

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 430 244**

51 Int. Cl.:

**G01T 1/169** (2006.01)

**G06F 19/00** (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.11.2010 E 10782596 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2013 EP 2504720**

54 Título: **Procedimiento de determinación de una magnitud operativa que permite una gestión simplificada y optimizada de muestras irradiadas en unas instalaciones y que garantiza el cumplimiento de los objetivos de seguridad**

30 Prioridad:

**24.11.2009 FR 0905639**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**19.11.2013**

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)  
25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"  
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**POIRSON, LAURENT**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 430 244 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de determinación de una magnitud operativa que permite una gestión simplificada y optimizada de muestras irradiadas en unas instalaciones y que garantiza el cumplimiento de los objetivos de seguridad

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de determinación de una magnitud operativa única ligada a una muestra irradiada, que es representativa de la exposición externa generada en todas las configuraciones de trabajo y de almacenamiento que se pueden encontrar en un laboratorio. Se aplica en particular al campo del dictamen pericial sobre materiales irradiados, en el marco de la utilización de plataformas de investigación diseñadas a este efecto, habitualmente designadas "laboratorios calientes". La invención también se puede aplicar a todos los tipos de instalaciones de irradiación experimentales o de investigación de la materia que utiliza radiaciones, así como a las instalaciones de producción de elementos radiactivos.

10 Un laboratorio caliente permite el análisis de muestras irradiadas, y permite recibir en sus instalaciones muestras irradiadas diversas, que pueden ser materiales activados, por ejemplo mediante flujos neutrónicos, protónicos o fotónicos, o también combustibles irradiados. Los análisis realizados sobre estas muestras irradiadas pueden, por ejemplo, estar constituidos por pruebas de fatiga, de corrosión, o incluso de caracterización de la resistencia mecánica, por ejemplo a la rotura, a la tracción estática o a la tracción dinámica.

15 La recepción de muestras irradiadas necesita la implementación de un método de gestión de las muestras, que debe garantizar el cumplimiento de los requisitos dosimétricos de seguridad para los cuales se han diseñado las instalaciones. Los métodos de gestión aplicados deben, además, buscar limitar los riesgos ligados a los factores humanos, en particular los errores de apreciación o los errores vinculados a la retranscripción de un número excesivamente elevado de valores que pueden causar un perjuicio para la salud de los operarios.

20 Se conoce el documento "ESRF procedures for experiments using radioactive samples on beamlines other than beamline BM20 (ROBL)", disponible en la dirección de Internet <http://www.esrf.eu/Infrastructure/Safety/Experiments/RadioactiveSamples/radioactive%20samples%20version%20C.pdf>.

25 Este documento representa un ejemplo típico de directivas, relativas a la gestión de muestras irradiadas, suministradas por un laboratorio de investigación, en línea con la ley relativa a la seguridad nuclear. En este documento se encuentran unas tablas de actividad máxima que no hay que superar para diferentes tipos de muestras (véanse, por ejemplo, las tablas 2, 3 y 4). También se encuentran unas fórmulas que representan una actividad equivalente "normalizada" que no hay que superar, en el caso de que la muestra esté formada por una mezcla de radionucleidos.

30 La gestión de las muestras en los laboratorios calientes se realiza habitualmente en función de una actividad calculada que se desarrolla, según los casos, en actividad total de radionucleidos emisores beta/gamma, actividad beta específica para las manipulaciones en cajas de guantes, actividad alfa, fluencia neutrónica. El cálculo de actividad se realiza por medio de códigos de cálculos de activación o de cálculos de productos de fisión y núcleos pesados, a partir de las características medias de los flujos de irradiación y de la composición isotópica de los materiales sometidos a la irradiación; integrando estos códigos de cálculo, por otra parte, unos módulos de cálculo de evolución con el fin de tener en cuenta el tiempo de enfriamiento mínimo esperado antes de la recepción. Sin embargo, estas magnitudes por sí solas no permiten prever la exposición externa generada en el puesto de trabajo de una unidad de trabajo. En efecto, para un mismo valor de actividad, la exposición externa generada en el puesto de trabajo depende de otros parámetros: el espectro de distribución de los radionucleidos en la muestra, la naturaleza y la geometría del material que constituye la muestra en virtud de los fenómenos de auto-atenuación, las características, en particular la naturaleza y el espesor de las protecciones biológicas de la unidad de trabajo. Es por lo que, como complemento de las actividades consideradas con anterioridad, es habitual definir unos espectros envolventes tipo, por el rasgo del material que constituye las muestras. Estos espectros tipo se supone que conducen a una actividad igual y para una configuración dada de unidad de trabajo, con una tasa de dosis, representativa de la exposición externa, más elevada. Ahora bien, estos espectros tipo, además de la complejidad inherente a la gestión de varios parámetros, como por ejemplo la lista de los elementos radiactivos admisibles y sus actividades máximas respectivas, y la necesidad para cualquier procedimiento de figurar en un sistema de referencia de seguridad, que requiere la aprobación de la autoridad de seguridad antes de que el procedimiento se pueda aplicar, reducen de forma considerable la lista de las muestras que se pueden recibir y por tanto el campo posible de estudio de las muestras irradiadas, aun cuando su recepción en las unidades de trabajo y de almacenamiento no comprometa los objetivos dosimétricos del laboratorio.

35 Hay que observar que determinados sistemas de referencia de seguridad prevén la posibilidad de requerir unas autorizaciones excepcionales para aquellas muestras que no figuran en el marco predefinido, no obstante estos requerimientos imponen unos plazos de tratamiento relativamente largos que no siempre son compatibles con la urgencia de determinados análisis sobre los materiales cuando a estos los demandan a su vez en el marco de estudios de seguridad en otras instalaciones. Esta limitación implícita del campo de funcionamiento permitido se debe a tres razones esenciales:

- 5 los rasgos de los materiales, como la matriz, los elementos aditivos, las impurezas que constituyen las muestras irradiadas son ilimitados, lo que confiere por tanto a las muestras irradiadas unos espectros de radionucleidos igualmente variados. Ahora bien, esta variabilidad de los espectros no se puede encuadrar en unos espectros envolventes tipo de la exposición externa en los puestos de trabajo sin fijar previamente los rasgos aceptables de los materiales que constituyen las muestras;
  - 10 los materiales estudiados encuentran su aplicación en diferentes instalaciones de irradiación, como ciclotrones, aceleradores de partículas, sincrotrones, reactores nucleares. Los materiales objeto de los estudios pueden, por lo tanto, haber sido irradiados mediante todo tipo de radiaciones, en particular de neutrones, protones, deutones, iones, fotones, con un rango de energía que no cesa de ampliarse. Ahora bien, las características particulares de las radiaciones producidas por estas instalaciones dirigen las posibles reacciones nucleares en el material sometido a la irradiación. De este modo, con independencia del rasgo del material, la variabilidad de las características de las radiaciones estudiadas en la investigación confiere a los materiales irradiados unos espectros de elementos radiactivos igualmente variados;
  - 15 si se ha podido determinar un espectro envolvente tipo para una unidad de trabajo dada, este espectro tipo no tiene necesariamente carácter de envolvente para una unidad de trabajo que tiene una protección biológica con un espesor diferente y menos aun cuando cambia la naturaleza del material biológico, pudiendo también la misma unidad de trabajo comprender unas protecciones biológicas de diferentes rasgos. En efecto, dejando aparte el espectro de los elementos radiactivos, la eficacia de una protección biológica, que está caracterizada por el factor de protección -una magnitud adimensional igual a la relación de atenuación de la tasa de dosis por la protección biológica- depende de su espesor y de la naturaleza de su material. Es por lo que, en el uso corriente, un laboratorio se ve obligado a realizar:
 
    - 20 o al comienzo de la puesta en servicio de una unidad de trabajo, unos controles exhaustivos de eficacia de los blindajes, en presencia de muestras patrón irradiadas representativas de los espectros tipo considerados envolventes;
    - 25 o durante su utilización, en la descarga de las muestras en una unidad de trabajo, un control sistemático de la tasa de dosis en cada puesto de trabajo con el fin de verificar que la exposición previsible del personal durante los análisis experimentales es compatible con los objetivos dosimétricos de seguridad. En caso contrario, en particular si se demuestra que las medidas complementarias de radioprotección son insuficientes, se puede abandonar el análisis experimental.
- 30 Esta limitación tiene repercusiones sobre el uso racional de las herramientas experimentales de cara a amortizar los costes de inversión, pero también priva al laboratorio de una ampliación de su campo de competencias a los nuevos materiales.
- Un objeto de la presente invención es resolver al menos los inconvenientes ya expuestos, proponiendo un procedimiento que permita gestionar de manera simple y segura unas muestras irradiadas cuya naturaleza y propiedades se desconocen a priori. El procedimiento según la presente invención se basa en la determinación de una magnitud operativa única, representativa del riesgo de exposición externa generado por una muestra irradiada, sea cual sea la unidad de trabajo o de almacenamiento destinada a recibirla. Esta magnitud operativa está vinculada a una muestra irradiada, y no impone ninguna restricción en cuanto a la naturaleza de las muestras que se pueden recibir. Además, esta magnitud operativa es aditiva, sean cuales sean el tipo y el número de muestras presentes en una misma unidad de trabajo o de almacenamiento, y de este modo permite una gestión simplificada y optimizada de los inventarios de muestras irradiadas presentes en las unidades o traspasadas entre unidades, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los objetivos de seguridad fijados en el diseño en términos de dosimetría del personal y de factor humano.
- 45 Una ventaja de la invención es que permite que un laboratorio que la implementa pueda ofrecer una mejor aceptabilidad de muestras irradiadas que presentan una gran diversidad, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento en todo momento de los objetivos dosimétricos y la simplicidad en la gestión de las muestras.
- Otra ventaja de la invención es que permite una utilización óptima de las unidades de trabajo al estimar de la forma más precisa posible la exposición externa generada por las muestras teniendo en cuenta las incertidumbres de las mediciones y al permitir rehacer, si fuera necesario, los balances de inventarios para tener en cuenta la atenuación.
- 50 Otra ventaja de la invención es que permite que un operario elija de forma fácil los envases de transporte más apropiados para el envío de las muestras tras examinarlas.
- Otra ventaja de la invención se basa en el hecho de que un procedimiento según la invención se puede adaptar fácilmente a diferentes laboratorios que incorporan diferentes tipos de instalaciones, ya que los pretratamientos necesarios no implican cálculos complejos.
- 55 Otra ventaja de la invención es que la implementación de un procedimiento según uno de los modos de realización de la presente invención se puede llevar a cabo mediante una interfaz informática que puede controlar un operario que no tenga conocimientos específicos en mediciones nucleares.

Para ello, la invención tiene por objeto un procedimiento para la determinación de una magnitud operativa que permite una gestión simplificada y optimizada de las muestras irradiadas presentes en las unidades de trabajo y de almacenamiento de un laboratorio garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los objetivos de seguridad en términos de dosimetría del personal y de factor humano.

5 El procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada manipulada en unas instalaciones que comprenden unos recintos de protección con al menos un espesor y una naturaleza determinados, se caracteriza porque comprende:

- una primera etapa de cálculos previos que establecen a partir de una primera biblioteca de elementos radiactivos, una segunda biblioteca y una tercera biblioteca de elementos radiactivos para los cuales la relación de las tasas de dosis calculadas respectivamente a través del espesor mínimo de protección y del espesor máximo de protección que presentan los blindajes de las unidades de trabajo de la instalación, es inferior a la del elemento radiactivo de referencia;
- una segunda etapa de cálculo de la fuente puntual que equivale a la muestra irradiada, que calcula las actividades en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la primera biblioteca detectados por una cadena de espectrometría gamma y unos límites de detección en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la segunda biblioteca no detectados por la cadena de espectrometría gamma, y que produce un archivo de fuente puntual que comprende los datos de las actividades en una fuente puntual de cada uno de los elementos radiactivos detectados y no detectados por la cadena de espectrometría gamma corregidas con un factor de corrección definido como la relación del valor de tasa de dosis declarada en una cámara de ionización y el valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente en base a las actividades en una fuente puntual calculadas ponderadas por la tabla de respuesta de la cámara de ionización y la tabla de conversión de tasa de dosis equivalente detrás del espesor reducido de protección del puesto de medición;
- una tercera etapa de cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia que pondera las actividades en una fuente puntual corregidas producidas en la segunda etapa por unos factores de conversión de tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo de protección para los elementos radiactivos de la tercera biblioteca y el espesor intermedio de protección para los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca y que ponderan el valor de tasa de dosis equivalente obtenida para los elementos radiactivos de la tercera biblioteca, por una parte, y, por otra parte, para los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca por la inversa del factor de conversión en tasa de dosis equivalente de protección para 1 Bq del elemento radiactivo de referencia respectivamente calculado detrás del espesor máximo y del espesor intermedio, siendo la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia igual a la suma de las actividades equivalentes calculadas de este modo respectivamente para los elementos radiactivos que pertenecen y que no pertenecen a la tercera biblioteca.

35 En un modo de realización de la invención, el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada, estando los recintos de protección constituidos por dos materiales diferentes A y B, cuyos espesores de blindaje mínimos y máximos son respectivamente  $E_{A_{\min}}$ ,  $E_{A_{\max}}$  y  $E_{B_{\min}}$ ,  $E_{B_{\max}}$ , se puede caracterizar porque las actividades equivalentes en elementos radiactivos de referencia  $A_{\text{equiv}/A}$  y  $A_{\text{equiv}/B}$  son calculados en la tercera etapa respectivamente para los materiales A y B a partir de bibliotecas relativas a cada uno de los materiales A y B, siendo la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia igual a la mayor de las actividades equivalentes  $A_{\text{equiv}/A}$  y  $A_{\text{equiv}/B}$ , seleccionándose el espesor reducido:

- más pequeño que el espesor mínimo de blindaje  $E_{A_{\min}}$  de material A y el espesor equivalente  $E_{A_{\text{equiv}}}E_{B_{\min}}$  de material A igual al espesor de material A que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo de referencia el mismo factor de protección que el espesor mínimo de blindaje de material B  $E_{B_{\min}}$ , si la cámara de ionización y la cadena de espectrometría gamma están situadas detrás de un espesor de blindaje de material A; o
- más pequeño que el espesor mínimo de blindaje  $E_{B_{\min}}$  de material B y el espesor equivalente  $E_{B_{\text{equiv}}}E_{A_{\min}}$  de material B igual al espesor de material B que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo de referencia el mismo factor de protección que el espesor mínimo de blindaje de un material A  $E_{A_{\min}}$ , si la cámara de ionización y la cadena de espectrometría gamma están situadas detrás de un espesor de blindaje de material B.

50 En un modo de realización de la invención, el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada se puede caracterizar porque las actividades en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la primera biblioteca detectados por una cadena de espectrometría gamma y los límites de detección en fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la segunda biblioteca no detectados por la cadena de espectrometría gamma son calculados a lo largo de la primera etapa, seguida de una etapa en la cual dichas actividades en una fuente puntual y dichos límites de detección son convertidos en fluencias fotónicas, por orden de energía, calculando una tercera etapa unas fluencias fotónicas corregidas mediante una ponderación de las fluencias fotónicas por unos coeficientes de respuesta de la cámara de ionización contenidas en la tabla de respuesta de la cámara de ionización, obteniéndose dichos valores reconstituidos de la tasa de dosis equivalente mediante una ponderación de dichas fluencias fotónicas por los factores de conversión en tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización comprendidos en la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente detrás del espesor reducido de protección del

puesto de medición.

5 En un modo de realización de la invención, el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada se puede caracterizar porque la tabla de respuesta de la cámara de ionización asigna a cada banda de energía dada  $[E_i, E_f]$  el coeficiente mínimo de respuesta visto en la curva de respuesta de la cámara de ionización y que corresponde al intervalo de energías  $[0, E_j]$ .

10 En un modo de realización de la invención, el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada se puede caracterizar porque el valor de tasa de dosis declarado en la cámara de ionización es igual al límite de detección  $L_{de}$  si la tasa de dosis medida por la cámara de ionización es inferior o igual a un umbral de decisión  $U_{de}$ , y es declarado igual al valor neto de tasa de dosis medido por la cámara de ionización incrementado con una incertidumbre  $\xi_{de}$  si la tasa de dosis medida por la cámara de ionización es superior al umbral de decisión  $U_{de}$ .

15 En un modo de realización de la invención, el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada en presencia de un ruido de fondo, se puede caracterizar porque dicho umbral de decisión  $U_{de}$  y dicho límite de detección  $L_{de}$  son dados por la relación:

$$U_{de} = \frac{2 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) \quad \text{y} \quad L_{de} = \frac{4 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) ,$$

en la que:

20 F designa el coeficiente de calibración de la cámara de ionización para el elemento radiactivo de referencia, expresado en Sv/Culombio;  
e designa la carga del electrón;  
t designa el tiempo de medición de la muestra irradiada;  
D<sub>0</sub> designa la dosis generada por el ruido de fondo durante el tiempo t, expresado en Sv.

25 Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de una muestra irradiada en presencia de un ruido de fondo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el umbral de decisión  $UD_{net}$  y límite de detección  $LD_{net}$  que se utilizan para el análisis de la sustracción pico por pico de los espectros adquiridos por la cadena de espectrometría gamma, en ausencia y en presencia de la muestra que hay que medir y que se expresan en número de fotones por segundo emitidos en la energía  $E_i$  que se han absorbido por completo en el detector por efecto fotoeléctrico y que provienen únicamente de la muestra, viene dados por la relación:

$$U_{Dnet} = K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left( \frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2} \right)}$$

y

$$LD_{net} = \frac{K^2}{t_m} + 2 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left( \frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2} \right)},$$

en las que:

35 K es el coeficiente de seguridad que corresponde a un error de primera y de segunda especie considerados ambos iguales;  
p'(a) es la superficie neta normalizada del pico de absorción total a la energía  $E_i$  del espectro de ruido de fondo determinado en ausencia de la muestra, integrada en la zona de interés  $[E_i - a, E_i + a]$ ;  
a define la zona de interés  $[E_i - a, E_i + a]$  de integración de la superficie del pico de absorción total;  
40 R es la resolución de la cadena de espectrometría en la energía  $E_i$  para el espectro adquirido en presencia de la muestra y corresponde a la anchura total a media altura medida en el pico neto de absorción total;  
R' es la resolución de la cadena de espectrometría en la energía  $E_i$  para el espectro del ruido de fondo y corresponde a la anchura total a media altura medida en el pico neto de absorción total;  
t<sub>m</sub> es el tiempo de adquisición del espectro en presencia de la muestra;

$t_0$  es el tiempo de adquisición del espectro del ruido de fondo;

B es el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E_i-a, E_i+a]$  del espectro adquirido en presencia de la muestra;

B' es el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E_i-a, E_i+a]$  del espectro del ruido de fondo.

- 5 La presente invención también tiene por objeto un dispositivo de medición de una muestra irradiada que comprende al menos una superficie de trabajo adaptada para recibir la muestra irradiada y que cubre un espesor de blindaje bajo el cual está dispuesto un cajón blindado caracterizado porque el cajón blindado comprende al menos una cámara de ionización y un detector de espectrometría gamma asociado a una cadena de espectrometría, y está dispuesto bajo el espesor de blindaje sustancialmente frente a la muestra irradiada, estando conectadas al menos la
- 10 cámara de ionización y la cadena de espectrometría a una unidad de tratamiento que implementa el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia determinado de la muestra irradiada según uno de los modos de realización de la invención.

Se mostrarán otras características y ventajas de la invención con la lectura de la descripción, que se da a título de ejemplo, realizada en relación a los dibujos adjuntos, que representan:

- 15 – la figura 1, una vista esquemática en sección que ilustra un dispositivo de medición dispuesto bajo la superficie de trabajo de una unidad de trabajo o de almacenamiento;
- la figura 2, un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de procedimiento de determinación de la magnitud característica del procedimiento, según un ejemplo de realización de la invención;
- 20 – la figura 3, un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de una etapa de cálculo de la fuente puntual que corresponde a una muestra irradiada, en un modo de realización de la invención;
- la figura 4, un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de una etapa de cálculo de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en un ejemplo de realización de la invención;
- la figura 5, un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de una etapa de cálculo de la fuente puntual representativa del límite de detección de actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en un ejemplo de realización de la
- 25 invención;
- la figura 6, un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de método de cálculo del límite de detección de actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en un ejemplo de realización de la invención.

La figura 1 presenta una vista esquemática en sección que ilustra un dispositivo de medición dispuesto bajo la superficie de trabajo de una unidad de trabajo o de almacenamiento, que permite la implementación de un

30 procedimiento según un modo de realización de la invención. De una manera práctica, el procedimiento se puede implementar, por ejemplo, en una unidad de tratamiento que puede estar interconectada con los elementos que constituyen el dispositivo de medición que se describe a continuación.

Una muestra irradiada 100 está dispuesta en la superficie de trabajo 101 de una unidad de trabajo cuyas caras frontal, trasera y superior no están representadas en la figura. La superficie de trabajo 101 cubre un espesor de

35 blindaje 102 que corresponde al blindaje inferior de la unidad de trabajo. De manera opcional, se puede colocar una placa de blindaje adicional 103 entre la muestra irradiada 100 y la superficie de trabajo 101. Un cajón blindado 110 en el cual está implantado un dispositivo de medición que se describirá en detalle a continuación, está situado bajo el espesor de blindaje 102. El ascenso, el descenso y la extracción del cajón blindado 110 para las operaciones de mantenimiento se pueden realizar, por ejemplo, por medio de una mesa elevadora 120 que se puede desplazar a

40 continuación por unos carriles de guiado 121. En este ejemplo de modo de realización, el dispositivo de medición implantado en el cajón blindado 110 comprende una cámara de ionización 111 y un detector de espectrometría gamma 112. Para los ajustes de puesta a punto, la posición del dispositivo de medición en el interior del cajón se puede ajustar en altura y en posición transversal por medio de un soporte fijado en el interior del cajón, que no está representado en la figura. Este soporte también permite orientar la parte activa del detector de espectrometría

45 gamma 112 hacia el punto de medición central señalado en la superficie de trabajo 101. Se puede realizar un alojamiento en la parte inferior del blindaje 102 cuyas dimensiones transversales deben permitir que se realice en el momento de los ajustes un ascenso parcial del dispositivo de medición dentro de este alojamiento. Las dimensiones transversales del alojamiento también deben ser suficientes para cubrir el tamaño de las muestras que se reciban. La altura del alojamiento está en función del espesor reducido de blindaje detrás del cual se deben realizar las

50 adquisiciones de mediciones del dispositivo de medición.

En aras de un aprovechamiento máximo de las unidades de trabajo y en particular de sus equipos científicos, la presente invención propone definir una magnitud operativa, que permite una estimación lo más ajustada posible a la exposición real que las muestras generan en el puesto de trabajo de las unidades de trabajo, teniendo en cuenta al mismo tiempo las estimaciones necesarias ligadas a la fluctuación estadística del fenómeno de radiactividad en

55 presencia. En efecto, en la práctica no se puede medir una magnitud física relativa a la radiactividad con un grado de certeza del 100 %, siendo la radiactividad un fenómeno aleatorio, para el cual solo es posible estimar estadísticamente las magnitudes físicas, con un riesgo de error dado aproximadamente. Para que la integración de estas estimaciones ligadas a la medición nuclear, que es necesaria para garantizar los objetivos de seguridad, no lleve a sobrestimar la magnitud operacional buscada, se correlacionan diferentes mediciones nucleares. La

60 complementariedad de los rendimientos de los aparatos de detección empleados: la cámara de ionización 111 y el detector de espectrometría gamma 112, se utiliza con este objetivo para la determinación de la magnitud operativa.

La magnitud operativa elaborada a partir de un puesto de medición y de un tratamiento apropiado que conjuga unas mediciones nucleares, por ejemplo por medio del detector de espectrometría gamma 112, y dosimétricas, por ejemplo por medio de la cámara de ionización 111, ofrece un equilibrio que responde a la necesidad de una utilización flexible, reactiva y al máximo de las capacidades de recepción, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento del requisito dosimétrico de seguridad y de radioprotección. Con respecto a los métodos conocidos del estado de la técnica descritos con anterioridad, basados en el cálculo previsto de actividades, una gestión basada en la magnitud operativa permite aumentar los límites de aceptabilidad, tradicionalmente de al menos un factor 10 para la mayoría de las muestras activadas, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los objetivos de dosis, incluso para las muestras no habituales, por ejemplo muestras que contienen una elevada actividad de elementos radiactivos emisores de rayos gamma cuya energía es superior a 1,33 MeV.

El procedimiento de determinación de la magnitud operativa, que implica el dispositivo de medición que comprende la cámara de ionización 111 y el detector de espectrometría gamma 112, permite una gestión simple y segura de las muestras irradiadas ya que la magnitud operativa única permite la caracterización de una muestra irradiada dada, allí donde se sitúe dentro del laboratorio. El valor de la magnitud operativa vinculada a una muestra es entonces directamente comparable a aquella vinculada a cualquier otra muestra.

La magnitud operativa que propone la presente invención es una actividad equivalente en un elemento radiactivo X determinado, seleccionado de preferencia entre los radionucleidos que tienen más posibilidades de estar presentes y de detectarse en espectrometría gamma. En efecto, aunque en teoría no haya ninguna restricción para la elección del elemento radiactivo de referencia X, el efecto Compton impone, con el objetivo de optimizar la estimación de la magnitud operativa, seleccionar como referencia un elemento radiactivo, aunque no esté presente en todas las muestras, entre aquellos que presentan unas rayas intensas de energías superiores o iguales a las del elemento radiactivo emisor gamma mayoritariamente presente. La elección definitiva del elemento radiactivo X de referencia se basa también en la verificación previa de que sus rayas de energías se encuentran en los intervalos de medición de los aparatos de detección 111, 112 del sistema de medición. También se pueden seleccionar estos aparatos con el fin de cumplir con este requisito.

La presente invención permite un cálculo preciso de la actividad equivalente en X de una muestra irradiada, que toma en consideración los rendimientos de los aparatos de medición 111, 112 utilizados y que da cuenta de la exposición externa generada.

En aras de la simplificación, la presente descripción se basa en la elección del  $^{60}\text{Co}$  como elemento radiactivo de referencia para cuantificar la exposición externa causada por las radiaciones gamma y por las radiaciones de frenado causadas por las radiaciones beta. Esta elección corresponde a un caso práctico habitual en el que la muestra irradiada 100 está mayoritariamente constituida por aceros ferríticos, siendo entonces el  $^{60}\text{Co}$  el producto de activación mayoritario, y se basa también en el hecho de que el  $^{60}\text{Co}$  presenta dos rayas intensas de energía fácilmente detectables en espectrometría gamma, incluido detrás de los espesores de blindaje presentes entre la muestra irradiada 100 y los dispositivos de medición 111, 112 con el objetivo de evitar la saturación de estos últimos cuando la muestra irradiada 100 es muy radiactiva. Igualmente, en el ejemplo que se desarrolla en la siguiente descripción, la placa de blindaje adicional 103, el cajón blindado 110 y el espesor de blindaje 102 son de plomo. La superficie de trabajo 101 puede ser de acero inoxidable. Estas configuraciones se describen a título de ejemplos especialmente adaptados para los usos tradicionales, pero se sobreentiende que se pueden considerar otros elementos radiactivos de referencia, así como otros tipos de instalaciones en particular en términos de naturaleza del material de blindaje, que puede ser diferente de una unidad de trabajo a otra dentro de la misma instalación.

El espesor de blindaje 102 presente entre los aparatos de medición 111, 112 y la muestra irradiada 100 es como mucho igual al espesor mínimo de pared de blindaje de las unidades de trabajo de la instalación, es decir el espesor de blindaje más pequeño de la unidad de trabajo menos protegida. El espesor máximo, por su parte, se designa por el espesor máximo de blindaje que se encuentra en la unidad de trabajo más protegida teniendo en cuenta eventualmente el espesor de blindaje de los almacenes presentes en esta unidad de trabajo. El espesor 102 se designa de aquí en adelante como espesor reducido del puesto de medición. El espesor reducido se fija en función del rango de actividad esperado de las muestras con el fin de no saturar los aparatos de medición, en particular el detector de espectrometría 112. De este modo, para un rango alto de actividad, el espesor reducido buscado es al menos igual al espesor mínimo de protección biológica de las unidades de trabajo, mientras que para un rango más bajo, y en particular si las muestras tienen una muy baja actividad, es preferible reducir el espesor reducido, con el fin de no asignar a dichas muestras una actividad mayor de la que estas tienen en realidad. En el caso de que se desee cubrir un rango muy amplio, es preferible reducir más el espesor reducido y utilizar la placa de blindaje adicional 103. La única condición es que el espesor reducido añadido del espesor de la placa de blindaje adicional 103 sea en total lo más parecido al espesor mínimo de las paredes de blindaje de las unidades de trabajo. Es, además, necesario ofrecer al sistema la posibilidad de tratar estas dos configuraciones de medición a elección del operario, por ejemplo a través de un programa informático de interfaz, o bien de manera automática.

Los criterios de tasa de dosis aceptables en la cara frontal siendo en general del orden de unas decenas de  $\mu\text{Sv/h}$ , el espesor reducido debe ser inferior al espesor mínimo de las paredes de las unidades de trabajo. De este modo, a partir del conocimiento del término fuente que se ha tenido en cuenta durante el diseño para el dimensionamiento de las unidades de trabajo, se puede determinar el espesor reducido que mejor se adapta para los aparatos de

detección 111, 112 por medio de cálculos o bien de ensayos experimentales.

La cámara de ionización 111 puede estar conectada a un electrómetro. Esta presenta la ventaja de ser fiable y robusta. Se puede por ejemplo seleccionar la cámara de ionización 111 de conformidad con la norma europea EN 60731. Esto permite, por una parte, no tener en cuenta la corriente de fuga en las expresiones matemáticas del umbral de decisión y del límite de detección de la cámara de ionización 111 y, por otra parte, ofrecer una dispersión de las respuestas limitada a  $\pm 10\%$  para un ángulo de incidencia de la radiación comprendido entre  $\pm 20^\circ$  con respecto al eje perpendicular al eje de simetría de la cámara de ionización 111 y, por lo tanto, limitar la influencia del ángulo del que proviene la radiación. Se puede prever de manera ventajosa que se pueda regular en altura la posición de la cámara de ionización 111, con el fin de garantizar este ángulo de incidencia para la medición, lo que permite no imponer un sentido preferente para la ubicación de muestras de forma alargada.

La optimización más precisa posible del valor de la magnitud operativa vinculada a la muestra 100 impone la elección de una cámara de ionización cuya respuesta se debe calibrar para el elemento radiactivo de referencia seleccionado y que tiene en una situación ideal una curva de respuesta lo más plana posible en el rango de energía de 0 a 4 MeV. Aunque se tengan en cuenta los valores de respuesta de la cámara de ionización 111 en función de la energía en el método de elaboración de la magnitud operativa, es preferible para optimizar el valor de la magnitud operativa, que la curva de respuesta en energía no fluctúe en más de un 10 % en torno al valor medio de 1.

El detector de espectrometría gamma 112 puede ser del tipo CdZnTe que forma con un preamplificador conectado a un analizador multicanal y los dispositivos de tratamiento asociados, que comprenden en particular un programa informático de tratamiento espectral, no representados en la figura, una cadena de espectrometría gamma. El detector de espectrometría gamma 112 puede, por ejemplo, tener una forma hemisférica con el fin de ofrecer un ángulo de detección más amplio que un detector plano, permitiendo de este modo acercar más el detector de espectrometría gamma 112 al espesor reducido de blindaje 102 conservando al mismo tiempo una superficie aparente de detección de las muestras dimensionada al tamaño del alojamiento y de este modo permitir una elección más amplia del rango de medición. De manera ventajosa, se puede situar el preamplificador a  $90^\circ$  del detector de espectrometría gamma 112, permitiendo de este modo situar el conjunto detector de espectrometría gamma 112 / preamplificador en paralelo a la cámara de ionización 111 con el fin de que el detector de espectrometría gamma 112 pueda apuntar al punto de medición.

Para la seguridad, solo importa la búsqueda de los elementos radiactivos que son más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, el  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo de la descripción, es decir los elementos radiactivos para los cuales un espesor de blindaje dado sería menos protector que si esta fuente estuviera constituida, con una actividad igual, por  $^{60}\text{Co}$ . También, para estos elementos radiactivos, la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  hay que calcularla por tanto detrás del espesor máximo de blindaje que se puede encontrar entre las muestras y el operario. Al tener esta última en cuenta eventuales almacenes, se puede definir de manera ventajosa, en este caso, una actividad máxima equivalente por almacén con el fin de descubrir el límite máximo de actividad equivalente que se puede recibir en la unidad de trabajo concernida. Para todos los demás elementos radiactivos, es decir, para los elementos radiactivos menos perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$ , es importante para la seguridad que el cálculo final de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  se realice para un espesor comprendido entre el espesor reducido del puesto de medición y el espesor mínimo. El uso del detector de espectrometría gamma 112 como complemento de la cámara de ionización 111 que mide una tasa de dosis equivalente tiene, por lo tanto, como objetivo principal buscar en la muestra irradiada 100 los elementos radiactivos clasificados como más perjudiciales que  $^{60}\text{Co}$  y cuantificar sus contribuciones a los valores de tasa de dosis equivalente. Ahora bien, el espesor de plomo detrás del cual se realizan las mediciones tiene como consecuencia degradar las rayas de energías emitidas por los elementos radiactivos contenidos en la muestra irradiada 100. Esta degradación del espectro, resultado de la interacción de las radiaciones con la materia está causada:

- por el efecto fotoeléctrico en el plomo que se traduce en la absorción total de la energía de una parte de las rayas emitidas por los elementos radiactivos contenidos en la muestra;
- por el efecto de Compton que « transforma » las rayas de energías emitidas por la muestra en un *continuum* de emisiones gamma de bajas energías, o “frente Compton”;
- por el efecto de par que se produce para las energías de radiación gamma superiores a 1 MeV, y que se traduce en la creación de un electrón y de un positrón.

Hay que señalar que por los efectos mencionados, el espectro obtenido por el detector de espectrometría gamma 112 debe presentar un gran frente Compton que oculta las rayas características de bajas energías de los elementos radiactivos contenidos en la muestra. Como consecuencia, solamente las rayas de energías superiores y con una intensidad suficiente tienen posibilidades de poder cuantificarse. No resulta, por lo tanto, útil que el programa informático de espectrometría gamma trate las bajas energías. De una manera clásica, con unas fuentes de  $^{60}\text{Co}$ , el efecto Compton en el plomo es en efecto excesivamente alto para unas energías inferiores a 700 KeV como para que sea posible distinguir una raya característica. En cualquier caso, este valor umbral no tiene una gran influencia en los resultados del método de cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo  $^{60}\text{Co}$  como el que propone la presente invención, ya que únicamente importan las mediciones espectrométricas de las energías al menos superiores a 1,17 MeV, que corresponden a la energía mínima de las rayas del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ . En efecto, las energías inferiores las tiene en cuenta la cámara de ionización 111.



La figura 2 presenta un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de procedimiento de determinación de la magnitud característica del procedimiento, según un ejemplo de realización de la invención.

En el ejemplo que se ilustra en la figura 2, los blindajes de todas las unidades de trabajo están constituidos por el mismo material.

5 Hay que señalar que de aquí en adelante todos los cálculos que se presentan se pueden aplicar en una unidad específica de tratamiento, por ejemplo, por medio de una programación adecuada del programa de utilización de esta última. De la misma forma, las diferentes bibliotecas, tablas de conversión, y de una manera general todos los datos necesarios para el tratamiento, se pueden almacenar en una memoria de la unidad de tratamiento, o bien en un dispositivo externo de almacenamiento de datos.

10 Un procedimiento de cálculo de una magnitud característica según un modo de realización de la presente invención puede comprender 3 etapas: una etapa de cálculos previos 201, una etapa de cálculo de la fuente puntual 202 y una etapa de cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X 203.

15 En la etapa de cálculos previos 201, con el objetivo de buscar en la muestra irradiada 100, en referencia a la figura 1, los elementos radiactivos clasificados como más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$  por medio de la cadena de espectrometría gamma, es necesario establecer de forma previa la lista de los elementos radiactivos potencialmente más perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$ .

20 Hay que señalar, sin embargo, que una búsqueda infructuosa de dichos elementos radiactivos en la muestra irradiada 100 no puede llevar a la conclusión de una ausencia de estos elementos radiactivos en la muestra irradiada 100: es, por lo tanto, necesario tomar en consideración los límites de detección de estos elementos radiactivos.

25 Para establecer la lista de los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ , es necesario, en una primera fase, llevar a cabo una selección en una biblioteca exhaustiva de todos los elementos radiactivos existentes, mediante una selección de aquellos que presentan al menos una raya de energía superior a 1,17 MeV, que corresponde a la raya de energía más débil del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ . Por supuesto, la exhaustividad de la biblioteca de trabajo depende de los modos de producción de los elementos radiactivos y, por lo tanto, de los tipos de instalaciones que pueden haber generado las muestras irradiadas.

30 A partir de esta lista, hay que realizar unos cálculos de tasa de dosis equivalente: por una parte, para el espesor de la unidad de trabajo menos protegida, es decir el espesor mínimo de blindaje y, por otra parte, para el espesor máximo de blindaje, es decir el espesor máximo de protección biológica que puede estar presente entre la muestra irradiada 100, eventualmente situada en un almacén, y el operario situado en la cara frontal de cualquier unidad de trabajo. Estos cálculos tienen como objetivo determinar para cada uno de los elementos radiactivos, el factor de protección aportado por la distancia entre los extremos del espesor de blindaje de plomo que se puede encontrar en la operación. El factor de protección se define como la relación de las tasas de dosis calculadas con respectivamente los espesores mínimo y máximo de blindaje.

35 Los cálculos se realizan con una modelización simple en una fuente puntual del elemento radiactivo considerado de la lista ya mencionada, con una pantalla plana infinita y unas distancias fuente-pantalla, pantalla-punto de cálculo, y actividad de la fuente de libre elección, pero fijas de forma definitiva para todos los cálculos. Es importante conservar la misma modelización geométrica para todos los cálculos. Todos los elementos radiactivos cuyo factor de protección es inferior al de  $^{60}\text{Co}$  se clasifican por tanto como más perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$ .

40 Una vez realizada esta clasificación de los elementos radiactivos, es entonces posible, en un modo de realización de la invención, diferenciarlos según sus instalaciones de producción de origen, por ejemplo diferenciar aquellos que pueden estar presentes en un combustible irradiado de aquellos que pueden estar presentes en un material activado distinto del combustible. En efecto, en un combustible irradiado, los elementos radiactivos se producen por fisión o por captura neutrónica, mientras que para los demás materiales, proceden de la activación neutrónica, fotónica, protónica o iónica. Según el modo de formación considerado, algunos elementos radiactivos estarán presentes o ausentes en la muestra irradiada 100. Se puede entonces constituir una biblioteca de los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$  para cada uno de los casos en los que el origen de las muestras permite diferenciar estas bibliotecas. En el ejemplo que se ofrece en la presente invención, esta distinción se limita a los casos de los combustibles irradiados, por una parte, y de los materiales activados por activación neutrónica, fotónica, protónica o iónica, por otra parte.

45 En el caso en el que la muestra irradiada 100 es un trozo de barra de combustible que comprende un combustible irradiado y una vaina activada, resulta ventajoso elegir realizar una biblioteca adicional que tenga en cuenta la presencia simultánea en la muestra de combustible irradiado y de materiales activados.

50 Así pues hay que señalar que para optimizar el valor de la magnitud operativa de una muestra activada, las bibliotecas se pueden diferenciar en función del tipo de instalación de origen de los elementos radiactivos presentes en una muestra, reduciendo de este modo el número de elementos radiactivos que figuran en cada biblioteca. Sin embargo, puede resultar igualmente ventajoso disponer de una biblioteca más general que permita tratar cualquier

muestra activada sin tener que conocer el tipo de instalación que originó su activación.

La no-detección por la cadena de espectrometría gamma de la presencia de los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ , no puede llevar a la conclusión de la ausencia de estos elementos radiactivos en la muestra irradiada 100. Esta detección está en efecto ligada a los rendimientos de la cadena de espectrometría gamma, al ruido ambiental de fondo, pero también a las condiciones de las mediciones y a la naturaleza del fenómeno físico medido, de carácter aleatorio. Con el fin de tomar en consideración esta no-detección, es necesario partir de la hipótesis de la presencia de estos elementos radiactivos no identificados, y asignarles un límite de detección, que corresponde a la actividad mínima detectable. Este límite de detección se determina de forma tradicional en base a un índice de confianza, por ejemplo de un valor típico del 97,5 %.

Para el cálculo de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , también es necesario tener en cuenta los rendimientos de la cámara de ionización 111, que mide la tasa de dosis equivalente. Estos rendimientos se tienen en cuenta en la etapa de cálculo de la fuente puntual 202, a través del límite de detección cuando la medición meta de tasa de dosis equivalente, es decir la diferencia de los valores de tasa de dosis equivalente medidos por el puesto de medición respectivamente en presencia y en ausencia de la muestra es inferior al umbral de decisión, así como a través de la curva de respuesta en energía de la cámara de ionización 111, de una manera similar a la curva de eficacia del detector de espectrometría gama 112.

La curva de respuesta de la cámara de ionización 111 tiene en cuenta o bien la pérdida real de representatividad de la medición, o bien la pérdida supuesta total cuando no se conoce la curva de respuesta más allá de una determinada energía. De este modo se utiliza esta curva de respuesta para correlacionar las actividades de la fuente puntual inicialmente derivadas de los resultados de tratamiento de la cadena de espectrometría gamma, con el valor de tasa de dosis mostrada por la cámara de ionización 111 teniendo en cuenta los rendimientos esperados de esta última en el peor de los casos. Hay que señalar que estos rendimientos considerados como el peor de los casos garantizan el carácter conservador de la corrección aportada a la fuente puntual y, por tanto, de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ .

El método de cálculo de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  propuesta por la presente invención se basa en una clasificación selectiva entre los elementos radiactivos clasificados como más o menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ , según su eficacia biológica para atravesar el plomo.

Hay que señalar que también se puede considerar establecer el método de cálculo basándose únicamente en la selección por fluencia energética de todos los elementos radiactivos potencialmente emisores de rayas de energías superiores a 1,17 MeV; sin embargo, en este caso, el número elevado de rayas conduce, en caso de no-detección, a tener en cuenta un número mayor de límites de detección, y por tanto a aumentar más la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  asignada a cada muestra, sin que esto esté justificado.

También es necesario, de forma previa a la etapa de cálculo de la fuente puntual 202 y de la etapa de cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia 203, constituir una multitud de bibliotecas de elementos radiactivos. El tipo de muestra irradiada: combustible irradiado u otro material irradiado, se puede especificar de manera ventajosa como se ha mencionado con anterioridad. El tipo de muestra lo puede identificar por tanto el programa informático, por ejemplo por medio de un registro por el operario. A un tipo dado de muestras, se le pueden asociar entonces tres bibliotecas:

- una primera biblioteca, que es una biblioteca exhaustiva de elementos radiactivos potenciales, utilizada por el programa informático de tratamiento del espectro adquirido por la cadena de espectrometría gamma, con el fin de identificar los elementos radiactivos que originan los picos de absorción total que aparecen en el espectro. La primera biblioteca contiene necesariamente los elementos radiactivos de la segunda biblioteca que se describe a continuación:
- una segunda biblioteca que se utiliza para el cálculo de la fuente puntual que se describe más adelante en referencia a la figura 3, y que contiene:
  - los elementos radiactivos que tienen al menos una raya de energía superior a 1,33 MeV, con el fin de corregir la pérdida considerada total de respuesta de la cámara de ionización 111 seleccionada; esta corrección es, en el ejemplo de la descripción, necesaria ya que no se conoce la curva de respuesta de la cámara de ionización 111 más allá de 1,33 MeV; igualmente, por defecto, esta respuesta se considera nula. Esta lista es opcional si se conoce la curva de respuesta de la cámara de ionización en el intervalo de 0 a 4 MeV;
  - los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ , con el fin de tener en cuenta los límites de rendimientos del puesto de espectrometría gamma a través de los límites de detección;
- una tercera biblioteca utilizada específicamente en la etapa de cálculo de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  que se describe más adelante en referencia a la figura 4, y que únicamente contiene los elementos radiactivos identificados como más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ .

Hay que señalar que en caso de que se conozca la respuesta de la cámara de ionización en el rango de energías

que se extiende de 0 a 4 MeV, la segunda y la tercera bibliotecas se confunden.

De aquí en adelante, una muestra de tipo combustible irradiado se denomina de "tipo 1", y una muestra de cualquier otro tipo se denomina de "tipo 2". Se designan entonces B1-0, B1-1 y B1-2 respectivamente a la primera, la segunda y la tercera bibliotecas que corresponden a una muestra de tipo 1, y B2-0, B2-1 y B2-2 respectivamente a la primera, la segunda y la tercera bibliotecas que corresponden a una muestra de tipo 2.

Si se tienen en cuenta los dos tipos de muestras 1 y 2, se constituyen seis bibliotecas en total una única vez para todas, con independencia de la medición de las muestras irradiadas.

De manera ventajosa, para un uso óptimo que solo responde a las necesidades del sistema de medición, se pueden afinar los datos nucleares pertinentes que deben contener estas bibliotecas. En efecto, al no realizarse el tratamiento del espectro sobre las bajas energías, resulta por ejemplo inútil hacer una adquisición en las bajas energías, que por otra parte degrada la resolución en energía. Igualmente, el método de búsqueda de los elementos radiactivos que pueden originar las rayas que aparecen en el espectro, se puede basar de manera preferente en las rayas características que tienen las energías y las intensidades más elevadas. En la práctica, hay que ofrecer todas las posibilidades para que se detecten los elementos radiactivos que constituyen las diferentes bibliotecas. Para ello, las características de los elementos radiactivos constitutivos de las diferentes bibliotecas utilizadas se pueden elaborar de manera ventajosa sobre las siguientes bases:

- únicamente se pueden considerar los elementos radiactivos con un periodo radiactivo superior a un periodo determinado, por ejemplo de 10 días, teniendo en cuenta unos tiempos de enfriamiento constatados entre el final de las irradiaciones y la recepción del material en el laboratorio objeto de la aplicación citado como ejemplo. En efecto, se considera que más allá de un tiempo de enfriamiento que corresponde a 10 periodos reactivos, los elementos radiactivos concernidos han desaparecido; y/o
- se pueden suprimir los elementos radiactivos emisores beta puros, cuyos productos de filiación no son emisores gamma; y/o
- se les pueden asignar unas rayas características de estos emisores gamma a los elementos radiactivos emisores beta puros de los cuales uno al menos de los productos de filiación es emisor gamma con un periodo radiactivo inferior o igual al periodo determinado mencionado con anterioridad, por ejemplo de 10 días, teniendo en cuenta su relación de producción y de transmisión para el cálculo de intensidad que se refiere al elemento radiactivo emisor beta puro considerado; y/o
- se pueden suprimir todas las rayas gamma de energía inferior a 700 KeV, siendo este valor umbral el resultado de la elección del elemento radiactivo de referencia dado en este ejemplo, es decir el  $^{60}\text{Co}$ , y de la naturaleza del material que constituye la protección biológica dada en este ejemplo, es decir el plomo, desde el momento en que persiste, tras esta operación, al menos una raya de energía superior a 700 KeV en el elemento radiactivo considerado; y/o
- se pueden sustituir los paquetes de rayas cuya energía está muy próxima y comprendida en un intervalo igual a la resolución de la cadena de espectrometría gamma por una raya única a la cual se le asigna la energía de la raya más intensa del paquete, y la intensidad total del paquete considerado; y /o
- se pueden suprimir todas las rayas con una intensidad, incluidas las que son el resultado de la operación ya mencionada llegado el caso, por ejemplo inferiores o iguales a un 5 %, desde el momento en que persiste, tras esta operación, al menos una raya con una intensidad superior al 5 %, y desde el momento en que no existe otro elemento radiactivo de la lista que presenta las mismas rayas de energía. En efecto, dos elementos radiactivos pueden presentar las mismas rayas de energía, incluso con unas intensidades idénticas, pero es necesario que se puedan diferenciar por al menos una raya de energía, ya que en caso de un bajo recuento, el programa informático de espectrometría gamma no puede diferenciarlos mediante la estimación de su periodo radiactivo.

El formalismo de los datos nucleares que figuran en las bibliotecas viene impuesto por el programa informático de espectrometría utilizado. Se puede emplear, por ejemplo, el formalismo típico siguiente: una línea que precisa el nombre del elemento radiactivo, seguido de su periodo radiactivo, del número total de rayas de energía, una línea que precisa la energía de la primera raya, en orden creciente, seguida de su intensidad y así sucesivamente hasta la última raya. El elemento radiactivo siguiente se separa, por ejemplo, del anterior mediante un carácter especial de tipo salto de línea.

La etapa de cálculo de la fuente puntual 202 que equivale a la muestra medida se describe a continuación en detalle en referencia a la figura 3. El cálculo de la fuente puntual toma en consideración los límites de rendimientos de los aparatos de medición 111, 112 en referencia a la figura 1. Estos límites de funcionamiento se tienen en cuenta, en particular, a través de los límites de detección de los elementos radiactivos no detectados y de la curva de respuesta de la cámara de ionización 111.

La etapa 203 de cálculo de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en el ejemplo de la presente invención, se describe más adelante de manera detallada en referencia a la figura 4. A partir de la fuente puntual así determinada al finalizar la etapa de cálculo 202, se realizan dos cálculos de equivalencia en  $^{60}\text{Co}$ : un primer cálculo para los elementos radiactivos más perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$ , detrás del espesor máximo de protección biológica, y un segundo cálculo para los demás elementos radiactivos, detrás de un espesor seleccionado entre el espesor reducido del puesto de

medición y el espesor mínimo de protección biológica. La actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  de la muestra es por tanto igual a la suma de las actividades equivalentes calculadas respectivamente para los elementos radiactivos más perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$  y los elementos radiactivos menos perjudiciales que el  $^{60}\text{Co}$ .

5 La figura 3 presenta un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de la etapa de cálculo de la fuente puntual que corresponde a una muestra irradiada, en un modo de realización de la invención.

En el ejemplo de realización que se ilustra en la figura 3, el cálculo de la fuente puntual 202, en referencia a la figura 2, se puede descomponer en seis etapas 301 a 306 que se describen a continuación de forma detallada.

10 La primera etapa 301 permite el cálculo de las actividades en una fuente puntual de los elementos radiactivos identificados y no identificados por la cadena de espectrometría gamma. A la primera etapa 301 le sigue una multitud de etapas 302 a 305 que conducen al cálculo del factor de corrección que hay que aplicar en una sexta etapa 306 a las actividades de la fuente puntual determinadas en la primera etapa 301. El factor de corrección permite correlacionar los resultados de mediciones procedentes de la cadena de espectrometría gamma, tras tener en cuenta su curva de eficacia global, con los resultados mostrados por la cámara de ionización teniendo en cuenta su curva de respuesta. Esta corrección permite por tanto verificar las actividades de la fuente puntual inicialmente procedentes de los resultados de tratamiento de la cadena de espectrometría gamma, de tal modo que la exposición así generada por la fuente puntual corregida y supuestamente mostrada en la cámara de ionización 111, es decir el valor reconstituido de la tasa de dosis que mediría la cámara de ionización que tiene en cuenta los rendimientos considerados como los peores, sea igual al valor neto mostrado por la cámara de ionización 111 al finalizar las mediciones. El factor de corrección tiene, por lo tanto, por objeto ofrecer una realidad física, en cuanto a sus efectos en términos de exposición externa, a la fuente puntual como se ha definido, en particular porque esta contabiliza los límites de detección. El factor de corrección, que pondera de manera global las actividades inicialmente determinadas para la fuente puntual, permite conservar el peso importante voluntariamente acordado a los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, en la fuente puntual que representa la muestra. Igualmente, para tener en cuenta el caso particular en el que no se conoce la curva de respuesta de la cámara de ionización más allá de un valor umbral de energía, siendo necesariamente el valor umbral superior o igual a las energías de las rayas del elemento radiactivo de referencia seleccionado, se puede no contabilizar de manera ventajosa en el cálculo del factor de corrección, y de manera más precisa en el cálculo del valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente que mediría la cámara de ionización 111, la contribución aportada por los elementos radiactivos menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia que tienen al menos una raya con una energía superior a dicho valor umbral y que no se han identificado.

15 La primera etapa 301 diferencia los elementos radiactivos procedentes de la primera biblioteca, es decir la biblioteca B1-0 o B2-0 según el tipo de muestra irradiada considerada, de los procedentes de la segunda biblioteca B1-1 o B2-1. De una manera tradicional, un programa informático de tratamiento de espectrometría gamma dispone de dos espectros: el espectro de ruido de fondo adquirido de forma previa en el cual ya se ha realizado un tratamiento, y el espectro en presencia de la muestra situada en el puesto de medición cuya adquisición acaba de terminar. El tratamiento separado de los espectros permite identificar los picos de absorción total, calcular sus áreas bruta y neta así como su área del fondo continuo, el umbral de decisión vinculado a un pico y el límite de detección. Este identifica los picos detectados que corresponden a las energías de las rayas de los elementos radiactivos que pertenecen a la primera biblioteca B1-0 o B2-0. En el tratamiento del espectro adquirido en presencia de la muestra, el programa informático de tratamiento de espectrometría gamma lleva a cabo para los elementos radiactivos detectados una sustracción pico por pico del ruido de fondo y realiza en una primera subetapa 3011 un cálculo de las actividades en una fuente puntual según unas técnicas conocidas en sí mismas que se basan, en particular, en el establecimiento previo de la curva de eficacia global de la cadena de espectrometría gamma en las condiciones de medición del puesto de medición.

20 Para los elementos radiactivos no detectados en el espectro de la muestra, el programa informático de tratamiento de espectrometría gamma realiza un cálculo de límites de detección en una segunda subetapa 3012, en base al análisis del único espectro adquirido en presencia de la muestra. Ahora bien, los métodos de cálculo habituales del umbral de decisión y del límite de detección utilizados para el tratamiento de un espectro único no son representativos de la sustracción de dos espectros. Igualmente, se proponen unos métodos de cálculo del umbral de decisión y del límite de detección que se deben aplicar a los resultados procedentes de la sustracción del ruido de fondo. Hay que señalar que las expresiones se pueden reformular de tal modo que se reutilicen los valores de umbral de decisión y de límite de detección suministradas por el programa informático de espectrometría gamma en los tratamientos separados de cada espectro.

25 Para calcular las actividades en una fuente puntual es necesario establecer de forma previa la curva de eficacia global de la cadena de espectrometría gamma. La eficacia global en la energía  $E_i$  se define como la relación del número total de eventos contabilizados en el pico de absorción total en la energía  $E_i$  del detector de espectrometría gamma y el número de fotones emitidos en la energía  $E_i$  durante el mismo tiempo de medición por una fuente puntual que estaría situada en el lugar de la muestra. Esta eficacia tiene, por lo tanto, en cuenta la geometría del puesto de medición, como las diferentes pantallas presentes entre la muestra que hay que medir y el detector de espectrometría gamma. En paralelo, para los elementos radiactivos que pertenecen a la segunda biblioteca B1-1 o B2-1 que no los detecta la cadena de espectrometría gamma, partiendo de la hipótesis de que estos elementos

radiactivos están en efecto presentes en las muestra irradiada, se realiza un cálculo de los límites de detección en una fuente puntual en la segunda etapa 3012 según los métodos de cálculo que se describen a continuación. De este modo, se determinan las actividades en una fuente puntual de todos los elementos radiactivos, los detecte o no la cadena de espectrometría gamma, al final de una tercera subetapa 3013 de la primera etapa 301.

5 Se recuerda en primer lugar que los eventos que son resultado de la interacción fotoeléctrica de la radiación gamma incidente con el material del detector dan lugar a un impulso cuya altura es proporcional a la energía incidente de esta radiación. De una manera tradicional, una escala de recuento multicanal recupera este impulso y lo contabiliza, o lo almacena, en un canal, con un intervalo de valor determinado, siendo el valor contabilizado proporcional a la altura del impulso y, por lo tanto, proporcional a la energía de la radiación incidente sobre el detector que ha dado lugar al evento. Tras un tiempo de medición dado, la escala de recuento multicanal permite contabilizar en cada canal el número de eventos que han tenido lugar. Una calibración previa en energía de la cadena de espectrometría gamma permite hacer la correspondencia entre cada canal y la energía de la radiación incidente sobre el detector. La representación del número de eventos adquiridos durante un tiempo de medición dado en función del número de canal o de la escala de las energías se designa "espectro". El número de canales y el paso del canal determinan el intervalo de energía de la adquisición del espectro. A continuación se trata el espectro con el programa informático de la cadena de espectrometría gamma según unas técnicas conocidas con el fin de identificar en este los picos que corresponden a una absorción total en el detector de la energía de las rayas características emitidas por los elementos radiactivos potenciales de la muestra que hay que medir. Cuando se identifican estos picos, el programa informático de tratamiento integra el número de eventos contabilizados por la escala de recuento multicanal en los canales de la zona de interés del pico identificado. Al poder realizar el tratamiento de un espectro realizado por los programas informáticos de espectrometría gamma según unas técnicas conocidas en sí mismas, se presenta de forma sucinta a continuación un ejemplo de modo de tratamiento de espectro que permite definir determinadas magnitudes utilizadas en mediciones por espectrometría gamma, como la zona de interés del pico, el umbral de decisión y el límite de detección.

25 Un espectro gamma de medición de una muestra se presenta en forma de un fondo continuo que decrece con la energía, sobre el cual se superponen los picos de absorción total. El fondo continuo es representativo de las interacciones por efecto Compton de las radiaciones gamma emitidas por la muestra irradiada con los materiales estructurales que rodean al detector, en particular las pantallas interpuestas entre la muestra y el detector, o con el propio material del detector. A estos fenómenos también se añaden las interacciones de las radiaciones de orígenes telúrico y cósmico, y de las radiaciones parásitas exteriores a la medición que provienen, por ejemplo, de la presencia de un almacén de depósito de muestras. Estas interacciones se miden por tanto en ausencia de la muestra irradiada, a través de la adquisición del espectro de ruido de fondo. La adquisición del espectro de ruido de fondo se realiza entonces al mismo tiempo que la medición por la cámara de ionización de la tasa de dosis equivalente generada por el ruido de fondo. Tal y como se describe a continuación, este último valor se utiliza en la etapa 202 en referencia a la figura 2.

La aparición de los picos de absorción total depende entonces de la intensidad de los rayos gamma emitidos y de las fluctuaciones estadísticas de recuento en cada uno de los canales de la zona de interés del pico. Con el objetivo de minimizar estas fluctuaciones, es conveniente seleccionar la zona de interés que optimiza la relación entre señal y ruido.

40 La señal está representa por el área neta del pico de absorción total integrada en una zona de interés (E-a, E+a).

Si se supone que el pico de absorción se puede describir mediante una curva de Gauss y que el fondo continuo se puede considerar como constante en un intervalo restringido, la relación entre señal y ruido se expresa de la siguiente forma:

$$R = \frac{\int_{E-a}^{E+a} A \cdot e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx}{2 \cdot a \cdot B} \quad (1),$$

45 en la que:

- E designa la energía central del pico de absorción total;
- a define los límites de la zona de interés y, por lo tanto, la integración del área del pico;
- A designa la altura del pico;
- σ designa la desviación típica de la curva de Gauss;
- 50 B designa el valor medio del fondo continuo en el intervalo [E-a, E+a].

El valor de a que corresponde a la relación más alta se obtiene por tanto anulando la siguiente derivada parcial:

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{\int_{E-a}^{E+a} A \cdot e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx}{2 \cdot a \cdot B} \right] = 0 \quad (2),$$

o también, considerando  $t = (x-E)/\sigma$ , mediante la siguiente relación:

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{\int_{-a/\sigma}^{a/\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt}{a} \right] = 0 \quad (3).$$

La relación (3) admite como solución:  $a = 1,4 \cdot \sigma$ .

- 5 El área del pico de absorción total en el intervalo  $[E-1,4\sigma; E+1,4\sigma]$  corresponde por tanto al 83,8 % de la integral del pico en el intervalo infinito. El intervalo  $[E-1,4\sigma; E+1,4\sigma]$  se designa entonces intervalo de normalidad con un nivel de confianza igual al 83,8 %.

- 10 El valor de  $a$  difiere según los métodos que se empleen, y presenta en la práctica una escasa influencia sobre los resultados de medición. Se puede, por ejemplo, utilizar el valor recomendado por el grupo de trabajo de normalización nº 5 del Comité de Instrumentación de Radioprotección que adopta un valor de  $2a = 5,92\sigma$ . El área del pico de absorción total en el intervalo  $[E-5,92\sigma; E+5,92\sigma]$  es por tanto el intervalo de normalidad con un nivel de confianza igual al 99,7 %.

- 15 Por otra parte, se llama "umbral de decisión" al límite a partir del cual con un riesgo  $\alpha$  aproximadamente, un pico detectado se considera verdadero. El riesgo  $\alpha$  es, por lo tanto, el riesgo de falso positivo, es decir el riesgo de concluir de forma equivocada en base a un pico detectado, que existe un pico, cuando en realidad este no existe. Según esta definición, el umbral de decisión está por tanto directamente ligado al error estadístico cometido en la integral del pico de absorción total.

En estas condiciones, se puede demostrar que, fijando un riesgo  $\alpha$  igual al 2,5 %, el umbral de detección, designado UD, viene dado por la siguiente relación:

$$20 \quad \mathbf{UD = 4,41 \cdot \sqrt{R \cdot B}} \quad (4),$$

en la que:

R: designa la anchura total a media altura del pico de absorción total considerado de forma gaussiana, designada también "resolución" de la cadena de espectrometría;  
B designa el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E-R, E+R]$ .

- 25 De este modo, si el área medida del pico de absorción total es superior al valor del umbral de decisión, se puede concluir con una certeza del 97,5 % que la magnitud física buscada está presente en la muestra o en el ruido de fondo según el espectro considerado.

- 30 En el caso contrario, en el que el área medida del pico de absorción total es inferior al valor del umbral de decisión, se puede concluir que la magnitud física está ausente de la muestra o del ruido de fondo, con un riesgo  $\beta$  de concluir de forma equivocada que la magnitud buscada está ausente de la muestra o del ruido de fondo cuando en realidad está presente. Se puede demostrar por tanto que el valor mínimo del área del pico de absorción total, designado LD( $\alpha$ ), para el cual se puede concluir que hay una detección con un riesgo  $\beta$  aproximadamente igual a un 2,5 % de cometer un error, viene dado por la siguiente relación:

$$\mathbf{LD(\alpha) = 8,8 \cdot \sqrt{R \cdot B}} \quad (5).$$

- 35 El límite de detección se expresa en número de fotones en la energía  $E_i$  absorbidos en el detector por efecto fotoeléctrico durante un tiempo de adquisición dado. El límite de detección expresado en la actividad del elemento radiactivo que origina la raya de emisión  $E_i$ , en la configuración de una fuente puntual viene por tanto dado por la relación:

$$LD = 8,8 \cdot \frac{\sqrt{R \cdot C}}{\varepsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 0,997 \cdot \sqrt{T}} \quad (6),$$

en la que:

C = B/T designa el recuento medio del fondo en el intervalo [E-R, E+R];

$\varepsilon_f(E_i)$  designa la eficacia global del detector;

5  $\Gamma(E_i)$  designa la relación de transmisión del elemento radiactivo más probable, a veces designada intensidad de la raya de emisión en la energía  $E_i$  del elemento radiactivo considerado;

T designa el tiempo de adquisición del espectro.

10 En el marco de la presente aplicación, se puede realizar una adquisición del ruido de fondo en ausencia de la muestra irradiada. El espectro de ruido de fondo que se deriva de esta es objeto de un tratamiento, que comprende en particular la búsqueda de los picos y el cálculo del área neta de los picos, mediante la sustracción del fondo continuo, según unas técnicas conocidas en sí mismas. El espectro adquirido en presencia de la muestra es objeto del mismo tratamiento, pero se realiza además para los picos identificados por comparación con el umbral de detección definido más arriba, una sustracción pico por pico de las áreas netas normalizadas del espectro de ruido de fondo teniendo en cuenta un valor de tolerancia en el centroide del pico identificado. La diferencia así obtenida de las áreas netas normalizadas obtenidas para cada pico identificado en el espectro adquirido en presencia de la muestra debe ser objeto a continuación de una prueba de detección. Se presentan a continuación las relaciones que 15 formulan el cálculo del umbral de decisión y del límite de detección que se aplican a los resultados de medición resultantes de la sustracción pico por pico del espectro de ruido de fondo tal como se ha descrito con anterioridad:

20 Para el espectro adquirido en presencia de la muestra durante el tiempo de medición  $t_m$ , (llamado espectro de la muestra) se escribe para el pico identificado F(a) el área del fondo continuo en el intervalo 2a, es entonces posible escribir la siguiente relación:

$$F(a) = 2 \cdot B \cdot a \quad (7).$$

Si f(a) designa el área normalizada del fondo continuo entonces:

$$f(a) = \frac{F(a)}{t_m} \quad (8).$$

25 El error estadístico que afecta a una variable viene dado por la raíz cuadrada de su varianza. Si « $\sigma^2 x$ » es la varianza de la variable X, entonces se puede escribir la siguiente relación:

$$\sigma^2_{f(a)} = \left( \frac{1}{t_m} \right)^2 \cdot \sigma^2_{F(a)} = \frac{F(a)}{t_m^2} \quad (9).$$

Si P(a) designa el área neta del pico de absorción total en la energía E, es decir:  $P(a) = \int_{E-a}^{E+a} A \cdot e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx,$

30 siendo A y  $\sigma$  respectivamente la altura y la desviación típica de la forma considerada gaussiana del pico neto y S(a) el área bruta del pico de absorción total, y si p(a) y s(a) designan respectivamente sus áreas neta y bruta normalizadas, entonces:

$$p(a) = \frac{P(a)}{t_m}, \quad s(a) = \frac{S(a)}{t_m} \quad \text{et} \quad \sigma^2_{p(a)} = \frac{P(a)}{t_m^2} \quad (10).$$

El área bruta normalizada del pico de absorción total también se puede escribir:

$$s(a) = p(a) + f(a) \quad (11);$$

35

igualmente:

$$\sigma^2_{s(a)} = \sigma^2_{p(a)} + \sigma^2_{f(a)} \quad (12).$$

A partir de las relaciones (9) y (10) anteriores se puede escribir entonces la siguiente relación:

$$\sigma^2_{s(a)} = \frac{P(a)}{t_m^2} + \frac{F(a)}{t_m^2} \quad (13).$$

5 Ahora bien,  $p(a) = s(a) - f(a)$ , por lo que:  $\sigma^2_{p(a)} = \sigma^2_{s(a)} + \sigma^2_{f(a)}$ . Así pues, a partir de las relaciones (13) y (9), se pueden escribir las siguientes relaciones:

$$\sigma^2_{p(a)} = \frac{P(a)}{t_m^2} + \frac{F(a)}{t_m^2} + \frac{F(a)}{t_m^2}, \quad (14)$$

o

$$\sigma^2_{p(a)} = \frac{P(a)}{t_m^2} + 2 \cdot \frac{F(a)}{t_m^2} \quad (15).$$

10 Para el espectro adquirido en ausencia de muestra, o "espectro del ruido de fondo", al designar  $F'(a)$ , para el pico identificado a la vez en el espectro de la muestra y el espectro de ruido de fondo, el área del fondo continuo considerado constante en el intervalo  $2a$ , se puede por tanto escribir la siguiente relación:

$$F'(a) = 2 \cdot B' \cdot a \quad (16);$$

siendo  $B'$  el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E_i - a, E_i + a]$  del espectro del ruido de fondo.

Si  $f'(a)$  designa el área normalizada del fondo continuo del espectro del ruido de fondo, entonces:

$$f'(a) = \frac{F'(a)}{t_0} \quad (17).$$

15

Del mismo modo que antes, se puede escribir la siguiente relación:

$$\sigma^2_{f'(a)} = \frac{F'(a)}{t_0^2} \quad (18).$$

Si  $P'(a)$  designa el área neta del pico de absorción total en la energía  $E$ , es decir:  $P'(a) = \int_{E-a}^{E+a} A' \cdot e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma'^2}} \cdot dx$ ,

20 siendo  $A'$  y  $\sigma'$  respectivamente la altura y la desviación típica de la forma considerada gaussiana del pico neto y  $S'(a)$  el área bruta del pico de absorción total del espectro de ruido de fondo, y si  $p'(a)$  y  $s'(a)$  designan respectivamente sus áreas neta y bruta normalizadas, entonces de la misma manera que antes se puede escribir la siguiente relación:

$$\sigma^2_{p'(a)} = \frac{P'(a)}{t_0^2} + 2 \cdot \frac{F'(a)}{t_0^2} \quad (19).$$

25 La diferencia de las superficies netas utilizadas para el cálculo de las actividades en una fuente puntual que representan la muestra medida viene dada por:

$$p(a) - p'(a).$$

De este modo:



$$\sigma^2_{[p(a)-p'(a)]} = \sigma^2_{p(a)} + \sigma^2_{p'(a)} \quad (20).$$

A partir de las relaciones (15) y (19) se puede escribir la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \sigma^2_{[p(a)-p'(a)]} &= \frac{P(a)}{t_m^2} + 2 \cdot \frac{F(a)}{t_m^2} + \frac{P'(a)}{t_0^2} + 2 \cdot \frac{F'(a)}{t_0^2} \\ &= \frac{p(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0} \end{aligned} \quad (21).$$

De este modo:

$$\sigma_{[p(a)-p'(a)]} = \sqrt{\frac{p(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (22),$$

5

o también:

$$\sigma_{[p(a)-p'(a)]} = \sqrt{\frac{p(a)-p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (23).$$

La magnitud  $[p(a)-p'(a)]$  que corresponde a  $p(a)-p'(a) = 0$ , es decir a la ausencia de pico proveniente de la muestra medida, sigue por lo tanto una ley normal de desviación típica igual a:

$$\sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}}.$$

10

Por lo tanto, solo se verifica la hipótesis de la ausencia de pico proveniente de la muestra con un riesgo  $\alpha$  excepto si:

$$\begin{aligned} p(a) - p'(a) &\leq K_\alpha \cdot \sigma_{[p(a)-p'(a)]} \\ &\leq K_\alpha \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \end{aligned} \quad (24),$$

en la que  $K_\alpha$  es el coeficiente de seguridad que corresponde a un riesgo  $\alpha$  de falso positivo, es decir declarar de forma equivocada la presencia de un pico cuando no lo hay.

15 El umbral de decisión, expresado en diferencia de superficie neta normalizada de los picos en la energía E de los espectros de la muestra y del ruido de fondo, que es el límite a partir del cual un pico de absorción total se puede considerar como proveniente de la muestra con un riesgo  $\alpha$  aproximadamente, viene por lo tanto dado por la relación:

$$UD = K_\alpha \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (25)$$

20 Si R y R' se consideran las anchuras totales a media altura, comúnmente designadas por las siglas LTMH, de los picos de absorción total, considerada de forma gaussiana, en la energía E respectivamente de los espectros de la muestra y del ruido de fondo, se puede escribir:

$$R = 2,355 \cdot \sigma \text{ y } R' = 2,355 \cdot \sigma' \quad (26)$$

25 R y R' son las resoluciones de la cadena de espectrometría, respectivamente para los espectros de la muestra y del ruido de fondo. Hay que señalar que para las energías de las rayas de los elementos radiactivos de la biblioteca de búsqueda que no se han identificado en uno u otro de los espectros, el valor R o R' se considera igual al valor de energía correspondiente vista en la curva de calibración de resolución.

Si se adopta por convención un valor  $2a = 5,92 \sigma$  para el espectro de la muestra y  $2a = 5,92 \sigma'$  para el espectro del ruido de fondo, entonces para estos dos espectros, respectivamente:  $2a = 2,52 R$  y  $2a = 2,52 R'$ ; se puede, por lo tanto, escribir la siguiente relación:

$$UD = K_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)} \quad (27).$$

- 5 Por ejemplo, para un riesgo  $\alpha = 2,5 \%$  de declarar de forma equivocada la presencia de un pico proveniente de la muestra cuando este no existe, entonces el valor de la función de distribución de la gaussiana reducida da  $K_{\alpha} = 1,96$  y el umbral de detección se escribe:

$$UD = 1,96 \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)} \quad (28).$$

- 10 De este modo, si la diferencia de las superficies netas normalizadas de los picos de absorción total de los espectros establecidos en presencia o en la ausencia de la muestra en la energía de las rayas de los elementos radiactivos contenidos en la biblioteca de búsqueda, es superior al valor del umbral de decisión, se puede concluir con una certeza del 97,5 % que la magnitud física buscada está presente en la muestra.

- 15 En el caso contrario, en el que la diferencia de las superficies netas normalizadas del pico de absorción total es inferior al valor del umbral de decisión, se puede concluir que la magnitud física está ausente de la muestra con un riesgo  $\beta$  aproximadamente de concluir de forma equivocada que la magnitud buscada está ausente de la muestra cuando en realidad está presente.

- 20 Pero, para que un pico proveniente de la muestra representada por el valor  $[p(a) - p'(a)]$  no se declare nulo con un riesgo  $\beta$  corto de concluir de forma equivocada que es nulo cuando es real, es preciso que la diferencia de las superficies netas normalizadas del pico no sea nula, es decir  $[p(a) - p'(a)] \neq 0$  y que, según las relaciones (24) y (25) anteriores, se cumpla la siguiente la desigualdad:

$$[p(a) - p'(a)] \geq K_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} + K_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{p(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (29),$$

en la que  $K_{\beta}$  es el coeficiente de seguridad que corresponde a un riesgo  $\beta$  de falso negativo, es decir de declarar de forma equivocada la ausencia de un pico cuando en realidad existe uno.

- 25 El valor mínimo de la diferencia de las superficies netas normalizadas del pico de absorción total designado  $LD_{net}$ , para el cual se puede concluir que hay una detección de pico proveniente de la muestra con el riesgo  $\beta$  corto, verifica entonces la siguiente relación:

$$LD_{net} = K_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} + K_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{LD(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (30).$$

Si se establece, por ejemplo,  $\beta = \alpha = 2,5 \%$ , entonces:  $K_{\alpha} = K_{\beta} = K$ , y por lo tanto:

$$LD_{net} = K \cdot \left[ \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} + \sqrt{\frac{LD_{net}}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \right] \quad (31).$$

Si se establece  $X = \sqrt{\frac{LD_{net}}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}}$ , se obtiene la relación:

$$t_m X^2 - \left[ \frac{p'(a)}{t_0} + \frac{p'(a) \cdot t_m}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f'(a) \cdot t_m}{t_0} \right] = K \cdot \left[ \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} + X \right] \quad (32),$$

o también la siguiente relación:

$$X^2 - \frac{K}{t_m} \cdot X - \left[ \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0} \right] - \frac{K}{t_m} \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} = 0 \quad (33).$$

5 Si se establece entonces que  $b = \frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}$ , la raíz positiva de esta ecuación es por tanto:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\frac{K}{t_m} + \sqrt{\left(\frac{K}{t_m}\right)^2 + 4 \cdot b + 4 \cdot \frac{K}{t_m} \cdot \sqrt{b}}}{2} \\ &= \frac{\frac{K}{t_m} + \left[ \frac{K}{t_m} + 2 \cdot \sqrt{b} \right]}{2} \\ &= \frac{K}{t_m} + \sqrt{b} \end{aligned} \quad (34).$$

10 El límite de detección del pico de absorción total proveniente de la muestra, para la cual es cierto en  $(1-\beta)$  que se detectará el pico, viene entonces dado por la relación:

$$LD_{net} = t_m \cdot (X^2 - b) = t_m \cdot \left[ \left( \frac{K}{t_m} + \sqrt{b} \right)^2 - b \right] = \frac{K^2}{t_m} + 2 \cdot K \cdot \sqrt{b} \quad (35),$$

o también por la relación:

$$LD_{net} = \frac{K^2}{t_m} + 2 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \quad (36).$$

15 Despreciando el valor de  $K^2/t_m$  delante del segundo término de la relación (36) se puede entonces escribir la siguiente relación:

$$\begin{aligned} LD_{net} &\approx 2 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 2 \cdot \frac{f(a)}{t_m} + 2 \cdot \frac{f'(a)}{t_0}} \\ &= 2 \cdot SD = 2 \cdot K_a \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left( \frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2} \right)} \end{aligned} \quad (37).$$

Si se considera entonces, por ejemplo,  $\beta = \alpha = 2,5 \%$ ,  $K_\alpha = 1,96$ , se puede escribir la siguiente relación:

$$LD_{net} = 3,92 \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)} \quad (38).$$

- 5 El límite de detección  $LD_{net}$  formulado por la relación (38) anterior se expresa en número de fotones por segundo en la energía  $E_i$  que se han absorbido por completo en el detector por efecto fotoeléctrico y que provienen únicamente de la muestra. Ahora bien, es necesario expresar el límite de detección de actividad del elemento radiactivo presente potencialmente en la muestra y que origina la raya de emisión  $E_i$ , en la configuración de una fuente puntual. Para ello, se puede utilizar en una primera fase una curva de eficacia global que da para un evento de energía  $E_i$  detectado en el detector, la fluencia fotónica de la fuente puntual. A continuación según la probabilidad de presencia de un elemento radiactivo u otro, se deduce su actividad, en base a su relación de transmisión en la energía  $E_i$ .
- 10 Si  $\epsilon_f(E_i)$  es la eficacia global del detector,  $\Gamma(E_i)$  la relación de transmisión del elemento radiactivo más probable, el límite de detección de este elemento radiactivo expresado en actividad de una fuente considerada puntual viene dado por la relación:

$$LD_{net} = 3,92 \cdot \frac{\sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)}}{\epsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 99,7\%} \quad (39).$$

- 15 Si se considera  $C = B/t_m$  y  $C' = B'/t_0$  los recuentos medios del fondo respectivamente en los espectros de la muestra y del ruido de fondo, se puede escribir la siguiente relación:

$$LD_{net} = 3,92 \cdot \frac{\sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot C}{t_m} + \frac{R' \cdot C'}{t_0}\right)}}{\epsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 99,7\%} \quad (40).$$

En el ejemplo de aplicación descrito, la expresión de los resultados de medición en la energía  $E_i$  tras la sustracción pico por pico del ruido de fondo se puede formular de la siguiente manera:

- 20 • Cuando se ha detectado un pico en el espectro de la muestra, es decir

$p(a) > 4,41 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot B}{t_0^2}}$ , es necesario expresar el resultado de la medición asignado a la muestra en la energía  $E_i$  en función de la siguiente prueba:

•

$$\text{Si } p(a) - p'(a) \leq 1,96 \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)}$$

- 25 entonces

$$\text{Resultado} = LD_{net} = 3,92 \cdot \frac{\sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot C}{t_m} + \frac{R' \cdot C'}{t_0}\right)}}{\epsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 99,7\%} \quad (41).$$

$$\text{Si } p(a) - p'(a) > 1,96 \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2}\right)}$$

entonces

$$\text{Resultado} = \frac{[p(a) - p'(a)] + \xi}{\epsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 99,7\%} \quad (42),$$

en la que  $\xi$  representa la incertidumbre estándar expandida sobre la evaluación de  $[p(a)-p'(a)]$  que es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres respectivas de  $p'(a)$  y de  $p(a)$  dadas por el programa informático de tratamiento con un coeficiente de seguridad de 1,96.

- Cuando no se ha detectado ningún pico en el espectro de la muestra, es decir para

$$p(a) \leq 4,41 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot B}{t_0^2}},$$

entonces el resultado de la medición asignado a la muestra en la energía  $E_i$  es el valor del siguiente límite de detección:

$$\text{Resultado} = LD_{net} = 3,92 \cdot \frac{\sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left(\frac{R \cdot C}{t_m^2} + \frac{R' \cdot C'}{t_0^2}\right)}}{\epsilon_f(E_i) \cdot \Gamma(E_i) \cdot 99,7\%} \quad (43).$$

La expresión de la actividad en una fuente puntual asignada a cada elemento radiactivo de la primera biblioteca se puede obtener a continuación según unos criterios que priorizan por orden las rayas detectadas y las rayas más intensas. También se puede realizar un cálculo de actividad calculando una media ponderada de las actividades o de los límites de detección definidos en la energía  $E_i$  por la intensidad de cada raya también designada relación de transmisión del elemento radiactivo definido en la primera biblioteca B1-0 o B2-0.

El tratamiento realizado en la segunda etapa 302 consiste, a partir de las actividades en una fuente puntual por elemento radiactivo obtenidas al final de la primera etapa 301, en construir una nueva fuente puntual ficticia anulando en una primera subetapa 3021, los valores de los límites de detección de los elementos radiactivos menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia que tienen al menos una raya de energía superior al valor umbral ya mencionado y que nos se han identificado, es decir, de los elementos radiactivos no identificados de la segunda biblioteca B1-1 o B2-1 que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2. Por ello, la ausencia de datos suficientes en la curva de respuesta de la cámara de ionización 111 conduce mediante este cálculo a un factor de corrección que siempre es más grande que el que se obtendría si se conociera la curva de respuesta en todo el intervalo. Esto garantiza el carácter envolvente de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia calculada en la etapa 203, en referencia a la figura 2. Obviamente sigue siendo preferible que la curva de respuesta de la cámara de ionización se conozca, con el fin de no sobreestimar por exceso el valor de la magnitud operativa buscada, y de este modo optimizar la capacidad potencial de recepción de las muestras irradiadas en las unidades de trabajo.

El objeto de las etapas 302 a 305 es calcular el factor de corrección que permite correlacionar los resultados de las mediciones procedentes de la cadena de espectrometría gamma, tras tener en cuenta la curva de eficacia global de esta, con el resultado de medición mostrado por la cámara de ionización que tiene en cuenta su curva de respuesta. En el caso particular en el que la curva de respuesta de la cámara de ionización no se conoce más allá de un valor umbral de energía, siendo el valor umbral superior o igual a las energías de las rayas del elemento radiactivo de referencia seleccionado, es necesario realizar la primera subetapa 3021 de la segunda etapa 302. En el caso en el que se conoce la curva de respuesta en todo el intervalo de las energías que cubre el conjunto de las rayas de la primera biblioteca, no es necesaria la primera subetapa 3021 de la segunda etapa 302.

La segunda etapa 302 comprende una segunda subetapa 3022 que consiste en convertir en fluencias fotónicas las actividades en una fuente puntual determinadas al final de la primera etapa 301 o al final de la primera subetapa 3021 de la segunda etapa 302. Para ello, los elementos radiactivos que constituyen la fuente puntual se buscan en una lista en la cual están catalogados todos los nombres de los elementos radiactivos que figuran en las diferentes bibliotecas de elementos radiactivos utilizadas en la etapa 301 designadas en el ejemplo B1-0 y B2-0, con todos los datos asociados referentes a los rayos de emisión gamma y X, es decir los datos relativos a la energía de las rayas y su intensidad. Para constituir esta lista, puede resultar conveniente partir del mismo banco de datos nucleares que

se ha utilizado para constituir las diferentes bibliotecas utilizadas en la etapa 301, verificar que el nombre de los elementos radiactivos que figuran en las bibliotecas B1-0 y B2-0 se han vuelto a transcribir con la misma escritura para que los nombres de los elementos radiactivos que figuran en las bibliotecas B1-0 y B2-0 se puedan encontrar de forma automática en la lista de datos. A continuación, conviene para los elementos radiactivos identificados en la constitución de las bibliotecas B1-0 y B2-0 como emisores beta con al menos uno de los productos de filiación emisores gamma que presentan un periodo radiactivo inferior o igual a periodo de 10 días escogido en el ejemplo, asignar las rayas características de estos emisores gamma, teniendo en cuenta su relación de producción y de transmisión para el cálculo de intensidad en referencia al elemento radiactivo emisor beta puro considerado. Hay que señalar que al contrario que en las bibliotecas B1-0 y B2-0, las características de las rayas extraídas del banco de datos nucleares seleccionado para constituir dicha lista se conservan en su estado con la excepción de la operación mencionada más arriba para los emisores beta que cumplen con los criterios enunciados con anterioridad.

Tras la identificación en dicha lista de los elementos radiactivos que constituyen la fuente puntual, se asocia para cada una de las rayas de energía características  $E_i$  de estos elementos radiactivos, el producto de la actividad del elemento radiactivo definida en la fuente puntual y la intensidad de emisión  $I_i$  de la raya que aparece en dicha lista. Este producto es la fluencia fotónica  $F_i$  de la fuente puntual en la energía  $E_i$ . Los valores de las fluencias fotónicas en las diferentes energías se pueden clasificar a continuación por orden de energía para simplificar los cálculos de la etapa siguiente.

La conversión de la fuente puntual en fluencias fotónicas realizada en la segunda subetapa 3022 de la segunda etapa 302 permite en la tercera etapa 303, calcular la contribución de cada raya de energía de la fuente puntual definida al final de la segunda etapa 302 a la tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización, y a continuación reconstituir el valor que esta última mostraría teniendo en cuenta su curva de respuesta.

Para calcular en la tercera etapa 303, la contribución a la tasa de dosis equivalente generada por la fuente puntual, o la fuente puntual ficticia, en la cámara de ionización, es necesario disponer de una tabla de conversión de las fluencias fotónicas de la fuente puntual en tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización. Esta tabla de conversión en tasa de dosis equivalente se puede obtener mediante un simple cálculo de radioprotección utilizando unos códigos de cálculo Monte Carlo o semi Monte Carlo mediante una división en bandas de energía lo suficientemente fina del rango de energías en el intervalo  $[0, 4 \text{ MeV}]$ , para liberarse de las variaciones de los factores de dosis, predefiniéndose la división de la energía mediante los códigos de cálculo de radioprotección. Se modeliza la geometría del puesto de medición, en particular de las pantallas interpuestas entre la fuente y la cámara de ionización. Sin embargo, con el fin de que el punto de cálculo represente lo mejor posible la tasa de dosis equivalente generada en el volumen de la cámara de ionización, se puede proponer:

- realizar una medición de tasa de dosis equivalente situando en la configuración de la futuras mediciones una fuente de calibración del elemento radiactivo de referencia, esto es  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo de la descripción, asimilada a una fuente puntual;
- determinar mediante cálculo, con una misma fuente de calibración, una misma geometría de medición, la posición del punto de cálculo para el cual el valor calculado de tasa de dosis equivalente es igual al valor anteriormente mostrado por la cámara de ionización. Hay que señalar que la cámara de ionización está calibrada sobre el elemento radiactivo de referencia y, por lo tanto, el coeficiente de respuesta es igual a 1.

Una vez realizada la modelización de cálculo, y fijada la posición del punto de cálculo, se calcula entonces para 1 fotón por segundo emitido en cada una de las bandas de energías preseleccionadas, el valor de la tasa de dosis equivalente en el punto de cálculo. De este modo se puede constituir la tabla de los factores de conversión de tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización para una emisión fotónica unitaria por bandas de energía. Para establecer la contribución  $C_i$  por rayas de energía de la fuente puntual, o fuente puntual ficticia, a la tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización, basta entonces con ponderar cada fluencia fotónica  $F_i$  definida en la energía  $E_i$  por el factor de dicha tabla de conversión en tasa de dosis equivalente cuya banda de energía comprende la energía  $E_i$ .

La siguiente etapa, la cuarta etapa 304, consiste en reconstituir el valor de tasa de dosis equivalente que mostraría la cámara de ionización si la muestra estuviera constituida por la fuente puntual definida al final de la etapa 301 o al final de la primera subetapa 3021 de la segunda etapa 302. Para ello, es necesario tener en cuenta la curva de respuesta de la cámara de ionización.

La curva de respuesta de la cámara de ionización está representada por una función continua. Para tener en cuenta esta curva de respuesta, es necesario establecer una tabla de respuesta de la cámara de ionización, que es una función discreta definida en unas bandas de energía seleccionadas en función de las variaciones de la curva de respuesta. Para tener en cuenta la degradación de la energía de las rayas características emitidas por los elementos radiactivos en el interior de la muestra, a través del espesor reducido del puesto de medición, y conservar el carácter envolvente del factor de corrección aplicado a la fuente puntual en la sexta etapa 306 que se describe en detalle más adelante, con independencia de la división en bandas de energía de la curva de respuesta, la tabla de respuesta asigna a cada banda de energía dada  $[E_i, E_f]$ , el coeficiente de respuesta mínima vista en la curva de respuesta de la cámara de ionización y que corresponde al intervalo  $[0, E_f]$ . Por último, para obtener el valor de tasa de dosis equivalente que mostraría la cámara de ionización si la muestra estuviera constituida por la fuente puntual

definida al final de la etapa 301 o al final de la primera subetapa 3021 de la segunda etapa 302, es necesario ponderar cada contribución  $C_i$  de la fuente puntual, definida en la energía  $E_i$ , por el coeficiente de la tabla de respuesta cuya banda de energía comprende la energía  $E_i$ , y a continuación sumar al conjunto de las rayas de energía todas las contribuciones ponderadas de la fuente puntual. La ponderación así realizada, permite estimar por defecto el valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente que mostraría la cámara de ionización; este valor por defecto garantiza el carácter envolvente del factor de corrección y partiendo del cálculo final de la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ .

El objeto de la quinta etapa 305 es realizar el cálculo de la fuente puntual propiamente dicha, calculando un factor de corrección, definido como la relación entre el valor neto declarado de la tasa de dosis equivalente en la cámara de ionización al final de las mediciones de ruido de fondo y de la muestra situada en la posición de medición, y el valor de tasa de dosis equivalente reconstituida al final de la cuarta etapa 304 ya mencionada.

Con el objeto de determinar el valor neto de la tasa de dosis equivalente que hay que declarar en la cámara de ionización, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones. El carácter estadístico de la radiactividad exige diferenciar el valor neto medido por la cámara de ionización y el valor neto de la tasa de dosis equivalente que se debe declarar en la cámara de ionización. El valor neto medido por la cámara de ionización se obtiene a partir de la sustracción de las dos mediciones siguientes: una medición de la tasa de dosis equivalente para la muestra situada en la posición de medición, y una medición de la tasa de dosis equivalente antes de que se introduzca la muestra en la unidad de trabajo o "medición del ruido de fondo". En efecto, es el valor neto de la tasa de dosis equivalente que se debe declarar en la cámara de ionización el que se debe utilizar para el cálculo del factor de corrección, en la medida en que solo este valor tiene en cuenta la incertidumbre estadística de las mediciones y, por lo tanto, garantiza con un nivel de confianza dado el carácter envolvente de la magnitud operativa de la actividad equivalente en X. Este valor declarado en la cámara de ionización se puede establecer por tanto en base a parámetros conocidos en sí mismos de umbral de decisión, de límite de detección, de expresión del resultado y de nivel de confianza asociado, que dependen de las condiciones de medición.

Estos parámetros de umbral de decisión, de límite de detección, de nivel de confianza y de expresión de resultado aplicables a una medición de una variable estadística se pueden definir de una de las formas posibles que se presentan a continuación.

De una manera habitual, el resultado de medición, denominado resultado bruto, de una magnitud dada, como la magnitud indicativa de la exposición externa, comprende la contribución de la muestra, pero también la del ruido de fondo externo, así como una contribución ligada a la influencia de la matriz de la muestra. Ahora bien, la influencia del ruido de fondo y de la matriz de la muestra en proceso de medición, no se pueden cuantificar a priori. Por el contrario, se pueden realizar de forma separada unas mediciones de ruido de fondo con un "blanco" compuesto por una matriz inerte que representa la muestra, y de este modo estimar los valores estadísticos ligados a la influencia del ruido de fondo. Por ello, se puede proceder como si se conocieran los resultados netos de medición ligados a la magnitud buscada en la muestra. De este modo, la distribución de los resultados netos de medición del blanco se puede representar mediante una ley normal de probabilidad centrada en un valor nulo de la magnitud deseada. Del mismo modo, se puede representar la distribución de los resultados netos de medición de una magnitud verdadera X contenida en la muestra mediante una ley normal centrada en el valor X.

Hay que señalar que en el marco de la presente invención, la magnitud verdadera buscada en la muestra es la exposición externa generada por la muestra en unas determinadas condiciones de medición. Como consecuencia, la matriz de la muestra solo tiene influencia potencial sobre el ruido de fondo medido. Así pues, se puede, obviando esta influencia, reducir las mediciones del blanco a unas mediciones de ruido de fondo externo, en ausencia de cualquier matriz de muestra.

Cuando los resultados netos de medición de una muestra son cercanos a los del blanco, es necesario realizar una prueba estadística con el fin de definir los valores de las magnitudes que hay que declarar. El umbral de decisión, designado  $U_{De}$  y cuyo valor es positivo, es el valor crítico de esta prueba para decidir la detección o no de una magnitud verdadera en la muestra. Este valor tiene en cuenta los rendimientos del aparato de medición, las condiciones operativas de la medición, como la geometría de medición, el tiempo, etc.

De este modo, cualquier resultado neto de medición superior al umbral de decisión, llevará a la conclusión de la presencia de la magnitud buscada en la muestra. Sin embargo, los resultados netos de medición pueden superiores al umbral de decisión, mientras que la magnitud buscada no existe en la muestra. Igualmente para un valor dado del umbral de decisión, existe una probabilidad  $\alpha$  de concluir de forma equivocada que hay detección cuando la magnitud buscada no está presente en la muestra. Fijar el valor del umbral de decisión es por lo tanto fijar el valor aceptable de  $\alpha$ , también llamado probabilidad de "falsa detección" o riesgo de primera especie. El valor de  $U_{De}$  se puede expresar por tanto en número de desviaciones típicas  $\sigma_0$  (distribución del blanco) con la forma:

$$S_{De} = u_{1-\alpha} \cdot \sigma_0, \text{ o } u_{1-\alpha}$$

es un factor multiplicador que depende de  $\alpha$ .

Por la definición del umbral de decisión, un resultado de medición inferior al umbral de decisión lleva a la conclusión de una no detección. Ahora bien, algunos resultados de medición pueden ser inferiores al umbral de decisión mientras que la magnitud buscada está en realidad presente en la muestra. Igualmente, para un valor dado del umbral de decisión, existe una probabilidad  $\beta$  dada de concluir de forma equivocada que no hay detección mientras que la magnitud buscada está presente en la muestra. La probabilidad  $\beta$  o riesgo de segunda especie varía con el valor de la magnitud verdadera detectada. De este modo, al fijar un valor mínimo de  $\beta$ , de este se deduce el valor mínimo de magnitud verdadera que se puede detectar con una probabilidad de  $(1-\beta)$  y, por lo tanto, que puede dar un resultado de medición superior al umbral de decisión. Este valor mínimo es el límite de detección, designado  $L_{De}$ . Cualquier magnitud verdadera superior al límite de detección tiene, por lo tanto, una probabilidad superior a  $(1-\beta)$  de ser detectada.

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  se pueden seleccionar iguales por convención. Si se admite entonces que las distribuciones de los resultados netos de medición del blanco y de medición de la muestra que contiene el límite de detección tienen la misma desviación típica, se puede escribir la siguiente relación:  $L_{De} = 2U_{De}$ .

Para unos riesgos  $\alpha$  y  $\beta$  iguales al 2,5 % y en la hipótesis de una ley normal,  $u_{1-\alpha}$  es entonces igual a 1,96 y, por lo tanto, se puede escribir  $U_{De} = 1,96 \cdot \sigma_0 \cong 2 \cdot \sigma_0$  y  $L_{De} \cong 4 \cdot \sigma_0$ . El límite de detección es entonces el valor más pequeño de la magnitud buscada que tenga una probabilidad al menos igual al 97,5 % de ser detectada.

Cuando se dispone de un resultado neto de medición  $R$ , es necesario poder llegar al valor verdadero  $X$  que no se conoce. Para ello, se puede definir un intervalo de confianza centrado en un valor  $X$  particular, de tal modo que este intervalo tenga una probabilidad dada de contener el valor verdadero  $X$ . En efecto, esta probabilidad es la probabilidad de encontrar un valor  $R$  tal que el intervalo de confianza centrado en  $R$  contenga el valor verdadero  $X$ .

Para un valor  $X \geq 0$ , si  $\sigma_x$  es la desviación típica de la distribución centrada en el valor  $X$ , el valor neto de la medición  $R$  puede entonces tomar los valores comprendidos entre  $-\infty$  y  $+\infty$ . Entre todos los valores que toma  $R$ , es necesario buscar los valores de  $R$  para los cuales el intervalo de confianza contiene el valor  $X$ .

Si  $R \pm \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x$ , es el intervalo de confianza entorno a  $R$  para el nivel de confianza de  $(1-\gamma)$ .

Para que el valor verdadero  $X$  esté contenido en el intervalo central  $[R - \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x, R + \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x]$ , es preciso

que  $|R-X|$  sea inferior a  $\frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x$ . La  $[R - \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x, R + \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x]$ , es preciso que  $|R-X|$  sea inferior a

$\frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x$ . Siendo  $X$  un valor positivo, esta condición se escribe de la siguiente forma:

$(X - \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x) \leq R \leq (X + \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x)$ . Ahora bien, si se adoptan para los valores de  $\frac{u_{1-\gamma}}{2}$ , los valores dados

por la tabla de la ley normal que da unos valores particulares de la función de distribución de la gaussiana reducida, la probabilidad de obtener un valor de medición  $R$  que esté contenido en el intervalo

$[X - \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x, X + \frac{u_{1-\gamma}}{2} \cdot \sigma_x]$  es entonces de  $(1-\gamma)$ . Esta probabilidad es también la probabilidad para que el

intervalo  $[R - u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x, R + u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x]$  contenga el valor verdadero  $X$ . De este modo, si se considera el caso particular en el que  $u_{1-\gamma}/2 = u_{1-\alpha}$  (siendo  $U_{De} = u_{1-\alpha} \cdot \sigma_0$ ), entonces la probabilidad para que el intervalo de confianza  $[R - u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x, R + u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x]$  contenga el valor verdadero  $X$  es igual a  $(1-2\alpha)$ . El intervalo de confianza del valor  $X$  en el nivel de la probabilidad  $(1-2\alpha)$  se define por  $\pm u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x$ .

Para un valor  $X$  cualquiera y un resultado neto de medición  $R$ , la amplitud del intervalo de confianza asociado a  $R$  es igual a  $\pm u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x$ . Esta amplitud se puede interpretar por lo tanto como la incertidumbre aleatoria asociada al resultado neto de medición  $R$  para un nivel de confianza de  $(1-2\alpha)$  de encontrar el valor verdadero  $X$ . Si la incertidumbre aleatoria relativa del resultado  $R$  se expresa mediante  $[u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x / R]$ , entonces esta incertidumbre relativa aumenta cuando  $\sigma_x$  disminuye y, por lo tanto, cuando  $X$  disminuye. De este modo es máxima cuando  $X = 0$  y se expresa entonces mediante  $[u_{1-\alpha} \cdot \sigma_0 / R]$  o también  $[U_{De} / R]$ . Cuando  $R$  disminuye de  $+\infty$  a 0, la relación  $[u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x / R]$  aumenta. Existe, por lo tanto, un único valor particular de  $R$  tal que la incertidumbre relativa  $[u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x / R]$  sea igual al 100 %. Este valor particular es  $R = U_{De}$  que pertenece a la distribución centrada en el valor verdadero "nulo". El umbral de decisión también puede, por lo tanto, definirse como el valor particular del resultado neto de medición  $R$ , para el cual la incertidumbre aleatoria relativa es del 100 % para un nivel de confianza de  $(1-2\alpha)$ .

Cuando se obtiene un resultado de medición  $R$ , no es posible conocer a priori la distribución de  $X$  a la cual



pertenece. Es, por lo tanto, necesario definir los valores mínimo y máximo que podría tomar X según el valor de medición particular R, con un riesgo mínimo de que X esté en realidad fuera del intervalo definido. Se presentan a continuación algunos ejemplos de expresiones que hay que adoptar para el resultado con los niveles de confianza asociados, según los valores que toma R por comparación con el valor del umbral de decisión.

- 5 Cuando  $R \leq U_{De}$ , el resultado se puede expresar de la siguiente forma:  $X \leq L_{De}$ , que corresponde a un nivel de confianza igual a  $(1-\alpha)$  de encontrar el valor verdadero X.

Cuando  $R > U_{De}$  y se escribe  $X = R \pm u_{1-\alpha} \cdot \sigma_x$ , el nivel de confianza de esta expresión es de  $(1-2\alpha)$ .

La incertidumbre relativa sobre un resultado de medición igual al  $L_{De}$  es entonces, por ejemplo, del 50 % para un nivel de confianza del 95 %, si se fija  $\alpha = 2,5 \%$ .

- 10 No se conocen los valores de las desviaciones típicas  $\sigma_x$ , pero se pueden estimar a partir del resultado de medición y de las condiciones en las cuales se ha realizado la medición. Se escribe entonces el estimador  $\sigma_R$ .

En el marco de la presente invención, donde se trata de estimar los valores envolventes, se decide adoptar las siguientes expresiones:

Si R es la medición:

- 15 - Si  $R \leq U_{De}$ , entonces el valor de la magnitud buscada se considerará igual al  $L_{De}$ ;  
 - Si  $R > U_{De}$  entonces la magnitud buscada se considerará igual a  $R \pm 2 \sigma_R$  (siendo  $\sigma_R$  la desviación típica de la medición R y 2, el valor del coeficiente de seguridad que corresponde a una probabilidad superior al 95 %).

- 20 Así pues, si el valor neto de la tasa de dosis equivalente (eventualmente negativa) medida por la cámara de ionización es inferior o igual al umbral de decisión  $U_{De}$ , entonces el valor neto de la tasa de dosis equivalente declarado en la cámara de ionización se selecciona igual al límite de detección  $L_{De}$ ; si el valor neto de la tasa de dosis equivalente medida por la cámara de ionización es superior al umbral de decisión  $U_{De}$ , entonces el valor neto de la tasa de dosis equivalente declarada en la cámara de ionización se considera igual a la suma del valor neto de la tasa de dosis equivalente medida por la cámara de ionización y de una incertidumbre  $\xi_{De}$ .

- 25 El umbral de decisión  $U_{De}$  y el límite de detección  $L_{De}$  de la cámara de ionización se expresan en función del valor del ruido de fondo, del tiempo de medición del ruido de fondo y del tiempo de medición de la muestra irradiada. La cámara de ionización puede estar acoplada de una manera clásica a un electrómetro digital que funciona en modo "tasa de dosis", por ejemplo por medio de una resistencia en cuyos bornes se mide la tensión, o incluso en modo "dosis", por ejemplo por medio de un condensador cuya carga recogida se mide, o incluso en modo "tasa de dosis integrada" que consiste, por ejemplo, en integrar la corriente que atraviesa una resistencia, a través de la medición de la tensión, durante un tiempo de medición fijado por el operario.

- 30 Si se considera, por ejemplo, el modo "dosis" de la unidad de recuento constituida por la cámara de ionización acoplada al electrómetro, obteniéndose entonces el valor de la tasa de dosis equivalente al realizar la relación entre la dosis equivalente medida, mostrada por el electrómetro, y el tiempo de medición, entonces el modo de funcionamiento se puede asimilar al de una escala de recuento digital.

- 35 El valor de la tasa de dosis equivalente necesario para el cálculo del factor de corrección, y que parte del cálculo de la fuente puntual, es el valor de la tasa de dosis generada únicamente por la muestra irradiada. Por consiguiente, es necesario determinar el umbral de decisión  $U_{De}$  y el límite de detección  $L_{De}$  expresado en valor neto de la tasa de dosis equivalente, es decir tras la deducción del ruido de fondo. A continuación se presentan las demostraciones y expresiones matemáticas de estas magnitudes asociadas a una cámara de ionización conectada a un electrómetro que funciona en modo "dosis". Se ha considerado que la corriente de fuga de la cámara de ionización es insignificante.

Si  $D_0$  es el valor de dosis bruta medido en ausencia de la muestra (ruido de fondo) durante el tiempo de medición  $t_0$ .

Si  $D_m$  es el valor de dosis bruta medido en presencia de la muestra durante el tiempo de medición  $t_m$ .

- 45 Si  $d_e$  es el valor neto de la tasa de dosis, es decir de la tasa de dosis generada únicamente por la muestra que hay que medir.

Entonces tenemos la relación:

$$d_e = \frac{D_m}{t_m} - \frac{D_0}{t_0} \quad (44).$$

La dosis es una magnitud proporcional a la energía depositada en la cámara de ionización por la radiación incidente

y, por lo tanto, proporcional al número de pares de iones creados. Ahora bien, la carga recogida por el condensador del circuito eléctrico es proporcional al número de pares de iones creados. Por lo tanto, se puede expresar la dosis como el producto del número de pares de iones creados y por una constante, esto es:

$$D_0 = F \cdot N_0 \cdot e \quad \text{y} \quad D_m = F \cdot N_m \cdot e,$$

5 siendo:

$N_0$ : el número de pares de iones creados por el ruido de fondo durante el tiempo  $t_0$ ;

$N_m$ : el número de pares de iones creados en presencia de la muestra durante el tiempo  $t_m$ ;

F: el coeficiente de conversión expresado en Sievert/Culombio, medido durante el calibrado de la cámara de ionización con una fuente que contiene el elemento radiactivo de referencia;

10 e: la carga del electrón =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Culombios.

Se puede escribir entonces la relación (44):

$$d_e = F \cdot e \cdot \left( \frac{N_m}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right) \quad (45).$$

La incertidumbre estándar combinada con el valor de, designado  $\sigma(d_e)$ , viene dada entonces por la relación:

$$(\sigma(d_e))^2 = \left( \frac{\partial d_e}{\partial N_m} \right)^2 (\sigma(N_m))^2 + \left( \frac{\partial d_e}{\partial N_0} \right)^2 (\sigma(N_0))^2 \quad (46).$$

15 Ahora bien, si se admite que  $N_m$  y  $N_0$  son lo suficientemente grandes como para seguir una ley normal, entonces se puede estimar sus incertidumbres estándar mediante las relaciones:

$$(\sigma(N_m))^2 = N_m \quad \text{y} \quad (\sigma(N_0))^2 = N_0$$

La relación (46) se escribe entonces:

$$(\sigma(d_e))^2 = \left( \frac{F \cdot e}{t_m} \right)^2 \cdot N_m + \left( \frac{F \cdot e}{t_0} \right)^2 \cdot N_0 \quad (47)$$

20 La incertidumbre estándar extendida de  $d_e$ , designada  $\xi(d_e)$ , que corresponde a un nivel de confianza de  $(1-\alpha)$  viene dada entonces por la siguiente relación:

$$\left( \xi_{d_e} \right)^2 = u_\alpha^2 \cdot (\sigma(d_e))^2 = (u_\alpha \cdot F \cdot e)^2 \cdot \left( \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right) \quad (48).$$

Al expresar la incertidumbre relativa sobre  $d_e$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\left( \frac{\xi_{d_e}}{d_e} \right)^2 = \frac{(u_\alpha \cdot F \cdot e)^2 \cdot \left( \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right)}{(d_e)^2} = \frac{(u_\alpha \cdot F \cdot e)^2 \cdot \left( \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right)}{\left[ F \cdot e \cdot \left( \frac{N_m}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right) \right]^2} = \frac{u_\alpha^2 \cdot \left( \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right)}{\left[ \frac{N_m}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right]^2} \quad (49).$$

25 Al definirse también el umbral de decisión como el valor particular que toma  $d_e$ , para el cual se tiene una incertidumbre relativa del 100 %, este verifica la siguiente relación:

$$1 = \frac{u_\alpha^2 \cdot \left[ \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right]}{\left[ \frac{N_m}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right]^2} \text{ o también } \left[ \frac{N_m}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right]^2 = u_\alpha^2 \cdot \left[ \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right] \quad (50).$$

Al desarrollar la identidad al cuadrado y al multiplicar cada miembro de la ecuación por  $t_m^2$ , se obtiene finalmente la siguiente ecuación de segundo grado:

$$N_m^2 + N_0^2 \cdot \frac{t_m^2}{t_0^2} - 2 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot N_m = u_\alpha^2 \cdot \left[ N_m + N_0 \cdot \frac{t_m^2}{t_0^2} \right] \quad (51);$$

5 que también se puede escribir:

$$N_m^2 - \left[ 2 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} + u_\alpha^2 \right] \cdot N_m + N_0 \cdot \frac{t_m^2}{t_0^2} \cdot \left[ N_0 - u_\alpha^2 \right] = 0 \quad (52).$$

La raíz positiva de la ecuación de segundo grado (52) viene dada, por tanto, por la relación:

$$N_m^1 = \frac{\left[ 2 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} + u_\alpha^2 \right] + \sqrt{u_\alpha^2 \cdot \left[ u_\alpha^2 + 4 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left( 1 + \frac{t_m}{t_0} \right) \right]}}{2} \quad (53).$$

$$= N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} + \frac{u_\alpha \cdot \left( u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + 4 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left( 1 + \frac{t_m}{t_0} \right)} \right)}{2}$$

10 El umbral de decisión expresado en valor neto de la tasa de dosis generada por la muestra viene dado entonces por la siguiente relación:

$$S_{d_r} = F \cdot e \cdot \left( \frac{N_m^1}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right) = F \cdot e \cdot \frac{u_\alpha \cdot \left( u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + 4 \cdot N_0 \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left( 1 + \frac{t_m}{t_0} \right)} \right)}{2 \cdot t_m} \quad (54).$$

Al expresar entonces el  $U_{de}$  en función de  $D_0$  dado por la relación:  $N_0 = \frac{D_0}{F \cdot e}$ , se puede escribir entonces la siguiente relación:

$$U_{de} = F \cdot e \cdot \left( \frac{N_m^1}{t_m} - \frac{N_0}{t_0} \right) = F \cdot e \cdot \frac{u_\alpha \cdot \left( u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + 4 \cdot \frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left( 1 + \frac{t_m}{t_0} \right)} \right)}{2 \cdot t_m} \quad (55).$$

15 Si se considera, por ejemplo, un valor del coeficiente de seguridad de 1,96 ( $\cong 2$ ) que corresponde a un nivel de probabilidad del 95 %, el umbral de decisión expresado en valor neto de la tasa de dosis viene dado por la relación:

$$U_{de} = \frac{2 \cdot F \cdot e}{t_m} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left( 1 + \frac{t_m}{t_0} \right)} \right) \quad (56),$$

en la que:

$U_{de}$  designa el umbral de decisión expresado en valor neto de tasa de dosis, expresado en Sv/h o en Sv/s;  
 $F$  designa el coeficiente de calibración de la cámara de ionización para el elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ , expresado en Sv/Culombios;

5 e designa la carga del electrón, esto es  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Culombios;

$t_m$  designa el tiempo de medición de la muestra irradiada, expresado en horas o en segundos;

$t_0$  designa el tiempo de medición del ruido de fondo, expresado en horas o en segundos;

$D_0$  designa la dosis generada por el ruido de fondo durante el tiempo  $t_0$ , expresado en Sv.

Para un valor  $\frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0}$  grande delante de  $u_\alpha^2$ , la expresión (55) del umbral de decisión se convierte entonces en:

$$U_{de} = F \cdot e \cdot \frac{u_\alpha \cdot \left( \sqrt{4 \cdot \frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left(1 + \frac{t_m}{t_0}\right)} \right)}{2 \cdot t_m} = F \cdot e \cdot \frac{u_\alpha \cdot \left( \sqrt{\frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left(1 + \frac{t_m}{t_0}\right)} \right)}{t_m} \quad (57).$$

$$= u_\alpha \cdot F \cdot e \cdot \left( \sqrt{\frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \left( \frac{1}{t_m \cdot t_0} + \frac{1}{t_0^2} \right)} \right)$$

10

En estas condiciones, si se considera  $t_m = t_0$ , se puede escribir la relación:  $U_{de} = u_\alpha \cdot F \cdot e \cdot \left( \sqrt{\frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e \cdot t_0^2}} \right)$ , siendo

esta relación equivalente a  $U_{de} = u_\alpha \cdot \sigma(d_0)$  obtenido al seleccionar  $N_m = N_0$  en la expresión (47) de la desviación típica de la tasa de dosis neta.

15

La expresión matemática del límite de detección expresándose en tasa de dosis equivalente neta y teniendo en cuenta la conversión ya mencionada ( $\alpha = \beta$ ), se puede deducir de (56):

$$L_{d_e} = 2 \cdot S_{d_e} = \frac{4 \cdot F \cdot e}{t_m} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{D_0}{F \cdot e} \cdot \frac{t_m}{t_0} \cdot \left(1 + \frac{t_m}{t_0}\right)} \right) \quad (58),$$

en la que  $L_{de}$  designa el límite de detección expresado en valor neto de tasa de dosis, en Sv/h o Sv/S.

Si el tiempo de medición de la muestra  $t_m$  corresponde al tiempo de medición del ruido de fondo  $t_0$ , y si su valor común se designa  $t$ , entonces se pueden escribir las siguientes relaciones:

$$U_{de} = \frac{2 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) \quad \vee \quad L_{d_e} = \frac{4 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) \quad (59),$$

20

siendo  $F$  tradicionalmente del orden de 1,104 Sv/C en el ejemplo de la presente aplicación, el término  $\frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}$

es más grande que 1, y la relación (59) se puede simplificar, por lo tanto, por aproximación mediante la siguiente relación:

$$U_{de} \approx \frac{2 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( \sqrt{\frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) \approx 3 \cdot \frac{\sqrt{D_0 \cdot F \cdot e}}{t} \quad \vee \quad L_{d_e} \approx 6 \cdot \frac{\sqrt{D_0 \cdot F \cdot e}}{t} \quad (60),$$

25

También se puede expresar el umbral de decisión  $U_{de}$  y el límite de detección  $L_{de}$  en función del valor de la tasa media de dosis equivalente mostrado por el electrómetro, en ausencia de la muestra irradiada, que corresponde entonces al valor del ruido de fondo.

Si  $d_0$  es el valor de tasa media de dosis mostrado por el electrómetro al cabo de un tiempo  $t_0$  de medición en ausencia de la muestra irradiada, la relación (59) se escribe entonces de la siguiente manera:

$$U_{de} = \frac{2 \cdot F \cdot e}{t_m} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{d_0}{F \cdot e} \cdot \left( t_m + \frac{t_m^2}{t_0} \right)} \right) \quad (61),$$

y la relación (60) se escribe entonces de la siguiente forma:

$$L_{d_e} = \frac{4 \cdot F \cdot e}{t_m} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{d_0}{F \cdot e} \cdot \left( t_m + \frac{t_m^2}{t_0} \right)} \right) \quad (62).$$

5 Así pues, si el valor neto de la tasa de dosis equivalente de, tras la medición de la muestra irradiada y la deducción del ruido de fondo, verifica:

- $d_e \leq U_{de}$ , entonces el valor neto de la tasa de dosis equivalente declarado en la cámara de ionización designada  $D_d$  es tal que  $D_d = L_{de}$ , en caso contrario
- $d_e > U_{de}$ , entonces  $D_d = d_e + \xi_{de}$ , en la que  $\xi_{de}$  es la incertidumbre sobre el valor de, para el cual se selecciona un coeficiente de seguridad de 2, que corresponde a un nivel de probabilidad de un 95 %.

10 La incertidumbre estándar extendida sobre de puede, por tanto, venir dada por la siguiente relación:

$$\left( \xi_{d_e} \right)^2 = u_a^2 \cdot \left( \sigma(d_e) \right)^2 = \left( u_a \cdot F \cdot e \right)^2 \cdot \left( \frac{N_m}{t_m^2} + \frac{N_0}{t_0^2} \right) = \left( u_a \cdot F \cdot e \right)^2 \cdot \left( \frac{D_m}{F \cdot e \cdot t_m^2} + \frac{D_0}{F \cdot e \cdot t_0^2} \right),$$

entonces:

$$\xi_{d_e} = u_a \cdot \sqrt{F \cdot e \cdot \left( \frac{D_m}{t_m^2} + \frac{D_0}{t_0^2} \right)} = u_a \cdot \sqrt{F \cdot e \cdot \left( \frac{d_m}{t_m} + \frac{d_0}{t_0} \right)} = 2 \cdot \sqrt{F \cdot e \cdot \left( \frac{d_m}{t_m} + \frac{d_0}{t_0} \right)} \quad (63),$$

15 en la que  $d_m$  y  $d_0$  designan los valores de la tasa media de dosis mostrados por el electrómetro, respectivamente en presencia y en ausencia de la muestra irradiada.

En la quinta etapa 305, el factor de corrección se obtiene calculando la relación entre el valor neto de la tasa de dosis equivalente en la cámara de ionización para la muestra situada en su posición de medición, y el valor de tasa de dosis equivalente tal y como se reconstituye al final de la ya mencionada cuarta etapa 304.

20 A continuación la sexta etapa 306 consiste en ponderar mediante el factor de corrección el conjunto de las actividades de los elementos radiactivos de la fuente puntual calculada al final de la primera etapa 301, en la tercera subetapa 3013. El resultado de estas actividades ponderadas por elemento radiactivo constituye la fuente puntual representativa de la muestra medida y corresponde al resultado de salida de la etapa de cálculo de la fuente puntual 202 en referencia a la figura 2.

25 Hay que señalar que al constituirse la fuente puntual que representa la muestra al final de la sexta etapa 306, se pueden identificar las características de esta fuente según el formalismo de un código de radioprotección y de este modo ofrecer la posibilidad de realizar unos cálculos complementarios de radioprotección como, por ejemplo, la estimación de la tasa de dosis equivalente generada por la muestra situada en un envase de transporte.

30 La figura 4 presenta un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de procedimiento de cálculo de la actividad equivalente de  $^{60}\text{Co}$ , en un modo de realización de la invención, a partir de la fuente puntual tal como se obtiene al final de la etapa de cálculo de la fuente puntual 202 en referencia a la figura 2.

35 En el ejemplo de realización que se ilustra en la figura 4, el cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X, en referencia a la etapa 203 de la figura 2, se puede descomponer en una primera etapa 401 de clasificación de los elementos radiactivos que constituyen la fuente puntual en dos categorías. A esta etapa le siguen a continuación dos etapas de tratamiento 402 y 403 realizadas en paralelo para cada una de las dos categorías de elementos radiactivos. Los resultados de estos dos tratamientos realizados en paralelo son a continuación objeto de un tratamiento común en una cuarta etapa 404, para terminar con el cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X de la muestra medida.

En la primera etapa 401, se hace una distinción según si los elementos radiactivos de la fuente puntual, obtenida en

la etapa 202 en referencia a la figura 2, pertenecen o no a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2 según el tipo de muestra irradiada considerada.

Para los elementos radiactivos que pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2, es decir, los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, esto es el  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo de la presente invención, a la primera etapa 401 le sigue una primera etapa de tratamiento 402 que se puede descomponer en dos etapas, una primera subetapa 4021 que consiste en calcular el valor de la tasa de dosis equivalente generada por la fuente puntual constituida por estos elementos radiactivos detrás del espesor máximo de blindaje a una distancia dada y una segunda subetapa 4022 que consiste en calcular la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X, perteneciendo algunos elementos radiactivos de la fuente puntual a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2.

La primera subetapa 4021 se puede realizar de dos maneras, según si la tabla del factor de tasa de dosis se ha establecido detrás del espesor máximo  $E_{\text{max}}$  por actividad unitaria de elemento radiactivo o por emisión fotónica unitaria distribuida en bandas de energía.

Para constituir estas dos tablas de conversión a elegir, se puede modelizar en un código de cálculo de radioprotección de preferencia de tipo Monte Carlo o semi Monte Carlo, una fuente puntual y una pantalla plana infinita cuyo espesor y naturaleza se consideran iguales al valor máximo de blindaje que se puede interponer entre las muestras y los operarios. Llegado el caso, se puede tener en cuenta el espesor de blindaje adicional aportado por la presencia de almacenes blindados en la unidad de trabajo si los blindajes considerados son de la misma clase que la pared de blindaje de la unidad de trabajo considerada. Las posiciones fuente-pantalla y punto de cálculo-pantalla se fijan una vez para todas. Resulta ventajoso fijar las distancias fuente-pantalla y pantalla-punto de cálculo iguales a las de una situación representativa de la configuración de trabajo con el fin de ofrecer la posibilidad de mostrar al operario el valor estimado de la tasa de dosis equivalente generada en el puesto de trabajo. Para calcular el factor de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, la fuente del cálculo puede estar entonces constituida por una actividad unitaria de uno de los elementos radiactivos de la biblioteca B1-2 y B2-2, y se puede realizar el cálculo de tasa de dosis equivalente. Para obtener la tabla de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, es necesario llevar a cabo tantos cálculos como elementos radiactivos hay en las bibliotecas B1-2 y B2-2. Hay que señalar que es por tanto importante, en aras de la coherencia, que los datos nucleares de los elementos radiactivos de las bibliotecas B1-2 y B2-2 utilizadas por el código de cálculo de radioprotección sean idénticos a los utilizados en la tercera etapa 302 de conversión de las actividades de la fuente puntual en fluencia fotónica realizada en la segunda subetapa de la segunda etapa 302 de cálculo de la fuente puntual, en referencia a la figura 3. En caso contrario o en caso de duda, es preferible dar prioridad al segundo método que utiliza una tabla de conversión en tasa de dosis equivalente por emisión fotónica unitaria y que, por otra parte, ofrece la ventaja de permitir una modificación posterior de las bibliotecas sin cuestionar las etapas de cálculo.

Para constituir la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente por actividad unitaria de elemento radiactivo, se puede emplear la misma modelización de cálculo que las de una situación representativa de la configuración de trabajo y definir una fuente fotónica unitaria (1 fotón/s) por banda de energía definida en el intervalo de 0 a 4 MeV. Según las posibilidades del código de cálculo, puede ser necesario realizar tantos cálculos como bandas de energía definidas haya, pero hay que señalar que la mayoría de los códigos de cálculo de radioprotección propone una predivisión en bandas de energía con la posibilidad de realizar un único cálculo para obtener los factores de conversión en tasa de dosis equivalente por fuente unitaria (1 fotón/s) distribuido por bandas de energía. Sea cual sea el medio de cálculo utilizado, el objetivo es conocer los factores de conversión en tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo de la fuente puntual constituida por un fotón emitido por segundo en cada una de las bandas de energías preseleccionadas.

El primer método para obtener en la primera subetapa 4021 de la primera etapa de tratamiento 402 el valor de la tasa de dosis equivalente generada por la fuente puntual detrás del espesor máximo de blindaje a una distancia dada, consiste en ponderar cada actividad de la fuente puntual definida en la primera etapa 401 para los elementos radiactivos de la biblioteca B1-2 o B2-2 por el factor correspondiente de la tabla de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, en una etapa previa de ponderación 4020, y a continuación sumar todas las contribuciones de estos elementos radiactivos.

El segundo método consiste en una primera fase en convertir en fluencia fotónicas las actividades de la fuente puntual definida para los elementos radiactivos de la biblioteca B1-2. Para ello, se procede como en la segunda etapa 302 del cálculo de la fuente puntual, y se utiliza de nuevo la lista de datos nucleares señalada. De este modo, se identifican en esta lista los elementos radiactivos de la fuente puntual que pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 (o B2-2). Gracias a esta lista se asocia para cada una de las rayas de energía características  $E_i$  de estos elementos radiactivos el producto de la actividad del elemento radiactivo definido en la fuente puntual correspondiente de la primera etapa 401 y la intensidad de emisión  $I_i$  de la raya que aparece en dicha lista. Los valores de las fluencias fotónicas definidas en las energías  $E_i$  constituyen la fuente puntual de los elementos radiactivos de la tercera biblioteca B1-2. Para obtener, por último, el valor de la tasa de dosis equivalente generada por la fuente puntual detrás del espesor máximo de blindaje a una distancia dada, se puede entonces ponderar cada fluencia fotónica así determinada en la energía  $E_i$  por el factor correspondiente de la tabla de conversión por emisión fotónica unitaria, y a continuación sumar todas las contribuciones de las rayas de energía.

La segunda subetapa 4022 que consiste en calcular la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X, de los elementos radiactivos de la fuente puntual que pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2, necesita definir el factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo en actividad equivalente del elemento radiactivo de referencia, es decir el  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo de la descripción. Para ello, es necesario emplear exactamente la misma modelización de cálculo que la utilizada para la realización de la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo (por emisión fotónica unitaria o por actividad unitaria) objeto de la subetapa 4021, y a continuación definir la fuente puntual por 1 Bq de  $^{60}\text{Co}$ . El resultado de este cálculo de radioprotección es el valor de la tasa de dosis equivalente generada por 1 Bq de  $^{60}\text{Co}$  detrás del espesor máximo de blindaje a la misma distancia de modelización. La inversa de este valor de tasa de dosis equivalente es el valor del factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo en actividad equivalente del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ . La actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  de los elementos radiactivos de la fuente puntual que pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2 se obtiene al realizar el producto del valor de la tasa de dosis equivalente generada por dichos elementos radiactivos de la fuente puntual detrás del espesor máximo de blindaje y del valor del factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo de blindaje y del valor del factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo en actividad equivalente del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ .

Para los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2.2, es decir los elementos radiactivos menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, esto es el  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo de la presente invención, a la primera etapa 401 le sigue una segunda etapa de tratamiento 403 que se puede descomponer de una manera similar a la primera etapa de tratamiento 402 descrita con anterioridad, en dos subetapas:

- una primera subetapa 4031 que consiste en calcular el valor de la tasa de dosis equivalente generada por los elementos radiactivos de la fuente puntual que no pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2, detrás de un espesor intermedio de blindaje  $E_{\text{int}}$  comprendido entre el espesor reducido  $E_{\text{reducido}}$  del puesto de medición y el espesor mínimo  $E_{\text{min}}$  de blindaje de las unidades de trabajo, a una distancia dada. Puede resultar ventajoso realizar este cálculo detrás del espesor reducido del puesto de medición con el fin de volver a utilizar la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente establecida para la constitución de la fuente puntual. Se puede demostrar que para los elementos radiactivos clasificados como menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia (B1-2 o B2-2), la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia que se deriva decrece cuando el cálculo del valor de tasa de dosis equivalente se realiza detrás de un espesor creciente de blindaje. Como consecuencia la elección de fijar el espesor intermedio igual al espesor reducido conduce a un valor de actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia que es envolvente de la que se habría obtenido si la equivalencia se hubiera realizado con un espesor superior al del puesto de medición. La limitación voluntaria del número de tablas de conversión no pone, por lo tanto, en entredicho el carácter envolvente del cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia así presentada. Sin embargo, si la desviación típica entre el espesor reducido del puesto de medición y el espesor mínimo de las unidades de trabajo es significativa, puede resultar ventajoso optimizar el valor de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia realizando el cálculo de la tasa de dosis equivalente de la segunda etapa de tratamiento 403, detrás del espesor mínimo de blindaje de las unidades de trabajo. En este caso, hay que constituir una nueva tabla de conversión en las mismas condiciones detrás del espesor mínimo de blindaje;
- una segunda subetapa 4032 que consiste en calcular la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X de la fuente puntual de los elementos radiactivos que no pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2.

La primera de las subetapas 4031 de la etapa de tratamiento 403 en referencia a la figura 4 se puede realizar de dos maneras, según la elección de realizar una tabla de factor de tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio seleccionado entre el espesor reducido del puesto de medición y el espesor mínimo de blindaje de las unidades de trabajo por actividad unitaria de elemento radiactivo, o por emisión fotónica unitaria distribuida en bandas de energía.

Ya se ha constituido una tabla de conversión por emisión fotónica para el espesor reducido del puesto de medición en la tercera etapa 303 del cálculo de la fuente puntual, en referencia a la figura 3. Por lo tanto se puede volver a utilizar aquí, si se escoge fijar el espesor intermedio en el valor del espesor reducido del puesto de medición. En caso de elegir otro espesor intermedio comprendido entre el espesor reducido y el espesor mínimo, hay que realizar una nueva tabla de conversión por emisión fotónica según los mismos principios que los enunciados en referencia a la tercera etapa 303 del cálculo de la fuente puntual.

Para constituir la tabla de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo detrás del espesor intermedio seleccionado igual al espesor reducido del puesto de medición, se puede volver a utilizar la modelización geométrica de la tercera etapa 303 del cálculo de la fuente puntual. La distancia seleccionada entre el punto de cálculo y el espesor reducido de blindaje se puede modificar, pero se debe conservar para todos los cálculos de la tercera etapa de tratamiento 403. Para calcular el factor de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, se puede constituir entonces la fuente del cálculo de radioprotección con una actividad unitaria de uno de los elementos radiactivos de la biblioteca general B1-0 y B2-0, e iniciar el cálculo de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio seleccionado. Para obtener la tabla de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, es entonces necesario realizar tantos cálculos como elementos radiactivos hay en las bibliotecas B1-0 y B2-0. Hay que

recordar que es importante, en aras de la coherencia, que los datos nucleares de los elementos radiactivos de las bibliotecas B1-0 y B2-0 utilizados por el código de cálculo de radioprotección sean idénticos a los utilizados en la segunda etapa 302 del cálculo de la fuente puntual de conversión de las actividades de la fuente puntual en fluencia fotónica. En caso contrario o en caso de duda, resulta ventajoso dar prioridad al segundo método que se describe a continuación que utiliza una tabla de conversión en tasa de dosis equivalente por emisión fotónica unitaria detrás del espesor intermedio el cual, si este se considera igual al espesor reducido del puesto de medición, ya se ha establecido para la realización de la tercera etapa 303 del cálculo de la fuente puntual, considerándose la distancia entre el punto de cálculo y el espesor reducido igual a una distancia representativa de la posición de la cámara de ionización.

El primer método para obtener en la primera subetapa 4031 de la tercera etapa de tratamiento 403 el valor de la tasa de dosis equivalente generada detrás del espesor intermedio de blindaje a una distancia dada por la fuente puntual de los elementos radiactivos que no pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2, es decir los elementos radiactivos menos perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, consiste en ponderar, en una etapa previa de ponderación 4030, cada actividad de la fuente puntual así definida por el factor correspondiente de la tabla de conversión por actividad unitaria de elemento radiactivo, y a continuación sumar todas la contribuciones de estos elementos radiactivos, para obtener la tasa de dosis equivalente.

El segundo método consiste, en una primera fase, en convertir en las fluencias fotónicas las actividades de la fuente puntual de los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2. Para ello se procede como en la segunda etapa 302 del cálculo de la fuente puntual, y se puede volver a utilizar la lista de datos nucleares señalada. De este modo, los elementos radiactivos de la fuente puntual que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2 se identifican en esta lista. Gracias a esta lista, se asocia para cada una de las rayas de energía características  $E_i$  de estos elementos radiactivos el producto de la actividad del elemento radiactivo definido en la anterior fuente puntual y la intensidad de emisión  $I_i$  de la raya que aparece en dicha lista. Estos productos representan las fluencias fotónicas definidas en las energías  $E_i$  y constituyen la fuente puntual de los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2, convertidas en fluencias fotónicas. Para obtener por último en la primera subetapa 4031 de la etapa 403 el valor de la tasa de dosis equivalente generada por esta fuente puntual detrás del espesor reducido de blindaje a una distancia dada, se puede entonces ponderar cada fluencia fotónica así determinada en la energía  $E_i$  mediante el factor correspondiente de la tabla de conversión por emisión fotónica unitaria, y a continuación sumar todas las contribuciones de las rayas de energía.

La segunda subetapa 4032 de la etapa de tratamiento 403 en referencia a la figura 4, que consiste en calcular la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia X, de los elementos radiactivos de la fuente puntual que no pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2, necesita definir el factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio seleccionado en la subetapa 4031 por actividad unitaria del elemento radiactivo de referencia, es decir el  $^{60}\text{Co}$  en el ejemplo descrito. Para ello, es necesario volver a utilizar exactamente la misma modelización geométrica de cálculo, es decir el mismo espesor intermedio, la misma distancia punto de cálculo-blindaje, etc., que la utilizada para la etapa 4031, y a continuación definir la fuente puntual del cálculo por una actividad unitaria de 1 Bq de  $^{60}\text{Co}$ . El resultado de este cálculo de radioprotección es el valor de la tasa de dosis equivalente generada por 1 Bq de  $^{60}\text{Co}$  detrás del espesor intermedio a la misma distancia de modelización que la de la subetapa 4031 (por emisión fotónica unitaria o por actividad unitaria). La inversa de este valor de la tasa de dosis equivalente es el valor del factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio en actividad equivalente del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ . La actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  de los elementos radiactivos de la fuente puntual que no pertenecen a la tercera biblioteca B1-2 o B2-2 se obtiene realizando el producto del valor de la tasa de dosis equivalente generada por dichos elementos radiactivos de la fuente puntual detrás del espesor intermedio y del valor del factor de conversión de la tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio en actividad equivalente del elemento radiactivo de referencia  $^{60}\text{Co}$ .

La tercera etapa de tratamiento 404 consiste en sumar las actividades equivalentes obtenidas, por una parte, al final de la primera etapa 402, es decir la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia de los elementos radiactivos de la fuente puntual que pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2 y obtenidas, por otra parte, al final de la segunda etapa de tratamiento 403, es decir la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia de los elementos radiactivos de la fuente puntual que no pertenecen a la biblioteca B1-2 o B2-2. Esta suma es, por tanto, la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia de la muestra medida.

En ausencia de actividad en una muestra irradiada, el método de cálculo de la actividad equivalente  $^{60}\text{Co}$  asigna por defecto a la muestra irradiada una actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  que nunca es nula. El valor de esta actividad depende a las condiciones de medición y de los límites de rendimiento de los aparatos. Esta actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  también es la actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  mínima detectable por el sistema de medición. Por analogía con la definición del límite de detección aplicable a una medición de una variable estadística, el valor de esta actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  se puede designar "límite de detección en actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ ". El cálculo de esta actividad se realiza entonces en el caso supuesto en el que la tasa de dosis neta generada por la muestra irradiada es inferior al valor del umbral de decisión  $U_{de}$  y cuando no se ha detectado ningún elemento radiactivo. El conocimiento del límite de actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$  debe en particular permitir al operario apreciar durante las adquisiciones los rendimientos de las condiciones operativas de la medición y también el tiempo de recuento necesario. De este modo, si el valor de actividad asignado a la muestra es igual al límite de detección así definido,



resulta interesante para el operario aumentar el tiempo de medición si desea asignar una actividad más baja a la muestra. Este cálculo se puede realizar y mostrar de forma cíclica durante el tiempo de medición, realizando unos tratamientos en segundo plano de los resultados intermedios.

5 La figura 5 presenta un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de una etapa de cálculo de la fuente puntual representativa del límite de detección de actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en un ejemplo de realización de la invención, en la hipótesis en la que la cadena de espectrometría gamma no ha podido detectar ningún elemento radiactivo al final de la primera etapa 301 de cálculo de la fuente puntual, en referencia a la figura 3. De una manera similar al cálculo de la fuente puntual en el caso más general, descrito con anterioridad en referencia a la figura 3, el cálculo de la fuente puntual en la presente hipótesis se puede descomponer en seis etapas 501 a 506 que corresponden  
10 respectivamente a las seis etapas 301 a 306 descritas con anterioridad en referencia a la figura 3.

La primera etapa 501 según la presente hipótesis se diferencia de la primera etapa 301 del caso general. En la primera etapa 501 en la presente hipótesis a todos los elementos radiactivos de la segunda biblioteca B1-1 o B1-2 se les asigna en una segunda subetapa 5012 una actividad igual a su límite de detección  $L_{de}$ , calculada en una primera subetapa 5011 a partir de las mediciones realizadas por la cadena de espectrometría gamma.

15 Hay que señalar que resulta indispensable que el programa informático de espectrometría gamma utilizado permita calcular, por medio de las fórmulas de umbral de decisión y de límite de detección ya presentadas en la etapa 301, los límites de detección en fuente puntual de los elementos radiactivos detectados y no detectados de la segunda biblioteca B1-1 o B1-2 tras la operación de sustracción pico por pico de las adquisiciones en presencia y en ausencia de la muestra que hay que medir. Las actividades así constituidas de los límites de detección de los elementos  
20 radiactivos de la segunda biblioteca B1-1 o B2-1 definen en esta hipótesis la fuente puntual, siendo objeto en las etapas 502 a 504 de unos tratamiento de cálculo idénticos a los descritos en relación con las etapas 302 a 304 en referencia a la figura 3, incluidas las subetapas 5021 y 5022, idénticas a las subetapas 3021 y 3022, permitiendo de este modo terminar el cálculo del valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente que mostraría la cámara de ionización en presencia de la fuente puntual. La quinta etapa 505 de cálculo de la fuente puntual se diferencia entonces de la quinta etapa 305 del cálculo de la fuente puntual descrita con anterioridad en referencia a la figura 3. En la presente hipótesis, la quinta etapa de cálculo 505 consiste en calcular el factor de corrección que se utiliza en la sexta etapa 506 para ponderar la fuente puntual de los límites de detección calculados con anterioridad en la segunda subetapa 5012 de la primera etapa 501. Este factor de corrección se define como la relación entre el límite de detección  $L_{de}$  determinado a partir de la tasa media de dosis del ruido de fondo y los tiempos de medición según  
25 uno de los modos posibles, entre ellos la relación (58) dada con anterioridad para el modo dosis de la cámara de ionización y el valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente que mostraría la cámara de ionización tal como se obtiene al final de la cuarta etapa 504 ya mencionada.

Las actividades por elemento radiactivo de la fuente puntual que representan las actividades mínimas detectables por el sistema de medición y que son objeto de la sexta etapa 506 se definen por tanto como el producto de las actividades en una fuente puntual tal y como se determinan en la primera etapa 501 ya mencionada por el factor de corrección resultante de la quinta etapa 505.  
35

La figura 6 presenta un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de método de cálculo del límite de detección de actividad equivalente en  $^{60}\text{Co}$ , en la hipótesis en la que la cadena de espectrometría gamma no ha podido detectar ningún elemento radiactivo al finalizar la etapa 301 del cálculo de la fuente puntual, en referencia a la figura 3. Las etapas de tratamiento 601 a 604 que conducen al cálculo final del límite de detección de actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia son idénticas en todos los puntos a las etapas de tratamiento 401 a 404 descritas con anterioridad en referencia a la figura 4, con la diferencia de que el archivo fuente puntual utilizado en la entrada de la primera etapa 601 está constituido por el archivo de fuente puntual resultante de la quinta etapa 505 del cálculo de la fuente puntual en la presente hipótesis. De este modo, en el caso de la presente hipótesis, se determinan los límites de detección corregidos en una fuente puntual de los elementos radiactivos al final de la primera etapa 601 del cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia, más que unos valores de actividades en una fuente puntual. Del mismo modo, en las segundas etapas 6022 y 6032 respectivamente de las etapas de tratamiento 602 y 603, son calculados unos límites de detección equivalentes, respectivamente de los elementos radiactivos más perjudiciales que el elemento radiactivo de referencia, y de los elementos radiactivos menos perjudiciales, y no de las actividades equivalentes.  
40  
45  
50

Hay que señalar que los ejemplos presentados en la anterior descripción se aplican a unos recintos constituidos por protecciones biológicas de la misma clase. Se puede aplicar de manera ventajosa un procedimiento de determinación de la magnitud operativa a recintos constituidos por protecciones biológicas de distintas clases, es decir realizadas con materiales diferentes o bien con unos materiales idénticos pero con densidades diferentes.

55 Si se dispone, por ejemplo, de dos conjuntos de unidades de trabajo blindadas, puede estar justificada la necesidad de elaborar una actividad equivalente en X con carácter envolvente para los dos conjuntos, si se prevén transferencias de muestras entre estos dos conjuntos y si se dispone de un único sistema de medición. En el interior de cada conjunto, las unidades de trabajo tienen por tanto un espesor mínimo y un espesor máximo de blindaje. Si  $EA_{min}$ ,  $EA_{max}$  son los espesores respectivamente mínimo y máximo de los recintos del primer conjunto constituido por el material A y  $EB_{min}$ ,  $EB_{max}$  los espesores respectivamente mínimo y máximo de los recintos del segundo conjunto  
60

constituido por el material B. Se considera que el sistema de medición está situado detrás de un espesor reducido de material A o B, de tal modo que este espesor es como máximo igual al espesor más bajo equivalente de material A o B. Para determinar los valores admisibles del espesor reducido del puesto de medición se puede proceder de la siguiente manera:

- 5 En una primera fase se pueden determinar los factores de protección que aportan los diferentes espesores  $EA_{\min}$ ,  $EA_{\max}$  y  $EB_{\min}$ ,  $EB_{\max}$  para una fuente puntual del elemento radiactivo de referencia X.

10 Para el espesor  $EA_{\min}$  se determina mediante cálculo su espesor equivalente constituido por material B designado  $EB_{\text{equiv}} EA_{\min}$ , que es el espesor de material B que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo X el mismo factor de protección que  $EA_{\min}$ . De la misma manera, se puede determinar el espesor equivalente constituido por material A, designado  $EA_{\text{equiv}} EB_{\min}$ , que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo X el mismo factor de protección que le espesor  $EB_{\min}$ .

El método de cálculo del espesor equivalente  $EB_{\text{equiv}} EA_{\min}$  se describe a continuación, de este se puede deducir el método de cálculo del espesor  $EA_{\text{equiv}} EB_{\min}$  permutando los índices A y B. Es conveniente en una primera fase modelizar, por medio de un código de cálculo de radioprotección:

- 15 - una fuente puntual de elemento radiactivo X con una actividad fijada en un valor dado;  
 - una distancia fuente-punto de cálculo de tasa de dosis dada;  
 - una distancia pantalla-punto de cálculo dada.

20 Al estar estos valores fijados de forma definitiva, una primera etapa puede por tanto consistir en situar una pantalla de material A y con un espesor  $EA_{\min}$  y calcular la tasa de dosis equivalente generada en el punto de cálculo por esta fuente.

25 Una segunda etapa puede consistir en sustituir a continuación esta pantalla por una pantalla de material B y en fijar el valor de tasa de dosis equivalente en el punto de cálculo en el valor encontrado en dicha primera etapa, manteniéndose iguales los demás parámetros citados en los tres párrafos anteriores. A continuación se calcula el espesor del material B necesario para obtener esta tasa equivalente de dosis en el punto de cálculo. Este espesor es el espesor  $EB_{\text{equiv}} EA_{\min}$ .

30 Si el puesto de medición está situado detrás de una pantalla constituida por el material A, entonces el espesor de esta pantalla, denominado espesor reducido, debe ser inferior o igual al más pequeño de los dos valores  $EA_{\min}$  y  $EA_{\text{equiv}} EB_{\min}$ , con el riesgo en caso contrario de asignar a una muestra poco radiactiva un límite de actividad equivalente en X excesivamente grande, lo que perjudicaría por tanto a la utilización óptima de uno u otro de los conjuntos de recintos. Es, por lo tanto, necesario que el espesor reducido del puesto de medición designado  $E_{\text{reducido}}$  verifique la relación:

$$E_{\text{reducido}} \leq \inf (EA_{\min}, EA_{\text{equiv}} EB_{\min}) \quad (64).$$

De la misma manera, si el puesto de medición está situado detrás de una pantalla constituida por el material B, se debe cumplir la siguiente relación:

35 
$$E_{\text{reducido}} \leq \inf (EB_{\min}, EB_{\text{equiv}} EA_{\min}) \quad (65).$$

40 Hay que señalar que si se prevé recibir unas muestras con una actividad muy elevada, el espesor reducido así determinado podría conducir a saturar el detector de espectrometría del puesto de medición. Un cálculo de tipo Monte Carlo puede permitir estimar el riesgo de saturación. Si este riesgo es real, se puede prever, de manera ventajosa, disponer una protección amovible delante del espesor reducido, que constituye un nuevo espesor reducido del puesto de medición y, por lo tanto, una segunda configuración de cálculo, por ejemplo seleccionable por el operario.

45 La lista de los elementos radiactivos clasificados como más perjudiciales que el elemento de referencia X depende de la naturaleza del material considerado, aun cuando un gran número de elementos radiactivos pueden ser comunes a dos materiales dados. Como consecuencia, si los dos conjuntos A y B se diferencian por la naturaleza de su protección biológica, entonces las bibliotecas de elementos radiactivos establecidas de forma independiente para cada conjunto no son *a priori* idénticas. Para los dos conjuntos de unidades de trabajo, por ejemplo de plomo y de hormigón, las actividades máximas equivalentes en X que definen el campo de funcionamiento se consideran conocidas para cada una de las unidades de trabajo que componen los diferentes conjuntos.

50 Se pueden determinar, para cada uno de los materiales A y B, las diferentes bibliotecas de elementos radiactivos como se han definido con anterioridad. En el caso de muestras de tipo 1, y al seleccionar el  $^{60}\text{Co}$  como elemento radiactivo de referencia, entonces se pueden establecer las bibliotecas que se presentan en la siguiente tabla:

Bibliotecas asociadas	Todos los elementos radiactivos potencialmente	Elementos radiactivos que tienen al menos un rayo de energía > 1,33 MeV y elementos radiactivos más perjudiciales	Elementos radiactivos más perjudiciales que
-----------------------	--	---	---

	presentes	que el $^{60}\text{Co}$	el $^{60}\text{Co}$
Material A	B1-0	$B_A$ 1-1	$B_A$ 1-2
Material B		$B_B$ 1-1	$B_B$ 1-2

Hay que señalar que en el caso de que las bibliotecas  $B_A$  1-2 y  $B_B$  1-2 resulten ser idénticas, entonces se puede simplificar el método de cálculo de la fuente puntual y de la actividad equivalente en X que se describe a continuación.

5 Tras una adquisición de espectros en ausencia y en presencia de la muestra, se puede calcular una fuente puntual para cada uno de los materiales A y B según el método descrito con anterioridad en referencia a la figura 3; de este modo se pueden constituir unos archivos de fuentes puntuales para los materiales A y B, designados respectivamente  $Sp_A$  y  $Sp_B$ .

10 Hay que señalar que las etapas de cálculo de la fuente puntual tal y como se han descrito con anterioridad en referencia a la figura 3 son idénticas para los dos tipos de materiales A y B, con la excepción de la primera etapa 301 que se diferencia por las bibliotecas utilizadas. En efecto, al implantarse el puesto de medición detrás de un espesor reducido de uno de los materiales, las tablas de conversión en tasa de dosis equivalente y la tabla de respuesta de la cámara de ionización utilizadas son idénticas para la constitución de las dos fuentes puntuales.

15 Al estar constituidas las fuentes puntuales, entonces se puede realizar el cálculo de actividad equivalente en X para cada uno de los materiales A y B, según el método descrito con anterioridad en referencia a la figura 4, pero sustituyendo las tablas de conversión de tasa de dosis equivalente detrás del espesor intermedio por las establecidas detrás de los espesores mínimos de material A o B. Se recuerda aquí que para el material de la unidad de trabajo que acoge el puesto de medición, la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente y el factor de conversión en actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia utilizados para el cálculo de la contribución de los elementos radiactivos clasificados como menos perjudiciales, se pueden realizar detrás de un espesor intermedio comprendido entre el espesor reducido del puesto de medición y el espesor mínimo de este material. Por ejemplo, se puede seleccionar el espesor mínimo de las unidades de trabajo para cada uno de los materiales. Las actividades equivalentes en X para los materiales A y B se designan respectivamente  $A_{\text{equiv/A}}$  y  $A_{\text{equiv/B}}$ .

20 La actividad equivalente en X de la muestra que cubre todos los espesores de las unidades de trabajo de material A y material B es, por tanto, el mayor de los dos valores  $A_{\text{equiv/A}}$  y  $A_{\text{equiv/B}}$ . Se puede por tanto escribir la siguiente relación:

$$\text{Actividad equivalente en X de la muestra} = \sup (A_{\text{equiv/A}}, A_{\text{equiv/B}}) \quad (66).$$

30 El cálculo del límite de detección de actividad equivalente en X de la muestra se realiza de una manera similar, procediendo mediante una primera etapa de cálculo del archivo de las actividades por elemento radiactivo de la fuente puntual que representa las actividades mínimas detectables por el sistema de medición para cada uno de los materiales A y B según las etapas descritas con anterioridad en referencia a la figura 5. Hay que señalar que para los elementos radiactivos comunes a las segundas bibliotecas  $B_A$  1-1 de A y  $B_B$  1-1 de B, las actividades calculadas al finalizar la sexta etapa 506 de cálculo de la fuente puntual, en referencia a la figura 5, son idénticas para cada uno de los dos materiales A y B. La segunda etapa consiste en calcular los límites de detección de actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia para cada uno de los materiales designados  $LD_{\text{equiv/A}}$  y  $LD_{\text{equiv/B}}$ . Para ello, se procede según el método descrito con anterioridad en referencia a la figura 6, utilizando en la entrada, para cada uno de los materiales, el archivo de las actividades por elemento radiactivo de la fuente puntual resultante de la primera etapa mencionada con anterioridad, y utilizando para la tercera etapa 603 las tablas de conversión en tasa de dosis equivalente y el factor de conversión en actividad equivalente establecidos detrás del espesor mínimo de cada uno de los materiales en lugar de los establecidos detrás del espesor intermedio. El límite de detección de actividad equivalente en X de la muestra es por tanto el mayor de los dos valores  $LD_{\text{equiv/A}}$  y  $LD_{\text{equiv/B}}$ .

45 Hay que señalar que se puede sacar provecho de manera ventajosa a la existencia de almacenes blindados en el interior de determinadas unidades de trabajo, utilizados para el almacenamiento de muestras irradiadas, para ampliar, en caso de que fuera necesario, el campo admisible de las muestras irradiadas. Del mismo modo, para mantener esta coyuntura, es preferible que las protecciones biológicas de los almacenes blindados se tengan en cuenta en el método de elaboración de la magnitud operativa. De este modo, el campo de funcionamiento permitido asociado a la magnitud operativa se puede diferenciar en un campo habitual simplificado en el que solo se gestiona el inventario de la unidad de trabajo, y un campo excepcional en el que se permite una mayor actividad global, en particular en la superficie de trabajo, en función del inventario presente en el almacén.

50 Sean cuales sean los criterios que han conducido a dimensionar las protecciones biológicas de una unidad de trabajo, se puede transponer el procedimiento según uno de los modos de realización de la invención, a una unidad de trabajo ya construida. De este modo, los límites del campo de funcionamiento, traducido en la unidad operativa del método de gestión, se definen únicamente a partir de la elección del elemento radiactivo X de referencia, y de un valor máximo aceptable de tasa de dosis en el puesto de trabajo, sin que sea necesario conocer de forma previa el

método según el cual está elaborada la magnitud operativa vinculada a la muestra irradiada. Como consecuencia, se pueden definir, en su diseño, los límites del campo de funcionamiento permitido de cada unidad de trabajo sin tener que fijar de forma inmediata los parámetros que intervienen en el método de la elaboración de la magnitud operativa vinculada a las muestras irradiadas.

- 5 Se puede actualizar la magnitud operativa de las muestras, con el fin de que esta dé cuenta con la mayor precisión, pero nunca por defecto, de la exposición externa generada por las muestras irradiadas en el puesto de trabajo de cada unidad de trabajo. Al ser decreciente en el tiempo la exposición externa generada por las muestras irradiadas, el método de elaboración de la magnitud operativa puede, por lo tanto, sacar partido del estado de desintegración de la muestra irradiada al llegar al laboratorio, así como a lo largo de su almacenamiento en las unidades de trabajo.
- 10 Por lo tanto, puede estar prevista de manera ventajosa una actualización de los inventarios en proceso de utilización, con el objetivo de aumentar las capacidades de almacenamiento de las unidades de trabajo.

Hay que señalar que la magnitud operativa establecida según el procedimiento de la presente invención también permite apreciar la aceptabilidad de muestras dispuestas en un envase de transporte, desde el momento en que la aprobación de este representa una actividad máxima traducida en el elemento radiactivo de referencia.

15

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) manipulada en unas instalaciones que comprenden unos recintos de protección con al menos un espesor y una naturaleza determinados, **caracterizado porque** comprende:

- 5
- una primera etapa (201) de cálculos previos que establecen a partir de una primera biblioteca (B1-0, B2-0) de elementos radiactivos, una segunda biblioteca (B1-1, B2-1) y una tercera biblioteca (B1-2, B2-2) de elementos radiactivos para los cuales la relación entre las tasas de dosis calculadas respectivamente a través del espesor mínimo de protección y el espesor máximo de protección que presentan los blindajes de las unidades de trabajo de la instalación es inferior a la del elemento radiactivo de referencia (X);
- 10
- una segunda etapa (202) de cálculo de la fuente puntual que equivale a la muestra irradiada (100), que calcula las actividades en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la primera biblioteca (B1-0, B2-0) detectados por una cadena de espectrometría gamma (112) y los límites de detección en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la segunda biblioteca (B1-1, B2-1) no detectados por la cadena de espectrometría gamma (112), y que produce un archivo de fuente puntual que comprende la información de las actividades en una fuente puntual de cada uno de los elementos radiactivos detectados y no detectados por la cadena de espectrometría gamma (112) corregidas con un factor de corrección definido como la relación del valor de tasa de dosis declarada en una cámara de ionización (111) y del valor reconstituido de la tasa de dosis equivalente en base a las actividades en una fuente puntual calculadas ponderadas por la tabla de respuesta de la cámara de ionización (111) y la tabla de conversión en tasa de dosis equivalente detrás del espesor reducido de protección del puesto de medición;
- 15
- una tercera etapa (203) de cálculo de la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia (X) que pondera las actividades en una fuente puntual corregidas producidas en la segunda etapa (202) con unos factores de conversión en tasa de dosis equivalente detrás del espesor máximo de protección para los elementos radiactivos de la tercera biblioteca (B1-2, B2-2) y el espesor intermedio de protección para los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca (B1-2, B2-2) y que pondera el valor de tasa de dosis equivalente obtenida para los elementos radiactivos de la tercera biblioteca (B1-2, B2-2) por una parte y por otra parte para los elementos radiactivos que no pertenecen a la tercera biblioteca (B1-2, B2-2) mediante la inversa del factor de conversión en tasa de dosis equivalente de protección para 1 Bq del elemento radiactivo de referencia respectivamente calculado detrás del espesor máximo y del espesor intermedio, siendo la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia (X) igual a la suma de las actividades equivalentes así calculadas respectivamente para los elementos radiactivos que pertenecen y que no pertenecen a la tercera biblioteca (B1-2, B2-2).
- 20
- 25
- 30

2. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) según la reivindicación 1, estando los recintos de protección constituidos por dos materiales diferentes A y B, cuyos espesores de blindaje mínimos y máximos son respectivamente  $EA_{\min}$ ,  $EA_{\max}$  y  $EB_{\min}$ ,  $EB_{\max}$ , **caracterizado porque** las actividades equivalentes en elementos radiactivos de referencia (X)  $A_{\text{equiv}/A}$  y  $A_{\text{equiv}/B}$  son calculados en la tercera etapa (203) respectivamente para los materiales A y B a partir de bibliotecas ( $B_A$  1-0,  $B_A$  1-1,  $B_A$  1-2,  $B_B$  1-0,  $B_B$  1-1,  $B_B$  1-2) relativas a cada uno de los materiales A y B, siendo la actividad equivalente en elemento radiactivo de referencia igual a la más importante de las actividades equivalentes  $A_{\text{equiv}/A}$  y  $A_{\text{equiv}/B}$ , seleccionándose el espesor reducido:

- 35
- más pequeño que el espesor mínimo de blindaje  $EA_{\min}$  de material A y el espesor equivalente  $EA_{\text{equiv}}EB_{\min}$  de material A igual al espesor de material A que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo de referencia (X) el mismo factor de protección que el espesor mínimo de blindaje de un material B  $EB_{\min}$ , si la cámara de ionización (111) y la cadena de espectrometría gamma (112) están situadas detrás de un espesor de blindaje de material A; o
- 40
- más pequeño que el espesor mínimo de blindaje  $EB_{\min}$  de material B y el espesor equivalente  $EB_{\text{equiv}}EA_{\min}$  de material B igual al espesor de material B que ofrece frente a una fuente de elemento radiactivo de referencia (X) el mismo factor de protección que el espesor mínimo de blindaje de material A  $EA_{\min}$ , si la cámara de ionización (111) y la cadena de espectrometría gamma (112) están situadas detrás de un espesor de blindaje de material B.
- 45
- 50

3. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) según la reivindicación 1, **caracterizado porque** las actividades en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la primera biblioteca (B1-0, B2-0) detectados por una cadena de espectrometría gamma (112) y los límites de detección en una fuente puntual para cada uno de los elementos radiactivos de la segunda biblioteca (B1-1, B2-1) no detectados por la cadena de espectrometría gamma (112) son calculados a lo largo de la primera etapa (301), seguida de una segunda etapa (302) en la cual dichas actividades en una fuente puntual y dichos límites de detección son convertidos en fluencias fotónicas por orden de energía, calculando una tercera etapa (303) las fluencias fotónicas corregidas mediante una ponderación de las fluencias fotónicas por unos coeficientes de respuesta de la cámara de ionización (111) contenidas en la tabla de respuesta de la cámara de ionización (111), obteniéndose dichos valores reconstituidos de la tasa de dosis equivalente mediante una ponderación de dichas fluencias fotónicas por los factores de conversión en tasa de dosis equivalente generada en la cámara de ionización (111) comprendida en la tabla de conversión en tasa de dosis

- 55
- 60

equivalente detrás del espesor reducido de protección del puesto de medición.

4. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) según la reivindicación 3, **caracterizado porque** la tabla de respuesta de la cámara de ionización (111) asigna a cada banda de energía dada  $[E_i, E_f]$  el coeficiente mínimo de respuesta leído en la curva de respuesta de la cámara de ionización (111) y que corresponde al intervalo de energías  $[0, E_f]$ .

5. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el valor de tasa de dosis declarado en la cámara de ionización (111) es igual al límite de detección ( $L_{de}$ ) si la tasa de dosis medida por la cámara de ionización (111) es inferior o igual a un umbral de decisión ( $U_{de}$ ), y es declarado igual al valor neto de tasa de dosis medido por la cámara de ionización (111) incrementado con una incertidumbre ( $\xi_{de}$ ) si la tasa de dosis medida por la cámara de ionización (111) es superior al de decisión ( $U_{de}$ ).

6. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) en presencia de un ruido de fondo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** dicho umbral de decisión ( $U_{de}$ ) y dicho límite de detección ( $L_{de}$ ) son dados por la relación:

$$U_{de} = \frac{2 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) \quad \text{y} \quad L_{de} = \frac{4 \cdot F \cdot e}{t} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot D_0}{F \cdot e}} \right) ,$$

en la que:

F designa el coeficiente de calibración de la cámara de ionización (111) para el elemento radiactivo de referencia (X), expresado en Sv/Culombio;

e designa la carga del electrón;

t designa el tiempo de medición de la muestra irradiada;

$D_0$  designa la dosis generada por el ruido de fondo durante el tiempo t, expresado en Sv.

7. Procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de una muestra irradiada (100) en presencia de un ruido de fondo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el umbral de decisión ( $UD_{net}$ ) y el límite de detección ( $LD_{net}$ ) usados para el análisis de la sustracción pico por pico de los espectros adquiridos por la cadena de espectrometría gamma, en ausencia y en presencia de la muestra que hay que medir y que se expresan en número de fotones por segundo emitidos en la energía  $E_i$  que se han absorbido por completo en el detector por efecto fotoeléctrico y que provienen únicamente de la muestra, son dados por la relación:

$$UD_{net} = K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left( \frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2} \right)}$$

y

$$LD_{net} = \frac{K^2}{t_m} + 2 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{p'(a)}{t_m} + \frac{p'(a)}{t_0} + 5,042 \cdot \left( \frac{R \cdot B}{t_m^2} + \frac{R' \cdot B'}{t_0^2} \right)},$$

en la que:

K es el coeficiente de seguridad que corresponde a un error de primera y de segunda especie considerados ambos iguales;

$p'(a)$  es la superficie neta normalizada del pico de absorción total en la energía  $E_i$  del espectro de ruido de fondo determinado en ausencia de la muestra, integrada en la zona de interés  $[E_i-a, E_i+a]$ ;

a define la zona de interés  $[E_i-a, E_i+a]$  de integración de la superficie del pico de absorción total;

R es la resolución de la cadena de espectrometría en la energía  $E_i$  para el espectro en presencia de la muestra y corresponde a la anchura total a media altura medida en el pico neto de absorción total;

R' es la resolución de la cadena de espectrometría en la energía  $E_i$  para el espectro del ruido de fondo y corresponde a la anchura total a media altura medida en el pico neto de absorción total;

$t_m$  es el tiempo de adquisición del espectro en presencia de la muestra;

$t_0$  es el tiempo de adquisición del espectro del ruido de fondo;

B es el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E_i-a, E_i+a]$  del espectro adquirido en presencia de la muestra;

B' es el valor medio del fondo continuo en el intervalo  $[E_i - a, E_i + a]$  del espectro del ruido de fondo.

8. Dispositivo de medición de una muestra irradiada (100) que comprende al menos una superficie de trabajo (101) adaptada para recibir la muestra irradiada (100) y que cubre un espesor de blindaje (102) bajo el cual está dispuesto un cajón blindado (110) **caracterizado porque** el cajón blindado (110) comprende al menos una cámara de ionización (111) y un detector de espectrometría gamma (112) asociado a una cadena de espectrometría, y está dispuesto bajo el espesor de blindaje (102) sustancialmente frente a la muestra irradiada (100), estando la cámara de ionización (111) y la cadena de espectrometría conectadas al menos a una unidad de tratamiento que aplica el procedimiento de determinación de la actividad equivalente en un elemento radiactivo de referencia (X) determinado de la muestra irradiada (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

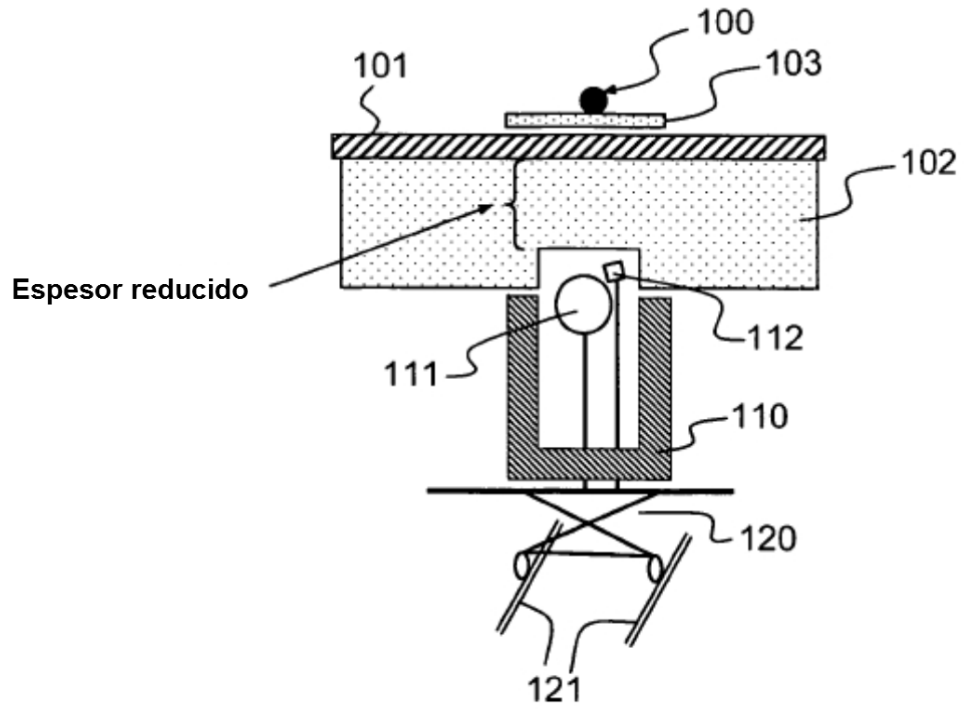


FIG.1

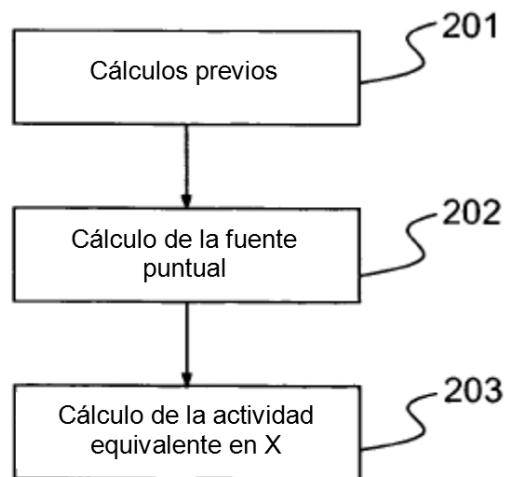


FIG.2



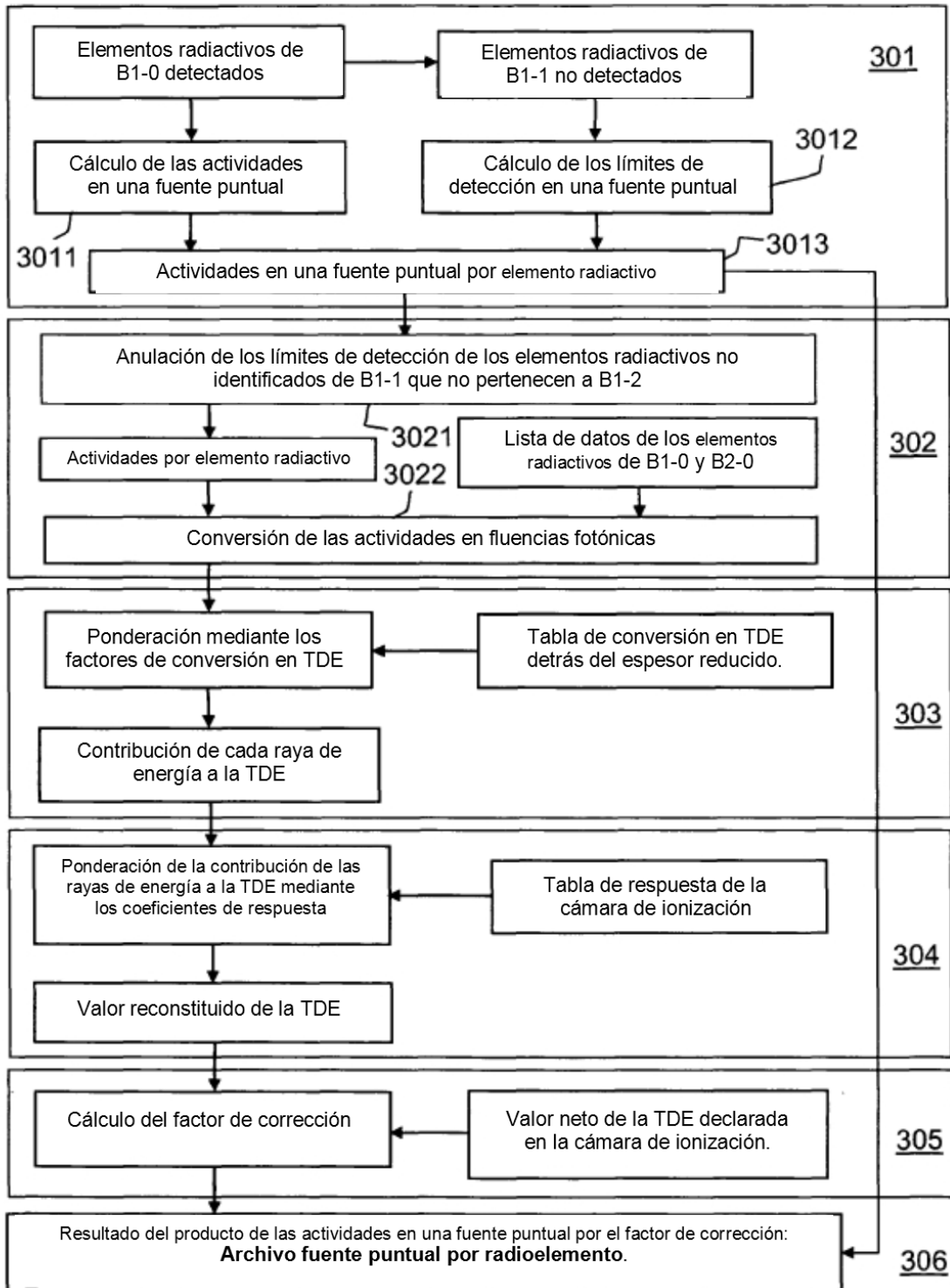


FIG.3

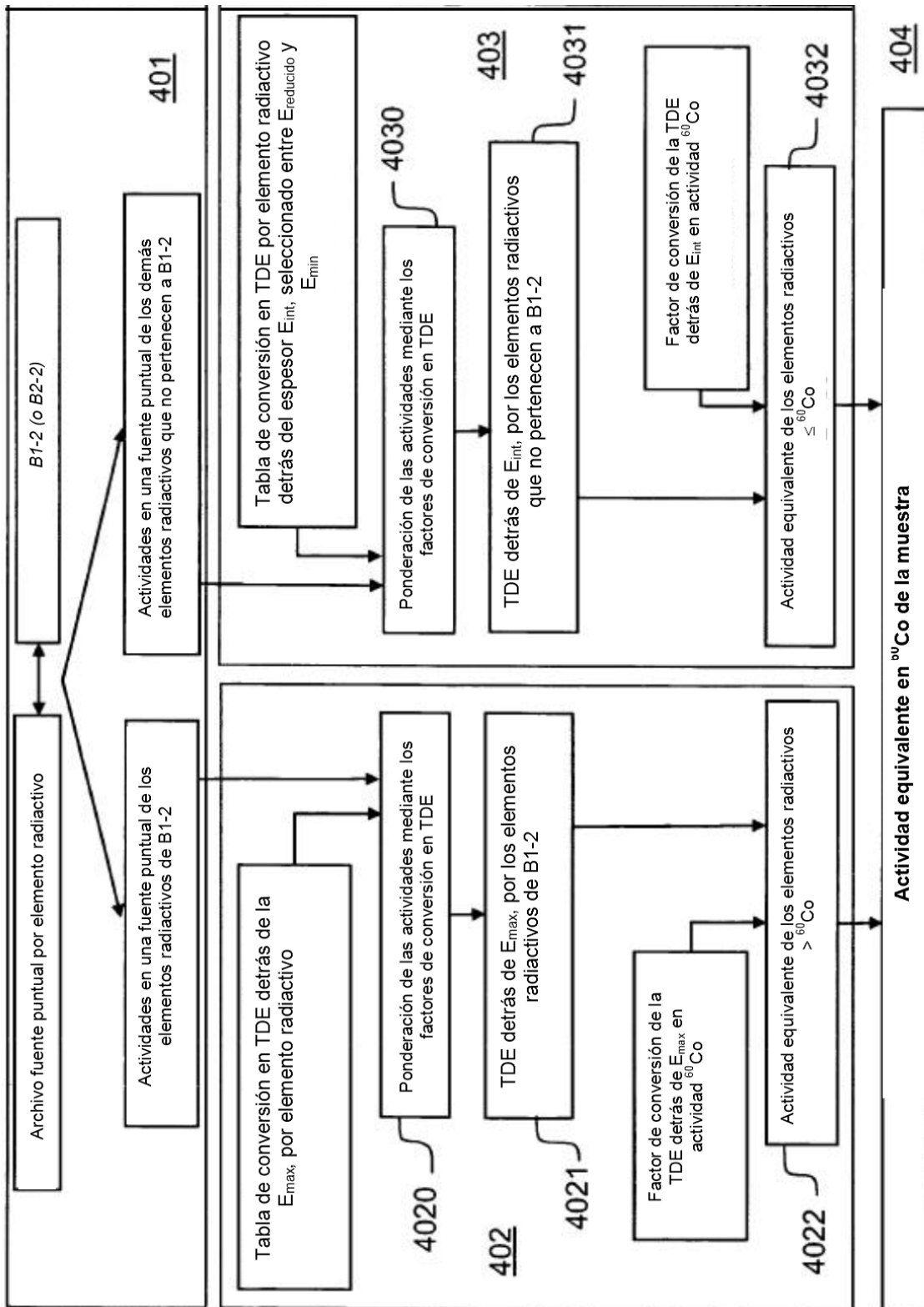


FIG.4

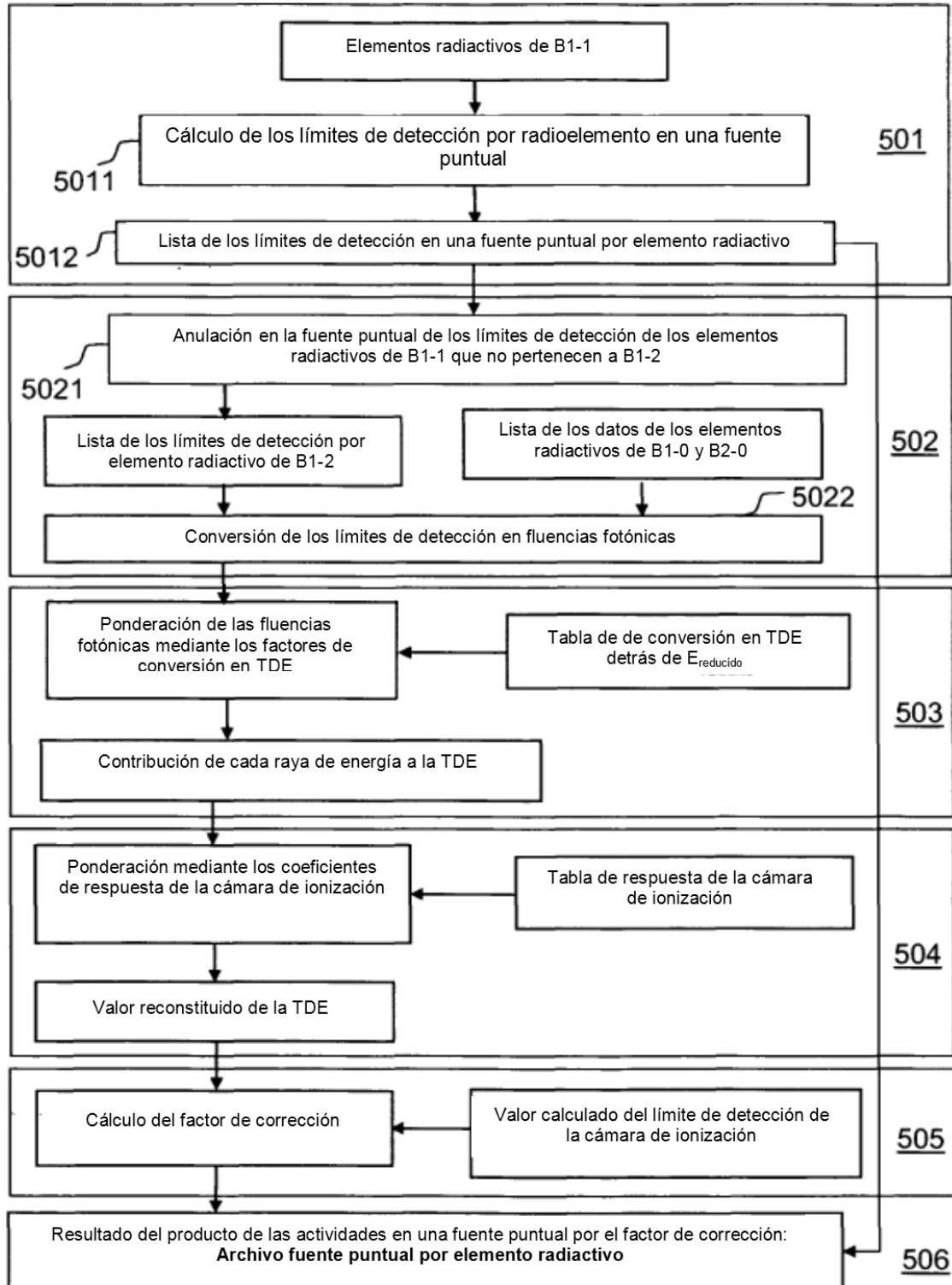


FIG.5

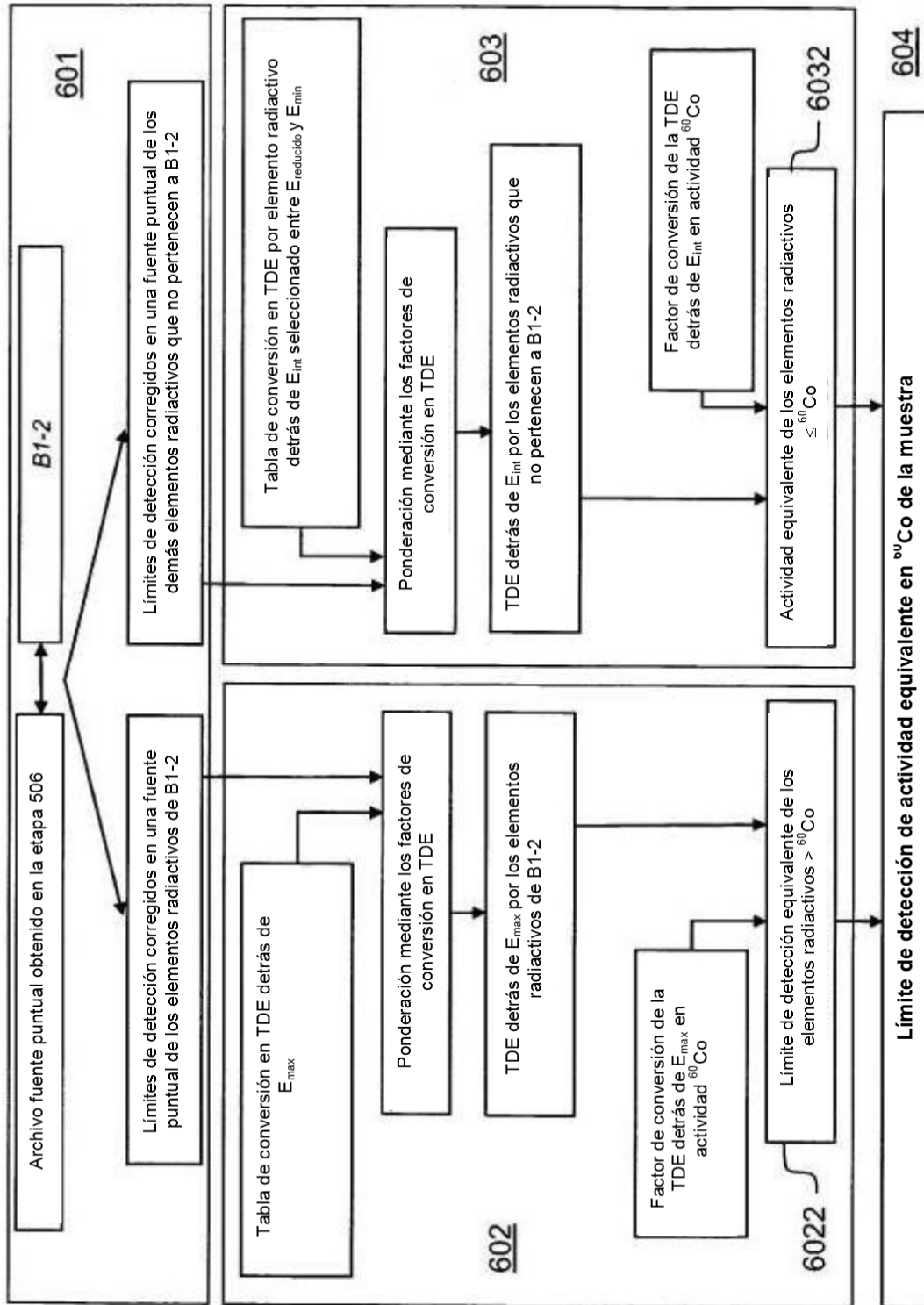


FIG.6