

## **Reconstrucción de Espectros de Aceleradores Lineales Clínicos**

**Oyardo, J.P.<sup>1</sup>, Costa, A.M.<sup>1</sup> y Amaral, L.L.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Física, Facultad de Filosofía, Ciencias y Letras de Ribeirão Preto, Universidad de São Paulo

<sup>2</sup> Servicio de Radioterapia del Hospital Das Clinicas de la Facultad de Medicina de Ribeirão Preto, Universidad de São Paulo

### **RESUMEN**

El conocimiento del espectro de rayos X es fundamental para el cálculo de la dosis en pacientes usando sistemas de planeamiento del tratamiento en Radioterapia (TPS). Actualmente los Sistemas de Planeamiento de Tratamientos (Treatment Planning System) usan poderosos algoritmos de Monte Carlo para el cálculo de la dosis para mejorar la precisión en la obtención de la dosis administrada a un paciente con tratamiento de radioterapia, estos algoritmos requieren que el espectro de rayos X sea conocido.

En este trabajo se ha obtenido el espectro de fluencia de fotones de Rayos X de un Acelerador Lineal Siemens ONCOR de 6 MV usando un método de carácter inverso para la reconstrucción de los espectros a partir de las curvas de transmisión de fotones medidas para diferentes espesores de bloques de aluminio cobre y plomo. El método usado para la reconstrucción de los espectros es una técnica estocástica conocida como Templado Simulado Generalizado (Generalized Simulated Annealing), basado en el trabajo de la estadística de cuasi-equilibrio de Tsallis que tiene como principio la generalización de la estadística de Gibbs-Boltzman empleada conjuntamente con el método de templado de metales. Para implementar el método de reconstrucción hemos construido un programa en C++ que implementa la técnica de Generalized Simulated Annealing.

**Palabras Claves:** Templado Simulado Generalizado, Espectro de Fluencia de Fotones, TPS.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La Radioterapia es una técnica de tratamiento clínico que usa radiación ionizante de alta energía para eliminación de tumores y células cancerígenas, puede ser usada como terapia adyuvante después de la cirugía para lograr un mejor control tumoral a través de las dosis de radiación. Debido a las altas energías de radiación que se emplean en un tratamiento de radioterapia se necesita precisión y control exacto de la dosis suministrada al paciente que recibe un tratamiento; ante esta necesidad la Comisión Internacional de Unidades de Radiación ICRU [6] [7] establece una diferencia porcentual máxima de -5% a 7% entre la dosis prescrita y la dosis administrada para el volumen de tratamiento.

Los sistemas de planificación del tratamiento TPS "Treatment Planning System" usan técnicas de Monte Carlo [14] para calcular la dosis administrada al paciente en un tratamiento, pero para que este cálculo sea preciso se requiere conocer el espectro de fluencia de fotones que entrega la máquina de tratamiento o Acelerador lineal [15][16]. En este trabajo nosotros calculamos el espectro de fluencia de fotones [1] de un acelerador lineal de

---

<sup>1</sup> E-mail del Autor. Johnp067@usp.br

uso clínico de 6 MV usando el método de generalized Simulated Annealing [17] que es un método para encontrar el mínimo de la función de costo de un sistema.

El método de reconstrucción espectral corresponde matemáticamente a un problema no lineal inverso “ill posed problems” [5], cuya solución requiere potentes algoritmos de optimización y una buena función de regularización. La fluencia de fotones puede obtenerse a partir de datos de transmisión, [2][3][4][12] y usando los coeficientes de atenuación para fotones NIST [13].

A partir del espectro de fluencia obtenido se puede calcular los valores de la energía media, el coeficiente de atenuación medio entre otras cantidades de interés para el haz clínico como el porcentaje de dosis en profundidad PDD, y los índices de calidad TPR<sub>20/10</sub>, PDD<sub>20/10</sub> [8].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección presentamos un breve fundamento teórico para el cálculo de la fluencia de fotones y el método Generalized Simulated Annealing – GSA, así mismo describimos la obtención de las curvas transmisión para diferentes materiales aluminio, cobre, plomo y observamos el método usado para determinación del espectro del Acelerador.

### 2.1. Determinación de la Fluencia de Fotones

La fluencia de fotones [1] puede ser calculada usando un método de carácter inverso a partir de los coeficientes de atenuación másico [13] y los datos de las curvas de transmisión medidas [4][12]. Consideramos un haz de rayos X con fluencia no atenuada  $\phi_E(E)$  que después de cruzar un cierto número de atenuadores con espesuras  $t_1, t_2, \dots, t_n$  y densidades  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  de un material se tiene la fluencia atenuada  $\phi'_E(E)$  en la ecuación (1).

$$\phi'_E(E) = \phi_E(E) \exp \left[ -\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \sum_{j=0}^n \rho_j t_j \right] \quad (1)$$

En que  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$  es el coeficiente de atenuación para un cierto material cual depende de la energía.

#### 2.1.1. Método de Generalized Simulated Annealing (Recozimento simulado)

Es un método estocástico que permite encontrar el mínimo de La función de costo  $f(\phi_{trial})$  del sistema de la ecuación (2), mediante el uso de un esquema de enfriamiento de la temperatura que permite alcanzar su estado cristalino de mínima energía. El método consiste en suponer una solución inicial para la fluencia  $\phi_{trial}$  y encontrar nuevas soluciones validadas por el criterio de Metrópolis [12,17].

$$f(\Phi_{trial}) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} [T^{(n)} - S^{(n)}]^2 + \frac{\lambda}{k-2} \sum_{s=1}^{k-1} |\tilde{\Phi}_{trial}^{(s)} - \tilde{\Phi}_{trial}^{(s-1)}| \quad (2)$$

$\tilde{\Phi}_{trial}$  es una fluencia de ensayo normalizada obtenida a partir de dividir cada uno de los elementos de  $\Phi_{trial}$  por el máximo calculado  $\max(\Phi_{trial})$ ,  $T^{(n)}$  es la transmisión calculada [12] y  $S^{(n)}$  es una transmisión medida,  $\lambda$  es un parámetro de regularización  $m$  es el número de medidas hechas de transmisión,  $k$  es el número de canales de energía para la reconstrucción del espectro. La temperatura controla el proceso de recocimiento y decrece de acuerdo a un esquema de enfriamiento dado por  $T_v^{(t)} = \alpha^t T_v^{(0)}$  donde  $\alpha \in (0, 1)$  es la tasa de enfriamiento, así mismo existe otro esquema de la temperatura visitante  $T_v^{(t)}$  de la ecuación (3) donde  $\ln_{q_v}$  es la función logaritmo generalizado [17].

$$T_v^{(t)} = T_v^{(0)} \frac{\ln_{q_v}(2)}{\ln_{q_v}(t+1)} \quad (3)$$

### 2.1.2. Implementación del Método

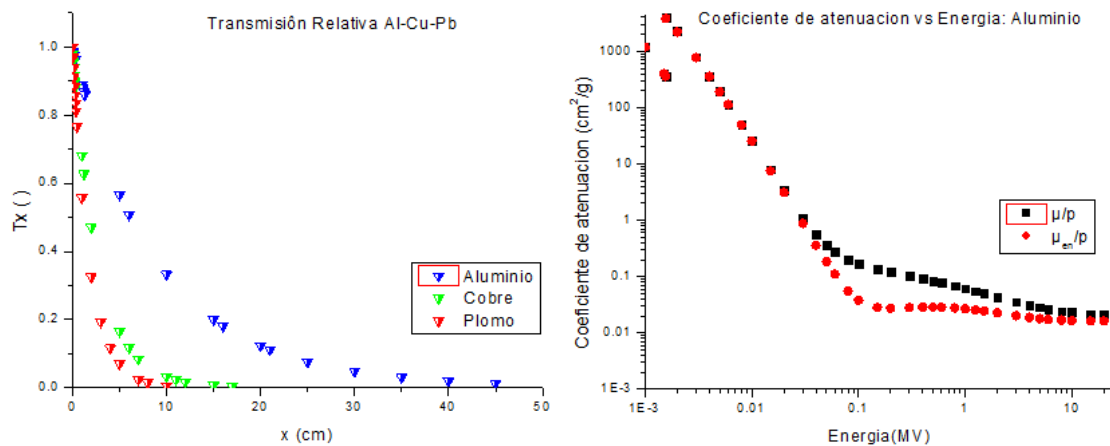
Como primer paso para la realización de nuestro trabajo se hizo la medición de las curvas de transmisión [9,11] para fotones en el acelerador lineal PRIMUS ONCOR de energía nominal de 6 MV, para eso hemos empleado atenuadores de diferentes espesores de aluminio cobre y plomo previamente preparados para el experimento en la oficina mecánica do departamento de Física da FFCLRP-USP. Las curvas de transmisión fueron medidas con una cámara de ionización FARMER FC65-G unida a un electrómetro IBA-DOSE1 calibrados y que son usados en medidas de control de calidad en el Servicio de Radioterapia del Hospital Das Clinicas de la Facultad de Medicina de Ribeirão Preto, tomándose el registro de la lectura del electrómetro para la carga producida en la cámara de ionización en nC después de que haz transmitido pasa a través de los diferentes espesores de atenuadores de cada material. Luego se hicieron las graficas normalizadas de la transmisión que se observan en la **figura 2.a**. Posteriormente obtuvimos los coeficientes de atenuación másico y coeficientes de atenuación másico en energía de la **figura 2.b** que han sido previamente medidos por el National Institute of Standards and Technology- NIST [13]

Las medidas de transmisión fueron normalizadas y insertadas en un archivo para ser procesado por nuestro programa escrito en C++ cual realiza el ajuste de la transmisión medida y la transmisión calculada para luego obtener el espectro de fluencia de fotones con base al algoritmo de Generalized Simulated Annealing NISBET [12] y TSALLIS [17].

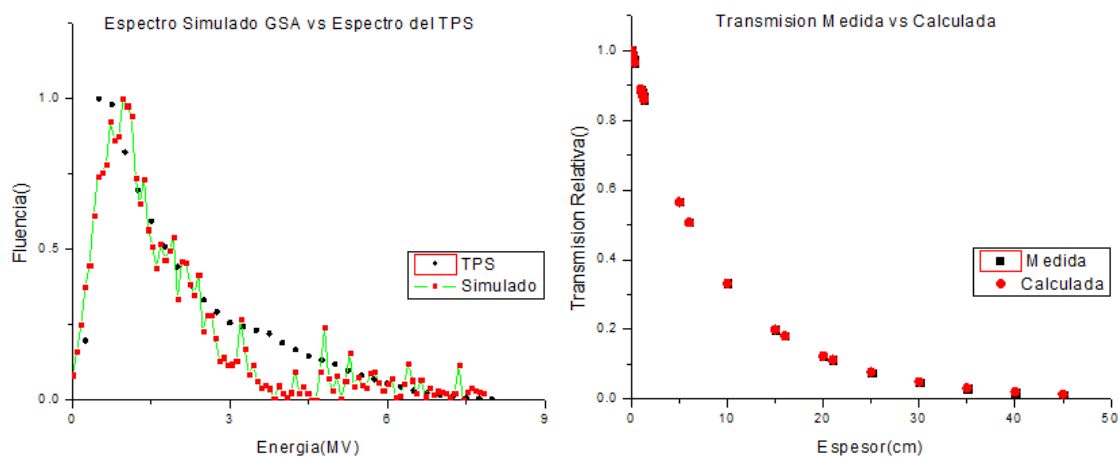
Se han realizado diferentes pruebas con el algoritmo de Generalized Simulated Annealing construido para su validación previa mediante la minimización de funciones previamente conocidas y luego hemos implementado este algoritmo en la reconstrucción de espectros de nuestro interés.

## 2.2. RESULTADOS

En la **figura 2.a** presentamos las curvas de transmisión medidas para fotones en el acelerador lineal PRIMUS ONCOR de energía nominal de 6 MV, para diferentes espesores de atenuadores de aluminio cobre y plomo. En la **figura 2.b** los coeficientes de atenuación másico y coeficientes de atenuación másico en energía que han sido previamente medidos por el National Institute of Standards and Technology- NIST [13]



**Figura. 2.a.** (Izquierda) Mediciones de transmisión hechas en el acelerador lineal Siemens Primus de 6 MV. **Figura. 2.b.**(Derecha) Coeficientes de Atenuación másico y coeficiente de atenuación másico en energía para Aluminio en función de la energía para fotones de 0 a 20 MV .



**Figura 3.a.** (Izquierda) Espectro de fotones del Acelerador Lineal Siemens Primus obtenido por la técnica de Simulated Annealing. **Figura 3.b.** (Derecha) Comparación de la transmisión medida y la transmisión calculada para diferentes espesores de Aluminio.

En la **figura 3.b** se observan las curvas de transmisión obtenidas por el método de simulated annealing y la comparación de estas curvas con las curvas de transmisión medidas en el acelerador Siemens Primus de 6 MV para aluminio, se observa el perfecto ajuste de la transmisión medida con la transmisión calculada por simulated annealing. En la **figura 3.a** se observa el espectro de fluencia de fotones del acelerador lineal siemens Primus reconstruido por la técnica de simulated annealing, también en la misma figura se observa en puntos negros el espectro de fluencia obtenido del planificador TPS XiO 4.62.00; de la comparación de estas dos curvas se puede observar que existe un buen acuerdo con los resultados obtenidos para la fluencia simulada por simulated annealing. Los parámetros seleccionados fueron el número de canales  $k = 101$ , número de iteraciones máximo  $t_{max} = 200$ , número de soluciones de ensayo en cada iteración  $n_r = 100$ , valor del parámetro de generalización  $\tilde{q}_V = 1.6$ , parámetro de regularización  $\lambda = 0.0004$  y el coeficiente de la tasa de enfriamiento  $\alpha = 0.9$ . En la **tabla 1** hemos resumido el cálculo de la energía media para el espectro obtenido dando un resultado de 1.93 MV que es un valor muy aproximado a la energía media obtenida del espectro del planificador TPS que da un valor de 2.075 MV. Aun esta decir que la discordancia entre estos valores de la energía media pueden ser mejorados y se deben a la pequeña desviación que se observa entre los espectros simulado por GSA y obtenido del TPS para los parámetros abajo mencionados en la región entre 3 y 5 MV.

**Tabla 1. Resultados obtenidos de la simulación**

k	t_max	$n_r$	$\tilde{q}_V$	$\lambda$	$\alpha$	Energía Media(MV)
101	200	100	1.6	0.0004	0.9	1.93

### 3. CONCLUSIONES

La técnica GSA ó Generalized Simulated Annealing es una potente herramienta para la minimización de funciones de costo que puede ser usada en la reconstrucción de espectros de aceleradores lineales clínicos con el fin de obtener parámetros relacionados al haz clínico y compararlos con los datos medidos en la rutina clínica.

#### 4. REFERENCIAS

1. ATTIX, F.H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1986.
2. BAKER, C.R., and PECK, K.K. "Reconstruction of 6 MV photon spectra from measured transmission including maximum energy estimation". *Physics in Medicine and Biology*, **42**:2041-2051, 1997.
3. CATALA, A.; FRANCOIS, P.; BONNET, J.; and SCOUARNEC, C. "Reconstruction of 12 MV bremsstrahlung spectra from measured transmission data by direct resolution of the numeric system  $AF=T$ ". *Medical Physics*, **22**(1):3-10, 1995.
4. HUANG, P.-H.; KASE, K.R.; and BJÄRNGÅRD., B.E. "Simulation studies of 4-MV x-ray spectral reconstruction by numerical analysis of transmission data". *Medical Physics*, **9**(5):695-702, 1982.
5. H.W.Engl and C.W.Groetsch, *Inverse and Ill-posed Problems*, Academic,Orlando,1987.
6. ICRU: "Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy. In ICRU report **Volume 50**. Bethesda: International Commission on Radiation Units and Measurements"; 1993.
7. ICRU: "Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (supplement to ICRU report 50). In ICRU Report **Volume 62**. Bethesda: International Commission on Radiation Units and Measurements"; 1999.
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA): "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water". *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Technical Report Series 398, 2001.
9. JOHNS, H.E., and CUNNINGHAM, J.R. *The Physics of Radiology*. Springfield USA: Charles C Thomas Publisher, 1983.
10. KHAN, F.M. *The Physics of Radiation Therapy*. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2003.
11. KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 4. Ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
12. NISBET, A.; WEATHERBURN, H.; FEWICK, J.D.; and MCVEY, G. "Spectral reconstruction of clinical megavoltage photon beams and the implications of spectral determination on the dosimetry of such beams". *Physics in Medicine and Biology*, **43**:1507-1521, 1998.
13. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY-NIST. XCOM: Photon Cross Sections Database: <http://www.nist.gov/physlab/data/xcom/index.cfm>, 2013.
14. SALVAT, F.; FERNÁNDEZ-VAREA J. M.; SEMPÁU, J. PENELOPE-2006, *A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. NUCLEAR ENERGY AGENCY. July, 2006.
15. SHEIKH-BAGHERI, D.; e ROGERS, D.W.O. "Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code". *Medical Physics*, **29**(3):391-402, 2002.
16. SHEIKH-BAGHERI, D. e ROGERS, D.W.O. "Sensitivity of megavoltage photon beam Monte Carlo simulations to electron beam and others parameters". *Medical Physics*, **29**(3):379-390, 2002.
17. Tsallis, C.; Stariolo, D. A. "Generalized simulated annealing". *Physics A*, v. **233**, n. 1–2, p. 395–406, 1996