

Dosímetros personales para radioprotección: desde el papel fotográfico hasta CMOS

Franco Toscano¹

María José González², Franco Simini³

¹UDELAR-FING, ²⁻³UDELAR-FING-NIB

Abstract—Se presentan los principales métodos de dosimetría partiendo desde los más primitivos hasta los más sofisticados, mostrando sus principios de funcionamiento y sus principales ventajas y desventajas. Se menciona el avance en la actualidad, en la tecnología p-MOSFET concluyendo con interrogantes sobre el alcance del uso de los dosímetros a nivel masivo (eventualmente incorporados en los celulares).

Palabras claves— Dosímetros de cámara de ionización, Dosímetros de luminiscencia óptica simulada, Dosímetros de p-MOSFETS Dosímetros de termoluminiscencia, Dosímetros personales, Fotografía de emulsiones nucleares, Historia de la radiación, OSDL, Radio protección, RADFETs, TDL.

I. INTRODUCCIÓN

La motivación fundamental de medir radiaciones absorbidas por personas expuestas a las mismas, es el impacto negativo que tienen en los organismos vivos, como por ejemplo quemaduras, y enfermedades autoinmunes (cáncer), y problemas hereditarios.

En 1928, se crea la “International Commission on Radiological Protection” (ICRP) organismo que se encarga hasta el día de hoy, de establecer las normas y principios de seguridad con todo lo vinculado a las radiaciones ionizantes. La ICRP establece las dosis máximas permitidas y las protocolos en los usos de los dosímetros, y luego en función de las políticas de cada país se crean legislaciones.[1]

En una primera instancia se definen algunos conceptos básicos para mejorar el entendimiento del texto.

A) Radiación electromagnética ionizante

La radiación electromagnética ionizante corresponde a todo tipo de radiación (onda o partícula) con la energía suficiente para generar carga positiva o negativa (ionizar) en las moléculas de la materia, con la que interactúa. En el espectro electromagnético se caracterizan por tener frecuencias mayores a 30×10^{15} Hz, longitudes de onda menores a 10 nm, y energías mayores a 124 eV. [2]

B) Tipos de radiación electromagnética ionizante

Las radiaciones ionizantes pueden ser de origen natural como por ejemplo los rayos cósmicos, pero también puede ser de origen artificial como la generación de rayos x en una radiografía.

Otra clasificación posible es por el tipo de partícula de cada radiación:

1. Alpha: 2 protones + 2 neutrones
2. Beta: un electrón o un positrón
3. fotones (rayos gama y rayos x)
4. neutrinos

Las radiaciones alpha y la mayoría de las radiaciones beta no comprenden un riesgo grave cuando se irradian de afuera hacia dentro del organismo ya que difícilmente logran penetrar las primeras capas de piel del ser humano. Sí, son de alto riesgo, si por algún motivo se irradian dentro del organismo (ingesta, inhalación, inyección de radiofármacos). Por otro lado, los fotones y neutrinos son altamente penetrantes siendo de alto riesgo ya sea desde afuera o desde adentro del organismo. Por este motivo la gran mayoría de los dosímetros están fundamentalmente desarrollados para los fotones y neutrinos.

C) Unidades y magnitudes de medida

Definimos algunas unidades y magnitudes básicas de radiación:

1. El roentgen (R) es una unidad de medida de la exposición radioactiva. La exposición radioactiva se define como la carga eléctrica generada por la ionización de la radiación, sobre una masa de aire dada.

$$1R = 0,000258 C/Kg$$

2. Dosis absorbida: es la cantidad de energía que deposita la radiación por unidad de masa irradiada. Se mide en grays ($Gy = J/Kg$)
3. Dosis equivalente: es la cantidad de radiación absorbida ponderada por un factor (w_R) correspondiente al tipo de radiación, se mide en sievert (Sv):

$$H_T = \sum w_R \cdot (DosisAbsorb) \quad (1)$$

4. Dosis efectiva (E_T): es la cantidad de dosis equivalente ponderada por un factor que hace referencia a la radiosensibilidad del órgano que fue radiado. Se mide en Sv.

$$E_T = \sum w_R \cdot w_T \cdot (DosisAbsorb) = H_T w_T \quad (2)$$

Para fijar ideas la dosis de una placa dental tiene una radiación absorbida del orden de 0.1mSv, siendo un 4% de la dosis anual establecida por el ministerio de salud pública de la República Oriental del Uruguay.

D) Primeras mediciones e instrumentos de medida de radiaciones.

Las primeras mediciones de radiación fueron efectuadas en los inicios del 1900. En ese momento, se utilizó papel fotográfico común y corriente (creado y comercializado a partir de 1850) como primer método de medición de presencia de radiaciones. Dado su alto costo, se optó en la comunidad científica, el uso de electroscopios de hojas de oro y cámaras de ionización. Los electroscopios (creados en el 1600 aproximadamente) eran instrumentos de medición de cargas, que dada su antigüedad estaban ya con un nivel de sensibilidad, precisión y popularidad considerables para la época. El electroscopio solo permitía medir la presencia de radiaciones alpha, mientras que las demás radiaciones debido a su menor poder de ionización, eran difíciles de detectar con dicho instrumento. Este problema fue resuelto con el uso de las cámaras de ionización (inventadas en el inicio del 1900), que consisten en un gas encerrado entre dos electrodos con una diferencia de potencial. Dicho gas al ser ionizado por las radiaciones genera pares de iones, que a su vez permiten el pasaje de una corriente la cual es medida por galvanómetros.[3]

II. DOSÍMETROS

A) Fotografía de emulsiones nucleares

Como se mencionó antes, parte de las primeras detecciones e investigaciones de las radiaciones ionizantes fueron realizadas utilizando papel fotográfico, el cual estaba diseñado en su gran mayoría para ser sensible a la luz visible, y no propiamente a las frecuencias de onda electromagnética de las radiaciones ionizantes. Por lo que, en una primera etapa, las cantidades de rayos ionizantes necesarios para poder generar la reacción en el papel fotográfico eran sumamente altas generando aumentando el riesgo de daños biológicos. En la década de 1930 se crea la emulsión nuclear fotográfica o emulsión nuclear. Esta consiste en compuestos en alterar la emulsión con otros químicos especiales con mayor sensibilidad a las frecuencias de las radiaciones ionizantes. Gracias a la emulsión nuclear en 1942, se crean los primeros dosímetros personales que consistían en pequeñas placas de film con emulsión nuclear y filtros de calibración, para controlar la reacción rayo-emulsión. Al final del tiempo de exposición preestablecido para la situación particular se revelaban y en función del revelado y conociendo a priori el tipo de fuente de radiación se estimaba la cantidad de radiación que había recibido el operario en función de la imagen obtenida. La conjunción filtro-emulsión no tenían una perfecta capacidad de distinguir entre distintos tipos de radiación una vez fabrica-

dos, es decir se medía una aproximación de la dosis equivalente. Dependiendo del lugar de la posición del dosímetro se medían distintos niveles de radiación, por lo que se crearon varios accesorios para contener al film como por ejemplo anillos, prendedores, brazaletes, etc, para adecuar mejor las mediciones. Por otro lado, tampoco permitían una lectura en tiempo real, dado que era necesario primero tener un tiempo de exposición (del orden de días) y una vez utilizado el film, revelarlo, es decir que si el operario se exponía por algún motivo a un exceso de radiación no se obtenía la información del suceso hasta días después. El sistema de medición tenía en su momento una exactitud del 20% en los mejores casos siendo a su vez sensibles a la temperatura y humedad del ambiente. En el presente este tipo de dosímetros está prácticamente en desuso .[4][5]

B) Dosímetros de bolsillo de cámara de ionización de lectura directa e indirecta

Son dispositivos creados poco antes del 1939, que miden la exposición radioactiva (en roentgen). Esencialmente existen dos tipos de dispositivos similares, el de lectura indirecta y el de lectura directa.

El dosímetro de lectura indirecta consiste básicamente en una cámara de ionización, la cual en esencia es un condensador con un gas encerrado de dieléctrico. El dispositivo se carga previamente a su uso, y a medida que recibe radiación el gas dieléctrico se ioniza generando conducción entre las placas cargadas, provocando la descarga del capacitor de manera paulatina. Al final de la exposición de radiación es necesario conectarlo para poder medir la carga final del dispositivo con lo cual se calcula la radiación absorbida. Por otro lado, el dispositivo de lectura directa consiste esencialmente en un electroscopio de fibras de cuarzo, el cual se carga previamente al uso, generando el distanciamiento de las fibras (por tener cargas iguales). Dichas fibras están inmersas en una pequeña cámara, de paredes de material conductor, con un gas. El gas, al recibir las ondas de radiación se ioniza generando una conducción entre las fibras y las paredes de la cámara y de esa manera, mientras se reciba radiación las fibras se descargan moviéndose lentamente a su posición de equilibrio sin carga. Para leer la marcación el dispositivo tiene lupas en un lado del cilindro donde se puede observar la fibra detrás de una escala que permite la medición en tiempo real sin necesidad de ningún otro dispositivo. Estos dispositivos fueron los primeros dosímetros personales de lectura en tiempo real.

Ambos dispositivos (de lectura directa e indirecta) tenían el gran inconveniente de la necesidad de la carga, los primeros modelos al sufrir movimientos bruscos generaban contactos entre las partes conductoras y se descargaban ipso facto, perdiendo la medida. Otro problema era que tenían un rango dinámico muy acotado (hasta 1950 la gran mayoría no superaba los 200 mR) y solo medían radiaciones gamma, rayos x, beta de 1Mev y posteriormente se crearon algunos capaces de medir radiación de neutrinos (las alfas no eran posibles de medir con este sistema por su falta de poder de penetración). Estos

dispositivos se llaman vulgarmente “pocket dosimeters” o “pen dosimeters” dado que su aspecto y tamaño es el de un bolígrafo y se mide la exposición de radioactividad dejando al dispositivo en el bolsillo del usuario.[6]

Comparación entre dosímetros de bolsillo de lectura directa e indirecta:

TABLA 1 COMPARACIÓN ENTRE DOSÍMETROS DE BOLSILLOS DE LECTURA INDIRECTA Y DIRECTA¹

Lectura indirecta	Lectura directa
No permiten tomar acciones en el momento	Permiten tomar acciones en el momento (esencial para uso militar)
Si precisan de otro dispositivo para obtener la medida	No precisan otros dispositivos para obtener la medida
Medición más confiable	Medición menos confiable

C) Dosímetros Termoluminiscentes (TLD) y de luminiscencia óptica simulada (OSLD)

1) Dosímetros termoluminiscentes (TLD)

El fenómeno de termoluminiscencia, se da en determinados cristales que tiene la capacidad de absorber radiaciones de alta energía de manera tal, que se almacena la energía cambiando los niveles de excitación de los electrones. Provocando que dicha energía queda “atrapada” en el cristal (en inglés se utilizan las expresiones “trap state” para cuando se tiene energía absorbida en los estados de los electrones y “ground state” para cuando no hay energía absorbida). Si el cristal con radiación absorbida, recibe calor, reacciona liberando la energía almacenada en forma de fotones, o sea luz.

El dosímetro (patentado en 1973) es un cristal con propiedades termoluminiscentes (generalmente compuestos por LiF o CaF₂ dopados con Mg y Ti) con filtros para regular la exposición y el tipo de radiación. Se introduce en algún contenedor de plástico (anillo, prendedores, etc). Una vez finalizada la exposición a la radiación, se introduce el cristal en un dispositivo que calienta el cristal, en su mayoría utilizando nitrógeno en estado gaseoso (en el entorno de los 250 °C), y en forma simultánea se mide la luz emitida por el cristal. De esa manera se puede calcular la radiación absorbida. El “lector” también cumple la función de restablecer el cristal a su estado inicial. [7][8]

2) Dosímetro de luminiscencia óptica simulada (OSLD)

Los cristales en los dosímetros de OSLD (patente de 1998) son generalmente óxido de aluminio dopado con carbono (Al₂O₃:C) o similares, los cuales son capaces de absorber y almacenar la energía de radiaciones específicas. La diferencia con respecto a los cristales termoluminiscentes es que para su

lectura se utiliza un haz de luz de determinada longitud de onda, respondiendo el cristal con otro haz de luz con una longitud de onda distinta.

Esta forma de medir evita las altas temperaturas en los TLD permitiendo además de un ahorro de energía la capacidad de no perder el registro en el dosímetro. Es decir que el OSLD tiene la capacidad de ser leído varias veces sin perder la información de la radiación acumulada (por cada lectura se altera la medición con un 0.05%), permitiendo utilizar el mismo dosímetro como registro de acumulación de radiación a lo largo de tiempos prolongados. En caso de querer “borrar” la información se calienta al igual que los TLD y se lleva a un “ground-state” todo el cristal. Como última ventaja frente a los TLD es que los OSLD pueden generar imágenes.[9][8][10][11]

3) Comparación entre OSLD y TLD.

Ambos sistemas son robustos frente a la temperatura y humedad, dependiendo del radioisótopo son capaces de distinguir entre distintos tipos de radiaciones. Tienen altos niveles de sensibilidad (el umbral de sensibilidad mínimo es de aproximadamente 5 – 10 µGy, que equivale a 5 - 10 µSv para radiaciones gamma y rayos x, estando muy por debajo de los 100 µGy solicitados por los estándares internacionales). Tienen la capacidad de almacenar la información de la energía absorbida por largo periodos de tiempo y pueden ser reutilizados (se considera que se puede utilizar al menos 2000 veces sin notar cambios en su sensibilidad). La gran desventaja es la presencia de un nivel de saturación, de 1 Gy aproximadamente. Es decir que el cristal al llegar a dicha energía absorbida es incapaz de seguir absorbiendo.

Una ventaja de los OSLD frente a los TLD, es que los TLD deben ser lo más pequeños posibles por facilitar su etapa de calentamientos mientras que los OSLD pueden permitirse tener tamaños mayores. Esto permite que los OSLD tengan placas de cristal mayores y generar una imagen que permita explicitar la distribución de las radiaciones en el área del cristal.

El sistema OSLD tiene por el momento mejores prestaciones que el TLD, dado que puede ser releído varias veces sin alterar la medida, pueden tener cristales más grandes y generar imágenes y consumen menos energía en su lectura.

D) Dosímetros con electrónica de semiconductores MOSFETs, RADFETs, DIS.

El principio físico consiste en la interacción “creación de pares”, que consiste en el impacto de un rayo ionizante sobre un núcleo, esto genera un par de partículas, un electrón y un positrón.

En los transistores MOSFETs, el aislante entre el gate y el sustrato es óxido de silicio (SiO₂), el cual al sufrir radiaciones

¹ Información extraída de [6]

ionizantes interactúa creando pares, lo que termina provocando una concentración de iones de hidrógeno en la interface óxido de silicio/substrato, alterando el voltaje umbral V_T característico.[12][13] Dicha concentración de iones se mantiene por mucho tiempo (meses-años). Dado que el efecto de la radiación es siempre la concentración de iones de hidrógeno en la interfaz, dependiendo del tipo de substrato será el efecto que genere. En los N-MOSFETs la radiación disminuye el V_T teniendo como caso límite los terminales Source y Drain en permanencia de cortocircuito. En cambio, para el caso del P-MOSFET se genera el efecto inverso siendo el caso límite Source y Drain permanecía de circuito abierto independientemente del voltaje del gate. Por cómo se distribuyen las cargas, los P-MOSFET son más sensibles que los N-MOSFETs frente a la radiación. [9]

Al descubrirse y entenderse dicho fenómeno en la década de 1970 el mundo de los transistores se abrió en dos, en los que sí querían usar el efecto de radiación y en los que querían evitarlo. De ahí nace el concepto de RADFET, que simplemente son transistores FET optimizados en su sensibilidad a la radiación (alterando los compuestos en su composición química, los espesores de las capas, etc). La ingeniería hacia el RADFET encareció los dispositivos de dicha línea ya que la producción de transistores especiales no era tan masiva como los convencionales. De todas maneras, la mayoría de los transistores en el mercado de tipo P-MOSFET tienen una considerable sensibilidad a la radiación ionizante. En los estudios de los últimos años han llegado obtener resultados notables en la utilización de transistores “ordinarios” presentes en el mercado tal como se muestra en los trabajos: [14][15][16]. Uno de los estudios más prometedores se basa en los transistores que vienen en sensores de imágenes convencionales, con la adaptación del dispositivo para poder utilizarlo sensor de radiación gamma.[17]

Las grandes ventajas de los sistemas MOSFET son la lectura no destructiva de la información acumulada, pequeño tamaño de los dispositivos (del orden de 1mm^2 , permitiendo mediciones in vivo entre otras), capacidad de estar absorbiendo(midiendo) radiación permanentemente, bajos niveles de consumo de energía, compatibilidad con microprocesadores, capacidad de comunicación por RF de manera sencilla con otros dispositivos, precios competitivos, y actualmente se encontraron formas de reutilizarlos (sometiéndolos a altas temperaturas o corrientes de formas particulares, que borran la información acumulada).

Las desventajas de estos sistemas son fundamentalmente la necesidad de una calibración previa dependiendo del campo de radiación dado que tienen cierta sensibilidad a los ángulos de incidencia y dependiendo de donde y cómo se coloque, y la relativa baja resolución de aproximadamente 1cGy (RADFET). [9][15]

Los DIS (direct ion storage) son una combinación de la cámara de ionización y los FG MOSFET (floating gate mosfet) siendo en conjunto un sistema más sofisticado y más costoso que obtiene las mismas prestaciones que los RADFET pero con una sensibilidad mucho mayor (del orden de los

$10\mu\text{Sv}$)[9]

III. 3 CONCLUSIONES

Gracias a los avances en otros campos, como la nano-electrónica, y fundamentalmente a la interdisciplina entre ingenieros, físicos, médicos, químicos, etc se pudo pasar de la emulsión fotográfica, del tamaño de la palma de una mano, que hacía muy dudoso el costo beneficio (vida o enfermedad) en algunas situaciones, al concepto de RADFET que en el tamaño de la cabeza de un alfiler permite casi a ciencia cierta definir si el costo beneficio vale la pena en tiempo real.

Hoy en día se plantea el uso de dispositivos p-MOSFET para los pacientes médicos que estén sometidos a alguna intervención con radiaciones ionizantes dado el bajo costo, la practicidad, la precisión, y la simpleza del sistema de medición. Esto permite tener en la historia clínica del paciente la radiación absorbida en situaciones médicas como un dato más.

El campo de investigación de los dosímetros de radiación es muy nuevo, teniendo todo el potencial para las nuevas tecnologías, tal como se plantea en el trabajo de D.Magalotti [17] donde se utiliza un sensor fotográfico y un sistema de conexión remota para obtener un dosímetro de buena exactitud, de lectura en tiempo real y capacidad de enviar datos a otro dispositivos. Esto hace surgir las siguientes interrogantes: ¿Sería posible que la mayoría de nosotros tuviéramos un dosímetro en el celular? (por ejemplo, utilizando la propia cámara de fotos con un planteo similar al de D.Magalotti) ¿Seríamos capaces de observar el movimiento de las concentraciones de las radiaciones en el mundo dada la conectividad masiva actual? ¿Podríamos ser todos observadores como medidores de los focos de concentración de energía ionizante concentrada en Japón y ver hacia qué países se mueve o no? ¿Podríamos ser capaces de medir las cercanías de las centrales nucleares, o centros de desperdicios nucleares, etc, de manera pública? ¿Podrían mejorarse los estudios de causa de cáncer por radiación, o poder descartarlo como causa en determinados pacientes? ¿Podrían estas ideas democratizar la información sobre el uso de las radiaciones y generar un control y consciencia más exigente por causa de la exposición pública explícita de la información?

IV. 4 REFERENCIAS

- [1] “ICRP.” [Online]. Available: <http://www.icrp.org/index.asp>. [Accessed: 14-Jun-2017].
- [2] ICRP and ICRP, IRCP Publication 99. Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. Elsevier, 2005.
- [3] F. N. Flakus, “Radiation detection Detecting and measuring ionizing radiation - a short history,” *IEAE Bull.*, vol. 23, no. 4, pp. 31–36, 1981.
- [4] T. Use, F. Badges, and P. Monitoring, “The Use of Film Badges for Personnel Monitoring,” no. 8, 1962.
- [5] “NYC Dept. of Hospitals Film Badge.” [Online].

Available:

http://www.orau.org/ptp/collection/dosimeters/NYC_Film_Badge.html. [Accessed: 16-Jun-2017].

[6] “General Information About Pocket Chambers and Pocket Dosimeters.” [Online]. Available: <https://www.orau.org/ptp/collection/dosimeters/pocketchamdos.htm>. [Accessed: 16-Jun-2017].

[7] “Presentación TLD.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/fatmaMSG/tld-47009931>. [Accessed: 17-Jun-2017].

[8] R. Chen, “Advantages and Disadvantages in the Utilisation of Thermoluminescence (TL) and Optically Stimulated Luminescence (Osl) for Radiation Dosimetry,” *Physics (College. Park. Md.)*, pp. 1–8, 2001.

[9] G. S. Ristic, “Radiation dosimeters for medical use,” *Conf. Med. Phys. Biomed. Eng.*, pp. 59–64, 2013.

[10] D. Andisco, S. Blanco, V. Bourel, C. Di Risio, and L. Schmidt, “Intercomparación de lecturas de radiación dispersa entre dosimetría film , electrónica y OSL con Rayos X para dosis bajas,” pp. 654–663, 2014.

[11] C. a Perks and C. Yahnke, “Medical dosimetry using Optically Stimulated Luminescence dots and microStar® readers,” *12th Int. Congr. Int. Radiat. Prot. Assoc.*, p. 10, 2008.

[12] Texas Instruments, “Total Ionizing Dose Effects on MOSFETs.” [Online]. Available: <https://training.ti.com/total-ionizing-dose-effects-mosfets>. [Accessed: 23-Jun-2017].

[13] D. M. Fleetwood, “Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 60, no. 3, pp. 1706–1730, 2013.

[14] M. a Carvajal, F. Simancas, J. Banqueri, and a M. Lallena, “Techniques to increase the sensitivity for dosimetry,” pp. 18–20, 2013.

[15] M. Pejovic, “P-channel MOSFET as a sensor and dosimeter of ionizing radiation,” *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, vol. 29, no. 4, pp. 509–541, 2016.

[16] M. M. Pejović and M. M. Pejović, “Application of pMOS Dosimeters in Radiotherapy.”

[17] D. Magalotti, “Design and accurate characterization of a wireless , wearable and real time Active Personal Dosimeter for healthcare applications,” UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA, 2015.