

## Estudio de la respuesta de un TLD100-HARSHAW mediante el código de Monte Carlo MCNP6.

J. Ordóñez<sup>a</sup>, S. Gallardo<sup>b</sup>, J. Ortiz<sup>c</sup>, S. Martorell<sup>a,c,d</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Medioambiente y Seguridad Industrial (MEDASEGI)

<sup>b</sup>Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental

<sup>c</sup>Laboratorio de Radiactividad Ambiental

<sup>d</sup>Departamento de Ingeniería Química y Nuclear

Universitat Politècnica de València

joorro1@etsii.upv.es

**Resumen** – El código MCNP6 se ha utilizado para desarrollar un modelo de Monte Carlo del TLD100-HARSHAW, incluyendo una fuente colimada y un fantoma de agua con paredes de PMMA (ISO water slab phantom). Para calcular el kerma en aire y las dosis superficial  $H_p(0.07)$  y profunda  $H_p(10)$ , se aplica un tally F6 (MeV/g). Este modelo permite obtener la función de respuesta relativa en energía (RRE) normalizada al  $^{137}\text{Cs}$  para haces de diferente calidad y ángulos de incidencia. La validación del modelo se lleva a cabo comparando datos simulados con experimentales utilizando diferentes calidades de haz de rayos-X de acuerdo con la norma ISO-4037-3. El código MCNP6 representa una herramienta muy útil para analizar las mediciones experimentales y a su vez para realizar calibraciones de TLDs sin necesidad de irradiarlos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los dosímetros de termoluminiscencia TLD100 se utilizan frecuentemente en dosimetría personal aportando resultados fiables de  $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$  en campos mixtos de fotones/electrones. En la Universitat Politècnica de València (UPV), el TLD100 se utiliza para evaluar oficialmente la dosimetría personal de los trabajadores profesionalmente expuestos. El material TLD empleado en este caso es LiF, dopado con pequeñas cantidades de Mg y Ti. Una de las características más importantes de estos dosímetros es la dependencia en energía y ángulo de incidencia (función de respuesta).

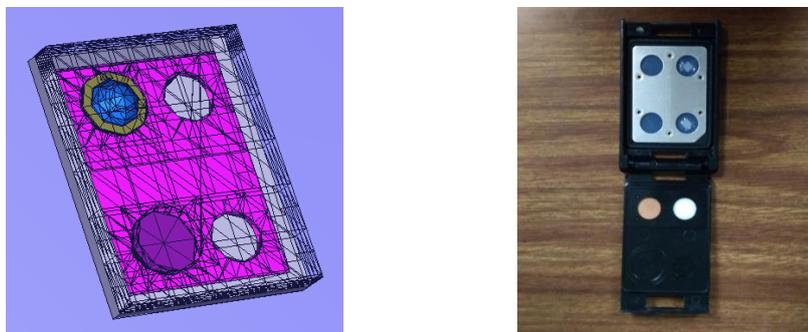
En la actualidad, se utilizan los códigos de Monte Carlo por ser herramientas computacionales fiables y precisas orientadas a la caracterización y calibración de este tipo de detectores en dosimetría personal y ambiental [Hranitzky et al., 2002, Hranitzky et al., 2006, Hranitzky y Stadtmann, 2007, Eakins et al., 2008]. En este contexto, se ha desarrollado un modelo del TLD100-HARSHAW utilizando el código de Monte Carlo MCNP6 con el que se realizan simulaciones siguiendo el procedimiento experimental de calibración. Se realiza un análisis detallado de la respuesta del cristal en un intervalo de energía 20-661 keV, obteniendo funciones de respuesta (RRE) para diferentes condiciones de irradiación, incluyendo haces de diferente calidad y ángulos de incidencia y estudiando su comportamiento.

## 2. MÉTODOS Y MATERIALES

### 2.1. TLD100 – HARSHAW

El dosímetro empleado es un TLD100-HARSHAW (Figura 1) con detectores de termoluminiscencia de LiF dopado con Mg y Ti. Está compuesto por 2 detectores de 3.2x3.2x0.9 mm, cada uno con un filtrado diferente según el tipo de dosis que se quiera obtener. Para dosis profunda

( $H_p(10)$ ) se emplea un filtro semiesférico de teflón con un radio de 4.75 cm y para la superficial ( $H_p(0.07)$ ) un filtro de Mylar de 0.1 mm de espesor.

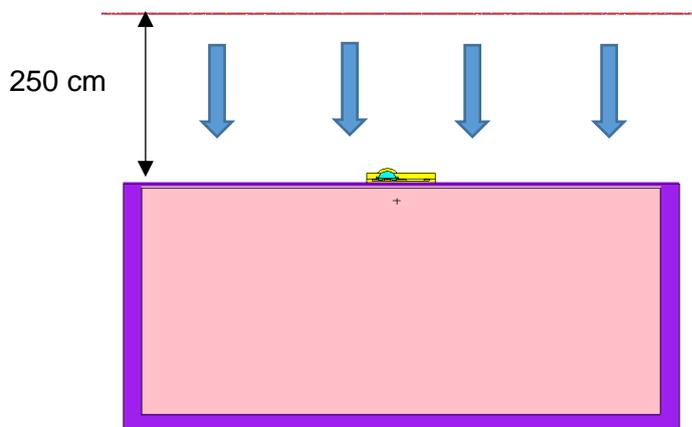


**Figura 1: TLD100-HARSHAR; LiF: Mg, Ti**

## 2.2. Modelo en MCNP6 del TLD100

El código MCNP6 [MCNP6TM Monte Carlo equipo, 2013] se ha utilizado para simular las dosis profunda,  $H_p(10)$  y superficial,  $H_p(0.07)$ , así como para estudiar la función de respuesta del dosímetro TLD100 (Figura 2), bajo diferentes condiciones de irradiación. Se ha empleado el *tally* F6 para almacenar la energía absorbida por los detectores en unidades de MeV/g. La fuente de rayos-X se ha simulado como un haz uniforme y paralelo de 50x50 cm y a 250 cm de la superficie frontal del fantoma, donde se sitúa el TLD. Los diferentes espectro de rayos-X se simulan con MCNP6 de acuerdo a [Ankerhold, 2000] y a la norma ISO-4037-1 *Narrow Series* [ISO, 1996].

El modelo simula el transporte de radiación tanto en el dosímetro como fuera de él, incluyendo los efectos de atenuación y dispersión con el medio que lo rodea y con los materiales circundantes. El fantoma se ha modelado siguiendo las recomendaciones de la ICRU-47: *ISO Water Slab Phantom*. Tiene unas dimensiones de 30x30x15 cm y está compuesto por una carcasa de polimetilmetacrilato (PMMA) conteniendo agua en su interior. La carcasa tiene un espesor de 2.5 mm en su cara frontal, donde se sitúa el TLD y 10 mm en el resto (Figura 2).



**Figura 2: Modelo de calibración**

Además del dosímetro, se ha realizado un segundo modelo en el que únicamente se simulan los detectores, es decir, los cristales de LiF colocados en el interior del fantoma. En un primer caso,

el cristal se sitúa a 10 mm por debajo de la superficie y a continuación a 0.07 mm, lo que equivaldría a simular la dosis equivalente profunda y superficial, respectivamente ( $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$ ). De este modo, es posible comparar la respuesta del dosímetro obtenida con el modelo completo del TLD, en el que la radiación atraviesa los filtros correspondientes para obtener la dosis profunda y superficial, con la obtenida según la descripción teórica de ambas magnitudes.

### 2.3. Función de Respuesta Relativa

Para calcular la respuesta del dosímetro se ha simulado únicamente el transporte de fotones, utilizando la aproximación a kerma para determinar la dosis depositada en los detectores [Eakins et al., 2008].

La respuesta relativa  $R(\theta, E)$  del dosímetro frente a una fuente de radiación de energía  $E$ , y ángulo de incidencia  $\theta$  se ha definido relativa al  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$  a partir de las respuestas a  $H_p(10)$  o  $H_p(0.07)$  en términos de kerma en aire y corregidas por los coeficientes de conversión a dosis equivalente (Ec 1 y 2).

$$R(\theta, E) = \frac{K(\theta, E)_{\text{LiF}} \times K(0, Cs)_{\text{Air}}}{K(\theta, E)_{\text{Air}} \times K(0, Cs)_{\text{LiF}}} \times \frac{h(0, Cs)}{h(\theta, E)} \times \eta'(E); \quad (1)$$

$$h(\theta, E) = \frac{H_p(X)}{K(\theta, E)_{\text{Air}}} \quad (2)$$

donde  $K(\theta, E)_M$  es la energía absorbida en el detector de interés ( $H_p(10)$  o  $H_p(0.07)$ ), estimado a partir del tally F6 de MCNP6, para el material del detector, LiF (aproximación a kerma) o aire (kerma);  $h(\theta, E)$  es el coeficiente de conversión de kerma en aire a dosis equivalente para una energía y ángulo de incidencia dado en el detector de interés,  $\eta'(E)$  es la eficiencia termoluminiscente relativa al LiF en función de la energía y  $H_p(X)$  es la dosis obtenida en un cristal (detector) de agua a a X mm de profundidad desde la superficie frontal del fantoma, estimada a partir del tally F6.

Para obtener la función de respuesta, primero se obtiene el kerma en aire,  $K(\theta, E)_{\text{Air}}$ , para cada energía de interés, simulando únicamente el detector (material aire). A continuación, se realiza el mismo procedimiento pero cambiando el material del detector por agua,  $H_p(X)$ , introducidos en el interior del fantoma a la profundidad correspondiente (10 mm o 0.07 mm) y se calculan los coeficientes de conversión  $h(\theta, E)$  según la Ec. 2. El siguiente paso consiste en obtener la aproximación a kerma según la energía y ángulo de irradiación para el modelo completo de TLD situado sobre el fantoma y normalizarla respecto al  $^{137}\text{Cs}$  (Ec. 1).

La respuesta del dosímetro a diferentes ángulos de incidencia se ha simulado del mismo modo y posicionando la fuente a  $60^\circ$  y  $30^\circ$  relativos al ángulo formado por la dirección de irradiación y a la superficie frontal del fantoma, siendo  $0^\circ$  la exposición normal al plano frontal del TLD y  $60^\circ$  la posición más inclinada.

## 3. RESULTADOS

Tal y como se ha explicado en la sección anterior, el primer paso consiste en calcular los coeficientes de conversión de kerma en aire a dosis equivalente. Para ello, se ha obtenido el kerma en aire para un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ ,  $K(0^\circ, E)_{\text{Air}}$  y los  $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$  a partir del Tally F6 (Figura 3 y 4, respectivamente). Se observa un comportamiento lineal a partir de 100 keV aproximadamente presentando un mínimo en 60 keV. Los resultados para  $H_p(0.07)$  son muy superiores a los de  $H_p(10)$  hasta una energía de 30 keV, a partir de la cual son prácticamente coincidentes.

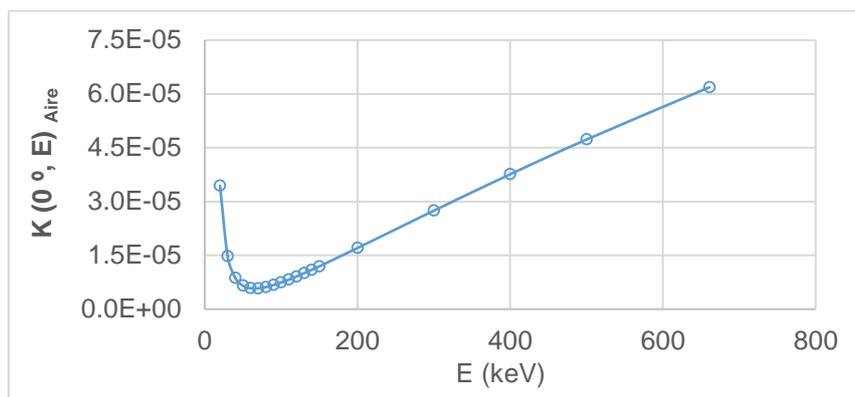


Figura 3: Kerma en aire,  $K(0^\circ, E)_{\text{Aire}}$

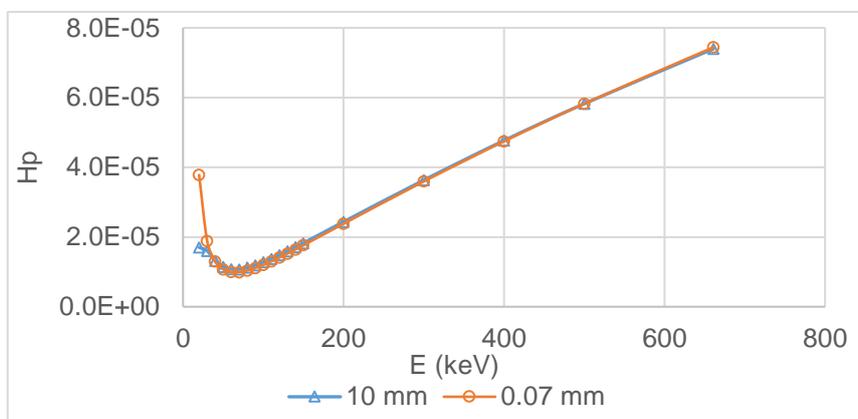


Figura 4:  $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$

Los coeficientes de conversión de kerma en aire a dosis equivalente se han obtenido tanto para dosis profunda (10 mm) como para superficial (0.07 mm) y se han validado comparándolos con los calculados por [Gualdrini y Morelli, 1996 ENEA] y [Grosswendt, 1991b], obteniendo resultados coherentes tal y como muestran las Figuras 5 y 6.

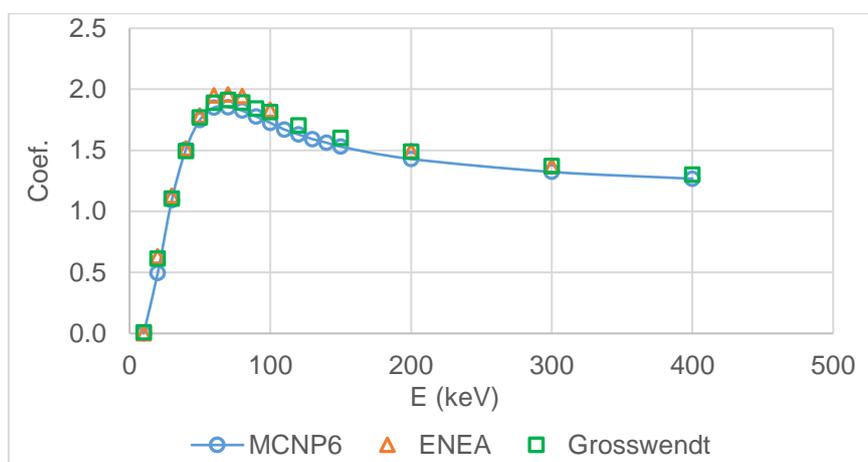
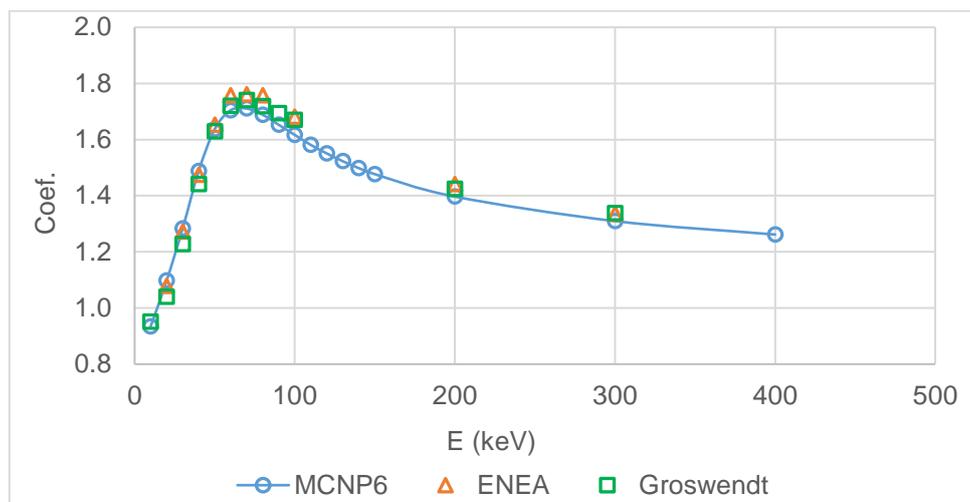


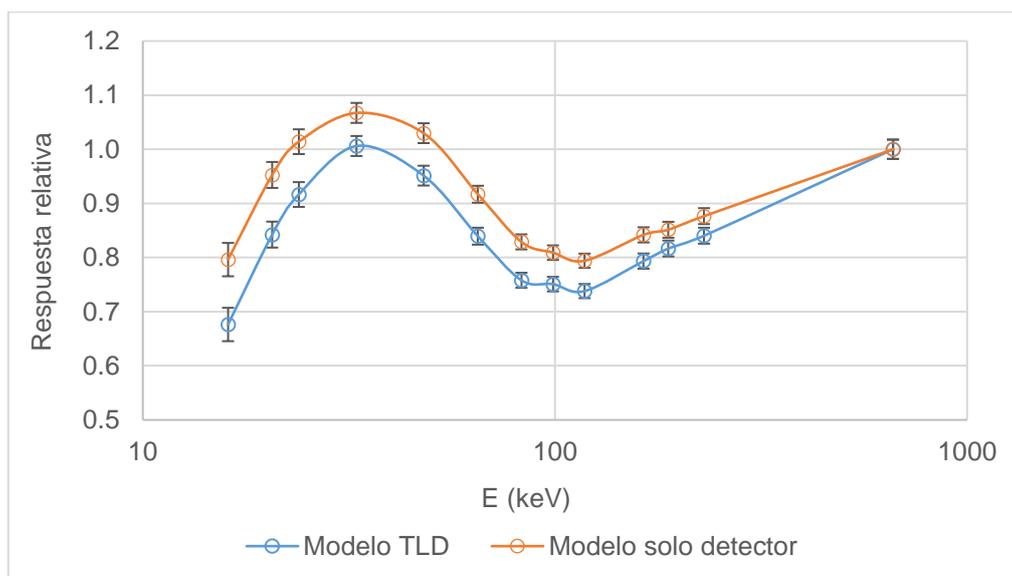
Figura 5: Coeficientes de conversión para  $H_p(10)$ ;  $h(0^\circ, E)$



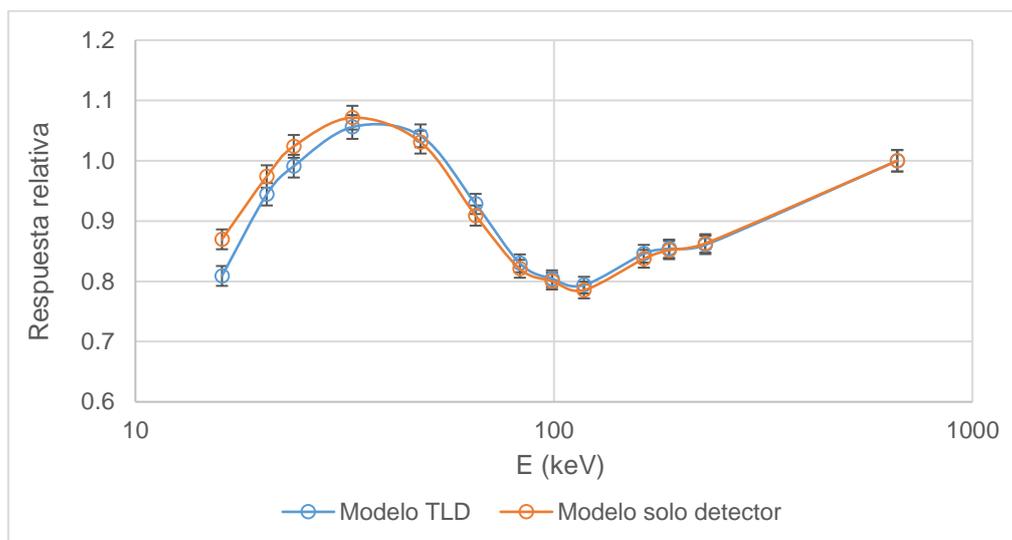
**Figura 6: Coeficientes de conversión para  $H_p(0.07)$ ;  $h(0^\circ, E)$**

Tras simular la aproximación a kerma, para cada energía de interés con el modelo del TLD completo y situado sobre la superficie frontal del fantoma, ya se puede obtener la respuesta del dosímetro de acuerdo a la Ec. 1 tanto para dosis profunda como superficial (Figura 7 y 8, respectivamente). De un modo análogo, también se ha calculado la respuesta del dosímetro simulando únicamente cada detector por separado e introducido dentro del fantoma a la profundidad correspondiente para dosis profunda (10 mm) y superficial (0.07). De este modo se han comparado los resultados obtenidos con el modelo de TLD completo y los obtenidos según la descripción teórica.

En el caso de dosis profunda, ambos modelos presentan resultados similares, pero con diferencias de entre el 14% y el 10% hasta 30 keV y de entre el 8% y 4% a partir de 50 keV. En el caso de dosis superficial, ambos modelos presentan resultados prácticamente idénticos.

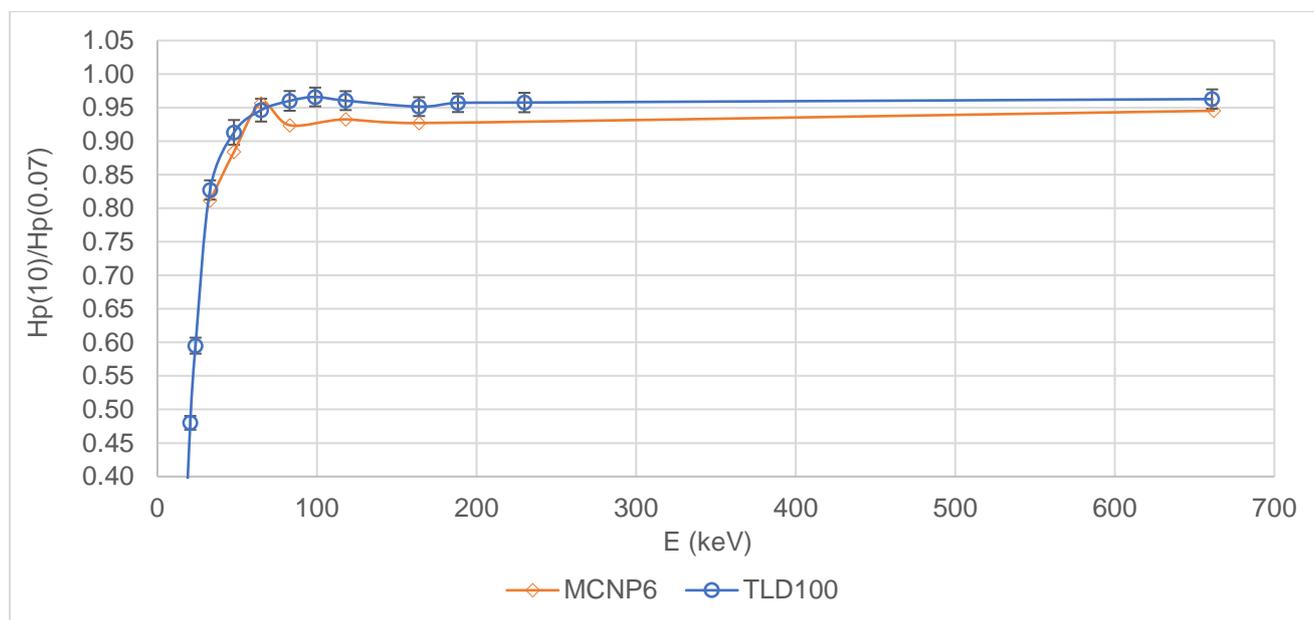


**Figura 7: Función de Respuesta Relativa para  $H_p(10)$ ;  $R(0^\circ, E)$**



**Figura 8: Función de Respuesta Relativa para  $H_p(0.07)$ ;  $R(0^\circ, E)$**

Otro modo de validación del modelo del TLD100 ha sido el comparar la ratio  $H_p(10)/H_p(0.07)$  a partir de los resultados simulados con la obtenida en las calibraciones experimentales. La Figura 9 muestra esta ratio, observándose buenos resultados a nivel general.



**Figura 9: Ratio  $H_p(10)/H_p(0.07)$  simulada y experimental**

Por último, se ha simulado la respuesta relativa del TLD según el ángulo de incidencia. Las Figuras 10 y 11, respectivamente, muestran estos resultados para  $H_p(10)$  y  $H_p(0.07)$  en función del ángulo:  $0^\circ$  (normal a la superficie frontal del fantoma),  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . En ambos casos, la respuesta relativa obtenida a  $0^\circ$  y  $30^\circ$  es muy similar, diferenciándose levemente por debajo de 50 keV. La respuesta relativa para  $60^\circ$  sí que muestra diferencias más importantes hasta los 80 keV, siendo más notable

en el caso de  $H_p(10)$ , con valores mucho mayores a los obtenidos para  $0^\circ$  y  $30^\circ$  y con una tendencia creciente a medida que disminuye la energía.

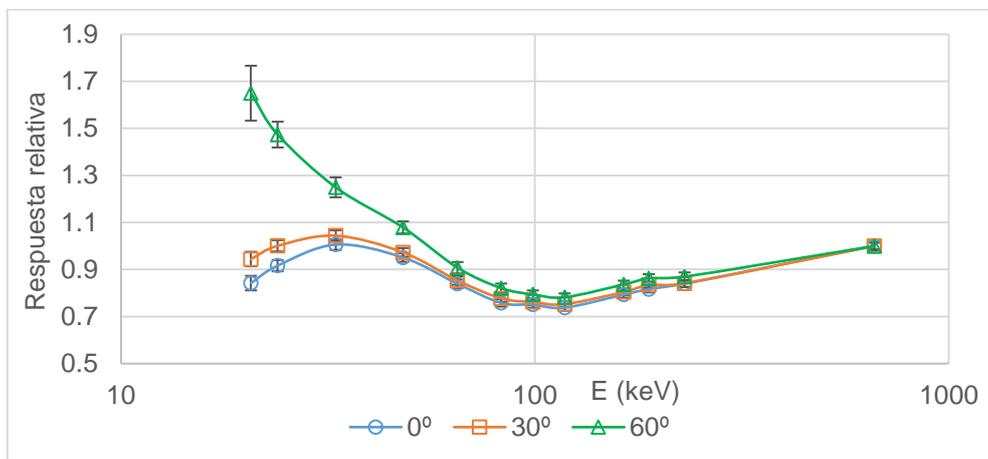


Figura 10: Respuesta  $H_p(10)$  del TLD100 para diferentes ángulos de incidencia

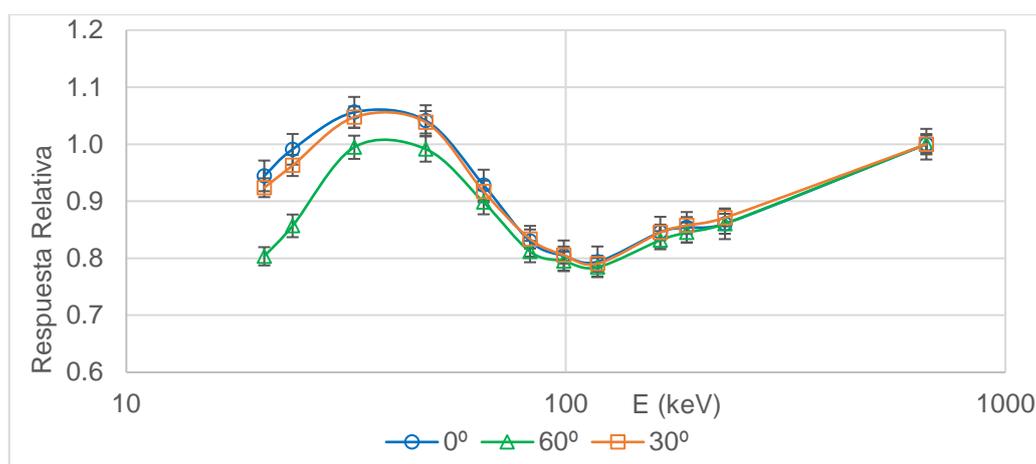


Figura 11: Respuesta  $H_p(0.07)$  del TLD100 para diferentes ángulos de incidencia

## CONCLUSIONES.

Se ha realizado un modelo de un TLD100-HARSHAW; LiF: Mg, Ti mediante el código de Monte Carlo MCNP6. Este modelo se ha empleado para obtener, en primer lugar, los coeficientes de conversión de kerma en aire a dosis equivalente, validándolos, para, a continuación, calcular la respuesta relativa del dosímetro para dosis profunda ( $H_p(10)$ ) y para dosis superficial ( $H_p(0.07)$ ), comparando los resultados con los obtenidos a partir de su descripción teórica, también mediante simulaciones. Esta comparación ha mostrado resultados coherentes en ambos casos, aunque con mayores diferencias para el caso de dosis profunda. Se ha comparado también la ratio  $H_p(10)/H_p(0.07)$  obtenida mediante simulación, con valores experimentales, obteniendo también resultados satisfactorios. Finalmente, se ha estudiado la respuesta relativa del TLD en función del ángulo de incidencia, obteniéndose un mayor efecto para el caso de dosis profunda y un ángulo de  $60^\circ$ .

El código MCNP6 permite obtener las funciones de respuesta del TLD100-HARSHAW para diferentes condiciones de irradiación, siendo una herramienta muy útil para estudiar las mediciones experimentales y a su vez para realizar calibraciones de TLDs sin necesidad de irradiarlos.

## AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Cátedra CSN-UPV Vicente Serradell, así como al Laboratorio de Radiactividad Ambiental (Universitat Politècnica de València), por la financiación y los recursos dedicados a este trabajo de investigación en virtud de la subvención no. FPI-2015-S2-1576.

## REFERENCIAS

Ankerhold, U., 2000. Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data—ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra. PTB-Dos-34, PTB, Braunschweig.

Eakins, J.S., Bartlett, D.T., Hager, L.G., Tanner R.J., 2008. Monte Carlo modelling of a TLD device containing LiF:Mg,Cu,P detectors. *Radiat. Meas.* 43, 631-635.

Grosswendt, B. (1991b). The angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalent for photons in slab phantoms of tissue-equivalent material and PMMA. *Radiat. Prot. Dosim.* 35, 221-235

Gualdrini, G.F., Morelli, B., 1996. Air kerma to personal dose equivalent conversion factors for the ICRU and ISO recommended slab phantoms for photons from 20 keV to 1 MeV. ENEA – Centro Ricerche “Ezio Clementel”, Bologna.

Hranitzky, C., Stadtmann, H. and Kindl, P., 2002. The use of Monte Carlo simulation technique for the design of an H\* (10) dosimeter based on TLD-100. *Radiat. Prot. Dosim.* 101, 279–282.

Hranitzky, C., Stadtmann, H. and Olko, P., 2006 Determination of LiF:Mg,Ti and LiF:Mg,Cu,P TL efficiency for X-rays and their application to Monte Carlo simulations of dosimeter response. 14th Solid State Dosimetry Conference, New Haven, 2004. *Radiat. Prot. Dosim.* 119, 483–486

Hranitzky, C. and Stadtmann, H., 2007. Simulated and measured Hp(10) response of the personal dosimeter Seibersdorf. *Radiat. Prot. Dosim.* 125, 166-169.

International Organization for Standardization (ISO), 1996. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy—part 1: radiation characteristics and production methods. ISO 4037-1, Geneva.

Monte Carlo team, MCNP6TM – User’s manual, Version 1.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, May 2013.