

Capítulo 2

CONTROL DE CALIDAD DE DETECTORES DIRECCIONALES Y CONTADORES DE POZO

Los detectores de radiación son dispositivos que utilizan la interacción de la radiación con la sustancia para generar una señal que se puede analizar y procesar. En general, basan su funcionamiento en métodos de ionización gaseosa, centelleo y semiconductores. Los más empleados en medicina nuclear son los detectores gaseosos (cámaras de ionización, contadores Geiger-Müller), y los detectores de centelleo; aunque más recientemente se ha incrementado el uso de semiconductores.

En Cuba está muy difundido el uso de detectores de pozo para realizar estudios *in vitro*, fundamentalmente en técnicas de radioinmunoanálisis, y ejecutar mediciones para el control de calidad de los radiofármacos, y el de los detectores direccionales para estudios *in vivo*, como la captación de yodo-131 en pacientes con enfermedades tiroideas. De manera general, estas técnicas utilizan detectores de centelleo y analizadores monocanales de altura de pulsos para procesar la señal. Por tal razón, los controles de calidad que se les realizan son similares.

Fundamentos físicos de los detectores de centelleo

Los detectores de centelleo basan su funcionamiento en el registro de los cuantos de luz emitidos por ciertos materiales al recibir la acción de las radiaciones ionizantes. El material centelleante se acopla ópticamente a un tubo fotomultiplicador para la transformación de la señal lumínica en impulsos eléctricos (en virtud del efecto fotoeléctrico) y su posterior ampliificación (Fig. 2.1). El cristal centelleante y el tubo fotomultiplicador conforman el sistema de detección o sonda, que se acopla a la electrónica necesaria para la selección y cuantificación de los pulsos.

Los centelleantes pueden ser de naturaleza inorgánica (sólida) u orgánica (líquida, gel o plástica). Para seleccionar el tipo de centellante y calidad del detector, en dependencia de la aplicación, es necesario tener en cuenta un conjunto de consideraciones entre las que se encuentran: el tamaño del cristal, la eficiencia de detección intrínseca, la resolución energética, la respuesta al fondo en la región del espectro de interés, la supresión por anti-coincidencia del fondo y la prolongada estabilidad de operación.

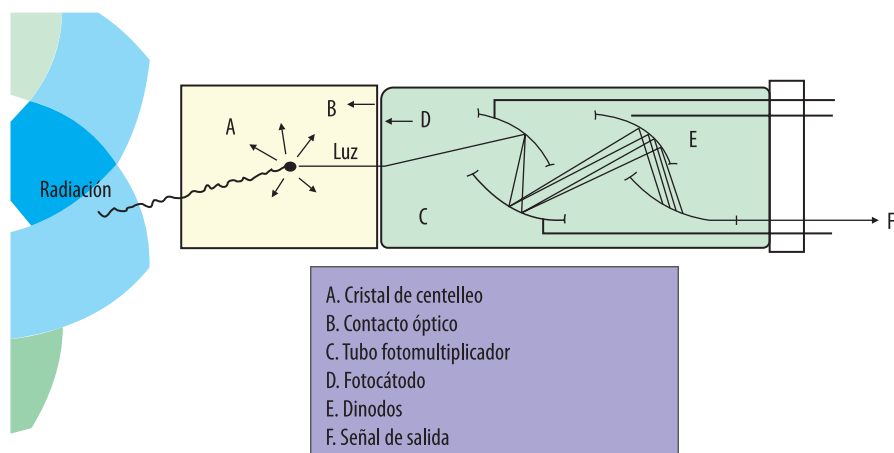


Fig. 2.1. Esquema de un sistema de detección con detector de centelleo.

Los cristales inorgánicos son materiales con un alto número atómico. Los cristales de ioduro de sodio activado con talio, son los detectores más usados para las mediciones de radionucleidos emisores de fotones, por su alta eficiencia intrínseca de detección, las facilidades de fabricación y su costo relativamente bajo. Su tamaño es variable, existiendo detectores de 300 mm de diámetro y 150 mm de espesor.

Los fotones de alta energía (mayor que 200 keV) son detectados eficientemente por cristales centelleantes de gran volumen. La radiación de fondo causada por la dispersión Compton es elevada en la franja de las bajas energías (12 keV a 200 keV), lo que imposibilita la detección de radionucleidos, cuyas energías están comprendidas en este rango y que la actividad incorporada haya sido baja.

Principios de funcionamiento de contadores de pozo y detectores direccionales

Los sistemas de medición *in vitro* e *in vivo* de las radiaciones gamma emplean detectores de ioduro de sodio activado con talio. En el caso de los detectores *in vitro*, se emplean con un pozo axial o con un agujero transversal; en el caso de los detectores *in vivo*, usualmente poseen un cristal sólido en forma cilíndrica (Fig. 2.2).

El efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y en menor medida la formación de pares, son los procesos predominantes en la interacción de los fotones con el medio de detección. La absorción y la atenuación de los fotones en el detector y la excitación o ionización de los átomos en el medio de detección, causan la producción de electrones que rápidamente pierden energía cinética por la interacción con otros electrones del medio. Esta fracción de energía, recibida por los átomos del medio centelleante, es convertida en luminiscencia en los detectores de centelleo, y se obtiene como resultado la emisión de un fotón de luz.



Fig. 2.2. Detectores de pozo y direccional.

Los procesos de interés en las interacciones fotón-detector, son aquellos en los que el fotón incidente deposita toda su energía en el interior del detector (efecto fotoeléctrico), de manera que la selección de los detectores tiene como base que estos proporcionen una alta probabilidad de ocurrencia de interacciones fotoeléctricas y que posean espesores optimizados para la energía del fotón de interés. En el caso de los radionucleidos empleados en medicina nuclear, que poseen energías bajas y medias, son suficientes para los detectores de pozo con cristales de 45 mm de diámetro con un pozo de 16 mm de amplitud; si se trata de detectores direccionales, un cristal de 50 mm de diámetro y 25 mm de espesor. Cristales mayores ofrecen una sensibilidad mayor para las altas energías. En estudios de radioinmunoanálisis y otros procedimientos similares en que se emplean yodo-125, debido a su baja energía (30 keV), se pueden emplear cristales de espesores menores.

Como los cristales de ioduro de sodio son higroscópicos, se deben recurrir con envolturas metálicas seleccionadas de manera que se produzca una mínima atenuación, para evitar pérdidas de luz y el deterioro por humedad. Generalmente, se utilizan finas láminas de acero inoxidable, aluminio o berilio, en dependencia de la energía de los fotones a detectar.

Adicionalmente, el detector se rodea de un blindaje de plomo para reducir su respuesta a la radiación ambiental. En el caso de los detectores direccionales, se acopla además, a un colimador simple de plomo, que tiene como objetivo eliminar la radiación dispersa. Estos colimadores pueden ser de diferentes tipos, en dependencia de las características direccionales que requieren las diferentes situaciones clínicas (Fig. 2.3). El detector blindado y colimado, se coloca en soportes ajustables para propiciar una correcta colocación en relación con el paciente (Fig. 2.4).

De manera auxiliar, se requiere de circuitos electrónicos asociados al detector, para extraer, amplificar y conformar la señal eléctrica proveniente de este, y convertir la señal en una distribución de altura de pulsos apropiada. En la electrónica se incluye: fuente de alto voltaje, preamplificador, amplificador y analizador de alturas de pulsos. La utilización de fuentes de alto voltaje es necesaria para suministrar energía eléctrica al detector.



Fig. 2.3. Diferentes tipos de colimadores.

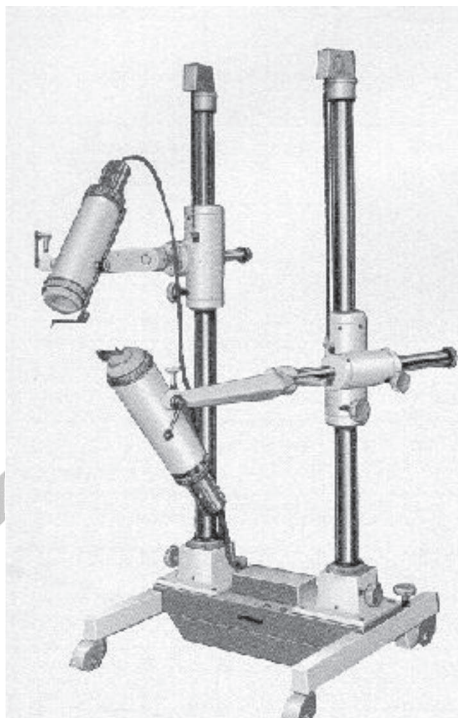


Fig. 2.4. Soportes ajustables para los detectores direccionales.

Una vez conformado el sistema de detección, es conveniente realizar una calibración energética tal que permita conocer la correspondencia entre la altura de los pulsos a la salida del amplificador y la energía de la radiación gamma que dio lugar a estos pulsos. Esto posibilita establecer las condiciones de trabajo para cualquier radionucleido y su identificación.

Se muestran diferentes equipos empleados en el país (Fig. 2.5). Los requerimientos generales a este equipamiento, al ser utilizados con fines de espectrometría gamma son la compatibilidad de impedancia y de las

características de la señal de entrada y salida, flexibilidad en la selección de la constante de tiempo y de la relación señal ruido óptima. El funcionamiento satisfactorio de todo el equipamiento electrónico, depende de la estabilidad en el suministro de electricidad, por lo que se recomienda el uso de estabilizadores de voltaje.



Fig. 2.5. Equipos auxiliares empleados en Cuba.

Estos sistemas, adicionalmente, pueden incorporar dos o más canales electrónicos independientes para realizar mediciones simultáneas de radiactividad en diferentes regiones del organismo o muestras.

Pruebas para el control de la calidad de captorees de iodo y contadores de pozo

El programa de control de la calidad de los captorees de iodo y contadores de pozo debe seguir un esquema similar al que se muestra en la tabla 2.1.

En las condiciones actuales no todas estas pruebas pueden realizarse, por tanto, es preciso especificar que solo se realizarán las permitidas o recomendadas por el fabricante y que el usuario deje definidas en su procedimiento de control de calidad.

Controles operacionales (diarios)

Inspección física

Objetivo

Verificar que el sistema esté operable.

Tabla 2.1. Pruebas para el control de la calidad de captores de lodo y contadores de pozo.
Clasificación y frecuencia mínima propuesta

Pruebas	Aceptación	Referencia	Operacionales
Inspección física	X	-	Diaria
Determinación del voltaje óptimo de trabajo del tubo fotomultiplicador	X	X	Semestral
Calibración energética y linealidad	X	X	Anual
Resolución energética		X	Anual
Conteos de fondo radiactivo	X	X	Diaria
Precisión	X	X	Trimestral
Sensibilidad*	X	X	Anual
Linealidad de la respuesta de actividad	X	X	Anual
Comprobación de las condiciones de calibración	X	X	Diaria

* Prueba recomendada, no obligatoria.

Procedimiento

Comprobar que no existan daños físicos. Encender el equipo y esperar su estabilización. Verificar que funcionen todas las teclas de controles, entre otros.

Análisis de los resultados y límites de aceptación

Cualquier situación anormal que se presente invalida el uso del equipo y requiere acción correctiva.

Conteos del fondo radiactivo

Realizar el procedimiento descrito en la primera edición de *Control de calidad de la instrumentación en medicina nuclear. Protocolo nacional* (p. 57), según la prueba (Tabla 2.1).

Comprobación de las condiciones de calibración

Realizar el procedimiento descrito en la primera edición de *Control de calidad de la instrumentación en medicina nuclear. Protocolo nacional* (pp. 64-65), según la prueba (Tabla 2.1).

Pruebas de aceptación y referencia

Determinación del voltaje óptimo de trabajo del tubo fotomultiplicador

Objetivo

Verificar el estado de funcionamiento del tubo fotomultiplicador, obteniendo el rango de voltajes (*plateau*) que se pueda emplear para realizar una adecuada espectrometría y definir el voltaje óptimo de trabajo.

Materiales

Fuente estándar de cesio-137 o de otro radionucleido, cuyo periodo de semidesintegración sea superior a tres años y con actividad del orden de 370 kBq (10 μ Ci) (para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de orden menor).

Procedimiento

1. Encendido del equipo, selección en el módulo contador de los parámetros de trabajo:
 - a) Escala de alto voltaje con que se va a trabajar (cuando proceda).
 - b) Régimen de trabajo integral, selección de un valor de umbral (línea de base) lo más bajo posible, tal que no aparezca mensaje de error en el equipo, evitando así la introducción de ruido electrónico en la medición.
 - c) Selección de un tiempo de medición que garantice una estadística de conteos adecuada (10 kiloconteos).
2. Extraer de su blindaje la fuente puntual, y colocarla de forma que quede lo más próxima al detector y en el centro de este. La fuente debe quedar ubicada de forma que se mantenga fija durante toda la medición.
3. Selección del voltaje mínimo que permite el equipo. Medir y anotar el valor del voltaje seleccionado y los conteos correspondientes. En cada voltaje seleccionado se debe realizar un mínimo de tres mediciones.
4. Incrementar discretamente el valor de voltaje y repetir las operaciones descritas en el punto 3. Los incrementos del voltaje no deben ser superiores a la unidad y se deberán repetir hasta alcanzar y superar la zona de *plateau*.
5. Concluida las mediciones, retirar la fuente puntual y guardarla en su blindaje.

Análisis de los resultados

El voltaje óptimo de trabajo se define a partir de obtener el rango de voltajes para el que los conteos de la fuente se mantengan aproximadamente constantes (*plateau*), y por eso se puede emplear para realizar una correcta espectrometría. Con esta prueba se verifica el estado de funcionamiento del tubo fotomultiplicador.

Se grafican los valores de conteo vs. voltaje y se establecen los valores de voltaje en los que se define la zona de *plateau*, seleccionando el valor mínimo y máximo de voltaje que corresponden a esta zona. La selección del voltaje óptimo de trabajo se realiza tomando como criterio el primer tercio del *plateau*, se deben registrar estos valores.

Se muestran gráficos típicos obtenidos con este tipo de equipamiento (Fig. 2.6). Se observa la curva obtenida para un detector que posee una zona de *plateau* bien definida y también la curva obtenida para un detector en el que no se puede definir esta zona. También se presentan los valores de

voltaje correspondientes a la zona de *plateau* y el valor seleccionado como voltaje óptimo de trabajo.¹

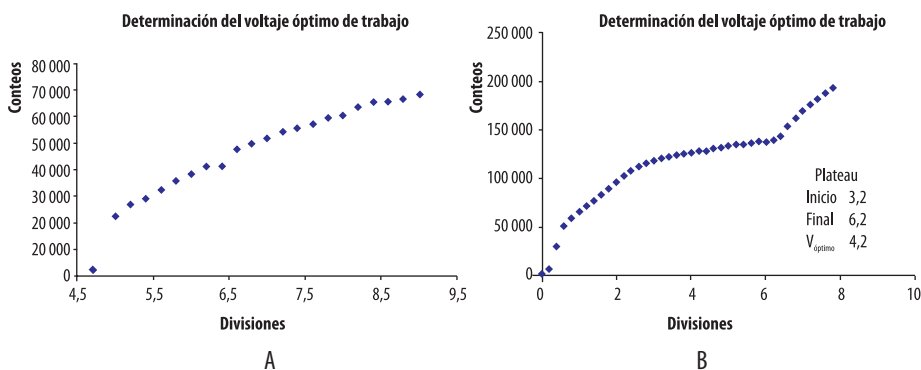


Fig. 2.6. Gráficos típicos de la determinación del voltaje óptimo de trabajo de dos detectores direccionales.

A. Curva obtenida para un detector que posee una zona de *plateau* adecuadamente definida.

B. Curva obtenida para un detector en el que no se puede definir una zona de *plateau*.

Límites de aceptación

La no existencia de una zona de *plateau* puede indicar pérdida de las propiedades del detector, ocasionada probablemente por el deterioro de alguno de sus componentes, lo que lo imposibilita para realizar mediciones espectrométricas.

Calibración energética y linealidad

Objetivo

Seleccionar las condiciones espectrométricas de trabajo para los radionucleidos de uso clínico y comprobar su linealidad.

Materiales

Fuente estándar de cesio-137 o de otro radionucleido, cuyo periodo de semidesintegración sea superior a tres años y con actividad del orden de 370 kBq (10 μ Ci).

Soluciones de los radionucleidos de interés o soluciones estándar de radionucleidos que los simulan con actividades de alrededor de 370 kBq (10 μ Ci).

Para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de un orden menor.

Procedimiento

Existen dos métodos para realizar la calibración energética. Uno general, aplicable siempre, el que permite determinar la posición del fotopico una

¹ El voltaje óptimo de trabajo seleccionado se mantiene en todas las mediciones que se realicen hasta que sea ejecutada una nueva calibración. Cada uno de estos pasos se realiza para cada detector de manera independiente.

vez fijado el voltaje de trabajo del equipo, y otro específico, que permite hacer corresponder el valor de la energía del radionucleido con el valor del umbral, lo que tiene un sentido práctico. Esto se puede lograr variando la amplificación y la ganancia, o mediante variaciones del voltaje de trabajo, siempre y cuando este se mantenga en la zona de *plateau* del detector (definida en la prueba anterior).

Método general

1. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Seleccionar el régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Fijar un valor de ventana no superior a 10 % (0,5 divisiones).
 - d) Establecer el tiempo de medición igual o superior a 60 s para que se garantice una estadística de conteos adecuada.
 - e) Entre las fuentes radiactivas disponibles para hacer la calibración, seleccionar aquella que menor energía posea, extraerla de su blindaje y colocarla de forma que quede lo más próxima al detector y en el centro de este. Cerciorarse de que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.

Cuando se empleen soluciones radiactivas, se deben adoptar las medidas de protección radiológica requeridas para evitar contaminaciones.

2. Seleccionar el umbral (línea de base), lo más bajo posible y comenzar la medición; cuando esta concluya, registrar el valor del umbral y los conteos. Para cada valor de umbral seleccionado, se deberán realizar como mínimo tres mediciones.
3. Incrementar discretamente el valor del umbral y repetir las operaciones descritas en el punto 3. Los incrementos del umbral no deben ser superiores a 0,5 divisiones. Lo descrito en el punto 4 se debe repetir hasta haber obtenido el espectro del radionucleido medido, es decir, se debe definir claramente la región del fotopico.
4. Guardar la fuente radiactiva empleada en su blindaje y tomar la fuente que le continúa en energías. Repetir las operaciones descritas en los puntos 3-5 hasta que se hayan utilizado las fuentes disponibles en la calibración.
5. Graficar los valores de conteo vs. umbral para cada radionucleido medido y establecer el valor de umbral para el que se obtiene el máximo de conteos (vértice del fotopico que corresponde con la energía del radionucleido), se muestran, a modo de ejemplo, gráficos típicos obtenidos con este tipo de equipamiento (Fig. 2.7), este valor se debe registrar.

Método específico

1. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Seleccionar el régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Establecer un valor de ventana no superior a 10 % (0,5 divisiones).

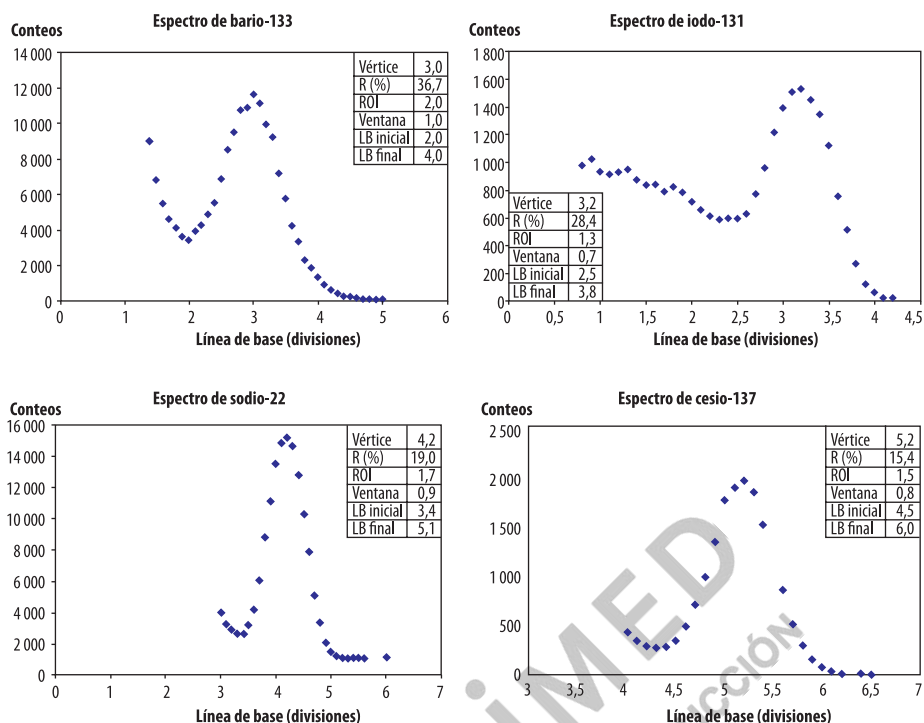


Fig. 2.7. Espectros de bario-133, iodo-131, sodio-22 y cesio-137 obtenidos en un módulo contador.

- d) Fijar un tiempo de medición igual o superior a 60 s para que se pueda garantizar una estadística de conteos y una constante de tiempo adecuada.
 - e) Extraer de su blindaje la fuente de cesio-137 o de otro radionucleido, cuyo periodo de semidesintegración sea superior a tres años y colocarla de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.
 - f) Colocar el valor del umbral en una división que coincida con la energía del radionucleido seleccionado.
2. Dar inicio a la medición y variar los valores de amplificación, ganancia o voltaje del tubo fotomultiplicador hasta obtener un máximo de conteos, para esto, se puede auxiliar del valor de la tasa de conteos o de la lectura en la escala. Una máxima tasa de conteos o una máxima inflexión en la aguja de la escala indica que el valor máximo del fotopico se encuentra dentro de la ventana seleccionada.
 3. Registrar los valores obtenidos de voltaje, amplificación y ganancia para el radionucleido medido y fijarlos en el equipo.
 4. Proceder a obtener el gráfico del fotopico; para esto, se varía el valor del umbral en la región del fotopico, comenzando en la zona del valle de Compton, incrementar discretamente el valor del umbral hasta que

el fotopico se defina completamente. Los incrementos del umbral no deben ser superiores a 0,5 divisiones. Para cada valor de umbral seleccionado, se deberán realizar como mínimo tres mediciones.

5. Guardar la fuente radiactiva empleada en su blindaje y tomar la siguiente fuente a medir.
6. Verificar que el valor del umbral correspondiente al fotopico de cada uno de los restantes radionucleidos coincida con la energía de estos. Repetir las operaciones descritas en los puntos 4 y 5, hasta que se hayan utilizado las fuentes disponibles para la calibración.

Análisis de los resultados

Determinar el valor de la ventana para cada uno de los radionucleidos medidos, lo que se puede hacer por dos métodos:

- Método aproximado: determinar en el gráfico del espectro del radionucleido el valor de umbral, mínimo y máximo (donde comienza y termina), del fotopico. Ser cuidadoso en la selección de estos valores para no incluir conteos correspondientes a la zona de dispersión Compton. La resta de estos dos valores, dividido entre 2, corresponde al valor de la ventana, de manera muy aproximada.
- Método exacto:
 - Determinar el valor de la ventana según la expresión:

$$\text{Ventana} = 0,5 \left[\frac{1,67 \cdot R \cdot E}{m} \right] \quad (2.1)$$

Donde:

R: valor de la resolución energética del radionucleido (número en %).

E: energía del fotopico (keV).

m: valor de la pendiente de la curva: energía vs. umbral (línea de base).

- Registrar los valores de umbral y ventana determinados para cada radionucleido.
- Los valores de umbral y ventana, determinados para cada radionucleido, se mantendrán en las mediciones que se realizarán hasta que sea ejecutada una nueva calibración, o cuando la verificación efectuada como parte del control de calidad al sistema de medición así lo aconseje.

Para evaluar la linealidad energética se grafican los valores de energía vs. umbral para cada radionucleido medido y se traza la línea de mejor ajuste de los valores plotados (Fig. 2.8).

Límites de aceptación

La linealidad energética es de vital importancia para detectores que trabajan con varios radionucleidos, aunque las pérdidas pequeñas de esta se pueden corregir.

Los límites de aceptación están en dependencia del uso específico del equipo y se deben analizar para cada caso específico.

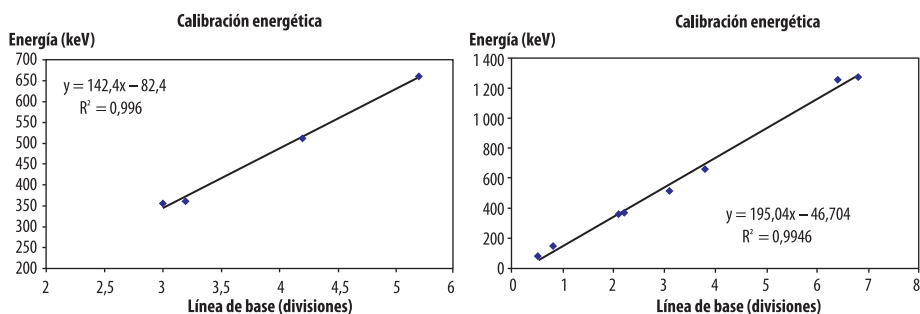


Fig. 2.8. Ajuste de la linealidad energética para un módulo contador.

Resolución energética

Objetivo

Determinar la resolución energética del sistema para el cesio-137, o para el radionucleido de interés.

Materiales

Fuente de cesio-137, u otro radionucleido de interés con actividad aproximada de 370 kBq (10 μ Ci).

Procedimiento

1. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Seleccionar el régimen de trabajo diferencial y simétrico.
2. Fijar un valor de ventana no superior a 10 % (0,5 divisiones).
3. Establecer el tiempo de medición igual o superior a 60 s para garantizar una estadística de conteos y una constante de tiempo adecuadas.
4. Extraer de su blindaje la fuente de cesio-137 o radionucleido de interés y colocarla de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.
5. Variar paulatinamente la posición de la ventana del monocanal, registrando el número de conteos para obtener el espectro del radionucleido (ver Fig. 2.6).

Análisis de los resultados

Calcular y registrar la resolución energética para el cesio-137 o en su defecto para el radionucleido de referencia de su laboratorio como:

$$R(\%) = \frac{FWHM}{U_{\text{vértice}}} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

Donde:

R: resolución energética expresada en porcentaje.

FWHM: ancho del fotopico a mitad de su altura.

$U_{\text{vértice}}$: umbral del vértice del fotopico.

Límites de aceptación

Como prueba de referencia, la pérdida de 20 % de resolución energética requiere una investigación minuciosa.

Conteos de fondo radiactivo

Objetivo

Verificar la tasa de conteos del fondo radiactivo para garantizar que cualquier aumento de este se demuestre fácilmente.

Procedimiento

1. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo definidos en la calibración para el radionucleido con que se va a trabajar posteriormente.
2. Cerciorarse de que no haya ninguna fuente radiactiva en la habitación.
3. Establecer el tiempo de medición que garantice una correcta estadística de conteos (más de 10 kiloconteos).
4. Realizar tres mediciones como mínimo y registrar los resultados.

Límites de aceptación

Si el valor de fondo determinado supera el 20 % del valor de referencia para su equipo, se deben investigar las causas.

Precisión

Objetivo

Verificar la precisión de conteos del sistema de medición.

Materiales

Fuente estándar de cesio-137 de actividad de alrededor de 370 kBq (10 μ Ci) (para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de un orden menor).

Procedimiento

1. Extraer de su blindaje la fuente de cesio-137 y colocarla de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.
2. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo definidos en la calibración para el cesio-137:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Valor de umbral.
 - d) Valor de ventana.
 - e) Establecer el tiempo de medición igual o superior a 60 s que garantice una correcta estadística de conteos (10 kiloconteos).
3. Iniciar la medición, registrar el valor de los conteos y repetir la medición 10 veces de forma consecutiva, donde:

$$C_p = \frac{\sum C_i}{10} \quad (2.3)$$

Análisis de los resultados

Determinar la precisión del sistema de medición, por la siguiente expresión y registrar los resultados:

$$\chi^2 = \sum \frac{(C_i - C_p)^2}{C_p} \quad (2.4)$$

Límites de aceptación

Analizar los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que para una muestra de 10 conteos, y por tanto nueve grados de libertad, los límites de confianza para χ^2 son 16,92 y 3,32, respectivamente. La prueba se debe repetir si el resultado está fuera de estos valores; si este comportamiento persiste, se puede considerar que hay una falla en la operación del instrumento y, por tanto, se deben investigar las causas.

Sensibilidad

Objetivo

Detectar las pérdidas de sensibilidad del equipo y la estabilidad de su respuesta.

Materiales

Fuente estándar de cesio-137 o de otro radionucleido, cuyo periodo de semidesintegración sea superior a tres años de actividad, alrededor de 370 kBq (10 μ Ci). Para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de un orden menor.

Procedimiento

1. Extraer la fuente de cesio-137 de su blindaje y colocarla de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.
2. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo definidos en la calibración, para el cesio-137:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Valor de umbral.
 - d) Valor de ventana.
 - e) Establecer el tiempo de medición igual o superior a 60 s para que se garantice una estadística de conteos adecuada (10 kiloconteos).
3. Comenzar la medición, repetirla 10 veces de forma consecutiva.

Análisis de los resultados

- Calcular la desviación estándar:

$$DE = \frac{1}{2} \left(\frac{C_p}{t} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

DE: desviación estándar.

C_p : conteos promedio.

t: tiempo de medición empleado.

- Calcular el decaimiento radiactivo de la fuente de cesio-137 medida para el periodo de un año, considerando intervalos de 30 días a partir de la expresión:

$$A(t) = A_{\text{medida}} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t\right) \quad (2.6)$$

Donde:

$T_{1/2} = 30 \text{ años} = 10\,950 \text{ días}$. Se incrementa en intervalos de 30 días, suponiendo mediciones mensuales durante un año.

- Graficar la curva de decaimiento del cesio-137 a partir del logaritmo de la tasa de conteo medida vs. meses del año.
- Situar en el mismo gráfico los valores correspondientes al logaritmo de la tasa de conteos anterior $\pm 2\sigma$, obteniéndose dos líneas paralelas (por encima y por debajo) a la recta que define el decaimiento del cesio-137. Para el detector de pozo $\pm 3\sigma$ (Fig. 2.9).

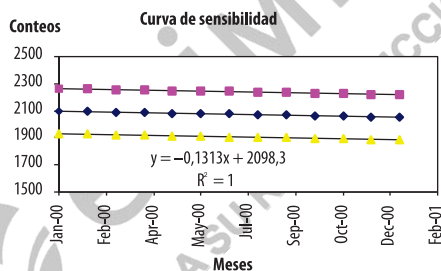


Fig. 2.9. Muestra de una curva de sensibilidad en el tiempo.

Límites de aceptación

Los resultados de las pruebas sucesivas se deben situar en la vecindad de la línea de decaimiento del cesio-137 y limitado por las líneas correspondientes a $\pm 2\sigma$. Para el detector de pozo $\pm 3\sigma$. Si esto no sucede, se debe repetir la prueba y, si la falla persiste, interrumpir la operación del instrumento.

Linealidad de la respuesta a la actividad

Objetivo

Verificar la linealidad de un sistema de conteo con respecto a la actividad de la muestra medida. Establecer los límites de actividad para los cuales es útil su instrumento.

Materiales

Solución de tecnecio-99m con una actividad alrededor de 185 kBq/mL (5 $\mu\text{Ci/mL}$) para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de un orden menor.

Procedimiento

1. Preparar una solución de tecnecio-99m con una actividad, alrededor de 185 kBq/mL (5 μ Ci/mL) y transferir a un tubo de ensayo 1 mL de esta solución.
2. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo definidos en la calibración para el tecnecio-99m:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Valor de umbral.
 - d) Valor de ventana.
 - e) Establecer el tiempo de medición igual o superior a 60 s para que se garantice una estadística de conteos adecuada (10 kiloconteos).
3. Colocar el tubo de ensayo con la solución radiactiva de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que este quede ubicado de forma que se mantenga fijo y que esta geometría se pueda reproducir con exactitud.
4. Comenzar la medición, al concluir esta registrar el valor de los conteos y la hora exacta en que se realizó.
5. Repetir la medición regularmente durante un período que se obtengan como mínimo 10 mediciones, y garantizar que la actividad final de la muestra se corresponda con la actividad mínima que usualmente se emplea en el servicio para las mediciones que se realizan con este equipo.

Análisis de los resultados

- Graficar los valores del logaritmo de la tasa de conteos vs. tiempo, y trazar la mejor recta.
- Calcular la pendiente de la recta y determinar el periodo de semidesintegración del radionucleido, según la expresión:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{m} \quad (2.7)$$

Donde:

$T_{1/2}$: periodo de semidesintegración del radionucleido.

m: pendiente de la recta.

Límites de aceptación

Los conteos medidos no deben exceder ± 5 % de los valores estimados por la línea recta trazada, para que la linealidad del instrumento sea adecuada. Sin embargo, de acuerdo con el instrumento y su uso, se puede corregir la falta de linealidad en las regiones de saturación si esta muestra un comportamiento estable.

Comprobación de las condiciones de calibración

Objetivo

Comprobar que las condiciones de calibración del equipo se mantienen dentro de los límites aceptables.

Material

Fuente radiactiva o soluciones de los radionucleidos de interés, o de aquellos radionucleidos que los simulan con actividades de alrededor de 370 kBq (10 μ Ci) (para el detector de pozo la actividad de la fuente a emplear es de un orden menor).

Procedimiento

1. Seleccionar en el módulo contador los parámetros de trabajo definidos en la calibración:
 - a) Alto voltaje definido como óptimo.
 - b) Preestablecer el régimen de trabajo diferencial y simétrico.
 - c) Seleccionar un valor de ventana estrecho (0,1 divisiones).
 - d) Establecer el tiempo de medición largo.
 - e) Seleccionar la fuente radiactiva según el radionucleido a comprobar, extraerla de su blindaje y colocarla de forma que quede lo más próxima posible al detector y en el centro de este. Cerciorarse que la fuente quede ubicada de forma que se mantenga fija.

Cuando emplee soluciones radiactivas, adoptar las medidas de protección radiológicas requeridas para evitar contaminaciones.

2. Teniendo en cuenta el valor de umbral y la ventana previamente determinados para el radionucleido a medir, se debe determinar el rango de valores en que moverá el umbral como:

$$\Delta U = \pm U_{\text{vértice}} - \left(\frac{\text{Ventana}}{2} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

$U_{\text{vértice}}$: umbral del vértice del fotopico determinado en la prueba de calibración.

Ventana: ventana de trabajo determinado en la prueba de calibración.

3. Iniciar la medición y variar el umbral (línea de base) muy lentamente desde el valor mínimo al máximo, determinados en el punto anterior. Determinar y registrar el valor de umbral para el que la unidad de conteos digital o el escalímetro indican la mayor razón de conteos. Una máxima tasa de conteos o una máxima deflexión en la aguja del escalímetro indica el valor máximo del fotopico.

Análisis de los resultados

Proceder a comparar el valor de umbral del vértice del fotopico determinado en el punto anterior con el establecido en la calibración del equipo.

Límites de aceptación

Se deben tener en cuenta estos criterios:

- Si $U_{\text{vértice}}$ determinado mayor o igual que $U_{\text{vértice}}$ calibración (ventana calibración/4), se recomienda efectuar una nueva calibración en energías antes de continuar trabajando con el equipo.

- Si $U_{\text{vértice}}$ determinado menor o igual que $U_{\text{vértice}}$ calibración (ventana calibración/4), se recomienda ajustar el valor del $U_{\text{vértice}}$ al establecido en la calibración antes de continuar trabajando con el equipo.

