

Reevaluación de un *bunker* de gammagrafía industrial a cielo abierto para licenciamiento

Gerardo Lázaro*

Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470,
Lima 41, Perú

Resumen

Se evalúa un sistema de gammagrafía industrial fijo a cielo abierto, licenciado y en servicio de acuerdo con los nuevos requerimientos normativos y la disponibilidad de nuevas herramientas de cálculo. La radiación dispersa, principalmente la llamada efecto cielo que tiene consecuencias interesantes se ha evaluado con el programa MCNP5/VISED, previamente instalado en una PC con Linux-Fedora 8-64. Se transporta fotones de energías de 1.17 y 1.32 MeV correspondientes al Cobalto-60, utilizando el tally f5z para el cálculo de la exposición para distancias desde 10 a 700 m. Se modela dos tipos de bunker, uno cilíndrico para propósitos de validación teórico-experimental del modelo y otro cuadrangular, derivado del cilíndrico con laberinto en su acceso, similar al real en evaluación.

Abstract

It is evaluated a fixed system, open-cast industrial gammagraphy. It is licensed and in process of evaluation. This evaluation becomes according to the new normative requirements and the availability of new tools of calculation. The stray radiation mainly the called skyshine effect has interesting consequences that could have been studied with program MCNP5. This Program MCNP5/VISED is installed in a PC with Linux-Fedora 8 as operating system. It is transported photons of 1.32 and 1.17 MeV of energy, corresponding to Cobalt 60. The tally f5z is used for the calculation of the exposition for distances from 10 to 700 m. It is designed a model with two types of bunker. One cylindrical, only for validation experimental theoretical MCNP calculations; and another squared one, derived from the cylindrical model, with labyrinth in its access similar to the real one in evaluation.

1. Introducción

Se representa un modelo de evaluación de un sistema para gammagrafía industrial fijo con Co-60 a cielo abierto. El modelo estima además la contribución por efecto cielo, que se desestimó en evaluaciones anteriores, y por ende no se conocía su contribución a la dosis equivalente al público. La evaluación a la exposición debido al efecto cielo se hizo hasta distancias de 700 m, área donde se encuentra viviendas colindantes y público en tránsito. También se presenta resultados de simulaciones de transporte de fotones de energías de 1.17 MeV (100%) y 1.32 MeV (100%) correspondientes al Cobalto-60 utilizando el código MCNP5/VISED[1] instalado en una PC-Dell/Optiplex 755 con Linux-Fedora 8-64.

La modelación se hace para dos tipos de bunker, uno cilíndrico y otro cuadrangular con laberinto en su acceso. El cilíndrico se hizo para propósitos de validación teórico-experimental [2] del modelo y el cuadrangular,

derivado del cilíndrico, con laberinto en su acceso, es similar al bunker en evaluación. La evaluación del sistema se ajusta a la normativa nacional vigente [4,5,6,7].

Se aplica como criterio de diseño [4] en áreas no restringidas dosis equivalente menor a 0,5 microSv/h a 30 cm de la superficie del blindaje, en área controlada 7,5 microSv/h y en consola 0,5 micro/h para toda condición. Asimismo, se aplica la recomendación del artículo 617[5] como límite no debe exceder de 0,1 mSv/semana para áreas protegidas ocupadas por trabajadores expuestos y 0,02 mSv/semana para áreas donde se encuentre el público considerando la máxima carga de trabajo y el máximo factor de ocupación.

2. Desarrollo

Se utiliza el tally f5z para verificar el modelo y los resultados se validan con datos experimentales del KSU Nuclear Engineering

* Correspondencia autor: glazaro@ipen.gob.pe

Shielding Facility[2]. En la Figura 1 se representa el modelo experimental ubicando la fuente en el eje central Z a una altura de 1,98 m. La contribución por dispersión de la radiación del aire se evalúa con f5z:p en círculos de 10 hasta 700 m alrededor de z con centro en la fuente. En el punto de interés se evalúa en volúmenes con radio de 50 cm. El modelo de ambas geometrías es mostrado en las Figuras 1,2 y 3. Se utiliza la composición de materiales mostrados en las Tablas 1 y 2.

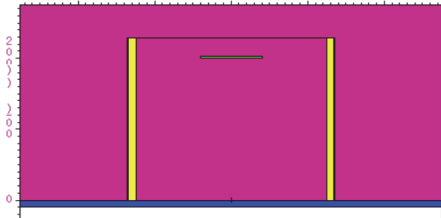


Figura 1. Bunker de irradiación/Modelo MCNP con cilindro y fuente con tapa superior de hierro.

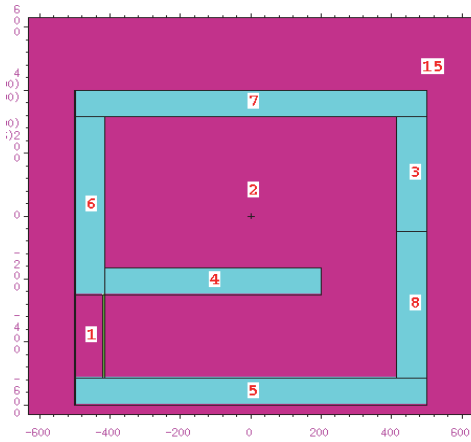


Figura 2. Bunker cuadrado con Laberinto.

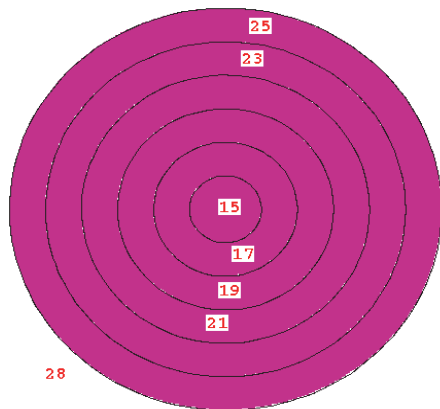


Figura 3. 1000 m de distancia del Bunker de irradiación / Modelo MCNP.

Tabla 1. Densidad y composición del concreto y terreno utilizados en MCNP5.

Elemento	Densidad - g/cm ³		
	2,3	1,7	
	Concreto(2)	Terreno(a)	
	Zaid MCNP	Átomos /cm ³	Átomos/cm ³
Hidrógeno	1000	7.86E21	9.77E21
Carbono	6000	-	-
Nitrógeno	7000	-	-
Oxígeno	8000	4.38E22	3.48E22
Sodio	11000	1.05E21	-
Magnesio	12000	1.4E20	-
Aluminio	13000	2.39E21	4.88E21
Silicio	14000	1.58E22	1.16E22
Argón	18000	-	-
Potasio	19000	6.9E20	-
Calcio	20000	2.92E21	-
Hierro	26000	3.1E20	-

(a) American National Standard ANSI/ANS-6.6.11987 [3].

2. Resultados

Se observa que los cálculos obtenidos presentan una buena aproximación a los experimentales con errores relativos menores al 2 %, lo que expresa la consistencia del modelo diseñado con MCNP y que puede ser utilizado para propósitos de evaluación con gran confianza en sus resultados.

Para la carga de trabajo que señala el usuario, 17.7 h/semana y una fuente de 17 Curies, los valores de 7 microR/h.Ci y 35 microR/h.Ci cumplen las condiciones 0.02mSv/semana y 0.1mSv/semana impuesta por la norma[5]. Con estos valores se definen las áreas libre, supervisada y controlada, tal como se muestra en la Figura 1. Se realiza los cálculos y se buscan los puntos donde se cumplan estas condiciones. Este cálculo es la fluencia en un anillo de 50 cm de radio y con la tarjeta factor multiplicador -fm5 se aplica la sección eficaz total de transferencia de energía, considerando la fracción de deposición de energía y se determina la energía-MeV/fotón. El valor del multiplicador C en la tarjeta fm5 es la dosis usando la aproximación *kerma*, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C(\text{rads/fotón}) = (N_a * f / M) * (1,6e-8 \text{ erg/MeV}) / (1e-24 \text{ cm}^2/\text{barn}) \quad [9]$$

Donde:

N_a : # de Avogadro;

f : # de átomos por molécula;

M : masa molar del material en gramos.

El valor C para aire es $6,622e-10$ rads/fotón, se corrige con el factor 0,876 para transformarlo en exposición R /fotón en aire. Para el cobalto 60, con 2 fotones por desintegración, se tiene el factor C de $2,014E11$ para exposición en aire en microR/h/Ci . Este factor de multiplicación en la tarjeta fm5 se utiliza con los parámetros -5 y -6 que considera la sección eficaz total y la energía depositada por colisión (MeV/col).

Tabla 2. Densidad y Composición del aire [2] y acero utilizados en MCNP5.

Densidad – g/cm ³		1,22x 10 ⁻³	7,82
Elemento		Aire nivel del mar (2)	Acero al Carbon(2)
	Zaid	Fracción de peso	Fracción de peso
Hidrógeno	1000	-	-
Carbono	6000	0,000124	0,005
Nitrógeno	7000	0,755268	-
Oxígeno	8000	0,231781	-
Sodio	11000	-	-
Magnesio	12000	-	-
Aluminio	13000	-	-
Silicio	14000	-	-
Argón	18000	0,012827	-
Potasio	19000	-	-
Calcio	20000	-	-
Hierro	26000	-	0,995

Validado el modelo, por la buena aproximación de resultados teórico-experimentales mostrado en la Tabla 3, se extendió al caso cuadrangular (Figura 2) en evaluación, modificando la geometría a un bunker con laberinto teniendo una puerta de fierro para su acceso, tal como se muestra en la Figura 2. Las secciones eficaces utilizadas corresponden a la librería mcplib04 – ENDF/B-VI Release 8. Los resultados de exposición con aire seco son ligeramente superiores con respecto a tener aire con humedad. En la ciudad de Lima la humedad

es relativamente alta y es variable. De modo conservador la evaluación se realiza con la composición mostrada en la Tabla 2.

En el bunker con laberinto sin techo, con una carga de trabajo de 17,7 horas a la semana se obtiene una dosis a nivel de público de 0,02 mSv/semana a partir de 120 metros de distancia del término fuente. La condición de 0,1 mSv/semana se consigue desde 44 metros. Para la actual situación del bunker se postula que debe tener un área controlada hasta los 44 metros, y de esta distancia a 120 metros debe ser considerada como área supervisada. Estas condiciones que son consecuencia de la aplicación del reglamento, no han sido parte del procedimiento de trabajo por parte del operador. Se desconocía la importancia del efecto cielo. Hubo una propuesta para colocar una tapa de fierro en la parte superior de la fuente, pero se observa que la dosis se reduce solo en un 50%, siendo insuficiente debido a que el área controlada es de 20 metros e incluye al bunker, y también porque el área próxima al bunker es zona de tránsito.

Tabla 3. Tasa de exposición del bunker cilíndrico calculado con MCNP y el experimental. (Tasa de Exposición mR/h Ci).

Distancia (m)	MCNP5		Experimental MicroR/h Ci
	MicroR/h Ci	+/- ♦	
10	121,7370	1,28	--
20	67,8220	0,62	--
30	45,1350	0,4	--
40	32,8360	0,32	--
50	25,2660	0,22	24,2400
60	19,5130	0,15	--
70	16,0620	0,13	--
80	13,1650	0,11	--
100	9,2360	0,08	9,6600
200	2,3910	0,02	2,4250
300	0,7780	0,01	0,7600
400	0,3023	0,01	0,3100
500	0,1165	0,003	0,1170
600	0,0471	0,002	0,0542
700	0,0192	0,001	0,0244

El personal que trabaja directamente con la fuente se retira a la oficina ubicada a más de 100 metros de distancia. La dosimetría personal de estos trabajadores arroja valores menores a los de registro y no era posible detectar los niveles de radiación por efecto cielo.

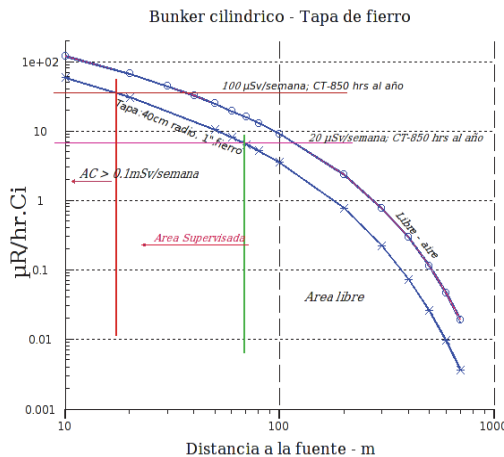


Figura 4. Resultados del modelo de intercomparación de cálculo de MCNP[3] con los datos experimentales[2].

Al considerar como techo del bunker una plancha de hierro de una pulgada de espesor, el área controlada se confina dentro de los límites físicos del bunker y el área supervisada hasta los 48 metros. Para facilitar el trabajo de transporte de las piezas a irradiar el techo tiene una ventana de 1 x 1 metros. Sin la ventana es posible definir como área supervisada hasta los 26 metros.

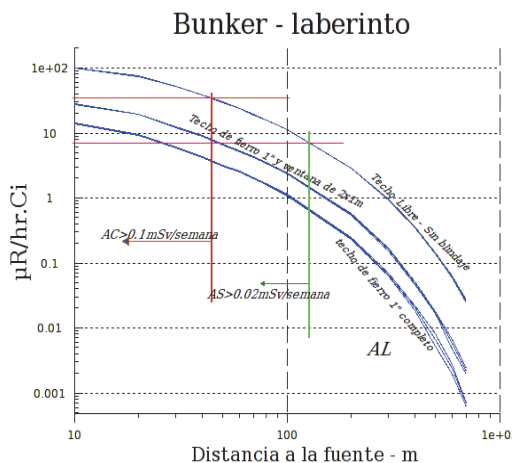


Figura 5. Resultados del modelo cuadrangular con laberinto para el acceso.

Si no es posible controlar el acceso del personal no ocupacionalmente expuesto a esta área supervisada, se debe colocar un techo de concreto de 24 cm de espesor con una ventana en el techo de 2 x 1 metros lejos de la fuente. Con esta configuración se consigue valores de dosis para el público a 10 metros de distancia; es decir, dentro de los límites fijos del bunker.

Otra recomendación de acuerdo con la norma es la incorporación de una luz luminosa que vaya al estado de encendido al momento de salir la fuente, que debe ser activada por un monitor de radiaciones y ubicada dentro del recinto.

Además, se debe instalar una alarma acústica que se active al abrir la puerta (hierro) de acceso al recinto.

4. Conclusiones

La instalación debe colocar un techo al recinto de irradiación, preferentemente de hierro y de 1 pulgada de espesor. El área controlada se confina dentro de los límites físicos del recinto y se define un área supervisada hasta una distancia de 48 metros.

Si hay dificultades en la vigilancia del acceso al área supervisada, por parte de trabajadores no expuestos ocupacionalmente, se debe optar por poner un techo de concreto de 24 cm de espesor y con la ventana de 2 x 1 metros lejos de la fuente.

5. Agradecimientos

Se agradece a Rubén Bruna y Julio Villanueva por el apoyo de mediciones en campo.

6. Bibliografía

- [1] Los Alamos National Laboratory. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5 – X5 Monte Carlo Team - Revised; 2005.
- [2] Olsher RH, Hsiao-Hsu H, Harvey WF. Benchmarking the MCNP Monte Carlo code with a photon skyshine experiment. Nuclear Science and Engineering United States. 1993; 114(3):219-227.
- [3] McConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA, Williams RG. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. En: Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-15870. 2006.
- [4] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Requisitos de seguridad radiológica para irradiadores gamma panorámicos de categoría II y IV. Norma IR.012.98. Disponible en: http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/leyes_normatividad.htm
- [5] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Requerimientos de seguridad radiológica en

radiografía industrial. Norma IR.001.2009.
Disponible en:

http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/leyes_normatividad.htm

[6] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Reglamento de autorizaciones, fiscalización, control, infracciones y sanciones de la Ley N° 28028 Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiaciones Ionizantes. 2008. Disponible en:

http://www.ipen.gob.pe/site/publicaciones/ley28028/reglamento_ley28028.pdf

[7] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Reglamento de Seguridad Radiológica. D.S. No. 009-97-EM. Disponible en:

http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/leyes_normatividad.htm

[8] National Council on Radiation and Measurements. Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities. NCRP Report No. 147. 2004.

[9] Los Alamos National Laboratory. MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport code Version 5, Volume II. Users Guide. Chapter 3. p. 3-99.