

Comparación entre la metodología de reconstrucción de espectros por transmisión y por dispersión, ambas basadas en imágenes tomadas con EPID

B. Juste¹, R. Miró¹, A. Jambrina¹, JM. Campayo², S. Díez², A. Santos³, G. Verdú¹

*1 Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM),
Universitat Politècnica de València
Camí de Vera, s/n 46022, Valencia, Spain*

*2 Hospital Clínic Universitari de València, Avda. Blasco Ibáñez, 17. Valencia. 46010,
España*

2 Hospital Provincial de Castellón.

bejusvi@iqn.upv.es

Resumen –Se han publicado numerosos métodos para la reconstrucción de espectros de fotones emitidos por Linac; algunos de ellos se basan en el análisis de datos de transmisión y otros en datos de dispersión. En este trabajo, se comparan los dos enfoques de deconvolución de espectros con el fin de validar experimentalmente su robustez y determinar cuál es la metodología óptima para su aplicación en una rutina de garantía de calidad clínica. Ambos métodos estudiados se basan en imágenes EPID generadas cuando el haz de fotones incide sobre un bloque de plástico. Se midió la distribución de la radiación transmitida/dispersada producida por este objeto centrado en el tamaño de campo del haz. Las mediciones se realizaron utilizando un haz de fotones de 6 MeV producido por el acelerador lineal. Las mismas condiciones de distribución de radiación también se simularon con código Monte Carlo para una serie de haces de fotones monoenergéticos en ambos casos (metodología de transmisión y dispersión). Dos sistemas de ecuaciones lineales fueron generados para combinar las mediciones polienergéticas con el EPID con los resultados de simulación monoenergéticos. Se aplicaron técnicas de regularización para resolver los sistemas y obtener el espectro fotónico incidente. Se presenta una comparación entre la reconstrucción espectral basada en datos de la transmisión y la reconstrucción espectral en base a datos de dispersión, que ambos hemos desarrollado utilizando imágenes EPID. Está demostrado que los resultados de reconstrucción basados en transmisión ofrecen mucho mejor ajuste con las predicciones teóricas.

1. INTRODUCCIÓN

Poner La importancia de una metodología de caracterización de espectros de fotones emitidos por Linac ha sido reportada a menudo [1]. El objetivo es proporcionar los medios periódicos de aseguramiento de la calidad, mejorar la exactitud dosimétrica en los tratamientos y para la optimización de los dispositivos de Imagen Portal Electrónica (EPID). Además, los sistemas de planificación de tratamiento 3D actuales usan algoritmos que requieren un conocimiento preciso del espectro emitido por el Linac para realizar adecuadamente los complicados cálculos dosis que involucran medios no homogéneos, falta de equilibrio electrónico y campos multiláminas modificando las mordazas.

La reconstrucción espectral por análisis de atenuación ha recibido recientemente una atención considerable. El método consiste en medir la transmisión de un haz a través de diversos espesores de material y obtener a partir de los datos registrados la distribución de energía espectral del haz [2], [3]. La medición de transmisión o curvas de dosis en profundidad es razonablemente fácil de realizar en cualquier unidad de radiofísica y puede ofrecer además un control rutinario de los espectros emitidos si se establece una metodología de reconstrucción que describa confiablemente el espectro para la gama completa de las energías del haz que emite el Linac.

Por otro lado, existen métodos de reconstrucción espectral alternativos basados en datos de dispersión y que requieren menos mediciones [4], [5]. Este método consiste en la irradiación de un plástico y determinar la distribución espectral emitida del haz primario basándose en la medida de dispersión de la radiación alrededor del plástico en varias posiciones específicas de dispersión, obteniendo una curva de dispersión que es característica del espectro primario emitido.

Este trabajo compara el desarrollo preliminar de estas dos alternativas de métodos de reconstrucción espectral y valida la superioridad del método basado en datos de transmisión. El método matemático es similar en ambos casos y se basa en una matriz lineal construida por simulaciones de Monte Carlo de la transmisión (método basado en Transmisión) / dispersión (método basado en dispersión) para un conjunto de haces de fotones monoenergéticos consecutivos. Mediciones con el EPID junto con la matriz de simulación constituyen el modelo matemático que relaciona la radiación transmitida/dispersada para determinar la distribución de la energía del haz principal.

El EPID utilizado en este trabajo consiste en un detector de matriz de silicio amorfo que se utiliza especialmente para verificación de la colocación del paciente. Mostramos en este artículo las ventajas de utilizar este EPID como alternativa para la verificación de espectro.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Las dos metodologías de determinación de un espectro de radiación de frenado propuestas en este trabajo se basan en una combinación de simulaciones de haces monoenergéticos, y medidas polienergéticas y un modelo matemático que consiste en un sistema matricial de ecuaciones. Las simulaciones monoenergéticas y la metodología matemática de resolución de la matriz se generan inicialmente, y luego el método de reconstrucción del espectro puede ser aplicado para cualquier haz dentro de la gama de energías disponibles en el Linac, tomando únicamente nuevas medidas con el EPID [6].

2.1. Procedimiento experimental

Todas las adquisiciones de las medidas y las imágenes fueron realizadas con un acelerador lineal *Elekta Sli Precise* con un haz de fotones de 6 MeV y con un ajuste de tasa de dosis de 100 unidades de monitor (UM).

El *iView GT EPID (Elekta)* [7] se basa en el panel detector de silicio amorfo XRD 1640 (Perkin-Elmer Optoelectronics, Fremont, CA) con una distancia fija fuente-detector (*Source Detector Distance*, SDD) de 160 cm y una zona de detección de 46 x 46 cm. Este sistema tiene una resolución de 1024 x 1024 píxeles. Se adquirieron imágenes portales manteniendo el ángulo en 0° en las condiciones mencionadas de irradiación utilizando el

software comercial de iViewGT. Todas las imágenes se obtuvieron mediante la integración de los *frames* adquiridos durante la dosis total recibida. Se estimó que el número de fotogramas integrado durante la emisión del haz oscila entre 40 y 50, cuando se usa 100 unidades de monitor.

2.1.1. Mediciones para la metodología de transmisión

El montaje experimental presentado en la figura 1 implica la adquisición de imágenes usando un tamaño de campo cuadrado de 20 cm x 20 cm en el isocentro y seguido por varias imágenes de bloques diferentes de agua sólida (de 2 cm de espesor a 20 cm, en incrementos de 2 cm), manteniendo una distancia desde la fuente al isocentro de 100 cm. Hemos seleccionado estos espesores de bloques de agua para obtener una gama de intensidades de gris amplia.

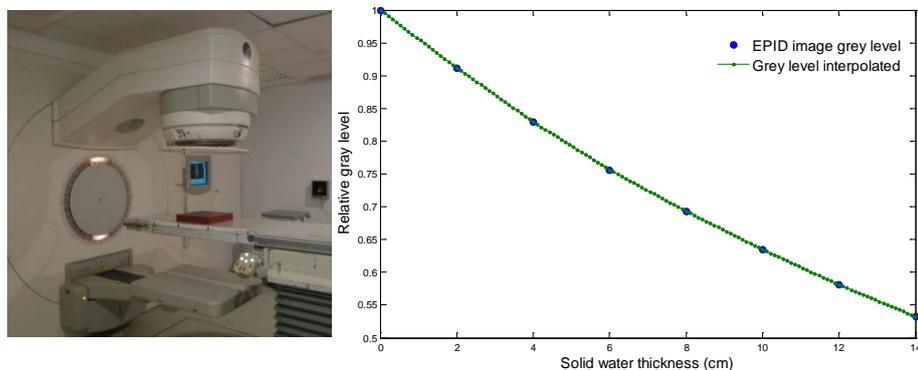


Figura 1. Procedimiento experimental para la adquisición de imágenes por transmisión. Curva de atenuación obtenida con diferentes bloques de agua sólida.

La figura 1 muestra la curva de atenuación relativa obtenida después de que se analizaron todas las imágenes (de 2 cm a 14 cm de espesor de bloque). Para cada espesor de bloque se midió la respuesta EPID como el valor promedio de píxeles en una región de interés de 1 x 1 cm en el centro de la imagen. Los datos para cada detector se normalizaron con la imagen de blanco (sin bloque).

2.1.2. Mediciones para la metodología de dispersión

En este enfoque se diseñó un experimento para determinar el espectro de energía de fotones, basado en la radiación dispersa medida en distintas posiciones generadas por un bloque de dispersión.

El montaje experimental consiste en la adquisición de imágenes usando un tamaño de campo cuadrado de 10 cm x 6,3 cm en el isocentro. Las imágenes obtenidas con el EPID muestran la radiación del haz primario diseminado alrededor del paralelepípedo plástico de 10 cm x 10 cm x 20 cm situado en la superficie superior del EPID y a una distancia de 157 cm de la fuente. PMMA (polimetilmetacrilato) es el material elegido para el medio de dispersión debido a su bajo número atómico, lo que es necesario para que la dispersión Compton sea el tipo de interacción dominante en el intervalo de energía del espectro de 6 MeV.

La figura 2 muestra la columna analizada con los valores de los píxeles para estudiar la dispersión producida. Las mediciones se repitieron dos veces, con y sin el dispersor. La curva roja corresponde a los valores de la sustracción de las imágenes anteriores. La figura también muestra los valores de niveles de grises para estas columnas, que representan la radiación dispersada a 8,5 cm desde el centro del bloque. La curva roja fue entonces normalizada al valor máximo.

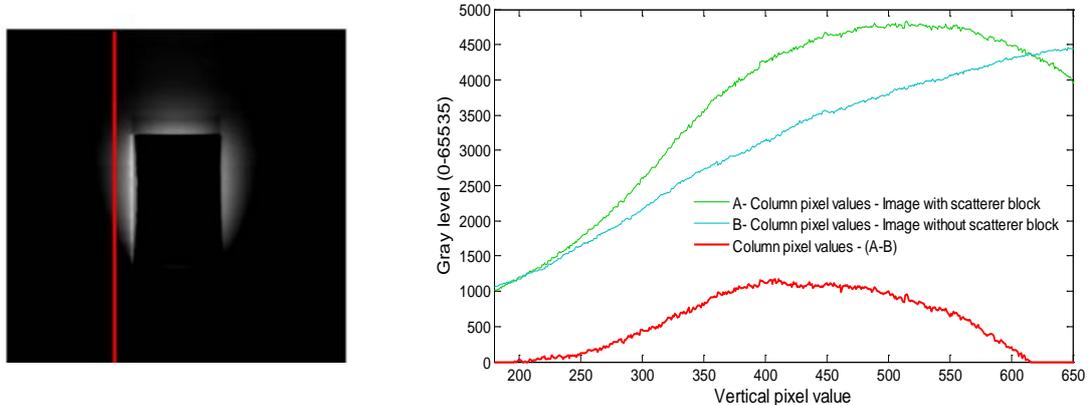


Figura 2. Imágenes EPID obtenidas con y sin bloque dispersor usando un haz de fotones de 6MeV y un tamaño de campo de 10 cm x 6.3 cm. Valores de gris en la curva de dispersión.

2.2. Simulación Monte Carlo

El método de Monte Carlo es ampliamente utilizado para la simulación de transporte de partículas a través de diferentes materiales. El código utilizado en este trabajo es el MCNP versión 5 [8]. El MCNP5 fue utilizado para simular el transporte de la radiación de haces monoenergéticos garantizando las mismas condiciones y con tamaño de campo idénticos a las utilizadas en las medidas experimentales.

La geometría detallada del cabezal de la unidad principal de tratamiento *Elekta Precise* (funcionando con un haz de fotones de 6 MeV), los bloques de agua sólida/PMMA y el EPID de silicio amorfo se han modelizado con precisión según los datos del fabricante. La validación del modelo MLC Linac fue validada previamente mediante curvas de dosis en profundidad en una cuba de agua [9], [10].

La relación entre la dosis y la respuesta EPID debe considerar la difusión de los fotones ópticos generados en la capa centelleadora encima de los fotodiodos. Se simuló imágenes EPID para un conjunto de bloques de agua sólida de espesores variables y los datos fueron convertidos a valores de dosis mediante una matriz de calibración desarrollados en trabajos anteriores [11]. La respuesta de la cámara en la capa sensible del detector se simuló en las mismas condiciones de irradiación que se hizo el procedimiento experimental. La respuesta del detector EPID utilizado en este trabajo es plana sobre la región de energía de interés.

Para registrar la contribución de fotones y electrones se ha utilizado el *FMESH tally de fluencia y se ha colocado en la capa GOS (aleación de Gadolinio) del EPID, que representa la parte activa del detector. 10^9 partículas fueron simuladas para cada haz de energía. Cada simulación Monte Carlo se ejecutó hasta que la incertidumbre en todos los

puntos evaluados fue menor de 0.3%, pasando así todas pruebas estadísticas internas de MCNP.

2.2.1. Método de Transmisión

La figura 3 representa la matriz de respuesta (Dim 134 x 134) con intervalo de energía entre 0-6,7 MeV. Los resultados se normalizan al valor máximo. Cada curva de atenuación (escalonada en 134 puntos desde 0 a 14 cm) se calculó mediante simulación para cada haz monoenergético.

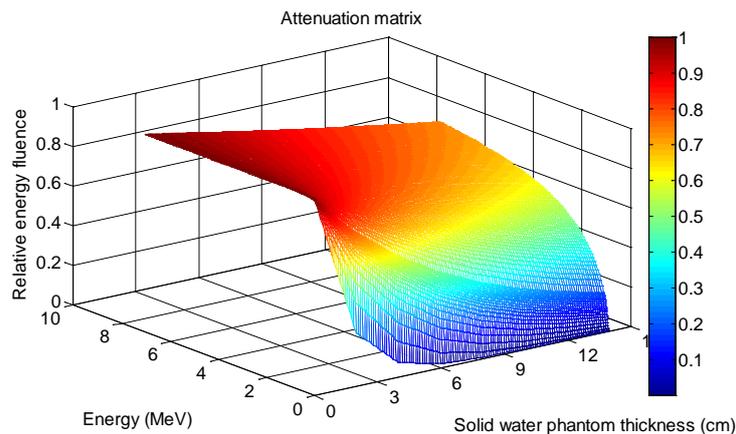


Figura 3. Resultados obtenidos por simulación para la matriz de transmisión.

2.2.2 Método de dispersión

Se han simulado haces monoenergéticos y se han registrado los fotones dispersados generados en cada píxel. Los resultados de la dispersión para cada haz monoenergético se muestran en la figura 4. Cada valor de dispersión se generó restando la salida de tally de un voxel específico en una posición específica por el valor del mismo punto simulado sin bloque. El conjunto de datos se normalizó al valor máximo.

La resolución de píxeles del modelo Monte Carlo EPID se estableció en 0,5 x 0,5 cm para permitir la buena exactitud estadística en el cálculo de dosis.

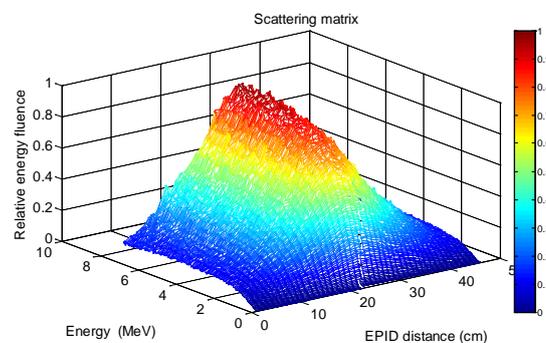


Figura 4. Matriz de dispersión obtenida por simulación.

2.3. Problema inverso de Regularización de la matriz

Una ecuación de Fredholm de primera clase fue propuesta para caracterizar la transmisión/dispersión como se muestra en la ecuación 1. Esta ecuación es similar en principio y aplicación tanto al método basado en la transmisión como al de la dispersión, con la excepción de que la matriz de atenuación se sustituye por la matriz de dispersión y la curva de atenuación obtenida con el EPID se reemplaza con la curva de dispersión (descrita anteriormente).

$$E(x) = \int_0^{E_{max}} A_E(x) S(E) dE \quad (1)$$

$S(E)$ es el espectro de energía de fotones, en este caso desconocido. Para el método basado en Transmisión, la matriz $A_E(x)$ es una función que representa el componente de fluencia de energía relativa transmitido con un bloque plástico de espesor x y fue derivado de las simulaciones Monte Carlo y $E(x)$ es la curva de atenuación EPID en espesores diferentes bloque x . Para el método basado en la dispersión, la matriz de $A_E(x)$ es una función que representa el componente de fluencia de energía relativa dispersado en la posición x y también se derivó de las simulaciones Monte Carlo y $E(x)$ mide en este caso la señal de dispersión EPID en la posición x .

El problema se transforma en un sistema de matrices discretas:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot S_1 + a_{21} \cdot S_2 + \dots + a_{M1} \cdot S_M &= E_1 \\ a_{12} \cdot S_1 + a_{22} \cdot S_2 + \dots + a_{M2} \cdot S_M &= E_2 \\ \vdots & \\ a_{1N} \cdot S_1 + a_{2N} \cdot S_2 + \dots + a_{MN} \cdot S_M &= E_N \end{aligned} \quad (2)$$

Donde E_1, E_2, \dots, E_N son las lecturas del EPID, S es la fluencia energética en los diferentes intervalos de energía y a_{ij} son los elementos simulados que componen la matriz A .

Este problema se considera mal condicionado puesto que la inversión directa no tiene solución con sentido. Los problemas mal condicionados son comunes en física y aplicaciones de ingeniería. Tales problemas están altamente afectados por errores de medición, donde ligeros cambios en los datos medidos pueden producir efectos drásticos sobre la solución inversa calculada.

Sin embargo, se puede demostrar que el espectro puede ser recuperado con una precisión aceptable después de rectificación mediante técnicas de regularización. En este trabajo se ha utilizado la regularización Tikhonov descrita por Hansen [12].

3. RESULTADOS

Poner el apartado siguiente aquí. Poner el apartado siguiente aquí.

Las figuras 5 y 6 muestran el espectro reconstruido obtenido utilizando la metodología de deconvolución basado en transmisión y dispersión respectivamente junto con su correspondiente límite superior de tolerancia (*Upper Tolerance Limit*, UTL) y límite de tolerancia inferior (*Lower Tolerance Limit*, LTL) para una distribución uniforme de incertidumbre en media y FWHM de 0.95%, usando límites de tolerancia doble con muestras de 100 casos [13].

Los espectros resultantes eran cualitativamente similares a los establecidos por los límites y coherentes con el comportamiento esperado.

Sin embargo se aprecia que ambos espectros ajustan entre los dos límites para energías más altas (más allá de 2 MeV), aunque el método basado en Dispersión muestra un pico más suave en comparación con los establecidos por UTL y LTL. A energías más bajas (0-2 MeV) la diferencia máxima entre el espectro reconstruido basado en Dispersión y los límites de tolerancia es de 10%. Puesto que la diferencia máxima entre el espectro reconstruido basado en el método de transmisión y los límites de tolerancia es inferior al 5% en todos los puntos evaluados, podemos establecer que la metodología de transmisión es la opción óptima para deconvolucionar espectros.

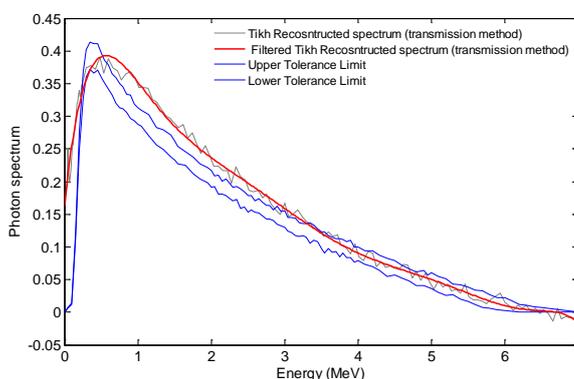


Figura 5. Espectro reconstruido utilizando la metodología de transmisión junto con los límites UTL y LTL

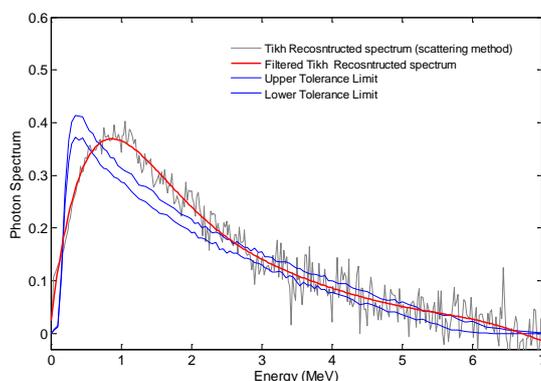


Figura 6. Espectro reconstruido utilizando la metodología de dispersión junto con los límites UTL y LTL

El objetivo de este trabajo ha sido demostrar una primera aproximación de la viabilidad de la reconstrucción de un espectro usando una tecnología mixta experimental-Montecarlo basada en imágenes EPID asociadas al Linac. Además se ha determinado que metodología de transmisión describe con más fiabilidad el espectro de fotones sobre toda la gama de energías de haces.

Los trabajos futuros se dirigirán hacia la mejora de la exactitud de los resultados obtenidos. Para eso, varios aspectos se tomarán en cuenta, como la limitación por el hecho de que la señal se detecta en el material de centelleo EPID (GOS) y el MCNP5 no se puede tomar en cuenta y registrar los fotones de luz creados en esta capa. Sin embargo, la técnica ha utilizado datos relativos suponiendo que la cantidad de fotones de luz generada es proporcional a la radiación recibida. Futuros trabajos utilizarán la metodología del adjunto para resolver este problema.

4. CONCLUSIONES

Para caracterizar el espectro primario de fotones emitido por un acelerador lineal, se obtuvo la función de respuesta del proceso. Esta función se aproxima por una matriz que contiene toda la información necesaria para obtener el espectro primario a partir de la curva de atenuación/dispersión tomada experimentalmente con un sistema EPID.

Un problema importante en el proceso de deconvolución es obtener la inversa de la matriz de respuesta. Una matriz pseudoinversa basada en el método TSVD fue utilizada para obtener una buena aproximación de la matriz inversa. Esta metodología matemática puede obtenerse fácilmente y permite una reconstrucción exacta y rápida del espectro primario.

AGRADECIMIENTOS

Poner los agradecimientos aquí. Queremos expresar nuestro agradecimiento al "Hospital Clínic Universitari de Valencia" y al "Hospital Provincial de Castellón" por la ayuda prestada.

REFERENCIAS

- [1] P. Bloch, M D. Altschuler, Bj"arngard, "Determining clinical photon beam spectra from measured depth-dose curve with the Cimmino algorithm", Phys. Med. Biol. Vol. 45, 2000, pp.171-83.
- [2] P. M. Charland, L. D. Paniak, "Enhanced bremsstrahlung spectrum reconstruction from depth-dose gradients". Physics in Medicine & Biology, 14, 2005, pp. 3245-3262.
- [3] B. Juste, R. Miró, G. Verdú, "6 and 15 MeV photon spectra reconstruction using an unfolding dose gradient methodology". IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, n1, 2011, pp 129-132.
- [4] WT. Jalbout, NM. Spyrou, "Spectral reconstruction by scatter analysis for a linear accelerator photon beam" Phys Med Biol. 51(9), 2006, pp. 2211-24.
- [5] G E. Desobry et al., "Bremsstrahlung review: an analysis of the Schiff spectrum," Med. Phys. Vol.18, 1991, pp.497-505
- [6] M. Partridge, "Reconstruction of megavoltage photon spectra from electronic portal imager derived transmission measurements" Phys. Med. Biol. 45, 2000.
- [7] Elekta Oncology Systems. Elekta iView GT brochure - Information for Monte Carlo Modeling of the iView MV portal imager. Document nº 4513 371 0483 03. Elekta Limited.
- [8] X-5 Monte Carlo team, "MCNP – A General Monte Carlo NParticle Transport Code, Version 5", LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, April 2003.

- [9] Juste B., Miró R., et al., Comparison of experimental dose curves in a heterogeneous phantom with results obtained by MCNP5 simulation and treatment planning tools. Applied Radiation and Isotopes. Vol. 68, 2010, pp. 913-917.
- [10] Juste B., Miró et al. Experimental validation of an accurate multileaf collimation (MLC) Linac simulated by Monte Carlo. Applied Radiation and Isotopes. ISSN: 0969-8043. Vol. 68, 2010, pp. 4.
- [11] B. Juste, D. Morera, R. Miró, G. Verdú, et al., "MCNP5 Monte Carlo simulation of amorphous silicon EPID dosimetry from MLC radiation therapy treatment beams" IEEE Engineering in Medicine and Biology Society ISSN: 0739-5175, 2012
- [12] P.C. Hansen, "Regularization Tools: A Matlab package for analysis and solution of discrete ill posed problems", Numerical Algorithms, Vol. 6, 1994, pp. 1-35.
- [13] B. Juste, R. Miró, G. Verdú, R. Macián. "Uncertainty and sensitivity analysis of the effect of the mean energy and FWHM of the initial electron fluence on the Bremsstrahlung photon spectra of linear accelerators", Appl Radiat Isot., 7, 2012, pp.1267-71.