



Revisión de Artículos

Guadalupe Martín Martín*

Comité de Redacción.

Estimadas compañeras y compañeros,

Para este primer número de la Revista del año 2015, contamos con cuatro interesantes comentarios sobre trabajos científicos publicados recientemente en revistas internacionales de nuestro campo de reconocido prestigio.

Para empezar, Ana María Tornero nos habla del estudio que ha llevado a cabo sobre la dependencia con la densidad del aire de la cámara de ionización *SourceCherck*, empleada comúnmente para control de calidad de fuentes de braquiterapia de baja energía, descubriendo que el factor de corrección de densidad k_{TP} que se suele aplicar puede ser incorrecto. A continuación, Benigno Barbés nos presenta su trabajo sobre la caracterización de unos diodos esféricos para dosimetría de haces de fotones en radioterapia, cuya aplicación en principio no era esta, pero que han mostrado ventajas interesantes sobre los que existen en el mercado para este fin. Por otro lado, Faustino Gómez nos comenta su estudio sobre la dependencia con la temperatura de la cámara de ionización líquida de PTW *microLion*, para la que provee a los usuarios/as las claves para determinar el factor de corrección para la temperatura adecuado. Finalmente, contamos con el comentario de Marta Bueno, en el que nos explica cómo determinó un algoritmo que evaluase la necesidad de aplicar cálculos de dosis basados en Monte Carlo, en determinados casos de pacientes de protonterapia para los que el cálculo estándar de dosis pudiera presentar errores significativos.

Espero que disfrutéis con los trabajos publicados en esta sección y os animo, como en ediciones anteriores, a participar con sugerencias de artículos que consideréis apropiados para incluir en el próximo número de la Revista. Gracias.



Dependence with air density of the response of the PTW SourceCheck ionization chamber for low energy brachytherapy sources

Tornero-López AM, Guirado D, Perez-Calatayud J, Ruiz-Arrebola S, Simancas F, Gazdic-Santic M, Lallena AM
 Med Phys 2013; 40(12).

Ana María Tornero López

Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica.
 Hospital Universitario San Cecilio, Granada.
ana.tornero@gmail.com

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este artículo?

En el contexto de la braquiterapia como tratamiento del cáncer de próstata localizado, una opción terapéutica es el implante permanente de semillas de ^{125}I . Antes del implante, el protocolo de control de calidad de estas

* Correspondencia
 Email: guadalupe.martin@salud.madrid.org

fuentes recomienda medir su intensidad de kerma en aire (S_K), lo cual suele realizarse con cámaras de ionización tipo pozo abiertas al aire.

Dos cámaras usuales para ello son la HDR1000 Plus (Standard Imaging, Middleton WI, USA) y la SourceCheck (PTW, Freiburg, Germany). En nuestro servicio disponemos de ambas pero, al trazarlas entre sí, observamos una discrepancia entre sus medidas. Intentando descubrir el origen de esta diferencia, nos focalizamos en una peculiar característica de la HDR1000 Plus: la señal producida en estas cámaras de ionización abiertas al aire es proporcional a la densidad del aire interior, y, por tanto, la medida necesita ser corregida por el factor densidad k_{TP} (que es la razón entre la densidad del aire en condiciones estándar y la densidad del aire durante la medida). En el caso de la HDR1000, Griffin et al. (Med Phys 2005;32:700-9) mostraron que esta corrección de densidad es a bajas presiones, de modo que es necesaria la aplicación de un factor corrector adicional que depende de la presión. Al no existir ninguna verificación independiente de este resultado, y dado que la altura a la que se encuentra nuestra ciudad, Granada, implica una corrección adicional de una cuantía importante, consideramos conveniente comprobar con experimentos adecuados su validez para nuestra HDR1000 Plus. Para el estudio del comportamiento de esta cámara con la densidad del aire, decidimos tomar como referencia el comportamiento de la cámara SourceCheck, para la que no se habían señalado características anómalas hasta ese momento.

Para nuestra sorpresa observamos que la aplicación del factor densidad k_{TP} a bajas densidades no corrige lo suficiente la medida de la SourceCheck, al contrario de lo que sucede con la cámara HDR1000 Plus. La magnitud no despreciable de esta corrección y el extendido uso de esta cámara por Europa nos motivó para realizar un análisis exhaustivo de su comportamiento, lo cual nos llevó a la publicación del artículo que aquí reseñamos.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades del trabajo?

El estudio de este comportamiento exigía someter a la cámara de ionización SourceCheck a condiciones atmosféricas que comprendieran un amplio rango de densidades, al menos desde $0.70\rho_0$ hasta ρ_0 , (ρ_0 es la densidad del aire en condiciones normales). Las características geográficas de nuestra ciudad nos permitieron realizar un experimento de campo en el que viajamos con la instrumentación necesaria desde el nivel del mar hasta una altura de casi 3000 metros, cubriendo un rango de presiones que permitió hacer un estudio adecuado del comportamiento de la cámara, mientras que manteníamos la temperatura aproximadamente constante. No obstante, es difícil el control preciso de los valores de presión y temperatura en cada medida, con lo que posteriormente realizamos un experimento de laboratorio; éste consistió en la toma de medidas dentro de una cámara presurizada construida artesanalmente, de manera que las variables atmosféricas pudieron ser controladas de un modo más fiable.

Además, comprendimos la necesidad de verificar si el efecto se manifestaba en otras cámaras SourceCheck, con lo cual tuvimos que pedir sus cámaras SourceCheck a compañeros de diversas instituciones para someterlas al mismo experimento y deducir así conclusiones generales de utilidad para toda la comunidad.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

La cámara de ionización SourceCheck mide menos de lo esperado cuando la densidad del aire es pequeña, lo cual implica que, si se asume que su comportamiento es el de una cámara de Bragg-Gray, lo cual es indispensable para el cálculo del S_K de las semillas, existe una corrección insuficiente al aplicar el factor densidad usual k_{TP} . La magnitud de tal corrección puede llegar a ser del 1.5% en una situación atmosférica típica de 700 mmHg y 20 °C, y en ciudades situadas a alturas considerables sobre el nivel del mar, como Madrid, Salamanca, Granada o Albacete. Es por tanto necesaria la aplicación de un factor adicional que dependa de la densidad para corregir definitivamente las medidas tomadas por esta cámara. La dependencia de este factor adicional con la densidad se describe bien mediante una función lineal.

La importancia de este efecto, además, depende de la cámara de ionización particular: es decir, la función lineal tiene distinta pendiente para cada cámara sometida a estudio.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

El efecto encontrado es de suficiente importancia como para no ser despreciado en ningún caso. De hecho, debería tenerse en cuenta incluso en ciudades que se encuentren cercanas al nivel del mar, ya que pueden ocurrir variaciones significativas en la densidad, debidas a cambios en la presión causados por variaciones climáticas, incluso si la temperatura se mantiene en valores típicos de la práctica clínica usual.

La variabilidad de los resultados para las distintas cámaras consideradas indica la necesidad de una evaluación independiente del efecto para cada cámara particular. Es por tanto necesario conocer la temperatura y presión a la que cada cámara fue calibrada. Esto implica que, como ya hacen algunos institutos de calibración, las condiciones

atmosféricas de presión y temperatura en el momento de la calibración deben de ser descritas en el certificado correspondiente emitido por el laboratorio de calibración de la SourceCheck.

Además, cada institución puede estudiar la respuesta particular de su cámara SourceCheck, y deducir su función correctora definitiva particular.

Actualmente estudiamos los motivos de este comportamiento mediante simulación Monte Carlo, y nuestros resultados preliminares indican que las medidas de esta cámara son muy sensibles a las características de su diseño. Es por tanto necesario cuidar este aspecto a la hora de la fabricación. El estudio mediante simulación Monte Carlo es importante para cualquier nuevo diseño de cámara y para las medidas posteriores una vez fabricada.



Application of spherical diodes for megavoltage photon beams dosimetry

Barbés B, Azcona JD, Burguete J, Martí-Climent JM
Med Phys 2014;41(1).

Benigno Barbés

Servicio de Radiofísica. Clínica Universidad de Navarra.
bbarbes@unav.es

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este artículo?

Es frecuente que los tratamientos de radioterapia externa usen distribuciones de dosis heterogéneas. El diseño de detectores para esas condiciones es complicado, y sigue siendo objeto de investigación. Deben ser de tamaño reducido, para mejorar la resolución espacial y disminuir la perturbación del haz. Han de tener también una respuesta uniforme con el ángulo de incidencia de la radiación. También es muy conveniente que sean robustos y económicos.

La empresa *Sphelar* comercializa unos diodos con geometría esférica, diseñados como fotocélulas para luz solar, con capacidad de absorber energía procedente de todas las direcciones del espacio. Su proceso de fabricación garantiza, *a priori*, una serie de características muy interesantes: una notable perfección geométrica y pureza de los materiales, un alto rendimiento, y una gran simplicidad de diseño.

Los diodos *Sphelarya* habían sido probados con éxito como detectores de radiación de fuentes de braquiterapia (20-28 keV). Nos pareció buena idea hacerlo también para radiación de megavoltaje. Había que comprobar si tenían buena respuesta a esas energías, y si los defectos inherentes a ese tipo de detectores no resultaban muy acusados. Si se cumplía esto, sus características los podían convertir en una buena herramienta para la dosimetría clínica.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades del trabajo?

No contábamos con experiencia en caracterización de detectores de semiconductor, de modo que tuvimos que comenzar con una amplia revisión bibliográfica a la vez que realizábamos las primeras pruebas con el diodo. Afortunadamente, encontramos directrices en el informe 87 de la AAPM. Por otra parte, apenas teníamos financiación para el estudio, de modo que casi todo el material para el dispositivo experimental tuvo que ser confeccionado por nosotros.

Empleamos diodos adquiridos directamente al fabricante, sobre los que tuvimos que realizar mínimas adaptaciones. El diodo responde mucho más a la luz visible que a los fotones de alta energía, por lo que lo cubrimos con cinta aislante y realizamos las medidas con las luces apagadas, comprobando que no había señal en ausencia de radiación. Como los diodos no son sumergibles, rodeamos algunos de una capa de epoxy para hacer medidas en agua. Por lo demás, los diodos *Sphelar* han demostrado ser muy robustos: a pesar de haber sido sometidos a golpes, mojaduras, soldaduras y altas irradiaciones, ninguno dejó de funcionar.

Para hacer el estudio de degradación del diodo con la irradiación previa, fue necesario someter al diodo a una dosis de 12 kGy, muy alta para un Linac. Probamos un irradiador de Cs, pero ese tipo de radiación casi no

degradaba el diodo. Dimos por fin con una empresa de irradiación industrial (Mevion Technology S.L., Soria) que se prestó a colaborar de modo altruista.

Para analizar la respuesta angular de un detector, lo más conveniente es medir en el eje de un maniquí cilíndrico. Buscamos trabajos en que se validaran diodos comerciales de distintas marcas: *Scanditronix*, *Sunnuclear* y *Standard Imaging*. En ellos se estudia la variación de respuesta al girar el haz en torno a un eje concreto, el de mejor respuesta del diodo: como es lógico, esos diodos (planos o cilíndricos) no tienen buena respuesta angular más que entorno a uno de sus ejes. En nuestro caso, queríamos comprobar que el Sphelar no tiene ejes privilegiados, por lo que era preciso medir la respuesta en torno a sus tres ejes. Para algunos de los ángulos, fue necesario construir un inserto específico para el maniquí comercial que empleamos.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Conviene tener en cuenta que el diodo que queríamos validar está diseñado para otro uso muy distinto, por lo que no tendría por qué tener una buena respuesta a la radiación de alta energía.

Dada la simetría esférica de los diodos, esperábamos encontrar una buena respuesta angular con la radiación. Las medidas lo confirmaron: el Sphelar tiene, en los tres ejes de giro principales, una homogeneidad semejante a la que tienen los otros diodos en su dirección privilegiada.

Por lo demás, encontramos otros resultados importantes no previsibles:

1. Una vez que ha recibido una pre-irradiación alta (12 kGy), el ritmo de degradación con la radiación es suficientemente bajo.
2. Aun después de someterlo a pre-irradiación, la señal del diodo es más alta que en otros diodos de tamaño similar. Tampoco varía significativamente con la dosis por pulso.
3. Tiene una precisión semejante a los otros diodos al medir factores de campo: sobre-respuesta en campos grandes, por la mayor proporción de radiación indirecta, que se puede corregir empleando un blindaje.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

El estudio ha demostrado la capacidad de un nuevo diodo para la medida de radiación de megavoltaje. Algunas de sus características (principalmente su simplicidad y su geometría esférica) suponen una gran ventaja sobre otros diodos. No hay que olvidar, además, que se pueden adquirir a un precio muy económico, y montar en la configuración que se desee.

Con posterioridad al artículo, una estudiante de ingeniería (Ana Olarte García) realizó su Proyecto de Fin de Carrera fabricando un sistema de control de los diodos, capaz de leer la señal, amplificarla, convertirla a digital, y enviar las medidas a un ordenador. Diseñó también un circuito para controlar varios detectores simultáneamente. Puso así las bases para el diseño de un sistema de dosimetría *in vivo*, o una matriz de detectores para control de calidad. Es justo agradecer a Ana su magnífico trabajo.

Los autores del artículo quedan a disposición de todo el que pueda estar interesado en el empleo de los diodos Sphelar, para ampliar información y transmitirles nuestra experiencia.



Study of the PTW microLion chamber temperature dependence

Gómez F, González-Castaño D, Díaz-Botana P, Pardo-Montero J
Phys Med Biol 2014;59(11).

Faustino Gómez

Dept. Física de Partículas. Facultad de Física. Universidad de Santiago.
faustino.gomez@usc.es

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este artículo?

Desde hace más de 12 años el Grupo de Investigación en Radiofísica de la Universidad de Santiago se ha dedicado al estudio, desarrollo y construcción de cámaras de ionización líquida. En el caso de cámaras de aire

abiertas el factor de corrección por presión y temperatura proviene de la variación de la densidad del aire. En el caso de las cámaras de ionización líquida la variación con la temperatura es consecuencia de la dependencia de la probabilidad de recombinación inicial entre el ión y el electrón producido en el seno del líquido con la temperatura. En un trabajo seminal de 1938 L. Onsager desarrolló un modelo de cómo se recombina un electrón con el ión del que proviene. Un electrón producido por la ionización en un medio como isoootano se detiene en el medio (termaliza) a una distancia muy corta de su ión original: apenas 20 nanómetros. En esta situación todavía siente el campo eléctrico de su ión y tiende a acercarse a él en una trayectoria al azar dominada por las colisiones de origen térmico. Cuando Onsager calculó la probabilidad de recombinación obtuvo que es mayor cuanto menor sea la temperatura, ya que la mayor agitación térmica contribuye a que el electrón no llegue a alcanzar el ión del que proviene. Así que antes de medir nos esperábamos que la señal aumente con la temperatura (al contrario que en las cámaras de aire) y podíamos calcular la pendiente de la señal con la temperatura mediante la teoría de Onsager. El objetivo primordial del trabajo era comprobar el modelo teórico y proveer a los usuarios de la cámara microLion del factor de corrección para la temperatura como magnitud de influencia.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades del trabajo?

Hubo algunos problemas con la reproducibilidad de las cámaras MicroLion. Aquí nos ayudaron los miembros del Hospital Universitario Regional de Málaga, especialmente D. Pedro Galán prestándonos una de sus cámaras para realizar más medidas. Por otra parte la medida a diferentes temperaturas con suficiente precisión requiere una realización exquisita del proceso de estabilización térmica. Para garantizar el control de temperatura y equilibrio térmico, la cámara estaba en un bloque metálico conectado a un módulo Peltier refrigerado por agua y el conjunto aislado térmicamente del exterior. El sistema de refrigeración por agua se desarrolló para el experimento consiguiendo una estabilidad de la temperatura por debajo de 0.1 °C. La inercia térmica del sistema implicaba que en cada paso de variación de 0.5 °C se necesitaba entre media y una hora de estabilización. Por eso la toma de datos se hizo mediante un programa que controlaba automáticamente todo el proceso de adquisición, variación de la temperatura, comprobación de la estabilidad de medida, encendido/apagado de la fuente de radiación, etc. Los datos se tomaron de manera automatizada en un período de más de tres meses trabajando con ciclos semanales de 24 horas al día. Se tomaron varios miles de medidas antes de hacer la publicación.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

En primer lugar hemos determinado una pendiente para la señal relativa de este tipo de detectores entorno a 0.24% K⁻¹. Esta dependencia es comparable a la de las cámaras de aire. ¡Aunque tiene el signo opuesto! Estos números estaban más o menos de acuerdo con lo que ya habíamos medido tiempo atrás (Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A Vol. 560, 584-588 2006). Sin embargo estábamos interesados en hacer el estudio en dos calidades diferentes de haz (Cobalto 60 y Rayos X de 50 kV) ¿Por qué? El modelo de Onsager es un modelo muy elemental: en él solo hay un ión y un electrón inmersos en un medio material homogéneo. En la realidad alrededor de las partículas cargadas en el medio se producen grupos de ionizaciones y en algún caso los iones y electrones pueden estar lo bastante cerca para que sus campos eléctricos interaccionen. Esto quiere decir que la situación real es algo diferente al modelo de Onsager sobre todo cuando el LET efectivo es elevado. En este estudio comparamos las distancias de termalización del modelo Onsager para diferentes calidades de haz y diferentes voltajes aplicados a la cámara de ionización líquida. Si el modelo reproduce los datos correctamente, la distancia de termalización no depende del campo externo aplicado. Esto es aproximadamente cierto en Cobalto pero en rayos X de baja energía vemos que hay discrepancias significativas. Este resultado muestra que existen efectos colectivos en la recombinación inicial tal y como ya indican otros trabajos precedentes.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

En el caso de usar las cámaras líquidas para dosimetría absoluta es fundamental medir la temperatura y corregir por su efecto en la lectura del detector. Si nuestro uso de estos detectores se centra en medidas de carácter relativo debemos evitar someterlos a bruscas variaciones de temperatura o gradientes térmicos. Finalmente, seguimos careciendo de una extensión de la teoría de Jaffe a medios densos que describa la recombinación inicial/columnar de manera consistente.



An algorithm to assess the need for clinical Monte Carlo dose calculation for small proton therapy fields based on quantification of tissue heterogeneity

Bueno M, Paganetti H, Duch MA, Schuemann J
 Med Phys 2013;40(8).

Marta Bueno

Departament de Dosimetria i Física Mèdica, Institut de Tècniques Energètiques.
 Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
marta.buenovizcarra@irsn.fr

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este artículo?

En los últimos años, la protonterapia ha ido ganando popularidad hasta convertirse hoy en día en una de las modalidades de radioterapia más atractivas. Las distribuciones de dosis en profundidad características de los haces de protones los convierten en grandes candidatos para el tratamiento del cáncer, ya que permiten conformar la dosis en el tumor reduciendo así la dosis integral comparado con la terapia con fotones. Esta indudable ventaja, sin embargo, refuerza el impacto que las incertidumbres durante el proceso de planificación y tratamiento tienen sobre la dosis impartida al paciente. De esta forma, los errores potenciales de cálculo de dosis o posicionamiento del paciente, por ejemplo, pueden tener consecuencias drásticas en la distribución de dosis y, por tanto, en la eficacia del tratamiento. Del abanico de fuentes de incertidumbre a tener en cuenta, una es la debida al cálculo de dosis en presencia de tejidos de alta y baja densidad, i.e. hueso o aire. Cuando el haz debe atravesar regiones altamente heterogéneas en el paciente, la fiabilidad de los algoritmos de cálculo de dosis analíticos se ve significativamente disminuida. Una de las posibles soluciones para sortear este obstáculo es la de recurrir a la simulación Monte Carlo que, habiendo sido validada previamente, ofrece una alta exactitud en la determinación de la dosis incluso en presencia de heterogeneidades. El tiempo del cálculo Monte Carlo de un tratamiento completo supera con creces el tiempo del que se dispone en la rutina clínica y, por eso, la simulación queda casi siempre reducida a estudios de investigación. Sin embargo, si el error de cálculo es significativo, es decir, supera cierto nivel de tolerancia preestablecido cuestionando la eficacia del tratamiento, el incremento en exactitud que ofrece la simulación Monte Carlo, compensa y justifica la inversión en tiempo de cómputo en beneficio del propio paciente. Llegados a este punto, la motivación de este estudio fue la de hallar un indicador de la exactitud del algoritmo de cálculo integrado en el sistema de planificación en la determinación de la dosis impartida al GTV para cada haz de protones, en base al nivel de heterogeneidad del tejido irradiado. El requisito indispensable de dicho indicador era el de cumplir con un tiempo de cálculo muy corto; la finalidad del mismo era la de detectar los casos potenciales para el cálculo Monte Carlo.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades del trabajo?

La definición e implementación del índice de heterogeneidad, al que nos referimos como H fue, en sí, uno de los grandes retos del trabajo. El cálculo de H no podía incumplir el único requisito impuesto de ser obtenido en un tiempo muy limitado. De otra forma, el estudio en sí carecería de sentido. Sin embargo, el cómputo de H está basado en la información del tejido que proporciona el CT del paciente voxel a voxel, y en la metodología del algoritmo *pencil beam* del planificador, por lo que el volumen de datos a tratar es significativo. Conseguir optimizar el método de cálculo de H fue uno de los grandes retos de este estudio. Asimismo, se limitó la validez del estudio a campos relativamente pequeños, es decir, haces cuyo diámetro estaba entre 2 y 7 cm. Si bien el cálculo de la distribución de dosis en el paciente para haces pequeños de protones requiere un tiempo razonable, la simulación Monte Carlo a través del cabezal hasta que éstos alcanzan la superficie del paciente es laboriosa y muy costosa en cuanto a tiempo de cálculo, lo que convierte al estudio en tedioso.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

El cálculo del índice H permite cuantificar la heterogeneidad del tejido irradiado en base a un cálculo de dosis tipo *pencil beam*. El valor de H para cada haz se obtiene como resultado de la contribución de cada *pencil beam* en menos de tres minutos. Comprobamos que existe una fuerte correlación entre el índice de heterogeneidad H y

los errores que comete el algoritmo de cálculo del sistema de planificación en la predicción de la dosis impartida en el GTV para campos pequeños de protones. La dependencia lineal entre ambas magnitudes permite estimar la incertidumbre en la dosis impartida al tumor en pocos minutos a partir del cálculo de H. Así, H señala la necesidad potencial de recurrir a la planificación del tratamiento mediante el cálculo Monte Carlo a fin de asegurar que la incertidumbre se mantiene dentro del nivel de tolerancia establecido en beneficio del propio paciente.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Este hallazgo tiene repercusiones directas en la práctica clínica. El índice H es un método eficiente y efectivo para seleccionar aquellos casos para los que el beneficio potencial que puede ofrecer el cálculo Monte Carlo en cuanto a la exactitud de la dosis impartida en el tumor, compensa un tiempo de cómputo más largo. De esta forma, H puede implementarse en la rutina clínica como un indicador potencial de la necesidad de la verificación Monte Carlo del plan de tratamiento, sin interferir ni interrumpir el flujo de trabajo.