

## Diseño de un Mini Reactor nuclear Subcrítico

Claudia Rafela Escobedo-Galván, Hector Rene Vega-Carrillo, Victor M. Dávila-Hernandez

Unidad Académica de Estudios Nucleares  
Universidad Autónoma de Zacatecas  
Jardín Juárez 147, col. Centro. Zacatecas, Zac. C.P. 98000  
e-mail: [rafelaescobedo@hotmail.com](mailto:rafelaescobedo@hotmail.com)

### Resumen

Se diseñó un mini reactor nuclear subcrítico formado por un medio moderador de agua ligera, uranio como combustible, una fuente isotópica de neutrones de  $^{239}\text{PuBe}$ . El diseño se hizo mediante métodos Monte Carlo con el código MCNP5 en el cual se modeló el uranio en un arreglo de cilindros huecos concéntricos de 8.5, 14.5, 20.5, 26.5, 32.5 cm de radio interno y 3 cm de espesor, de 36 cm de altura. Se hicieron diferentes modelos desde un solo cilindro de combustible (Uranio natural) hasta cinco. En el centro del mini reactor se ubicó la fuente de neutrones de  $^{239}\text{PuBe}$ , en cada arreglo se puso agua como moderador. Se usaron las bibliotecas de secciones eficaces ENDF/VI y el número de historias fue lo suficientemente grande para garantizar una incertidumbre menor al 3 %. Para cada caso se calculó el factor de multiplicación efectivo  $k_{\text{eff}}$ , el factor de amplificación y la potencia. Se calcularon en los diferentes casos, en el exterior del mini reactor la dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$ . El valor de la  $k_{\text{eff}}$ , el factor de amplificación ( $\nu$ ) y la potencia (P) se relacionan directamente con el número de cilindros de Uranio como combustible. A pesar de que la energía promedio de los neutrones del  $^{239}\text{PuBe}$  está entre 4.5 y 5 MeV, en el caso del mini reactor para uno cilindro, en el espectro de neutrones no existe la presencia de neutrones térmicos, por lo que las fisiones producidas son con neutrones rápidos, y en los diseños de dos y tres anillos, el espectro de neutrones muestra la presencia de neutrones térmicos, sin embargo las fisiones que se están generando son con neutrones rápidos, finalmente en los casos cuatro y cinco la cantidad del moderador es suficiente para termalizar los neutrones y así producir la fisión. El valor máximo para la  $k_{\text{eff}}$  fue de 0.82, este valor se aproxima bastante al ensamble de la UAZ que genera una  $k_{\text{eff}}$  de 0.86. De acuerdo a las normas de seguridad y protección radiológica para los diseños del mini reactor de uno, dos y tres cilindros cumplen con la seguridad establecida, mientras para los diseños de cuatro y cinco cilindros no cumplen.

**Palabras Clave:** Diseño, Monte Carlo, Subcrítico,  $k_{\text{eff}}$ .

## 1.- INTRODUCCIÓN

Algunos países desarrollados están limitando su expansión así como la producción de energía nuclear entre los que se destacan Japón, Alemania, Suiza etc. Y otros como India y China aun continúan con los planes de construcción de plantas nucleares, en el caso de Latinoamérica las expectativas para el uso de esta energía son prometedoras [Honty, 2011]. La energía nuclear es económicamente viable y cumple con más del 20% de la demanda mundial de electricidad. Esta energía puede satisfacer sin complicaciones las demandas energéticas que se tienen actualmente [Lafuente, 2011)]. La mayoría de los países satisfacen sus demandas energéticas a base del consumo en combustibles fósiles, contribuyendo al calentamiento global a través de la emisión de gases como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, o carbono. Para evitar esto se ha empleado el uso de energías alternas como son la eólica, hidráulica, solar y energía nuclear etc. Pero ningunas de éstas, en forma aislada, pueden satisfacer por completo la demanda energética. A corto plazo solo la energía nuclear lo puede hacer [Echeverría, 2012]. La presencia de la energía nuclear en América Latina ha sido muy poco significativa. De acuerdo con los análisis de prospectiva de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el consumo global de electricidad en América Latina alcanzará los 1,438 TWh en el año 2030, por lo que ya es una necesidad la construcción de plantas nucleares en Latinoamérica [Marín, 2002]. Para las centrales nucleares el objetivo principal es proteger al individuo, la sociedad y el medio ambiente estableciendo y manteniendo en ellas medidas eficaces contra los riesgos radiológicos [Abu-Khander, 2009].

Los reactores nucleares se clasifican en reactores de potencia (cuyo fin es producir energía), a través de la reacción en cadena que se produce dentro de él y dicha reacción puede ser controlada. La energía que producen de manera comercial, oscila entre 600 y 1500 MWatts con eficiencias termodinámicas cerca del 33% [Nifenecker, 2001]. Los reactores de investigación en donde el propósito principal es para actividades de investigación ejemplo de ellos, análisis por activación neutrónica (NAA), producción de radioisótopos para uso medicinal e industrial, analizar materiales mediante técnicas no destructivas, la mayoría de

los neutrones se emplean para producir la fisión usando solo una pequeña parte para la realización de experimentos. La potencia de estos reactores varía desde unos pocos Watts hasta casi 100 MW [Faghihia, 2009]. Los reactores de enseñanza en donde la reacción de fisión que se produce solo con una fuente de neutrones [Vega-Carrillo, 2015]. Una de sus principales características, es la seguridad que tienen [Salvatores, 2001], así como un funcionamiento más sencillo que mantiene el margen de subcriticidad segura [Schikorr, 2001]. Los reactores subcríticos se usan para realizar experimentos que confirman cálculos de reactores de potencia, y también se están empleando como transmutadores de algunos desechos nucleares de corta vida [Stange, 2015, Nuttin *et al*, 2005]. Los reactores subcríticos o de investigación son útiles para que los estudiantes generen experiencia en la práctica y se familiaricen con la física de los principales parámetros en el reactor. Cuando un reactor es subcrítico, se tiene un sistema de una alta seguridad y una mayor eficiencia en el aprendizaje del comportamiento de los neutrones así como el concepto de la física de los reactores [Kamalpour, 2014].

Los parámetros más importantes de un reactor son: El factor de multiplicación ( $k_{\text{eff}}$ ), la reactividad, la distribución espacial de los neutrones, el espectro de los neutrones dentro y fuera del núcleo del reactor y la dosis equivalente ambiental en los puntos ubicados fuera del reactor [González-Puin, 2013; Kamalpour, 2014]. La  $k_{\text{eff}}$  es la razón entre los neutrones que se producen en la generación  $i+1$  y los neutrones que se produjeron en la generación  $i$ . Si  $k_{\text{eff}} > 1$ , el reactor es crítico, si  $k_{\text{eff}} < 1$ , el reactor subcrítico [Vega-Carrillo, 2012]. Cuando se habla de reactores subcríticos se entiende que estos dispositivos están diseñados para no llegar a ser críticos, sin importar la situación que se esté presentando (inundaciones, fundición del núcleo, etc). Dando por entendido que estos reactores son seguros hablando desde la perspectiva de la criticidad [Gohar, 2010].

En México existen dos ensambles subcríticos uno en el Instituto Politécnico Nacional en la ciudad de México y el segundo se encuentra en la Universidad Autónoma de Zacatecas en Zacatecas. Ambos, son Nuclear Chicago modelo 9000. El reactor de la UAZ es un reactor heterogéneo que usa agua ligera como moderador, el Uranio es natural metálico  $\text{U}_3\text{O}_8$ , la capacidad total de este reactor es de 2618 kg de Uranio, la vasija es de forma cilíndrica con

una altura de 152.4 cm y un diámetro de 121.92 cm, el arreglo del reactor es de forma hexagonal en cuyo centro hay una barra en donde se incrusta la fuente de neutrones que es de  $^{239}\text{PuBe}$  que emite  $Q = 1.01 \text{ E } (7) \text{ n/s}$  [Vega-Carrillo, 2014]. Bajo estas condiciones la  $k_{\text{eff}}$  es 0.85683, teniendo un factor de amplificación  $k_{\text{eff}} = 6.985$ , una potencia del reactor de  $P = 61.73 \text{ mW}$ , emitiendo un flujo máximo de  $\phi_{\text{Máx}} = 2.93 \text{ E}(4) \text{ n/cm}^2\text{-s}$  y una dosis ambiental en la periferia de  $1.86 \text{ }\mu\text{Sv/h}$  [Vega-Carrillo, 2012].

Llevar a cabo la elaboración de los proyectos de los reactores nucleares puede llegar a ser muy caro y es por ello que se emplea el uso de códigos para la obtención de cálculos realistas en los reactores, Todos los códigos funcionan con métodos deterministas o estocásticos. Los métodos estocásticos (Métodos Monte Carlo), que son empleados en su mayoría en reactores subcríticos, Monte Carlo es muy eficiente para modelar una geometría bastante complicada como es el caso del núcleo de un reactor [Dawahra, 2014]. Los métodos deterministas son empleados para cálculos de reactores críticos, estos métodos son aproximaciones de la ecuación de Boltzmann, una de las aproximaciones más empleadas es la teoría de difusión de multi-grupo [Gulik, 2014].

El objetivo de este trabajo fue diseñar un mini reactor nuclear subcrítico con combustible de Uranio natural, moderador de agua ligera y una fuente isotópica de neutrones de  $^{239}\text{Pu-Be}$ .

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizó el código MCNP5; se utilizaron las bibliotecas de secciones eficaces ENDF/VI y el número de historias fue lo suficientemente grandes para garantizar una incertidumbre menor al 3 %. Una vez que se tenía el conocimiento del funcionamiento de este código, se prosiguió a realizar el diseño del mini reactor nuclear subcrítico como se muestra a continuación en la figura 1.

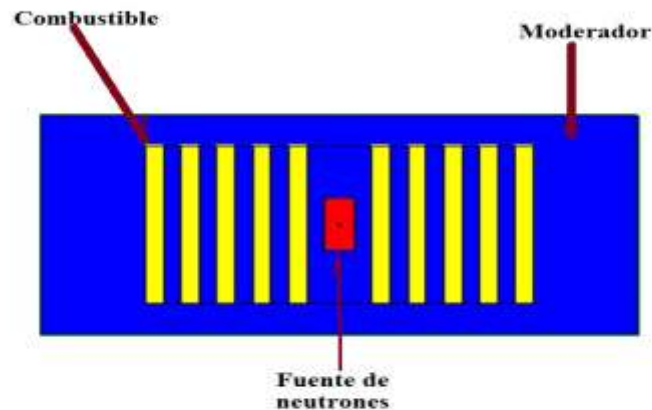


Figura 2.1. Mini reactor nuclear subcrítico con cinco anillos de Uranio.

En la figura 2.1 se muestran el arreglo para cinco anillos, en el centro se colocó una fuente de  $^{239}\text{Pu-Be}$  y después se colocaron cilindros concéntricos de Uranio natural y agua ligera como moderador. Cada cilindro de Uranio tiene una altura de 36 cm y un espesor de 3 cm, estos valores se mantuvieron constantes en cada arreglo. Con la simulación se calcularon los valores de la  $k_{\text{eff}}$  para cada anillo de Uranio. Cuando se obtuvo el valor de la  $k_{\text{eff}}$ , se incluyeron más datos para obtener los espectros de los neutrones y la dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$ .

## 2.1 Cálculos

El método Monte Carlo se usó para calcular el factor de multiplicación efectivo,  $k_{\text{eff}}$ , del mini reactor nuclear subcrítico, el factor de amplificación de los neutrones,  $\mu$ , la distribución espacial de los neutrones y de la dosis equivalente ambiental, y los espectros de neutrones a lo largo del radio del reactor. Estos parámetros se calcularon en función de la cantidad de combustible, representado por el número de anillos. Con los valores de la  $k_{\text{eff}}$  y el  $\mu$  se calculó la potencia del reactor.

### 2.1.1 Valores del $k_{\text{eff}}$ , la potencia y la $H^*(10)$ , en función al número de anillos.

Tabla 2.1. Parámetros del mini reactor en función del número de anillos de Combustible.

# de Anillos	$k_{\text{eff}}$	Masa (kg)	$\mu$	Potencia (pW)	$H^*(10)$ (pSv)
1	$0.5295 \pm 3.494E(-4)$	90.7	2.13	13.2	$2.0062E(-4) \pm 1.5\%$
2	$0.6418 \pm 6.610E(-4)$	168.5	2.79	21.1	$2.1642E(-4) \pm 5.7\%$
3	$0.7294 \pm 5.617E(-4)$	246.2	3.70	31.7	$2.7430E(-4) \pm 5.2\%$
4	$0.7736 \pm 5.648E(-4)$	324	4.42	40.2	$4.4193E(-4) \pm 5.2\%$
5	$0.8004 \pm 5.763E(-4)$	401.8	5.01	47.1	$7.9510E(-4) \pm 3.25\%$

### 2.1.2 Espectros de Neutrones

En la figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 se muestra el espectro de neutrones, en función de la distancia respecto al centro del reactor, a diferentes distancias para el caso del mini reactor con uno, dos, tres, cuatro y cinco anillos de combustible.

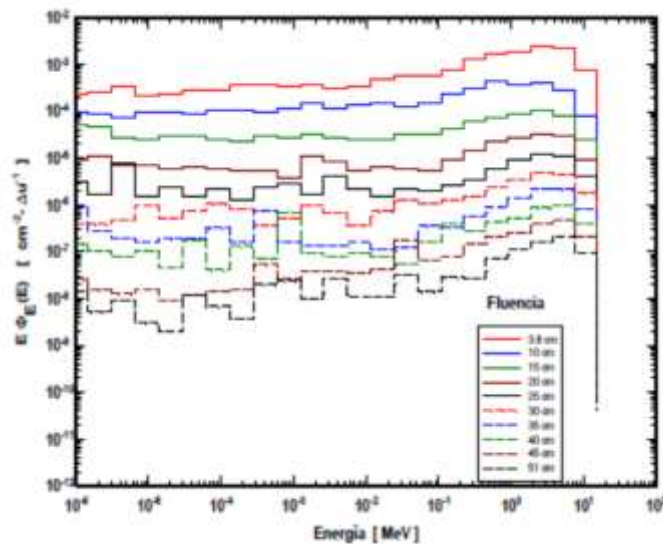


Figura 2.1. Espectro de neutrones en función de la distancia para un anillo.

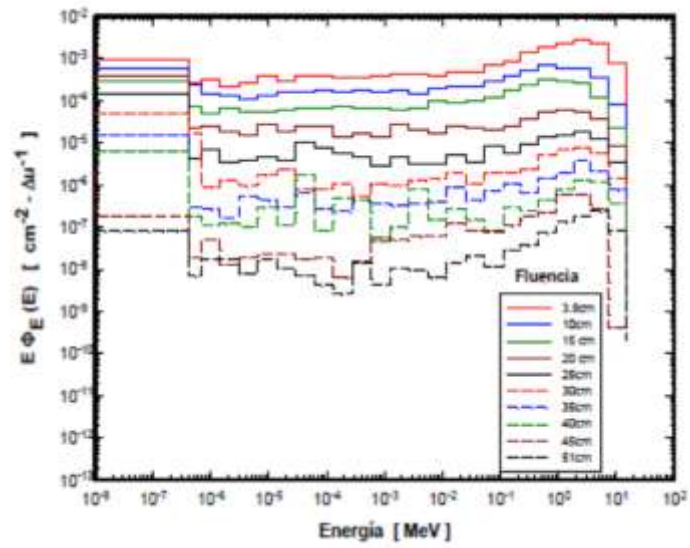


Figura 2.2. Espectro de neutrones en función de la distancia para dos anillos.

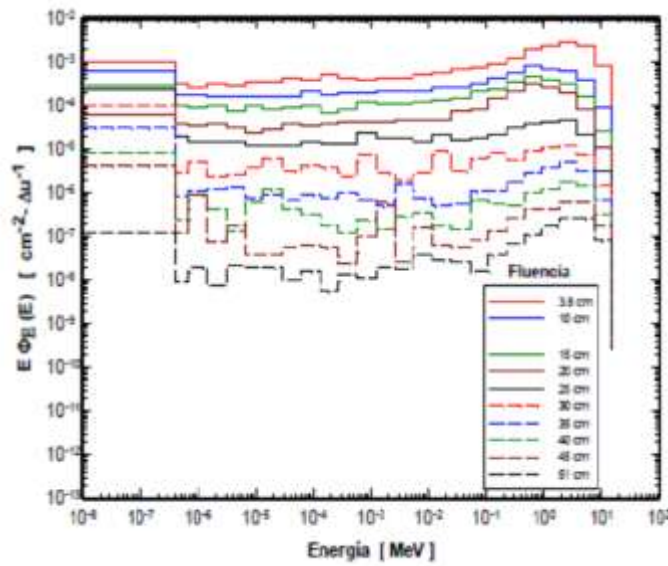


Figura 2.3. Espectro de neutrones en función de la distancia para tres anillos.

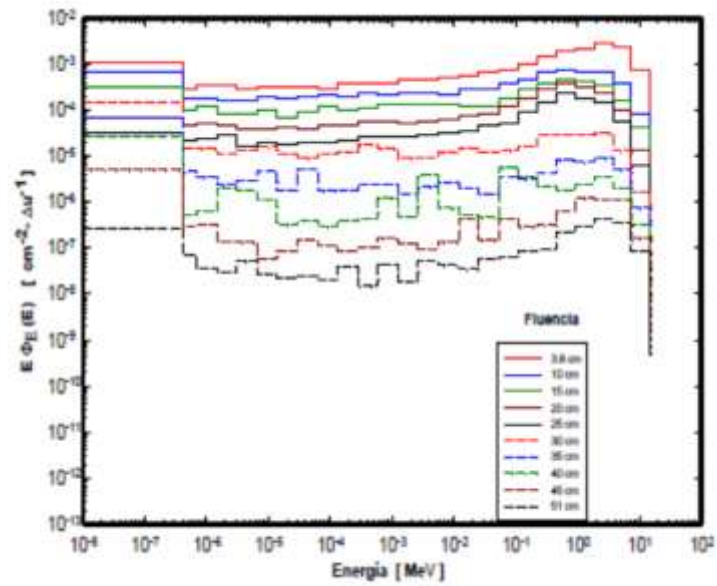


Figura 2.4. Espectro de neutrones en función de la distancia para cuatro anillos.

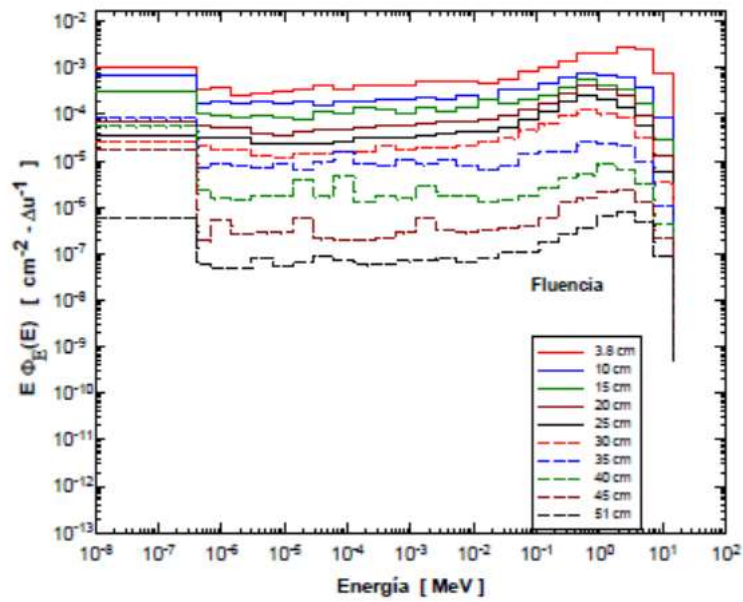


Figura 2.5. Espectro de neutrones en función de la distancia para cinco anillos.



### 2.3 Distribución espacial de los neutrones

La distribución espacial del flujo total de neutrones permite obtener la forma del "Buckling" del reactor, en las figuras 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 se muestra esta distribución para el mini reactor con uno, dos, tres, cuatro y cinco anillos de combustible.

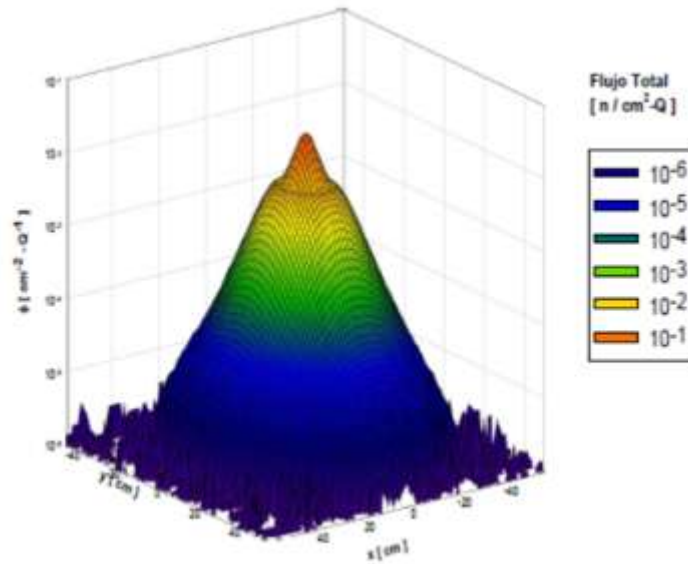


Figura 2.6. Flujo de neutrones para un anillo.

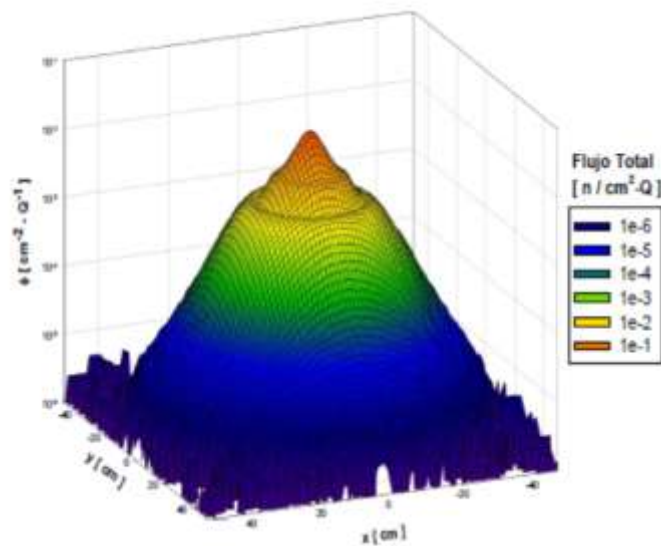


Figura 2.7. Flujo de neutrones para dos anillos.

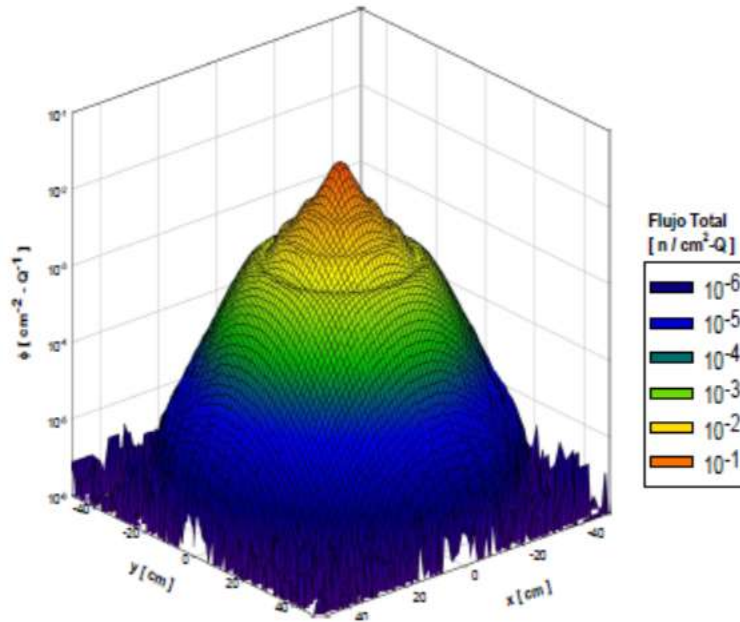


Figura 2.8. Flujo de neutrones para tres anillos.

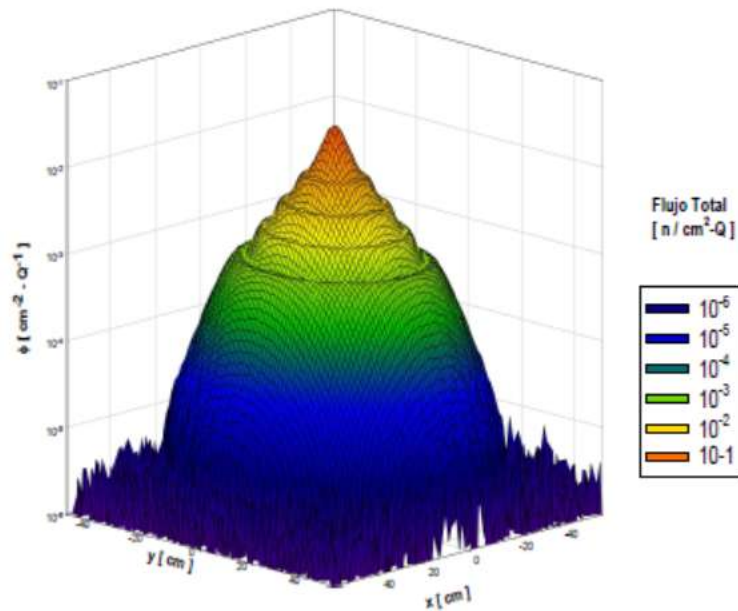


Figura 2.9. Flujo de neutrones para cuatro anillos.

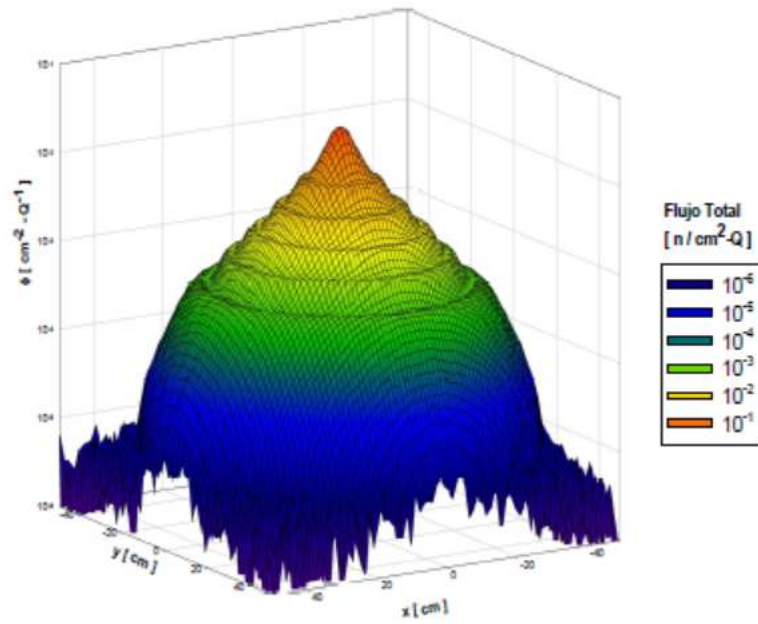


Figura 2.10. Flujo de neutrones para cinco anillos.

## 2.4 Distribución espacial de la $H^*(10)$

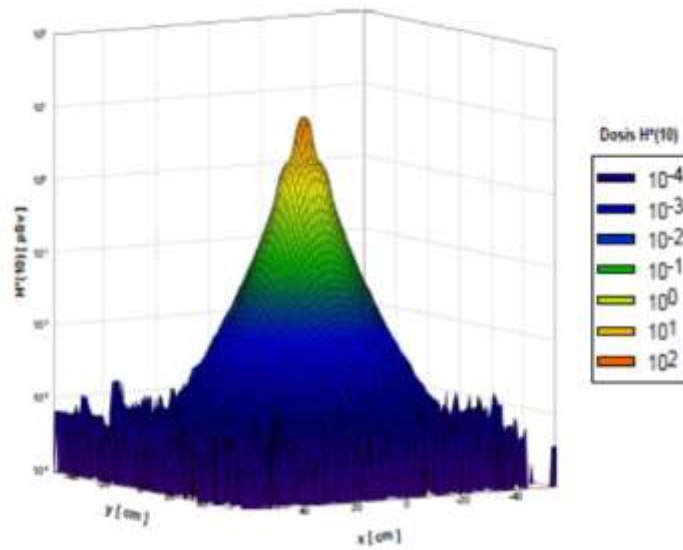


Fig. 2.11.  $H^*(10)$  para un anillo.

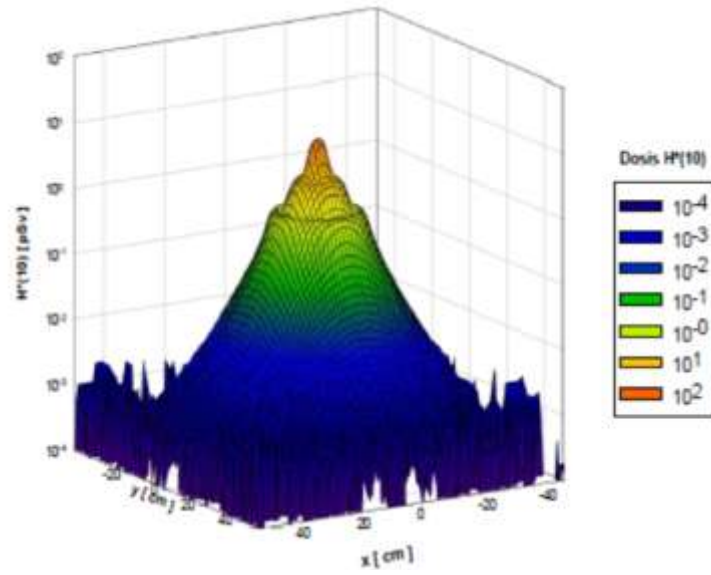


Figura 2.12.  $H^*(10)$  para dos anillos.

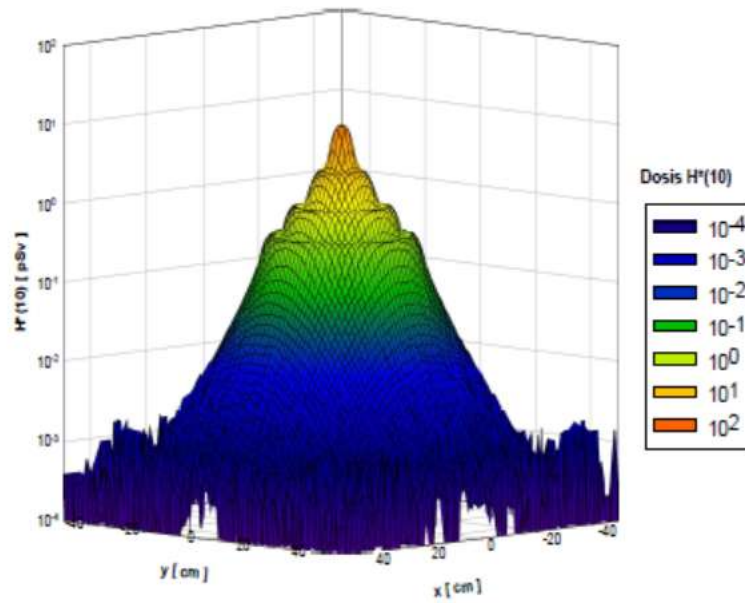


Figura 2.13.  $H^*(10)$  para tres anillos.

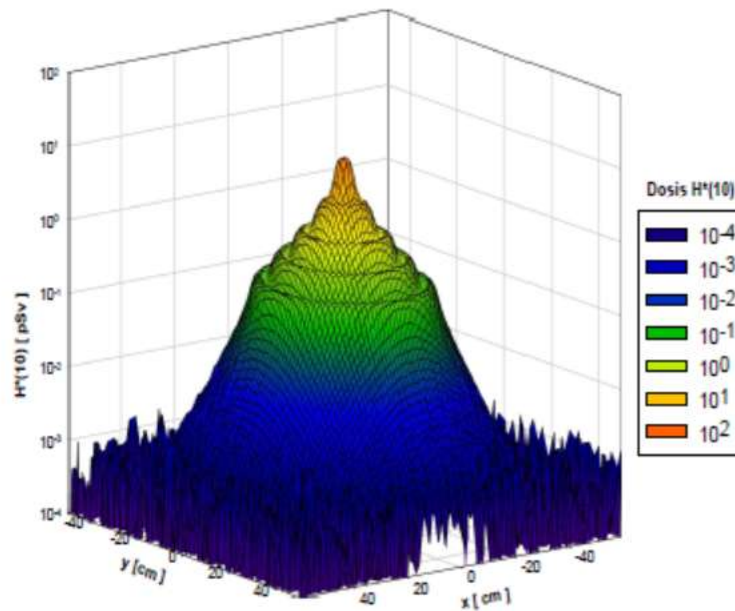


Figura 2.14.  $H^*(10)$  para cuatro anillos.

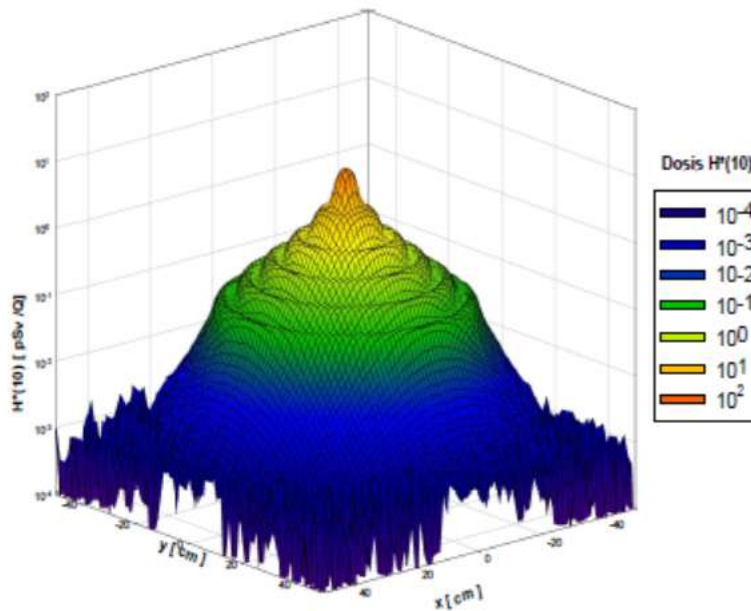


Figura 2.15.  $H^*(10)$  para cinco anillos.

Si se usa la fuente de  $^{239}\text{Pu-Be}$  que emite  $1.01\text{E}(7)$  n/s, los parámetros de la tabla 2.1 cambian a los mostrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros del mini reactor en función del número de anillos de combustible.

# de Anillos	$k_{eff}$	$\mu$	Potencia (mW)	H*(10) ( $\mu$ Sv/h)
1	0.5295±3.494E(-4)	2.13	0.15	7.29
2	0.6418±6.610E(-4)	2.79	0.23	7.87
3	0.7294±5.617E(-4)	3.70	0.35	9.97
4	0.7736±5.648E(-4)	4.42	0.44	16.07
5	0.8004±5.763E(-4)	5.01	0.52	28.91

### 3.- DISCUSIÓN

#### 3.1 Valores del $k_{eff}$ , la potencia y la H\*(10).

En la tabla 2.1 se muestran los valores calculados de  $k_{eff}$ , y la dosis ambiental por métodos Monte Carlo, mientras que el factor de amplificación y la potencia del reactor se obtuvieron con las siguientes ecuaciones respectivamente

$$\mu = \frac{1}{1 - k_{eff}} \quad (1)$$

$$P = \frac{Q\mu k_{eff}}{\nu p_f} \quad (2)$$

En la ecuación (2), Q es el valor de la fuente de neutrones, que para este caso es de  $^{239}\text{Pu}$ -Be y tiene un valor de 1.01E(7) n/s,  $\nu = 2.44$  n/fisión y  $p_f = 3.20077 \text{ E } (10)$  fisiones/Watt, son parámetros reportados.

En la tabla 2.1 se muestra como se genera un aumento en la  $k_{\text{eff}}$  con forme se aumenta el número de anillos, de manera similar aumentan los parámetros  $\mu$ , la potencia, la masa y la  $H^*(10)$ . Se observa que en el diseño del mini reactor nuclear subcrítico para cinco anillos de Uranio se obtiene un valor de la  $k_{\text{eff}}$  es de 0.80, con una masa de Uranio de 401.8 kg, un factor de amplificación de 5.01 y una potencia de 519  $\mu\text{W}$ , estos valores tienden a asimilarse con los reportados con el reactor subcrítico de la UAZ que reporta un valor de  $k_{\text{eff}}$  de 0.83, con una masa de 2430 kg, un factor de amplificación de 5.77, generando una potencia de 617  $\mu\text{W}$

### 3.2 Espectros de Neutrones

En la figura 2.1, que es el caso del mini reactor nuclear subcrítico con un anillo de Uranio se obtuvo un espectro de neutrones en donde solo se presentan los neutrones rápidos y epitérmicos. La ausencia de neutrones térmicos indica que las fisiones que se producen son llevadas a cabo con neutrones rápidos.

Para la figura 2.2 y 2.3 que es el caso del mini reactor subcrítico con dos y tres anillos de Uranio respectivamente, los espectros de neutrones muestran la presencia de neutrones rápidos, térmicos y epitérmicos. La presencia de neutrones térmicos indica que la configuración y la distancia de segundo y tercer anillo de Uranio (a una distancia de 13.5 y 18.5 cm de la fuente), es suficiente para termalizar los neutrones rápidos provenientes de la fuente de  $^{239}\text{Pu-Be}$ . Sin embargo la presencia de los neutrones rápidos continua siendo mayor que los térmicos en ambos casos, por lo que se concluye que las fisiones que se están produciendo en su mayoría continúan siendo con neutrones rápidos, también existiendo fisiones producidas con neutrones térmicos puesto que la sección eficaz va a aumentar. Estos resultados se verifican con el aumento de  $\mu$  en el caso de un anillo que fue de 2.128 y en el caso de dos anillos fue de 2.778 y finalmente para tres anillos fue de 3.704.

Finalmente para los casos de las figuras 2.4 y 2.5 continúan presentes los neutrones rápidos, térmicos y epitérmicos; en ambos casos los espectro de neutrones muestran que existen más neutrones térmicos que rápidos, por lo que se concluye que a partir del cuarto y quinto anillo de Uranio la mayoría de las fisiones producidas son con neutrones térmicos. Sin embargo el factor de amplificación de neutrones tiende a parecerse (con cinco anillos) que es de 5.56, con el reportado en el reactor de la UAZ que es de 5.77

El incremento de las fisiones es debido al aumento de la masa del Uranio y al incremento de neutrones térmicos debidos a la configuración propuesta. En todos los casos para el detector colocado a 51 cm que está localizado fuera del mini reactor mostro un aumento en los neutrones rápidos debido al cambio de medios, puesto que el medio del agua es más denso que el medio del aire, por lo que los neutrones al cambiar de medios también cambian su velocidad.

### **2.3 Distribución espacial de los neutrones**

La distribución espacial de los neutrones muestra como el flujo total de los neutrones forman el Buckling del reactor. En las figuras 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 se observa claramente cómo cambia el Buckling del mini reactor subcrítico conforme aumenta el número de anillos, para la figura 2.10 el Buckling del mini reactor subcrítico es de cinco anillos de Uranio, cuando los neutrones provenientes de la fuente de  $^{329}\text{Pu-Be}$  tienen contacto con el primer anillo de Uranio se generan fisiones con neutrones rápidos, para el segundo y tercer anillo la mayoría de las fisiones que se generaron fue con neutrones rápidos sin descartar que también hay fisiones con neutrones térmicos.

A partir del cuarto y quinto anillo de Uranio se ven más pronunciados los anillos debido al incremento de fisiones que se están generando, en su mayoría producidas neutrones térmicos.



En todos los casos se presenta un mayor de flujo de los neutrones en el centro de la fuente y conforme se aleja de ella la disminución de estos, cumpliéndose así la ley inversa al cuadrado.

### **3.4 Distribución espacial de la $H^*(10)$**

La distribución espacial de la  $H^*(10)$ , en el plano medio del reactor, permite evaluar el comportamiento de los neutrones dentro y en la frontera externa del mini reactor nuclear subcrítico. En las figuras 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15 se muestra esta distribución para el mini reactor con uno, dos, tres, cuatro y cinco anillos de combustible respectivamente.

Se observa cómo se ensancha la gráfica conforme se incrementa el número de anillos, esto indica que la  $H^*(10)$  aumenta en la periferia del mini reactor subcrítico y de acuerdo a las normas de seguridad y protección, el diseño del mini reactor subcrítico es seguro dentro de los tres primeros casos, para el caso con cuatro y cinco anillos, el mini reactor subcrítico no cumple con estas normas.

En la tabla 2.2 se muestra como aumenta de manera poco significativa para los tres primeros caso, pero ya en los casos en donde el mini reactor tiene cuatro y cinco anillos de Uranio, se observa claramente el incremento drástico de  $H^*(10)$ . Concluyendo que cuando las fisiones se producen con neutrones rápidos la  $H^*(10)$  aumenta poco, por lo que va a permitir que el diseño del mini reactor nuclear subcrítico cumpla con las normas de seguridad y protección. Mientras que cuando las fisiones son con neutrones térmicos los resultados que se obtuvieron es un aumento drástico en la dosis ambiental generando como consecuencia que estos sistemas no cumplan con las normas de seguridad y protección radiológica. Sin embargo en los cinco casos  $k_{eff}$  es menor a la unidad.

## 5.- CONCLUSIONES

Se diseñó un mini reactor nuclear subcrítico con métodos Monte Carlo. El diseño fue cambiando desde un anillo, hasta llegar a un modelo óptimo que mostrara parámetros similares a los parámetros que tiene el reactor subcrítico de la UAZ, que fue el mini reactor subcrítico con cinco anillos. Las principales diferencias son el tamaño y la masa del combustible que se reduce en 1/6 a la utilizada para el reactor de la UAZ.

En todos los diseños de los mini reactores se mantuvo la  $k_{eff}$  debajo de la unidad, para garantizar la seguridad en cuanto a criticidad se refiere.

Se encontró en todos los casos la presencia de neutrones térmicos, rápidos y epitermicos, solo en el primer caso (un anillo) no hubo presencia de neutrones térmicos. Pero para los tres primeros diseños de mini reactores, las fisiones que se producen en su mayoría son con neutrones rápidos, y a su vez al medir la  $H^*(10)$ , se encontró que cumplen con las normas de seguridad y protección.

En los diseños de mini reactores con cuatro y cinco anillos de Uranio, la mayoría de las fisiones que se presentan son con neutrones térmicos, además existe un gran aumento en la  $H^*(10)$ , este aumento produce que estos diseños no cumplan con las normas de seguridad y protección.

### **Agradecimientos**

Al CONACyT por la beca otorgada a CREG, y al COZCyT por el apoyo parcial otorgado al proyecto “Reactor Nuclear Subcrítico”.

## REFERENCIAS

- Abu-Khander, M. y Marden. M. (2009). *Recent advances in nuclear power: A review*. Progress in Nuclear Energy **51**: 225-235.
- Dawahra, S., Khattab, K. y Saba, G. (2014). *Determination of the LEU core safety parameters of the MNSR reactor using the MCNP4C code*. Annals of Nuclear Energy **63**: 594-597.
- Echeverría, F. A., Sarabia, P.L. y Venegas-Martinez. F. (2012). *Valuación económica de proyectos energéticos mediante opciones reales: el caso de energía nuclear en México*. Ensayos Revista de Economía **31**: 75-98.
- Faghihnia F y Mirvakili S. (2009). *Burn up calculations for the Iranian miniature reactor: A Reliable and safe research reactor*. Nuclear Engineering and Design **239**: 1000-1009.
- González-Puin, L.X., Vega-Carrillo, H.R. y Martínez-Ovalle, S.A. (2014). *Espectros de neutrones producidos por fuente de  $^{239}\text{Pu-Be}$  en reactor nuclear*. Revista Ciencia en Desarrollo **4**: 7-11.
- Gohar, Y. y Smith, D. L. (2010). *YALINA, facility, a sub-critical accelerator-driven system (ADS) for nuclear energy research. Facility description and overview of the research program*. Report ANL-10/05, Argonne National Laboratory.
- Gulik, V. y Tkaczyk, A. H. (2014). *Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems*. Nuclear Engineering and Design **270**: 133-142.
- Honty, G. (2011). *Energía nuclear en América Latina: el día después*. Nueva Sociedad **234**: 32-44.
- Kamalpour, S., Khalafi, H. y Mirvakili, S. M. (2014). *Conceptual design study of light water subcritical assembly*. Progress in Nuclear Energy **73**: 107-112.
- Lafuente, A. y Piera M. (2011). *Nuclear fission sustainability with subcritical reactors driven by external neutron sources*. Annals of Nuclear Energy **38**: 910-915.
- Marín, C. E. (2002). *La producción de electricidad de origen nuclear en España*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles **33**: 65-77.
- Nifenecker, N., David S., Loiseaux J., y Meplan O. (2001). *Basics of accelerator driven subcritical reactors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **463**: 428-467.

- Nuttin, A., Heuer, D., Billebaud, A., Brissot, R., Le Brun, C., Liatard, E. y David, S. (2005). *Potential of thorium molten salt reactors detailed calculations and concept evolution with a view to large scale energy production*. Progress in Nuclear Energy **46**: 77-99.
- Salvatores M., Slessarev I y Berthou V. (2001). Review and proposals about the role of accelerator driven systems nuclear power, Progress in Nuclear Energy **38**: 167-178.
- Schikorr, W. M. (2001). *Assessments of the kinetic and dynamic transient behavior of sub-critical systems (ADS) in comparison to critical reactor systems*. Nuclear Engineering and Design **210**: 95-123
- Stange, G., Mackie, T y Corradini, M. A. (2015). *Small reactor design for <sup>99</sup>Mo production with novel fuel*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **305**: 23-30.
- Vega-Carrillo, H.R. *TEORÍA DE REACTORES NUCLEARES*. Alemania, Academic: Editorial Académica Española. (2012).
- Vega-Carrillo, H.R., Hernández-Dávila, V.M., Rivera T. y Sánchez, A. (2014). *Nuclear and dosimetric features of an isotopic neutron source*. Radiation Physics and Chemistry **95**: 122-124.
- Vega-Carrillo, H.R., Esparza-Garcia, I. R. y Sanchez, A. (2015). *Features of a subcritical nuclear reactor*. Annals of Nuclear Energy **75**: 101-106.