

Diseño Integral de un Laboratorio

Secundario de Calibración Dosimétrica

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MÁSTER EN FÍSICA

PRESENTADA POR:

JORGE EDGARDO FLORES HERRERA

ASESOR:

M. SC. ALEJANDRO GALO ROLDÁN

Fecha: 28 de julio de 2021

Ciudad Universitaria

Tegucigalpa M. D. C. Honduras

Ciudad Universitaria

Tegucigalpa M. D. C. Honduras

Resumen

La función primordial de un Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD o SSDL por sus siglas en inglés) es proporcionar un servicio de Metrología específica para la medición de distintos parámetros vinculados a la radiación ionizante, a través del establecimiento medidas patrón, mediante mecanismo formales y técnicamente trazables, a valores reconocidos y aceptados como reales y exactos y así proporcionar acceso a servicios de verificación de instrumentación requeridos para la realización de los controles de calidad en aplicaciones donde la precisión de la intensidad del haz es vital, particularmente la radioterapia donde se manejan tolerancias en los valores de flujo de energía muy estrechos así como en actividades de radioprotección.

Un estándar secundario (patrón), se constituye como un eslabón fundamental del sistema de medición internacional, que se basa en la comparación de estándares de laboratorios patrones primarias, bajo el amparo de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM). El patrón secundario puede constituirse como el patrón nacional de un país, como lo puede ser para el caso de Honduras donde prima la necesidad de contar con servicio que garantice la fiabilidad de las tecnología que hacen uso de haces de radiación para el tratamiento y diagnóstico seguro y eficaz, de enfermedades. Es así, que es necesario establecer a nivel nacional la capacidad de medir las radiaciones ionizantes incluyendo las cantidades de radiación protección de interés para las personas ocupacionalmente expuestas y para protección del público en general.

Palabras clave: Calibración, Dosis, Radiación, Laboratorio, Patrón

Índice

Resumen

1

1. 5

2. 6

2.1. 7

2.1.1. 9

2.2. 10

2.2.1. 11

2.2.2. 11

2.2.3. 13

2.2.4. 14

2.3. 14

2.4. 15

2.4.1. 18

2.4.2. 20

2.4.3. 23

2.4.4. 26

2.5. 30

2.5.1. 30

2.5.2. 31

2.5.3. 32

2.5.4. 35

3. 36

3.1. 36

3.2. 38

3.2.1. 38

3.2.2. 39

3.2.3. 41

3.2.4. 42

3.3. 45

3.4. 47

3.5. 48

3.5.1. 50

3.5.2. 50

3.5.3. 50

3.5.4. 51

4.	52
4.1.	52
4.2.	53
4.3.	53
4.4.	54
4.5.	54
4.6.	55
4.6.1.	55
4.6.2.	55
4.6.3.	56
4.6.4.	56
4.7.	56
4.7.1.	56
5.	63
6.	65
Referencias	62

1. Introducción

La dosimetría es el área del conocimiento relacionada con la medición de la radiación ionizante. En el sentido más general comprende la utilización de metodologías de medición, instrumentación específica y descripción de principios físico – químicos para determinar la interacción de radiación con la materia. La interacción de la radiación con la materia a nivel

molecular y atómico manifiesta efectos que están directamente relacionados con la Dosis de radiación del medio irradiado. Por lo tanto, el conocimiento de la dosis de radiación es un requisito necesario cuando se busca alcanzar un efecto en la materia debido a la radiación. La dosis, también representa una cantidad básica utilizada en dosimetría personal para propósitos de protección radiológica.

La dosimetría es importante en tres campos de aplicación: Radioterapia, preservación de alimentos y protección radiológica. En cada campo las dosis y los requisitos de precisión de la medición son distintos. En el caso de la radioterapia la rigurosidad con relación a la precisión es mucho mayor, aquí la brecha entre la precisión requerida y la mayor precisión que se puede lograr en la práctica es muy estrecha. Por otro lado, en el caso de mediciones con fines de radio protección por lo general no se requiere una alta precisión. Lo anterior indica que en el caso de la radioterapia las verificaciones periódicas y calibración de los dosímetros es una condición necesaria y constante, en el caso de la radioprotección puede ser una condición prescindible. Históricamente, la dosimetría en radioterapia y la dosimetría personal se han desarrollado de forma bastante independiente y con poca comprensión común. En materia de radioprotección y desde el punto de vista legal, se hace necesario mantener documentada toda la cadena de trazabilidad para aquellos casos en los que hacen reclamaciones por indemnización como resultado de una exposición.

El rápido crecimiento en el uso de la tecnología nuclear y de las radiaciones ionizantes propició que fuese cada vez más importante la medición precisa de éstas. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) junto con la Organización Mundial de la Salud (OMS), han realizado importantes esfuerzos para el establecimiento de una Red de Laboratorios Secundarios de Calibración (SSDL por sus siglas en inglés) [1], partiendo desde la especial preocupación de que en países en vías de desarrollo ya se implementaban técnicas de radioterapia con Cobalto-60, siendo ésta una herramienta para el combate de tumores relacionados con el cáncer, sin embargo, si la dosis administrada no se medía con buena precisión la probabilidad de

éxito en la cura de la enfermedad se ve notablemente reducida. Una desviación mayor al 5% en la administración de la dosis al volumen del tumor puede alterar marcadamente la efectividad del tratamiento.

En el caso de Honduras, al igual que en la mayoría de la región centro americana, no se cuenta con un laboratorio capaz de realizar calibraciones dosimétricas de la precisión y calidad requeridas para actividades como la radioterapia y mucho menos para fines de protección radiológica, siendo la excepción a esta afirmación el caso de Guatemala que en la actualidad brinda el servicio de calibración dosimétrica para propósitos de radioprotección. Bajo esta perspectiva es deseable para el país contar con un servicio que garantice la precisión de la medición de las magnitudes dosimétricas, especialmente las asociadas a radioterapia con haz externo, ya que en la actualidad en el país se cuenta con cinco (5) servicios operativos y brindando tratamientos [2].

2. Marco teórico

Un Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) es una infraestructura sofisticada y compleja, designada por las autoridades nacionales de cada país, para proporcionar la necesaria cohesión entre la trazabilidad y los patrones de dosimetría de radiaciones ionizantes a nivel nacional/internacional [3]. Un LSCD está equipado con patrones secundarios de la más alta calidad metrológica para las diferentes magnitudes empleadas en radiaciones ionizantes, los cuales son trazables a los LPD y a la BIPM [3].

El soporte para la trazabilidad internacional a los LSCD está dado por los LPD del mundo y del OIEA a través del BIPM, cuyo objetivo es proveer la coherencia y robustez necesaria para la dosimetría de las medidas con las diferentes magnitudes utilizadas en el uso de las radiaciones ionizantes. La trazabilidad metrológica mundial del Sistema Internacional de medidas para dosimetría de la radiación ionizante se muestra en el siguiente Figura 1. [4] [3]

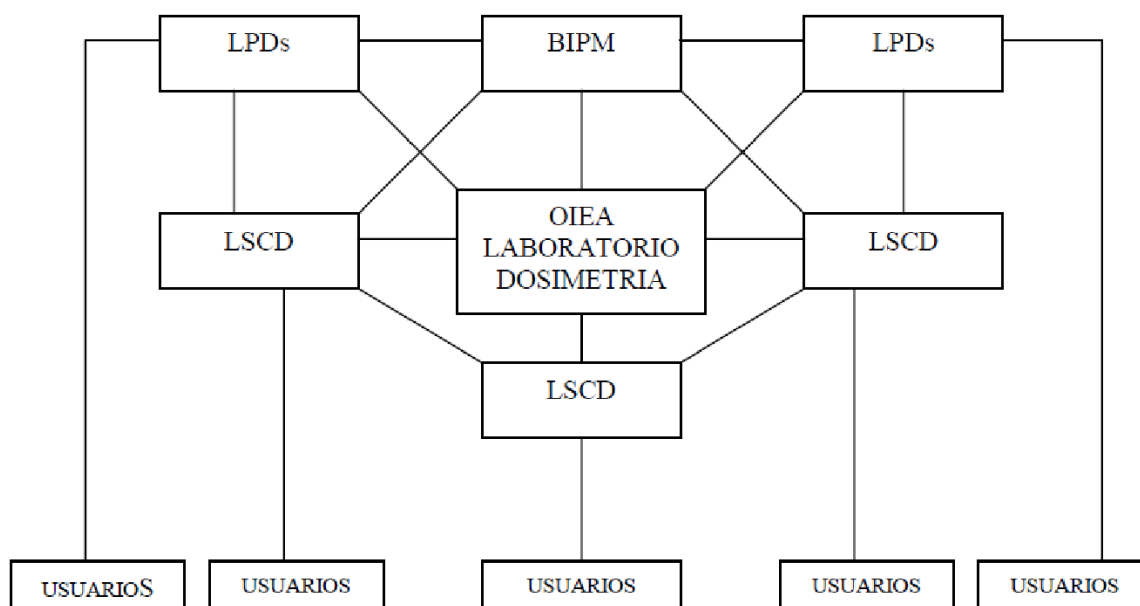


Figura 1. Trazabilidad global del Sistema Internacional de medidas dosimétricas [1]

2.1. Contexto nacional:

En el caso de Honduras, la utilidad de un servicio de calibración dosimétrica se fundamenta en la necesidad de establecer un sistema de control de calidad en radioterapia, en actividades vinculadas a la física médica de la Teleterapia y la radioprotección, ya que, en el país a la fecha, no existen este tipo de servicios. Por otro lado, este documento enfocará su atención a las necesidades de calibración dosimétrica presentadas en radioterapia y en general para la radioprotección. Este primero, debido al nivel de riesgo asociado a el uso de los haces de radiación que entregan dosis en el orden de varios Grays y cuya calibración dosimétrica es esencial para garantizar el éxito de la técnica terapéutica a implementar. Por otro lado, en relación con el uso de los equipos generadores de radiación en el orden de los rayos X no terapéuticos, las necesidades relacionadas con la metrología de la radiación, en el caso de Honduras, están orientadas al control de calidad de imagen que, en términos de exposición del paciente y riesgo asociado, son relativamente menores a los referidos a la radioterapia con haz externo.

Por otro lado, la Teleterapia como técnicas de tratamiento del cáncer en los últimos diez años ha experimentado una paulatina migración a el uso de aceleradores lineales que han ido sustituyendo lentamente a los equipos de cobaltoterapia.

En términos de control de calidad en Radioterapia, no se logra cumplimentar por parte de los usuarios, de forma periódica los procesos de calibración de los haces de radiación debido a las dificultades relacionadas con acceso a estos servicios de verificación de los instrumentos de medición. La razón fundamental argumentada, es que dicho equipo de medición debe ser enviado al extranjero para la realización de dichas calibraciones. Por otro lado, existe limitado recurso humano especializado para la realización de dichas tareas por lo que en el caso de la teleterapia enfrenta la dificultad de no contar con sistemas que garanticen la calidad de los tratamientos.

A la fecha de la realización de este documento los recursos utilizados en teleterapia para la calibración de los haces de radiación, son:

1. La contratación de un experto externo al servicio para la verificación de los haces
2. La envío del equipo de medición al extranjero para la realización de la verificación de la calibración.
3. Y en menor medida, el intercambio de equipo de medición entre servicios de radioterapia para la calibración de los haces de radiación.

Adicionalmente, en el país las iniciativas para la creación y puesta en marcha de estos servicios a nivel público se sustentan a través de la cooperación, habiéndose identificado como potencial receptor la Universidad Nacional Autónoma de Honduras a través de la Escuela de Física. Lo referido a la selección de la Escuela de Física se abordará en la sección de actores relevantes.

En el contexto nacional, se identifican actualmente siete (7) equipos de Teleterapia operando en el país, distribuidos en cinco (5) instalaciones. Dos de ellas se encuentran en San Pedro Sula y el resto en Tegucigalpa, siendo el Hospital de Especialidades San Felipe el que cuenta con dos (2) equipos operando. En la tabla 1 se describe el número de equipamientos por instalación y su localización. Los datos han sido obtenidos del Directorio de Centros de Radioterapia (DIRAC por sus siglas en inglés) administrado y publicado por el OIEA. [2]

De la misma DIRAC encontramos que la mayoría del equipamiento en radioterapia instalado en el país tiene una antigüedad no mayor a los cinco años y esto respalda lo indicado al inicio en relación con la migración progresiva a el uso de aceleradores lineales.

Tabla 1

Cantidad de equipamientos utilizados en radioterapia en Honduras

City	Operator Name	He Photon And Electron Beam Rt	Proton Ion Therapy	XRay Generator	Brachy Therapy Inc El	Last Update
		Total: 7	Total: 0	Total: 0	Total: 1	Latest: 2019
SPS	Liga Contra el Cáncer	1	0	0	0	2019
SPS	Centro Oncohematologico-COHESA	1	0	0	0	2019
TGU	Centro de Cáncer Emma Romero de Callejas	2	0	0	1	2019
TGU	Hospital De Especialidades San Felipe	2	0	0	0	2019
TGU	Centro Oncológico Hondureño	1	0	0	0	2019

Recuperado de: Directory of Radiotherapy Centres (DIRAC), IAEA.

2.1.1. Actores Relevantes:

En el contexto de Honduras y partiendo del nivel implementación que ha alcanzado el uso de la radiación ionizante en el país, particularmente en las exposiciones médicas, es posible afirmar que las técnicas para la realización de la calibración dosimétrica no deberían ser muy complejas en términos de equipamiento y realización. Inicialmente se desea contar con capacidades para la calibración de haces de fotones y posteriormente ir implementando técnicas de calibración dosimétrica para partículas beta, Alpha y finalmente, si los requerimientos tecnológicos así lo requieren, implementar la calibración dosimétrica para haces de neutrones.

Siguiendo esta orientación y tomando en consideración que la Escuela de Física de la UNAH ya cuenta con una relativa experiencia en el área de la dosimetría termoluminiscente, se puede afirmar que el recurso humano está familiarizado con la dosimetría de las radiaciones.

Actualmente, el servicio de dosimetría externa de la UNAH cuenta con un grupo de profesionales jóvenes que ha trabajado en la mejora del servicio de dosimetría personal externa y en su ampliación, por lo que han adquirido experiencia y conocimiento de las distintas tecnologías utilizadas en el país.

Por otro lado, las iniciativas privadas para la implementación de la calibración dosimétrica no se consideran viables, primero por la cantidad de instalaciones y equipos que así lo requieran, y segundo porque en términos de constituirse como una inversión con miras al lucro es una alternativa inviable, partiendo por los costes de inversión inicial, mantenimiento de los equipamientos, formación del recurso humano y finalmente demanda de los servicios.

Por lo anterior, la iniciativa estatal es a la fecha de la realización de este documento la única alternativa viable para atender una necesidad técnica que permitirá asegurar la calidad y trazabilidad de los valores de radiación ionizante requeridos.

2.2. Sistema Internacional de Medición

El Sistema Internacional de Medición provee el marco para la consistencia mundial en metrología, poniendo a disposición de la comunidad de usuarios, calibración instrumental que puede ser trazable a un patrón primario [3]. Estos patrones son verificados internacionalmente a través de comparación con otros patrones operando alrededor del mundo.

Un elemento central dentro de este marco es la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés, Bureau International des Poids et Mesures), el cual es un laboratorio establecido bajo la Acuerdo de 1875 denominada “The Metre Convention” cuya finalidad es “asegurar en todo el Mundo la uniformidad de las mediciones y su trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades” [5] [6].

Los Laboratorios Primarios de Calibración Dosimétrica que han desarrollado patrones primarios para medidas de radiación comparan sus patrones para ser comparados con los patrones del BIPM a través de una serie continua de inter-comparaciones bilaterales. Lo anterior permite evaluar la equivalencia de cualquier par de estándares primarios. Posteriormente, los Laboratorios Primarios

de Calibración calibran los patrones de los Laboratorios Secundarios de Calibración, los que se convierten en instrumentos de referencia para los usuarios. Paralelamente, BIPM calibra estándares de laboratorios secundarios nacionales que se han adherido a la The Metre Convention al no contar con estándares primarios. Adicionalmente el BIPM calibra los instrumentos de referencia del OIEA, quien a su vez calibra los patrones de la red de laboratorios secundarios del OIEA/OMS. Finalmente, el sistema internacional de medidas tiene como mandato proveer a todos los usuarios acceso a calibración de instrumentos cuyos resultados son trazables a patrones primarios que en sí mismo se comparan internacionalmente [5].

2.2.1. La Red Laboratorios Secundarios de Calibración Dosimétrica del OIEA/OMS

En 1976, el OIEA y la OMS reforzaron la implementación del Sistema Internacional de Unidades (SI) en la dosimetría de la radiación, mediante el establecimiento de una red de laboratorios secundarios de calibración dosimétrica (SSDL) para garantizar la trazabilidad de las mediciones, particularmente en países que no son miembros de The Metre Convention. Para enero del 2008, la red de laboratorios secundarios incluye 76 laboratorios y 6 organizaciones nacionales en 64 estado miembro. La red de laboratorios secundarios incluye 20 miembros afiliados como ser BIPM, varios laboratorios primarios de calibración, La comisión Internacional sobre Mediadas y Unidades de Radiación (ICRU), La Organización Internacional de Física Medica y muchas otras organizaciones internacionales [4].

2.2.2. El rol de los laboratorios secundarios de calibración dosimétrica

Un laboratorio secundario de calibración dosimétrica (LSCD) es una instalación tal que ha sido designado por las autoridades nacionales competentes, para llevar a cabo las tareas de brindar un enlace necesario para la trazabilidad de la dosimetría de radiación a las normas nacionales o internacionales, para los usuarios dentro de ese país. Un LSCD está equipado con estándares o patrones que son trazables al OIEA, un laboratorio primario o el BIPM. Los patrones de referencia del 50% de los LSCD son trazable al OIEA, el 30% a un laboratorio primario y el resto al BIPM.

Los LSCD proveen calibración de instrumentos trazables. El ámbito de las calibraciones que proporciona un LSCD, cubre una amplia variedad de servicios como ser: radioterapia externa, braquiterapia, radiodiagnóstico, incluyendo la mamografía, radioprotección y medicina nuclear. Mientras la mayoría de los LSCD ofrecen un rango completo de servicios de calibración otros solo ofrecen uno o dos tipos de calibración.

La principal función de un LSCD es proveer servicios de calibración, incluyendo la difusión de información relacionada con los procedimientos de calibración y asistencia práctica a los usuarios en sus aplicaciones particulares. Algunos LSCD que cuentan con la infraestructura y la experiencia necesaria tienen la posibilidad de brindar un rango adicional de servicios como ser [3]:

1. Dosímetros postales para comparaciones de dosis provenientes de instituciones médicas dentro de un país o región.
2. Auditorías de dosimetría in situ con una cámara de ionización u otros equipos apropiados.
3. Comparaciones de dosis en procesamiento con radiación
4. Servicios de calibración en para dosímetros personales
5. Dosímetros postales para dosimetría del paciente en radiodiagnóstico
6. Mantenimiento de instrumentos de medición de los usuarios
7. Asesoramiento en materia de garantía de la calidad
8. Entrenamiento a nivel nacional sobre medición de la radiación y técnicas de calibración, así como mantenimiento y uso de instrumentación.

2.2.3. Consistencia metrológica de los LSCD

Para asegurar que los servicios de calibración de la red de LSCD cumplen con los estándares aceptados internacionalmente, el OIEA ha organizado un programa de comparación usando cámaras de ionización para ayudar a los LSCD a verificar la integridad de sus patrones nacionales y de sus procedimientos utilizados para transferir los patrones a los usuarios. El programa de comparación del OIEA, mediante la transferencia de cámaras de ionización, incluye la medición

de los coeficientes de calibración para KERMA en aire (N_K) y dosis absorbida en agua ($N_{D,w}$), producidos con la radiación con Cobalto-60. Los resultados de las mediciones son confidenciales y son comunicados directamente al usuario. Esta política de confidencialidad es con el propósito de alentar a participación de los laboratorios y su total cooperación en la reconciliación de cualquier discrepancia.

Antes de enviar la cámara de ionización seleccionada al OIEA, se solicita al LSCD realizar una verificación con una fuente de referencia y calibrar la cámara en términos de N_K y $N_{D,w}$. El proceso de calibración entre el LSCD y OIEA se llevan a cabo bajo condiciones de referencia bien definidas. La cámara de ionización es remitida al OIEA, para su calibración junto con una hoja de datos que incluye información del LSCD, relacionada con la cámara y su trazabilidad, y los resultados de las mediciones de la fuente de verificación junto con los de sus calibraciones, incluidas sus incertidumbres. Luego de que el OIEA calibra la cámara de ionización, ésta es retornada al LSCD para que repita la verificación con la fuente de referencia y su calibración. El LSCD reporta sus resultados de la repetición de las mediciones al OIEA. Los resultados son analizados en el OIEA y transmitidos únicamente al usuario. Tomando en consideración análisis previos, que demuestran que se puede alcanzar una incertidumbre combinada del 0.8% por parte de un LSCD para la calibración de dosímetros para radioterapia, el OIEA ha establecido como límite aceptable un 1.5% para los resultados de esta intercomparación. No se espera que la incertidumbre adicional derivada de la calibración en el OIEA aumente la incertidumbre de la relación de comparación, significativamente. A los LSCD con resultados fuera del límite de aceptación se les recomienda revisar sus procedimientos de calibración, aunque no se les informa sobre magnitud o el signo de la discrepancia. Luego de la acción correctiva por parte del LSCD, se organiza una intercomparación adicional para demostrar que la discrepancia se ha resuelto [3].

2.2.4. Tendencias

La función principal de los LSCD continuará siendo la provisión de servicios de calibración a los usuarios. Se espera, que la variedad de servicios de calibración aumente, especialmente en el campo

de radiodiagnóstico. La publicación de la Comisión Internacional de Electrotécnica (por sus siglas en inglés IEC) sobre la calibración de dosímetros en radiología de diagnóstico y la reciente publicación por parte del OIEA del código de práctica de esta actividad, probablemente conduzca a un aumento en las solicitudes de calibración por parte de los departamentos de radiodiagnóstico y también por parte de los servicios de protección radiológica para la evaluación de las dosis de los pacientes. La braquiterapia, especialmente la de alta tasa de dosis con ^{192}Ir , se está expandiendo en muchos países. También se espera que la implementación de programas de garantía de la calidad para mediciones de radiactividad en medicina nuclear conduzca a un aumento en las solicitudes de calibraciones en esta área. Finalmente, existe una clara tendencia en muchos países a la acreditación de servicios de calibración para satisfacer los requisitos regulatorios y de los clientes [3].

2.3. El propósito de la calibración

El objetivo primario de la calibración es:

1. Garantizar que un instrumento funcione correctamente y, por lo tanto, sea adecuado para el propósito de monitoreo o medición previsto.
2. Determinar, bajo un conjunto controlado de condiciones estándar, la indicación de un instrumento en función del valor medido (la cantidad que se pretende medir). Esto debe hacerse sobre el rango completo de la medición del instrumento.
3. Ajustar la calibración del instrumento, si es posible, de modo que la precisión general de la medición del instrumento esté optimizada [7].

2.4. Terminología

Instrumento de referencia:

Los instrumentos de referencia deben ser patrones secundarios calibrados con estándares primarios por un laboratorio primario nacional o en un laboratorio de referencia reconocido, que tenga los estándares apropiados. Alternativamente, los estándares secundarios, si son estándares nacionales, pueden ser calibrados por la Oficina Internacional de Poids et Mesures (BIPM) en París. Cuando el instrumento de referencia no sea un estándar secundario, debe ser calibrado contra

otros estándares secundarios o contra estándares terciarios que hayan sido calibrados contra estándares secundarios [5].

Fuente de referencia:

Una fuente de referencia debe ser una fuente radiactiva estándar secundaria, calibrada con patrones primarios por un laboratorio primario nacional o en un laboratorio de referencia reconocido que tenga los estándares apropiados. Alternativamente, la fuente estándar secundaria, si es una fuente estándar nacional, puede ser calibrada por el BIPM. Cuando la fuente de referencia no sea una fuente estándar secundaria, debe calibrarse frente a otras normas secundarias o contra estándares terciarios que se hayan calibrado con estándares secundarios [5].

Patrón Primario:

Es un estándar con las más altas cualidades metrológicas en un campo específico. Los patrones primarios se mantienen en laboratorios que:

- a. realizan investigaciones a los fines de la metrología y
- b. participan en intercomparaciones internacionales reconocidas por laboratorios de normas primarias, por ejemplo, por el BIPM.

Patrón Secundario:

Es un estándar cuyo valor se fija por comparación directa con un estándar primario y que se acompaña de un certificado que documenta esta trazabilidad.

Patrón Terciario:

Es un estándar cuyo valor se fija mediante comparaciones con un estándar secundario.

Patrón Nacional:

Es un patrón reconocido a nivel nacional de manera oficial como base para fijar un valor, en un país. En general, el estándar nacional en un país es también el estándar primario.

Instrumentos de Medición:

Es un dispositivo destinado a hacer una medición, solo o en conjunto con otros equipos.

Factor de Calibración:

El factor de calibración, N , se define como el valor verdadero convencional de la cantidad que el instrumento debe medir (el mesurando), H , dividido por la indicación, M (corregida, si es necesario) dada por el instrumento, es decir [5]:

$$N = \frac{H}{M} \quad (1)$$

El factor de calibración normalmente solo se requiere para una radiación en específico, y puede no haber un factor único aplicable a la totalidad del rango de medición de un instrumento, en cuyo caso se dice que el instrumento tiene una respuesta no lineal.

El factor de calibración N es adimensional, cuando el valor indicado tiene las mismas unidades que el mesurando; un instrumento perfectamente preciso debe tener un factor de calibración de uno.

Respuesta:

La respuesta R es el cociente entre el valor indicado M por el instrumento de medición y el valor verdadero convencional del mesurando [7].

Nota: El tipo de respuesta debe especificarse, por ejemplo. “ R_Φ ” (respuesta con respecto a la fluencia, Φ):

$$R_\Phi = \frac{M}{\Phi} \quad (2)$$

o “ R_H ” (respuesta con respecto a la dosis equivalente):

$$R_H = \frac{M}{H} \quad (3)$$

Valor verdadero convencional (de una cantidad):

El valor real convencional de una cantidad es la mejor estimación del valor, determinado por un estándar primario o secundario o por un instrumento de referencia que ha sido calibrado contra un estándar primario o secundario [5].

Nota: Un valor verdadero convencional es, en general, considerado lo suficientemente cercano al valor verdadero para que la diferencia sea insignificante para el propósito dado.

Error intrínseco relativo, I (%):

El error intrínseco relativo se define como el cociente, expresado como porcentaje, del error de la indicación, $H - M$, de una cantidad por el valor real convencional del mesurando, H , cuando el instrumento de medida está sujeto a una radiación de referencia especificada, en condiciones de referencia especificadas, es decir [5]:

$$I(\%) = \frac{H - M}{H} \times 100 \quad (4)$$

Tiempo de Respuesta:

El intervalo de tiempo entre el instante en que un instrumento está expuesto a una fuente de radiación y el instante en que la respuesta del instrumento alcanza el 90% de su estado estacionario para un valor.

Sobrecarga de instrumento

Exposición de un instrumento a un campo de radiación que tiene una tasa de dosis superior a su límite superior de uso previsto.

Punto de referencia de un instrumento de medición:

El punto de referencia de un instrumento de medición es el punto que se utilizará para colocar el instrumento en una localización de prueba. El fabricante debe marcar el punto de referencia en el instrumento. Si esto resulta imposible, el punto de referencia debe indicarse en la documentación adjunta suministrada con el instrumento.

Punto de Prueba:

El punto de prueba es el punto de referencia del instrumento donde se coloca para fines de calibración o prueba de tipo y en el que el valor convencionalmente verdadero de él mesurando es conocido.

Capa hemirreductora (Kerma en Aire) HVL:

La capa hemirreductora (kerma aire) (HVL) es el espesor del material especificado que atenúa el haz de fotones en una medida tal que la tasa de kerma en aire se reduce a la mitad de su valor original. En esta definición, la contribución de toda la radiación de fotones dispersos distinta de cualquiera que pueda estar presente inicialmente en el haz se supone excluida.

2.4.1. Cantidades operacionales, Fantomas para Dosímetros y Medidores de Tasa de Dosis

En 1991, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) presenta recomendaciones para un nuevo régimen de limitación de dosis, incluyendo especificaciones de las cantidades límite primarias para fines de protección radiológica [8]. Este régimen o sistema de limitación de dosis, se basa en las dosis equivalentes en varios órganos o tejidos, H_t , de un individuo, y la suma ponderada de las dosis equivalentes en algunos tejidos y órganos representa la dosis efectiva, E . Estas cantidades relacionadas con la protección radiológica son esencialmente no medibles. Deben ser estimadas mediante el uso de cantidades, que pueden ser medidas mediante condiciones operacionales, es decir a través de las cantidades operacionales. Estas se definen bajo las condiciones actuales del receptor, es decir, en términos de un receptor que se especifica como [5]:

- a. *La esfera ICRU¹ para el control del área.*
- b. *El cuerpo humano para propósitos de monitoreo individual*

La radiación puede ser caracterizada como "débilmente penetrante" o "fuertemente penetrante", dependiendo de qué dosis equivalente está más cerca de su valor límite. Para la radiación débilmente penetrante, la dosis equivalente en el cristalino o en la piel, es de mayor relevancia. Para una radiación fuertemente penetrante, la dosis efectiva E , es más apropiada. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las cantidades operacionales destacadas en función de su capacidad de penetración.

¹ Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU por sus siglas en ingles)

Tabla 2

Resumen de cantidades operacionales

Radiación Externa	Cantidad Limitante	Cantidad Operacional	
		Monitoreo de Área	Monitoreo Individual
Fuertemente Penetrante	Dosis Efectiva	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Débilmente Penetrante	Dosis en Piel	$H'(0.07, a)$	$H_p(0.07)$
	Dosis en Cristalino	$H'(3, a)$	$H_p(3)$

Recuperado de: [5]

La figura 1 ilustra la relación existente entre campos de radiación de referencia, las cantidades físicas que caracterizan las propiedades dosimétricas de los campos de radiación de referencia, y las cantidades utilizadas para las calibraciones. El laboratorio de calibración establecerá los campos de referencia recomendados por la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en ingles) [5]. Para la medición de las cantidades básicas de radiación utilizadas para la caracterización del campo de referencia se utilizarán instrumentos de medición de referencia (Instrumento patrón). Las cantidades asociadas a la calibración son derivadas de las cantidades básicas de radiación mediante los coeficientes de conversión adecuados.

2.4.2. Monitoreo de Área

En actividades rutinarias de protección radiológica, es deseable caracterizar la irradiación de los individuos a proteger, en términos de una única dosis equivalente que pudiera ocurrir en un fantoma que aproxima al cuerpo humano. El fantoma seleccionado es denominado esfera ICRU. La esfera ICRU es una esfera de 30 cm de diámetro compuesta de un material equivalente al tejido humano con una densidad de 1 g/cm^3 y una composición másica de 76.2% de oxígeno, 11.1% de hidrógeno y 2.6% de nitrógeno. Este material es denominado tejido ICRU [5].

Para el monitoreo de área, es de utilidad estipular ciertos campos de radiación que se derivan del campo de radiación real. Los términos “Expandido” y “Alineado” son utilizados para caracterizar estos campos derivados. Para el campo expandido, la fluencia y sus distribuciones direccionales y energéticas tienen el mismo valor en todo el volumen de interés al igual que en el campo real en el punto de referencia. En el campo expandido y alineado, la fluencia y su distribución de energía son las mismas que en el campo expandido, pero la fluencia es unidireccional. Es importante darse cuenta de que la definición de expansión y alineación solo es necesaria para la definición de la cantidad y no es relevante para las mediciones realizadas con los monitores de área. Los instrumentos diseñados para medir $H^*(10)$ deben tener una respuesta isotrópica. Los dosímetros de área deben calibrarse y probarse libremente en el aire; preferiblemente en campos de radiación expandidos y alineados.

Dosis ambiental equivalente:

La dosis ambiental equivalente, $H^*(d)$, en un punto en un campo de radiación, es la dosis equivalente que sería producida por el correspondiente campo expandido y alineado, en la esfera ICRU en la profundidad d , en el radio opuesto a la dirección del campo alineado. Unidad: J/Kg

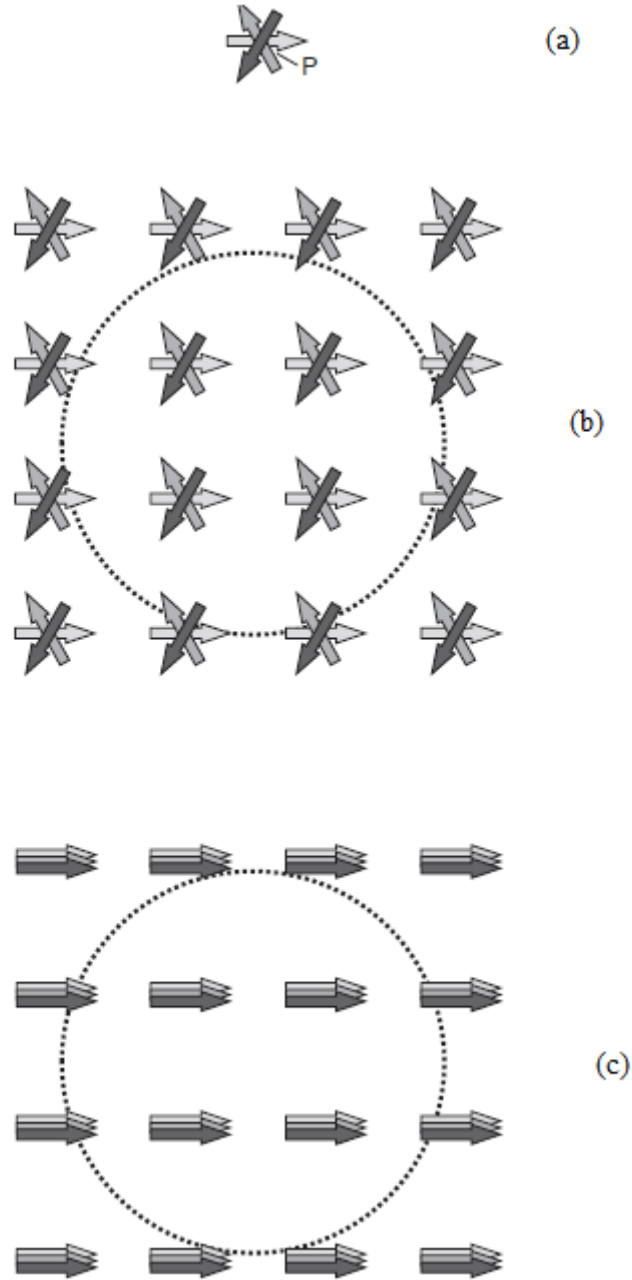


Figura 2. [Representación esquemática de (a) un campo de radiación real, (b) un campo de radiación expandido, y (c) un campo de radiación expandido y alineado. (a) Campo de radiación real en el punto de interés, P, que consta de tres componentes de diferentes direcciones, simbolizados por tres flechas diferentes. (b) Campo de radiación expandido en el punto P. El círculo punteado se dibuja para ilustrar el tamaño requerido para el campo expandido. (c) Campo expandido y alineado que el punto P. El círculo se dibuja para ilustrar el tamaño requerido para el campo expandido y alineado. En principio, las tres flechas en cada ubicación son estrictamente coincidentes, pero por

razones de claridad se muestran en sucesión.] Recuperado de: Calibration of radiation protection monitoring instruments, 1999, IAEA.

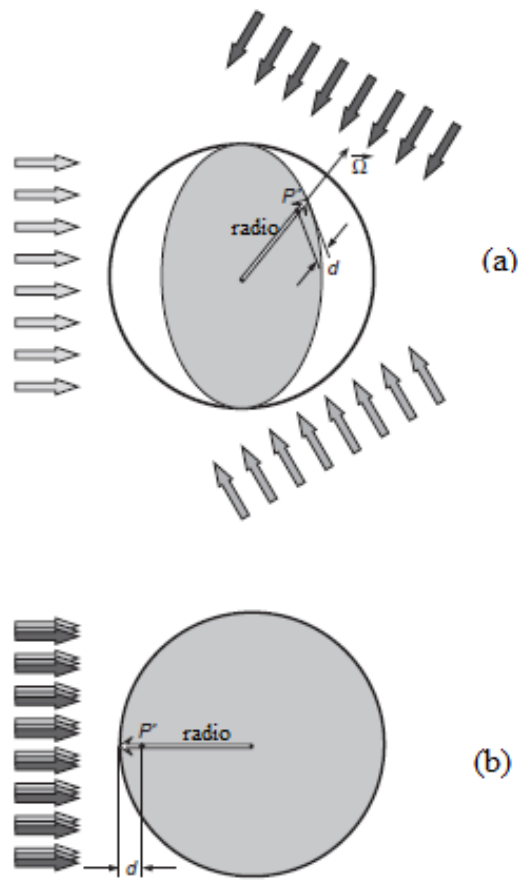


Figura 3. [Geometrías de radiación de la esfera ICRU en el punto P' en la esfera en la que se determina la dosis equivalente en (a) un campo de radiación expandido y en (b) un campo de radiación expandido y alineado. La radiación puede afectar a la esfera ICRU desde diferentes direcciones en el campo expandido. $H'(d, \Omega)$ se define para la dirección a del radio vector. En un campo de radiación expandido y alineado, el vector de radio para determinar $H^*(d)$ siempre se opone a la dirección (única) del campo de radiación.] Recuperado de: Calibration of radiation protection monitoring instruments, 1999, IAEA.

Se denomina Sievert (Sv) a la unidad dada para medir la Dosis Equivalente Ambiental. Cualquier enunciado en el que se mencione la Dosis Equivalente Ambiental deberá incluir la especificación de la profundidad de referencia, la cual se denota por letra d y se expresa en milímetros (mm). La

geometría de la radiación con relación a la esfera ICRU se muestra en la figura 3. Para radiación fuertemente penetrante, la distancia d recomendada es de 10mm. La dosis equivalente ambiental, a esta profundidad quedaría expresada como $H^*(10)$. Para radiación débilmente penetrante, la profundidad recomendada será 0.07mm para piel y 3mm para la dosis en el ojo utilizando la notación anterior [5].

Dosis equivalente direccional, $H'(d, \Omega)$

La dosis equivalente direccional, $H'(d, \Omega)$, en un punto en el campo de radiación, es la dosis equivalente que podría ser producida por el correspondiente campo expandido en la esfera ICRU, a la profundidad d sobre el radio de la esfera en la dirección Ω . Unidad J/Kg

El nombre especial para la unidad de dosis equivalente direccional es el Sievert (Sv). Cualquier enunciado sobre la dosis equivalente direccional debe especificar la profundidad de referencia d y la dirección Ω . Para simplificar la notación, d debe expresarse en milímetros. La geometría de la radiación sobre esfera ICRU en el caso de $H'(d, \Omega)$ se muestra en el diagrama de la Figura 3.

Para radiación débilmente penetrante, se emplean una profundidad de 0,07 mm para la piel y 3 mm para el ojo. La dosis direccional equivalente para estas profundidades se denota por $H'(0.07, \Omega)$ y $H'(3, \Omega)$, respectivamente. En el caso particular de un campo unidireccional, la dirección puede especificarse en términos del ángulo α entre el radio opuesto al campo incidente y el radio especificado.

2.4.3. Monitoreo Individual

Dosis equivalente personal, $H_p(d)$

La dosis equivalente personal, $H_p(d)$, es la dosis equivalente en el tejido ICRU, a una profundidad adecuada d debajo de un punto específico en el cuerpo. Unidad J/Kg

El nombre especial para la unidad de equivalente de dosis personal es *Sievert (Sv)*. Cualquier enunciado sobre dosis equivalente personal debe incluir una especificación de la profundidad de referencia, d . Para simplificar la notación, d debe expresarse en milímetros [9].

Para la radiación débilmente penetrante, se emplean una profundidad de 0,07mm para la piel y 3mm para el ojo. La dosis personal equivalente para estas profundidades luego se denota por $H_p(0.07)$ y $H_p(3)$, respectivamente. Para la radiación fuertemente penetrante, se emplea con frecuencia una profundidad de 10 mm, usando la notación análoga.

Para la calibración de dosímetros personales, se considera que la definición de $H_p(d)$ incluye los siguientes fantasmas compuestos por tejido ICRU:

- Fantoma tipo losa de 300 mm × 300 mm × 150 mm de profundidad para representar el torso humano (para la calibración de dosímetros de cuerpo entero);
- Fantoma tipo pilar, un cilindro circular con un diámetro de 73 mm y una longitud de 300 mm, para representar un brazo o pierna inferior (para la calibración de dosímetros de muñeca o tobillo);
- Fantoma de barra, un cilindro circular con un diámetro de 19 mm y una longitud de 300 mm, para representar un dedo (para la calibración de dosímetros de dedo).

Los dosímetros personales deberán en principio, ser irradiados en fantasmas estandarizados. Como mención adicional, tres tipos de fantasmas se han seleccionado para calibraciones con radiación de fotones, beta y neutrones:

Fantoma de agua tipo losa ISO:

El fantoma utilizado para representar el torso humano, con respecto a la retrodispersión de la radiación incidente, es denominado fantoma de agua tipo losa ISO de 30 cm × 30 cm × 15 cm de profundidad. La cara frontal del fantoma de agua consiste en una placa de PMMA² de 2,5 mm de espesor. Los otros lados del fantoma son de PMMA de 10 mm de espesor.

Fantoma de agua tipo pilar ISO

El fantoma utilizado para representar la parte inferior del brazo o pierna, con respecto a la retrodispersión de la radiación incidente, para ensayar los dosímetros de muñeca o tobillo, se

² El PMMA es polimetilmetacrilato con una densidad de 1,19 g/cm³ y una composición másica de 8,05% de Hidrogeno, 59,99% de Carbono y 31,96% de Oxígeno.

denomina fantoma de columna de agua, el cual consiste en un cilindro circular con un diámetro de 73 mm y una longitud de 300 mm. Las paredes del fantoma consisten en PMMA; las paredes circulares tienen un espesor de 2,5 mm y las paredes del extremo tienen un grosor de 10 mm.

Fantoma tipo barra de PMMA ISO

El fantoma utilizado para representar un dedo, en relación con la radiación retrodispersada debido a la radiación incidente, para probar un dosímetro de dedo, es denominado Fantoma tipo barra de PMMA, el cual consiste en un cilindro circular de 19 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Este fantoma está compuesto de PMMA.

Todos estos fantomas son ejemplos aproximados de partes representativas del cuerpo. Cuando estos son utilizados, no es necesario utilizar factores de corrección para modificar diferencias en la radiación retrodispersa en relación con el tejido ICRU. Una representación gráfica es presentada en la figura 4.



Figura 4. [Fantomas de calibración ISO, por PTW-Freiburg GmbH en <https://www.ptwdosimetry.com/en/products-metrology/iso-calibration-phantoms/>]

Las calibraciones de rutina para dosímetros personales pueden ser realizadas de manera simple, ya sea en el aire o en fantoma PMMA, e incluso con un tipo de radiación diferente a la que el instrumento está diseñado para medir. Tales simplificaciones pueden justificarse, siempre que se verifique el procedimiento de calibración durante la prueba de referencia, de modo que la diferencia en las respuestas del dosímetro en ambas condiciones de irradiación sea la misma para cada dosímetro del mismo tipo. La calibración con un fantoma debe realizarse si el dosímetro es muy sensible a la radiación retrodispersada del espectro incidente, como el dosímetro de albedo de neutrones, por ejemplo

2.4.4. Otras cantidades

Fluencia

La fluencia, Φ , es el cociente de dN y da , donde dN es el número de partículas incidentes en una esfera de área de sección transversal da [5]; así:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (5)$$

Energía Impartida

La energía impartida, M , por la radiación ionizante sobre la materia en un volumen [5], viene dada por:

$$M = R_{entrada} - R_{salida} + \Sigma Q \quad (6)$$

Donde:

$R_{entrada}$: es la energía radiante incidente en el volumen, es decir, la suma de las energías (excluidas las energías de reposo) de todas las partículas ionizantes cargadas y no cargadas que entran en el volumen,

R_{salida} : es la energía radiante que emerge del volumen, es decir, la suma de las energías (excluidas las energías de reposo) de todas las partículas ionizantes cargadas y no cargadas que abandonan el volumen,

ΣQ : es la suma de las energías de masa restantes de los núcleos y las partículas elementales en cualquier interacción que se produzca en el volumen (si disminuye: signo positivo, si aumenta: signo negativo).

Dosis absorbida

La dosis absorbida, D , es el cociente de dM y dm , donde dM es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia de masa dm [5], por lo tanto:

$$D = \frac{dM}{dm} \quad (7)$$

El nombre especial para la unidad de dosis absorbida es Gray (Gy).

Tasa de Dosis Absorbida

La tasa de dosis absorbida, \dot{D} , es el cociente de dD y dt , donde dD es el incremento de la dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt [5]. Por lo tanto:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (8)$$

El nombre especial para la unidad de tasa de dosis absorbida es Gray por segundo (Gy/s).

Kerma³

El kerma, K , es el cociente de dE_{tr} y dm , donde dE_{tr} es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas liberadas por partículas ionizantes no cargadas en un material de masa dm [5]; así:

$$kerma = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (9)$$

³ Kerma es el acrónimo en inglés de energía cinética liberada por unidad de masa (kinetic energy released per unit mass)

El nombre especial para la unidad de kerma es Gray (Gy).

Transferencia lineal de energía

La transferencia lineal de energía o poder de frenado de colisión lineal, L , de un material con relación a una partícula cargada, es el cociente de dE y dl , donde dE es el promedio de la energía perdida por una partícula, debido a la colisión con los electrones al atravesar una distancia dl [5]:

$$L = \frac{dE}{dl} \quad (10)$$

La energía E puede ser expresada en eV, por lo que L puede expresarse como eV/m

Energía Lineal

La energía lineal, y , es el cociente de M y \underline{l} , donde M es la energía impartida a la materia en un volumen de interés, por un evento de deposición de energía y \underline{l} es la longitud media de la cuerda en ese volumen [5]; así:

$$y = \frac{M}{\underline{l}} \quad (11)$$

M puede expresarse en eV, y por lo tanto y puede expresarse en eV/m o en algún submúltiplo o múltiplo conveniente.

Un evento de deposición de energía consiste en deposiciones de energía estadísticamente correlacionadas, como, por ejemplo, aquellas producidas por partículas de alta energía y/o sus electrones secundarios.

Distribución de la dosis absorbida en transferencia de energía lineal

La distribución de la dosis absorbida debido la transferencia de energía lineal, D_L , es el cociente de dD y dL , donde dD es la dosis absorbida aportada por las partículas cargadas primarias con transferencia lineal de energía entre L y $L + dL$; así [5]:

$$D_L = \frac{dD}{dL} \quad (12)$$

Factor de calidad

El factor de calidad, Q , en un tejido, está dado por:

$$Q = \int_L Q(L) D_L dL \quad (13)$$

donde D es la dosis absorbida en un punto, D_L es la distribución de D durante transferencia de energía lineal L y $Q(L)$ es el factor de calidad correspondiente en el punto de interés. La integración debe realizarse sobre la distribución D_L , debido a todas las partículas cargadas, excluyendo sus electrones secundarios. $Q(L)$ se especifica de la siguiente manera [5]:

		<i>1</i>	<i>para</i>	<i>$L \leq 10$</i>
Q	=	$0.32L - 22$	<i>para</i>	$10 < L < 100$
		$300/L$	<i>para</i>	$L \leq 100$

donde L se expresa en $keV \cdot \mu m^{-1}$.

Dosis equivalente

La dosis equivalente, H , es el producto de Q y D en un punto del tejido, donde D es la dosis absorbida y Q es el factor de calidad en ese punto [5]; así:

$$H = QD \quad (14)$$

Tasa de dosis equivalente

La tasa de dosis equivalente, \dot{H} , es el cociente de dH por dt , donde dH es el aumento de la dosis equivalente en el intervalo de tiempo dt [5]; así:

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (15)$$

El nombre especial para la unidad de dosis equivalente es sievert por segundo

$(Sv \cdot s^{-1})$.

2.5. Fundamentos de calibración

2.5.1. Calibración y Ensayos

La *calibración* se define como la determinación cuantitativa, bajo un conjunto controlado de condiciones estándar, de la indicación dada por un instrumento de medición de radiación en función del valor de la cantidad que el instrumento está destinado a medir [5].

Las *pruebas* son mediciones destinadas a confirmar que un instrumento está funcionando correctamente, y/o la determinación cuantitativa de las variaciones de la indicación del instrumento en un rango de condiciones de radiación, eléctricas y ambientales.

En general, se reconocen cuatro categorías distintas de pruebas de instrumentos, de las cuales la calibración es una parte; estos son:

Ensayos de referencia: éstas pruebas normalmente serán llevadas a cabo por un laboratorio de calibración secundario, a fin de poner a disposición del usuario del instrumento, la información relacionada con dichas pruebas. Estos ensayos están destinados a determinar las características de un tipo o modelo particular de un instrumento de producción. Estas, implican pruebas exhaustivas en un amplio rango de cantidades que pueden influir en el resultado de una medición sin ser el objetivo de la medición, las que pueden ser denominadas “magnitudes de influencia”. Tales magnitudes de influencia se pueden enumerar como: la energía, el ángulo de incidencia, dosis o tasa de dosis de una radiación tipo, generalmente bajo una variedad de condiciones ambientales. Una prueba referencia es desarrollada sobre un prototipo o un instrumento tomado al azar de un lote de producción para el cual se pretende sea el instrumento tipo que caracterice el lote.

Calibraciones especiales: En algunos casos especiales, las mediciones de respuesta, similares a las de una prueba de referencia, son necesarias en el curso de calibraciones especiales. Éstas

deben realizarse, por ejemplo, si el dosímetro o medidor de dosis se opera en circunstancias anormales o si la calibración de rutina o la prueba de tipo proporciona información insuficiente.

Calibraciones de rutina: Su propósito es determinar un factor de calibración apropiado en el uso rutinario del dosímetro o medidor de dosis. Una calibración de rutina puede ser de confirmación, cuando se realiza para verificar la calibración realizada por el fabricante, junto con un dosímetro o medidor de dosis, o para verificar si el factor de calibración es suficientemente estable durante el uso prolongado a largo plazo de un dosímetro o medidor de tasa de dosis. Al considerar la forma más práctica de realizar una calibración de rutina, los resultados obtenidos en una prueba tipo pueden resultar útiles, especialmente al seleccionar el espectro para irradiar dosímetros personales.

Pruebas de aceptación: Estas son pruebas convenidas llevadas a cabo en todos los instrumentos de un tipo particular antes de ser puestos en servicio por primera vez; tienen la intención de demostrar que cada instrumento un envío, cumple con su especificación de fábrica.

2.5.2. Condiciones de Referencia y Condiciones Estándar de Prueba

Bajo condiciones de referencia, todas las cantidades de influencia y los parámetros del instrumento tienen valores ('valores de referencia') en los que el factor de corrección para la dependencia de esa cantidad de influencia tiene el valor 1.0. El factor de calibración solo es válido sin correcciones para las condiciones de referencia [5].

Las condiciones de prueba estándar son el rango de valores de un conjunto de cantidades de influencia bajo las cuales se lleva a cabo una calibración o una determinación de la respuesta.

Las desviaciones del factor de calibración bajo condiciones de referencia, causadas por estas desviaciones, deberían corregirse en principio. En la práctica, la incertidumbre que se persigue sirve como un criterio de qué cantidad de influencia debe tenerse en cuenta, mediante una corrección explícita o la incorporación de su efecto en la incertidumbre. Durante los ensayos de tipo, todos los valores de las cantidades de influencia que no son objeto de la prueba se fijan dentro del intervalo de las condiciones de prueba estándar.

Para obtener valores medidos M (corregidos) en condiciones de ensayo estándar, según se establezca en el manual de instrucciones del instrumento, puede ser necesario, por ejemplo, corregir el valor indicado M_i para la indicación cero M_0 y otros efectos representados por la corrección apropiada de factores k_i [5]:

$$M = (M_i - M_0) \prod_i k_i \quad (16)$$

2.5.3. Trazabilidad

La mediación de las características de medición de radiación de un instrumento, en un ensayo de referencia, de aceptación o de rutina, requieren ser trazables a un patrón nacional (Primario o Secundario) aceptado. Lo anterior implica que [5]:

- a. Cada instrumento de referencia utilizado con propósitos de calibración se ha calibrado con un instrumento de referencia de mayor calidad.
- b. La frecuencia de dicha calibración, que depende del tipo, calidad, estabilidad, uso y entorno del estándar de calidad inferior, es tal que establece una confianza razonable tal que su valor no se moverá fuera de los límites de su especificación entre calibraciones sucesivas;
- c. La calibración de cualquier instrumento con relación a un instrumento de referencia es válida en términos exactos solo si en el momento de la calibración, y su desempeño a partir de entonces debe inferirse del conocimiento de los factores mencionados arriba en (b).

Tabla 3

Condiciones de referencia y condiciones de prueba estándar

		Condiciones de prueba
Cantidades de Influencia	Condiciones de Referencia	estándar (a menos que se indique lo contrario)
Radiación por Fotones	$^{137}\text{Cs}^4$	$^{137}\text{Cs}^4$
Fantoma (Solo en caso de dosímetros personales)	Losa de 30 cm × 30 cm × 15 cm de tejido ICRU (Para Dosímetros de cuerpo entero)	Fantoma tipo losa de agua ISO
	Cilindro circular derecho de tejido ICRU de 73 mm de diámetro y 300 mm de longitud (para dosímetros de muñeca o tobillo)	Fantoma tipo pilar de agua ISO
	Cilindro circular derecho de tejido ICRU de 19 mm de diámetro y 300 mm de longitud (para dosímetros de dedo)	Fantoma tipo barra de PMMA ISO
Angulo de la radiación incidente	$\alpha = 0^\circ$ ⁵	$\alpha = 0^\circ \pm 5^\circ$
Contaminación por elementos radiactivos	Despreciable	Despreciable

⁴ Se puede utilizar otra calidad de radiación si se considera más apropiada.

⁵ Ángulo, I , entre la dirección principal de la radiación incidente (eje del campo de radiación) y la dirección de referencia inversa del instrumento según lo indicado por el fabricante.

Radiación de Fondo	Tasa de dosis equivalente ambiental $H^*(10) = 0.1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ o menos si práctico ¹	Tasa de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ menos de $0.25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
Temperatura Ambiente	20 °C	18 – 22 °C ^{6,7}
Humedad relativa	65%	50-75% ^{6,7}
Presión atmosférica	101.3 kPa	86-106 kPa ^{6,7}
Tiempo de estabilización	15 min	> 15 min
Voltaje de Trabajo	Valor nominal de trabajo	Valor nominal de trabajo $\pm 3\%$
Frecuencia	Valor nominal de frecuencia	Frecuencia nominal $\pm 1\%$
Corriente alterna (A/C)	Sinusoidal	Sinusoidal con distorsión total de la onda menor a 5% ⁸
Campo electromagnético de origen externo	Despreciable	Menor que el mínimo valor que causante de interferencia
Inducción magnética de origen externo	Despreciable	Menos del doble del valor de la inducción debido a la campo magnético de la tierra
Controles de montaje	Configuración para el funcionamiento normal	Configuración para el funcionamiento normal

Recuperado de: [5]

⁶ Los valores reales de estas cantidades en el momento de la prueba deben ser establecidos

⁷ Los valores de la tabla están pensados para calibraciones realizadas en climas templados. En otros climas, deben declararse los valores reales de las cantidades en el momento de la calibración. Del mismo modo, puede permitirse un límite inferior de presión de 70 kPa cuando los instrumentos utilizados en altitudes más elevadas.

⁸ Sólo para montajes operados desde la fuente de tensión principal.

2.5.4. Determinación del factor de calibración y de la respuesta a través de un instrumento de referencia

En general, un instrumento de referencia no indica de manera apropiada la cantidad de dosis de radiación, para calibraciones en ensayos de referencia. En su lugar, los instrumentos de referencia más habituales se utilizan para caracterizar los campos de radiación de referencia por otros mesurandos, como la fluencia para la radiación de neutrones y el kerma en aire para la radiación de fotones. La cantidad equivalente de dosis se deriva de estas cantidades de radiación básicas, mediante los coeficientes de conversión apropiados, h [10].

Si se utiliza un instrumento de referencia (denotado por el subíndice R en adelante), su factor de calibración, N_R , dado en el certificado de calibración, se puede usar para determinar el verdadero valor convencional de la dosis equivalente H , mediante el coeficiente de conversión h para la dosis equivalente a la cantidad H y el valor medido (indicado) M_R del instrumento de referencia (corregido para las condiciones de referencia) [5].

$$H = hN_RM_R$$

Dos casos deben ser considerados:

- a. Cuando el instrumento de referencia indica el mismo mesurando que el instrumento bajo calibración

$$h = 1$$

- b. Cuando el instrumento de referencia indica un mesurando diferente del instrumento bajo calibración. En este caso, debe aplicarse un coeficiente de conversión apropiado, h .

El modo de operación del instrumento de referencia debe estar de acuerdo con su certificado de calibración y el manual de instrucciones del instrumento, por ejemplo, establecer la escala en cero, el tiempo de calentamiento, la verificación de la batería, la aplicación de factores de corrección de escala o escala. El intervalo de tiempo entre las calibraciones periódicas del instrumento de referencia debe estar dentro del período aceptable definido por las

reglamentaciones nacionales. Donde no existan tales regulaciones (como lo es en el caso de Honduras), el intervalo de tiempo no debe exceder los tres años.

Las mediciones deben realizarse regularmente, utilizando una fuente radiactiva de control o un campo de radiación calibrado, para determinar que la reproducibilidad del instrumento de referencia se encuentra dentro del $\pm 2\%$ del valor certificado [5]. Deben aplicarse correcciones en relación decaimiento radiactivo de la fuente y para los cambios en la densidad del aire en virtud de las condiciones de referencia cuando corresponda.

3. Calibración de instrumentos para medición de radiación gamma

3.1. General:

Los objetivos principales de una instalación de calibración deben ser [7]:

- a. Asegurar que su instrumentación trabaje adecuadamente
- b. En el caso de un instrumento sin ajustes de calibración, asegurarse que los errores en las lecturas del instrumento sean revelados. Para un instrumento con ajustes de calibración, debe mejorarse la precisión general del instrumento.
- c. Desarrollar una variedad de investigaciones detalladas relacionadas con diferentes tecnologías de medición.
- d. Proveer orientaciones a los usuarios en relación con las mejores tecnologías de medición adaptadas a sus requerimientos
- e. Proveer de patrones de radiación que asistan al diseño y prueba de nuevas mediciones.

Los objetivos anteriores se basan en una amplia variedad de tecnologías de medición y técnicas, siendo así como el alcance de una instalación de calibración se basará en el tipo de instrumentación a calibrar, así como de las condiciones en las que usará los instrumentos. Por lo anterior, el rango de instalaciones y equipamientos partirá desde aquellas en las que contarán con arreglos simples para la verificación de rutina, a

aquellas que cuentan con detalladas curvas de respuesta para diferentes valores y tipos de energía, elaboradas a través de un amplio grupo de condiciones ambientales.

Las descripciones desarrolladas en adelante comprenderán las instalaciones destinadas a la calibración de instrumentos para la medición de radiación gamma con propósitos de radioterapia y radioprotección, que incluirá en general una serie de instrumentos y equipos orientados a obtener una determinada precisión y nivel de error. Cuando se mencione instalaciones e instrumentos más complejos o de mayor precisión apuntando a técnicas más complicadas, se hará acotación al respecto.

Sumado a lo anterior, algunas diferencias importantes pueden ser mencionadas para instalaciones que realizan calibraciones a nivel de radioprotección, así como para dosímetros en radioterapia [11], y que serán útiles al momento de considerar el diseño:

- a. Los niveles de dosis utilizados a nivel de radioprotección son alcanzados por medio de corrientes bajas para generación de rayos X, sistemas de filtrado de haces de gran espesor y largas distancias de calibración.
- b. En radioprotección los dosímetros utilizados requieren de campos de radiación amplios al incorporar cámaras de ionización para su calibración. Lo anterior se logra con distancias largas y sistemas limitación tipo de diafragma para logra haces de radiación anchos.
- c. Debido a la necesidad de largas distancias y campos de radiación amplios los recintos de irradiación requieren ser grandes con el objetivo de reducir la dispersión interna desde el techo y las paredes.
- d. El blindaje del recinto de irradiación deber suficientemente grueso para disminuir la radiación de fuga y dispersa de instalaciones de radiación contiguas.
- e. Debe considerarse la instalación de un sistema de televisión remoto para visualizar las lecturas del dosímetro, contrario a lo que sucede en la calibración

de dosímetros a nivel de terapia que normalmente se encuentran conectados por un cable a sistema de medición.

Los elementos anteriores servirán como referencia para el adecuado diseño de las instalaciones de radiación y los arreglos necesario para desarrollar las actividades de calibración.

3.2. Radiación Electromagnética:

La proporción de un amplio rango de campos de radiación que van desde algunos keV hasta los 10MeV, requiere un determinado número de equipos emisores de rayos X y diferentes tipos de radionucleidos. Así mismo, se requiere de una amplia gama de intensidades de fuentes radiactivas que van desde valores que producen dosis muy cercanas al fondo de radiación hasta varios cientos de Grays por hora. El campo de radiación ideal para calibración es aquel que cuenta con un valor discreto para la energía y un valor de exposición conocido con precisión. Un valor discreto de energía en el campo de radiación es idealmente requerido ya que la mayoría de los instrumentos tienen una sensibilidad que varía con el valor de la energía del fotón. Para energías mayores a los 300keV se usan comúnmente fuentes radiactivas, sin embargo, para valores de energía por debajo de los 300keV la variedad de radionucleidos es limitada, con periodos de semidesintegración relativamente prolongados y, en la mayoría de los casos, con energías de fotones variables. Para valores por debajo de los 300keV, por tanto, las máquinas de rayos X son más adecuadas para la calibración [7].

3.2.1. Rayos X:

Existen dos tipos de fuentes de radiación para la evaluación de la respuesta de instrumentos, que van desde valores de unos pocos keVs hasta los 300keV:

- f.** La fluorescencia de rayos X
- g.** Los rayos X fuertemente filtrados

3.2.2. Radiación de rayos X filtrada:

El espectro teórico de un equipo de rayos X operando a potencial constante, muestra una variación lineal de la intensidad. Esta variación de intensidad depende la corriente del tubo, la constante del tubo, el valor del flujo de fotones para el valor de energía asociado al kilo voltaje. Esta intensidad de rayos X que será filtrada, está asociada con el espectro de emisión del tubo [12]. El espectro deseado debe tener un rango de energías tal que produzca tasas de exposición adecuadas. Esto se logra mediante la colocación de filtros de espesores adecuados en la trayectoria del haz de radiación, con la finalidad de reducir el ancho del espectro de emisión del tubo, mediante la absorción de los fotones de baja energía. Esta preferencia en el espectro de emisión, mediante la absorción de los fotones de baja energía, se realiza con la finalidad de reducir el efecto fotoeléctrico que resulta predominante en el proceso de absorción a bajas energías. Este espectro estrecho de energías resulta más adecuado para la calibración de instrumentos produciendo tasas de exposición más bajas.

Se puede listar un conjunto de criterios para la selección del sistema de filtrado del equipo de rayos X. Un espectro de bajas energías es producido como resultado de la radiación secundaria proveniente del blanco o la radiación de fuga que se produce en el borde del filtro [12]. Un filtro adecuado puede estar constituido por una capa delgada de plomo, más cobre, más aluminio. Estos materiales pueden ser de alta pureza. El uso de una composición de materiales para filtro que no ha sido investigada, debe ser medida para determinar el poder de absorción.

El uso de sistemas de filtrado lleva a dos problemas:

- h.** Cualquier fluctuación en el valor del voltaje o la forma de onda de la fuente de alimentación, tiene como consecuencia una amplia variación del espectro de emisión del tubo, así como en la tasa de exposición producida. La solución más confiable resulta en instalar un medidor del kilo voltaje pico (kVp), así para

obtener el mismo espectro de emisión del tubo, se hará variar la corriente para una combinación de filtros conocida.

- i. Las tasas de exposición obtenidas son mucho menores que las utilizadas para la calibración de patrones primarios.

Generalmente, las calibraciones primarias realizadas para energías que van desde 30 hasta los 300 keV se realizan a tasas de exposición mayores. Idealmente las tasas de exposición medidas en equipos de rayos X fuertemente filtrados, se realizan a través de instrumentos secundarios que han sido calibrado frente a patrones primarios [7]. Dado que resulta complejo obtener una tasa de exposición elevadas, para un rango de energías de fotones por debajo de los 300keV, este tipo de equipamientos resultan adecuados para sistemas de calibración secundaria.

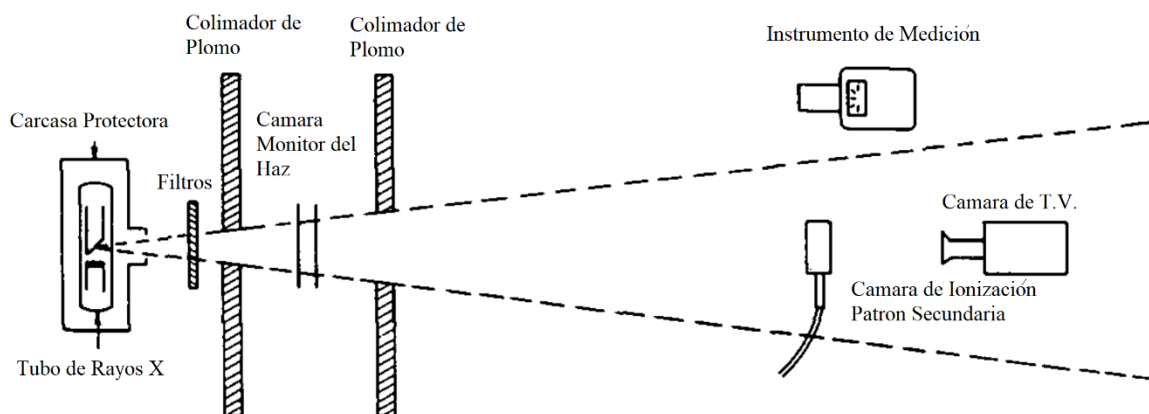


Figura 5. [Diagrama esquemático de equipo de rayos X para calibración gamma [7]



Figura 6. [Sistema de Calibración de Rayos X que incluye mecanismo electromecánico de movilización de instrumento. Imagen propiedad de ATOMTEX SPE]

3.2.3. Florescencia de Rayos X:

Estos sistemas de han sido utilizados para rangos de energías menores a los 100keV [7]. La figura 7 muestra un sistema por fluorescencia de rayos X. Las láminas utilizadas para producir

fluorescencia se colocan a 45° con respecto al haz primario, y la radiación fluorescente producida se mide a 45° de esta lámina, por lo que produce una disposición de 90° entre el ángulo primario y secundario, y así la radiación dispersa se reduce al mínimo. Esta técnica es un poco más complicada que el sistema de filtrado de rayos X, y las tasas de exposición son igualmente baja con relación a la distancia fuente blanco.

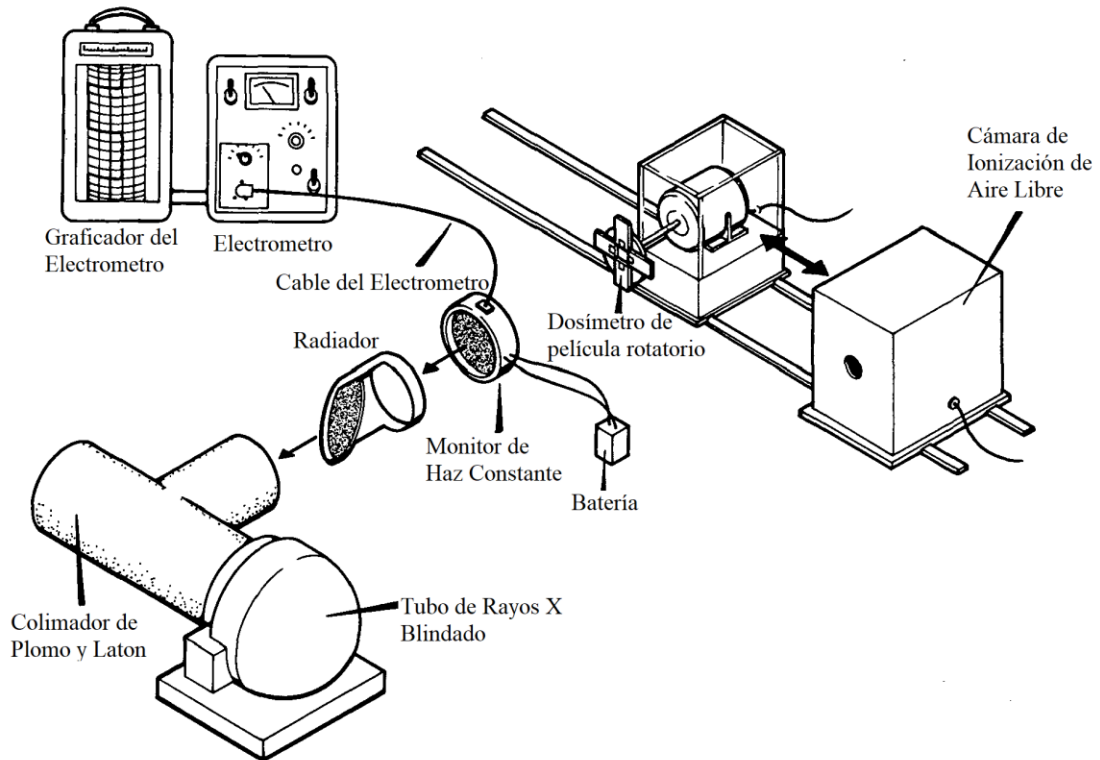


Figura 7. Esquema básico de un sistema por fluorescencia de rayos X, [7]

3.2.4. Radiación Gamma:

Para energías mayores a los 300keV un radionucleido es la mejor opción. Un radionucleido ideal es aquel emite fotones de una sola energía y tiene un periodo de semidesintegración adecuado. Muy pocas fuentes radiactivas cumplen con este requisito, sin embargo, aun así, varios radionucleidos son utilizados como fuentes patrón.

Al utilizar la constante Gamma (Γ) para determinar la tasa de exposición producida por la fuente a diferentes distancias encontraremos que las dimensiones de la fuente serán pequeñas.

La fuente radiactiva debe ser utilizada en condiciones similares a las que se determinó la constante Gamma, en general, esto significa que el campo de radiación desde la fuente debe ser utilizado sin colimación, que las distancias detector-fuente deben ser del orden de 30cm a 100cm para pequeños detectores, y que el campo de radiación en uso debe obedecer la ley del inverso cuadrado. Este requisito puede ser cumplido apoyando el detector y la fuente en un material de baja dispersión y a una distancia de un metro por encima del suelo. La figura 8 muestra un tipo de soporte adecuado para apoyar el detector



Figura 8. Soporte motorizado para la colocación del detector. [Imagen propiedad de SCANNIX]

Para determinar las desviaciones de la ley del inverso cuadrado, debido a la radiación dispersa, se pueden investigar de la siguiente manera:

- Primero se verifica la linealidad de un instrumento por medio de una tasa de exposición variable, para que se pueda corregir cualquier falta de linealidad.

- El instrumento debe tener un detector pequeño y su sensibilidad debe variar solo ligeramente con la energía del fotón.
- El instrumento y la fuente se colocan en sus soportes y la distancia entre ellos se debe mantener fija.
- Fuentes del mismo isótopo, pero con diferentes actividades conocidas, deben colocarse en el soporte de la fuente. Si el instrumento tiene una respuesta a la tasa de exposición de forma lineal, las lecturas serán proporcionales a las intensidades de la fuente.
- Usando una sola fuente, la distancia del instrumento desde la fuente ahora es variada y para que se mantenga la relación del cuadrado inverso, la lectura del instrumento, posteriormente de la corrección por no linealidad, debe ser proporcional al recíproco de la distancia al cuadrado.
- Las distancias sobre las cuales la relación anterior se cumplen deberán ser registradas y para los instrumentos de detección de radiación gamma deberán servir de límite para la calibración del instrumento.
- La intensidad de la fuente debe variarse en lugar de usarse distancias en las que se deba aplicar una corrección de dispersión apreciable.
- Para proveer mayor protección al personal que labora en el laboratorio para fuentes con actividades mayores 10mCi, posicionadores neumáticos, eléctricos u otro tipo de tecnología debe ser utilizada para controlar la exposición.
- Para fuentes con campos de radiación elevados debe utilizarse una cámara de ionización de cavidad y durante el proceso de calibración los instrumentos deberán monitorearse remotamente.

Radionuclide	Effective quantum energy (keV)	Half-life	Specific gamma-ray constant R.m ² /Ci.h
¹²⁵ I	35	59.2 d	0.070
²⁴¹ Am	60	458 yr	0.0129
⁵⁷ Co	122	269 d	0.097
^{114m} In	192	50 d	0.0427
²⁰³ Hg	279	47.1 d	0.119
¹⁹² Ir	300-600	74.3 d	0.44
¹⁹⁸ Au	412	2.7 d	0.231
¹³⁷ Cs	662	29.9 yr	0.323
⁶⁰ Co	1250	5.23 yr	1.30
²²⁶ Ra	180-2200	1608 yr	0.825 ^b
²⁴ Na	1380 and 2800	15 h	1.83

Figura 9. [Tabla de Radionucleidos adecuados para la calibración de detectores, [7]

En referencia a la tabla anterior, una presentación extensa y específica puede ser encontrada en el documento Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment del OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.

La constante Gamma (Γ), es una medida de la tasa de exposición desde una fuente puntual sin filtrar, lo cual implica que únicamente los fotones emitidos por la fuente contribuyen a la tasa de exposición. Existen otras formas o fuentes de radiación que pueden contribuir a la tasa de exposición como ser la radiación de aniquilación, los rayos X característicos y el bremsstrahlung o radiación de frenado.

3.3. Algunas consideraciones para la calibración secundaria con radiación Gamma

La técnica de sustitución puede ser utilizada para la calibración con rayos X, en donde la tasa de exposición es medida inicialmente con el instrumento patrón de calibración secundaria y también servirá para verificar la tasa de exposición producida por el equipo de rayos X. Seguidamente el instrumento de prueba es colocado en la misma posición geométrica, es decir, el

centro geométrico del detector se encuentra a la misma distancia desde el punto focal de radiación hasta el centro del patrón secundario de radiación. Posteriormente se registra la lectura del detector de prueba verificando que la lectura del monitor del haz de radiación no haya cambiado. El uso de un sistema de posicionamiento remoto permitirá acceder a los detectores en comparación, sin necesidad de apagar el equipo de rayos X o acceder al cuarto de irradiación. Asimismo, durante la intercomparación será necesario que el kilo voltaje pico (kVp) se mantenga constante. Además, las lecturas del instrumento deberán ser vistas a través de un sistema de televisión de circuito cerrado, o través de una mampara de protección con ventana plomada o través de un sistema de espejos de visualización.

Existen dos tipos de patrones secundarios adecuados para la calibración de rayos X: el primero es una cámara de ionización de aire libre y el segundo una cámara de ionización de cavidad. De los dos, la cámara de ionización de cavidad es la más sencilla de operar dado que para rangos de energía del orden de los 50keV a los 300keV las cámaras de ionización de aire libre son más voluminosas y presentan dificultades para el posicionamiento remoto. No deberían ser utilizadas como patrones de calibración secundaria cámaras de ionización con desviaciones en la respuesta mayores al 10% para energías entre 10keV a 300keV. También es recomendable utilizar un radionucleido para realizar verificaciones periódicas de la calibración del patrón secundario con relación a la respuesta obtenida de la calibración con el patrón primario. Por debajo de valores a los 50keV una cámara de paredes delgadas o una cámara de aire libre puede ser utilizada. Cuando la cámara patrón es del tipo no sellada deberá considerarse factores como la presión, la temperatura y la humedad, si estos difieren a los reportados por el certificado del patrón secundario, deberán aplicarse los factores de corrección adecuados.

Para calibraciones a nivel de dosis de terapia será necesario contar con un dosímetro patrón secundario, calibrado en un Laboratorio Primario de Calibración Dosimétrica. Este deberá ser almacenado en lugar seguro para minimizar desviaciones del factor de calibración. Es

primordial que los dosímetros de referencia sean mantenidos lo más fielmente de conformidad a la norma IEC 731 [13].

Como mención general, la calibración de sistemas dedicados a espectrometría gamma requiere métodos más complicados que implican los siguientes aspectos [14]:

- a. Debe realizarse una separación de las energías en función de los canales.
- b. La eficiencia de la adquisición de información depende del número de canales del instrumento correlacionada con geometría de la adquisición.

3.4. Sitio de Emplazamiento:

Las instalaciones requeridas para el emplazamiento de un laboratorio de calibración consisten en el terreno en el que se ubica el edificio del laboratorio y el edificio mismo para las actividades de tipo administrativo. Los aspectos relacionados con el terreno y construcción del laboratorio deben estar estrechamente integrados. La necesidad principal por atender es contar con una instalación con baja dispersión para los recintos de irradiación de tal manera que las actividades de calibración puedan ser desarrolladas con la precisión requerida y bajo nivel de radiación en el exterior de las paredes perimetrales.

Estas condiciones pueden ser cubiertas con instalaciones de dimensiones relativamente grandes, de tal manera que aplicando la ley del inverso cuadrado y una cantidad adecuada de blindaje instalado en las paredes externas se podría reducir la tasa de exposición de los campos radiación producido por las fuentes radiactivas y equipos generadores, a valores aceptables en el exterior del edificio. Para instalaciones de tamaño moderado emplazadas en terrenos grandes será necesario contar con medidas de acceso rígidas de tal manera que se puedan mantener las características de protección y calibración partiendo de la base del costo. Sin embargo, en sitios donde el costo de la tierra es alto, una instalación de tamaño moderado será la opción viable tomando en consideración la necesidad de instalación de blindajes adecuados en las paredes exteriores. En cualquier caso, la variación en la dispersión en las posiciones de las calibraciones del

instrumento no debe exceder las variaciones debidas al posicionamiento del instrumento, en los conjuntos de prueba de irradiación.

Para ciertos tipos de trabajo de calibración el blindaje es requerido por otras razones más allá de la protección, como por ejemplo instrumentos requeridos para la medición de fondo de radiación los cuales requieren celdas o recintos de calibración con bajos niveles de radiación de fondo.

Un laboratorio de calibración requerirá un edificio diseñado para el manejo, almacenamiento y disposición de fuentes de radiación dentro de instalaciones con un bajo nivel de dispersión en el que los instrumentos pueden ser irradiados. Adicionalmente, será necesario la construcción de oficinas para el personal que labora en el laboratorio. Algunas características especiales de la instalación deberán ser consideradas como por ejemplo recintos para el almacenamiento de dosímetros de tipo TLD o Film en las que se requiere bajos niveles de radiación de fondo. En general la instalación debe constar de:

- Cuartos de radiación
- Recintos de almacenamiento de fuentes
- Recintos para el almacenamiento de dosímetros personales
- Oficinas administrativas.

3.5. Instalaciones:

Un laboratorio de calibración para radiación fotónica debe consistir al menos de dos salas de irradiación separadas, una para rayos X (cuando así se disponga) y otra para radiación gamma, posiblemente con una sala común de medición y control. Las dimensiones mínimas de las salas de irradiación deben ser de aproximadamente 4 m de longitud, 4 m de ancho y 3 m de altura [7]. De ser posible, la habitación debe tener el tamaño suficiente para obtener un rango útil de distancias desde la fuente sobre la cual los resultados de la ley cuadrado inverso se mantengan suficientemente bajas, es decir menor o igual a el 5% [11]. Cuando se utilizan fuentes de radiación gamma, será adecuado instalar paredes de hormigón de aproximadamente 90 cm de espesor con un techo de

40 cm de hormigón normalmente. Se debe disponer de espacio adicional para Laboratorios auxiliares y para un pequeño taller que se utilizará para pruebas electrónicas y reparación de las instalaciones.

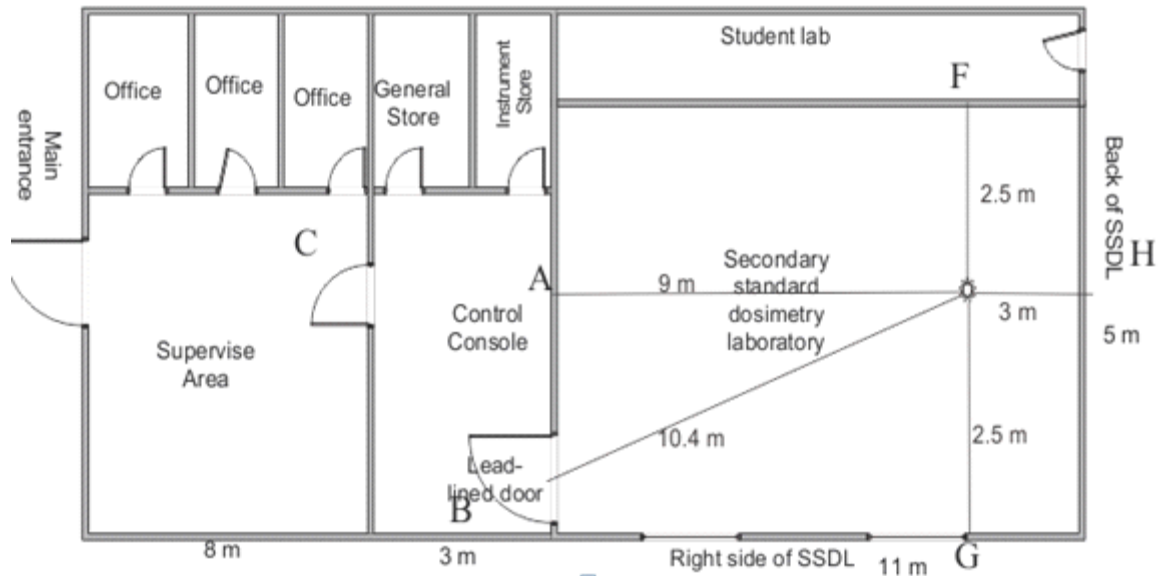


Figura 10. [Vista de la distribución de un laboratorio de calibración dosimétrica. [15]

Las salas de irradiación deberán tener sistemas adecuados de rieles y carro de transporte para los instrumentos de referencia y los instrumentos de medición que se calibran a lo largo del eje del haz, a efectos de considerar la precisión. La desviación máxima del punto de prueba efectivo del eje del haz debe ser al menos de un 1 mm en cada dirección en el rango de distancia que se utilizará. Se debe utilizar un instrumento de alineación, preferiblemente con un rayo láser. Las paredes de hormigón deben tener penetraciones especiales para cables u otros servicios (según los servicios para las celdas calientes con una sección transversal e instalaciones adicionales. El recinto o sala debe contar con aire acondicionado en el espacio del laboratorio para reducir a corto plazo los efectos de la temperatura ambiente y las fluctuaciones de humedad. Se requiere una alimentación de red eléctrica adecuada con tensión regulada para el funcionamiento del sistema de rayos X y los instrumentos electrónicos. Cabe señalar, sin embargo, que los suministros de

transformador estabilizado pueden en algunas circunstancias influir en el espectro producido por el conjunto de rayos X.

3.5.1. Recinto para el almacenamiento de dosímetros:

Sera necesario considerar el contar con un recinto de almacenamiento de dosímetros con un bajo fondo de radiación. Este espacio será necesario para el almacenamiento de dosímetros cuando estas no se encuentren en uso. Las condiciones de humedad y humedad de este recinto deberán cumplir con las recomendaciones por el fabricante de los dosímetros. Este recinto puede tener como mínimo un volumen de almacenamiento de 3 m³ y podrá requerir de la instalación de plomo o concreto en cantidad suficiente para reducir el efecto de los trabajos de irradiación durante el proceso de calibración. Es recomendable que este sitio sea construido cerca del área de entrega de paquetes. El criterio de diseño del blindaje deberá basarse en no superar de 2 a 5 la tasa de dosis producida por los equipos de radiación.

3.5.2. Oficinas administrativas:

Para la edificación de oficina administrativas debe considerarse un mínimo de 15 m². Estas oficinas deben ser pensadas para alojar a un director, un ingeniero, técnicos y secretarías. Las tasas de dosis en estos espacios no deberán superar los 0.02 mSv/h durante las operaciones normales del laboratorio

3.5.3. Propuesta de sistema de irradiación:

Sistema de haz colimado con Colimador de anillo ISO

Para los propósitos de radioprotección, este sistema utiliza un sistema de haz colimado con una geometría de dispersión baja utilizando un colimador cónico de anillo según lo recomendado en la norma ISO 4037-1 [16]. Puede consistir en un recipiente subterráneo del almacenamiento con seis fuentes de rayos gamma, generalmente de ⁶⁰Co o ¹³⁷Cs con actividades que van desde los 50 MBq a 1 TBq.

La fuente se selecciona para un sistema de irradiación giratorio. Éste está situado frente a un obturador de tungsteno activado neumáticamente. El lado opuesto tiene una abertura para reducir la retrodispersión de 180 °. Si las fuentes están en la posición de almacenaje, un tope mecánico se puede insertar en la posición exacta de la fuente, para proporcionar la medida exacta de la distancia a través del colimador del anillo.

Para calibraciones en radioterapia, podría utilizarse una unidad de radioterapia con fuente de Cobalto-60 o Cesio-137 o un sistema de irradiación equivalente. La actividad debe ser lo suficientemente alta para producir un KERMA en aire no menor a 0.1 Gy/min [11]. La fuente deber contar con sistema de blindaje adecuado y un sistema de colimación de tamaño variable. Deberá considerarse la corrección por tiempo de transito de la fuente para aquellos sistemas con de movilización mecánica.

3.5.4. Equipos suplementarios para la irradiación

A continuación, se resume una lista de equipo asociado que puede ser requerido para realizar actividades de calibración de fotones:

- Dos termómetros de precisión (o al menos un termómetro de mercurio)
- Un higrómetro
- Dispositivos de precisión para la medición de distancias (Una opción factible puede ser cintas de acero graduadas en milímetros)
- Temporizadores electrónicos de precisión
- Un estabilizador de potencia eléctrica
- Hojas de aluminio y cobre para la medición de capas hemi-reductoras
- Un sistema de televisión de circuito cerrado
- Fantoma tipo loza de conformidad a las especificaciones ISO
 - Un fantoma tipo columna de agua ISO
 - Un fantoma tipo barra PMMA

- Instrumentación para protección radiológica
 - Radiómetro para la medición de tasa de KERMA o dosis equivalente
 - Monitor de contaminación
 - Dosímetros personales
 - Monitores de radiación de área para ser instalados en los cuartos de irradiación, los cuales deben contener un indicador visual de la tasa de dosis medición.

4. Gestión y Organización del Laboratorio

En esta sección se mostrará la gestión típica de un laboratorio de calibración para la organización de su operación. Dado que las operaciones de un laboratorio de calibración dosimétrica no son típicas, el director del laboratorio tendrá la obligación de revisar estas operaciones y sus procedimientos con la finalidad de garantizar la calidad metrológica del laboratorio, así como ofrecer servicios y atención adecuados a sus clientes.

Las operaciones tipo de un laboratorio se pueden resumir a:

- Recepción y manejo de dosímetros e instrumentos
- calibración de los sistemas de ensayo de radiación
- Calibración de los instrumentos y dosímetros
- Retorno de dosímetros e instrumentos calibrados
- Resultados
- La gestión y mantenimientos de los registros del laboratorio
- Mantenimiento y desarrollo de los patrones de calibración propios y su proceso de verificación y calibración.

4.1. Recepción y manejo:

Cuando los instrumentos de monitoreo son recibidos para calibración en el laboratorio, los mismos deberían ser verificados para detectar contaminación y en el caso de los dosímetros deben almacenarse en los recintos de almacenamiento de bajo fondo de radiación en condiciones

ambientales propias para su manejo, hasta que los mismos sean calibrados. Un reporte de recepción y envío deberá ser preparado para cada instrumento recibido en el laboratorio. Dicho reporte deberá identificar correctamente al cliente y contar con los detalles de contacto de este incluyendo la dirección de la instalación del cliente. Inmediatamente, los paquetes que contendrán los instrumentos deberán ser abiertos en condiciones controladas y deberá realizarse una verificación de contaminación radiactiva. Esta verificación debería realizarse con un instrumento capaz de detectar contaminación debida a radiación beta-gamma o alfa en niveles superiores al fondo normal. Previo a la calibración es necesario realizar una comprobación preliminar con una fuente de verificación para probar la respuesta y la buena condición de trabajo de este. Estos resultados deberán ser registrados en el reporte de recepción del instrumento.

4.2. Calibración de los instrumentos y dosímetros:

Los procedimientos de irradiación deberán realizarse en ensamblajes destinados para este propósito. Los instrumentos por calibrar deberán ser colocados en soportes adecuados para su exposición y cada localización debería ser verificada para asegurar que el instrumento se encuentra a la distancia y ángulo correcto frente al campo de radiación. De la misma manera, debe registrarse esta actividad en el formato adecuado el cual podrá contener como mínimo:

- identificación del propietario e identificación del instrumento.
- El registro de las fuentes de calibración (o los patrones de referencia) junto con los cálculos requeridos para la calibración.
- información sobre el campo de radiación.
- El registro de quien realizó la calibración y quien lo verificó.

4.3. El retorno de los instrumentos calibrados:

Luego de realizar una verificación de que los instrumentos calibrados están libres de contaminación radiactiva deberán ser cuidadosamente embalados o empaquetados para ser retornados al cliente. Como regla general el retorno de los instrumentos calibrados deberá realizarse como máximo en los primeros 10 días posteriores a la recepción.

4.4. El registro de las actividades del laboratorio:

Un completo y detallado registro de las actividades del laboratorio será necesario y los mismo deberán ser mantenidos por varios años con la finalidad de contar una referencia histórica para futuras evaluaciones. Estos registros comprenden:

- Recepción y envío de los instrumentos calibrados
- Dosis recibida por los dosímetros durante su almacenamiento (Si aplica). Este registro debería verificar que los dosímetros únicamente fueron expuestos durante el proceso de irradiación.
- Los datos de la calibración incluyendo la información relacionada con el montaje y los instrumentos patrón utilizados durante la calibración
- El certificado de calibración de la fuentes y cronograma de calibración de esta.

4.5. Mantenimiento y desarrollo de los patrones de calibración propios y su proceso de verificación y calibración

El laboratorio de calibración deberá contar con un conjunto de controles de calidad para mantener un récord del desempeño de este. Estos récords serán establecidos por el director del laboratorio en función de la infraestructura utilizada para realizar las actividades de calibración.

La necesidad de contar con auditorias por un tercero deberá ser considerada para asegurar un adecuado desempeño. Lo anterior no necesariamente debe establecerse como un proceso de rutina, sin embargo, se recomienda de manera periódica participar en el intercambio e inter-comparaciones con otros laboratorios.

Asimismo, el laboratorio deberá mantener públicos sus procedimientos y resultados relacionados con el mantenimiento de sus patrones. Lo anterior permitirá a los clientes y otros comentar sobre métodos. El laboratorio deberá considerar todos estos comentarios y utilizarlos como herramienta de retroalimentación para propiciar mejora de sus controles de calidad y desempeño. Adicionalmente, un esfuerzo adicional deberá ser implementado para la puesta en marcha de nuevos patrones de calibración, así como el mantenimiento de la integridad de los ya

establecidos y la actualización de sus técnicas de calibración. Finalmente, el personal debe ser adecuadamente entrenado en protección radiológica y seguridad de las fuentes, así como contar con equipo de monitoreo adecuado de forma que puedan desarrollar su trabajo de manera segura.

4.6. Plantilla de personal:

La cantidad de personal dependerá de la demanda de trabajo del laboratorio. En general el laboratorio debería contar con un director, un físico, varios técnicos y personal administrativo, pero este listado no se limita a esta plantilla. Esta propuesta contiene dos profesionales cualificados para desarrollar los aspectos científicos del laboratorio junto con los técnicos para asistir en los procedimientos de rutina del programa de calibración del laboratorio. La integridad técnica del laboratorio debe ser irreproachable y su personal técnico deberá tener una reconocida competencia para asegurar este aspecto.

4.6.1. Director del Laboratorio:

Deberá tener un grado honorífico en ciencias, física, química, matemáticas o Ingeniería. Deberá tener una experiencia mínima de 5 años en dosimetría de las radiaciones y programas de monitoreo de la radiación. También debe tener conocimiento de los principios y metodología que involucran el desempeño de un laboratorio de calibración dosimétrica. Por ejemplo, debe conocer y tener competencias en el uso de cámaras de ionización al aire libre, cámaras de extrapolación, radiómetros, contadores de precisión extendida y equipos de medición equivalentes. Es deseable un conocimiento de las matemáticas relacionadas con la estadística de los programas de control de calidad. Debe demostrar buenas capacidades de administración, habilidad para editar claros y concisos reportes científicos relacionados con las características metrológicas y de calibración del laboratorio y trabajar bien con las personas.

4.6.2. Físico:

Deberá tener un mínimo de experiencia de dos años en dosimetría de las radiaciones en general, una experiencia cercana y equivalente en conocimientos a la del director.

4.6.3. Técnicos:

Los técnicos son requeridos para realizar los procedimientos de exposición. Los conocimientos y experiencia de los técnicos deberán estar relacionados con el campo de la física. Experiencia en el campo de las radiaciones y su dosimetría es deseable.

4.6.4. Personal administrativo:

Este puede comprender inicialmente a una secretaria y crecer hasta un administrador de recursos, personal de servicios generales, mantenimiento, administradores de registros y correspondencia. Su gestión y competencias deberá ser acorde en función los registros de la instalación pasando por las tareas y gestiones necesarias para canalizar y manejar los recursos, suministros y servicios requeridos para el funcionamiento del laboratorio, pasando por la adquisición, suministro, manutención de papelería y equipo de oficina, mantenimiento de las instalaciones, gestión de recursos financieros, compras, entre otras tareas.

4.7. Estimación de los costos de edificación del laboratorio:

Esta sección presenta valores de referencia. Los valores reales pueden variar considerablemente debido a diversidad de factores incluidos los aspectos derivados de estudios, permisos de operación, adquisición de equipos y gestiones asociadas con su compra e importación que también pueden estar reguladas por normas internacionales.

4.7.1. Terreno:

El costo de la tierra para el emplazamiento puede variar considerablemente en dependencia de la ubicación del laboratorio con relación a las áreas urbanas de una ciudad. Con relación a la propuesta presentada, un área de 1,000 m² a 5,000 m² resultaría adecuada para el emplazamiento considerando la necesidad de estacionamientos, controles de accesos y espacios para almacenamiento y maniobras.

Tabla 3

Edificación de la obra gris del laboratorio

Ambiente de trabajo	Cantidad	Área de construcción (m ²)	Área Total (m ²)
Recintos de irradiación	2	~90	~180
Oficinas	4	~15	~60
Cuarto de descontaminación	1	~30	~30
Almacenaje de Fuentes	1	~10	~10
Subtotal:			~280
Espacios Auxiliares: Ventilación, Climatización, Taller de Herramientas, Equipos eléctricos Almacenamiento de Insumos			~100
Área total de construcción:			~380

Tabla 4

Costos de Construcción

Elemento	Costo (L)	Costo Total (L)
Laboratorio	11,000/m ²	4,180,000
Diseño	10% del costo total de la obra	418,000
Gestiones	5% costos asociados a permisos y gestiones	209,000
Subtotal:		4,807,000
Contingencias		600,875
Total:		5,407,875

Tabla 5

Estimación de los costos de los equipos

Elemento	Numero requerido	Costo Total (L)
Soportes de irradiación		
irradiación Beta-Gamma de banco	1	55,000

irradiación Beta-Gamma de altura	1	14,000
Sistema de Rayos X rango medio	1	50,000
Sistema de Rayos X rango bajo	1	75,000
Total:		144,000
Fuente patrón Co-60 (1 Ci)	1	125,000
Fuente patrón Cs-137 (1 Ci)	1	75,000
Total:		200,000
Máquinas de Rayos X	2	1,100,000
Total:		1,100,000
Instrumentos patrón		
Conjunto de Radiómetros	3	112,000
Cámara de Extrapolación	3	105,000
Cámara de Ionización	1	125,000
Electrómetro	1	25,000

Cronometro patrón	1	12,000
Total:		379.000
Equipo de monitoreo		
Medidor Beta-Gamma	4	52,000
Monitores Beta-Gamma	4	70,000
Total:		122,000
Misceláneos		
Cajas de almacenamiento de fuentes	2	125,000
Transformadores de voltaje constante	2	62,500
Muebles y equipo de oficina		250,000
Total:		437,000

Los costos de emplazamiento para el caso de Honduras han sido aproximados y existe la posibilidad que algunos sean menores a los presentados siendo el valor final estimado sería igual a **L. 10,171,875.00.**

Tabla 6

Salarios directos

Personal	Rango de salario mensual (L)
Director	35,000 – 55,000
Físico	35,000 – 45,000
Técnicos (x2)	36,000 – 56,000
Personal Administrativo (x2)	36,000 – 50,000
Subtotal mensual:	142,000 – 206,000
Total de salario anuales:	2,130,000 – 3,090,000 ⁹

Los costos anuales de operación se describen continuación

Tabla 7

Costos anuales de operación

Elemento	Costo (L)

⁹ El valor representa el total a pagar en salario considerando la totalidad del personal por 15 meses de salario

Salarios:	3,090,000
Edificio:	
Mantenimiento	100,000
Servicios	200,000
Depreciación: ¹⁰	
Edificio, L. 4,407,875 en 40 años	110,197
Equipo, L. 9,671,875 en 10 años	967,188
Insumos:	
Laboratorio	125,000
Oficina	100,000
Servicios de apoyo	2,000,000
Viáticos	100,000
Mantenimiento del equipo	100,000
Membrecías	250,000
Manejo de paquetes	200,000
Sub Total:	7,342,385

¹⁰ La depreciación del edificio y equipamiento se calculó mediante el método lineal de depreciación que establece el valor anual de depreciación como el cociente del valor resultante de restar al valor inicial invertido en la construcción menos el valor residual que tendrá la edificación al finalizar su vida útil, dividido entre la cantidad de años de operación.

5. Conclusiones

1. La calibración dosimétrica de radiación gamma propuesta en este documento constituye es un conjunto de técnicas necesarias a desarrollar en el país y su complejidad técnica y tecnológica pueden ser plenamente desarrolladas por los profesionales hondureños actualmente vinculados a las radiaciones ionizantes, sustentada en condiciones de sostenibilidad, resiliencia y gestión con vistas a la mejora, intercambio de conocimiento y experiencia, y progreso tecnológico.

2. Un Laboratorio de Calibración Dosimétrica es un elemento técnico necesario para el aseguramiento de la calidad de medición de los instrumentos detectores de radiación actualmente operando en el país y cuyos usuarios tienen limitado acceso a servicios de verificación de la calidad, capacidad y eficacia para la medición de radiación ionizante.
3. Los servicios de calibración dosimétrica propuestos se basan en las necesidades técnicas primordiales a atender en materia de radioprotección y física médica de las radiaciones, con especial atención a las actividades de radioterapia en lo relacionado a la calibración de haces de radiación y por otro lado la verificación de la calibración de los instrumentos de medición utilizados en monitoreo de área y actividades de vinculadas a la protección radiológica.
4. Desde la perspectiva regulatoria, la conveniencia y beneficios de un servicio de calibración dosimétrica permitirá de forma independiente contar con una organización técnica asesora en materia de medición de las radiaciones disponible tanto para los usuarios como de los entes del estado encargados de la regulación y control.
5. La conveniencia de instalar un laboratorio de calibración dosimétrica con patrón secundario requiere del desarrollo de capacidades profesionales especiales, que pueden ser adquiridas mediante la asistencia del OIEA y cuya relación de cooperación permitirá posicionar a la Escuela de Física de la UNAH como una unidad nacional especializada en la radioprotección y la Metrología de las radiaciones
6. Todos los elementos constructivos equipamiento, e insumos asociados al diseño, desarrollo e implementación de un laboratorio secundario de calibración dosimétrica pueden ser implementados con los recursos tecnológicos actuales disponibles en el país, y con excepción del equipamiento de medición, posicionamiento e irradiación, no se requieren opciones constructivas complejas,
7. La dosimetría de las radiaciones es un área técnica especializada que ha tomado relevancia y progreso durante los últimos años en Honduras y pese a los pequeños

progresos la creación de facilidades vinculadas a la física de las radiaciones puede servir de estímulo científico para muchos estudiantes habidos de conocer tecnologías nuevas para el país.

6. Recomendaciones

1. Para el diseño, desarrollo e implementación del Servicio de Calibración Dosimétrica será necesario la creación de un grupo de trabajo especialistas en cooperación técnica, física de las radiaciones, un profesional vinculado con física de las radiaciones en representación de los usuarios, un representante del órgano regulador, quienes tendrán la función de asesorar, apoyar la organización y la supervisión de la edificación y puesta en marcha del servicio.
2. Durante la construcción, pruebas de aceptación de los equipos y puesta en servicio del laboratorio es importante el registro de todas las actividades y el seguimiento periódico de las actividades con la finalidad de dar visibilidad a la complejidad de las obras y su relevancia para el país, así como los alcances y limitaciones de esta.
3. Es importante la participación de los profesionales vinculados a las instalaciones que harán uso de los servicios del laboratorio con la finalidad de estos conozcan las técnicas de calibración dosimétrica asociadas.
4. La creación de panfletos, carteles y trípticos de divulgación pública darán visibilidad ante la comunidad universitaria y el público en general de las prestaciones técnicas de laboratorio y permitirán despertar interés técnico y científico.
5. La organización y gestión del laboratorio debe contemplar en todo momento la participación en actividades de intercambio de información como ser los ejercicios de Inter comparación, congresos de divulgaciones científicas y actividades de capacitación técnica.

Referencias

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), SECONDARY STANDARD DOSIMETRY LABORATORIES DEVELOPMENT AND TRENDS, Vienna: IAEA, 1985.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), "Directory of Radiotherapy Centres (DIRAC)," DIRAC, 2016. [Online]. Available: <https://dirac.iaea.org/>. [Accessed 25 04 2021].
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), CALIBRATION OF REFERENCE DOSIMETERS FOR EXTERNAL BEAM RADIOTHERAPY- TECHNICAL REPORTS SERIES No. 469, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 2009.
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), THE IAEA/WHO NETWORK OF SECONDARY STANDARDS DOSIMETRY LABORATORIES, Vienna: IAEA, 2017.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), Calibration of radiation protection monitoring instruments, Vienna: IAEA, 1999.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM), 3rd edn, Geneva: ISO, 2007.
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), Handbook on Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, Technical Reports Series No. 133, Vienna: IAEA,, 1971.
- [8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,

Publication 60, Annals of the ICRP 27, London and New York: Pergamon Press, 1991.

- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (OIEA), Evaluación de la exposición ocupacional debida a fuentes externas de radiación, Vienna: ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, 2004.
- [10] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP), Radiation Protection, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation, Publication 74, London and New York: Pergamon Press, 1977.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), «Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy - Technical Reports Series 374,» INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1995.
- [12] A. Brosed y M. Ginjaume, «Informes Técnicos Ciemat: Calibración de dosímetros personales usando haces externos de fotones. Control de los Servicios de Dosimetría Personal autorizados por el CSN,» CIEMAT, Madrid, 1995.
- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION (IEC), «Medical Electrical Equipment: Dosimeters with Ionization Chamber as Used in Radiotherapy, Standart Publication 731,» IEC, Geneva, 1982.
- [14] R. Calin, M. A. Calin, L. Done y A. C. Calin, «Assessment of calibration parameters for gamma-ray spectrometry systems,» *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, p. 7, 2011.
- [15] C. . C. Arwui, P. Deatanyah, J. Kwabena Amoako y G. Emi-Reynolds, «Evaluation of the Biological Shields of the Secondary Standard Dosimetry Laboratory of

Ghana Using MCNP5,» *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, p. 8, 2011.

- [16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods, Geneva: ISO, 2019.