

Cálculo de la criticidad en los depósitos de elementos combustibles del reactor nuclear RP-10

Álvaro Aguirre, Rubén Bruna*

Dirección de Producción, División de Reactores Nucleares, Instituto Peruano de Energía Nuclear
Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Resumen

Se muestran los resultados de los cálculos de la criticidad de los depósitos de elementos combustibles irradiados y no irradiados del reactor nuclear de investigación de 10 MW (RP-10), usando del código MCNP5. En todos los casos analizados, para las condiciones de almacenamiento normal e incidental, el factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) resulta menor a 0.90 establecido como el criterio de aceptación.

Criticality calculation of the deposits for the fuel elements in the RP-10 nuclear research reactor

Abstract

In this paper is shown the results of the criticality calculation of the deposits for irradiated and non-irradiated fuel elements in the RP-10 research reactor with MCNP5 code. In all cases and for normal and incidental conditions, the effective multiplication factor (K_{eff}) results less than 0,90 according to the acceptance criterion.

1. Introducción

En el almacenamiento de elementos combustibles (EECC) gastados y frescos es necesario evitar que se produzcan accidentes de criticidad, para lo cual se toman una serie de medidas como mantener una distancia adecuada entre los elementos combustibles o instalando materiales absorbentes entre los mismos, etc. Por otro lado, se deben realizar los cálculos considerando las medidas propuestas para demostrar el cumplimiento de los criterios de aceptación. Para ello, es necesario primero definir el Factor de multiplicación para un medio infinito (K_{inf}), como la razón entre el número de neutrones producidos en una generación entre el correspondiente a la generación anterior. Luego, se define el Factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) que toma en cuenta las pérdidas o fugas de neutrones cuando el sistema es finito:

$$K_{eff} = K_{inf} \cdot P \quad (1)$$

donde P es la probabilidad de permanencia en el sistema. Finalmente, se debe demostrar que K_{eff} es menor que el valor indicado en las normas vigentes [1] para las situaciones normales o incidentales.

2. Metodología

Para el cálculo del factor de multiplicación se usó el Método de Montecarlo aplicado al transporte de partículas [2], el cual consiste en seguir el comportamiento de cada una de ellas desde que nace en una fuente definida, hasta su absorción o escape del sistema de interés. Durante la vida de una partícula se utilizan distribuciones de probabilidades para conocer su futuro, tomando números al azar entre 0 y 1 para determinar si es posible una determinada interacción y dónde tiene lugar la misma, basándose en las leyes físicas y las probabilidades que gobiernan estos procesos. A medida, que se acumulan más historias, se van conociendo mejor las distribuciones de las partículas. Las cantidades de interés son calculadas, junto con la incertidumbre estadística de los resultados.

2.1 EECC no irradiados

2.1.1 Descripción del depósito

De acuerdo con lo señalado en el Informe de Seguridad del RP-10 Capítulo 10 Sistemas Auxiliares (acápito 10.1.12) [3], los EECC frescos se almacenan en un armario metálico (Figura 1), normalmente uno por cada casillero haciendo un total de 33.

* Correspondencia autor: rbruna@ipen.gob.pe

Este dispositivo fue especialmente diseñado y construido para mantener una geometría fija, y evitar la criticidad del conjunto. Por otro lado el recinto 28, en donde se almacenan los EECC, cuenta con un sistema de seguridad de acceso controlado y permanece cerrado.

Adicionalmente, considerando las características meteorológicas de la zona de emplazamiento y la ausencia de tuberías que ingresan o salen de dicho recinto, se considera improbable que este ambiente se inunde.



Figura 1. Armario de EECC no irradiados.

2.1.2 Descripción de las configuraciones

Se realizó el cálculo del factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) para las siguientes configuraciones en el almacenamiento de los EECC:

- 1) Armario cargado con 33 EECC y el recinto 28 en condiciones normales.
- 2) Armario cargado con 33 EECC y el recinto 28 completamente inundado con agua (condición incidental).
- 3) Armario cargado con 4 EECC en cada casillero, salvo la última fila en la cual se almacenan 15 EECC, haciendo un total 127 EECC y encontrándose el recinto 28 completamente inundado con agua (condición incidental extrema).

Las configuraciones 2 y 3 son las más pesimistas, debido a que el agua modera a los neutrones de fisión, aumentando la probabilidad de nuevas fisiones. La configuración 1 corresponde a las condiciones normales de almacenamiento.

2.1.3 Descripción del modelo

Para los cálculos de criticidad con el código MCNP5 [2] se modeló en tres dimensiones simulando el sistema para los distintos escenarios.

2.1.3.1 Modelado de la geometría

Para el almacenamiento de los EECC no irradiados se tomaron sus dimensiones reales y las del armario. En el resto de los componentes se hicieron algunas simplificaciones al diseño real teniendo en cuenta que las mismas fuesen siempre conservativas respecto al cálculo. Las principales simplificaciones en el modelado fueron:

- a) No se considera la parte externa del armario. En términos del factor de multiplicación efectivo (K_{eff}), la inclusión de dicha parte se hubiese traducido en una mayor absorción global de neutrones y por lo tanto una menor multiplicación del sistema. Así la no inclusión en el modelo de la parte externa del armario, es conservativa.
- b) Se giró el arreglo 45° en sentido anti horario alrededor del eje Y (Figura 2), manteniendo las distancias relativas entre los EECC, para simplificar la representación geométrica en MCNP5.
- c) No se consideran las dimensiones reales del recinto en el cual se encuentra el armario, sino un espesor de aire o agua de 30 cm adicional a la parte externa de este último, según el escenario analizado. Dado que una distancia mayor los neutrones serán totalmente absorbidos por el medio.
- d) Aun cuando también se pueden almacenar EECC de control, se considera el caso más conservativo; es decir que solo se almacenan EECC normales, dado que estos tienen 4 placas combustibles adicionales con respecto a los de control.

2.1.3.2 Modelado de la fuente

Para el cálculo del factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) con MCNP5 (implementado con la tarjeta KCODE) se definió un punto fuente ubicado en la mitad de cada una de las placas centrales de cada uno de los EECC, haciendo un total de 66 puntos fuentes iniciales. En cada uno de estos puntos se generaron 15000 partículas en cada ciclo, haciendo un total de 500 ciclos, de los cuales no se consideran los primeros 50, para asegurar la convergencia en la distribución espacial de la fuente de neutrones de fisión.

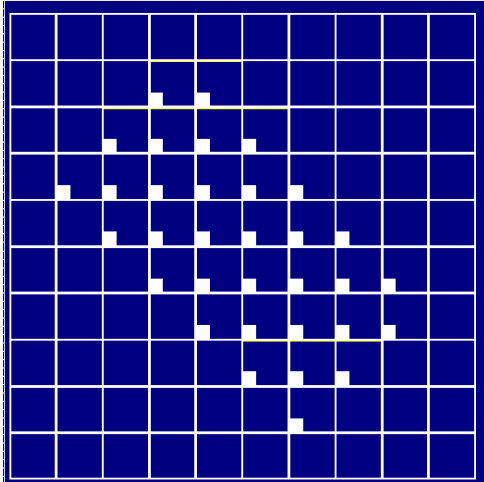


Figura 2. Corte transversal del modelo del armario con EECC no irradiados (plano XZ).

2.1.3.3 Modelado de los materiales

Se asumió que todos los EECC fueron fabricados por NUKEM y que todas las placas tienen el mismo porcentaje de impurezas en el Aluminio y en el U_3O_8 que constituyen el *meat* e igual al promedio entre los respectivos valores mínimo y máximo que aparecen en la Tabla 8.1.5 del Informe Data de Materiales de Elementos del Núcleo del RP-10 [4]; igualmente, para los materiales de la boquilla, marcos y el *cladding* de los EECC (Tablas 8.1.2 y 8.1.3) y, para la masa de uranio y el porcentaje de enriquecimiento (Tabla 8.1.6). El resto de los materiales del núcleo, así como de los componentes del armario fueron tomados de [4,5].

2.2 Depósito de EECC irradiados

2.2.1 Descripción de la piletta auxiliar

De acuerdo a lo señalado en el acápite 10.1.3.1 del Informe de Seguridad del RP-10 Capítulo 10 Sistemas Auxiliares [3] el reactor dispone de una piletta auxiliar (Figura 3), donde se almacenan los EECC irradiados después que han decaído algún tiempo en los depósitos del tanque del reactor. Para esto se cuenta con 2 contenedores iguales con una capacidad máxima de 48 EECC cada uno, cuyos diseños impiden la ocurrencia de la criticidad. Así mismo, se cuenta con un contenedor para EECC fallados con una capacidad de 16 EECC, el cual también podría ser usado para almacenar los EECC irradiados.



Figura 3. Piletta auxiliar para el almacenamiento de EECC irradiados.

2.2.2 Descripción de las configuraciones

Se calculó el *Keff* para las diferentes configuraciones en el almacenamiento de los EECC bajo el supuesto que estos no fueron irradiados, que sería el escenario más conservativo, puesto que se tendría una mayor cantidad de combustible. Además, se consideró que los contenedores podrían tener o no las planchas absorbentes de boral, cuya composición se muestra en la Tabla 1. De esta manera, se analizaron los siguientes escenarios posibles:

- 1) Los 3 contenedores (2 contenedores de 48 EECC y 1 contenedor de 16 EECC) con planchas absorbentes de boral y cargados con 112 EECC en total.
- 2) Los 3 contenedores sin planchas absorbentes de boral y cargados con 112 EECC en total (situación incidental).

De todos los escenarios propuestos, el más pesimista es el escenario 2, pues supone que los contenedores no cuentan con planchas absorbentes de boral.

Tabla 1. Composición del boral (densidad = 2.5g/cc).

Elemento	% en peso	Isótopo	% en peso
Boro	17.10	Boro 10	3.42
		Boro 11	13.68
Carbono	47.40		
Aluminio	78.16		

2.2.3 Descripción del modelo

Para los cálculos de criticidad con MCNP5 se modeló en tres dimensiones para los distintos escenarios estudiados, el sistema conformado por los EECC, los contenedores y la piletta auxiliar.

2.2.3.1 Modelado de la geometría

Para el modelado del almacenamiento de los EECC irradiados se tomaron las dimensiones reales de los EECC, de los contenedores y de la piletta auxiliar; sin embargo, con el fin de facilitar el modelamiento, se hicieron algunas simplificaciones, teniendo en cuenta que las mismas fuesen siempre conservativas. Las principales simplificaciones fueron:

- a) No se consideran los elementos estructurales de soporte de las planchas de boral que separan los compartimientos cada 4 EECC que hay en los contenedores.
- b) No se consideran los elementos estructurales de soporte que se encuentran en la base de cada contenedor.
- c) No se consideran los elementos de izaje que se encuentran en la parte externa de los contenedores.
- d) Se considera que los contenedores de EECC irradiados y fallados se encuentran juntos entre sí (Figura 4).
- e) Se considera que los contenedores de EECC irradiados y fallados se encuentran junto a la pared interna de la piletta auxiliar (Figura 4).
- f) Se considera que la altura de la piletta auxiliar es 3 m.
- g) No se considera el canal de transferencia que existe entre el tanque del reactor y la piletta auxiliar.
- h) Se considera que solo se almacenan EECC normales, siendo este el caso más conservativo, dado que los EECC de control tienen 4 placas combustibles menos que los normales.

En términos del factor de multiplicación efectivo, haber incluido los componentes estructurales mencionados hubiese significado una mayor absorción global de neutrones y por lo tanto una menor multiplicación del sistema. Así mismo, considerar que los contenedores estén juntos, aumenta la probabilidad de nuevas fisiones y reduce las fugas, aumentando también la multiplicación del sistema. De esta manera, considerar los contenedores sin los mencionados componentes estructurales y que estos se encuentran uno al lado del otro, son simplificaciones conservativas.

Por otro lado, suponer que los contenedores están juntos a la pared de la piletta es una hipótesis conservativa, pues al adicionar más

agua alrededor de los contenedores el Keff disminuye, al disminuir el factor de utilización térmica, dado que el sistema se comporta como sobre moderado. Finalmente, considerar la altura total de la piletta auxiliar y la existencia del canal de transferencia, no varía significativamente el factor de multiplicación, pero si aumenta el tiempo de cálculo.

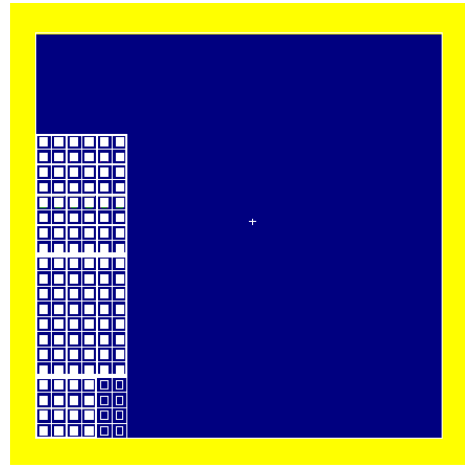


Figura 4. Vista de planta del modelo de la piletta auxiliar.

2.2.3.2 Modelado de la fuente

Para el cálculo del factor de multiplicación efectivo con MCNP5 (implementado con la tarjeta KCODE) se definió un punto fuente ubicado en la mitad de cada una de las placas centrales de los EECC, haciendo un total de 112 puntos fuentes iniciales. Luego, se simularon 500 ciclos generándose en cada uno 20000 partículas para cada uno de los puntos definidos.

2.2.3.3 Modelado de los materiales

Además de lo mencionado en el punto 2.1.3.3 se supuso contenedores cargados con EECC no irradiados. Desde el punto de vista neutrónico, considerar EECC frescos en lugar de gastados supone un caso más reactivo (con mayor cantidad de uranio 235) que el caso real.

3. Resultados y Discusión

3.1 Depósito de EECC no irradiados

En la Tabla 2 se presentan los valores del Keff con sus respectivos intervalos de confianza al 99 %, para las 3 configuraciones consideradas. Los valores confirman que el

factor de multiplicación efectivo, para la condición incidental extrema, es mucho mayor que el correspondiente al caso normal, debido a que el poder de moderación del agua es mayor que el del aire y por lo tanto el porcentaje de neutrones térmicos es mayor en el primer caso, con lo cual se incrementaría la tasa de fisiones térmicas aumentando con ello el K_{eff} . Así mismo se muestran los resultados para el hipotético caso incidental en cual se asume que el recinto 28, se encuentra completamente inundado con agua y que se almacenan 4 EECC por casillero, salvo la última fila en la cual se almacenan 3 EECC.

En este caso, el K_{eff} alcanza su valor máximo, pero aun así sigue siendo menor que el valor máximo establecido en el criterio de aceptación [1]. En la Figura 5, se muestra el gráfico de convergencia del K_{eff} para este caso.

Tabla 2. K_{eff} del armario cargado con EECC.

Configuración	$K_{eff} \pm 2.7\sigma$
1	0.02877 ± 0.00014
2	0.37711 ± 0.00065
3	0.74431 ± 0.00081

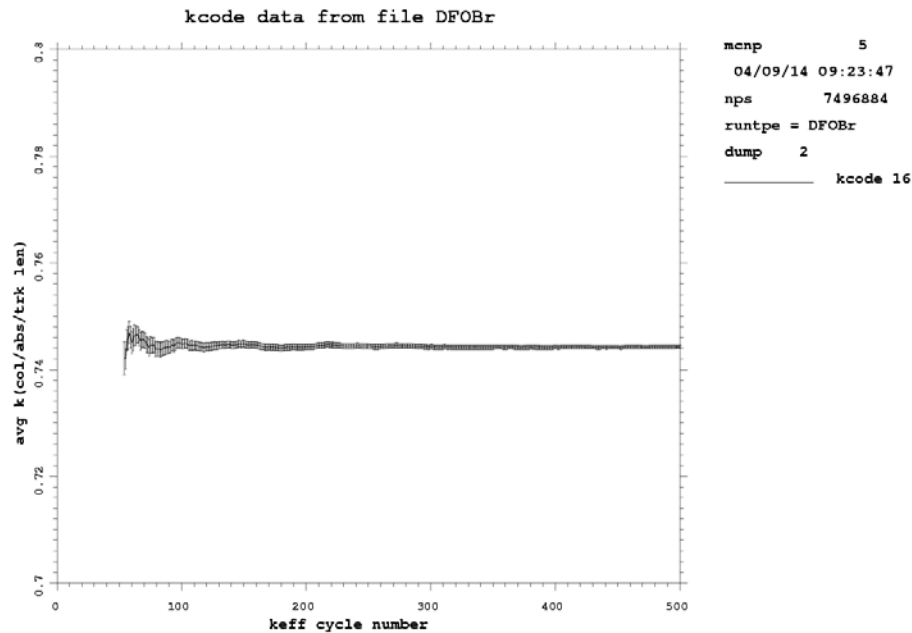


Figura 5. Gráfico de la convergencia del K_{eff} cuando el local 28 se encuentra completamente inundado, con 4 EECC en cada casillero del armario, exceptuando la última fila.

3.2 Depósito de EECC irradiados

En la Tabla 3 se muestran los valores calculados del K_{eff} con sus respectivos intervalos de confianza al 99 %, para las dos configuraciones consideradas en el almacenamiento de 112 EECC en la piletta auxiliar. Los valores confirman que el factor de multiplicación efectivo es menor que el valor máximo establecido en el criterio de aceptación [1].

Tabla 3. K_{eff} de la piletta auxiliar con 112 EECC de U_3O_8 .

Configuración	$K_{eff} \pm 2.7\sigma$
1	0.59673 ± 0.00062
2	0.71531 ± 0.00059

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, el almacenamiento de los EECC de U_3O_8 se realiza en condiciones seguras, siendo el K_{eff} menor que el valor máximo establecido en el criterio de aceptación [1] en todos los casos estudiados. Asimismo, se observa que el código MCNP5 representan bien la variación del K_{eff} con el tipo de moderador empleado y con las distancias entre EECC.

5. Agradecimientos

Al experto OIEA, Lic. Marcelo Madariaga por sus sugerencias, aportes y correcciones al presente artículo.

6. Bibliografía

- [1] Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina. Guía AR 4 Revisión 0. Diseño de reactores de investigación; 2003. Numerales 83 y 84.
- [2] Los Alamos National Laboratory. MCNP5 – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987. 2003.
- [3] Castro J, Arrieta R, Santivañez R, Carrillo D. Informe de Seguridad del RP-10. Capítulo 10: Sistemas auxiliares. Lima: IPEN. [Informe Interno].
- [4] Gallardo Alberto. Data de materiales de elementos del núcleo del RP-10. Lima: IPEN; 2013. [Informe Interno].
- [5] Williams III R, Gesh, C, Pagh R. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. Pacific Northwest National Laboratory; 2003 April. Report No. PNNL 15870 Rev. 1. Contract No. DE-AC05-76RL01830.
- [6] General Electric Company .Nuclides and Isotopes, Fourteenth edition. 1989.