



TRABAJO FINAL:

“Establecimiento de un Protocolo que permita estimar respuesta $H_p(10)$ de la dosimetría personal tipo FILM a partir del valor obtenido con el sistema de dosimetría termoluminiscente TLD Panasonic 802 AT en bajas energía”

***CARRERA: ESPECIALIZACION EN RADIOQUIMICA Y APLICACIONES
NUCLEARES***

Alumno: Guillermo José Calderon

Director: Sergio Mosconi

Co-Director: Sebastián Gossio

Mes y Año: marzo 2023

INDICE DE ABREVIATURAS

AAPM: (*American Association of Physicists in Medicine*) Asociación Americana de Físicos en Medicina

HPS: (*Health Physics Society*)

ARN: Autoridad Regulatoria Nuclear

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica

CRRD: Centro Regional de Referencia con Patrones Secundarios para Dosimetría

DO: Densidad Óptica

ECF: (*Element Correction Factor*)- Factor de corrección del elemento

EPD: (*Electronic Pocket Dosimeter*) – Dosímetro Electrónico de bolsillo

HDR: (*High Dose Rate*) Alta Tasa de Dosis

HVL: (*Half-Value Layer*) Espesor hemirreductor

Hp₍₁₀₎ : Dosis equivalente a 10 mm de profundidad en tejido

Hp_(0.07): Dosis equivalente a 0.07mm de profundidad

IAEA: (*International Atomic Energy Agency*) Agencia Internacional de Energía Atómica.

ICRP: (*International Commission on Radiological Protection*) Comisión Internacional de Protección Radiológica

ICRU: (*International Commission on Radiation Units and Measurements*) Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas

INSAG: (*International Nuclear Safety Advisory Group*) Grupo Asesor Internacional sobre Seguridad Nuclear

LDP: (*Laboratorio de Dosimetría Personal*)

LDR: (*Low Dose Rate*) Baja Tasa de Dosis

NIST: National Institute of Standards and Technology.

RFS: (*Radiofísica Sanitaria*).

NCRP: (*National Council on Radiation Protection & Measurements*) Grupo Asesor Internacional sobre Seguridad Nuclear

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

PLA: (*Polylactic Acid*) – Ácido Poliláctico

PMT: (*Photomultiplier Tube*) Tubo Fotomultiplicador

POE: Personal Ocupacionalmente Expuesto

REPROLAM: (*Red de Optimización de Protección Radiológica Ocupacional de Latinoamérica y Caribe*).



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

TL: Termoluminiscencia

TLD: (*Thermoluminescence **D**etectors*) Detectores Termoluminiscentes

QA: (*Quality **A**ssurance*) Garantía de Calidad

OSL: (**O**ptically **S**timulated **L**uminescence)



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Índice de Contenidos

Resumen	6
Capítulo 1.....	7
Introducción y Objetivos	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Antecedentes.....	8
1.3 Objetivo.....	10
1.5 Fundamento.....	11
Capítulo 2:.....	12
2.1 Magnitudes Operacionales.....	12
2.2 El concepto de la Dosimetría Personal	13
2.3 Dosimetría FILM.....	13
2.4 Dosimetría TLD	16
Capítulo 3:.....	18
3.1 Metodología	18
3.1.1 Identificación y selección de dosímetros tipo FILM	18
3.1.2 Identificación y selección de dosímetros tipo TLD	20
3.1.3 Espectro de Energía posibles de discriminar por el TLD	22
3.1.4 Revisión de los parámetros operativos de los equipos.....	25
3.2 Irradiaciones en kVp 120	25
3.3 Irradiaciones en 30 keV	28
3.4 Irradiaciones en 50-80 keV	30
Capítulo 4:.....	31
4.1 Procesamiento de Lecturas	31



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

4.2 Curvas de Calibración	34
5) Conclusiones.....	38
6) Referencias Bibliográficas:	38
Anexos	39
Anexo 1	39
Anexo 2	41
Anexo 3	43
ANEXO 4.....	48
ANEXO 5 REFERENCIAS.....	50



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Resumen

La Dosimetría Personal en el Control de Radiaciones Ionizantes en la actualidad, en la República Argentina se efectúa con diferentes tecnologías, presentando cada una de ellas determinadas ventajas y desventajas que las hacen elegibles para las diversas actividades laborales que se desarrollan en los centros asistenciales de salud, de investigación e industriales.

El objetivo del presente trabajo es brindar una solución a la seria problemática que impide la calibración de uno de estos sistemas, puesto que, no existe en el ámbito del país un laboratorio que cuente con fuentes calibradas de bajas energías. (menores 600 keV).

La solución propuesta consiste en caracterizar una metodología que, mediante el uso del equipamiento disponible en el ámbito local permita, contrastar y ajustar el sistema de monitoreo que mayores limitaciones presenta, usando la estimación de un sistema de monitoreo validado y calibrado con el cual se obtuvieron resultados satisfactorios en el Ejercicio de Intercomparación Regional REPROLAM adjunto como **Anexo III** al presente trabajo.

En el desarrollo del actual trabajo se procederá a describir los sistemas de monitoreo elegidos para cumplir estos objetivos, la justificación del uso de cada uno y las limitaciones o estado de situación que derivan en la necesidad de implementar esta propuesta de trabajo.

Todas las actividades, se han desarrollado en el Laboratorio de Dosimetría Personal de la Fundación Escuela de Medicina Nuclear, ubicada la ciudad de Mendoza y con la premisa de utilizar exclusivamente los equipos y elementos disponibles en las sedes de la Institución.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

La Dosimetría Personal en el Control de Radiaciones Ionizantes en la provincia de Mendoza es una actividad que se inició en el año 1970 en la Unidad de Radiofísica Sanitaria del Ministerio de Salud de la provincia Mendoza.

Por esa época el sistema de dosimetría personal en el control de radiaciones ionizantes más utilizado era la dosimetría mediante el uso de detectores por emulsión fotográfica o más comúnmente conocidos como FILMS Monitoring.

Esta tecnología, con el paso del tiempo demostró ser un método con una excelente relación costo-efectiva, siendo dispositivos que podían ser repartidos de forma masiva alcanzando a todos los trabajadores involucrados con el uso de radiaciones ionizantes con una razonable exactitud y precisión para esa época.

Con el posterior desarrollo de nuevos materiales y compuestos químicos tales como el $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y el CaSO_4 en la década del 80 y 90, surgieron tecnologías superadoras en cuanto a características de uso, rangos de detección y posibilidad de discriminación de energía de la radiación ionizante, que fueron progresivamente reemplazando el uso de los dispositivos del tipo FILM.

En Argentina tal, como fundamentaremos a continuación, esta tecnología tipo FILM nunca fue suplantada por completo, a tal punto, que en la actualidad (2023) una gran cantidad de instituciones tanto públicas como privadas la siguen prefiriendo como sistema de monitoreo para sus trabajadores, no por que resulten mejores en cuanto a prestaciones, si no por cuanto a su valor económico de reposición frente a los extravíos de dosímetros que con frecuencia ocurren.

Comentado lo anterior en relación al uso de esta tecnología obsoleta, la problemática actual, objeto de análisis del presente trabajo, radica en las serias dificultades técnicas que existen en Argentina para realizar calibraciones de los sistemas de dosimetría por tipo FILM, en particular en aquellos rangos de bajas energías.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Las energías comprendidas en el rango entre los 25 keV a 120 keV son ampliamente utilizadas en el ámbito del diagnóstico por imágenes, donde se desempeñan la mayor cantidad de trabajadores de la salud y resulta ser el rango que mayores dificultades presenta al momento de determinar dosis equivalentes para los sistemas de dosimetría del tipo FILM monitoring.

1.2 Antecedentes.

Entre los años 1972 a 1992 el único sistema disponible para Dosimetría Personal en el Control de Radiaciones Ionizantes en la provincia de Mendoza, fue el de tipo Film y era provisto por el Laboratorio de dosimetría del propio Organismo.

Con la creación de La Fundación Escuela de Medicina Nuclear en la provincia de Mendoza, el Ministerio de Salud, mediante la firma de un convenio le asignó a FUESMEN el área de Radiofísica Sanitaria y el Laboratorio de Dosimetría Personal, que hasta ese momento se gestionaba de forma integral en el ámbito del Ministerio de Salud de Mendoza.

A partir de ese momento, FUESMEN comienza expandir el alcance del servicio de dosimetría personal ampliando la cobertura para los sectores públicos y privados en el ámbito de la región de Cuyo, y, además con el firme objetivo de mejorar la calidad de las prestaciones de un servicio tan relevante como lo es el monitoreo de las dosis recibidas por el personal ocupacionalmente expuesto.

Así fue que luego desde el año 1995 en adelante se incorporó al sistema de dosimetría TLD (Termoluminiscente) de la marca Panasonic, que son los detectores que utilizaremos como referencia en este trabajo por comportarse como mejores estimadores de dosis. Las características particulares han sido descriptas e informadas en el **Anexo II**.

Posteriormente, en el año 2016 se incorporó la dosimetría **OSL** (Ópticamente estimulada) de la marca Landauer, con dos tipos de detectores, los **Inlight** y los **Nano Dots**, además también se adquirieron detectores de lectura inmediata de estado sólido del tipo **EPD** (Electronic Pocket Dosimeter).



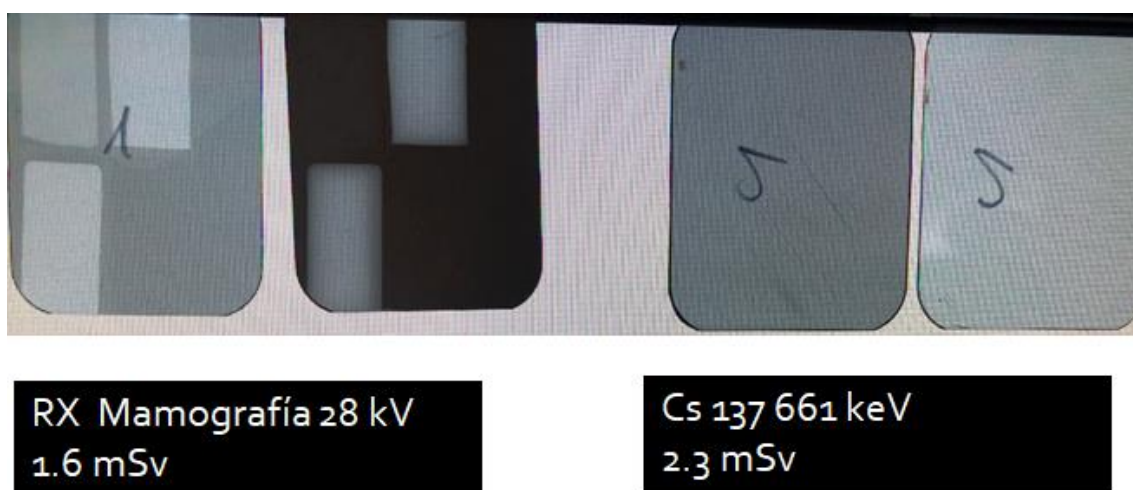
UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Como es notable, la incorporación de tecnología en pos de mejorar la calidad de las prestaciones ha tenido un sostenido crecimiento, pero incluso así, el sistema Film ha permanecido vigente por resultar económicamente ventajoso al ser considerado un elemento descartable (único uso) prácticamente sin costo de reposición por extravíos de la unidad.

Esta única ventaja, que ninguna tecnología hasta el momento ha podido igualar, ha conducido a que en la actualidad una gran cantidad de usuarios la prefieran por sobre otras tecnologías muy superiores en cuanto a posibilidad de detección de dosis con mayor exactitud y precisión.

La desventaja más importante que este sistema posee, es la absoluta dependencia de la energía de la radiación incidente, y puesto que, se carece en el país de equipamiento para irradiar dosímetros en haces de bajas energías, este sistema presenta serias inconsistencias al momento de determinar los valores de dosis.

A mayor abundamiento, a continuación, se muestran irradiaciones practicadas en dos energías diferentes, y, como resultado se puede observar a simple vista que las variaciones de DO obtenidas al momento del procesamiento, no necesariamente son proporcionales a las dosis entregadas, sino que también la energía de la radiación incidente.



Este efecto se produce debido a que los fotones X, (radiación electromagnética de baja energía) interactúan y transfieren gran parte de su energía a la emulsión de Bromuro de



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Plata (BrAg), mientras que los fotones gamma de alta energía, atraviesan la emulsión del film transfiriendo una menor cantidad de energía sobre el material sensible debido a que la radiación incidente y el material irradiado no alcanzan las condiciones de equilibrio electrónico para este espesor.

En general, el máximo de la respuesta relativa se encuentra en la región de los 40 keV de energías efectivas, siendo veinte veces superior a la correspondiente a la energía media de la radiación gamma emitida por el cobalto 60 de 1200 keV .

Por este motivo, el presente trabajo, pretende implementar una metodología que mediante el uso de dosímetros del tipo TLD se pueda irradiar en haces de bajas energías ambos tipos de detectores en forma simultánea y contrastarlos tomando como referencia para la determinación y validación de dosis a los dosímetros del tipo Termoluminiscentes Panasonic 802 At.

1.3 Objetivo

El objetivo es establecer un procedimiento, equipos y elementos para realizar una contrastación del sistema de dosimetría del tipo FILM en bajas energías mediante el uso de detectores del tipo TLD. Es importante aclarar que el objetivo del trabajo NO pretende reemplazar una calibración realizada en un Laboratorio de Referencia, sino más bien simplemente, aportar una herramienta que al menos ayude a mejorar la estimación de las dosis reportadas en bajas energías ante la imposibilidad de implementar los procedimientos estandarizados y certificados.

En Argentina, nuestro CRRD que funciona en el Centro Atómico Ezeiza, con más de 50 años de trayectoria es el único Laboratorio Nacional de Metrología para dosimetría de Radiaciones.

Por tanto, para asegurar precisión en las mediciones de radiaciones ionizantes en actividades relacionadas a la salud e industria se deben solicitar turnos y enviar los detectores para ser irradiados con los puntos de dosis y calidades de energía solicitados.

En un Laboratorio de calibración, acreditado para haces de bajas energías, se debe de disponer de una fuente que genere un haz de Rayos X de entre 30 keV a 300 keV con sus respectivos accesorios para realizar la filtración del haz permitiendo obtener un



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

espectro de salida continuo de acuerdo los estándares de energías definidas por ANSI rev 1993 [1] e ISO 4037-3 (2019) [2].

Este tipo de fuente (tubo de Rayos X) NO está disponible en Argentina, por tanto, nuestro Centro Regional de Referencia para Dosimetría Personal no está ofreciendo servicios de irradiación para que los Laboratorios prestadores de dosimetría personal puedan calibrar sus monitores en las calidades de energías de Rayos X.

Existen en Uruguay, Chile y Brasil Laboratorios de Metrología que ofrecen estos servicios, pero para acceder a ellos se requiere realizar gestiones complejas puesto que, el procedimiento para enviarlos y recibirlos está reglamentado por el régimen aduanero, el cual implica un proceso de importación / exportación temporaria que involucra una empresa de logística y despachantes de aduanas en origen y destino.

Además, para el pago de los servicios al Laboratorio en el exterior se debe obtener el permiso que permite girar divisas y afrontar el pago de los servicios de calibración, todo ello en el contexto actual resulta inviable, no solo desde el aspecto económico si también en cuanto a los tiempos que ello implica.

Por tal motivo acceder a un Laboratorio con fuente certificada entre 30 y 300 keV para realizar las calibraciones resulta imposible.

Ante tal escenario, no es posible acceder al servicio de calibraciones en bajas energías, y, por ende, la incertidumbre es muy grande respecto a los informes de dosis equivalentes en campos de bajas energías < 100keV.

1.5 Fundamento

Para fundamentar la posibilidad de referir nuestro sistema de tipo FILM al sistema TLD, nos basamos en el hecho de haber participado satisfactoriamente en el ejercicio de Intercomparacion Regional de Dosimetría Personal en Altas y Bajas Energía – REPROLAM recientemente en noviembre del 2022.

Para el sistema TLD de la marca Panasonic, no es necesario realizar calibraciones en bajas energías, los dosímetros 802 calibrados en energías de 661 keV – (^{137}Cs) en combinación con el algoritmo de cálculo de dosis permite obtener resultados



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

satisfactorios en todo el rango energético de fotones X y Gammas gracias al detector compuesto por $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ que posee una respuesta plana independiente de la energía de la radiación incidente.

Tal característica se vio validada gracias a los resultados obtenidos en el mencionado ejercicio de Intercomparación y por tal motivo se propone usar este sistema para contrastar la respuesta del FILM. Ver resultados en **Anexo III**

Capítulo 2:

2.1 Magnitudes Operacionales

La dosis equivalente personal representa una magnitud práctica que reemplaza a la dosis efectiva equivalente, un concepto inmensurable basado en una estimación probabilística de ocurrencia de consecuencias adversas para la salud seguidas a una exposición a radiaciones ionizantes a bajas dosis, menores al umbral de los efectos determinísticos.

Las guías de protección radiológica ICRP 60-1990 103-2007 [3]. que componen las bases de las reglamentaciones regulatorias están basadas en el concepto de dosis equivalente efectiva. Puesto que como hemos comentado anteriormente, la dosis efectiva equivalente no puede ser medida porque depende del “conocimiento” de la distribución de dosis absorbida en el individuo expuesto, información que rara vez está disponible, y la tolerancia individual contra determinados tipos de cánceres que puedan ser atribuidos a la radiación es información que no se conoce con certeza.

Se ha establecido a la dosis equivalente personal como la magnitud operacional para evaluar y controlar la exposición a la radiación ionizante [4]. Numerosos modelos computacionales han revelado que, para la mayoría de las situaciones de exposición, $H_p(10)$ representa una estimación conservadora de la dosis efectiva equivalente, mientras que $H_p(0.07)$ aborda adecuadamente la estimación de la dosis en piel.

Las normativas regulatorias de los gobiernos han adoptado diferentes nombres llamando a estas dos dosis a diferentes profundidades, dosis en profundidad y dosis en superficie.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

En nuestro trabajo se abordará la estimación de la dosis equivalente $H_p(10)$, puesto que es la de mayor interés a los fines de la protección radiológica de los trabajadores y es el valor que obtenemos como resultado del algoritmo de cálculo usado en el sistema de dosimetría TLD de Panasonic.

2.2 El concepto de la Dosimetría Personal

La dosimetría personal es la determinación de la cantidad de radiación ionizante absorbida por los profesionales que trabajan en distintas aplicaciones en las que puedan estar expuestos a radiaciones provenientes de fuentes de rayos X, rayos gamma, neutrones y/o radiación particulada tales como las alfa y las betas. La finalidad es garantizar que los trabajadores se aseguren del cumplimiento a los límites de dosis que establecen las disposiciones de la reglamentación vigente a nivel provincial, nacional o internacional tales como la Ley 17.557 con su decreto reglamentario 6320/68 y la Norma AR 10.1.1

En nuestro país las entidades de Fiscalización y Control de la Actividad Radiológica son la Autoridad Regulatoria Nuclear y el Ministerio de Salud de la Nación en dependencia del tipo de instalaciones y/o energías involucradas clasificándose por instalaciones con emisores de radiaciones ionizantes mayores o menores a 1 MeV y el uso o manipulación de fuentes radiactivas abiertas o selladas.

2.3 Dosimetría FILM

La dosimetría personal mediante el uso de detectores tipo películas o FILMS se basa en el fenómeno de ionización. La película consiste en dos soportes de celuloide, de 31×41 mm, recubiertos en ambas caras con una emulsión que contiene pequeños cristales de haluro de plata Ag^+ (una de ellas de reacción rápida y otra lenta), los que, bajo la acción de la radiación ionizante, interactúan con los electrones liberados, generándose una imagen latente.

La película está protegida por un envoltorio opaco, que evita su exposición a la luz visible evitándose así el velado natural.

Los iones de plata (bromuro de plata), son reducidos por el proceso químico, formándose así granos de plata metálica por la acción química del revelador, luego



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

mediante un baño levemente ácido se detiene el proceso para así finalizar el procedimiento con la inmersión en el líquido fijador, el cual elimina los granos de plata que no sufrieron la transformación a plata metálica.

Por último, se someten a los films al lavado con agua tratada a efectos de eliminar residuos químicos de los procesos anteriores y continuar con el secado en un horno a 40°C. durante 15 minutos.

Para el procesamiento de las películas dosimétricas Foma cuyas características se adjuntan al **Anexo I**, se utilizaron los reveladores radiográficos Foma DP y fijadores rápido Fomafix. El procesamiento de las películas se realizó a una temperatura de 19–21 °C con 4 minutos de tiempo de revelado utilizando una proporción de 5 litros de agua por 1 litro de revelador.

Lecturas:

Las lecturas de los films se realizaron por medio de un equipo denominado Densitómetro marca Tobias Associates, modelo TBX que permite medir el ennegrecimiento del film revelado mediante la determinación de la atenuación de la luz que cada film presenta.

El valor medido se denomina Densidad Óptica que se define con el logaritmo del cociente entre las intensidades de luz incidente y luz que logra atravesar el film

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

I_0 es la intensidad de luz incidente en ausencia del film

I es la luz que logra atravesar al film medida en la cara opuesta a la luz incidente (perpendicular al plano).

La curva característica de evolución del nivel de ennegrecimiento o bien “Densidad Óptica de la película” es del tipo sigmoideo, puesto que a nivel cero de exposición a radiación ionizante se produce un velo que presenta una D_0 baja, pero evidente, este



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

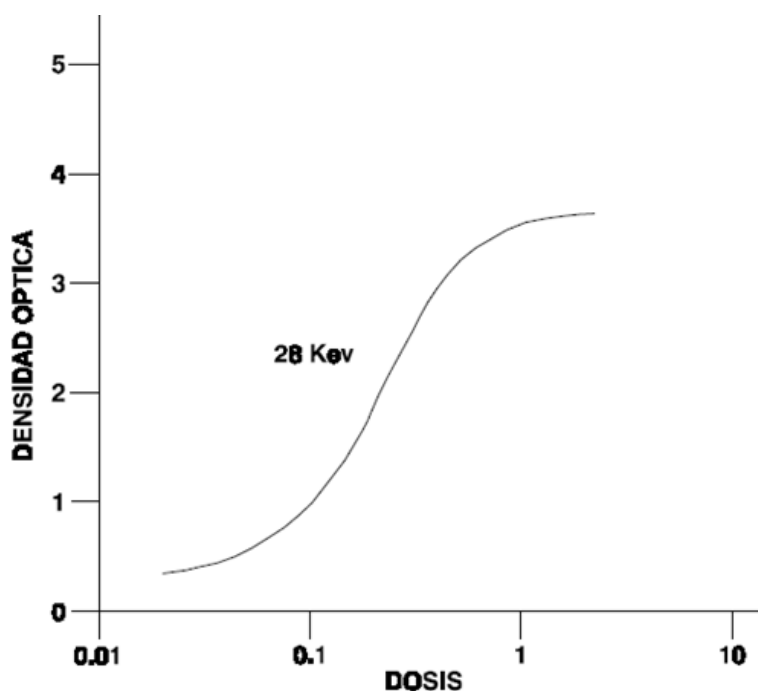
fenómeno se conoce como Densidad Óptica de **base (DO_b)** y se ve acentuado por la antigüedad del film en relación a su fecha de producción en fábrica.

La experiencia de nuestro laboratorio indica que la DO_b inicia en 0.2 unidades y al cabo del año puede estar en 0.35 unidades.

Asimismo, en el otro extremo de la curva, a medida que aumenta la magnitud de la radiación incidente, las densidades ópticas van acompañando este efecto hasta el punto en el cual se produce una “saturación” de film, en esta condición ya no existen granos de plata libres que puedan transformarse en plata metálica, y el film alcanza su máximo nivel de ennegrecimiento o **DO_{límite}**. Este valor se alcanza para una DO_{límite} de 5 a 6 unidades.

A continuación, se ejemplifica la evolución de la densidad óptica en función del aumento de la intensidad de la radiación ionizante (curva ejemplo de bibliografía), para nuestro trabajo en las irradiaciones de 70 kVp se alcanzaron estos valores para las películas de Alta sensibilidad.

A raíz de ello, los valores usados para el trabajo fueron tomados de la película de Baja sensibilidad puesto que el fenómeno de saturación limita la información necesaria para la interpretación de datos.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

El ennegrecimiento de la emulsión fotográfica depende de la dosis absorbida por unidad de fluencia del campo de radiación incidente. por lo cual no es posible discernir la energía de la radiación simplemente con el uso de film por sí solo.

El reconocimiento de la energía efectiva y la estimación de la dosis se consigue relacionando las densidades ópticas bajo distintos filtros de radiación (pequeñas placas de material absorbente) que forman parte de la estructura del porta-dosímetro personal como se mostrará más adelante en el desarrollo del trabajo.

Las relaciones de densidades ópticas medidas bajo los filtros permiten determinar la energía y luego la dosis.

2.4 Dosimetría TLD

A efectos de explicar de forma resumida la termoluminiscencia, podemos decir que es la emisión de luz cuando un material que ha sido expuesto a radiación ionizante es excitado mediante un proceso de calentado. Los materiales termoluminiscentes son semiconductores sólidos en los que la radiación ionizante induce la creación de pares electrón-hueco que permanecen atrapados en defectos de la red cristalina hasta que el material es estimulado mediante un proceso de calentado.

El mecanismo de la termoluminiscencia puede ser explicado mediante el diagrama de bandas de energía de los materiales cristalinos que se presenta en la Figura 3. La presencia de defectos o impurezas (denominados dopantes o activadores) en la red cristalina introduce niveles discretos de energía dentro de la zona prohibida constituyendo lo que se conoce como estructura de trampas del material.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

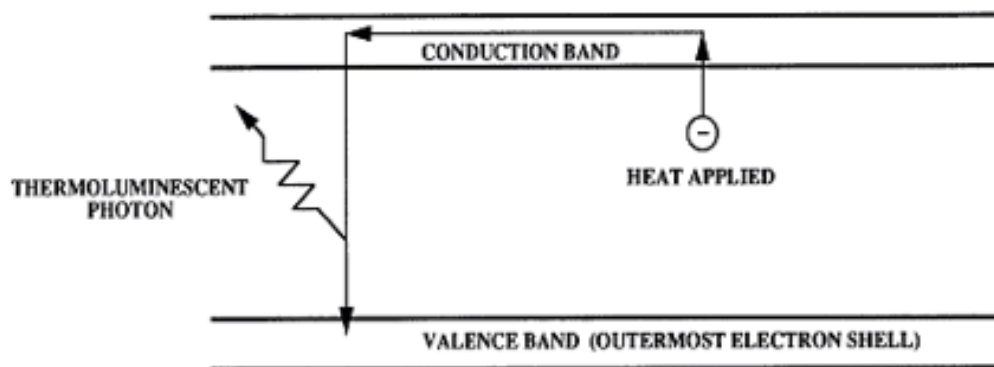


Figura 3: Esquema del mecanismo de la termoluminiscencia

La representación gráfica de la luz emitida por el dosímetro termoluminiscente (TLD) en función de la temperatura de calentamiento del material se denomina Curva de Brillo (Figura 4).

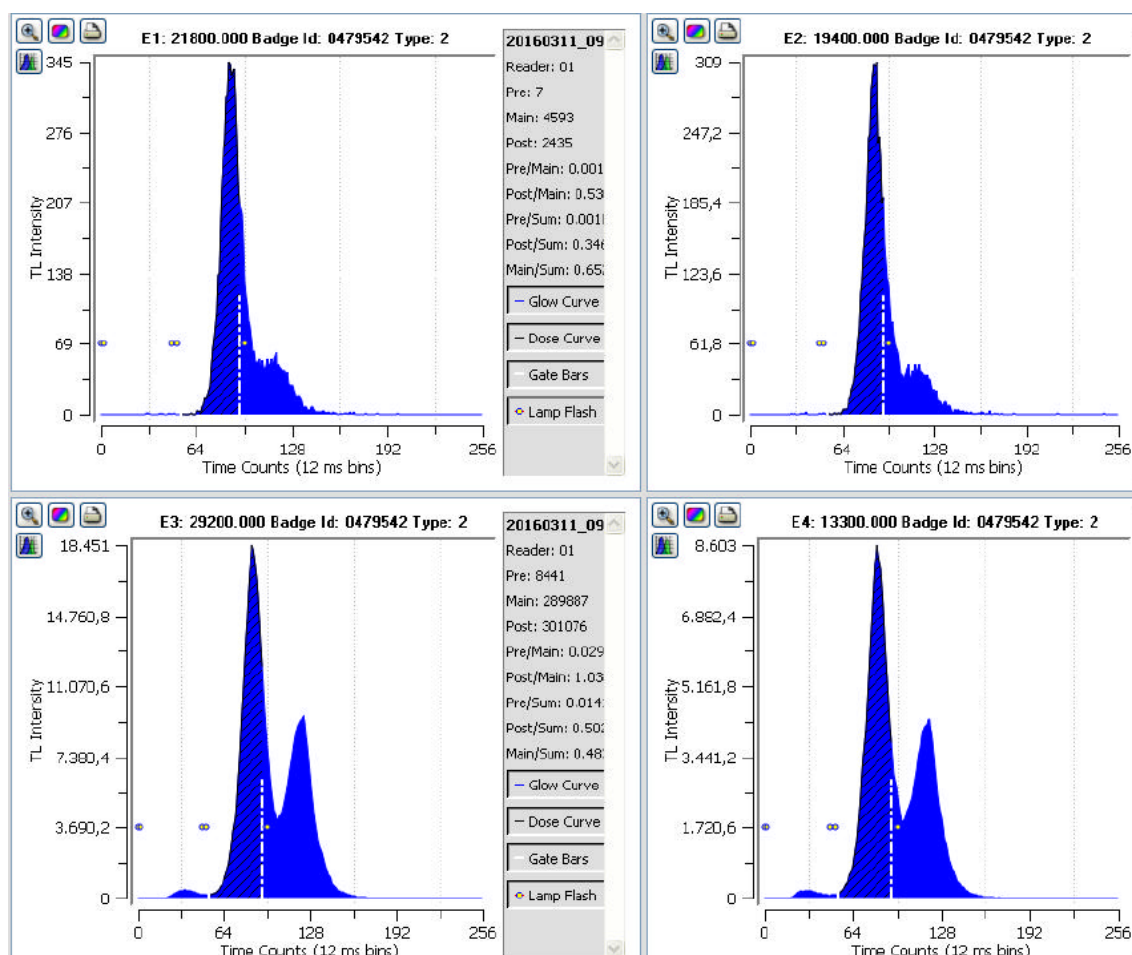


Figura 4: Curva de Brillo de un material TL (LiF:Mg,Ti) sometido a al proceso de estimulación mediante calor

El empleo de la luminiscencia en dosimetría requiere que la luz emitida por el material termoluminiscente (TL) durante el proceso de lectura sea recogida por un tubo fotomultiplicador. El conjunto del sistema de calentamiento del material, el tubo fotomultiplicador y la electrónica asociada conforma el lector de dosímetros TL que para este caso se usó el UD 716 AGL el cual es un lector del tipo automático.

El lector UD 716 AGL está vinculado a un sistema informático en el que se captura y almacena la información de la lectura dosimétrica para luego procesar los resultados mediante un algoritmo de cálculo de dosis $H_{p(10)}$, $H_{p(0.07)}$ y $H_{p(3)}$.

Los materiales TL utilizados en dosimetría personal Panasonic son $Li_2B_4O_7:Cu$ (respuesta plana en bajas y altas energías) y $CaSO_4:Tm$ (gran sensibilidad en bajas dosis). Los dosímetros TL empleados en dosimetría personal (**Anexo III**) combinan dos detectores de cada material TL con propiedades dosimétricas complementarias, alojados bajo filtros de materiales de espesor y composición indicados en el Anexo III.

Esto posibilita la aplicación de algoritmos de cálculo de dosis, basados en la relación entre la lectura individual de cada detector, de forma que se aporte información adicional sobre el campo de radiación para una más correcta evaluación de la dosis equivalente personal.

El conjunto se introduce en un contenedor plástico que constituye una protección frente a distintos agentes que pudieran alterar las propiedades dosimétricas de los detectores (polvo, humedad, luz, etc.) y que además permiten numerar e individualizar a cada detector.

Capítulo 3:

Métodos y Materiales

3.1 Metodología

3.1.1 Identificación y selección de dosímetros tipo FILM

Se seleccionaron los dosímetros a utilizar en las mediciones, tanto para los FILMS como para los TLD es importante identificar las variables que condicionan el desempeño y registrarlas a efectos de poder obtener trazabilidad y consistencia en los datos



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

medidos. Para el sistema de FILMS, es importante establecer el tipo de elemento usado para contener al film llamado “Porta Film”, el cual es un pequeño contenedor de 46mm x 40mm x 7mm fabricado a partir del polímero semicristalino **PLA** (1.07 gr/cm³). Se elige este material puesto que es el insumo utilizado por las impresoras 3D, que es nuestro medio disponible para fabricar los dispositivos porta films en el Laboratorio de Dosimetría Personal de FUESMEN y además este material posee una densidad equivalente a la del tejido (0.9 gr/cm³).



El Porta film contiene en ambas caras a los filtros de Cu, Al y Pb de 0.5 mm de espesor cada uno que tienen la finalidad de atenuar la radiación incidente sobre la emulsión fotográfica y permitir obtener un revelado con diferencias de densidades ópticas para un mismo film e irradiación.

Todas las mediciones, se realizarán con este tipo de porta films de forma tal que los valores obtenidos responden única y exclusivamente a esta combinación de espesores de filtros y tipos de materiales usados.

El otro elemento a considerar es el propio FILM, puesto que, si bien se asumen que todas las películas son homogéneas e iguales, pueden existir deferencias de lotes de fabricación, lugar de almacenaje, fechas de caducidad y fabricación, por tanto, para asegurar consistencia con los datos se tomaron todas las películas correspondientes al mismo lote de producción, fecha de compra y lugar de almacenaje.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Todos los films usados son de la marca FOMA lote de producción LOT -035683-04 – 2025-03. Se incluye en **Anexo I** características técnicas y especificaciones del fabricante.

3.1.2 Identificación y selección de dosímetros tipo TLD

Para los dosímetros termoluminiscentes, cada uno de ellos ya poseen un factor de corrección **ECF** asociado a su numeración, generado en irradiaciones previas con un Irradiador Automático de dosímetros marca Panasonic modelo Panarad 794 y, por tanto, la respuesta es homogénea independientemente del detector en particular que se esté empleando; todos responden de forma homogénea puesto que poseen su factor de corrección al día.

En el siguiente grafico se ejemplifica la “normalización” que el factor de corrección del elemento hace en relación a la respuesta relativa de cada sustrato.



- Factores aplicados a todos los elementos de los TLD, para homogeneizar su respuesta.
- A cada E_{ij} le corresponde un ECF_{ij} , donde i indica dosímetro y j indica elemento.

Mencionado lo anterior, se podría tomar cualquier unidad TLD- 802 At del stock disponible y destinarlo para realizar esta medición sin necesidad de caracterizarlo. No obstante, ello, se dispuso para este experimento de un lote de dosímetros que previamente se habían destinado al uso en el Ejercicio de Intercomparación Regional en Dosimetría Personal (**ICReprolam 2022**), auspiciado por OIEA en cooperación con el Laboratorio de Metrologías de Radiaciones Ionizantes de Brasil.

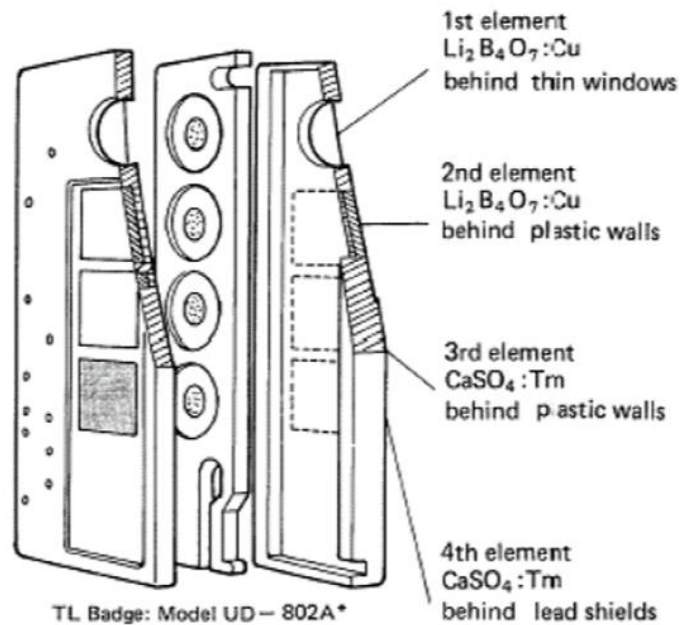
En el ejercicio de Intercomparación ICReprolam, se acreditó que las mediciones realizadas con los dosímetros TLD Panasonic – 802 reflejaron resultados satisfactorios informando las dosis **H_{p(10)}** y **H_{p(0.07)}** [5].

Los resultados obtenidos, alentaron a utilizar estos detectores para contrastar contra el sistema de Films, con el objetivo de desarrollar e implementar curvas de calibración en respuesta a bajas energías (<100 keV).

En Anexo II se encuentran las características de los dosímetros TLD utilizados por el Laboratorio de Dosimetría Personal de FUESMEN. Este tipo de detectores posee parametrizada su respuesta frente diferentes energías de la radiación incidente. A continuación, se adjunta una tabla con las respuestas de cada Elemento ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ / CaSO_4) en combinación con los filtros frente diversas calidades de energías incidentes.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Elemento 1 Cu: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Filtro film $14\text{mg}/\text{cm}^3$.

Elemento 2 Cu: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Filtro plástico $160\text{ mg}/\text{cm}^3$

Elemento 3 Tm: CaSO_4 Filtro plástico $160\text{ mg}/\text{cm}^3$

Elemento 4 Tm: CaSO_4 Filtro Pb 0.7 mm

3.1.3 Espectro de Energía posibles de discriminar por el TLD

Las respuestas de los dosímetros tipo TLD modelo 802 de Panasonic, compuestos por cuatro elementos se encuentra caracterizada y tabuladas. A continuación, se muestra una de las tablas más comúnmente difundidas que permiten ayudar a comprender las respuestas de cada elemento sensible en combinación con su filtración frente a la incidencia de radiaciones ionizantes provenientes de diversas fuentes.

2002 UD-802 Response Data from Panasonic

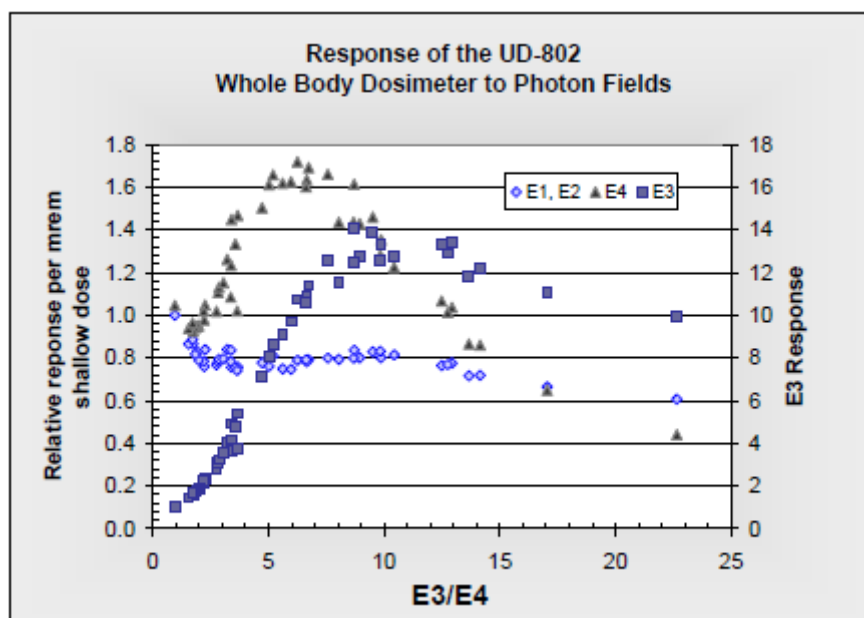
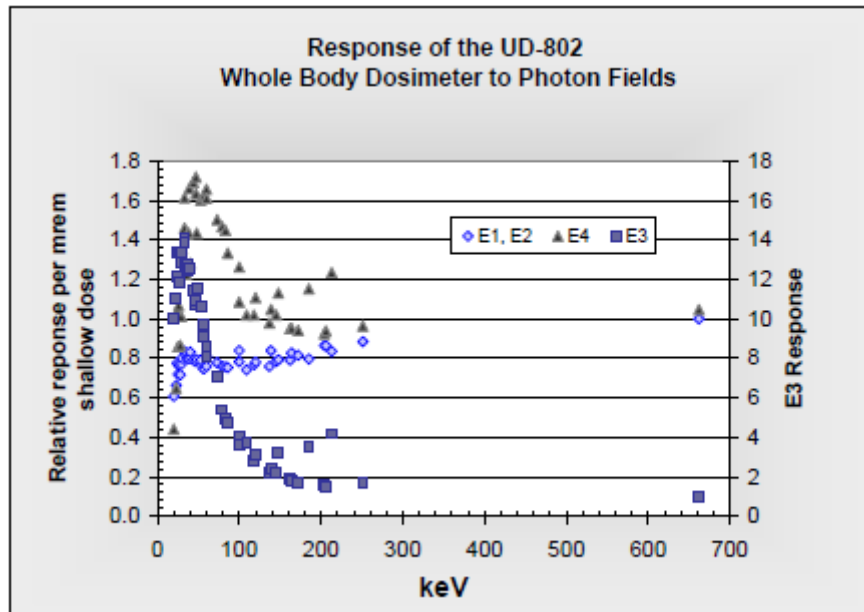
From 'algotestdata.xls'

average response relative to shallow dose, normalized to Cs E2 and E3

Field	keV	E1	E2	E3	E4	sdE1	sdE2	sdE3	SdE4
M30	20	0.733	0.607	9.976	0.440	0.040	0.013	0.364	0.012
L40	23	0.745	0.664	11.044	0.648	0.025	0.029	0.175	0.032
H30	24	0.804	0.776	13.401	1.036	0.037	0.031	0.115	0.045
M40	25	0.757	0.719	12.154	0.859	0.057	0.042	0.307	0.032
LK30	26	0.791	0.765	13.316	1.067	0.017	0.014	0.502	0.030
L50	28	0.793	0.716	11.823	0.865	0.018	0.030	0.327	0.046
M50	29	0.793	0.769	12.896	1.012	0.019	0.025	0.181	0.023
LK35	30	0.830	0.801	13.355	1.354	0.046	0.011	0.628	0.043
H40	33	0.863	0.836	14.044	1.613	0.045	0.033	0.364	0.054
NS40	33	0.860	0.829	13.873	1.460	0.013	0.026	0.369	0.038
M60	35	0.824	0.815	12.778	1.225	0.023	0.013	0.502	0.036
HK60	36	0.776	0.800	12.777	1.429	0.033	0.032	0.574	0.064
S60	38	0.806	0.798	12.451	1.435	0.032	0.023	0.327	0.060
H50	39	0.798	0.799	12.551	1.660	0.036	0.035	0.505	0.113
S75	40	0.820	0.832	12.595	1.281	0.036	0.038	0.641	0.042
WS60	44	0.801	0.792	11.394	1.691	0.034	0.013	0.517	0.130
H60	47	0.801	0.788	10.735	1.718	0.023	0.027	0.414	0.103
LK55	47	0.809	0.782	10.884	1.634	0.049	0.038	0.283	0.106
L100	48	0.794	0.793	11.535	1.434	0.064	0.030	0.354	0.040
M100	53	0.809	0.792	10.606	1.601	0.034	0.026	0.221	0.009
WS80	56	0.759	0.749	9.075	1.618	0.057	0.022	0.318	0.112
HK100	57	0.771	0.747	9.711	1.625	0.052	0.033	0.308	0.075
Am-241	60	0.783	0.809	8.617	1.657	0.044	0.025	0.154	0.073
LK70	60	0.737	0.761	8.089	1.611	0.039	0.018	0.372	0.087
M150	73	0.811	0.778	7.095	1.502	0.036	0.039	0.313	0.076
WS110	79	0.749	0.758	5.387	1.467	0.037	0.045	0.356	0.090
H100	83	0.772	0.756	4.920	1.449	0.016	0.030	0.226	0.031
LK100	86	0.752	0.754	4.751	1.332	0.033	0.029	0.192	0.056
M200	100	0.793	0.840	4.054	1.261	0.033	0.037	0.146	0.034
NS120	100	0.804	0.782	3.654	1.084	0.036	0.010	0.080	0.066
LK125	109	0.730	0.742	3.714	1.019	0.034	0.028	0.222	0.050
H150	118	0.748	0.768	2.808	1.018	0.035	0.014	0.117	0.023
HK250	120	0.799	0.781	3.132	1.107	0.024	0.027	0.041	0.031
WS200	137	0.778	0.759	2.173	0.979	0.048	0.046	0.080	0.021
M250	139	0.834	0.839	2.365	1.047	0.036	0.015	0.097	0.058
HK300	145	0.801	0.784	2.240	1.019	0.027	0.030	0.090	0.031
LK170	148	0.791	0.793	3.232	1.130	0.025	0.025	0.151	0.062
H200	162	0.817	0.791	1.884	0.950	0.027	0.022	0.043	0.029
NS200	164	0.873	0.827	1.831	0.952	0.034	0.024	0.024	0.017
WS250	172	0.793	0.816	1.734	0.942	0.040	0.040	0.064	0.027
LK210	185	0.813	0.796	3.515	1.152	0.032	0.022	0.066	0.055
H250	204	0.858	0.865	1.615	0.925	0.022	0.035	0.022	0.040
M300	206	0.892	0.864	1.451	0.938	0.051	0.020	0.047	0.051
LK240	213	0.871	0.836	4.176	1.234	0.022	0.066	0.234	0.022
H300	251	0.849	0.885	1.660	0.963	0.020	0.026	0.055	0.027
Cs-137	662	0.977	1.000	1.000	1.046	0.014	0.053	0.036	0.042
Co-60	1250	0.848	0.974	0.880	0.895	0.035	0.037	0.016	0.014
Sr 90	Beta	1.082	0.416	0.327	0.022	0.037	0.024	0.018	0.002
Ti 204	Beta	0.675	0.002	0.002	0.000	0.018	0.005	0.001	0.001
Cf mod	neut	1.839	1.973	0.200	0.172	0.137	0.061	0.007	0.008
Cf unmod	neut	0.263	0.274	0.066	0.056	0.011	0.021	0.003	0.002



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



En la gráfica anterior podemos observar la forma en la que se mantiene constante la respuesta de los elementos E1 y E2 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) para diferentes relaciones de cocientes de E3/E4 (CaSO_4). Esta característica es la que permite usar a E1 y E2 como mejores estimadores de la dosis al tener una respuesta lineal e independiente de la energía de la radiación.

Para energías $< 100\text{keV}$ el cociente tiende a ser mayor que la unidad, mientras que superando los 100 keV este valor tiene a 1, esto quiere decir que la respuesta de E3 es igual a la respuesta de E4.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Lo anterior se puede apreciar de forma clara en la tabla, al visualizar las respuestas de E1 E2, E3 y E4, donde podemos visualizar que conforme aumenta la energía de la radiación, las respuestas de los elementos tienden a igualarse, dado que los filtros ya no proporcionan atenuación para altas energías en especial para el caso del E4.

3.1.4 Revisión de los parámetros operativos de los equipos

Como primera medida, antes de proceder con las irradiaciones de los dosímetros, se verificaron las condiciones operativas de los equipos, tales como el kilovoltaje pico seleccionado kVp, el ajuste de la carga de trabajo expresada en mAs, distancias o referencias de posicionamiento a los fines de contar con la información que permita repetir las irradiaciones en caso de resultar necesario.

En el equipo de radiología clínica simple, se verificó que el kilovoltaje pico seleccionado se corresponda con el kVp del haz en la salida del tubo de RX. Para ello se empleó el instrumento **RaySafe modelo serie n°** verificando así la condición deseada seleccionando los valores de 50 y 70 kVp.

Se constató que la zona de irradiación sea homogénea asegurando la ausencia de penumbra, solapamiento o artificios que afecten el campo de irradiación.

3.2 Irradiaciones en kVp 120

Se dispuso de un Tomografo Canon modelo Aquilion Lightning con energía de rayos X variable desde 80 a 120 kVp. El campo de irradiación, limitado al ancho de corte máximo condicionó la posibilidad de armar un arreglo geométrico que permitiera irradiar los dosímetros en un solo corte, tampoco fue posible irradiar con barrido helicoidal puesto que la dosis en los detectores NO sería uniforme.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



La única alternativa para obtener una exposición con rayos X provenientes de un Tomógrafo con relativa homogeneidad de las irradiaciones fue mediante la radiación dispersa. Podría parecer absurdo pensar en irradiar con radiación dispersa un set de dosímetros con la mera finalidad de realizar un contraste entre sistemas dosimétricos, pero la realidad es que, de hecho, resulta ser la forma en la que más comúnmente se utilizan los dosímetros al monitorear las actividades que desempeñan los trabajadores.

El Personal Ocupacionalmente Expuesto mayormente se expone a radiación dispersa, puesto que, las exposiciones se producen como consecuencia de la radiación dispersada por el paciente y/o elementos de la sala que alcanzan alguna ubicación con carencia de blindaje.

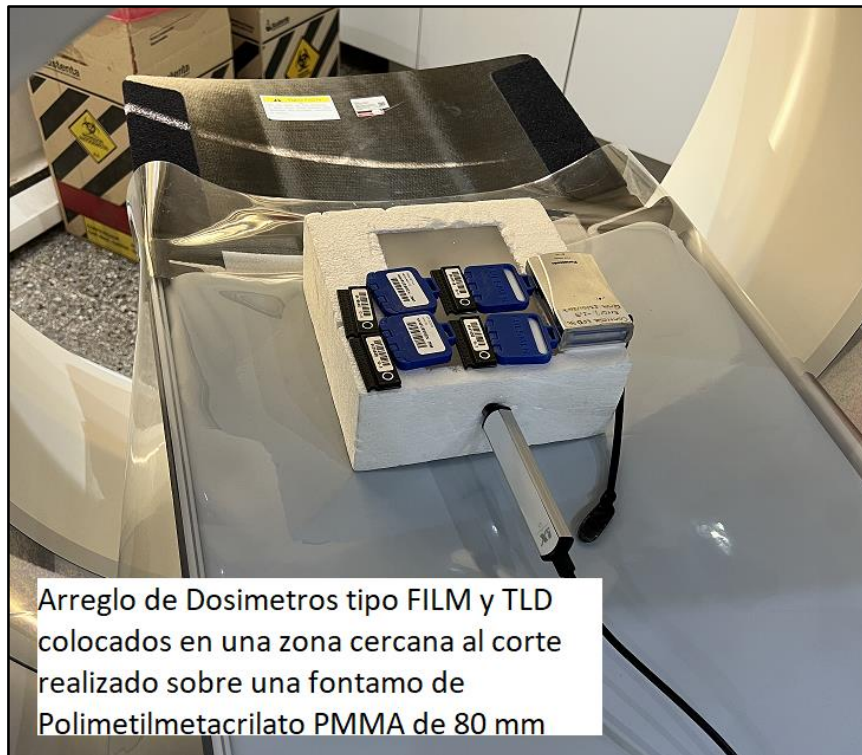
Es por tanto que, volviendo al tema de interés, nuestra finalidad y objetivo principal es contrastar la respuesta del sistema FILM respecto a los TLD en un campo de rayos X generado por un Tubo de 120 kVp, teniendo presentes que, con seguridad, la energía de la radiación incidente sobre los dosímetros no sea un dato certero ni posible de estimar, pero SI resultan ser las condiciones prácticas en las cuales rutinariamente los trabajadores se exponen a las radiaciones ionizantes.

Por lo antes comentado, si los TLD son nuestros elementos de monitoreo de referencia para esos campos, entonces la intención es que nuestro sistema de dosimetría por FILM responda de la misma manera, indistintamente que conozcamos certeramente la real



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

energía de la radiación incidente. Para este trabajo únicamente se ha propuesto confirmar que es un rango de baja energía (rayos X diagnósticos) y emitidos un equipo de tomografía.



Para alcanzar los valores informados en las tablas N°1, 2 y 3 fue necesario ejecutar al menos 4 irradiaciones modificando el parámetro de corriente de tubo y tiempo de exposición (mAs) configurando desde los 180 a 300 mAs.

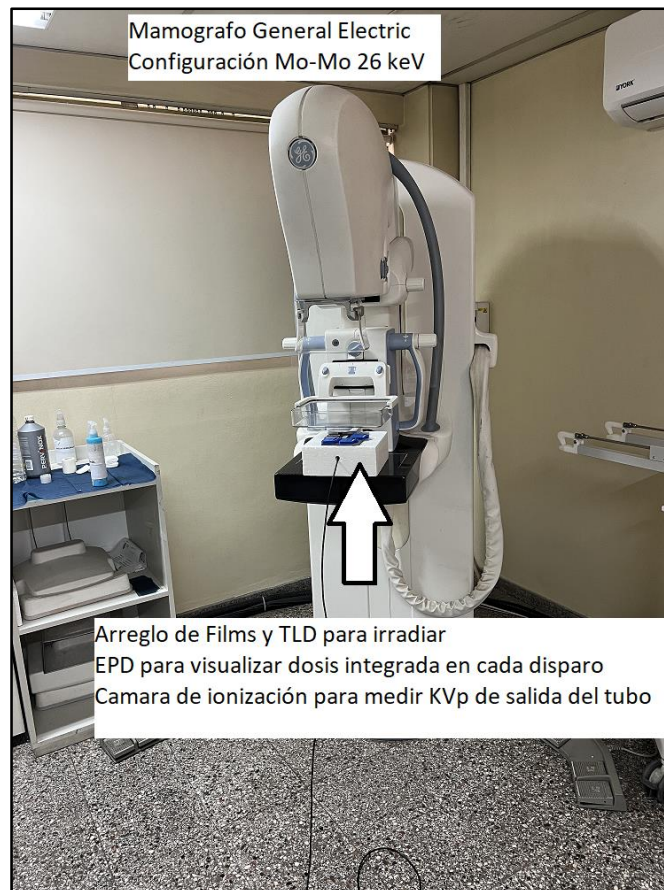


UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

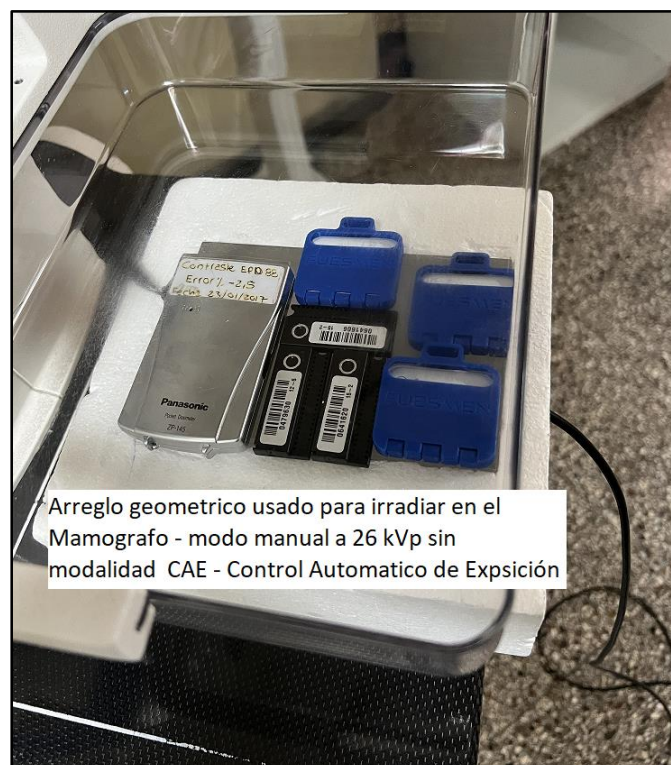


3.3 Irradiaciones en 30 keV

Para el caso de irradiaciones en las energías más bajas de nuestra zona de interés encontramos las aplicaciones de Mamografía que funcionan con kilovoltaje de entre 24 a 30 kVp. El modo de operación del equipo debe ser en forma completamente manual puesto que el dispositivo para control automático de exposición CAE, al detectar las densidades de los filtros metálicos produce una sobrecarga el tubo de Rayos X. Por este motivo se trabajó fijando el KVp en 30 sin uso del CAE.



Se realizaron 3 puntos de dosis en valores de 1.4 mSv, 3.7 mSv y 25 mSv



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

3.4 Irradiaciones en 50-80 keV

Para el caso de irradiaciones en las energías comprendidas en el rango de 50 a 70 se utilizó un equipo de radiología clínica simple, el cual se encuentra disponible en la sede de FUESMEN ubicada en el Hospital Italiano de Mendoza.

Para montar el arreglo en las 3 condiciones de irradiación se utilizó un material dispersor de 7 cm de espesor compuesto por polimetil-metacrilato (pmma) posicionando los dosímetros por encima del mismo en dirección perpendicular al tubo de RX.

La configuración del equipo se dejó constante para un mismo kilovoltaje (50 y 70) variando el mAs y realizando reiterados disparos hasta alcanzar valores de exposición entre 1 a 5 mSv indicada por el dosímetro tipo electrónico.

A efectos de tener alguna idea de la cantidad de exposiciones necesarias para alcanzar los valores deseado, se utilizó un dosímetro tipo electrónico de lectura directa que si bien se pensó que responderían de forma aproximada a la que lo hacen los TLD, se vio que en exposiciones directas muy cortas (milisegundos) no tiene una buena respuesta para esas condiciones de uso.



Equipo de Radiología usado para la experiencia



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Puesto que también se cuenta con un detector de estado sólido capaz de identificar la energía del haz, se contrastó el valor seleccionado en consola del equipo con respecto al medido al momento de la exposición.



Capítulo 4:

4.1 Procesamiento de Lecturas

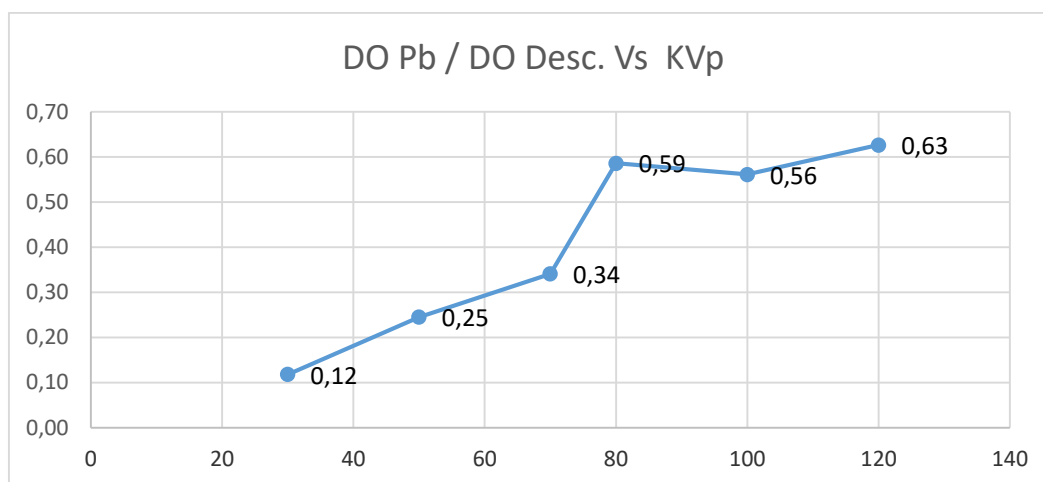
Luego de concluido el proceso de revelado, con los datos de las lecturas de densidades ópticas se realizó una curva a fin de evaluar la respuesta del cociente entre la DO debajo del filtro de Cu respecto a la DO sin filtro.

Esta grafica buscó establecer una relación entre el grado de atenuación que presenta el Cu a las diferentes energías de los RX incidentes y poder establecer así una relación entre la energía de la radiación incidente y la atenuación del Cu. Se manifiesta el hecho que, al aumentar la energía, el espesor del filtro de Cu (0.5mm) es insuficiente para atenuar los RX derivando en una insensibilidad del cociente ($DoCu / DoDesc$) tendiendo el valor a la convergencia en la unidad.

Para el caso del Aluminio, se vio que incluso los RX provenientes del Mamógrafo (30 kVp) tienen energía suficiente para atravesar el aluminio sin poder evidenciarse diferencia de contraste entre el aluminio y el descubierto.

Por su parte el Plomo con un número atómico 82, aun en las irradiaciones de realizadas en Tomografía logro atenuar lo suficiente el haz como para evidenciar una sensible diferencia en las Densidades ópticas debajo de los filtros de Cu y Pb.

Con los datos obtenidos se graficó la relación (DO Pb / Do Desc.) observándose que se alcanzó un máximo de 0.63 unidades para los 120 kVp.



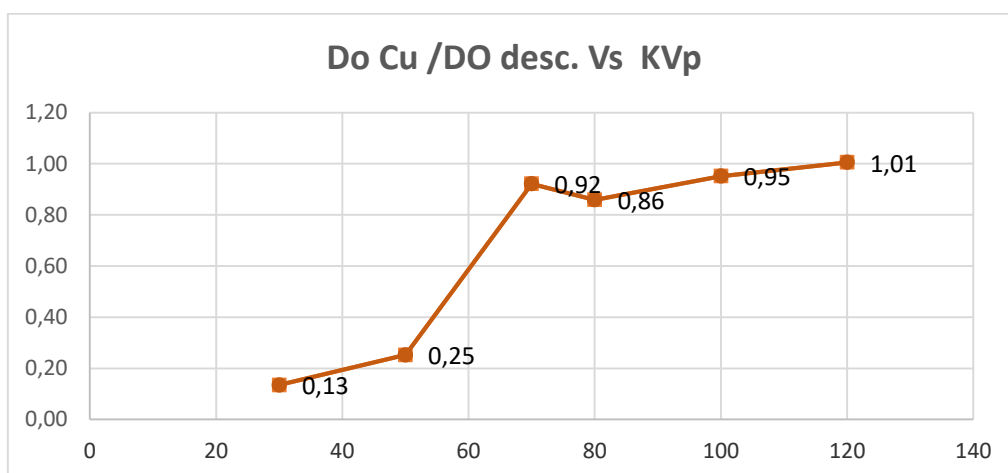
<i>KvP</i>	<i>Prom DO Pb / Desc DO</i>
30	0,12
50	0,25
70	0,34
80	0,59
100	0,56
120	0,63

Tabla N°1

Por su parte el filtro de Cobre a aproximadamente 100 kVp ya no tuvo el poder de atenuación como para discriminar diferencias en las densidades ópticas llegando el cociente al valor de la unidad.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



<i>KvP</i>	Prom. Cu/desc DO BS
30	0,13
50	0,25
70	0,92
80	0,86
100	0,95
120	1,04

Tabla N°2

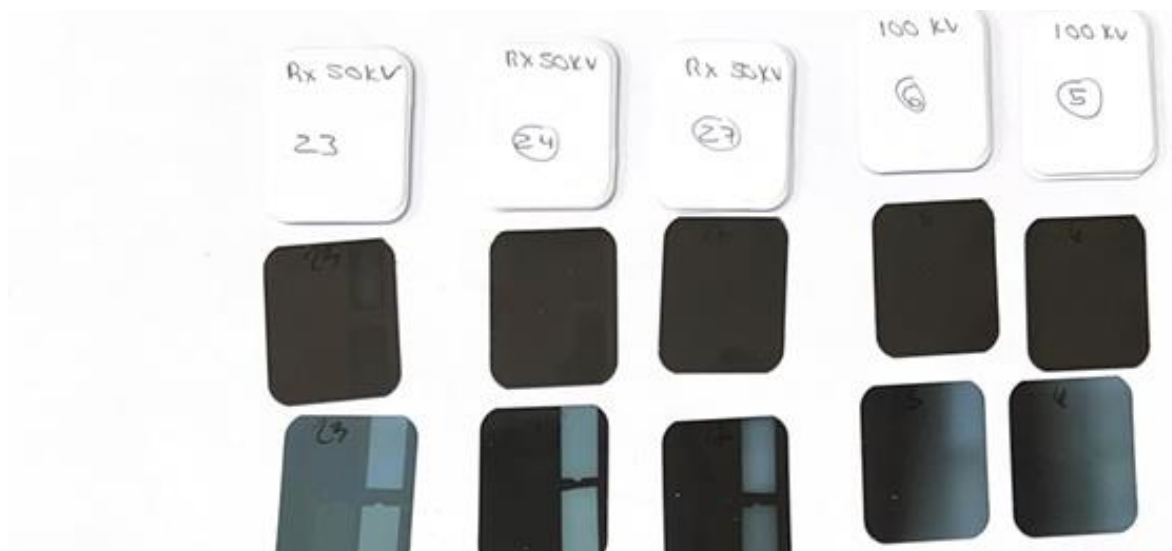
Identificadas las energías de la radiación incidente luego con los puntos de dosis se construyeron curvas de “Dosis” referidas a los valores informados por los TLD que se muestran en la siguiente tabla.

KvP	Descu BS	Hp(10) TLD uSv
30	0,40	1482
30	0,58	3762
30	1,26	25243
50	0,53	1925
50	1,35	11503
50	3,17	32965
70	5,66	116035
80	0,38	298
80	0,79	11582
100	0,880	874
120	0,298	113
120	0,30	201

Tabla N°3



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



4.2 Curvas de Calibración

Si bien las Curvas de Calibración de un sistema de Dosimetría Personal deberían ser como las mostradas a continuación, la realidad es que para llegar a construir estas

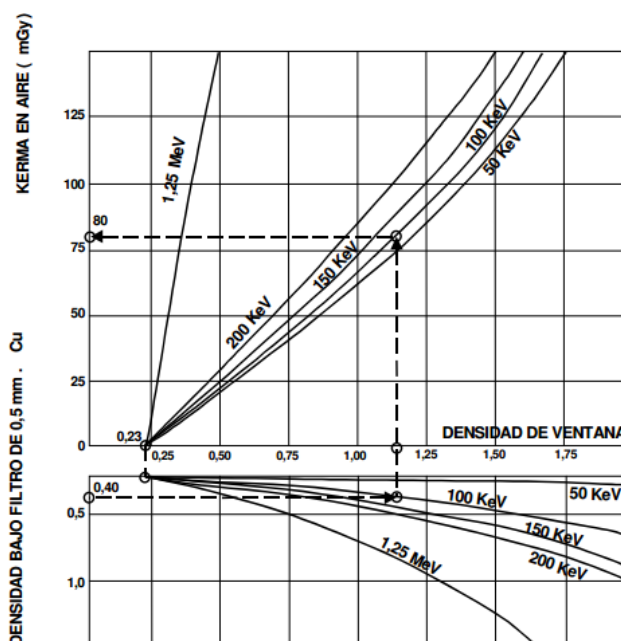


UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

gráficas se requiere de un laboratorio con las fuentes con trazabilidad al NIST, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.

Asimismo, también hacen falta una gran cantidad de puntos de medición que permitan trazar diferentes curvas para cada energía incrementando levemente la dosis en cada punto de irradiación. Este tipo de gráficas son características de bibliografía puesto que su construcción resulta sumamente laboriosa y casi impracticable.

METODO DE CALIBRACION DE FILM-DOSIMETROS



En consecuencia, y siendo la única herramienta viable el método de contrastación con el sistema TLD, se han procedido a construir “curvas”, en realidad son cuasi rectas que permitan inferir con mejor aproximación la dosis a la que fue expuesto un dosímetro tipo film en bajas energías

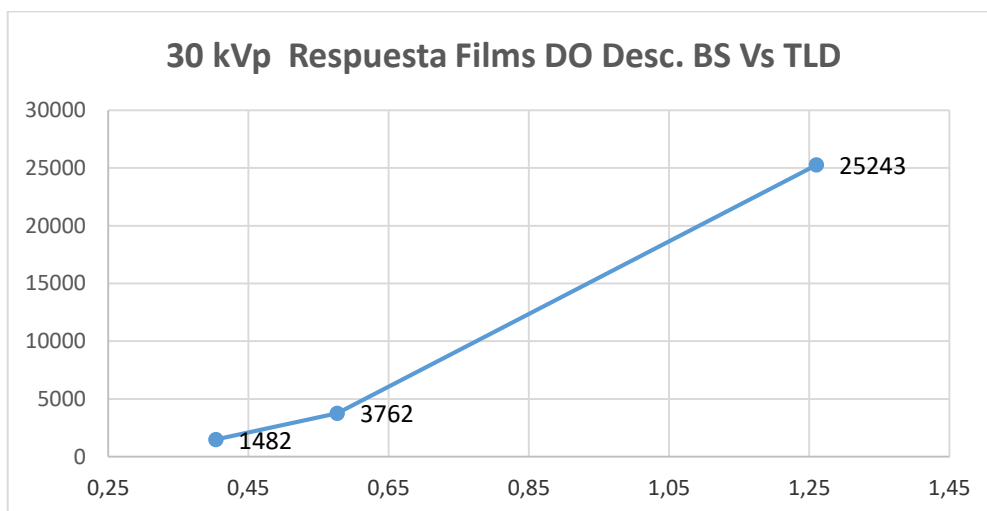
La siguiente resulta ser la primera gráfica obtenida para 3 puntos de dosis. Los resultados de las dosis medidas son para Hp(10) obtenidos con el software de cálculo “ “Doctor Software versión 2.0” y expresados en uSv (micro Sievert).

Es importante aclarar que para el punto de 25 mSv, se usaron los valores informados por el film de Baja sensibilidad puesto que el film más sensible alcanzó su saturación.

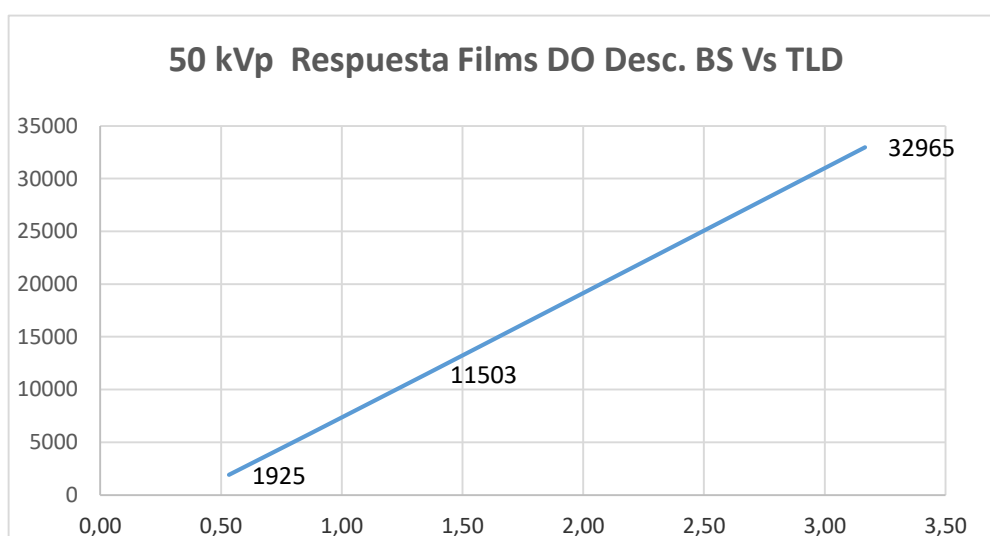


UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Esto amerita una revisión de la condición de irradiación para repetir la experiencia con datos del film de Alta sensibilidad.



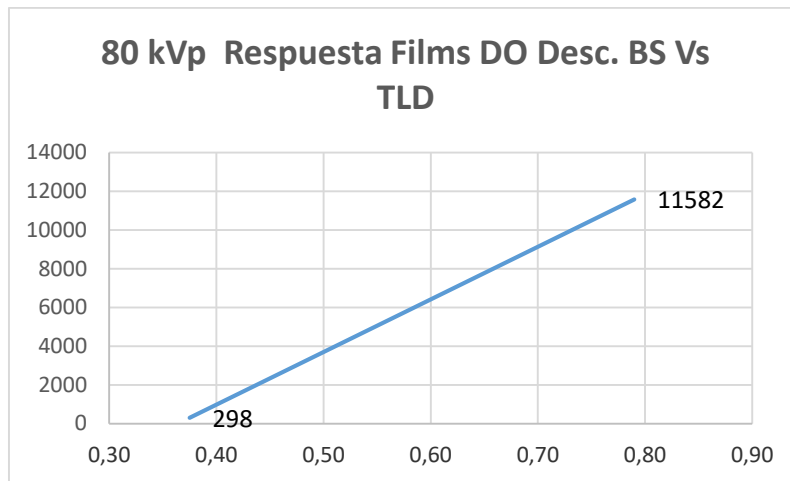
Idéntica fue la situación para las irradiaciones de 50 KVp se obtuvieron 3 puntos de dosis usando para los últimos dos los valores de densidad óptica correspondientes al film de baja sensibilidad.



Para la irradiación a 80 KVp se presentan los resultados obtenidos, pero se evidencia la necesidad de contar con al menos un tercer punto de dosis que permita verificar la tendencia y linealidad. Al momento de realizar las irradiaciones con esta energía, el fin perseguido fue determinar el cociente entre la (DO Cu / DO Desc).



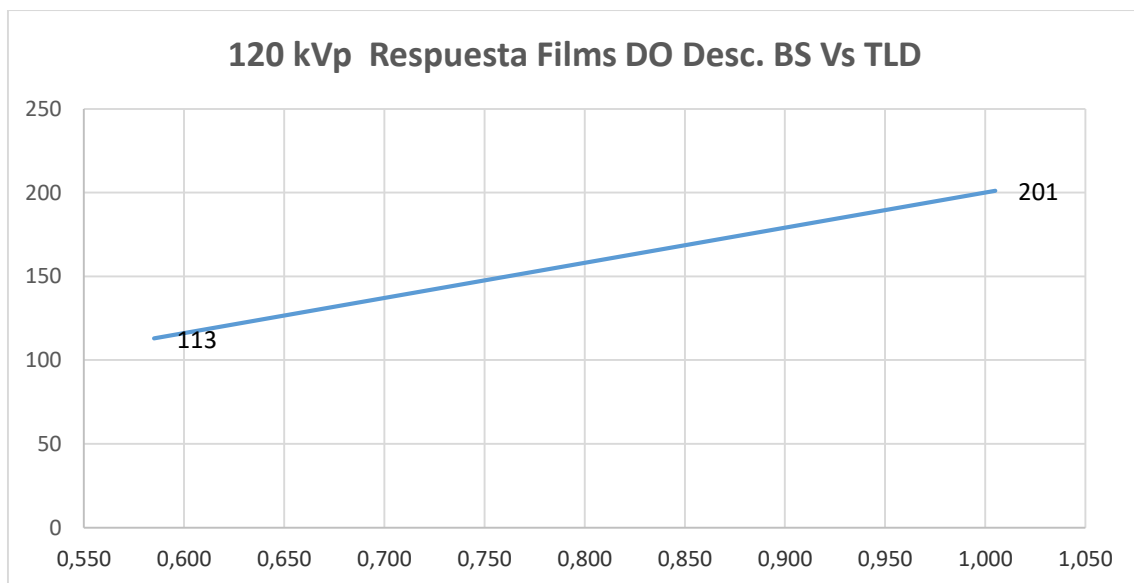
UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Para las irradiaciones de Tomografía, debemos hacer la salvedad que, si bien nos referimos a esta energía como la energía del haz incidente, lo cierto es que tal como se explicó precedentemente en el inciso 3.5) se desconoce la energía real incidente en los dosímetros.

Con esta salvedad, se irradiaron los dosímetros ubicándolos a una distancia de 3 cm desde el borde donde se produce el corte del haz de manera tal de irradiarlos en forma simultánea con los TLDs

El corte del tomógrafo se realizó con un ancho de 5 mm y por este motivo los valores de dosis medidos han sido muy bajos en contraste con las mediciones realizadas en exposición directa.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

5) Conclusiones

Se encontró una buena correspondencia entre las DO debajo de los filtros de Cu en relación a la DO del descubierto a medida que se fue incrementando la energía de los RX incidentes.

Los cocientes de la relación para la energía más baja fueron en promedio 0.13 (30 KVp) hasta alcanzar el promedio de 1.04 para las irradiaciones en Tomografía. Esto se da cuando la energía de la radiación es tal que el filtro no presenta atenuación alguna.

Una vez establecida la energía de la radiación incidente, se construyeron las curvas de dosis para cada energía logrando de esta forma aproximada asignar valores de dosis al intervalo de densidades ópticas comprendidas entre los puntos de la curva.

Si bien la premisa inicial del trabajo consistía en determinar un método que permita, a partir de las mediciones del sistema de dosimetría TLD, estimar los valores de dosis informados por el sistema tipo FILM, se han encontrado limitaciones importantes que ameritan en una segunda instancia corregir parámetros de irradiación que permitan el uso de las dos emulsiones (alta y baja sensibilidad) sin alcanzar la saturación del film, o al menos, alcanzarla con mayor cantidad de irradiaciones y puntos de en la curva.

Se puede concluir que el actual trabajo aporta datos muy útiles en relación la variación de densidades ópticas en bajas energías medidas con los dosímetros tipo FILMS, pero se requiere complementar con mayor cantidad de exposiciones para aumentar la estadística y mejorar las curvas de dosis.

6) Referencias Bibliográficas:

Radiaciones Ionizantes – *Robert N. Cherry Jr. Capítulo 48 – Riesgos Generales*

Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing- ANS /HPS 2001

The Use of Films Badges for Personnel Monitoring – Safety Series N°8 IAEA



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Anexo 1



MATERIALES PARA SANIDAD

PERSONAL MONITORING FILM

PELÍCULAS PARA DOSIMETRÍA PERSONAL

Característica del material

Foma PMF es un juego completo de dos películas destinadas para la dosimetría personal de irradiación gama, rtg y electrones:

Foma DF10 es una película altamente sensible esmaltada por ambos lados en azul en una base de polietileno tereftalato.

Foma DF2 es una película de baja sensibilidad (de averías).

Las películas se fabrican en medida de 3 x 4 cm (según ISO 3665). Un embalaje contiene 150 udes. de juegos completos de películas DF10+DF2 empaquetados impermeables a la luz en un embalaje estanco a la humedad.

Las películas se colocan en portas dosímetros. Dependiendo de la forma de procesamiento posibilitan medir los equivalentes de dosificación personal de la irradiación de fotones en intervalos de energía de 15 keV hasta 6 MeV en la gama de 0,1 mSv – 2 Sv.

Iluminación de la cámara oscura

Debido a la alta sensibilidad, es necesario procesar las películas teniendo iluminación indirecta de color rojo (filtros Agfa R1 ó R4), lámpara de 25 W, distancia mínima 75 cm de la película.

Procesado

Para el procesamiento de las películas dosimétricas Foma pueden utilizarse los reveladores radiográficos de polvo Foma DP con el regenerador Foma DP-R y el fijador rápido Fomafix P con regenerador. Entre el revelado y la fijación es conveniente incluir un baño de paro ligeramente acetoso.

El procesamiento de las películas se realiza a una temperatura de 19–21 °C. El tiempo de revelado depende de la concentración del revelador, su temperatura e intensidad del cambio de la solución en los alrededores de la película. Debe establecerse de manera experimental – generalmente oscila entre 5 y 7 minutos.

Ajuste

La película se fabrica en medida de 3x4 cm (según ISO 3665). Un embalaje contiene 150 udes. de paquetes de dos hojas impermeables a la humedad de material de PVC blando.

Almacenamiento

Es necesario conservar las películas a la temperatura máxima de 25 °C y a la humedad relativa de 60 % al máximo, fuera del impacto de la radiación ionizante y de los gases agresivos. Si hay diferencia entre la temperatura de almacenaje y la temperatura de uso de las películas más grande que 15 °C, hay que hacerse templar la película antes de uso a la temperatura de meta por tiempo al menos 3 horas.

Características dosimétricas de las películas y su optimización

La característica dosimétrica básica es la correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación ionizante que, a diferencia de la luz visible, es lineal desde los valores más bajos de la dosis. Para fines de uso de las películas en la dosimetría personal de radiación ionizante es conveniente, en concordancia con las recomendaciones internacionales ICRP 60 y ICRP 75, que el valor más bajo de la dosis que se pueda medir sea aprox. 0,1 mSv. Es posible lograr esto con las películas Foma DF10 por medio de una elección conveniente de las condiciones de revelado de manera experimental de forma que el juego de películas dosimétricas se irradian con el radiador gama (Cs-137 ó Co-60) por kerma en el aire en valores de 0,1 mGy hasta aprox. 40 mGy. Estas películas se revelan conjuntamente con las películas no irradiadas (velo, resp. fondo) en el equipo determinado y por un tiempo diferente (aprox. de 5 a 7 min.).

El tiempo óptimo de revelado se establece de forma que para una película sumamente sensible DF10 corresponda una densidad óptica del fondo (velo) aumentada en 4 σ con el fondo de la kerma en el aire menor a 0,1 mGy (lectura hecha de la curva de calibración para la radiación gama).



En la fig.1 se indica la curva de calibración, es decir la correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación ionizante para las películas DF10 y radiación gama Cs-137 en un procesamiento óptimo realizado en el Servicio Nacional de Dosimetría Personal (CSOD, s.r.o., República Checa).

La dosis más baja a medir es 0,08 mSv ($\pm 30\%$) y desde valores de aprox. 0,2 mSv la

incertidumbre de medición es mejor que $\pm 15\%$, cumpliéndose así con gran reserva con las recomendaciones ICRP 60 y ICRP 75 (incertidumbre -33 % hasta +50 % en el área del límite anual de las dosis). En la fig. 2 se indica la correspondencia correspondiente para la radiación X con la energía 49 keV (aprox. 70 kV + 0,5 mm Cu).

En las fig. 3 y 4 se indican las curvas de calibración para las películas de averías Foma DF2 para la radiación gama, radiación rtg respectivamente, con rendimiento máximo (49 keV), para las condiciones de revelado establecidas para las películas altamente sensibles Foma DF10 como óptimas. De las fig. 1 y 3 se desprende que los márgenes de las dosis de radiación gama son concadenantes entre sí con gran reserva, el campo superior de medida es mayor a 1 Gy. Por medio de la reducción del tiempo de revelado en un 50 % es posible medir con las películas Foma DF2 dosis hasta valores de como mínimo 2 Gy, desde luego que se aumenta el límite inferior de las dosis a medir.

Por la influencia de la dependencia energética de las películas Foma que para las películas Foma se indica en la fig. 5. Para la radiación X con energía de 49 keV (aprox. 70 kV + 0,5 mm Cu) la sensibilidad de la película DF10 es aprox. 17 veces mayor. Esto es evidente también de la comparación en las fig. 1 y 2 (fig. 3 y 4 respectivamente). Por estas razones es absolutamente necesario realizar en la dosimetría de películas la compensación de la dependencia energética por medio de algunos de los métodos publicados. El método de análisis de filtración arroja muy buenos resultados en todo el campo energético de 15 keV – 6 MeV, como se indica en la fig. 5.

Fading, es decir la mengua de densidad óptica con el tiempo luego de las radiaciones, en las películas Foma DF10 no supera el 10% durante 3 meses en condiciones de temperatura exterior no superior a 30 °C y la humedad relativa no supera el 60 %. La compensación del fading puede ser realizada por medio del tiempo convenientemente seleccionado de radiación de las películas de calibración.

Todas las curvas de calibración y el transcurso de la dependencia energética (Figuras de 1 a 5) han sido medidas en el Servicio Nacional de Dosimetría Personal (CSOD s.r.o., República Checa) bajo condiciones óptimas del tratamiento.

Las mencionadas curvas de calibración sirven para la orientación básica sobre el transcurso de la dependencia de la densidad óptica en la dosis de radiación y sobre el rango de la utilidad práctica de las películas. Dado que los valores resultantes pueden verse afectados por la manera del tratamiento de las películas y por la técnica de medición de las densidades ópticas, recomendamos comprobar la calibración bajo las correspondientes condiciones al uso práctico de las películas.

Nota: La clasificación según la norma anterior ISO 1757:1996 es "ISO 1757-3-W-2" (la norma fue anulada el día 10/5/2011)



UNSAM

UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Fig. 1 Correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación gama para la película FOMA DF10

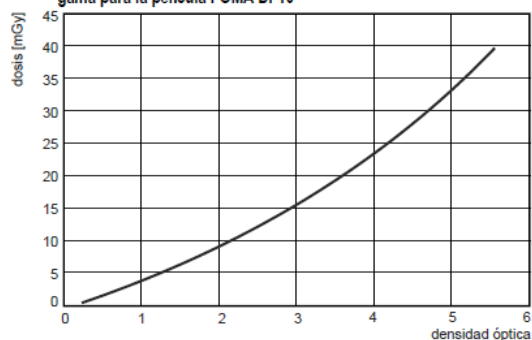


Fig. 2. Correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación X (49 keV) para la película FOMA DF10

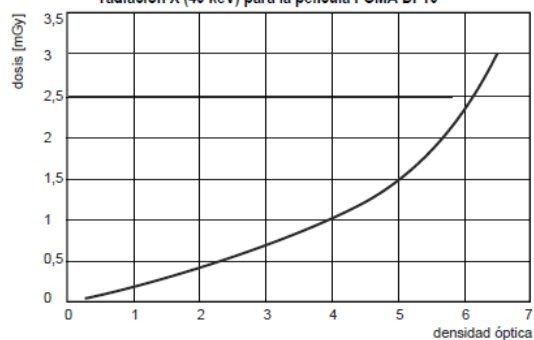


Fig. 3 Correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación gama para la película FOMA DF2

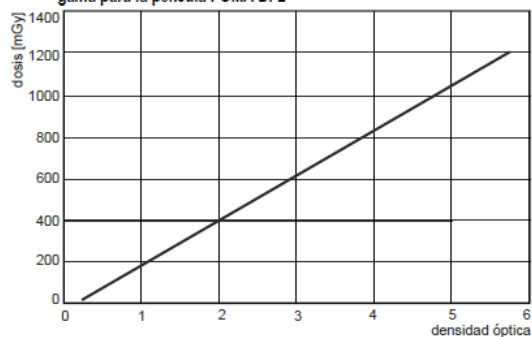
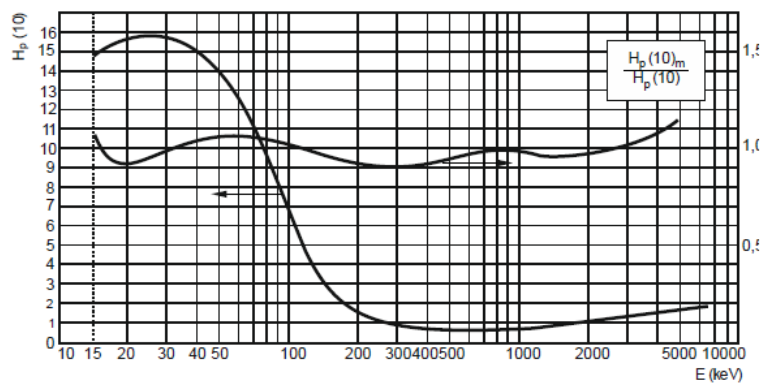


Fig. 4 Correspondencia de la densidad óptica con la dosis de radiación X (49 keV) para la película FOMA DF2



Fig. 5 Dependencia energética de las películas FOMA DF10 y resultados de su compensación por medio del método de análisis de filtración (medición realizada en el Servicio Nacional de Dosimetría de la Commonwealth of Independent States Personal).



El producto es fabricado e introducido al mercado de acuerdo al sistema de calidad según la norma internacional EN ISO 9001 (EZÚ Praga)

FOMA
BOHEMIA spol. s r.o.

500 02 Hradec Králové
República Checa

tel.: +420 495 733 210
fax: +420 495 733 376

foma@foma.cz
www.foma.eu

FOMA 08/17



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Panasonic

UD-800 series

Composite Type TL Badge

This composite type dosimeter with a maximum of 4 elements can be read by ALL Panasonic TLD Readers.

Many types of TL Badges are available to measure various radiation exposures (γ rays, x-rays, Beta-rays and neutron rays) through suitable combinations of phosphors and filtrations. This small, very reliable dosimeter is designed not only for superior characteristics as a dosimeter but also to include other desirable properties, such as ease of handling, cleanliness, resistance to mechanical impact, etc.

In the detection part, a specially developed phosphor $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ and a highly sensitive phosphor $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, both formed to a thin element, are used. They are especially engineered for optical heating.



$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ has a radiation response characteristic which is very close to that of human tissue, and responds precisely to X rays and γ rays over a wide range of energies. Furthermore, because the element is very thin, the skin dose can be measured.

$\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ on the other hand has very high sensitivity and very small doses can be detected with this phosphor. Also low-energy X rays and γ rays can be detected separately by utilizing the energy characteristics of the phosphor.

Elements are encased in a holder. The ID number is coded by punched holes, and they are read automatically by the reader. A hanger with clip is used for wearing.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

FEATURES

UD-800 series

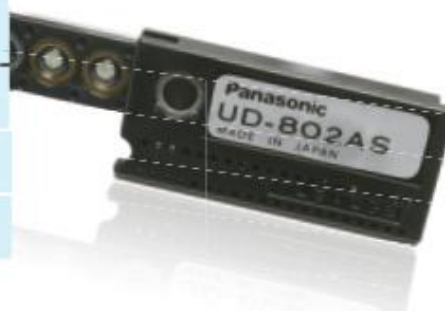
- Tissue equivalent lithium borate phosphor ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$) delivers a flat energy response over a low-to-high energy range.
- Enriched lithium borate phosphors (^7Li / ^6Li) are available for neutron dosimetry.
- Highly sensitive calcium sulphate phosphor ($\text{CaSO}_4\text{:Tm}$) allows precise measurement of low doses.
- Filtration: Thin plastic window or thick plastic window or metal shields (Al, Pb, Cd and Sn can be mounted on the holder depending on badge application.
- Energy dependence is low and sensitivity is high.
- Skin doses can be measured.
- ID codes of upto 7 digits can be punched .
- A locking mechanism prevents accidental contamination of the badge detection portion
- Small and lightweight



SPECS

UD-800 series

Type	Composite type up to 4 elements
Number code	Punched holes, 7 digits
Phosphors	$^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ $^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ $^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ $\text{CaSO}_4\text{:Tm}$
Measurable Radiation Types	X rays, γ rays; 10KeV ~10MeV Skin dose Neutron dose
Measurement Range	1mR ~1000R (X · Y) (10 μSv - 10Sv)
Spurious Signal	Undetectably small
Dimensions and Weight	49 x 23 x 6 mm approx. 5g



Panasonic Industrial Europe GmbH (UK)
Attention Radiation Measurement Group
Willoughby Road, Bracknell
Berkshire RG12 6FP,
Great Britain
Tel: +44 1344-853-322

Panasonic Industrial Company
Division of Panasonic Corporation of North America
Attention Radiation Measurement Group
2 Panasonic Way # 7E6
Secaucus NJ 07094
USA
Tel: +1 201-348-5339

Panasonic Communications Kyushu Co., Ltd.
Attention Radiation Measurement Group
2111 Ueda Usa
Oita 879-0493
Japan
Tel: +81 978-37-3151

Anexo 3



Anuncio de la Intercomparación de REPROLAM 2022 para Servicios de Dosimetría Externa de Cuerpo Entero

La Red de Optimización de Protección Radiológica Ocupacional de Latinoamérica y Caribe (REPROLAM), con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), pretende establecer un programa de intercomparaciones para los diferentes servicios técnicos de apoyo a la protección radiológica, cuya finalidad es contribuir a mejorar el desempeño técnico de los servicios de dosimetría personal y la armonización de protocolos de los mismos en la región. El programa de intercomparaciones comprenderá los servicios de dosimetría externa e interna y las técnicas de dosimetría computacional y dosimetría retrospectiva biológica y física. Estas intercomparaciones estarán abiertas a la participación de instituciones públicas y privadas.

En esta ocasión REPROLAM se complace en anunciar el **Ejercicio de Intercomparación para Servicios de Dosimetría Externa 2022 (ICReprolam2022)**. El mismo será realizado esta vez con el apoyo del Laboratorio de Metrología de las Radiaciones Ionizantes Departamento de Energía nuclear-UFPE de Universidad Federal de Pernambuco (LMRI-DEN/UFPE) de Brasil y del proyecto de cooperación técnica del OIEA RLA 9091.

Alcance:

Esta intercomparación es para dosímetros de cuerpo entero utilizados para la evaluación de Hp(10) y/o Hp(0,07). Las irradiaciones, con fotones, se llevarán a cabo en el Laboratorio de Metrología de las Radiaciones Ionizantes-LMRI-DEN/UFPE, Brasil, en los siguientes rangos:

- Energía: 30 keV a 1,3 MeV con posibilidad de haces mezclados;
- Dosis equivalente: 0,2 mSv a 50 mSv
- Ángulo de incidencia: 0° y ± 60°



REPROLAM Grupo Organizador

Daniel Molina	CPHR- Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Cuba
Denison Souza-Santos	Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Divisão de Dosimetria- IRD/CNEN, Brasil.
Helen Khoury	Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
Juan Carlos Mora Canadas	Ciemat, España Oficial Técnico, OIEA
Leslie Vironneau	Sección Vigilancia Radiológica Individual Comisión Chilena de Energía Nuclear, Chile
Patricia Mora	Coordinadora del área de Dosimetría Externa de REPROLAM, Costa Rica

Laboratorio Coordinador:

Laboratorio de Metrología das Radiaciones Ionizantes- LMRI-DEN/UFPE, Brasil
Responsable del laboratorio Helen Khoury



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Intercomparación de dosímetros de cuerpo entero (ICReprolam 2022)

Informe de Resultados

Código de Institución P-005

Tipo de Dosímetro : TLD

Calidades de radiación y energía media de los fotones (según ISO 4037-1):

Radiación gamma: S-Cs: 662 keV

Rayos X: W-80:56,5 keV; N-150: 118 keV

Código dosímetro	Calidad de radiación	Angulo de radiación	Magnitud	Valor de referencia (mSv)	Valor participante (mSv)	Relación R*
479608 - 01	S-Cs 137	0°	Hp(10)	3,0	3,4	1,13
			Hp(0,07)	3,0	3,4	1,13
479607 - 02	S-Cs 137	0°	Hp(10)	3,0	3,5	1,17
			Hp(0,07)	3,0	3,7	1,23
479606 - 03	S-Cs 137	0°	Hp(10)	3,0	3,4	1,13
			Hp(0,07)	3,0	3,6	1,20
479605- 04	S-Cs 137	0°	Hp(10)	3,0	3,2	1,07
			Hp(0,07)	3,0	3,4	1,13
479604 - 05	S-Cs 137	0°	Hp(10)	4,5	4,8	1,07
			Hp(0,07)	4,5	4,9	1,09
641608 - 06	S-Cs 137	0°	Hp(10)	4,5	4,8	1,07
			Hp(0,07)	4,5	4,9	1,09

641610 - 07	S-Cs 137	0°	Hp(10)	9,0	6,4	0,71
			Hp(0,07)	9,0	6,4	0,71
641609 - 08	S-Cs 137	0°	Hp(10)	9,0	5,5	0,61
			Hp(0,07)	9,0	5,5	0,61
641656 - 09	N-150	0°	Hp(10)	5,4	4,4	0,81
			Hp(0,07)	5,02	5,1	1,02
641655 - 10	N-150	0°	Hp(10)	5,4	3,9	0,72
			Hp(0,07)	5,02	5,3	1,06
641657 - 11	N-150	60°	Hp(10)	5,41	5,2	0,96
			Hp(0,07)	5,45	5,2	0,95
641665 - 12	N-150	60°	Hp(10)	5,40	5,20	0,96
			Hp(0,07)	5,44	5,2	0,96
641666 - 13	N-150	0°	Hp(10)	20,58	17,0	0,83
			Hp(0,07)	19,15	15,7	0,82
641613 - 14	N-150	0°	Hp(10)	20,66	18,9	0,91
			Hp(0,07)	19,21	17,4	0,92
479648 - 15	W-80	0°	Hp(10)	10,83	11,0	1,02
			Hp(0,07)	10,04	10,2	1,02
641662 - 16	W-80	0°	Hp(10)	10,81	8,8	0,81
			Hp(0,07)	10,01	8,1	0,81
641658 - 17	W-80	60°	Hp(10)	10,84	11,8	1,09
			Hp(0,07)	11,70	10,9	0,93
641602 - 18	W-80	60°	Hp(10)	10,81	10,7	0,99

			Hp(0,07)	11,67	9,8	0,84
641605 - 19	S-Cs-137 e W-80	0°	Hp(10)	4,95	4,80	0,97
			Hp(0,07)	4,74	4,80	1,01
641603-20	S-Cs-137 e W-80	0°	Hp(10)	4,94	4,8	0,97
			Hp(0,07)	4,73	4,8	1,01

* R- Relación entre Hp (part.)/Hp(ref)

ID Dosímetros No Irradiados

21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

CONDICIONES DE IRRADIACION

Los dosímetros fueron irradiados en el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Departamento de Energía Nuclear de la UFPE, Recife, Brasil

Los valores de K_{aire} de referencia fueron obtenidos utilizando una cámara de ionización patrón PTW W -32002 , N/S 550 y el electrómetro PTW UNIDOS N/S 10009-90284. La cámara fue calibrada en el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), certificado PTB 60018-15 para haz de rayos-x calidad ISO-N 150. Para el haz de S-Cs 137 y rayos-x W-80 fue calibrada en el LNMRI-IRD/CNEN (Laboratorio Nacional de Metrología de Las Radiaciones Ionizantes de la Comisión Nacional de Energía Nuclear) con los certificados LNMRI- 1375/2018 y LNMRI-1444/2018. Las condiciones de irradiación están de acuerdo con la ISO 4037/1-2-3 e IEC 62387

Para la irradiación en Hp(10), los dosímetros fueron colocados sobre el simulador de PMMA con 30 x 30 x 15cm³ lleno de agua (ISO wáter Slab Phantom) . En la irradiación con haz de S-Cs-137 se colocó una placa de PMMA de 30x30 cm² y 3mm de espesor a frente a los dosímetros para asegurar el equilibrio electrónico, conformelo establecido en la ISO 4037-3:2019(E). Para la irradiación en ángulos de incidencia distintos de cero grados (0°), el Fantoma fue colocado sobre una base giratoria que permitía girar en diferentes ángulos alrededor del eje z.

La distancia de la fuente hasta el dosímetro varió de 100 a 300 cm dependiendo de la tasa de kerma en aire necesario.

Las tasas de kerma en aire utilizadas son:

S-Cs-137- 11,87 mGy/h a 150 cm

ISO N 150- 58,34 mGy/h a 150 cm

ISO W-80 – 49,84 mGy/h a 250 cm

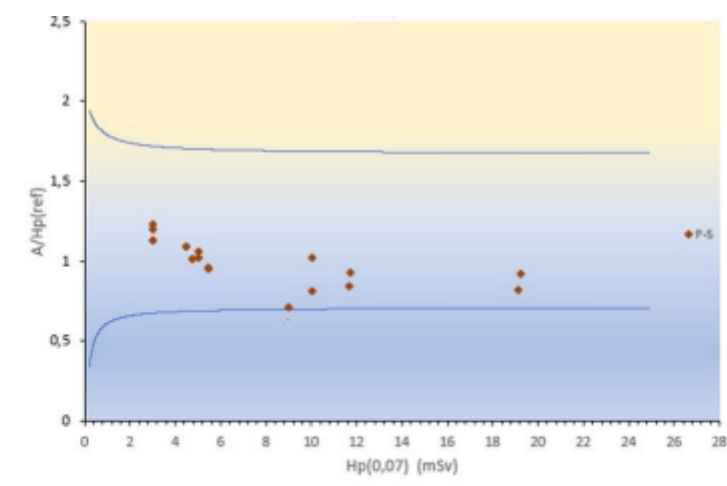


Figura 2- Curva Trompeta con los resultados de los valores de $H_p(0,07)$ para los dosímetros sometidos a las pruebas

La Tabla 1 presenta los valores de promedio, mediana, mínimo, máximo y coeficiente de variación en la relación R para mediciones de **$H_p(10)$** en función de la calidad del haz y del ángulo de irradiación.

Tabla 1- Valores para los resultados de R de $H_p(10)$ para diferentes calidades de energía del haz.

Calidad del Haz	Numero de dosímetros	Mediana (R)	Promedio (R)	Máximo (R)	Mínimo (R)	Coeficiente de variación(R)
S-Cs	7	1,07	0,995	1,17	0,61	21%
N-150 0°	4	0,81	0,82	0,91	0,72	10%
N-150 60°	2	0,96	0,96	0,96	0,96	0%
W-80 0°	2	0,915	0,915	1,02	0,81	16%
S-Cs/W60/0°	2	0,97	0,97	0,97	0,97	0%

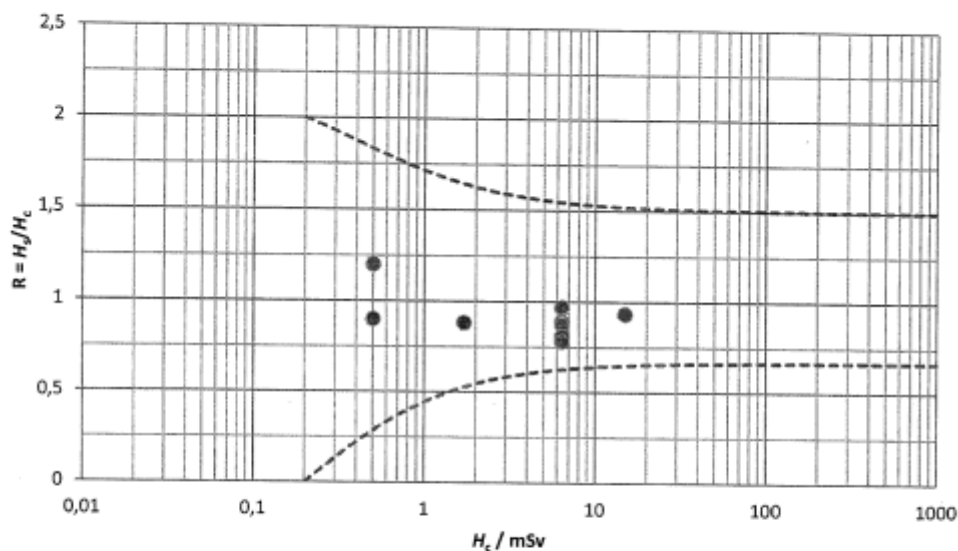
ANEXO 4

 ARN Autoridad Reguladora Nuclear PRESENCIA DE LA NACIÓN		CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN CÓDIGO F-DF-02 REVISIÓN 00 VIGENCIA 16/01/2020	IDENTIFICACIÓN CPARN22-15
Ejercicio			
Título	Comparación interlaboratorio nacional ARN 2022 de dosímetros personales de cuerpo entero para fotones		
Participante			
Código de identificación	P09		
Institución	FUNDACIÓN ESCUELA DE MEDICINA NUCLEAR		
Sector	LABORATORIO DE DOSIMETRÍA PERSONAL		
Dirección postal	GARIBALDI 405 CIUDAD MENDOZA		
Sistema			
Código de identificación	S15		
Nombre	Dosimetría por FILM		
Tipo de detector	FILM		
Material de todos los detectores contenidos en el dosímetro o denominación comercial	FILM		
Marca y modelo o descripción de las características físicas.	FOMA FILM		
Marca y modelo equipo de lectura	No aplica		



UNSAM
 UNIVERSIDAD
 NACIONAL DE
 SAN MARTÍN

Resultados P09 - S15



Evaluación del desempeño

Satisfactorio

El 100% de las determinaciones se encuentran dentro del rango de aceptación establecido en el protocolo

	Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma			
Aclaración	Claudio Renzi	Ignacio Menchaca	Adrián Vilella
Función	Dosimetría Física	Dosimetría Física	Dosimetría Física
Fecha	18/01/2023	18/01/2023	18/01/2023

Fin del documento



ANEXO 5 REFERENCIAS

1. HPS N13.11-1993 Personal Dosimetry Performance – Criteria for Testing.
2. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Characteristics of the radiations and methods for their production, ISO 4037-1. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO);1996.
3. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP 103-2007.
4. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1993. OCFR Part 20, Standards for Protection Against Radiation.
5. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations, ICRU Report 47. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1992.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN