

# DISEÑO DEL MODELO DIGITAL PARA SIMULAR LA DOSIMETRÍA DE LA FUENTE DE COBALTO-60 DE LA EPN

Gómez, J. P.<sup>1</sup>, Santos, R. A.<sup>2</sup>, Luna, G. M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares, MEER

<sup>2,3</sup>Laboratorio de Tecnología de Radiaciones, Escuela Politécnica Nacional

## RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolló un modelo digital en el programa Monte Carlo N-Particle que permitió simular la dosis entregada por la fuente de Co-60 de la EPN, y se validó el mismo mediante datos experimentales obtenidos por dosimetría Fricke. Se obtuvieron valores experimentales de dosis absorbida a 20, 40, 60, 100 y 175 cm de distancia con respecto a la fuente de Co-60 y, a 20 cm de altura con respecto al piso de la cámara de irradiación, estos valores fueron conseguidos mediante el método de dosimetría Fricke, el mismo que fue previamente calibrado, así, se pudo garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales, puesto que, el valor de la incertidumbre asociada a la medición de la dosis fue de 0,0673, este valor indicó que la dispersión de los valores de dosis, para un mismo punto, no es estadísticamente significativa, es decir, el sistema dosimétrico Fricke presenta repetitividad y reproducibilidad de los resultados. Con los valores experimentales de dosis absorbida se obtuvo un mapa de dosis, el mismo que fue utilizado para comparar los resultados conseguidos en la simulación.

Posteriormente, se tomó en cuenta las geometrías y materiales presentes en la cámara de irradiación y en la fuente de Co-60 para definir los datos de entrada en el programa MCNP y obtener el modelo digital inicial que permitió simular la dosimetría entregada por la fuente de Co-60.

Se compararon los resultados simulados con los datos experimentales y se realizaron los cambios oportunos de las geometrías y materiales de la cámara de irradiación y la fuente de Co-60 con la finalidad de acercar el modelo digital al comportamiento real.

El modelo digital final fue cercano a la realidad y alcanzó un error menor al 15% entre valores simulados y experimentales, por lo tanto, el modelo fue validado.

## 1. INTRODUCCIÓN

El programa Monte Carlo N-Particle, MCNP, desarrollado por el Laboratorio Nacional “Los Alamos” de los Estados Unidos, permite simular el transporte de fotones por medio de la resolución de la ecuación de Boltzmann mediante el método de Monte Carlo (Rojas, 2010, pp. 89 – 92, X-5 Monte Carlo Team, 2005, p. 1-1).

Un modelo digital que simule la dosimetría de la fuente de Cobalto-60 permite obtener el valor referencial de la dosis absorbida en cualquier punto de la cámara de irradiación, cuando ésta se encuentre vacía, de manera que se pueda planificar los procesos de irradiación y ofrecer un diagnóstico aproximado de productos irradiados. Para esto es necesario validar el modelo digital mediante la comparación de los datos entregados por la simulación con valores reales obtenidos mediante dosimetría Fricke.

Los datos experimentales son obtenidos mediante el sistema dosimétrico Fricke, el cual consiste en irradiar una solución ácida de sulfato de amonio ferroso 0,001 M. Los iones ferrosos presentes en la solución se oxidan a iones férricos en presencia de las radiaciones ionizantes y en proporción directa a la dosis absorbida. La concentración de los iones  $Fe^{3+}$  puede ser medida por medio de la absorbancia mediante espectrofotometría UV, a una

---

<sup>1</sup> jessipaola\_05@hotmail.com

longitud de onda de 304 nm, longitud de onda se encuentra el pico de máxima absorción de los iones férricos, el cálculo de dosis absorbida se determinó mediante la ecuación 1 (Attix, 2004, pp. 418 - 422).

$$D(\text{Gy}) = \frac{\Delta A}{\rho \cdot G(\text{Fe}^{3+}) \cdot \varepsilon \cdot d} \quad (1)$$

Donde,  $\Delta A$  es la diferencia de absorbancias entre la solución irradiada y la no irradiada,  $\rho$  es la densidad de la solución Fricke,  $G(\text{Fe}^{3+})$  es el rendimiento de la reacción,  $\varepsilon$  es el coeficiente de absorción molar lineal de los iones férricos y,  $d$  es la longitud del camino óptico.

Con los datos de dosis obtenidos mediante dosimetría Fricke se construye un mapa de dosis, que se utiliza para validar el modelo digital. Para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos experimentalmente es necesario calibrar el sistema dosimétrico Fricke.

Para validar el modelo digital se analiza el valor de error obtenido entre los resultados simulados y los valores experimentales, el valor máximo de porcentaje error que se espera es igual al 15%. Este valor de error fue establecido al tomar en cuenta trabajos realizados anteriormente (Petwal, Rao, Dwivedi, Senecha y Subbaiah, 2010, pp. 461 - 462; Rodrigues, Grynberg, Ferreira, Belo y Squair, 2010, p. 123; Salvadó, 2004, p. 76), donde se validaron modelos digitales desarrollados en el programa MCNP y, al considerar que no se cuenta con detalles específicos de las características de la fuente de Cobalto-60 y de la cámara de irradiación.

Con el desarrollo de este proyecto se obtiene una base para realizar futuras investigaciones en las que se podrá simular la distribución de la radiación a través de las paredes de la cámara de irradiación, de manera que se pueda analizar el blindaje de la misma o determinar el valor de dosis absorbida en un producto irradiado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Determinación de la incertidumbre asociada a la medición de la dosis absorbida en determinados puntos de la cámara de irradiación

La dosis absorbida fue obtenida a través de la utilización del sistema dosimétrico Fricke y su valor fue complementado con el valor de la incertidumbre asociada a la medición, que permite obtener una aproximación más confiable de los valores de dosis absorbida., para esto fue necesario calibrar el sistema dosimétrico Fricke.

La solución Fricke se realizó con base en la norma ASTM E1026: “Procedimiento estándar para el uso del sistema de referencia estándar de dosimetría Fricke”, aprobada el 1 de enero de 2004.

Para obtener los valores de dosis absorbida para la construcción de la curva de calibración, se calculó el tiempo necesario para alcanzar una dosis absorbida de 0, 50, 150, 250, 300 y 350 Gy, a 20 cm de distancia con respecto a la fuente de Cobalto-60 y a 20 cm de altura con respecto al piso de la cámara de irradiación. Se colocaron 3 muestras de solución Fricke dentro de la cámara de irradiación, se irradió la solución y se midió la dosis

absorbida. Este procedimiento se realizó 3 veces para obtener repetitividad y reproducibilidad en el proceso.

La incertidumbre asociada en la medición de la dosis ( $\mu_D$ ) es el resultado de una serie de mediciones y, matemáticamente es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, estos términos representan a las incertidumbres obtenidas en cada entrada de medición, y su cálculo se determinó mediante la ecuación 2 (Eurachem Group, 2000, pp. 11 - 12).

$$\mu_D = \sqrt{\left(\frac{\delta D}{\delta A}\right)^2 \cdot \mu_A^2 + \left(\frac{\delta D}{\delta T}\right)^2 \cdot \mu_T^2 + S^2} \quad (2)$$

Donde,  $\left(\frac{\delta D}{\delta A}\right)^2$  es el coeficiente de sensibilidad de la dosis con respecto a la absorbancia,  $\mu_A^2$  es la incertidumbre asociada a la medición de la absorbancia,  $\left(\frac{\delta D}{\delta T}\right)^2$  es el coeficiente de sensibilidad asociado a la estimación de la dosis con respecto a la temperatura,  $\mu_T$  es la incertidumbre asociada a la medición de la temperatura y,  $S^2$  es la varianza de la distribución de la probabilidad.

Con los datos conseguidos se realizó el gráfico de incertidumbre versus dosis, este proceso permitió garantizar la confiabilidad de los datos de dosis absorbida alcanzados mediante el sistema dosimétrico Fricke.

Para la construcción de la curva de calibración se realizó un análisis de varianza simple a los datos obtenidos de dosis absorbida, donde, se calculó el valor del factor de Fisher  $f_{calculada}$  y, con base en los grados de libertad se encontró el  $f_{Tablas}$ , tabulado en bibliografía, se analizó la regla de decisión:  $f_{Tablas} > f_{calculada}$ , y se comprobó si se retiene la hipótesis nula,  $h_0$ , o se opta por la hipótesis alternativa,  $h_1$ . (Castillo, 2009, p. 15).

Al optar por la hipótesis nula, se pudo determinar la reproducibilidad y repetitividad del sistema dosimétrico Fricke. El análisis de varianza permitió obtener una media de los valores de dosis absorbida para cada tiempo, con los resultados logrados se realizó el gráfico dosis versus tiempo que representó a la curva de calibración del sistema dosimétrico Fricke.

## **2.2. Obtención del mapa de dosis de la cámara de irradiación vacía mediante el método de dosimetría Fricke**

Para realizar el mapa de dosis se fijó una altura de 20 cm desde el piso, la misma que se determinó por ser la utilizada en la calibración del sistema dosimétrico Fricke. Se determinaron 5 distancias con respecto a la fuente, las cuales debían estar distribuidas en todo el espacio de la cámara de irradiación, estas distancias fueron de 20, 40, 60, 100 y 175 cm con respecto a la fuente de Cobalto-60. En estas distancias y con referencia a los puntos cardinales se situaron los soportes con los dosímetros, se ubicaron 8 dosímetros distribuidos en forma circular, a excepción de 20 y 175 cm, donde se colocaron 4. En cada punto se colocaron 3 tubos de ensayo que contenían la solución Fricke.

Se calculó el tiempo necesario para obtener una dosis de 300 Gy a 20 cm de distancia con respecto a la fuente. Este lapso calculado se utilizó para irradiar todas las muestras ubicadas en las distancias indicadas anteriormente. El proceso de irradiación se realizó por 3 ocasiones. La dosis absorbida fue dividida para el tiempo de irradiación y se obtuvo el valor de tasa de dosis absorbida.

### 2.3. Diseño del modelo digital en el programa MCNP de la fuente de Cobalto-60 con la cámara de irradiación vacía

Se obtuvo el primer modelo digital, el mismo que incluye las características básicas que describen la geometría de la cámara de irradiación y la fuente de Cobalto-60. Este modelo fue nombrado como M<sub>0</sub>.

#### 2.3.1. Definición de datos de entrada

Para definir los datos de entrada, fue necesario conocer las geometrías, las dimensiones y las composiciones químicas que forman la cámara de irradiación y de la fuente de Cobalto-60.

El centro de coordenadas (0,0,0) fue situado en el centro del piso de la cámara de irradiación y de la fuente de Cobalto-60, el mismo que se utilizó para la ubicación de las superficies que conforman la cámara de irradiación de la EPN. La secuencia que se siguió para definir los datos de entrada se detallan en la Figura 1.

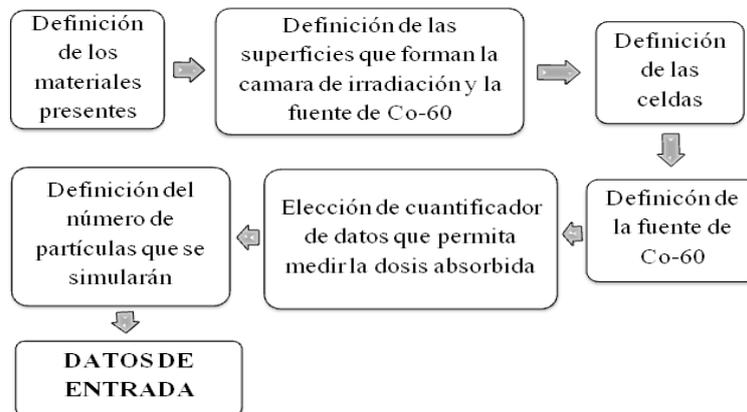


Figura 1 Secuencia de procedimientos para definir los datos de entrada

#### 2.3.2. Análisis de los datos de salida

Como resultado de la simulación el programa MCNP calcula el flujo de partículas para una fuente que sufre una desintegración por segundo y emite un fotón gamma, la tasa de dosis está dada por la ecuación 3.

$$\frac{dD}{dt} \left[ \frac{Gy}{s} \right] = \sum_i H(E) \quad (3)$$

Donde, i representa a todas las posibles fuentes que emiten fotones y que aportan para el conteo de energía total en una celda.

El valor real de desintegraciones por segundo que sufre la fuente de Cobalto-60 está dado por la actividad A, cuyo valor se tomó en el momento en que se realizó la dosimetría, este valor se calculó a partir de la actividad inicial de la fuente, A<sub>0</sub>, y el tiempo, t, transcurrido desde t<sub>0</sub>, (Rickards y Cameras, 1995). Además, por cada decaimiento del Cobalto-60 se emiten 2 fotones gamma, por lo tanto, la tasa de dosis se calcula a partir de la ecuación 4.

$$\frac{dD}{dt} \left[ \frac{Gy}{s} \right] = \frac{\text{fotones gammas}}{\text{decaimiento Co - 60}} \left[ \frac{\text{Partícula}}{Bq} \right] \times A_0 \times e^{-\frac{\ln(2) \times t}{t_{1/2}}} [Bq] \times \sum_i H(E) \left[ \frac{\frac{Gy}{s}}{\text{Partícula}} \right] \quad (4)$$

Los datos de energía por unidad de masa obtenidos en la simulación del modelo M<sub>0</sub>, fueron transformados en tasa de dosis.

En la Tabla 1 se indican los valores de actividad, fotones gamma por decaimiento del Cobalto-60, edad de la fuente y tiempo de vida media del Cobalto-60, datos necesarios para realizar el cálculo de tasa de dosis absorbida.

**Tabla 1 Variables utilizadas para el cálculo de tasa de dosis**

| Fecha dosimetría:      | 28/11/2011              | Unidades     |                    | Unidades   |
|------------------------|-------------------------|--------------|--------------------|------------|
| Actividad de la fuente | 40 700                  | Ci           | Edad de la fuente: | 7 667 días |
|                        | 1,506 x10 <sup>15</sup> | Bq           | Vida media:        | 1 924 días |
| # gamma/ decaimiento   | 2                       | gamma/(Bq/s) |                    |            |

## 2.4. Ajuste de los resultados generados con el programa MCNP y los datos experimentales obtenidos

A partir del modelo digital M<sub>0</sub>, se modificaron los datos de entrada y se colocaron las características específicas de la cámara de irradiación y de la fuente de Cobalto-60, de manera que se obtuvieron diferentes modelos, cada uno con características más cercanas a las reales.

### 2.4.1. Comprobación del modelo digital

Una vez obtenido el modelo digital final, se realizó una comprobación del mismo, para ello se fijaron alturas y distancias con respecto a la fuente, no consideradas en la obtención del modelo digital y, se obtuvieron nuevos datos experimentales.

Con este procedimiento se comprobó si el modelo digital describe el comportamiento de la fuente de Cobalto-60 dentro de la cámara de irradiación.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Resultado de la incertidumbre asociada a la medición de la dosis y la curva de calibración

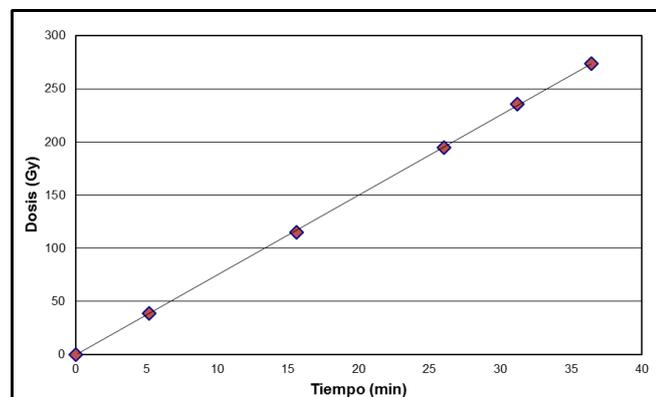
Se determinó el valor de incertidumbre asociada a la medición de la dosis absorbida, al tomar en cuenta todas las fuentes de error presentes en el procedimiento, el valor obtenido

fue de 0,0673. Este valor indica que los resultados de dosis obtenidos para cada tiempo, en el proceso de calibración del sistema dosimétrico Fricke, no presentan una dispersión significativa entre ellos, lo que significa que resultados logrados mediante el empleo de este método son confiables.

Posteriormente, para la construcción de la curva de calibración se realizó una prueba de varianza simple, que permitió comparar los datos obtenidos entre repeticiones y replicas, cabe resaltar que no se analizó el valor obtenido de dosis absorbida con el valor esperado, debido a que este último es un valor teórico y el fin de la calibración fue obtener el valor real de dosis absorbida que entrega la fuente de Cobalto-60.

Se calcularon los valores de los factores  $f_{calculada}$  y  $f_{tablas}$  para cada tiempo de irradiación, se analizó los resultados, los cuales permitieron retener la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia estadísticamente significativa entre los datos obtenidos en las réplicas y repeticiones. Con este análisis de varianza se puede decir que los datos obtenidos mediante el sistema dosimétrico Fricke presentan reproducibilidad y repetitividad. Además, se comprobó la confiabilidad de los resultados de dosis alcanzados por el sistema dosimétrico Fricke.

Finalizado el análisis de varianza se obtuvo una media de los datos de dosis absorbida para cada punto, con los que se construyó la gráfica dosis absorbida versus tiempo y se obtuvo la curva de calibración, la misma que se indica en la Figura 2. Se realizó una regresión lineal de los datos y se comprobó la linealidad que presenta el sistema dosimétrico Fricke entre 0 y 400 Gy.



**Figura 2 Curva de calibración del sistema dosimétrico Fricke**

### **3.2. Resultado de la obtención del mapa de dosis de la cámara de irradiación vacía mediante el método de dosimetría Fricke**

Se obtuvieron los mapas de tasa de dosis absorbidas para cada repetición, los mismos que fueron logrados mediante el método de dosimetría Fricke. Además, se calculó una media entre las repeticiones, que permitió tener un valor de tasa de dosis para cada distancia y cada punto cardinal, estos resultados se presentan en la Tabla 2. Estos valores fueron utilizados para comparar con los datos generados por el modelo digital.

**Tabla 2 Mapa de tasa dosis absorbida experimentales**

| Distancia<br>(cm) | Tasa de dosis (Gy/h) |         |         |         |         |          |         |          |          |
|-------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|
|                   | Norte                | Sur     | Este    | Oeste   | Noreste | Noroeste | Sureste | Suroeste | Promedio |
| 20                | 520,162              | 539,320 | 456,394 | 610,582 |         |          |         |          | 531,615  |
| 40                | 163,047              | 170,566 | 157,872 | 191,269 | 158,832 | 188,073  | 164,612 | 174,599  | 171,109  |
| 60                | 78,941               | 81,526  | 76,953  | 86,820  | 80,925  | 88,565   | 78,941  | 85,257   | 82,241   |
| 100               | 30,147               | 31,531  | 29,425  | 33,215  | 31,471  | 31,892   | 31,110  | 33,636   | 31,553   |
| 175               | 11,016               | 13,062  | 11,076  | 12,640  |         |          |         |          | 11,948   |

### 3.3. Resultado del modelo digital inicial

En esta sección se muestran las características del modelo digital  $M_0$  de la cámara de irradiación vacía, el cual sirvió como base para realizar los cambios necesarios con el fin de obtener un modelo que se acerque a la realidad. Las características más importantes que presenta el modelo digital  $M_0$ , se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3 Características del modelo digital  $M_0$**

| Componentes                       |                 | Detalles                 |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------------|
| Fuente                            | Material        | Cobalto metálico         |
|                                   | Geometría       | 2 cilindros concéntricos |
|                                   | Características | Isotrópico               |
| Dosímetros                        | Material        | Aire                     |
|                                   | Geometría       | Anillos (10 x 10 cm)     |
|                                   | Características | 1 anillo por radio       |
| Cámara de irradiación             | Material        | Hormigón                 |
|                                   | Geometría       | Paralelepípedos          |
|                                   | Características | Ninguna                  |
| NPS                               |                 | 1 000 000                |
| Número de simulaciones por modelo |                 | 1                        |

### 3.4. Ajuste de los resultados generados con el programa MCNP y los datos experimentales obtenidos

En esta sección se realizó la comparación de los datos obtenidos en el programa MCNP con los resultados experimentales conseguidos mediante dosimetría Fricke y, se efectuó los cambios necesarios al modelo digital, de manera que el mismo se acerque a la realidad y el error alcanzado no supere el 15%.

Para realizar esta comparación se utilizó los resultados experimentales expresados en la Tabla 2, los cuales eran datos estadísticamente confiables, por lo tanto, los valores obtenidos en el modelo digital fueron muy cercanos a los reales.

Se obtuvieron diferentes modelos digitales, los cuales presentaron variaciones de las superficies, materiales y disposición de la cámara de irradiación y de la fuente de Cobalto-60, estos cambios se realizaron en secuencia y se comenzó con el modelo digital M<sub>0</sub>, en la Tabla 4 se indican los diferentes modelos digitales realizados, los detalles que fueron cambiados y el porcentaje de error medio obtenido en cada uno.

**Tabla 4 Características de los detalles variados en cada modelo digital**

| <b>Modelo Digital</b> | <b>Variación de detalles</b>  | <b>Error promedio (%)</b> |
|-----------------------|---|---------------------------|
| M <sub>0</sub>        | -   | 21,33                     |
| M <sub>1</sub>        | Aire como material de la región activa de la fuente de Co-60  | 6,69                      |
| M <sub>2</sub>        | Solución Fricke y cilindros de r=0,75 cm como material y geometría de los dosímetros  | 14,4                      |
| M <sub>3</sub>        | 12 cilindros colocados de manera equidistantes e isotrópicos como la disposición de la fuente de Co-60  | 16,63                     |
| M <sub>4</sub>        | Cilindros de r=2,25 y distribución de los dosímetros en cada radio  | 9,43                      |
| M <sub>5</sub>        | Distribución real de la ubicación y actividad de los 12 cilindros que forman la fuente de Co-60   | 9,48                      |
| M <sub>6</sub>        | Bloques de plomo, placa de acero inoxidable, agua de la piscina, vidrio de los dosímetros y capa de pasivación de los lápices de la fuente de Co-60, como detalles que complementarios. | 8,86                      |
| M <sub>7</sub>        | 5 000 000 de partículas utilizadas para obtener resultados estadísticamente confiables  | 8,51                      |

### 3.4.1. Modelo digital final

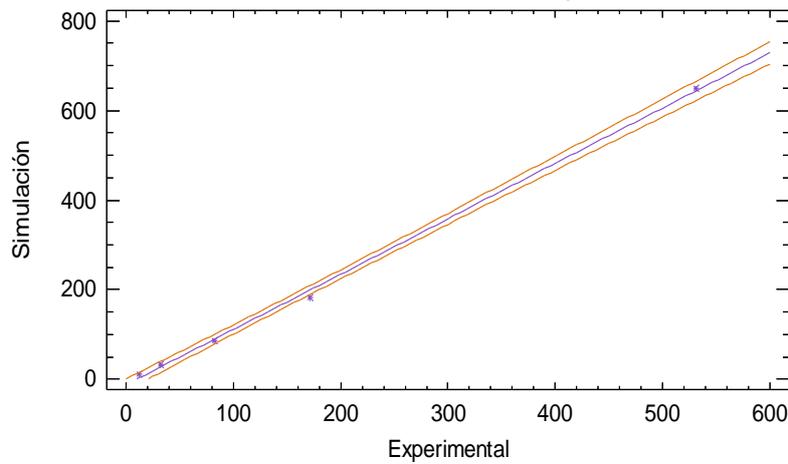
El modelo final obtenido en este proyecto fue el modelo M<sub>7</sub>, las características de este modelo se detallan en la Tabla 5.

**Tabla 5 Características del modelo digital M<sub>7</sub>**

| <b>Componentes</b>           |                        | <b>Detalles</b>  |
|------------------------------|------------------------|--|
| <b>Fuente</b>                | <b>Material</b>        | Aire   |
|                              | <b>Geometría</b>       | 12 cilindros   |
|                              | <b>Características</b> | Distribución real de la ubicación y actividad                                    |
| <b>Dosímetros</b>            | <b>Material</b>        | Solución Fricke  |
|                              | <b>Geometría</b>       | Cilindros (r = 2,25 cm)  |
|                              | <b>Características</b> | Distribución de los dosímetros en cada radio                                     |
| <b>Cámara de irradiación</b> | <b>Material</b>        | Hormigón   |
|                              | <b>Geometría</b>       | Paralelepípedos  |
|                              | <b>Características</b> | Bloques de plomo<br>Placa de acero inoxidable<br>Agua de piscina debajo del piso |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | Vidrio en los dosímetros<br>Capa de pasivación en el recubrimiento de los lápices |
| <b>NPS</b>                               |  | 5 000 000   |
| <b>Número de simulaciones por modelo</b> |  | 5   |

A la vez, se realizó el gráfico de correlación de los datos simulados y experimentales, que se indica en la Figura 3, donde se puede notar que el comportamiento del modelo digital  $M_7$  es similar al real, ya que la mayoría de los puntos de la recta se encuentran dentro de la región de confianza igual al 85%, dicha región se está limitada por las líneas de color naranja.



**Figura 3 Correlación entre datos de dosis absorbida simulados obtenidos en el modelo digital  $M_7$  y valores experimentales**

Por lo tanto, el modelo digital  $M_7$  es el que mejor representa el comportamiento de la fuente de Cobalto-60, puesto que se ha incluido todas las características posibles dentro del mismo.

### 3.4.2. Comprobación del modelo digital obtenido

Para realizar la comprobación del modelo digital  $M_7$  se obtuvieron nuevos datos experimentales mediante dosimetría Fricke, esta vez se realizó el procedimiento de rutina para medir la dosis absorbida, es decir, se colocaron 6 dosímetros en cada soporte, desde 0 a 100 cm de altura, con una separación de 20 cm cada uno, este proceso se realizó para las distancias de 30 y 50 cm con respecto a la fuente de Cobalto-60.

De la misma manera, se realizó un modelo digital para cada distancia, donde se incluyeron el número de dosímetros en cada soporte. En las Tablas 6 y 7 se indican los valores medios obtenidos en las simulaciones para 30 y 50 cm de distancia con respecto a la fuente de Co-60, respectivamente.

**Tabla 6 Valores de error medios obtenidos 30 cm de distancia de la fuente**

| Altura (cm) | Simulación (Gy/h) | Experimental (Gy/h) | Error Porcentual |
|-------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 0           | 267,770           | 290,897             | 7,95             |
| 20          | 258,321           | 257,806             | 0,20             |
| 40          | 152,255           | 139,117             | 9,44             |
| 60          | 79,474            | 69,673              | 14,07            |
| 80          | 45,151            | 39,871              | 13,24            |
| 100         | 28,594            | 25,803              | 10,81            |

**Tabla 7 Valores de error medios obtenidos 50 cm de distancia de la fuente**

| Altura (cm) | Simulación (Gy/h) | Experimental (Gy/h) | Error Porcentual |
|-------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 0           | 106,741           | 113,422             | 5,89             |
| 20          | 102,803           | 107,379             | 4,26             |
| 40          | 79,407            | 80,492              | 1,35             |
| 60          | 53,610            | 52,388              | 2,33             |
| 80          | 36,079            | 34,667              | 4,07             |
| 100         | 24,850            | 23,678              | 4,95             |

La comparación de resultados experimentales y simulados realizados en esta sección permitió validar el modelo digital M<sub>7</sub>, por lo que, se puede concluir que el algoritmo logrado en este proyecto entrega datos referenciales de dosis absorbida para cualquier altura y distancia con respecto a la fuente de Cobalto-60 del irradiador de la EPN, los mismos que son cercanos a los valores reales.

#### **4. Conclusiones**

1. La dosis absorbida y la incertidumbre tienen una relación directamente proporcional, el valor de incertidumbre relativa que se obtuvo es igual a 0,0673, este valor indica que los datos obtenidos para un mismo punto no presentan una dispersión significativa, por lo que los datos conseguidos mediante dosimetría Fricke son estadísticamente confiables.
2. Se pudo obtener un valor medio de dosis absorbida para un determinado punto dentro de la cámara de irradiación, debido a que los datos de dosis absorbida logrados mediante el sistema dosimétrico Fricke no presentan diferencia estadísticamente significativa entre repeticiones y réplicas, es decir, el proceso presenta reproducibilidad y repetitividad.
3. El modelo digital obtenido en este proyecto de titulación incluye la mayoría de las características y detalles presentes de las geometrías y materiales que forman la fuente de Cobalto-60 y la cámara de irradiación de la Escuela Politécnica Nacional.

4. Los valores de error obtenidos en las comparaciones del modelo digital con los datos experimentales y en las comprobaciones del mismo, no presentan uniformidad, sin embargo, el 93,75% de los resultados alcanzados presentan un error menor al 15% propuesto, y los valores de error promedio obtenidos con el modelo digital final presentan un resultado menor al 10%, esto quiere decir que, el modelo digital entrega valores cercanos al comportamiento real de la fuente de Cobalto-60, ya que fueron comparados con datos experimentales que presentaron una incertidumbre asociada a la medición de la dosis igual a 0,0673, por lo tanto, este ha sido validado.
5. El modelo digital validado entrega valores referenciales de tasa dosis absorbida en cualquier punto dentro de la cámara de irradiación, cuando está vacía, los mismos que son cercanos a los valores reales, lo que permite planificar los procesos de irradiación y ofrecer un diagnóstico aproximado.

### Referencias bibliográficas

1. Attix, F. (2004). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Weinheim, Alemania: Editorial WILEY-VCH.
2. Castillo, B. R. (2009, Abril). *La hipótesis en investigación*. Málaga, España: Univesidad de Málaga. Recuperado de <http://www.eumed.net/rev/cccss/04/rcb2.pdf>.
3. Eurachem Group. (2000). *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. (2da ed.). Uppsala, Suecia: Citac.
4. Petwal, V. C., Rao, J. N., Dwivedi J., Senecha, V. K. y Subbaiah, K. V. (2010). Dosimetric measurements and Monte Carlo simulation for achieving uniform surface dose in pulsed electron beam irradiation facility. *Pramana journal of physic*, 74(3), 467 - 468.
5. Rickards, C. J. y Cameras, R. R. (1995). *III. Interacción de la radiación con la materia*. México D.F., México: Fondo de Cultura Económica. Recuperado de: [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.htm).
6. Rodrigues, R.R., Grynberg, S.E., Ferreira. A.V., Belo, L.C.M. y Squair, P.L. (2010). Retrieval Of GammaCell 220 Irradiator Isodose Curves With MCNP Simulations And Experimental Measurements. *Brazilian Journal of Physic*, 40(1), 120 - 124.
7. Rojas, C. E. L. (2010). Aplicaciones de la simulación Monte Carlo en dosimetría y problemas de física médica. México, México: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Recuperado de <http://www.inin.gob.mx/documentos/publicaciones/contridelinin/Cap%C3%ADulo%206.pdf>
8. Salvadó, A. M. (2004). *Desarrollo de un programa de simulación basado en el método de Montecarlo para el cálculo de dosis con maniqués divididos en voxels. Aplicaciones en tomografía computarizada*. (Disertación doctoral). Universidad Rovira I Virgili, Reus, España.
9. X-5 Monte Carlo Team. (2005). *MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5: Vol I: Overview and Theory*. Los Álamos, Estados Unidos: Los Álamos Laboratory.