

TERCER EJERCICIO

GRUPO B – PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

TEMA 3

Instrumentación y métodos analíticos utilizados en la detección y medida de la radiación ionizante. Verificación, calibración y control de calidad.

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN	3
3. INTRODUCCIÓN	3
4. HISTORIA	4
5. TIPOS DE EQUIPOS DE MEDIDA.....	5
5.1 Detectores de ionización gaseosa	5
5.1.1 Cámara de Ionización.....	5
5.1.2 Contador proporcional.....	5
5.1.3 Contador Geiger Müller.....	6
5.2 Detectores de neutrones.....	6
5.3 Detectores de centelleo.....	7
5.3.1 Centelleo sólido.....	8
5.3.2 Centelleo líquido.....	9
5.4 Detectores de termoluminiscencia.....	10
5.5 Detectores de semiconducción.....	10
6. INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA	12
7. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA	122
8. CONSIDERACIONES GENERALES. ELECCIÓN DE EQUIPO. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN. INSPECCIÓN VISUAL	14
9. CONTROL DE CALIDAD. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN. INSPECCIÓN VISUAL	15
10. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE EQUIPOS	15
10.1 Calibración.....	16
10.1.1 Laboratorio de calibración acreditado.....	16
10.1.2 Laboratorio de calibración certificado.....	17
10.1.3 Otros laboratorios de calibración.....	18
10.1.4 Certificado de calibración.....	18
10.2 Verificación.....	19
10.2.1 Prueba de la verificación.....	20
10.3 Inspección visual.....	22
11. BIBLIOGRAFÍA.....	23
FIGURAS.....	24
ENLACES WEB.....	28

1. RESUMEN

Este tema proporciona la información necesaria para conocer el tipo de instrumentación existente para la medida de la radiación ionizante, la adecuada elección del instrumento en función del tipo de medición y uso deseado y el correcto mantenimiento de este equipamiento de radioprotección (siendo la calibración y la verificación los temas más importantes del mismo).

Al hablar de cada tipo de detector se hará una breve descripción de su funcionamiento, incluyendo además algunos aspectos prácticos, como ventajas o tipo de radiación que miden con mayor precisión. Se entra en más detalle en los equipos con mayor desarrollo tecnológico en los últimos años, los detectores de centelleo y de semiconducción.

Sólo se incluye una fórmula básica y un anexo con figuras para ayudar a una mejor comprensión de los puntos tratados.

Al final se indican los enlaces a páginas Web, de las casas comerciales más habituales de equipos de medida, que permitirán conocer su aspecto y características.

2. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE LA OPOSICIÓN

Todos los fundamentos básicos de los equipos aquí descritos están en el tema B.2 del primer ejercicio, "Esquemas de desintegración radiactiva. Interacción de partículas cargadas y radiaciones con la materia. Detección de partículas y radiaciones".

Las unidades básicas empleadas ya aparecen reflejadas en el tema B.2 del tercer ejercicio, "Magnitudes y unidades de protección radiológica".

Los dispositivos empleados en la medida de dosis personal, se tratan ampliamente en el tema B.7 del tercer ejercicio, "La dosis debida a la radiación externa".

3. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos prioritarios e indispensables para asegurar la protección del público, de los trabajadores y del medio ambiente frente a los efectos adversos de las radiaciones ionizantes, es la instrumentación para la medida y la detección de la radiación, con diferentes acepciones, monitor de radiación, detector de radiación, instrumentación de radioprotección, equipo de medida de la radiación, dosímetro personal, etc. Podríamos definirlos como aquellos dispositivos que son capaces de proporcionar una señal que se puede analizar y medir, cuando éste es alcanzado por la radiación.

Este equipamiento nos permite medir las tasas de dosis ambientales y direccionales ($\mu\text{Sv/h}$), la actividad radiactiva (cps), la actividad superficial ("contaminación" en bequerelios por unidad de superficie), y dosis personal (Sv), unidades radiactivas básicas para la toma de medidas y decisiones.

El uso de estos dispositivos es fundamental en la mayoría de las instalaciones radiactivas y nucleares, y se utilizan para un amplio rango de acciones, entre las que destacan:

- Clasificación de zonas radiológicas.
- Conocimiento sobre los potenciales riesgos de contaminación.
- Actuaciones en emergencias radiológicas,
- Evaluación de los riesgos de los trabajos con radiaciones ionizantes.
- Medida de las dosis recibidas por el personal.
- Comprobación de blindajes.
- Medida de contaminación superficial.
- Control de acceso a zonas con potencial irradiación.
- Altas médicas radiológicas.
- Control de fuentes radiactivas.
- Control de acceso a recintos blindados.
- Controles de hermeticidad a fuentes radiactivas encapsuladas.
- Comprobación de fugas.
- Medida rápida de contaminación exterior individual.
- Caracterización y desclasificación de residuos.
- Identificación de radioisótopos (espectrómetros), etc.

4. HISTORIA

El descubrimiento de las radiaciones ionizantes llevado a cabo por la comunidad científica entre finales del siglo XIX y principios del XX, conllevó el uso de las mismas en el campo de la medicina y de la investigación.

Desde el comienzo de su uso ya se empezaron a detectar los primeros efectos nocivos de la utilización de las radiaciones ionizantes para la salud, en científicos, médicos y pacientes. En las primeras décadas del siglo XX, el conocimiento obtenido sobre los riesgos para la salud del uso de las radiaciones ionizantes, puso de relieve la necesidad de buscar mecanismos de protección para las personas que pueden verse sometidas a las mismas, ya sea por su trabajo o como pacientes en medicina.

Para poder llevar a cabo esta tarea era fundamental poder medir la radiación. En 1911, el físico escocés Charles Thomas Rees Wilson, inventa la cámara de ionización. En 1928, los físicos alemanes Hans Geiger y Walther Müller, desarrollan el tubo Geiger-Müller, que podía detectar radiación alfa y beta, e incluso gamma. En décadas posteriores se desarrollan los contadores proporcionales, de centelleo y semiconductores, siendo muy significativos los avances a finales del siglo XX y principios del XXI, permitiendo disponer de equipos más precisos, con mayores rangos de medida, más portátiles, para usos en atmósferas explosivas, etc. Con toda esta instrumentación se posibilita la medida de diferentes magnitudes y unidades de medida relacionadas con la radiación ionizante para diferentes usos y necesidades.

En la actualidad, los monitores de radiación son empleados en Centrales Nucleares, Industrias, Instalaciones médicas, Aduanas, Centros de Investigación, etc. El personal de Consejo de Seguridad Nuclear, del Ejército y de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado también son usuarios de este tipo de equipamiento.

El número de instrumentos que se utilizan en todos estos organismos e instalaciones es muy alto. La diversidad tecnológica de los mismos y la variedad

de fines para los que se usan, hace necesario disponer de un mínimo conocimiento para un uso idóneo.

5. TIPOS DE EQUIPOS DE MEDIDA

5.1 Detectores de ionización gaseosa

Los detectores de ionización gaseosa están constituidos, básicamente, por un recinto lleno de un gas a presión, en el que se disponen dos electrodos mutuamente aislados, a los que se aplica una tensión de polarización.

La detección de la radiactividad con este tipo de equipos se fundamenta en la formación de pares de iones por interacción de la radiación con el gas, creando una diferencia de potencial que direcciona los iones hacia los electrodos, produciendo así un impulso que es posible detectar y/o medir electrónicamente (figura 1).

Los detectores de ionización se diferencian en función de la variación de la tensión de polarización. Suponiendo que al detector llegan partículas de la misma energía, la amplitud del impulso de corriente crecerá desde cero a la tensión de polarización aplicada (figura 2).

5.1.1 Cámara de ionización

Las cámaras de ionización funcionan en la primera parte plana "plateau" (zona 2 o también llamada de saturación) que puede apreciarse en la figura 2. El gas del interior de la cámara puede ser desde el aire a la presión atmosférica en dosimetría, hasta gases nobles, en especial argón, en cámaras herméticas.

Los impulsos que dan son pequeños (no utilizan el efecto multiplicador del campo eléctrico), por lo que son ideales para medir grandes actividades.

Las cámaras de ionización se clasifican en función de la forma de los electrodos, en planas o cilíndricas, según estén dotadas de electrodos plano-paralelos, o cilíndricos.

También se pueden diferenciar en cámaras de corriente (miden la intensidad media de corriente que circula por la cámara, que en general, es proporcional al flujo de radiación que interactúa) o cámaras de impulsos (detectan individualmente los impulsos correspondientes a la llegada de cada partícula ionizante que interactúa en el detector).

Este tipo de detectores son útiles, preferentemente, para la detección de fotones (radiación X y gamma) y partículas beta, e incluso para neutrones. La detección de partículas beta se alcanza con fuentes externas a través de ventanas suficientemente delgadas.

5.1.2 Contador proporcional

Cuando se incrementa la tensión de una cámara de ionización por encima del límite superior de la zona de saturación (figura 2, zona 3, denominada zona proporcional), se presenta un fenómeno de multiplicación de carga al unirse a la ionización primaria la secundaria, originada por los electrones que, acelerados hacia el ánodo, ganan energía suficiente para ionizar, por impacto, moléculas de gas.

La geometría suele ser coaxial, de cátodo cilíndrico y ánodo en forma de un hilo metálico muy fino. Así, el campo eléctrico en las proximidades del hilo es lo

suficientemente intenso como para alcanzar la zona proporcional, aplicando una tensión de polarización del orden del kV.

Los contadores proporcionales se utilizan para medidas de actividades muy bajas en muestras ambientales, gamma, rayos X, e incluso como detectores de neutrones.

Los contadores de partículas suelen estar provistos de ventanas suficientemente finas, a través de las cuales se detecta la radiación emitida por fuentes externas. Debido a ello, la medida en los casos de emisores alfa y beta de baja energía, es menos eficiente.

5.1.3 Contadores Geiger-Müller

Los contadores Geiger-Müller (figuras 3 y 4) son detectores de ionización gaseosa que trabajan en la zona polarizada denominada Geiger-Müller (figura 2, zona 5). El gas de llenado de un contador Geiger típico suele estar constituido por una mezcla de argón y otro gas, llamado extintor, que suele ser cloro o bromo.

El factor de multiplicación en estos detectores puede variar de 110 y 1000, de manera que los impulsos que suministra pueden ser de varios voltios, lo que simplifica enormemente los requisitos que debe cumplir la instrumentación asociada, abaratando su costo. Esto, junto con el hecho de que pueden trabajar en condiciones ambientales adversas, su sencillez, y robustez, han hecho de este tipo de detectores, uno de los más usados.

Sus inconvenientes son que sus impulsos no tienen relación ni con la naturaleza ni con la energía de las partículas detectadas y, en comparación con los equipos indicados con anterioridad, es un detector lento. La lentitud viene motivada porque después de cada detección de una partícula, el detector no se recupera hasta que ha sido barrida la enorme densidad de carga espacial que ha sido generada.

El uso más habitual de este tipo de monitores de radiación es la medida de radiación gamma y partículas beta.

Para la detección de partículas beta de baja energía, las ventanas de estos equipos se reducen a un grosor de hasta unos 2 mg/cm².

5.2 Detectores de neutrones

Los neutrones, al carecer de carga eléctrica no ionizan directamente los materiales que atraviesan; además, al no ser desviados por los campos eléctricos, son capaces de atravesar grandes espesores de materia. Un neutrón interacciona con la materia tan sólo cuando se acerca a muy pequeña distancia de un núcleo.

Al no ionizar los gases, los neutrones se detectan de forma indirecta, a través de los efectos secundarios que resultan de sus interacciones con los núcleos: reacciones nucleares, colisión elástica e inelástica, absorción y fisión nuclear, que generan partículas cargadas de elevada energía.

En principio, cualquier detector que sea sensible a la radiación ionizante lo será también a los neutrones. La interacción directa de estos sobre los materiales del detector, sobre todo partes metálicas (electrodos, por ejemplo), va a producir partículas o radiaciones ionizantes capaces de ser detectadas. Si se potencia este efecto, pueden construirse muchos detectores de neutrones. Estos equipos

pueden ser considerados como detectores de radiación ionizante a los que se les ha incorporado un material sensible a los neutrones.

Este equipamiento puede dividirse en dos grandes grupos:

Detectores activos, donde mediante fenómenos de ionización se obtienen impulsos eléctricos o corrientes que se miden simultáneamente a la interacción de los neutrones. Dentro de este grupo pueden incluirse los detectores de ionización en gases (cámaras de ionización, basados en la reacción $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ y contadores proporcionales, basados en la reacción $\text{He}^3 + n \rightarrow \text{H}^3 + p$), de centelleo, de semiconductor y autoenergizados.

Detectores pasivos que son alterados de alguna forma por la acción de los neutrones. La medida de esa alteración determina la cuantía de la interacción neutrónica. No existe simultaneidad entre la interacción de los neutrones y su determinación, la cual se realiza posteriormente en el laboratorio. Dentro de este grupo figuran los detectores de activación, de trazas y TLD.

Uno de los equipos más usados para la medida de neutrones, son los contadores proporcionales donde se usa la reacción nuclear $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Tanto la partícula alfa de 1,47 MeV como el núcleo de litio de 0,84 MeV formados, provocan una densa ionización al atravesar el gas de una cámara o de un contador proporcional; el movimiento de las cargas resultantes dará lugar a la formación en el electrodo colector de un impulso eléctrico en respuesta al neutrón detectado.

5.3 Detectores de centelleo

El funcionamiento de los detectores de centelleo se basa en la luminiscencia que se genera en ciertos materiales cuando éstos son afectados por la radiación.

Estos materiales luminiscentes (compuestos cristalinos) tienen la característica, de que una parte de la energía absorbida, la devuelven en forma de luz visible o ultravioleta, para que un dispositivo fotoeléctrico (fotomultiplicador, figura 5) con una adecuada sensibilidad, actúe como espectrómetro y convierta la luz generada en un impulso de tensión. Así se logra un alto rendimiento de detección y un tiempo de resolución corto.

Los materiales luminiscentes usados en los detectores de centelleo son de composición química orgánica o inorgánica. Existe actualmente gran variedad de materiales de centelleo: inorgánicos como $\text{SZn}(\text{Ag})$, $\text{INa}(\text{Ti})$, $\text{IK}(\text{Ti})$, $\text{ICs}(\text{Ti})$, $\text{SrI}_2(\text{Eu})$, $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ y orgánicos como el poliviniltolueno, poliestireno, xileno, etc.

Este tipo de detectores debe reunir una serie de características, entre las que destacan las siguientes:

- La transparencia a su propia luz de centelleo.
- El coeficiente de conversión luminiscente, definido como la fracción de energía cedida por la partícula o fotón primario, que se convierte en energía luminosa.
- Activadores (sustancias añadidas en pequeñas proporciones), que desvían la longitud de onda del cristal puro hacia valores mayores.
- El comportamiento temporal del impulso luminoso generado por cesión de energía al cristal (absorción de radiación ionizante).
- El espesor del cristal debe ser en lo posible igual al alcance máximo si se trata de partículas cargadas. En el caso de radiación gamma debe tener

el mayor espesor posible (limitaciones prácticas y económicas) y poseer un número atómico lo más elevado posible.

Los detectores de centelleo se pueden clasificar en sólidos y líquidos.

5.3.1 Detectores de centelleo sólido

En cuanto al centelleo sólido, los de mayor uso son de dos cristales formados por haluros: el yoduro de cesio (CsI) y el yoduro de sodio (NaI), cuyo ejemplo se puede observar en la figura 6, y siendo este último el más utilizado. Al igual que en los semiconductores existen en los cristales de centelleo sólido las dos bandas características de los cristales (modelo de bandas, en figura 7): la banda de valencia y la banda de conducción, entre las cuales se encuentra la banda prohibida.

La radiación que incide en el material cristalino, produce el paso de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, siendo “desexcitado” el cristal por la emisión de luz (fotones) que es capaz de arrancar electrones del foto tubo; para que el contacto óptico sea continuo entre el centelleador y el foto-tubo se pone una lámina de silicona. El inconveniente estriba en que los fotones generados son capaces, a su vez, de producir nuevas ionizaciones y por tanto el cristal no es transparente a su propia luz.

Esta dificultad se obvia introduciendo en la red cristalina, en muy pequeña proporción, un tipo de átomo diferente de los que constituyen la red y que tenga el estado fundamental y excitados dentro de la banda prohibida. Este tipo de impureza se llama activador, como se comentó anteriormente. En el INa el activador es el talio y los cristales se describen como NaI(Tl). Este tipo de detector da un espectro de emisión que se adecua casi perfectamente a la curva de sensibilidad de los fotomultiplicadores estándar, a lo que se suma un alto rendimiento de conversión y la gran eficiencia de detección favorecidos por su alta densidad y por la posibilidad de obtener cristales de gran tamaño.

La interacción de la radiación con el cristal se debe a los tres efectos característicos, fotoeléctrico, Compton y producción de pares. En todos los espectros con cristales de este tipo (para radiación gamma comprendida entre 100 y 4.000 KeV) tienen un componente discreto y otro característico (foto picos).

Aparece, además, un pico de “retrodispersión” (también llamado back-scattering) debido a que el fotón puede ser reflejado por el cristal, por la ventana del fotomultiplicador o por el blindaje, ese pico es proporcional al número atómico del elemento con el que interacciona (con el que se refleja).

Cuando la energía del fotón que incide es muy baja, menor de 100 KeV, como la radiación tiene muy poca penetración, la interacción Compton tendrá lugar muy cerca de la superficie del detector y se produce un escape.

Si la sustancia a medir es de muy poca actividad, el cristal de NaI(Tl) puede tener en una ventana un pozo en donde se introduce la muestra a medir para aumentar su eficiencia.

Otro detector todavía en uso es el de ZnS(Ag), que sólo puede usarse en forma de polvo cristalino cuya transparencia se mantiene sólo para espesores muy delgados. Son, sin embargo, adecuados para la espectrometría de partículas alfa más energéticas sin que se absorban significativamente partículas beta o fotones.

Estos detectores son adecuados para determinaciones espectrométricas cualitativas y cuantitativas, de emisores gamma. Se usan especialmente en los controles radioquímicos en Centrales Nucleares, que requieren análisis periódicos de actividad para controlar la química en las condiciones de operación, vigilar la tasa de corrosión, rotura de vainas, etc.

Además, y debido a la gran variedad de tipología de cristales y componentes asociados, los detectores de centelleo se usan en una amplia variedad de situaciones, para detectar desde partículas alfa y beta, hasta medidas de radiación debido a rayos X, gamma y neutrones, y espectrometría.

5.3.2 Detectores de centelleo líquido

Los principios básicos que caracterizan cualquier sistema de detección por centelleo líquido son similares a los de NaI(Tl). Es decir, se pretende que las partículas cargadas en movimiento cedan parte de su energía al medio centelleador, que la luz producida en la excitación de las moléculas centelleadoras sea detectable por los fotomultiplicadores y que éstos sean capaces de convertir dicha luz en impulsos eléctricos de altura proporcional a la energía de la partícula.

El centelleo líquido posee una serie de características propias. En primer lugar, aunque es perfectamente posible la detección de radiación electromagnética (rayos X o gamma) como en los sólidos, la principal aplicación del centelleo líquido no se encuentra en el análisis de este tipo de radiación, sino en la posibilidad de detectar partículas beta y alfa con rendimientos muy elevados. Por otro lado, el hecho de que la sustancia radiactiva se disuelva en el seno mismo del centelleador, permite eliminar los problemas derivados de la autoabsorción en muestras alfa y beta. Por tanto, se puede afirmar que el centelleo líquido es un instrumento muy eficaz cuando se desea estudiar cualquier muestra radiactiva, puesto que permite la detección de radiación alfa, beta o gamma.

En general, un líquido centelleador está compuesto de un disolvente y dos o más solutos. La función del disolvente es facilitar la distribución homogénea de la muestra radiactiva en el centelleador y transmitir la energía de excitación al soluto. La función del soluto es transformar dicha energía de excitación en luz. Con la utilización de los distintos solutos (primario, secundario, etc.) se consigue adaptar la emisión de luz al intervalo de longitudes de onda en el cual es más sensible el fotomultiplicador.

La muestra radiactiva, junto con el líquido centelleador, se incorporan a viales con tamaños y formas estándar. Debido a que una parte importante de la luz producida en el centelleador sale del vial por reflexión total, el rendimiento de detección depende del volumen total incorporado al vial.

Un centelleador líquido tiene una eficiencia del 98% al 100% y un tiempo de resolución del orden de 10-10 segundos. El problema básico del centelleo líquido es la extinción ("quenching") que es cualquier proceso activo que reduce la eficiencia de la transmisión de energía del disolvente al centelleador primario y de éste al secundario. Todas las sustancias producen extinción.

El método de calibración interna, que consiste en medir la muestra y después añadir a la misma una actividad conocida de un patrón de actividad A. Midiendo de nuevo la muestra, si no existiera extinción, la nueva actividad sería la inicial más A; y se puede calcular la eficiencia de la muestra patrón que será la misma

que la de la muestra problema, ya que al añadir el patrón no hemos añadido ningún factor de extinción adicional.

Otra posibilidad es el método de calibración externa que se basa en que cuanto mayor es la energía de las partículas mayor es el desplazamiento del espectro. Los aparatos de medida están dotados de patrones internos (^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{152}Eu) emisores gamma. El patrón que se desea utilizar se saca de su blindaje y se coloca detrás de un vial con sólo centelleador. La radiación gamma interacciona por efecto Compton con el líquido y los electrones emitidos se comportan como si fueran partículas beta.

Colocando viales con distintas cantidades de extintor se puede obtener una curva de calibración.

5.4 Detectores de termo luminiscencia (TL)

Los detectores de termo luminiscencia, descritos en el tema B.7 del tercer ejercicio, son especialmente utilizados para medidas dosimétricas de trabajadores expuestos a las radiaciones, junto a otras nuevas tecnologías también reseñadas en el mismo tema.

5.5 Detectores semiconductores

Los detectores semiconductores (también denominados de estado sólido) se basan en materiales como el silicio o el germanio. Los nuevos avances en materiales se centran en Teluro de Cadmio Zinc, Teluro de Cadmio, Diyoduro de Mercurio, etc. En general, los semiconductores son materiales, inorgánicos u orgánicos, que tienen la capacidad de controlar su conducción dependiendo de la estructura química, la temperatura, la iluminación y la presencia de impurezas donadoras (como el Li). El nombre semiconductor proviene del hecho de que estos materiales tienen una conductividad eléctrica entre la de un metal y un aislante. Tienen un rango de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción donde los estados electrónicos están prohibidos. A diferencia de los conductores, los electrones en un semiconductor obtienen la energía de la radiación ionizante para atravesar el intervalo de banda y alcanzar la banda de conducción.

Cuando la radiación ionizante interactúa con el material semiconductor, excita a un electrón fuera de su nivel de energía y, en consecuencia, deja un hueco (generación de pares electrón-hueco). En los detectores de semiconductores, los portadores de información fundamentales son estos pares de huecos de electrones, que se producen a lo largo del camino tomado por la partícula cargada (primaria o secundaria) a través del detector (figura 8). Bajo un campo eléctrico, los electrones y los huecos viajan a los electrodos, donde generan un pulso que se puede medir.

Este pulso lleva información sobre la energía de la radiación incidente original. El número de tales pulsos por unidad de tiempo también proporciona información sobre la intensidad de la radiación.

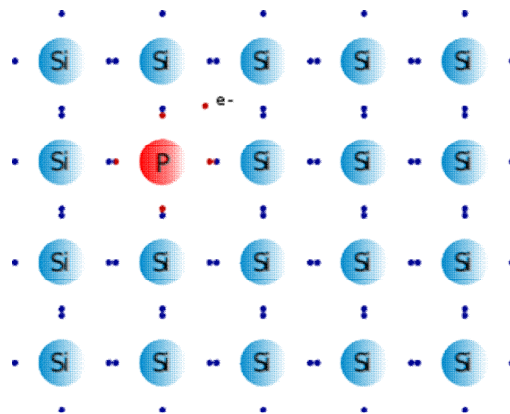
Se pueden distinguir dos tipos de semiconductores: los intrínsecos, que conducen la corriente eléctrica debido a su estructura atómica, y los extrínsecos que resultan de añadir a un semiconductor intrínseco ciertas impurezas que aumentan la conductividad. Este segundo tipo de semiconductores es el más utilizado.

Existen dos tipos de semiconductores:

- Tipo n, donde los electrones son mayoritarios y los huecos minoritarios. Poseen átomos de impurezas que permiten la aparición de electrones (de ahí su denominación de negativo o N) sin huecos asociados a los mismos semiconductores.

Los átomos de este tipo se llaman *donantes* ya que "donan" o entregan electrones. Suelen ser de valencia cinco (grupo XV de la tabla periódica), como el arsénico y el fósforo.

El siguiente es un ejemplo de dopaje de silicio por el fósforo (dopaje N). En el caso del fósforo, se dona un electrón.

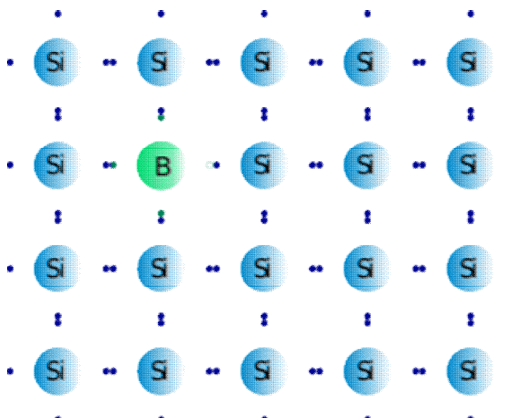


Dopaje de tipo N

- Tipo p, donde los huecos son mayoritarios y los electrones minoritarios. Los átomos de sus impurezas permiten la formación de huecos (de ahí que se denominen P o positivos) sin que aparezcan electrones asociados a los mismos, como ocurre al romperse una ligadura.

Los átomos de este tipo se llaman *aceptores*, ya que "aceptan" o toman un electrón. Suelen ser de valencia tres (grupo XIII de la tabla periódica), como el aluminio, el indio o el galio.

El siguiente es un ejemplo de dopaje de silicio por el boro (dopaje P). En el caso del boro le falta un electrón (de acuerdo con la regla del octeto) y, por tanto, se dona un hueco de electrón.



Dopaje de tipo P

El uso de los semiconductores permite un nivel de resolución alto y sirven para medida y detección de partículas cargadas, rayos X y gamma.

6. INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA

Algunos de los componentes que forman parte de los detectores de radiación, son:

- Preamplificadores y amplificadores de impulsos, cuya misión es aumentar la respuesta recibida primigeniamente en el detector.
- Discriminadores y conformadores de impulsos, cuya misión es diferenciar las señales producidas por la radiación de las producidas por el "ruido" del sistema.
- Contadores de impulsos, cuya misión es totalizar digitalmente los impulsos detectados a lo largo de un intervalo de tiempo determinado.
- Integradores de impulsos, con el mismo fin anterior, son convertidores frecuencia-tensión que proporcionan a la salida una tensión proporcional a la frecuencia de los impulsos aplicados a la entrada.
- Fuentes de alta tensión, destinados a polarizar adecuadamente los diversos tipos de detectores, con una amplia gama que va desde los 100 a los 2.500 Voltios.
- Cadenas de recuento. Todos los equipos señalados hasta ahora forman parte de una cadena de recuento que será más compleja o más simple en función del tipo de detector utilizado.
- Analizadores mono canal. Los impulsos que proceden de un detector presentan una gran diversidad de amplitudes. Las señales que le llegan se llevan simultáneamente a dos discriminadores acondicionados para actuar como límite interior y superior, respectivamente, cuya salida está conectada a un circuito de anti-coincidencia, de forma que permite el paso de los impulsos sólo en el caso de que no lleguen simultáneamente a las dos entradas. El nivel más bajo se denomina umbral y la diferencia entre ambos, ventana.
- Analizadores multi canal. Es un equipo capaz de contar los impulsos clasificados por amplitudes (y, por tanto, por energías de la radiación incidente); consiste en un conjunto de analizadores mono canales con umbrales y ventanas ajustados de tal modo que cubran todo el espectro de amplitudes de impulsos de detección; cada señal se canalizada hacia un cierto número de contadores, cada uno de los cuales actúa como canal independiente. La calibración en energía (número de cuentas obtenidas a diferentes energías) es básica para obtener unos resultados aceptables. Estos contadores han sufrido grandes avances, gracias al desarrollo de la técnica y ya existen equipos pre-calibrados para diferentes isótopos.

7. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

Los instrumentos de radioprotección se deben seleccionar en función del tipo y características de la emisión radiactiva principal en la instalación, teniendo en cuenta por lo tanto el tipo de radiación que el equipo puede medir, el rango energético que es capaz de detectar, rango de medida (debería cubrir hasta los potenciales riesgos radiológicos que puedan ocurrir en la instalación), la

eficiencia (respuesta en función de la energía y/o radioisótopo), magnitud de medida buscada (tasa de dosis equivalente ambiental/direccional para vigilancia radiológica con monitores de radiación o dosis equivalente personal para vigilancia dosimétrica personal en dosímetros de lectura directa, etc.). Otras características a tener en cuenta son el tiempo de respuesta, sensibilidad, factor de conversión, geometría de eficiencia (2π o 4π), límite de escala en unidades, saturación, escala logarítmica o lineal y analógica o digital, facilidad de uso, iluminación, audio, respuesta a diferentes ambientes (temperatura, humedad, campos magnéticos, radiofrecuencias, etc.), batería, tamaño, peso, portabilidad, robustez, fiabilidad, utilidad y costes de mantenimiento.

Otros aspectos importantes son:

- Deben mostrar las medidas en unidades del sistema internacional, tal y como se establece en las normas UNE de instrumentación de radioprotección, así como por el establecimiento de dicha característica desde 1986 en la Unión Europea.
- Cada equipo de medida debe ir acompañado de un certificado. La información que debe incluir está establecida en las normas IEC mencionadas en este tema.
- Los instrumentos de radioprotección deben tener una sensibilidad mínima de detección adecuada a las medidas que se pretenden realizar
- Se debe considerar también la importancia buscada en la exactitud de la medida.
- Hay que tratar de seleccionar aquel equipo de medida cuya curva de respuesta (eficiencia) respecto a la radiación predominante en la instalación (tipo y energía) sea lo más próxima a la unidad, para así asegurar una medición lo más fidedigna posible.
- La respuesta angular es una característica del detector de suma importancia. Nos da la dependencia de la medida en función de la dirección de la radiación incidente. El desconocimiento de dicha característica puede provocar errores significativos en la toma de medidas.

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

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

Si se coloca una fuente puntual en mitad del aire se puede asumir que la mitad de las partículas se dirigirán hacia el plano superior, mientras que la otra mitad se dirigirá hacia el plano inferior. Si colocáramos un detector sobre dicha fuente, el máximo de actividad que se podrá detectar es la mitad de la tasa de desintegración de la fuente (2π). Por ejemplo: los certificados de fuentes suelen dar una tasa de emisión de 2π . Esto significa que la fuente ha sido calibrada basándose únicamente en las partículas emitidas desde una superficie de la fuente. Si introducimos la tasa de emisión 2π en nuestra configuración de

calibración en el monitor, obtenemos una calibración 2π para ese monitor. Una calibración de eficiencia 2π del 74% para Sr-90 sería lo mismo que una calibración de eficiencia 4π del 37% para Sr-90.

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

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

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

8. CONSIDERACIONES GENERALES. ELECCIÓN DE EQUIPO. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN.

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

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

Para la elección adecuada de un instrumento de medida de la radiación hay que tener en cuenta el tipo de aplicación para la que vaya a ser destinado. Entre otros parámetros habrá que considerar las siguientes características:

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

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

ambiental de neutrones) e IEC 61526 (Dosímetros individuales de lectura directa de dosis equivalente y/o de tasa de dosis equivalente).

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

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

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

9. CONTROL DE CALIDAD. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN. INSPECCIÓN VISUAL.

El control de calidad de la instrumentación para la medida de la radiación se basa en tres procesos: la calibración, la verificación y lo que podemos definir como inspección visual. Estos controles deben estar incluidos en un procedimiento técnico que detalle aspectos como:

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

10. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE EQUIPOS

Antes de proceder a desarrollar ambos conceptos, es necesario proporcionar una definición de los mismos:

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

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

10.1 Calibración

La calibración es un proceso absolutamente fundamental en la mayoría de la instrumentación para la detección y medida de la radiación, y, por lo tanto, también para la Protección Radiológica. A la hora de tomar decisiones en esta materia, es básico detectar y medir la radiación. Para ello, se debe “confiar” en las medidas obtenidas por los equipos de medida. Esa confianza está depositada en pocos aspectos, siendo uno de ellos el que nos atañe en este apartado.

Los valores que obtendremos al realizar las diferentes medidas, están respaldados por la calibración, de cuya realización, obtenemos los datos de la desviación de nuestra medida respecto a un patrón convencionalmente verdadero (patrón de referencia) y garantizamos que su funcionamiento es correcto en todo su rango de operación

La calibración se puede llevar a cabo en diferentes tipos de laboratorio.

10.1.1 Laboratorio de calibración acreditado

Los laboratorios de calibración acreditados garantizan la trazabilidad y fiabilidad de los resultados de las calibraciones al haber sido acreditados por un organismo nacional de acreditación en la norma internacional Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (ISO/IEC 17025)” o por disponer de acreditación internacional (Anexo A, sección A.3. de la norma nombrada) emitida por el BIMP (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), EURAMET, etc. Para saber si un laboratorio dispone de acreditación y que alcance tiene, se puede acudir a la página web de ENAC (Entidad Nacional de Acreditación en España) que dispone de un buscador de entidades acreditadas o a ILAC (Organización Internacional para Organismos de Acreditación), en caso de necesitar información sobre laboratorios acreditados de otras naciones.

En España existen cuatro laboratorios de calibración “acreditados”:

- Laboratorio de Metrología de las Radiaciones Ionizantes, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Es el depositario de los Patrones Nacionales para la radiación gamma (^{137}Cs y el ^{60}Co), para Rayos X, para radiación beta y de actividad, entre otros. Los patrones secundarios del CIEMAT son trazables a patrones primarios de Alemania, Francia y Reino Unido.
- El Laboratorio de Calibración y Dosimetría, del Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de Cataluña. Dispone de la capacidad para calibrar en radiación gamma (^{137}Cs y el ^{60}Co), para Rayos X, para radiación beta y actividad. Sus patrones son trazables a patrones primarios y secundarios.
- Laboratorio de Metrología de las Radiaciones Ionizantes, del Centro Nacional de Dosimetría. Dispone de la capacidad para calibrar en Rayos X y sus patrones son trazables a patrón primario.
- Centro de Metrología y Calibración, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial “ESTEBAN TERRADAS” (INTA). Dispone de la capacidad para

calibrar en radiación gamma (^{137}Cs y el ^{60}Co). Sus patrones son trazables a patrones nacionales.

El usuario de la instrumentación, además de conocer que laboratorios de calibración están acreditados, a la hora de calibrar su equipamiento debe tener en cuenta también los siguientes aspectos:

- Elección del radioisótopo o calidad de haz de rayos X igual a la principal fuente radiactiva/equipo emisor de radiación presente en la instalación (en caso de disponer de una fuente radiactiva de ^{137}Cs se deberá seleccionar la calibración en ese radioisótopo, y en caso de no disponer los laboratorios acreditados de los radioisótopos o calidades de haces de rayos X necesarios, se elegirá el tipo y la energía de radiación más próxima al de interés en la instalación). Por ello, resulta indispensable conocer con antelación la relación de “fuentes” con los que trabajan en cada uno de los laboratorios de calibración. Cabe indicar que para los equipos diseñados bajo las normas IEC y para medida de tasa de dosis ambiental $\dot{H}^*(10)$, en caso de calibrar frente a una fuente encapsulada de ^{137}Cs , si la respuesta del monitor está dentro de tolerancias, se puede afirmar con cierta seguridad que lo será también para el rango de energía para el que ha sido diseñado.
- En algún equipamiento de radioprotección podría suceder que, debido a la actividad de la fuente, se supere el rango de medida del equipo si este es muy corto y se deba usar otro radioisótopo que no sea el mismo que se usa mayoritariamente en la instalación o del mismo rango de energía.
- Seleccionar calibraciones para los rangos o escalas de medida con presencia o potencial presencia en la instalación. En algunos laboratorios se solicita seleccionar dicha característica. En caso de no disponer de esta información, se puede calibrar en el último tercio de escala.
- Seleccionar calibraciones para tasa de dosis ambiental/direccional, dosis personal y/o actividad/contaminación superficial.

10.1.2 Laboratorio de calibración certificado

A diferencia de los laboratorios de calibración acreditados, los laboratorios de calibración certificados son aquellos que sin disponer de la acreditación en la norma ISO/IEC 17025 o equivalente, disponen de certificación de sus sistemas de gestión de calidad (ISO 9001) en calibración de instrumentos de medida de radiaciones ionizantes o certificados de conformidad de laboratorios metroológicos nacionales, etc. Además, referencian sus procedimientos de trabajo a la norma ISO/IEC 17025 o equivalente, otras normas IEC/ISO, etc.

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

Además, calibran a diferentes escalas de medida, desde tasas de dosis muy bajas a tasas de dosis altas. Este aspecto es de importancia, porque sólo este tipo de laboratorios junto con los acreditados disponen de las fuentes y

metodologías necesarias para poder calibrar en todo o en la mayor parte del rango de medida de la instrumentación. Estas fuentes radiactivas que disponen, también corresponden al tipo de radioisótopo recomendado por las normas de calidad para la realización de algunas calibraciones.

Muchos de estos laboratorios, suelen pertenecer a los fabricantes de la instrumentación de medida.

10.1.3 Otros laboratorios de calibración

Existen otros tipos de laboratorios de calibración, como los situados en las centrales nucleares. Estos laboratorios, se distinguen de los comentados anteriormente, en que sus servicios no se prestan a terceros. Disponen de fuentes de alta actividad para poder calibrar en un amplio rango de medida; personal técnico con formación; trabajan bajo procedimientos basados en normas ISO/IEC y otras recomendaciones internacionales; equipo patrón trazable a laboratorio metrológico con patrones nacionales, etc.

10.1.4 Certificado de calibración

Una vez obtenido el certificado de calibración, se deberán analizar los resultados para tener en cuenta las desviaciones y/o eficiencias del monitor a la hora de medir tasa de dosis equivalente ambiental $\dot{H}^*(10)$, tasa de dosis equivalente direccional $\dot{H}'(0,07)$, dosis equivalente personal H_p y/o actividad/contaminación superficial. En cuanto a tasa de dosis equivalente ambiental y direccional, la variación de la respuesta del equipo no debería superar el -15% y +22% (factor de calibración 1,17 y 0,82) para radiación debida a partículas beta y fotones, y -17% y +25% (factor de calibración 1,20 y 0,8) para neutrones, del valor convencionalmente verdadero establecido por el laboratorio, y si es así, habrá que prestar atención al comportamiento del equipo y tomar las acciones oportunas (comprobar anteriores calibraciones para comparar con la desviación inicial, mandar a reparar al fabricante, seguimiento periódico, disminución de los períodos de calibración, aumento de la periodicidad en verificación...). Si se supera el 40% se debe enviar el monitor al fabricante a reparar o darlo de baja. Para monitores de contaminación, la respuesta respecto a la tasa de emisión superficial no debería diferir en más de un 20% (conjunto de detección/monitor más sonda) -25% (monitor de contaminación) del valor fijado por el fabricante para el radionucleido especificado y en las mismas condiciones de uso.

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

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

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

- Fiabilidad de la verificación periódica, etc.

En la evaluación de los procedimientos de calibración y verificación llevada a cabo en el CSN, se comprueban los periodos establecidos (entre otros aspectos) por el titular de la instalación y se puede requerir, en caso necesario, su modificación. Por ejemplo, en el caso de monitores usados como equipo de referencia (denominados normalmente como “equipo patrón”) en instalaciones con riesgo radiológico “alto”, la periodicidad de calibración recomendada debe ser reducida; en instalaciones con riesgo radiológico muy bajo, poco uso, y tasas de dosis bajas, el periodo de calibración puede ser más amplio (cuatro o seis años) e incluso proceder sólo a verificaciones periódicas. En el caso de equipamiento usado para búsqueda de fuentes, estados de fuente fuera/fuente dentro, comprobación de acelerador irradiando o parado, etc., sólo es necesaria la calibración en origen y una verificación funcional.

Debido a la amplia variedad de instalaciones nucleares y radiactivas, hay muchos casos “particulares”. Pongamos como ejemplo un laboratorio donde se usa ^{14}C no encapsulado. En este tipo de instalación y teniendo en cuenta la baja eficiencia de los monitores de contaminación para el ^{14}C , si se aplican procedimientos de vigilancia radiológica mediante frotis y se dispone de un adecuado procedimiento de verificación (con baja periodicidad y con disponibilidad de fuente encapsulada de ^{14}C), la calibración podría usarse únicamente en caso de que las verificaciones resulten en desviaciones por encima de los valores establecidos, o incluso, prescindir de la misma.

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

10.2 Verificación

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

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

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

Existen distintos métodos de verificación en función de las fuentes disponibles en las instalaciones, pudiendo ser fuentes radioactivas encapsuladas, no encapsuladas o rayos X. Además, la verificación puede ser realizada por técnicos propios o en entidades externas.

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

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

10.2.1 Prueba de la verificación

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

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

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

En el caso de uso de fuentes radiactivas como fuente de referencia, es importante que las mismas dispongan de un certificado de actividad. De esta

manera no sólo nos aseguramos la actividad de la fuente, sino también del error asociado a ese valor o la trazabilidad.

Si usamos una metodología de verificación por decaimiento de la fuente por periodos de tiempo, se debe usar la fórmula para aplicar el factor de corrección por decaimiento y relacionar la medida obtenida con la actividad:

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

A: Actividad absoluta

A_0 : Actividad inicial de la fuente

λ : Constante de semidesintegración

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

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

En instalaciones con equipos emisores de rayos X de cierta potencia e intensidad (rayos X industriales, aceleradores, etc.) se dispone de una fuente de referencia estable y cuyas características de disparo pueden ser ajustadas y reproducidas por el personal técnico a las necesidades del proceso de verificación.

En el caso de disponer de varios instrumentos de radioprotección, si uno de los mismos se establece como equipo de referencia y es calibrado periódicamente en un laboratorio de calibración, las medidas obtenidas con los instrumentos no calibrados pueden compararse con la medida obtenida por el de referencia y calcular la desviación respecto a éste último. De esta manera el equipo de referencia también es verificado, al tener valores periódicos de verificación y poder contrastarlos. En el ámbito de las instalaciones radiactivas esta prueba suele denominarse como intercomparación.

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

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

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

La periodicidad recomendada se establece en función de los resultados obtenidos y otros factores como el tipo de instalación, tipo de riesgo presente en la instalación, periodicidad de uso, exactitud buscada en la medida, etc. El periodo máximo establecido no debe superar el año, siendo recomendable al menos una verificación semestral.

10.3 Inspección visual

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

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

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

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

11 BIBLIOGRAFÍA

1. Guía de Seguridad del CSN GS-05.17. Calibración y verificación de la instrumentación de radioprotección para la medida de la radiación y contaminación en instalaciones radiactivas
2. Curso experto en Protección Radiológica. CIEMAT. 2017.
3. Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración".
4. Norma UNE-EN 60846-1:2014 "Instrumentación de radioprotección. Medidores y/o monitores de (tasa) dosis equivalente ambiente y/o direccional para las radiaciones beta, X y gamma. Parte 1: Instrumentos de medida y control portátiles para lugares de trabajo y el medioambiente.
5. Norma UNE-EN 60846:2009 "Instrumentación de radioprotección. Medidores y/o monitores de (tasa) dosis equivalente ambiente y/o direccional para las radiaciones beta, X y gamma.
6. Norma UNE-EN 61005:2017 "Instrumentación de radioprotección. Medidores de dosis equivalente ambiental de neutrones (o de tasa de dosis equivalente).
7. Norma UNE-EN 60325:2005 "Instrumentación de radioprotección. Medidores y monitores de contaminación alfa, beta y alfa/beta (energía de las betas > 60 keV)".
8. Norma UNE-EN 61526:2013 "Instrumentación de radioprotección. Medida de dosis individuales equivalentes Hp (10) y Hp (0,07) para radiaciones X, gamma, neutrónica y beta. Dosímetros individuales de lectura directa de dosis equivalente y/o de tasa de dosis equivalente".
9. Curso teórico práctico de actualización en protección radiológica para el CSN. CIEMAT. 2017.

FIGURAS

FIGURA 1 (componentes básicos de un detector de ionización gaseosa)

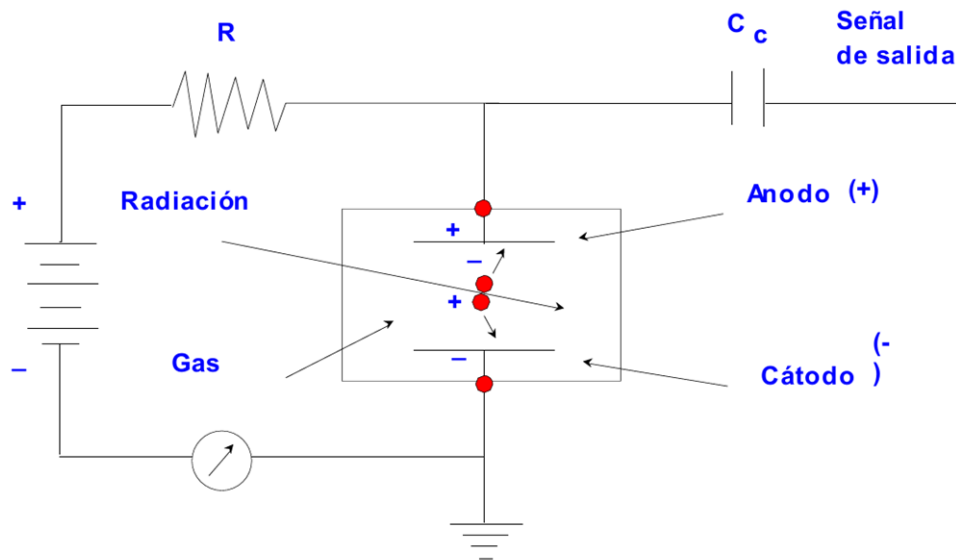


FIGURA 2 (Variación de la amplitud de impulso con la tensión aplicada a un detector de ionización gaseosa)

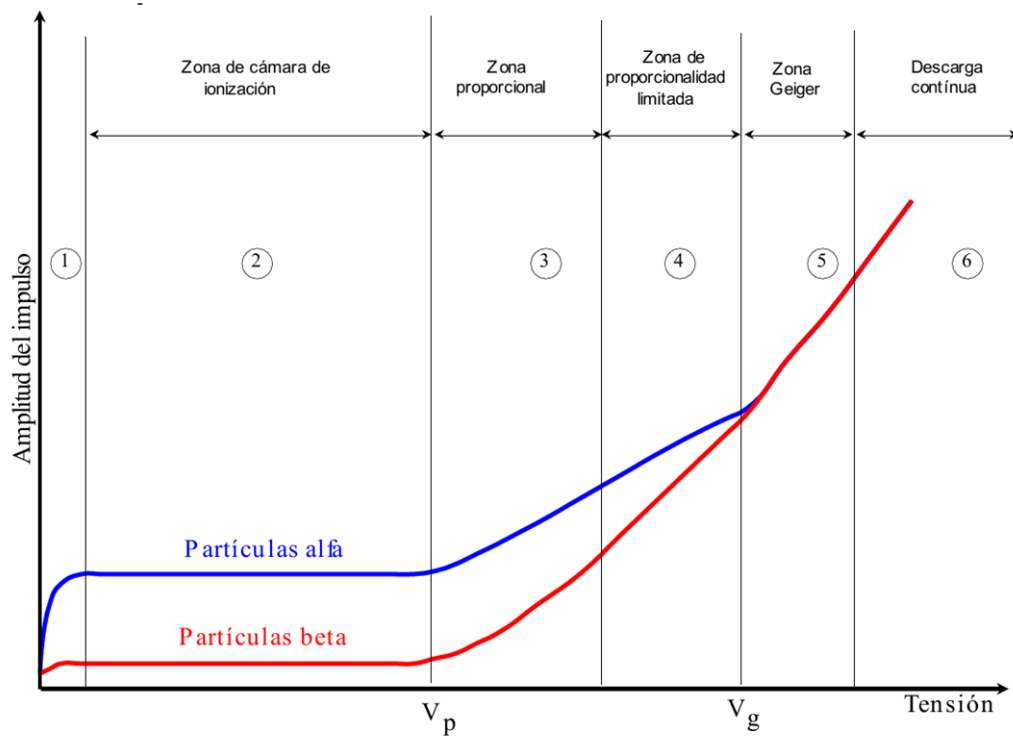


FIGURA 3 (Contador Geiger para radiación gamma)

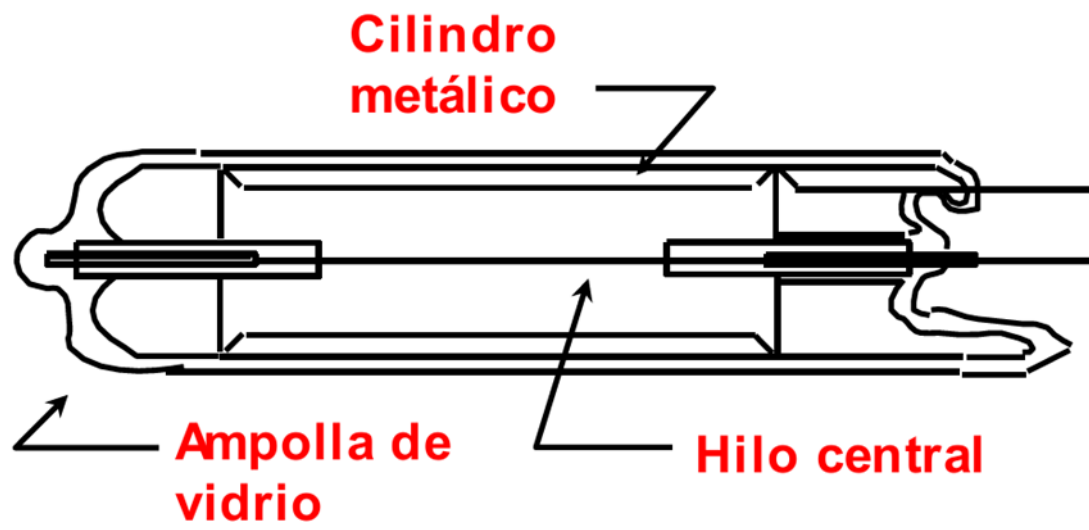


FIGURA 4 (contador Geiger para radiación Beta)

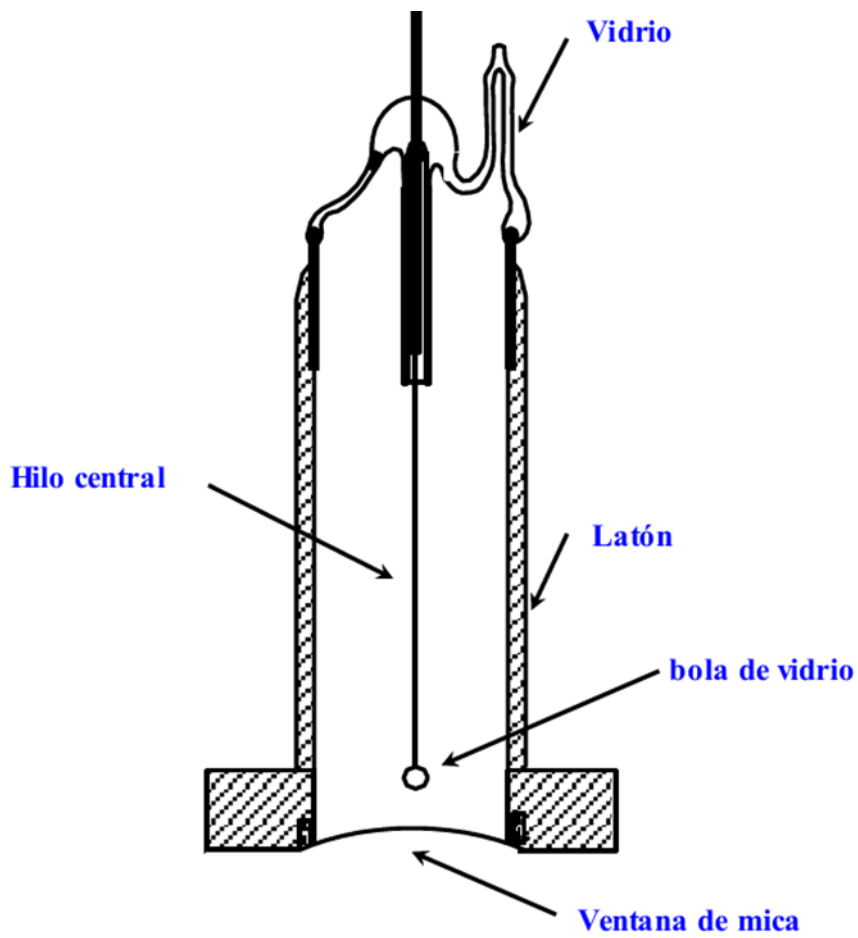


FIGURA 5 (foto-multiplicador en centelleo)

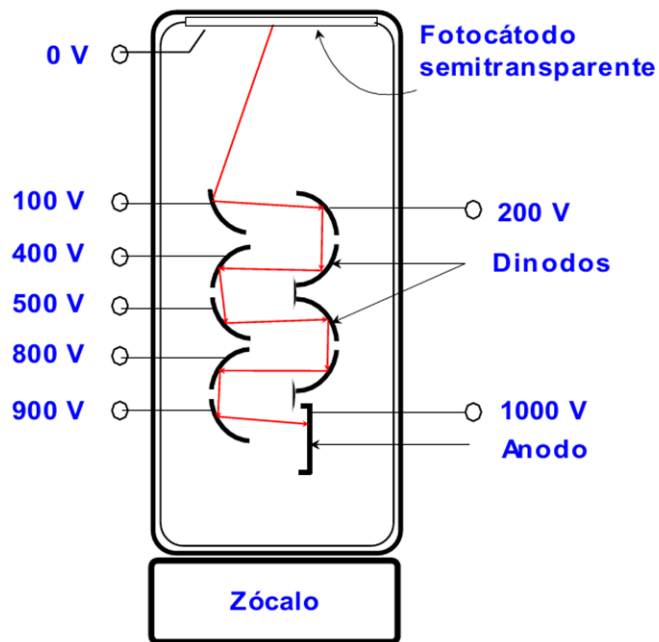


FIGURA 6 (Esquema de un detector de centelleo de NaI(Tl))

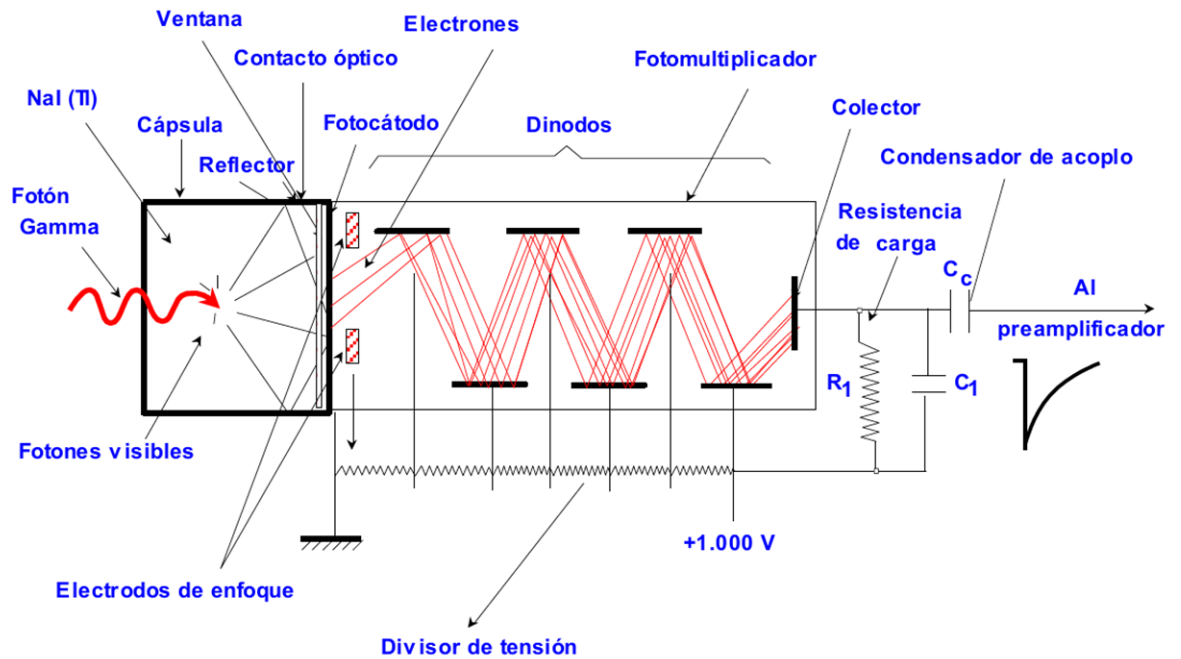


FIGURA 7 (Gráfica de la distribución de niveles energéticos en el modelo de bandas)

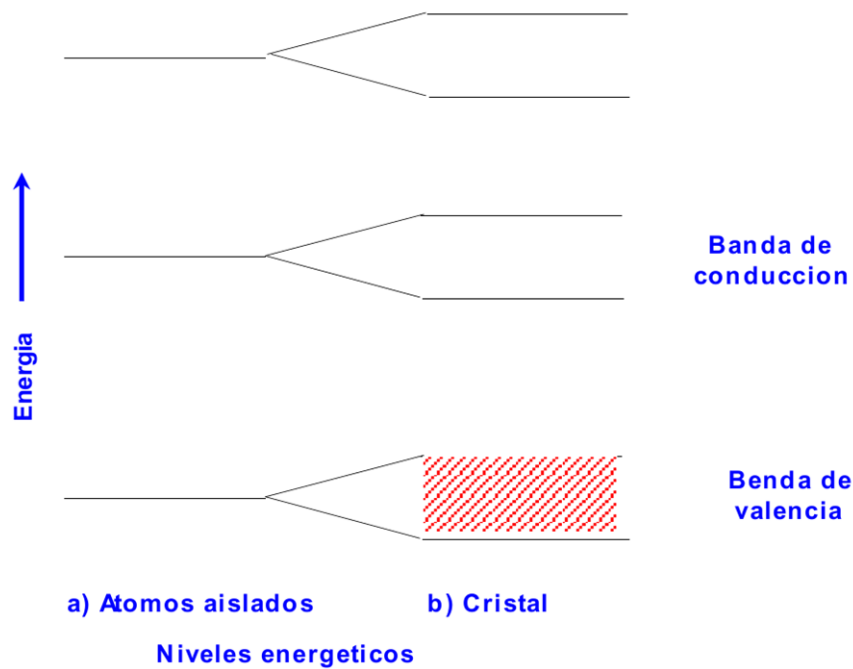
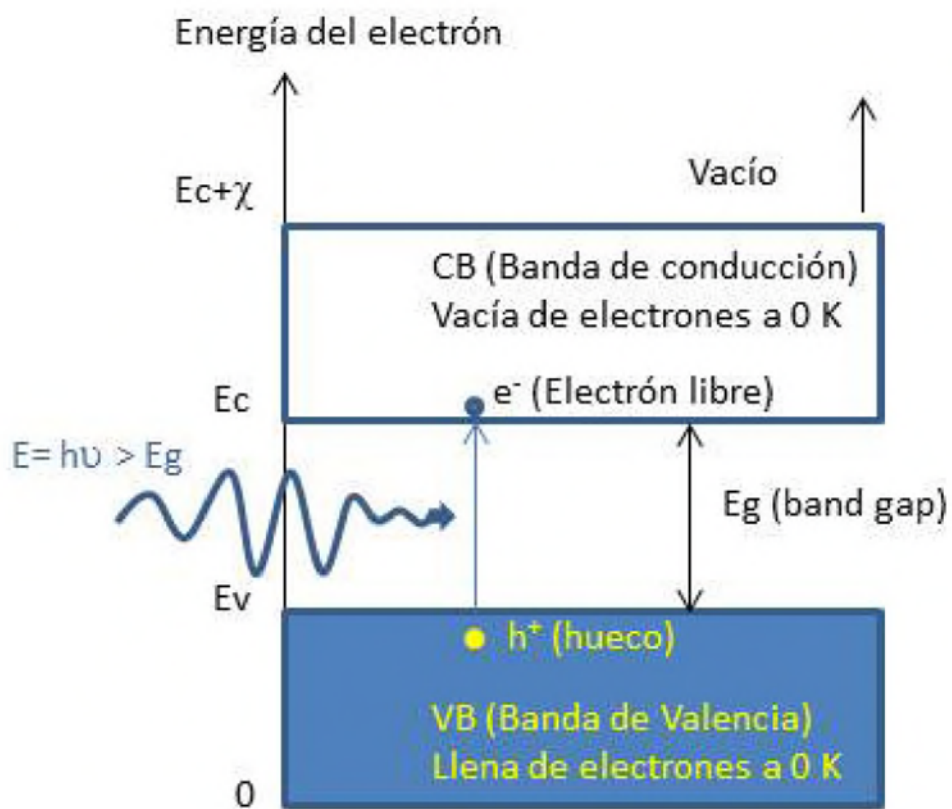


FIGURA 8 (mecanismo de absorción y diagrama de energías en un semiconductor)



ENLACES WEB. FABRICANTES DE EQUIPOS.

- 1.- LAMSE: www.lamse.es (fabricante español)
- 2.- BERTHOLD: www.berthold.com
- 3.- MIRION [Mirion, Radiation Measurement & Detection Devices](#)
- 4.- THERMO FISHER SCIENTIFIC <https://www.thermofisher.com/>
- 5.- TÉCNICAS RADIOFÍSICAS [Inicio - TRF](#) (fabricante español)
- 6.- FLUKE [RaySafe - Leader in X-Ray Radiation Dosimetry Management](#)
- 7.- POLIMASTER [POLIMASTER - Main](#)
- 8.- GRAEZT <https://graetz.com/>
- 9.- LUDLUM [Ludlum Measurements, Inc. - Ludlum Measurements Inc. \(ludlums.com\)](#)