

Caracterización física de fotorresistencias como dosímetros en radioterapia

Physical characterization of light-dependent resistors as dosimeters in radiotherapy

Juan Román-Raya^{1,*}, Isidoro Ruiz-García², Catalina de los Ángeles Rodríguez-Cano³, Miguel Ángel Carvajal², Damián Guirado⁴

¹ Hospital Universitario Virgen de las Nieves, Granada.

² Universidad de Granada, Granada.

³ Hospital Universitario Torrecárdenas, Almería.

⁴ Hospital Universitario Clínico San Cecilio, Granada.

Fecha de Recepción: 08/06/2023 - Fecha de Aceptación: 10/12/2023

El control de calidad de los tratamientos de radioterapia se basa en el empleo de sensores dosimétricos. En la actualidad, las cámaras de ionización y los diodos de estado sólido, junto con electrómetros como sistemas de lectura, son los sistemas más utilizados para este fin. En este trabajo se estudian nuevos sistemas dosimétricos fabricados a partir de dispositivos electrónicos comerciales, cuyo coste se reduce notablemente al no haber sido fabricados *ex profeso* para su uso en radioterapia; particularmente, se analizaron varios modelos de fotorresistencias comerciales como alternativa a los sistemas dosimétricos existentes para dosimetría. Para ello, se ha realizado una caracterización de la respuesta a la radiación ionizante de diferentes modelos comerciales de fotorresistencias asociadas a un electrómetro de uso clínico. Las irradiaciones se han llevado a cabo bajo las condiciones usuales de los tratamientos de radioterapia. Los resultados experimentales muestran que estos modelos de fotorresistencias pueden constituir una alternativa a los sensores dosimétricos utilizados en la actualidad, con las ventajas de que poseen una alta sensibilidad, un tamaño más reducido, un coste económico más bajo y requieren menores voltajes de polarización.

Palabras clave: Radioterapia, dosimetría, fotorresistencia, tasa de dosis, respuesta angular.

The quality control of radiotherapy treatments relies on the use of dosimetric sensors. Currently, ionization chambers and solid-state diodes, along with electrometers as reading systems, are the most commonly used systems for this purpose. This study investigates new dosimetric systems manufactured from commercial electronic devices, significantly reducing costs by not being specifically designed for use in radiotherapy. In particular, various models of commercial light-dependent resistors (LDRs) were analyzed as an alternative to existing dosimetric systems for dosimetry. A characterization of the response to ionizing radiation was conducted for different commercial models of LDRs associated with a clinical electrometer. Irradiations were performed under the usual conditions of radiotherapy treatments. Experimental results show that these LDR models can serve as an alternative to currently used dosimetric sensors, with the advantages of high sensitivity, smaller size, lower economic cost, and requiring lower polarization voltages.

Key words: Radiotherapy, dosimetry, light-dependent resistor, dose rate, angular response.

Introducción

En un programa de radioterapia debe garantizarse la irradiación suficiente de los tejidos tumorales, para alcanzar el propósito establecido al inicio del tratamiento, y deben limitarse los daños que se producen

en los tejidos sanos irradiados. La determinación de las dosis administradas es, por tanto, crucial. Por ello, cada centro que emplee radioterapia debe disponer de protocolos de monitorización mediante dosimetría *in vivo*, tal y como ha recomendado la International Commission on Radiological Protection.¹ Muchos de

*Correspondencia: juan.roman.raya.sspa@juntadeandalucia.es

<https://doi.org/10.37004/sefm/2024.25.1.005>

los sistemas de dosimetría *in vivo* empleados en la actualidad son costosos económicamente o incrementan la carga de trabajo. Por eso, es importante investigar en el desarrollo de nuevos sistemas más baratos y sencillos de manejar. En la actualidad, los sistemas dosimétricos más utilizados en dosimetría física son las cámaras de ionización. Estas trabajan a voltajes de varios cientos de voltios, lo cual desaconseja su uso en pacientes. Otros dispositivos también ampliamente utilizados en radioterapia son los dosímetros de semiconductor. Su principio de funcionamiento puede asemejarse al de las cámaras de ionización, aunque en ellos el medio ionizable consiste en un semiconductor en lugar de un gas. Estos dispositivos presentan la ventaja de que tienen una sensibilidad mucho mayor que las cámaras de ionización, y no se polarizan.

El empleo de dispositivos electrónicos semiconductores en dosimetría *in vivo* tiene una larga tradición en el campo de la radioterapia.² En la mayoría de los casos, los dispositivos específicamente diseñados para dosimetría suelen estar fabricados mediante procedimientos que les confieren una elevada sensibilidad a la radiación. Tal es el caso de los diodos PIN o de los transistores RADFET. Si bien estos dos tipos de dispositivos son muy distintos, la mejora de la sensibilidad se consigue incrementando el volumen de la zona sensible. Así, en el caso de los diodos, la zona de carga espacial se aumenta introduciendo una zona de silicio intrínseco, mientras que en los transistores RADFET se incrementa el volumen del óxido de puerta. El coste de estos sistemas se reduciría sensiblemente si fuera posible utilizar dispositivos comerciales que no hayan sido fabricados *ex profeso* para dosimetría, lo cual ya se ha realizado con transistores MOSFET^{3,4} o con fotodiodos.⁵ En este trabajo se estudia el empleo de fotorresistencias comerciales, en adelante LDR por sus siglas en inglés (*light-dependent resistor*), como detectores asociados a los electrómetros clínicos disponibles en los hospitales, de manera que tengamos dosímetros de bajo coste para los que no haya que diseñar un sistema de lectura específico. Una LDR es un componente electrónico que es sensible a luz y cambia su resistencia cuando se expone a ella, disminuyendo a medida que la intensidad de la luz aumenta. Están formados por materiales semiconductores, tales como CdSe, CdS, InSb o PbS.

Material y métodos

En un trabajo previo⁶ se realizó un estudio de diferentes modelos de LDR comerciales asociados a un electrómetro clínico, de los cuales seleccionamos los dos que presentaban mejores características dosimétricas. Estos fueron los modelos NSL-19M51 (Luna Optoelectronics, EE.UU.) y VT43N2 (Excelitas Technologies, EE.UU.), mostrados en fig. 1. El primero



Fig. 1. Modelos de LDR bajo estudio.

posee un diámetro de 4.1 mm mientras que el segundo es de 11.2 mm. Ambos modelos están compuestos de CdS, recubiertos con un encapsulado plástico.

En este trabajo, se han caracterizado estos dispositivos mediante los haces de fotones de 6 MV producidos por un acelerador lineal Artiste (Siemens, Alemania) y un acelerador lineal Infinity (Elekta, Suecia). Para minimizar el efecto de la luz ambiental, los dispositivos se recubrieron con esmalte negro. Las LDR se conectaron mediante un cable TNC a un electrómetro PC Electrometer (Sun Nuclear, EE.UU.). Se analizaron tres dispositivos por cada modelo de LDR.

Para estudiar la dependencia con la tasa de dosis absorbida, se colocaron 5 láminas de agua sólida (RW3) bajo los dispositivos y 2 sobre ellos, y se empleó como referencia una cámara tipo Farmer 30010 (PTW, Alemania). El ángulo de incidencia fue de 90°, los dispositivos se irradiaron con un tamaño de campo de 10 cm × 10 cm y se varió la tasa de dosis absorbida modificando la distancia fuente-detector.

Para el estudio de la dependencia angular, se empleó el maniquí StereoPHAN (Sun Nuclear, EE.UU.), que posee simetría cilíndrica. Para determinar la dependencia angular propia del acelerador se introdujo previamente una cámara Semiflex 3D (PTW, Alemania) en el interior del maniquí. La cámara y las LDR se situaron con el eje paralelo al eje de simetría del maniquí, en el isocentro de radiación. Se varió el ángulo de incidencia en el plano axial cada $\pi/6$ radianes y se irradió cada dispositivo con tres disparos de 2 Gy cada uno. El tamaño de campo fue de 5 cm × 5 cm, y la tasa de dosis absorbida se mantuvo constante en 300 cGy/min.

Resultados y discusión

En el primer conjunto de medidas, el electrómetro se empleó en modo corriente, y la lectura se calculó como el cociente entre la integral temporal de la corriente, cuando su valor es superior a tres veces la desviación estándar de la corriente de línea base (corriente en ausencia de radiación), y el tiempo de irradiación. Para ello, se exportó la corriente medida en función del tiempo a un fichero de Excel, a partir del cual los datos fueron analizados. En el intervalo de tiempo que dura la irradiación se obtuvo el valor medio

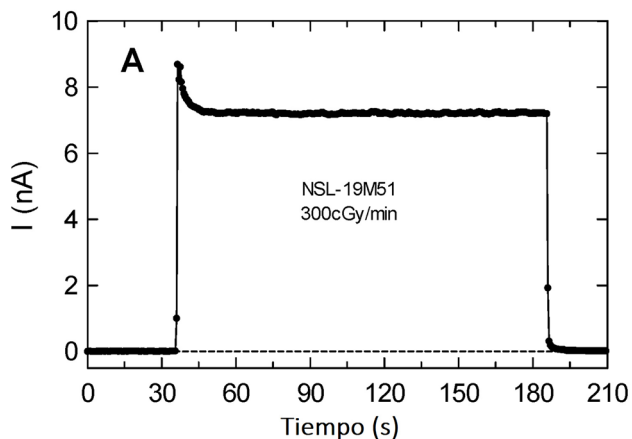


Fig. 2. Corriente medida frente al tiempo con el modelo NSL-19M51 a una tasa de dosis absorbida de 300 cGy/min. La línea horizontal corresponde a tres veces la desviación estándar de la corriente de línea base.

de la corriente, sustraída la línea base (fig. 2). La incertidumbre se ha estimado como la suma cuadrática de la desviación estándar del conjunto de mediciones (tipo A), y la sensibilidad del electrómetro en el rango seleccionado (tipo B).

En la fig. 3 se muestran, para las diferentes tasas analizadas, los valores obtenidos con ambos modelos de LDR. Para analizar esta dependencia se ajustaron los datos experimentales a la función

$$I = \alpha \cdot \dot{D}^\beta, \tag{1}$$

donde I es el valor de la corriente en nA y \dot{D} es la tasa de dosis absorbida en cGy/min. Los parámetros de ajuste se recogen en la tabla 1. Como se puede apreciar, estos dispositivos presentan una importante dependencia de la corriente con la tasa de dosis absorbida. La

dependencia lineal encontrada en el estudio previo⁶ se ha visto modificada al ampliar el estudio en el rango de tasas de dosis absorbida. Como ejemplo, en un diodo PIN desarrollado por Bhabha Atomic Research Centre, la sensibilidad entre una tasa de dosis absorbida de 50 y de 315 cGy/min se reduce en un 2.5%,⁷ mientras que con las LDR estudiadas se reduce en un factor 2.5.

A efectos comparativos, la cámara de ionización PTW 30010, comúnmente utilizada en radioterapia, proporciona una sensibilidad media de 0.2 nC/cGy a 400 V para tasas de dosis absorbida del rango de las utilizadas en radioterapia, mientras que las LDR estudiadas proporcionan sensibilidades de 1 nC/cGy a 150 V en ese mismo rango. Estos resultados muestran que es posible emplear electrómetros de uso común en radioterapia asociados a LDR como sistemas dosimétricos.

En cuanto a la dependencia angular, se estudió el modelo NSL-19M51. En este caso, se realizó un ajuste del tipo

$$\frac{M \cdot Q_0}{M_0 \cdot Q} = a + b \cos(\theta + \delta) + c \cos^2(\theta + \delta), \tag{2}$$

donde M y Q son las lecturas con la LDR y la cámara de ionización, respectivamente; $M_0 = M(\theta = 0)$ y $Q_0 = Q(\theta = 0)$ son las lecturas con la LDR y la cámara de referencia para ángulos de incidencia de 0 radianes; θ es el ángulo de incidencia y a, b, c y δ son parámetros de ajuste.

Tras ajustar los parámetros de esta función y determinar el desplazamiento δ , que varía entre 0.1 y 0.2 radianes, se procedió al centrado de los datos para representarlos gráficamente (fig. 4). En la figura sólo se han representado las incertidumbres para un dispositivo por claridad y son las mayores de los tres dispositivos estudiados. En la tabla 2 se dan los resultados del ajuste.

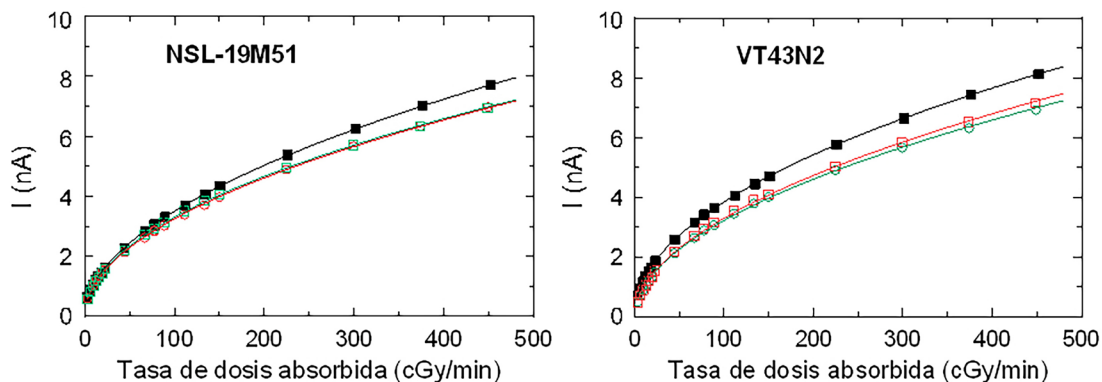


Fig. 3. Dependencia con la tasa de dosis absorbida de la corriente medida por las fotorresistencias. Se muestran tres dispositivos para cada modelo de LDR. No se incluyen las barras de incertidumbre ($k = 1$), ya que son más pequeñas que los símbolos empleados para representar los datos.

Tabla 1. Coeficientes de ajuste de los datos experimentales a la expresión (1), que representa la corriente medida por las fotorresistencias frente a la tasa de dosis absorbida. Las incertidumbres corresponden a $k = 1$.

$I = \alpha \cdot \dot{D}^\beta$	VT43N2			NSL-19M51		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
α	0.39±0.01	0.30±0.03	0.30±0.04	0.31±0.02	0.32±0.02	0.33±0.02
β	0.497±0.001	0.516±0.004	0.523±0.005	0.524±0.002	0.505±0.002	0.499±0.002

Tabla 2. Coeficientes de ajuste de los datos experimentales a la expresión (2), que representa la respuesta de cada dispositivo frente al ángulo de incidencia del haz. Las incertidumbres corresponden a $k = 1$.

	#1	#2	#3
a	0.947 ± 0.007	0.976 ± 0.007	0.935 ± 0.009
b	0.164 ± 0.005	0.140 ± 0.005	0.161 ± 0.008
c	-0.12 ± 0.01	-0.12 ± 0.01	-0.12 ± 0.02

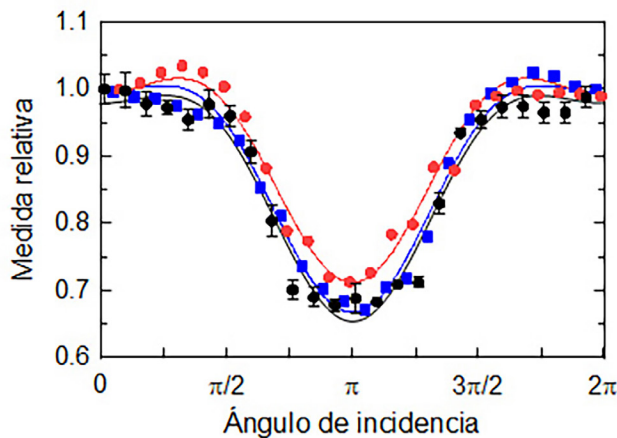


Fig. 4. Dependencia angular de la respuesta de tres dispositivos de fotorresistencias del modelo NSL-19M51. Las barras de incertidumbre corresponden a $k = 1$.

A modo de comparación, el diodo PTW T60016 Diode E (PTW, Alemania) presenta una reducción en la sensibilidad del 10% a $\pi/2$ rad y del 25% para $5\pi/6$ rad, mientras que en nuestros dispositivos esa reducción es del 5% y del 25%, respectivamente, por lo que la dependencia angular es del mismo orden.

Conclusiones

En este trabajo se han caracterizado dos modelos de fotorresistencias como sensores dosimétricos para haces de fotones de alta energía habituales en radioterapia externa, estudiando la dependencia con la tasa

de dosis absorbida y con el ángulo de incidencia. La alta sensibilidad y el bajo coste de estos dispositivos los convierten en candidatos para ser empleados como detectores de radiación ionizante.

Bibliografía

1. ICRP. Prevention of accidents to patients undergoing radiation therapy. Publication 86. London: Elsevier; 2001.
2. Rosenfeld A. Electronic dosimetry in radiation therapy. *Radiat Meas.* 2007;41:134- 153. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.01.005>
3. Carvajal M, Martínez-García M, Guirado D, Banqueri J, Palma A. Dose verification system based on MOS transistor for real-time measurement. *Sens Actuators A Phys.* 2016;247:269-276. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.009>
4. Martínez-García M, Carvajal M, Torres del Río J, Jaksic A. Response to ionizing radiation of diferent biased and stacked pMOS structures. *Sens Actuators A Phys.* 2016;252:67-75. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.007>
5. Ruiz-García I, Román-Raya J, Banqueri J, Palma AJ, Guirado D, Carvajal MA. Commercial photodiodes and phototransistors as dosimeters of photon beams for radiotherapy. *Medical Physics.* 2021;48(9). <https://doi.org/10.1002/mp.14921>
6. Román-Raya J, Ruiz-García I, Escobedo P, Palma AJ, Guirado D, Carvajal MA. Light-dependent resistors as dosimetric sensors in radiotherapy. *Sensors* 340 (Switzerland). 2020;20(6). <https://doi.org/10.3390/s20061568>
7. Kumar R, Sharma SD, Philomina A, Topkar A. Dosimetric characteristics of a PIN diode for radiotherapy application. *Technology in cancer research & treatment.*2014;13(4), 361-367. <https://doi.org/10.7785/tcrt.2012.500388>