

PROTOCOLO PARA LA CALIBRACIÓN Y EL USO DE ACTIVÍMETROS

Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, CIEMAT

Sociedad Española de Física Médica

Sociedad Española de Medicina Nuclear

Sociedad Española de Protección Radiológica

Sociedad Española de Radiofarmacia

**RELACIÓN DE PERSONAS QUE HAN PARTICIPADO EN LA
REDACCIÓN DE ESTE DOCUMENTO**

- Domínguez Montero, Pedro** *Hospital General Univ. Gregorio Marañón, en representación de la Sociedad Española de Medicina Nuclear (SEMN).*
- Escalada, Carmen** *Hospital Puerta de Hierro.*
- Ferrer, Natividad** *Hospital Ramón y Cajal, en representación de la Sociedad Española de Física Médica (SEFM).*
- García-Toraño, Eduardo** *en representación del Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, CIEMAT (coordinador).*
- Plaza, Rafael** *Hospital Universitario La Paz, en representación de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR).*
- Rodríguez, César** *Hospital Universitario Doce de Octubre.*
- Ruiz Guijarro, José Antonio** *Instituto PET Dr. Carreras.*
- Rodríguez Zarauz, José** *Hospital Central de la Defensa, en representación de la Sociedad Española de Radiofarmacia (SERFA).*

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	EL ACTIVÍMETRO: FUNCIONAMIENTO Y EMPLEO	5
2.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	5
2.2	LA ACTIVIDAD COMO CRITERIO DE CALIDAD.....	7
2.3	COMPROBACIONES PREVIAS	8
2.3.1	Introducción	8
2.3.2	Alta tensión	8
2.3.3	Fondo de radiación.....	8
2.3.4	Precisión	8
2.3.5	Linealidad	9
2.3.6	Estabilidad.....	10
2.3.7	Documentación	10
3	FACTOR DE CALIBRACIÓN Y GEOMETRÍA DE REFERENCIA	11
3.1	INTRODUCCIÓN.....	11
3.2	DEFINICIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN.	11
3.3	GEOMETRÍA DE REFERENCIA Y FACTOR DE GEOMETRÍA.....	12
4	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN.....	13
4.1	PROCEDIMIENTO PASO A PASO	13
4.2	CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES.....	13
4.2.1	Incertidumbre debida a la actividad de la fuente de referencia (uA).....	14
4.2.2	Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo. (ub).....	14
4.2.3	Incertidumbre de la medida realizada con el activímetro (ud):.....	14
4.3	EXPRESIÓN DEL RESULTADO	15
5	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE GEOMETRÍA	15
5.1	INTRODUCCIÓN	15
5.2	PROCEDIMIENTO PASO A PASO	15
5.3	CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES.....	16
5.4	EXPRESIÓN DEL RESULTADO	17
6	MEDIDA DE UNA FUENTE PROBLEMA	18
6.1	EL PROCESO DE MEDIDA PASO A PASO.....	18
6.2	INCERTIDUMBRE DEL RESULTADO DE LA MEDIDA.....	18
6.2.1	Consideraciones generales: métodos completo y abreviado	18
6.2.2	Método completo de cálculo de la incertidumbre.....	19
6.2.3	Método abreviado de cálculo de la incertidumbre	21
6.3	EXPRESIÓN DEL RESULTADO DE LA MEDIDA	21
7	REFERENCIAS	22
8	APÉNDICES	23
8.1	APÉNDICE I. CARACTERÍSTICAS DE LOS NUCLEIDOS RADIATIVOS UTILIZADOS MÁS FRECUENTEMENTE CON INDICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES TÍPICAS.....	23
8.2	APÉNDICE II. TABLAS DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO PARA ALGUNOS RADIONUCLEIDOS DE USO HABITUAL EN MEDICINA NUCLEAR.....	25
8.3	APÉNDICE III. COMPONENTES DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA EN LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN F	26
8.4	APÉNDICE IV. COMPONENTES DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA EN LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE GEOMETRÍA G	27
8.5	APÉNDICE V. COMPONENTES DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA EN LA MEDIDA DE LA ACTIVIDAD A DE UNA FUENTE PROBLEMA.....	28
8.6	APÉNDICE VI. EJEMPLO DE CALIBRACIÓN DE UN ACTIVÍMETRO.....	29
8.6.1	Introducción	29
8.6.2	Definición del Problema	29
8.6.3	Cálculo del factor de Calibración	29
8.6.4	Cálculo de la incertidumbre	29
8.6.5	Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo del Factor de Calibración y de su incertidumbre asociada	31

8.7	APÉNDICE VII. EJEMPLO DE MEDIDA DE UNA FUENTE Y CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA COMBINADA.....	33
8.7.1	Introducción	33
8.7.2	Definición del problema	33
8.7.3	Método Completo: Cálculo de la actividad.....	33
8.7.4	Método Completo: Obtención de la incertidumbre típica combinada.....	34
8.7.5	Expresión del resultado de la medida	35
8.7.6	Método abreviado: Cálculo de la actividad.....	35
8.7.7	Método abreviado: Obtención de la incertidumbre típica combinada.....	35
8.7.8	Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo de la Actividad de una fuente y de su incertidumbre asociada (Método abreviado)	37
8.7.9	Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo de la Actividad de una fuente y de su incertidumbre asociada (Método Completo)	39
8.8	APÉNDICE VIII. CÁLCULO DEL FACTOR DE GEOMETRÍA Y SU INCERTIDUMBRE TÍPICA COMBINADA.....	41
8.8.1	Introducción	41
8.8.2	Definición del Problema	41
8.8.3	Cálculo del factor de geometría	41
8.8.4	Incertidumbre del factor de geometría.....	42
8.8.5	Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo del Factor de Geometría y de su incertidumbre asociada	43

1 Introducción

De acuerdo con la definición admitida por la Sociedad Española de Medicina Nuclear, *"La Medicina Nuclear es la especialidad médica que emplea los isótopos radiactivos, las radiaciones nucleares, las variaciones electromagnéticas de los componentes del núcleo atómico y técnicas biofísicas afines para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médicas. Incluye el estudio de los fenómenos biológicos originados por la utilización de los isótopos radiactivos, así como el empleo de ciclotrones y reactores nucleares en la producción de radionucléidos de uso médico y la aplicación de sistemas de reconstrucción de imágenes y de elaboración de datos."*

Los tres pilares en los que se fundamenta la Medicina Nuclear están constituidos por el paciente objeto de estudio, los radiofármacos o radiotrazadores (moléculas simples, macromoléculas y elementos formes que contienen átomos radiactivos) que, tras ser administrados a un paciente se distribuyen localizándose a nivel molecular, celular, tisular u orgánico y la instrumentación específica de la Medicina Nuclear. La instrumentación permite obtener, mediante detectores externos, la distribución temporal y espacial del radiofármaco administrado, para estudiar la morfología y funcionamiento de diversos órganos. En terapia se aprovechan los efectos radiobiológicos del depósito selectivo de la radiación en las células que captan el radiofármaco, para tratar de destruirlas.

Existe en nuestro país diversa legislación que regula la práctica de la Medicina Nuclear, entre la que destaca el Real Decreto de regulación de medicamentos radiofármacos de uso humano (479/1993), el que establece los criterios de calidad en Medicina Nuclear (1841/1997), y el de justificación de las exposiciones médicas (815/2001). En ellos se recoge expresamente tanto la necesidad descrita de optimizar las dosis suministradas a los pacientes, como de controlar sistemáticamente y garantizar el correcto funcionamiento de los equipos utilizados para medirlas.

El activímetro, también conocido como calibrador de dosis, es el instrumento básico para medir las actividades de los radiofármacos que han de administrarse a los pacientes, por lo que es imprescindible garantizar la fiabilidad de sus medidas.

Este documento recoge un protocolo para la calibración y el uso de activímetros, que complemente lo propuesto en el Protocolo Nacional de Control de Calidad en la Instrumentación en Medicina Nuclear.

2 El activímetro: funcionamiento y empleo

2.1 Descripción del equipo

Los modelos de activímetro mas comúnmente utilizados se basan en una cámara de ionización de tipo pozo o reentrante en cuyo interior se sitúa la fuente radiactiva que se desea medir. El gas de llenado de la cámara se encuentra a una presión bastante superior a la atmosférica, normalmente entre 10 y 20 atmósferas, con objeto de tener una buena eficiencia. Al establecer una diferencia de potencial entre los electrodos de la cámara, la corriente iónica producida al paso de la radiación es -para una energía determinada y en

primera aproximación- proporcional a la actividad de la fuente radiactiva y, mediante un proceso de calibración adecuado, puede conseguirse que la cámara indique directamente el valor de la actividad de la fuente radiactiva.

Como el espesor de las paredes de la cámara debe ser relativamente grande para soportar la presión del gas de llenado, los activímetros se utilizan preferentemente para la medida de nucleidos que emitan radiación gamma, bien directamente o a partir de un proceso de aniquilación. Debido a la colocación de la fuente en el interior del pozo la dependencia de la respuesta de la cámara a la posición y forma de la fuente se minimizan.

Su capacidad para la medida de emisores beta depende esencialmente de la energía de las partículas y se basa en la detección de la radiación de frenado producida por éstas, fundamentalmente en su interacción con las paredes de la cámara.

Además de la cámara de ionización, otros componentes de la cadena de medida son:

- Una fuente de tensión estabilizada para proporcionar la polarización adecuada a la cámara.
- Un electrómetro adecuado para la medida de las corrientes de ionización producidas en la cámara que son muy débiles, del orden de pA.
- Electrónica para el procesamiento y presentación de los datos.
- Dispositivos de visualización e impresión de resultados de la medida.
- Dispositivos para la colocación de fuentes radiactivas en contenedores de distintas formas y tamaños.
- Interfaz para selección de opciones e introducción de datos.

La respuesta característica de un activímetro en función de la energía de los fotones

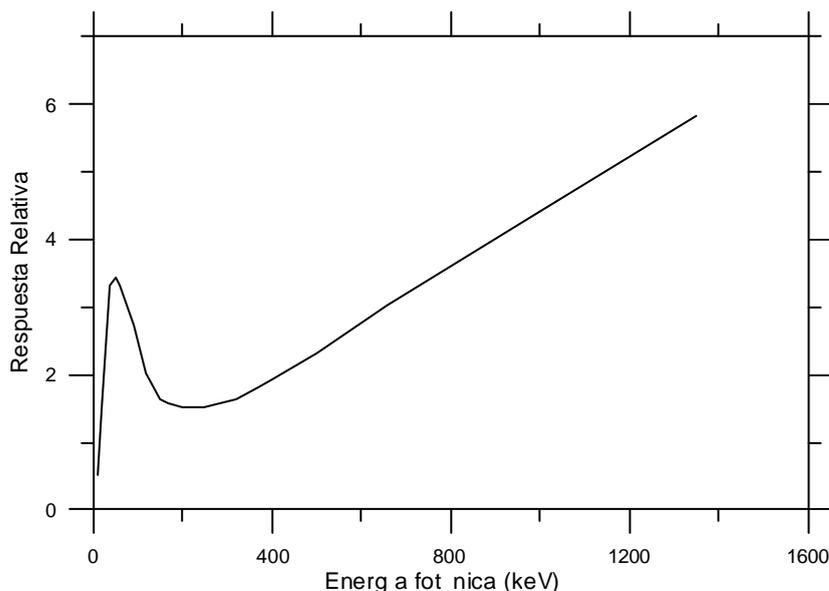


Figura 1. Curva característica de respuesta de un activímetro en función de la energía de la radiación. Los datos son simulados y no corresponden a ningún modelo concreto.

se esquematiza en la figura 1. La curva crece inicialmente hasta un máximo relativo a baja energía, alrededor de 40-45 keV, descendiendo de nuevo hasta comenzar una subida monótona por encima de unos 200 keV. El comportamiento a bajas energías está dominado por dos factores fundamentales: la atenuación de los fotones al atravesar las paredes y el mecanismo del efecto fotoeléctrico. Cuando la energía crece y la importancia de éste disminuye, se produce una disminución de la eficiencia, hasta que comienza a crecer de nuevo debido a la contribución de los electrones Compton producidos en la interacción de los fotones con las paredes de la cámara y el gas de llenado.

Existen modelos de activímetro especializados para la detección de emisores de partículas beta. En ellos, el elemento detector es un cristal de yoduro de sodio optimizado para la medida de la radiación de frenado producida por las partículas. En este caso el detector funciona como un contador de impulsos y no como un medidor de corriente, con lo que los componentes electrónicos y de procesamiento de la señal son distintos, e incluyen frecuentemente una cierta capacidad de discriminación en energías.

2.2 La actividad como criterio de calidad

La Directiva 97/43 de la CEE conocida como “Directiva de Exposiciones Médicas” (DEM) define los Niveles de Referencia de Dosis (NRD) en los siguientes términos:

"Se entiende por nivel de referencia para diagnóstico un nivel de dosis establecido para exámenes tipo en grupos de pacientes de talla estándar o maniqués estándar".

Los NRD contribuyen a la optimización de la protección de los pacientes procurando evitar que sean expuestos a dosis innecesariamente altas. En medicina nuclear diagnóstica, los NRD expresan actividades administradas (MBq) en lugar de dosis absorbidas por lo que tanto en los procesos de preparación de los radiofármacos como en su fraccionamiento en monodosis para ser administradas a los pacientes es primordial la utilización del activímetro o calibrador de dosis con objeto de ajustar la actividad que se inyectará al paciente a la recomendada.

Esta actividad administrada de referencia (o su equivalente el NRD) constituye un valor orientativo que se corresponde con la actividad que es necesario administrar para obtener una buena imagen en el marco de un procedimiento diagnóstico estándar de medicina nuclear. Para ajustarse a estos valores en la práctica es necesario, además de una buena práctica médica, el funcionamiento correcto de la gammacámara y la calibración del activímetro. Especial atención merecen los pacientes pediátricos, en los que el nivel de actividad administrada debe ser un porcentaje de la utilizada en los adultos, lo que exige un especial cuidado en su medida.

En el apéndice I se recogen las características más importantes de los nucleidos radiactivos más frecuentemente usados en Medicina Nuclear, así como una indicación de las actividades típicas utilizadas.

2.3 Comprobaciones previas

2.3.1 *Introducción*

En el Protocolo Nacional de Control de Calidad en la Instrumentación en Medicina Nuclear se describe en detalle las pruebas de aceptación de este tipo de equipos antes de ser declarados listos para su uso clínico, por lo que se indican a continuación solamente los aspectos básicos.

2.3.2 *Alta tensión*

Si el activímetro dispone de la posibilidad de comprobar la alta tensión aplicada al detector, deberá verificarse que se corresponde con la recomendada por el fabricante. Para cualquier medida posterior, se comprobará la constancia del valor utilizado en la calibración.

2.3.3 *Fondo de radiación*

La existencia de un fondo de radiación en la zona donde esté situado el activímetro da lugar a una corriente de ionización que debe descontarse de la medida de cualquier fuente. La medida del fondo radiactivo deberá realizarse a menudo, al menos una vez al día, aunque la frecuencia de esta comprobación dependerá de la variación temporal del fondo en la zona de la medida. Algunos activímetros disponen de la capacidad de realizar una medida larga de fondo que luego se sustrae automáticamente de cada medida posterior.

Hay que prestar atención al hecho de que cualquier cambio de blindaje del activímetro o en sus inmediaciones puede modificar el fondo y probablemente también la respuesta general del equipo, cuya calibración deberá hacerse de nuevo. Un aumento del blindaje producirá en principio una disminución del fondo de radiación externo al equipo, pero puede también dar lugar a un cambio en la respuesta de éste debido a la mayor contribución de fotones retrodispersados en el blindaje.

La existencia de fuentes de radiación distintas de la que se está midiendo en las cercanías del activímetro debe también vigilarse cuidadosamente para evitar errores significativos en la medida.

Otra causa posible de incremento significativo del fondo es la contaminación del portamuestras o del recubrimiento que protege el interior de la cámara, que se fabrica habitualmente con metacrilato.

2.3.4 *Precisión*

Para comprobar el grado de dispersión de los valores obtenidos en las medidas hechas por el equipo se realizarán medidas repetidas de una misma fuente, de un nucleido cuya actividad no decaiga significativamente durante la medida. Se realizará una serie de al menos 10 medidas colocando tras cada una de ellas la muestra en la posición de medida y se caracterizará el grado de dispersión mediante el cálculo de la desviación estándar, cuya expresión viene dada por:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

donde:

- n es el número de medidas realizadas
- z_k es el valor obtenido en la k -ésima medida
- \bar{z} es el valor medio de la serie de medidas.

2.3.5 *Linealidad*

Para muestras de actividades altas los activímetros dejan de comportarse en forma lineal, es decir no suministran una respuesta proporcional a la actividad. Ello se debe a variaciones en la recombinación de la carga creada en el volumen activo de la cámara de ionización. Este efecto depende del radionucleido medido y debe evaluarse para determinar el intervalo de actividad en el cual el activímetro puede utilizarse en forma fiable y establecer las correcciones que sea necesarias.

Algunos de los métodos mas utilizados para evaluar la linealidad de los activímetros son los siguientes:

- La medida de una fuente cuya actividad sea del mismo orden que la de la fuente más activa que vaya a emplearse en la práctica. Los valores de actividad indicados por el activímetro tomados a intervalos de tiempo determinados deberán corresponderse con el decaimiento radiactivo del nucleido que compone la fuente. El uso de coeficientes numéricos, la representación semilogarítmica o el ajuste funcional permitirán determinar la zona de linealidad del aparato y la magnitud de las posibles desviaciones de ésta. Esta técnica es adecuada para radionucleidos de vida media muy corta. Se realizarán como mínimo 8 medidas diferentes. En el apéndice II se presentan tablas con coeficientes numéricos que permiten realizar el cálculo del decaimiento para los radionucleidos usados más habitualmente. La figura 2 muestra la desviación de la respuesta de un activímetro que no se comporta en forma lineal cuando se representa en forma semilogarítmica la variación de la actividad indicada de una fuente con el tiempo.
- La medida de una fuente de iguales características que la mencionada en el apartado anterior y de alícuotas cuya actividad cubra el intervalo que se pretende estudiar. Para ello se utilizarán métodos que garanticen una relación suficientemente precisa entre las actividades de la fuente original y sus alícuotas (balanzas, pipetas..). Las incertidumbres en la preparación de alícuotas deberán tenerse en cuenta en el resultado. Se tendrá también en cuenta la posible influencia de la variación geométrica debida al cambio de volumen de la fuente. Esta técnica es adecuada para radionucleidos de vida media más larga.
- La medida de una fuente de iguales características que la anterior y el uso de blindajes que se interponen entre la fuente y el activímetro para producir una atenuación cuyo valor se conoce con una incertidumbre suficientemente baja.

2.3.6 *Estabilidad*

Para la comprobación de la estabilidad a largo plazo, se medirá diariamente una fuente radiactiva de referencia, registrando el resultado de la medida y comparando el valor obtenido, una vez corregido por decaimiento radiactivo, con las medidas anteriores para identificar cualquier comportamiento anómalo. A partir del registro histórico de las medidas, podrá estimarse la contribución de incertidumbre debida a este efecto, según se detalla posteriormente en el apartado de calibración.

2.3.7 *Documentación*

Se deberá mantener un registro de todas las medidas de comprobación realizadas, incluyendo las características y la actividad de las muestras medidas, así como la fecha de realización. En lo posible, las medidas de estabilidad se presentarán preferiblemente en forma de tablas o gráficos.

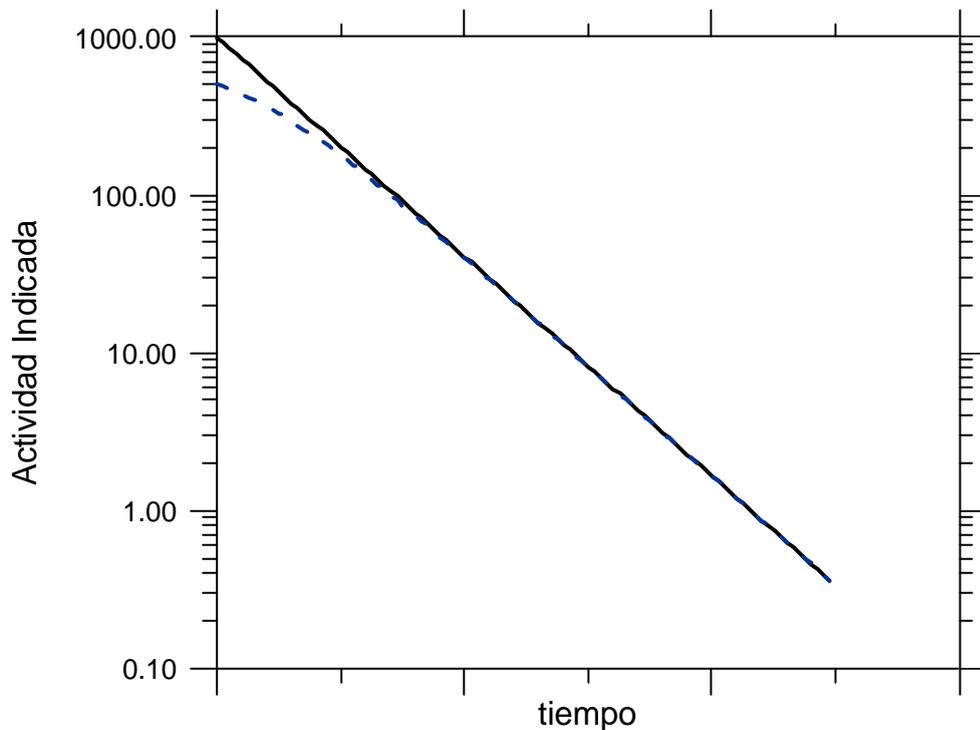


Figura 2 Comportamientos lineal (línea continua) y no lineal (discontinua) de un activímetro observados al seguir el decaimiento de una fuente radiactiva

3 Factor de Calibración y Geometría de Referencia

3.1 Introducción.

Los activímetros son calibrados normalmente por el fabricante siguiendo procedimientos que incluyen el uso de fuentes radiactivas certificadas. La calibración individual de los equipos es necesaria porque es imposible para los fabricantes garantizar que todas las unidades de un determinado modelo de activímetro tengan respuestas idénticas. La trazabilidad de las medidas puede garantizarse o bien mediante una calibración directamente realizada por el laboratorio nacional o bien por terceras partes cuya trazabilidad al laboratorio nacional haya sido demostrada. Alternativamente, el usuario puede calibrar su equipo siempre que siga el procedimiento indicado en este protocolo, utilice fuentes trazables y cumpla las condiciones que reglamentariamente se determinen.

La respuesta de un activímetro es función de una serie de variables, cada una de las cuales puede dar lugar a errores e introducir incertidumbres significativas en el proceso de calibración. Los factores principales que hay que considerar cuidadosamente se describen a continuación:

Blindaje. La necesidad de disminuir la corriente de fondo de la cámara hace necesario en muchas ocasiones el uso de un blindaje alrededor del equipo de medida. Este blindaje puede alterar la respuesta de la cámara si es significativamente distinto del existente en el momento de la calibración.

Pureza radionucleídica. Ningún radionucleido es 100% químicamente puro. La existencia de otros radionucleidos puede influir significativamente en la calibración y su efecto debe tenerse en cuenta.

Sistemas generadores. Cuando se calibra un activímetro para muestras que contienen sistemas con dos nucleidos padre-hijo (Ej.: ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$), el estado de equilibrio entre ellos deberá tenerse en cuenta al establecer el factor de calibración.

Electrónica. Los modernos activímetros incluyen un conjunto de sistemas electrónicos que realizan diversas funciones, como cálculos y presentación de resultados. Normalmente, están sujetos a mantenimiento propio, y su comprobación se realiza diariamente por medio de las medidas de la fuente de constancia.

Geometría de la medida, cuya importancia se discute posteriormente.

3.2 Definición del factor de calibración.

El proceso de calibración se basa en la medida de una serie de fuentes de referencia previamente calibradas y la comparación con los resultados indicados por el activímetro con los valores de actividad certificados. Su objeto es la determinación del factor de calibración f , definido como:

$$f = \frac{A}{A_i}$$

donde:

A Valor de referencia para la actividad de la fuente

A_i Valor neto indicado por el activímetro (= lectura - fondo)

El factor de calibración¹ es un número sin dimensiones, corresponde a un nucleido determinado y está ligado al concepto de geometría de referencia que se describe a continuación.

3.3 Geometría de Referencia y Factor de Geometría.

La respuesta de los activímetros depende de las condiciones de la medida, de entre las que cabe destacar:

- el tipo del contenedor (ampolla, vial, jeringa...).
- el material de que está construido éste (plástico, vidrio...), y sus dimensiones (espesor de paredes, homogeneidad de éstas, etc.).
- el volumen y composición de la muestra.
- la posición del contenedor en el interior del activímetro.

Esta dependencia es particularmente importante para el caso de los emisores gamma de baja energía, para los que pequeños cambios en las condiciones de la medida pueden dar lugar a grandes variaciones en la respuesta del activímetro para un mismo valor de la actividad medida. A cada conjunto posible de condiciones de medida, le corresponderá por lo tanto un factor de calibración propio. Para simplificar el proceso de calibración, es conveniente definir para cada nucleido una geometría de referencia, caracterizada por un conjunto de parámetros que correspondan a las condiciones experimentales más adecuadas para su calibración. A esa geometría le corresponderá un factor de calibración f . Para cualquier otra geometría, el factor de calibración deberá corregirse con un factor de geometría g que tiene en cuenta la diferente respuesta del activímetro al cambiar la geometría de referencia.

$$g = \frac{\text{valor indicado por el activímetro en la geometría de referencia}}{\text{valor indicado por el activímetro en la geometría de la medida}}$$

El valor del factor de calibración corregido vendrá dado por:

$$f_c = f \cdot g$$

siendo el valor de g en la geometría de referencia igual a la unidad.

¹ De acuerdo con la terminología de calibración señalada en la guía 31-0:1992 (E) de ISO un factor de calibración no tiene dimensiones, mientras que un coeficiente de calibración se expresa como la razón del mensurando por unidad del valor indicado (tiene dimensiones).

4 Determinación del Factor de Calibración

4.1 Procedimiento paso a paso

El proceso de determinación del factor de calibración para un activímetro, un nucleido y una geometría de referencia dados consta de los siguientes pasos:

1. La medida del fondo radiactivo b .

Para la medida del fondo se realizará una serie de medidas consecutivas, y se tomará la media de todos ellos como mejor estimador del valor de b .

2. La colocación de una fuente de referencia certificada, de actividad A , en una posición fija y reproducible.

Se cuidará especialmente que el conjunto formado por el contenedor de la muestra que se mide y el dispositivo utilizado para colocarlo dentro del activímetro definan una geometría que pueda ser reproducida en medidas posteriores.

3. La medida del valor de actividad indicado por el activímetro d .

Los pasos 2) y 3) se repetirán varias veces, colocando cada vez de nuevo la muestra en el activímetro. El valor medio de la serie de medidas obtenidas proporcionará el valor de d . El número de medidas realizadas deberá ser tal que la desviación estándar de la media de la serie de medidas sea comparable o inferior a la incertidumbre típica de A .

4. El valor del factor de calibración f se obtendrá como:

$$f = \frac{A}{d - b}$$

Hay que recalcar que este factor de calibración solo es válido para un conjunto de nucleido y geometría idénticos a los usados en su determinación. Para cualquier otra geometría se deberá calcular el factor de geometría g en la forma que se indica posteriormente. Si se utiliza otro nucleido, deberá calcularse un factor distinto repitiendo todo el proceso.

Se utilizarán siempre fuentes de referencia certificadas cuyas actividades sean trazables a los patrones nacionales de actividad o, en su defecto, a patrones nacionales de otros países. Se procurará que se asemejen lo más estrechamente posible a las muestras que se vayan a medir posteriormente.

4.2 Cálculo de incertidumbres.

La incertidumbre típica combinada uf_c se calcula a partir de la expresión general para el cálculo de incertidumbres:

$$uf_c^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 u_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 u_b^2$$

donde u_A , u_d y u_b son las incertidumbres típicas de la actividad A , el valor indicado d , y el fondo b respectivamente.

Operando, se obtiene la expresión:

$$uf_c = \sqrt{\left(\frac{1}{(d-b)}\right)^2 uA^2 + \left(\frac{A}{(d-b)^2}\right)^2 (ud^2 + ub^2)}$$

Las componentes individuales se obtienen de la forma siguiente:

4.2.1 ***Incertidumbre debida a la actividad de la fuente de referencia (uA).***

Se obtiene directamente del certificado de calibración de la fuente. Debe corresponder a $k=1$.

4.2.2 ***Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo. (ub).***

La incertidumbre asociada se determina a partir de la desviación estándar de la media del conjunto de medidas realizadas para determinar el fondo. Para n medidas, la incertidumbre viene dada por:

$$ub = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (b_k - \bar{b})^2}$$

4.2.3 ***Incertidumbre de la medida realizada con el activímetro (ud):***

Consta a su vez de los siguientes componentes:

Incertidumbre debida a la resolución del visor digital (ul):

Si la resolución del indicador digital es ΔA , la incertidumbre debida a este efecto es la que se deriva de una distribución rectangular:

$$ul = \sqrt{\frac{(\Delta A)^2}{12}} = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$$

Incertidumbre debida a la repetibilidad o precisión de la medida. (ur) Su valor se determina a partir de la serie de medidas realizadas para el cálculo de d . Se toma para ello la desviación estándar de la media de la serie:

$$ur = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

Incertidumbre debida a la reproducibilidad en la posición de la muestra. Se determina conjuntamente con el valor anterior si la serie de medidas se realiza colocando tras cada medida la fuente problema.

La combinación cuadrática de las dos componentes proporciona el valor de ud :

$$ud = \sqrt{ur^2 + ul^2}$$

4.3 Expresión del resultado

Conocidos el valor del factor de calibración (f) y el de la incertidumbre típica combinada (uf_c), el resultado obtenido se expresará como:

$$f \pm k \cdot uf_c$$

detallando el valor de k que se ha utilizado.

5 Determinación del factor de geometría

5.1 Introducción

El factor de calibración f es válido solamente para las medidas realizadas en la misma configuración geométrica en la que se obtuvo. Para cualquier cambio de ésta, deberá determinarse el factor de geometría correspondiente.

5.2 Procedimiento paso a paso

Si el activímetro ha sido calibrado previamente en una geometría definida como de referencia el proceso consiste en:

1. La medida de la fuente en la geometría de referencia.
2. La transferencia de toda o una parte de la disolución radiactiva desde el contenedor de la fuente de referencia a la nueva geometría. Deberá hacerse de manera que pueda determinarse con precisión la fracción p de la actividad inicial que se ha transferido al nuevo contenedor (mediante pipeteo, pesada, etc.). Alternativamente, la nueva geometría puede consistir en una simple variación de la posición de la fuente radiactiva en el interior del activímetro, sin que exista un cambio de contenedor ni otro tipo de manipulación de éste.
3. La adición, si fuese necesario, de disolución portadora para alcanzar un volumen determinado.
4. La medida de la fuente en la nueva geometría.

El valor del factor de geometría vendrá dado por:

$$g = p \frac{(c - b)}{(d - b)}$$

donde:

- p es la fracción de la actividad inicial que se ha transferido a la geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección.
- c es el valor indicado por el activímetro en la geometría de referencia, sin descontar el fondo.

- d** es el valor indicado por el activímetro en la geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección, sin descontar el fondo.
- b** es el fondo radiactivo.

5.3 Cálculo de incertidumbres.

La incertidumbre combinada del factor de corrección se calculará a partir de sus componentes:

$$u_{g_c}^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)^2 up^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial c}\right)^2 uc^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial d}\right)^2 ud^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial b}\right)^2 ub^2$$

de donde se sigue:

$$u_{g_c} = \sqrt{\left(\frac{c-b}{d-b}\right)^2 up^2 + \left(\frac{p}{d-b}\right)^2 uc^2 + \left(\frac{p(c-b)}{(d-b)^2}\right)^2 ud^2 + \left(\frac{p(c-d)}{(d-b)^2}\right)^2 ub^2}$$

- Las incertidumbres típicas de las lecturas del activímetro uc y ud que corresponden a las medidas en la geometría de referencia y la nueva geometría, respectivamente, se calculan en forma idéntica a lo indicado en 4.2.3.
- La incertidumbre típica debida a la variación del fondo radiactivo ub se calcula análogamente a como se indicó en 4.2.2, esto es como la desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar **b**.
- La incertidumbre en la determinación de la alícuota (up) transferida desde la fuente de referencia a la nueva geometría depende de la forma en que se ha realizado, por lo que se dan a continuación unas normas generales y se detalla para el caso de una determinación gravimétrica.
 1. Si se ha transferido un volumen determinado por medio de una pipeta calibrada, la incertidumbre estará especificada por el fabricante y se tomará para $k=1$.
 2. Si la transferencia se realiza por medio de una jeringa graduada, se estimará la incertidumbre típica a partir de los datos proporcionados por el fabricante o determinados por el usuario.
 3. Cuando no exista transferencia de la fuente radiactiva de un contenedor a otro, sino cambio de posición de una misma fuente en el interior del activímetro, se tendrá $p=1$ y la incertidumbre asociada será $up=0$.
 4. Si el control de la alícuota transferida se ha realizado gravimétricamente, el procedimiento es el siguiente:

Supóngase que se parte de una geometría de referencia definida a partir de un vial cuya masa de disolución activa se conoce previamente y es:

$$m_A \pm um_A(k = 1)$$

Se transfiere una parte de la masa activa a una jeringuilla. Para determinar la masa (y por lo tanto la actividad) transferida se sigue el siguiente procedimiento:

a) Se determina mediante una balanza la masa de la jeringa vacía:

$$m_j \pm um_j$$

donde la incertidumbre um_j se obtiene a partir de la incertidumbre indicada por el fabricante de la balanza, cuyo valor es normalmente del orden de la última cifra significativa indicada.

b) Se transfiere una fracción de la masa activa a la jeringa y se determina la nueva masa:

$$m_{jA'} \pm um_{jA'}$$

c) La masa transferida será:

$$m_t = m_{jA'} - m_j$$

y su incertidumbre vendrá dada por:

$$um_t = \sqrt{(um_{jA'}^2 + um_j^2)}$$

d) El valor de la alícuota p viene dado por:

$$p = \frac{m_t}{m_A}$$

y su incertidumbre típica up se calcula como:

$$\begin{aligned} up &= \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial m_t}\right)^2 um_t^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial m_A}\right)^2 um_A^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_A}\right)^2 um_t^2 + \left(\frac{m_t}{m_A^2}\right)^2 um_A^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{m_A}\right)^2 (um_{jA'}^2 + um_j^2) + \left(\frac{m_t}{m_A^2}\right)^2 um_A^2} \end{aligned}$$

5.4 Expresión del resultado

Conocidos el valor del factor de geometría (g) y el de la incertidumbre típica combinada (ug_c), el resultado obtenido se expresará como:

$$g \pm k \cdot ug_c$$

detallando el valor de k que se ha utilizado.

6 Medida de una fuente problema

6.1 El proceso de medida paso a paso

El proceso de medida de la actividad de una fuente problema consta de los siguientes pasos:

1. La colocación de la fuente en la posición de medida en el interior del activímetro.
2. La medida del valor de actividad indicado por el activímetro.
3. La corrección del resultado por el fondo radiactivo
4. La corrección del valor neto por el factor de calibración.
5. La corrección por el factor de geometría cuando la geometría de la medida no sea la definida como "geometría de referencia" en el proceso de calibración.
6. El cálculo de la incertidumbre del resultado.

La actividad A de la fuente vendrá dada por la expresión:

$$A = (d - b) \cdot f_c = (d - b) \cdot f \cdot g$$

donde:

- d es la lectura indicada por el activímetro sin descontar el fondo .
- b es el valor del fondo.
- f_c es el factor de calibración corregido por geometría.
- f es el factor de calibración para la geometría de referencia.
- g es el factor de corrección para la geometría de la medida ($g=1$ para la geometría de referencia).

6.2 Incertidumbre del resultado de la medida

6.2.1 Consideraciones generales: métodos completo y abreviado

La incertidumbre típica combinada del resultado (u_{A_c}) se obtiene a partir de sus componentes mediante la expresión general de cálculo de incertidumbres (guía CEM/ISO 1998):

$$u_{A_c}^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial b}\right)^2 u_b^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial f}\right)^2 u_f^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial g}\right)^2 u_g^2$$

donde u_d , u_b , u_f y u_g son las incertidumbres típicas del valor indicado d , del fondo b , del factor de calibración f y del factor de geometría g respectivamente.

Desarrollando esta expresión se llega a:

$$uA_c = \sqrt{(f \cdot g)^2 [ud^2 + ub^2] + [(d-b) \cdot g]^2 uf^2 + [(d-b) \cdot f]^2 ug^2}$$

Se obtiene una expresión más sencilla si se utilizan las incertidumbres relativas u_r definidas como la relación entre el valor de la incertidumbre y el valor de la magnitud:

$$uY_r = \frac{uY}{Y}$$

Utilizando esta notación y simplificando se llega a la expresión que proporciona la incertidumbre típica relativa sobre A , uA_r en función de las incertidumbres típicas relativas de los componentes:

$$uA_r = \sqrt{[uf_r^2 + ug_r^2 + u(d-b)_r^2]}$$

con:

$$u(d-b)_r^2 = \frac{u_d^2 + u_b^2}{(d-b)^2}$$

En las condiciones de medida habituales, un cálculo riguroso de la incertidumbre resultaría muy tedioso, pues exigiría realizar un número excesivo de medidas y cálculos que por razones de tiempo son inviables en muchos casos. Por ello, se describe en primer lugar el método completo de cálculo de incertidumbres y se propone a continuación un método abreviado que puede ser usado en condiciones de rutina.

6.2.2 Método completo de cálculo de la incertidumbre

6.2.2.1 Incertidumbre del factor de calibración

La incertidumbre típica uf del factor de calibración se determina conjuntamente con éste durante el proceso de calibración del activímetro y por lo tanto, se toma directamente del certificado de calibración ($k=1$).

6.2.2.2 Incertidumbre de la lectura

La incertidumbre típica ud del valor indicado se obtiene a partir de la combinación cuadrática de las varianzas de sus componentes:

$$ud = \sqrt{ur^2 + ul^2 + ue^2}$$

Repetibilidad o precisión de la medida. (ur) Su valor se determina realizando una serie de medidas consecutivas y calculando la desviación estándar de la media de la serie:

$$ur = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

Reproducibilidad de la posición de la muestra. Se determina conjuntamente con el valor anterior si la serie de medidas se realiza colocando tras cada medida la fuente problema.

Resolución del visor digital (ul):

Si la resolución del indicador digital, entendida como la unidad del dígito menos significativo, es ΔA , la incertidumbre típica debida a este efecto es la que se deriva de una distribución rectangular:

$$ul = \sqrt{\frac{(\Delta A)^2}{12}} = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$$

Factor de estabilidad a largo plazo (ue). La componente asociada se calculará a partir de las medidas obtenidas con la fuente de constancia. Se determinará en primer lugar el valor de la componente correspondiente a las medidas de constancia y se estimará a continuación su repercusión en una medida cualquiera.

Para el cálculo de la incertidumbre que se deriva de la estabilidad a largo plazo existen varias alternativas:

- La forma más directa de estimarla es a partir de la desviación estándar de la serie de medidas $\{z_k\}$ realizadas con la fuente de constancia:

$$uZ = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}$$

en esta expresión, $\{z_k\}$ representa el conjunto de medidas realizadas con la fuente y Z el valor medio obtenido, corregido por decaimiento.

- Si se conocen los límites de variación superior e inferior (zs , zi) de la serie de valores, otra alternativa posible es tomar una incertidumbre típica dada por:

$$uZ = (zs - zi) / \sqrt{12}$$

En ambos casos la incertidumbre típica relativa debida al factor de estabilidad será:

$$uZ_r = \frac{uZ}{Z}$$

Se puede calcular ahora la componente debida a la estabilidad para el caso de la medida de la muestra problema. En primera aproximación, la incertidumbre relativa sobre el valor d medido será igual a la correspondiente a la fuente de constancia, por lo que la incertidumbre típica sobre d debida a este efecto se podrá calcular como:

$$ue = ue_r \cdot d \approx uZ_r \cdot d = d \cdot \frac{uZ}{Z}$$

6.2.2.3 *Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo*

La incertidumbre asociada se determina a partir de la desviación estándar de la media del conjunto de medidas realizadas para determinarlo:

$$ub = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (b_k - \bar{b})^2}$$

6.2.2.4 *Incertidumbre del factor de geometría*

La incertidumbre correspondiente a g , (ug) se calcula al determinar este factor, usualmente dentro del proceso de calibración del activímetro. Para los cálculos se tomará siempre el valor correspondiente a $k=1$.

6.2.3 *Método abreviado de cálculo de la incertidumbre*

En el procedimiento abreviado se suprimen las medidas repetitivas descritas para el cálculo de la incertidumbre sobre la lectura y el fondo. La hipótesis básica es que las incertidumbres del factor de calibración, del factor de geometría y del factor de estabilidad dominan claramente sobre las demás componentes.

6.2.3.1 *Incertidumbres del factor de calibración y de geometría*

Las incertidumbres típicas uf del factor de calibración y ug del factor de geometría se obtienen conjuntamente con los correspondientes factores como se indicó en 6.2.2.

6.2.3.2 *Incertidumbre de la lectura*

En este caso se admite la simplificación de considerar únicamente las componentes debidas a la estabilidad a largo plazo y a la resolución del visor digital, por lo que la incertidumbre típica ud del valor indicado se obtiene como:

$$ud = \sqrt{ul^2 + ue^2}$$

expresión en la que ul y ue se calculan como se indicó en 6.2.2.. Nótese que los valores de ambas componentes pueden calcularse de antemano pues la resolución del visor digital es una característica del equipo, y la estabilidad, caracterizada en la forma en que se indicó, no variará en el tiempo mientras el equipo sea estable, al haberse definido como una desviación estándar, la cual no debe variar significativamente con el número de medidas.

6.2.3.3 *Incertidumbre debida a la variación del fondo radiactivo*

Por las mismas razones anteriores, la incertidumbre asociada a la variación del fondo puede calcularse previamente y no necesita determinarse para cada medida.

6.3 **Expresión del resultado de la medida**

Conocidos el valor de la actividad (A) y el de la incertidumbre típica combinada (uA_c), el resultado obtenido se expresará como:

$$A \pm k \cdot uA_c$$

detallando el valor de k que se ha utilizado.

7 Referencias

ANSI N42.13-1986, "*Calibration and usage of "dose calibrator" ionization chambers for the assay of radionuclides*"

A.Parkin et al., "*Protocol for Establishing and Maintaining the Calibration of Medical Radionuclide Calibrators, and their Quality Control*", Proceedings of the joint IPSM/BIR Meeting on Quality Standards in Nuclear Medicine, BIR, London, February 1992. Institute for Physical Sciences in Medicine Report N0.65 (1992)60.

CEM/ISO 98, "*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.*" (Versión Española de la Guía ISO). Ministerio de Fomento. Centro Español de Metrología. (1998)

IEC 61303 (Ed. 1.0) "*Medical Electrical Equipment- Radionuclide Calibrators- Particular Methods for Describing Performance*", International Electrotechnical Commission, (1994)

IAEA-TECDOC-602/S, "*Control de Calidad de los Instrumentos de Medicina Nuclear, 1991*", Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena (1996).

Real Decreto 1841/1997 de 5 de Diciembre por el que se establecen los criterios de calidad en Medicina Nuclear.

National Council on Radiation Protection and Measurements, "*A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures*", Report NCRP nº 58, 2ª edición, 1985, Bethesda, MD.,EEUU.

Sociedad Española de Física Médica, Sociedad Española de Medicina Nuclear y Sociedad Española de Protección Radiológica. "*Protocolo Nacional de Control de Calidad en la Instrumentación en Medicina Nuclear*".1999.

Washington State Department of Health, (EEUU) DOH-322-016 (Rev. 3/96), Pg. 25-30, "*Method for Calibration of Dose Calibrator*".

8 Apéndices

8.1 APÉNDICE I. Características de los nucleidos radiactivos utilizados más frecuentemente con indicación de las actividades típicas.

Nucleido	Modo de Desintegración	T _{1/2}	Emisiones g más importantes:		Actividades típicas administradas (MBq)	
			Energía (keV)	Número de fotones por 100 desintegraciones	Diagnóstico	Terapia
¹¹ C	β ⁺	20,38 min	511	200	150-370	
¹³ N	β ⁺	9,965 min	511	200	150-370	
¹⁵ O	β ⁺	2,037 min	511	200	150-370	
¹⁸ F	β ⁺ , c.e.	1,829 h	511	196	150-370	
⁵¹ Cr	c.e.	27,70 d	320,1	9,8	3,7-5	
⁶⁷ Ga	c.e	3,2612 d	91,3	3,2	185-370	
			93,3	39		
			184,6	21,3		
			209,0	2,4		
			300,2	16,7		
			393,5	4,6		
^{99m} Tc	γ	6,007 h	140,5	89,7	37-1110	
¹¹¹ In	c.e.	2,8047 d	171,3	90,2	185-370	
			245,3	94		
¹²³ I	c.e.	13,27 h	~ 27,4	61	111-185	
			~ 31	16		
			158,97	83		
¹²⁵ I	c.e.	59,9 d	~ 27,4	113	1,5-2	
			~ 31	25,6		
			35,49	6,7		
¹³¹ I	β ⁻	8,021 d	80,2	2,6	10-222	185-7400
			284,3	6,2		
			364,5	81,6		
			637,0	7,1		
			722,9	1,8		

PROTOCOLO PARA LA CALIBRACIÓN Y EL USO DE ACTIVÍMETROS

Nucleido	Modo de Desintegración	T _{1/2}	Emisiones g más importantes:		Actividades típicas administradas (MBq)	
			Energía (keV)	Número de fotones por 100 desintegraciones	Diagnóstico	Terapia
¹⁵³ Sm	β ⁻	46,284 h	~ 41,5 47 69,7 103,2	49 12 5,3 28,3		1850-3700
²⁰¹ Tl	c.e.	72,91 h	11,5 ~ 70 79,8 82,4 165,3 167,4	45 74 16,4 4,6 2,7 10,3	74-185	

Nucleido	Modo de Desintegración	T _{1/2}	Energía b ⁻ máxima (keV)	Número de b ⁻ por 100 desintegraciones	Actividades típicas administradas (MBq) Terapia
³² P	β ⁻	14,28 d	1710,4	100	148-222
⁸⁹ Sr	β ⁻	50,65 d	1495,1	99,99	111-185
⁹⁰ Y	β ⁻	2,671 d	2280	99,98	185-220
¹⁸⁶ Re	β ⁻	3,775 d	939,4 1076,6	21,5 71,6	74-1295

8.2 APÉNDICE II. Tablas de decaimiento radioactivo para algunos radionucleidos de uso habitual en Medicina Nuclear

F-18		Tc-99m		I-123	
<i>T1/2 (horas)</i>	1,829	<i>T1/2 (horas)</i>	6,007	<i>T1/2 (horas)</i>	13,21
tiempo (horas)	decaimiento	tiempo (horas)	decaimiento	tiempo (horas)	decaimiento
0	1,0000	0	1,0000	0	1,0000
1	0,6846	3	0,7074	3	0,8544
2	0,4686	6	0,5004	6	0,7299
3	0,3208	8	0,3973	8	0,6572
4	0,2196	24	0,0627	24	0,2838
6	0,1029	27	0,0444	27	0,2425
8	0,0482	30	0,0314	30	0,2072
10	0,0226	48	0,00393	48	0,0806

Ga-67		In-111		I-131	
<i>T1/2 (días)</i>	3,2612	<i>T1/2 (días)</i>	2,8045	<i>T1/2 (días)</i>	8,021
tiempo (días)	decaimiento	tiempo (días)	decaimiento	tiempo (días)	decaimiento
0	1,000	0	1,000	0	1,000
1	0,809	1	0,781	2	0,917
2	0,654	2	0,610	4	0,841
3	0,529	3	0,476	7	0,772
4	0,427	4	0,372	9	0,708
7	0,226	7	0,177	11	0,546
8	0,183	8	0,138	14	0,501
9	0,148	9	0,108	15	0,459
10	0,119	10	0,084	16	0,421
11	0,0965	11	0,0660	17	0,387

8.3 APÉNDICE III. Componentes de la incertidumbre típica en la determinación del factor de calibración f .

Componente	Fuente de Incertidumbre	Forma de cálculo
uA	Calibración de la actividad de la fuente radiactiva de referencia A	Se toma del certificado de calibración ($k=1$)
ub	Variación del fondo radiactivo b	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar b
ud	Medida indicada por el activímetro d	Composición de las componentes
ul	Resolución del visor digital	$ul = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$, siendo ΔA la resolución del visor
ur	Repetibilidad de la medida	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar d
ub	Reproducibilidad de la posición de la fuente	Se determina conjuntamente con la anterior si se coloca cada vez la fuente al realizar la serie de medidas.

$$uf_c = \sqrt{\left(\frac{1}{(d-b)}\right)^2 uA^2 + \left(\frac{A}{(d-b)^2}\right)^2 (ud^2 + ub^2)}$$

y $ud = \sqrt{ur^2 + ul^2}$

8.4 APÉNDICE IV. Componentes de la incertidumbre típica en la determinación del factor de geometría g .

Componente	Fuente de Incertidumbre	Forma de cálculo
ub	Variación del fondo radiactivo b	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar b
up	Determinación de la alícuota p transferida a la nueva geometría	A partir de los datos proporcionados por el fabricante de la pipeta o balanza empleadas en la transferencia. Si no ha habido transferencia, sino cambio de posición en el interior del activímetro, $p=1$ y $up=0$.
uc, ud	Lecturas del activímetro (c, d)	Composición de las tres componentes
ul	Resolución del visor digital	$ul = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$, siendo ΔA la resolución del visor
ur	Repetibilidad de la medida	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar c y d
ub	Posición de la fuente	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar c y d

$$ug_c = \sqrt{\left(\frac{c-b}{d-b}\right)^2 up^2 + \left(\frac{p}{d-b}\right)^2 uc^2 + \left(\frac{p(c-b)}{(d-b)^2}\right)^2 ud^2 + \left(\frac{p(c-d)}{(d-b)^2}\right)^2 ub^2}$$

8.5 APÉNDICE V. Componentes de la incertidumbre típica en la medida de la actividad A de una fuente problema

Componente	Fuente de Incertidumbre	Forma de cálculo
uf	Factor de Calibración f	Se toma del certificado de calibración ($k = 1$)
ug	Factor de geometría g	Se determina conjuntamente con el valor de g
$ub^{(*)}$	Variación del fondo radiactivo b	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar b
$ud^{(*)}$	Lectura indicada por el activímetro d	Composición de las componentes
ul	Resolución del visor digital	$ul = \frac{\Delta A}{\sqrt{12}}$, siendo ΔA la resolución del visor
ur	Repetibilidad de la medida	Desviación estándar de la media de la serie de medidas utilizadas para determinar d
ub	Reproducibilidad de la posición de la fuente	Se determina conjuntamente con la anterior si se coloca cada vez la fuente al realizar la serie de medidas.
ue	Estabilidad a largo plazo	A partir de las medidas obtenidas con la fuente de constancia

(*) En el método abreviado se calculan previamente para una serie completa de medidas

$$uA_c = \sqrt{(f \cdot g)^2 [ud^2 + ub^2] + [(d - b) \cdot g]^2 uf^2 + [(d - b) \cdot f]^2 ug^2}$$

8.6 APÉNDICE VI. Ejemplo de Calibración de Un Activímetro

8.6.1 Introducción

Este ejemplo presenta el problema de la calibración de un activímetro a partir de una fuente de referencia certificada.

8.6.2 Definición del Problema

Se pretende determinar el factor de calibración activímetro y su incertidumbre.

De acuerdo con lo expresado en 5.1, el valor del factor de calibración f se obtendrá como:

$$f = \frac{A}{d - b}$$

siendo A la actividad de la fuente de referencia, d la lectura del activímetro y b la lectura del fondo.

8.6.3 Cálculo del factor de Calibración

La actividad de la fuente de referencia se toma directamente de su certificado de calibración:

$$A = 75,7 (\pm 0,6) \text{ MBq } (k=1)$$

Para la determinación del fondo radiactivo se realizan una serie de medidas consecutivas, y se toma la media como mejor estimador del valor de b . Los valores correspondientes se presentan en la hoja de cálculo adjunta.

A continuación se coloca la fuente certificada en el interior del activímetro cuidando de que la geometría pueda ser reproducida en medidas posteriores y se anota el valor de la actividad indicado por el activímetro. Se extrae la fuente y se coloca de nuevo en posición, obteniéndose así un conjunto de medidas cuyo valor medio proporcionará el valor de d . (ver hoja de cálculo). Se comprueba que la desviación estándar de la media de la serie de medidas sea comparable o inferior a la incertidumbre típica de A . Si no fuera así, se realizarían medidas adicionales hasta satisfacer esa condición.

Los valores obtenidos para el fondo y la actividad indicada son, respectivamente, $b=0,14$ y $A=74,14$.

El valor del factor de calibración f resulta ser:

$$f = \frac{A}{d - b} = \frac{75,7}{74,14 - 0,14} = 1,023$$

8.6.4 Cálculo de la incertidumbre

Para el cálculo de la incertidumbre típica combinada u_{f_c} , se utilizará la expresión dada en 5.2

$$u_{f_c} = \sqrt{\left(\frac{1}{(d-b)}\right)^2 u_A^2 + \left(\frac{A}{(d-b)^2}\right)^2 (ud^2 + ub^2)}$$

La incertidumbre del valor de la actividad de la fuente de referencia se toma tal y como figura en el certificado de calibración para $k=1$: $uA=0,6$.

Las incertidumbres del fondo ub y debida a la reproducibilidad y repetibilidad ur se calculan como la desviación estándar de la media de las series de medidas respectivas y resultan ser: $ub=0,02$ y $ur=0,02$ respectivamente.

Como el valor numérico menos significativo que se puede apreciar en el visor es $\Delta A =0,1$ la incertidumbre debida a la resolución del visor es $ul = 0,1/\sqrt{12} = 0,029$.

La incertidumbre de la actividad indicada ud se obtiene por composición de las dos anteriores:

$$ud = \sqrt{ur^2 + ul^2} = 0,035$$

La incertidumbre típica combinada de f será por lo tanto:

$$uf_c = \sqrt{\left(\frac{1}{(74,14 - 0,14)}\right)^2 uA^2 + \left(\frac{75,7}{(74,14 - 0,14)^2}\right)^2 (ud^2 + ub^2)} = 0,008$$

El **factor de calibración** viene dado por:

$$f = 1,023 \pm 0,008 (k=1)$$

En los certificados de calibración, acostumbra a utilizarse el valor $k=2$, por lo que se normalmente se expresará en la forma:

$$f = 1,023 \pm 0,016 (k=2)$$

8.6.5 *Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo del Factor de Calibración y de su incertidumbre asociada*

Factor de calibración

Usuario: _____
 Fecha: 30 de septiembre de 2002 Hora: 12:47
 Contenedor de la muestra Vial Jeringuilla Cápsula
 Material del contenedor Vidrio Plástico
 Otros _____
 Volumen de la muestra 0,5 mL
 Volumen del contenedor _____ mL
 Isótopo ^{99m}Tc T_{1/2} 6,02 horas
 Actividad certificada (MBq) 110,1 Incertidumbre ± 0,9 (k = 1)
 Fecha: 30 de septiembre de 2002 Hora: 9:32
 Actividad corregida por decaimiento Ac (MBq) 75,7 ± 0,6 (k = 1)

Lecturas

Lectura k	Fondo b _k (MBq)	Lectura d _k (MBq)
1	0,1	74,1
2	0,2	74,1
3	0,1	74,1
4	0,1	74,2
5	0,2	74,2
6	0,1	74,1
7	0,2	74,2
8		
9		
10		
Valor medio m	0,14	74,14
Desviación estándar $s = \sqrt{\sum_k (x_k - \bar{x})^2 / (n - 1)}$	0,053	0,053

Factor de calibración

$f = Ac / (d - b) =$ 1,0234

Incertidumbres

Incertidumbre de la lectura indicada por el activímetro

Resolución del visor digital Δl 0,1 MBq $ul = \Delta l / \sqrt{12} =$ 0,029 MBq

Repetibilidad de la medida (desviación estándar de la media) $ur = s / \sqrt{n} =$ 0,020 MBq

Incertidumbre combinada $ud = \sqrt{ul^2 + ur^2} =$ 0,035 MBq

Incertidumbre de la lectura del fondo

Repetibilidad de la medida (desviación estándar de la media) $ur = s / \sqrt{n} =$ 0,02 MBq

Incertidumbre de la lectura neta

$u(d - b) = \sqrt{ud^2 + ub^2} =$ 0,04 MBq

Incertidumbre relativa

$uf_r = \sqrt{(uAc/Ac)^2 + (u(d - b)/(d - b))^2} \cdot 100 =$ 0,82 %

Incertidumbre del factor de calibración uf

$uf = f \cdot uf_r / 100 =$ 0,008

Factor de calibración

$f =$ <u>1,023 ± 0,017</u> ($k = 2$)
--

8.7 APÉNDICE VII. Ejemplo de medida de una fuente y cálculo de la incertidumbre típica combinada.

8.7.1 *Introducción*

Este ejemplo presenta el problema de la determinación de la actividad de una fuente radiactiva y del cálculo de la incertidumbre del resultado.

8.7.2 *Definición del problema*

Se pretende determinar la actividad de una disolución de ^{99m}Tc contenida en una jeringa de 5 mL, mediante un activímetro previamente calibrado para una geometría de referencia distinta. Se conoce el factor de geometría que hay que aplicar para las condiciones de la medida.

De acuerdo con lo indicado en la sección 4.1, el valor de la actividad vendrá dado por la expresión:

$$A = (d - b) \cdot f_c = (d - b) \cdot f \cdot g$$

- El activímetro está calibrado para una geometría de referencia definida por un vial de vidrio de 10 mL lleno. De acuerdo con el certificado, el factor de calibración para esta geometría tiene el valor:

$$f = 1,02 \pm 0,01 \quad (k=1).$$

- El factor de geometría para la geometría de la jeringa es conocido y tiene el valor:

$$g = 1,01 \pm 0,01 \quad (k=1)$$

8.7.3 *Método Completo: Cálculo de la actividad*

Se realizaron con el activímetro una serie de medidas del fondo radiactivo y de la jeringa que contiene la disolución. En la hoja de cálculo se indican los valores obtenidos.

Para determinar el fondo radiactivo b se realizaron 10 medidas consecutivas, cuyo valor medio resultó ser:

$$b = 0,12 \text{ MBq}$$

Se realizaron a continuación 6 medidas con la jeringa que contenía la disolución de I-131. El valor medio de la serie de medidas que se indican en la tabla proporciona la lectura indicada d para la fuente de I-131

$$d = 33,40 \text{ MBq}$$

Aplicando la expresión que proporciona el valor de la actividad en función de f , g , d y b se obtiene:

$$A = (d - b) \cdot f_c = (d - b) \cdot f \cdot g = (33,40 - 0,12) \cdot 1,02 \cdot 1,01 = 33,9 \text{ MBq}$$

8.7.4 Método Completo: Obtención de la incertidumbre típica combinada

Para obtener el valor de la incertidumbre típica combinada de A se utiliza la expresión indicada en 4.2:

$$uA_c = \sqrt{(f \cdot g)^2 [ud^2 + ub^2] + [(d-b) \cdot g]^2 uf^2 + [(d-b) \cdot f]^2 ug^2}$$

o la correspondiente en términos de la incertidumbre relativa:

$$uA_r = \sqrt{[uf_r^2 + ug_r^2 + u(d-b)_r^2]}$$

La incertidumbre debida al fondo **ub** se toma como la desviación estándar de la media de la serie de 10 medidas realizadas para determinarlo:

$$ub = 0,013$$

La incertidumbre de la lectura del activímetro **ud** tiene las siguientes componentes:

1. Estabilidad a largo plazo: De la desviación estándar de la serie de medidas de estabilidad realizadas con anterioridad se ha calculado que la incertidumbre relativa (desviación estándar de la serie de medidas) es de 1,5% . Por lo tanto, suponiendo la misma incertidumbre relativa en la medida de actividad se tendrá:

$$ue = 1,5 * 33,4 / 100 = 0,50$$

2. Repetibilidad: se calcula a partir de la desviación estándar de la media de la serie de 6 medidas realizadas con la jeringa. Tras cada medida la jeringa se ha extraído del activímetro y colocado de nuevo, por lo que esta componente incluye también la incertidumbre debida a la colocación de la jeringa:

$$ur = 0,045$$

3. Resolución del visor digital: El valor mínimo que se puede apreciar en el visor digital del activímetro es 0,1 MBq, por lo que la incertidumbre asociada resulta ser:

$$ul = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,03$$

El valor de la Incertidumbre de la lectura se obtiene por composición de los anteriores:

$$ud = \sqrt{(ue^2 + ur^2 + ul^2)} = 0,50$$

La incertidumbre típica relativa combinada del valor de A resulta ser:

$$uA_r = \sqrt{[uf_r^2 + ug_r^2 + u(d-b)_r^2]} = 0,0346 (3,46\%)$$

y por lo tanto: $uA_c = uA_r \cdot A_c = 0,0346 \cdot 33,9 = 1,17$

8.7.5 *Expresión del resultado de la medida*

El valor obtenido para la actividad contenida en la jeringa se expresa como:

$$A = 33,9 \pm 2,3 \text{ MBq } (k=2)$$

8.7.6 *Método abreviado: Cálculo de la actividad*

En este método se realiza una sola medida de la jeringa con el activímetro y se toma como valor del fondo el leído inmediatamente antes. Por similitud con el caso anterior se supone que los valores obtenidos han sido:

$$d = 33,4 \text{ MBq}$$

$$b = 0,1 \text{ MBq}$$

Aplicando la expresión que proporciona el valor de la actividad en función de f , g , d y b se obtiene asimismo:

$$A = (d - b) \cdot f_c = (d - b) \cdot f \cdot g = (33,40 - 0,1) \cdot 1,02 \cdot 1,01 = 34,0 \text{ MBq}$$

8.7.7 *Método abreviado: Obtención de la incertidumbre típica combinada*

La incertidumbre debida al fondo ub se considera despreciable.

La incertidumbre de la lectura del activímetro ud tiene las siguientes componentes:

- Estabilidad a largo plazo: Se calcula idénticamente al caso completo, y por lo tanto se obtiene:

$$ue = 1,5 \cdot 33,4 / 100 = 0,50$$

- Resolución del visor digital: El valor mínimo que se puede apreciar en el visor digital del activímetro es 0,1 MBq, por lo que la incertidumbre asociada resulta ser:

$$ul = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,03$$

El valor de la Incertidumbre de la lectura se obtiene por composición de los anteriores:

$$ud = \sqrt{(ue^2 + ul^2)} = 0,50$$

La incertidumbre típica relativa combinada del valor de A resulta ser:

$$uA_r = \sqrt{\left[uf_r^2 + ug_r^2 + u(d-b)_r^2\right]} = 0,035 \text{ (3,5\%)}$$

por lo tanto: $uA_c = uA_r * A_c = 0,035 * 34,0 = 1,17$

y la expresión del resultado final será:

$$A = 34,0 \pm 2,3 \text{ MBq (k=2)}$$

Nótese que las componentes de la incertidumbre pueden calcularse previamente en este caso para todo un grupo de medidas y no requieren por lo tanto un cálculo individualizado. El resultado final de la incertidumbre típica combinada coincide muy aproximadamente con el obtenido en el cálculo completo, lo que sucederá siempre que la incertidumbre esté dominada por las componentes del factor de calibración y geometría y la estabilidad a largo plazo.

8.7.8 *Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo de la Actividad de una fuente y de su incertidumbre asociada (Método abreviado)*

Medida de la actividad			
Usuario:	_____		
Fecha:	<u>30 de septiembre de 2002</u>	Hora:	<u>15:15</u>
Contenedor de la muestra	<input type="checkbox"/> Vial	<input checked="" type="checkbox"/> Jeringuilla	<input type="checkbox"/> Cápsula
Material del contenedor	<input type="checkbox"/> Vidrio	<input checked="" type="checkbox"/> Plástico	
Volumen del contenedor	<u>0,5</u> mL		
Volumen de la muestra	<u>0,5</u> mL	Isótopo	<u>^{99m}Tc</u>
Factores			
Factor de calibración $f =$	<u>1,02 ± 0,03</u>		$(k = 1)$
Factor de corrección por geometría $g =$	<u>1,00 ± 0,01</u>		$(k = 1)$
Lecturas			
Fondo (b)	<u>0,1</u>	MBq	
Lectura (d)	<u>33,4</u>	MBq	
Actividad de la muestra			
$A = (d - b)f \cdot g =$	<u>34,0</u>	MBq	

Incertidumbres

Incertidumbre de la lectura indicada por el activímetro

Resolución del visor digital Δl 0,1 MBq $ul = \Delta l / \sqrt{12} =$ 0,029 MBq
 Estabilidad a largo plazo e_r 1,5 % $ue = d \cdot e_r / 100 =$ 0,501 MBq
 Incertidumbre combinada $ud = \sqrt{ul^2 + ue^2} =$ 0,50 MBq

Incertidumbre de la lectura neta

$u(d - b) = ud =$ 0,50 MBq

Incertidumbres relativas

$u(d - b)_r = u(d - b) / (d - b) \cdot 100 =$ 1,5 %
 $uf_r = uf / f \cdot 100 =$ 2,9 %
 $ug_r = ug / g \cdot 100 =$ 1,0 %
 $uA_r = \sqrt{u(d - b)_r^2 + uf_r^2 + ug_r^2} =$ 3,5 %

Incertidumbre de la actividad de la muestra uA

$uA = A \cdot uA_r / 100 =$ 1,17 MBq

Actividad de la muestra

$A =$ 34,0 ± 2,3 MBq ($k = 2$)

Fecha: 30 de septiembre de 2002

Hora: 15:15

Realizado por:

8.7.9 Ejemplo de hoja de cálculo para el cálculo de la Actividad de una fuente y de su incertidumbre asociada (Método Completo)

Medida de la actividad (método completo)

Usuario: _____
 Fecha: 30 de septiembre de 2002 Hora: 15:15
 Contenedor de la muestra Vial Jeringuilla Cápsula
 Material del contenedor Vidrio Plástico
 Volumen del contenedor 0,5 mL
 Volumen de la muestra 0,5 mL Isótopo ^{99m}Tc

Factores

Factor de calibración $f =$ 1,02 ± 0,03 ($k = 1$)
 Factor de corrección por geometría $g =$ 1,00 ± 0,01 ($k = 1$)

Lecturas

Lectura k	Fondo b _k (MBq)	Lectura d _k (MBq)
1	0,1	33,5
2	0,2	33,4
3	0,1	33,5
4	0,1	33,2
5	0,1	33,4
6	0,1	33,4
7	0,2	
8	0,1	
9	0,1	
10	0,1	
Valor medio m	0,12	33,40
Desviación estándar $s = \sqrt{\sum_k (x_k - \bar{x})^2 / (n - 1)}$	0,042	0,11

Actividad de la muestra

$A = (d - b)f \cdot g =$ 33,9 MBq

Incertidumbres

Incertidumbre de la lectura indicada por el activímetro

Resolución del visor digital Δl $\frac{0,1}{\text{MBq}}$ $ul = \Delta l / \sqrt{12} = \frac{0,029}{\text{MBq}}$
 Estabilidad a largo plazo e_r $\frac{1,5}{\%}$ $ue = d \cdot e_r / 100 = \frac{0,501}{\text{MBq}}$
 Repetibilidad de la medida $ur = s / \sqrt{n} = \frac{0,045}{\text{MBq}}$
 Incertidumbre combinada $ud = \sqrt{ul^2 + ur^2 + ue^2} = \frac{0,50}{\text{MBq}}$

Incertidumbre de la lectura del fondo

Repetibilidad de la medida $ub = s / \sqrt{n} = \frac{0,013}{\text{MBq}}$

Incertidumbre de la lectura neta

$u(d - b) = \sqrt{ud^2 + ub^2} = \frac{0,50}{\text{MBq}}$

Incertidumbre relativa

$uA_r = \sqrt{(u(d - b) / (d - b))^2 + (uf / f)^2 + (ug / g)^2} \cdot 100 = \frac{3,46}{\%}$

Incertidumbre de la actividad de la muestra uA

$uA = A \cdot uA_r / 100 = \frac{1,17}{\text{MBq}}$

Actividad de la muestra

$A = \frac{33,9 \pm 2,3}{\text{MBq}} (k = 2)$

Fecha: 30 de septiembre de 2002

Hora: 15:15

Realizado por:

8.8 APÉNDICE VIII. Cálculo del factor de geometría y su incertidumbre típica combinada.

8.8.1 *Introducción*

Este ejemplo presenta el problema de la determinación del factor de geometría para un activímetro.

8.8.2 *Definición del Problema*

Se dispone de un activímetro cuya geometría de referencia está definida a partir de un vial y para el que se quiere obtener el factor de geometría g correspondiente a una jeringa y para el nucleido ^{123}I . Considerando la baja energía de los fotones emitidos por este nucleido, cabe esperar que el factor sea apreciablemente distinto de la unidad.

El valor del factor de geometría viene dado por:

$$g = p \frac{(c - b)}{(d - b)}$$

donde:

- p es la fracción de la actividad inicial que se ha transferido a la geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección.
- c es el valor indicado por el activímetro en la geometría de referencia, sin descontar el fondo.
- d es el valor indicado por el activímetro en la geometría para la que se quiere determinar el factor de corrección, sin descontar el fondo.
- b es el fondo radiactivo.

8.8.3 *Cálculo del factor de geometría*

Se pesan primeramente un vial y una jeringa vacíos obteniéndose las masas:

$$m_v = 22,365 \pm 0,001 \text{ g} \quad \text{y} \quad m_j = 5,441 \pm 0,001 \text{ g}$$

A continuación se llena el vial con la disolución de ^{123}I y se determina su masa:

$$m_{vA} = 23,138 \pm 0,001 \text{ g}$$

Se lee entonces la actividad indicada por el activímetro para el vial en las condiciones de referencia y se obtiene el valor:

$$c = 26,7 \text{ MBq}$$

El fondo se ha determinado previamente y tiene el valor:

$$b = 0,05 \text{ MBq}$$

Seguidamente se toma con la jeringa una parte de la disolución activa del vial y se determina la masa total de la jeringa:

$$m_{jA} = 5,910 \pm 0,001 \text{ g}$$

La medida de la jeringa en el activímetro proporciona el valor:

$$d=43,7 \text{ MBq}$$

Por lo que el factor de geometría g tendrá el valor:

$$g = p \frac{(c-b)}{(d-b)} = \frac{(5,91-5,441)}{(23,138-22,635)} \times \frac{(26,7-0,05)}{(43,7-0,05)} = 0,5693$$

8.8.4 Incertidumbre del factor de geometría

La incertidumbre en la determinación de las masas de la disolución contenidas en la jeringa y en el vial Dm se obtiene a partir de la incertidumbre de cada una de las medidas de masa. Para cada medida, se supone que la incertidumbre de la balanza es $um=0,001$, por lo que la incertidumbre de la diferencia valdrá:

$$uDm = 2 \cdot um = 0,0014$$

La incertidumbre combinada de la fracción p transferida, es:

$$up = \sqrt{\left(p/(m_{jA'} - m_j)\right)^2 + \left(p/(m_{vA} - m_v)\right)^2} u\Delta m = 0,0038$$

Para la incertidumbre de las lecturas del activímetro se tiene en cuenta las incertidumbres de cada lectura que son:

La debida a la resolución del visor digital $ul=0,1/0,12$

La debida a la repetibilidad de las lecturas del vial y de la jeringa, caracterizadas por la desviación estándar de la media de las medidas realizadas.

Para cada una de ellas obtiene:

$$uc = \sqrt{ul^2 + ur^2} = 0,049 \quad ud = \sqrt{ul^2 + ur^2} = 0,042$$

La incertidumbre combinada de las lecturas netas del activímetro es, para el vial:

$$u(c-b) = \sqrt{uc^2 + ub^2} = 0,049$$

Y análogamente, para la jeringa:

$$u(d-b) = 0,042$$

Finalmente, aplicando la expresión para la incertidumbre combinada de g se llega a:

$$ug = 0,0026$$

y la expresión del resultado final será:

$$g = 0,569 \pm 0,005 (k=2)$$

Incertidumbres

Incertidumbre de la balanza (certificado del fabricante) y de la diferencia de masas

$$um = \underline{0,001} \text{ g} \qquad u\Delta m = \sqrt{2} \cdot um = \underline{0,0014} \text{ g}$$

Incertidumbre combinada de la la fracción p

$$up = \sqrt{\left(\frac{p}{m_{jA} - m_j}\right)^2 + \left(\frac{p}{m_{vA} - m_v}\right)^2} u\Delta m = \underline{0,0038}$$

Activímetro

$$\text{Resolución } \Delta l \text{ (Lectura)} \quad \underline{0,1} \text{ MBq} \qquad ul = \Delta l / \sqrt{12} = \underline{0,029} \text{ MBq}$$

Incertidumbre combinada de las lecturas del activímetro

$$uc = \sqrt{ul^2 + ur^2} = \underline{0,049} \text{ MBq} \qquad ud = \sqrt{ul^2 + ur^2} = \underline{0,042} \text{ MBq}$$

Incertidumbre combinada de las lecturas netas

$$u(c-b) = \sqrt{uc^2 + ub^2} = \underline{0,049} \text{ MBq} \qquad u(d-b) = \sqrt{ud^2 + ub^2} = \underline{0,042} \text{ MBq}$$

Incertidumbre combinada de g

$$ug = \sqrt{\left(\frac{g}{p}\right)^2 \cdot up^2 + \left(\frac{g}{(c-b)}\right)^2 \cdot u(c-b)^2 + \left(\frac{g}{(d-b)}\right)^2 \cdot u(d-b)^2} = \underline{0,003}$$

Factor de geometría

$$g = \underline{0,569 \pm 0,005} \text{ (k=2)}$$