

DISEÑO NEUTRÓNICO DE UN ADS

Cintas A.^{a,c}, Lopasso E.M.^{a,c} y Márquez Damián J.I.^{b,c,d}

^a Física de Reactores y Radiaciones, ^b Física de Neutrones
Unidad de Actividad de Ingeniería Nuclear, GAEN,
Centro Atómico Bariloche (CNEA)

^cInstituto Balseiro (UNCuyo), ^dCONICET

cintasa@cab.cnea.gov.ar

RESUMEN

Presentamos un diseño de un LEU-ADS basado en el reactor experimental tipo piletta de baja potencia, el RA-8. La versatilidad de este reactor permite realizar mediciones en diferentes configuraciones de núcleo utilizando barras con distintos enriquecimientos, barras con venenos quemables, perturbaciones de agua, y distintos tipos de barras de control en configuraciones críticas y subcríticas acopladas a una fuente externa.

Para evaluar la factibilidad del LEU-ADS, se calcularon factores de multiplicación, parámetros cinéticos, espectros y la respuesta temporal del flujo ante un pulso de fuente. Se consideraron dos tipos de fuentes de neutrones: una isotópica, ²⁵²Cf, y un generador pulsado de neutrones, tipo D-D.

Estos parámetros se calcularon en las distintas configuraciones propuestas y se verificó la factibilidad de utilizar fuentes continuas y pulsadas acopladas a un núcleo subcrítico.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas subcríticos con fuente se encuentran bajo estudio, ya que serían una opción para producir la transmutación de los elementos de larga vida media generados durante la operación normal de los reactores nucleares de potencia. Estos sistemas se denominan generalmente ADS (**A**ccelerator **D**riven **S**ystem).

Luego de establecer de manera confiable la capacidad de modelado de sistemas ADS, a través de benchmarks internacionales, es que se proyecta un diseño “local” de un LEU-ADS, partiendo de una facilidad experimental existente, el RA-8.

La facilidad crítica RA-8 se construyó principalmente para medir parámetros neutrónicos, testear barras combustibles y probar distintas configuraciones del tipo PWR. Este reactor no cuenta con canales de irradiación, ni celdas calientes u otros dispositivos comunes a un reactor experimental, ya que está orientado a optimizar el diseño de barras combustible y diversas configuraciones.

Una de las características de este núcleo es que puede configurarse elemento por elemento, logrando una extraordinaria versatilidad con la que se pueden explorar numerosas configuraciones subcríticas y analizar el acoplamiento del sistema a diversas fuentes.

Para evaluar la factibilidad de convertir el RA-8 en un sistema subcrítico acoplado a una fuente (ADS-RA-8) se determinaron, mediante simulaciones numéricas, los parámetros neutrónicos más relevantes: factores de multiplicación, parámetros cinéticos, espectros y la evolución temporal del flujo ante un pulso de fuente.

Se consideraron dos fuentes para acoplar a este sistema, la primera, una fuente continua, de fisión espontánea (^{252}Cf) y la segunda un generador pulsado de neutrones (D-D), esta última permite calcular los parámetros cinéticos.

Se realizaron en total cinco configuraciones de núcleo, dos utilizan la fuente isotópica y las tres restantes se acoplan a la fuente pulsada (D-D). Estas configuraciones utilizan distinto número y tipo de barras combustibles.

1.2. Herramientas utilizadas

Para cada configuración propuesta se calcularon los distintos parámetros neutrónicos con el código de cálculo MCNP5 y las bibliotecas de secciones eficaces ENDF/B-VI.

2. MODELO DEL ADS-RA-8

2.1. Descripción del RA-8

El reactor RA-8 es del tipo pileta, moderado y refrigerado por agua liviana y cuya potencia térmica máxima de operación es de 100 w. El núcleo se encuentra dentro del tanque del moderador, el cual es rodeado por un tanque de mayores dimensiones donde se encuentra el reflector, ambos tanques llenos con agua liviana desmineralizada.

Distintas configuraciones de núcleo se pueden obtener utilizando un número variable de barras combustibles, estas barras se sostienen mediante dos grillas. Las grillas cuentan con 3500 perforaciones para posicionar los diferentes tipos de barras, formando un arreglo hexagonal. Ambas grillas tienen en su parte central una pieza hexagonal removible que permite configuraciones del núcleo adicionales.

Las barras combustibles disponibles para modelar este sistema son las que a continuación se detallan:

- 1.8 % (wt) UO_2 enriquecido en ^{235}U ,
- 3.4 % (wt) UO_2 enriquecido en ^{235}U y
- UO_2 natural con un 4% (wt) Gd_2O_3

2.2. Descripción del ADS-RA-8

Basándonos en la información disponible del RA-8, principalmente materiales, composiciones, geometría del núcleo y detalle de las barras combustibles se lograron simular distintas configuraciones subcríticas.

Como mencionamos anteriormente el núcleo tiene un arreglo hexagonal de barras combustibles, pudiéndose dejar el canal central libre para posicionar la fuente isotópica de neutrones (^{252}Cf), esta fuente se ubicaría a la mitad de la longitud activa para minimizar la fuga de neutrones.

Para posicionar la fuente pulsada, se requiere un espacio mayor en el centro del núcleo, por lo que se debió quitar la pieza hexagonal central de la grilla, generando así configuraciones de núcleo tipo anillo.

El moderador cubre por completo al núcleo, y los niveles de subcriticidad se alcanzan variando el número de barras combustibles. Dado que se trabaja con bajos niveles de subcriticidad ($k_{\text{eff}} < 0.98$), no es necesario incluir las placas de control y de seguridad, en el modelado del ADS.

2.2. Parámetros de Diseño

En configuraciones críticas del RA-8, se ha demostrado que con un nivel de potencia de 1 w es posible medir densidades de potencia mediante análisis por activación.

Para el sistema subcrítico, se fijó en primer lugar la intensidad de la fuente de acuerdo con las fuentes disponibles en el mercado. Posteriormente se obtuvo el nivel de subcriticidad requerido para alcanzar la potencia de 1 w y diseñar el núcleo de acuerdo a estos requerimientos.

En cuanto a la elección de las fuentes a acoplar al sistema, se optó por una fuente de fisión espontánea (^{252}Cf) ya que tiene una emisión de neutrones conveniente para el análisis de nuestro sistema ($\sim 3\text{E}+09$ n/s). Cuenta con una vida media de 2,6 años, lo que produce una emisión relativamente constante de flujo neutrónico durante los experimentos que se quieren llevar a cabo; además es de fácil adquisición. Por otro lado la emisión de neutrones no se puede "apagar", por lo que ésta requiere que esté blindada mientras no se la utilice.

De las fuentes disponibles comercialmente se seleccionaron las dos más representativas y se calculó el factor de multiplicación del núcleo de acuerdo con la potencia de 1 w requerida, (ver Tabla 1). Para cada una de estas fuentes se diseñaron configuraciones de núcleo con el nivel de subcriticidad requerido, Figura 1.

Las configuraciones de núcleo se obtuvieron utilizando distinto número de barras combustibles enriquecidas al 3,4%(wt). El factor de multiplicación calculado para cada sistema propuesto se muestra en la Tabla 2.

Además de las configuraciones con fuentes isotópicas, se consideró acoplar al sistema una fuente del tipo pulsada. En general, las fuentes pulsadas son utilizadas en las facilidades experimentales de ADS para medir, principalmente, parámetros cinéticos.

Desde el punto de vista operacional las fuentes pulsadas son preferibles ya que pueden ser desconectadas, por lo que convierten al sistema en un conjunto más seguro cuando se está trabajando en configuraciones cercanas a la crítica.

En nuestro análisis, seleccionamos una fuente de neutrones generados a través de reacciones D-D, cuya energía característica es de 2,45 MeV.

La desventaja de las fuentes pulsadas es su tamaño, por lo que se necesita un mayor espacio en la parte central del núcleo para introducir la fuente. Esto influye en el tamaño final del núcleo ya que para obtener el mismo nivel de potencia, se tendrá una configuración tipo anillo, lo que significa una mayor cantidad de barras combustibles.

Con el objetivo de evaluar el efecto que tendría el colocar un combustible quemado en el ADS, se simuló configuraciones con barras combustibles con un

contenido de Gd_2O_3 al 4%(wt). Estas barras simulan, como primera aproximación, el efecto del quemado del combustible enriquecido al 3,4%(wt) junto con los productos de fisión, dado que actúan como fuertes absorbentes térmicos.

Se diseñaron distintas configuraciones tipo anillo acoplada a la fuente D-D, con un factor de multiplicación de $\sim 0,95$. La composición de cada una de estas configuraciones de núcleo se presenta en la Tabla 3.

Estas tres configuraciones junto con las dos de fuente continua A y B nos permiten evaluar las diferentes fuentes y los cambios de composición de sistemas subcríticos acoplados a fuentes externas. En la Figura 2 se pueden observar los tres diseños de núcleo en configuración tipo anillo, utilizando distintos tipos de barras.

La configuración C, es un núcleo homogéneo con dos tipos de barras combustibles. La configuración D es similar a C pero ésta contiene un anillo de barras combustibles envenenadas con Gd_2O_3 . La configuración E es un núcleo heterogéneo compuesto por tres zonas bien definidas, posicionadas a 120 grados una de otra, para evitar cualquier tipo de interferencia entre ellas, la idea de esta configuración es estudiar la evolución temporal de un pulso de fuente y el espectro, en distintas posiciones utilizando un mismo núcleo.

Todas las configuraciones aquí presentadas, pueden ser montadas en el RA-8, utilizando los elementos combustibles y grillas existentes en el reactor, permitiendo pasar de un núcleo crítico a una configuración ADS y viceversa.

4. RESULTADOS

4.1. Factores de multiplicación

Se calcularon los dos factores de multiplicación (k_{eff} y k_s), para las cinco configuraciones planteadas, estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.

4.2. Espectro

Se calculó el espectro característico en distintas posiciones, utilizando una estructura de 172 grupos.

Se analizó el espectro en barras frescas en posiciones equivalentes en las configuraciones C, D y E (posición 1 en la Figura 2 (a), (b), y (c)), estudiando de esta manera la influencia de las barras envenenadas con Gd_2O_3 .

Los resultados muestran que el efecto del absorbente es local, y que el espectro en esta posición es el mismo para los tres casos. Por lo que se puede utilizar la configuración heterogénea E para estudiar los efectos tanto en las barras frescas como en las que contienen Gd_2O_3 .

Para esta configuración se calculó también el espectro en las posiciones 2 y 3 (Figura 2 (c)). El espectro característico de este núcleo se muestra en la Figura 3.

Las posiciones 2 y 3, (barras envenenadas), muestran una gran depresión del flujo térmico, por debajo de 0,1 eV, como se puede esperar debido a la presencia del Gd, cuya absorción predominante se encuentra en ésta zona energética. La posición rodeada por barras combustibles de 3,4%(wt) (posición 3) muestra un flujo térmico levemente más alto, sin embargo la absorción es local, y estas barras combustibles no compensan la presencia de estos fuertes absorbentes.

4.3. Parámetros Cinéticos

Se calcularon los principales parámetros de la cinética puntual (β , Λ , l_p) para las configuraciones con fuente pulsada (C, D y E), con el fin de caracterizar el comportamiento cinético del sistema. A pesar de que este modelo no es suficiente para capturar los cambios en el espectro y que además cuenta con autofunciones del flujo de

orden superior (y no sólo el modo fundamental), su simplicidad hace que sea una herramienta muy útil para evaluar el comportamiento de sistemas subcríticos con fuente, en condiciones cercanas a crítico. Los resultados de los parámetros evaluados se presentan en la Tabla 5.

Las configuraciones C, D y E muestran parámetros cinéticos similares. Como se puede observar en las figuras de las distintas configuraciones de núcleo (dibujadas a escala), tienen distintos tamaños, número y ubicación de las barras con Gd que pueden compensar efectos, esto lleva a obtener la misma respuesta cinética ante el pulso de fuente.

Sin embargo, en las tres configuraciones, el comportamiento cinético del núcleo se debe principalmente al gran número de barras combustibles de 3,4% (wt), frente a las pocas barras que contienen Gd, lo que nos permite analizar en una única configuración E el efecto local de las barras con Gd.

4.4. Evolución temporal del flujo neutrónico

En el núcleo heterogéneo, E, se calculó la evolución del flujo en las posiciones 1, 2 y 3 durante un período de 5 ms, debido a un pulso de fuente de 10 μ s de duración con una energía característica de 2,45 MeV.

Se evaluó también el flujo a tres grupos de energía, con el fin de analizar el comportamiento energético-temporal del flujo. Los límites de energía se seleccionaron de acuerdo a la sección eficaz de la mezcla (Gd-U). La región térmica se definió por debajo de las resonancias del Gd y del U, hasta 0,22eV, el grupo epitérmico hasta 111 keV, región donde termina el primer grupo importante de resonancias, y finalmente el grupo rápido se encuentra por encima de esta energía.

La evolución del flujo en las posiciones 1, 2 y 3 por grupo de energía se graficó en la Figura 4.

De éstos gráficos se puede observar que la fuente de neutrones se propaga casi inmediatamente a todo el núcleo y, durante los primeros microsegundos del pulso, el comportamiento del flujo térmico y epitérmico es dominado por la moderación local de los neutrones que vienen directamente de la fuente. A medida que el flujo térmico crece, los neutrones de fisión comienzan a tener un rol cada vez más importante en el grupo rápido, y el efecto de la absorción térmica del Gd empieza a ser relevante. Luego de que el pulso de fuente termina y hasta que el nuevo pulso es emitido, el flujo rápido y epitérmico decaen rápidamente debido a la absorción, fugas y la moderación, mientras que el flujo térmico se mantiene por el downscatering de los neutrones de fuente.

A partir de este punto, la evolución temporal del flujo es equivalente a la evolución de un sistema subcrítico sin fuente externa, y puede ser utilizada para medir los parámetros cinéticos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño neutrónico de un ADS a partir de la facilidad existente (RA-8). Se analizaron y caracterizaron los principales parámetros neutrónicos de este sistema.

Se calcularon los parámetros cinéticos en las diferentes configuraciones propuestas, se verificó la factibilidad de utilizar fuentes continuas y pulsadas. Se encontró que a partir de fuentes comerciales y de los elementos combustibles existentes se puede hallar un nivel de subcriticidad que sea compatible con los niveles utilizados en el sistema crítico para realizar mediciones experimentales.

De las distintas configuraciones, encontramos que los parámetros cinéticos son gobernados por el tipo de combustible predominante, en nuestro caso barras combustibles con un enriquecimiento del 3,4% (en peso en ^{235}U).

El efecto de absorbentes térmicos localizados, una situación que se puede comparar con los actínidos presentes en un combustible quemado, fue estudiado modelando un único veneno térmico (Gd) en combustible fresco. Este análisis está basado en los resultados de los espectros neutrónicos calculados en estas regiones.

Con el fin de analizar el comportamiento energético-temporal del flujo, se obtuvo la evolución del flujo en una estructura a tres grupos de energía que muestra un comportamiento local, donde el flujo rápido y epitérmico no sólo queda determinado por las fugas y la difusión de los neutrones de fuente sino debido al balance local entre las absorciones y las fisiones térmicas.

Esta disminución en el flujo rápido y epitérmico reduciría localmente el ritmo de transmutaciones en las barras envenenadas respecto al promedio del núcleo, no sólo en la zona térmica sino también para reacciones con umbral.

6. TABLAS

<i>Fuente de neutrones</i>	<i>Actividad[Ci]</i>	<i>Emisión[n/s]</i>	<i>Nivel de subcriticidad</i>
^{252}Cf	1.07	4.60E+09	0.948
^{252}Cf	0.536	2.30E+09	0.973

Tabla 1 Fuentes de neutrones isotópicas disponibles comercialmente, y nivel de subcriticidad requerido.

<i>Configuración</i>	<i>Barras al 3,4%(wt)</i>	k_{eff}
A	414	0.94980
B	480	0.97238

Tabla 2 Configuraciones con fuente de ^{252}Cf

<i>Configuración</i>	<i>Barras al 3,4%(wt)</i>	<i>Barras al 1,8%(wt)</i>	$\text{Gd}_2\text{O}_3+\text{UO}_2$
C	472	42	-
D	472	567	36
E	472	236	32

Tabla 3 Configuraciones con fuente D-D y con $k_{eff} \sim 0,95$

<i>Configuración</i>	$k_{eff} \pm \epsilon$	$k_s \pm \epsilon$
A	0.9498 (0.0001)	0.9488 (0.0001)
B	0.9724 (0.0001)	0.9729 (0.0001)
C	0.9499 (0.0001)	0.9396 (0.0001)
D	0.9496 (0.0001)	0.9389 (0.0001)
E	0.9500 (0.0001)	0.9417 (0.0001)

Tabla 4 Factores de multiplicación.

Configuración	$\beta_{\text{eff}}[\text{pcm}]$	$\rho[\text{pcm}]$	$\Lambda[\mu\text{s}]$	$I_p[\mu\text{s}]$
C	812 (17)	-5109 (88)	50 (1)	47 (1)
D	758 (15)	-5085 (95)	45 (1)	42 (1)
E	800 (15)	-5283 (97)	47 (1)	44 (1)

Tabla 5 Parámetros cinéticos para las distintas configuraciones.

8. FIGURAS

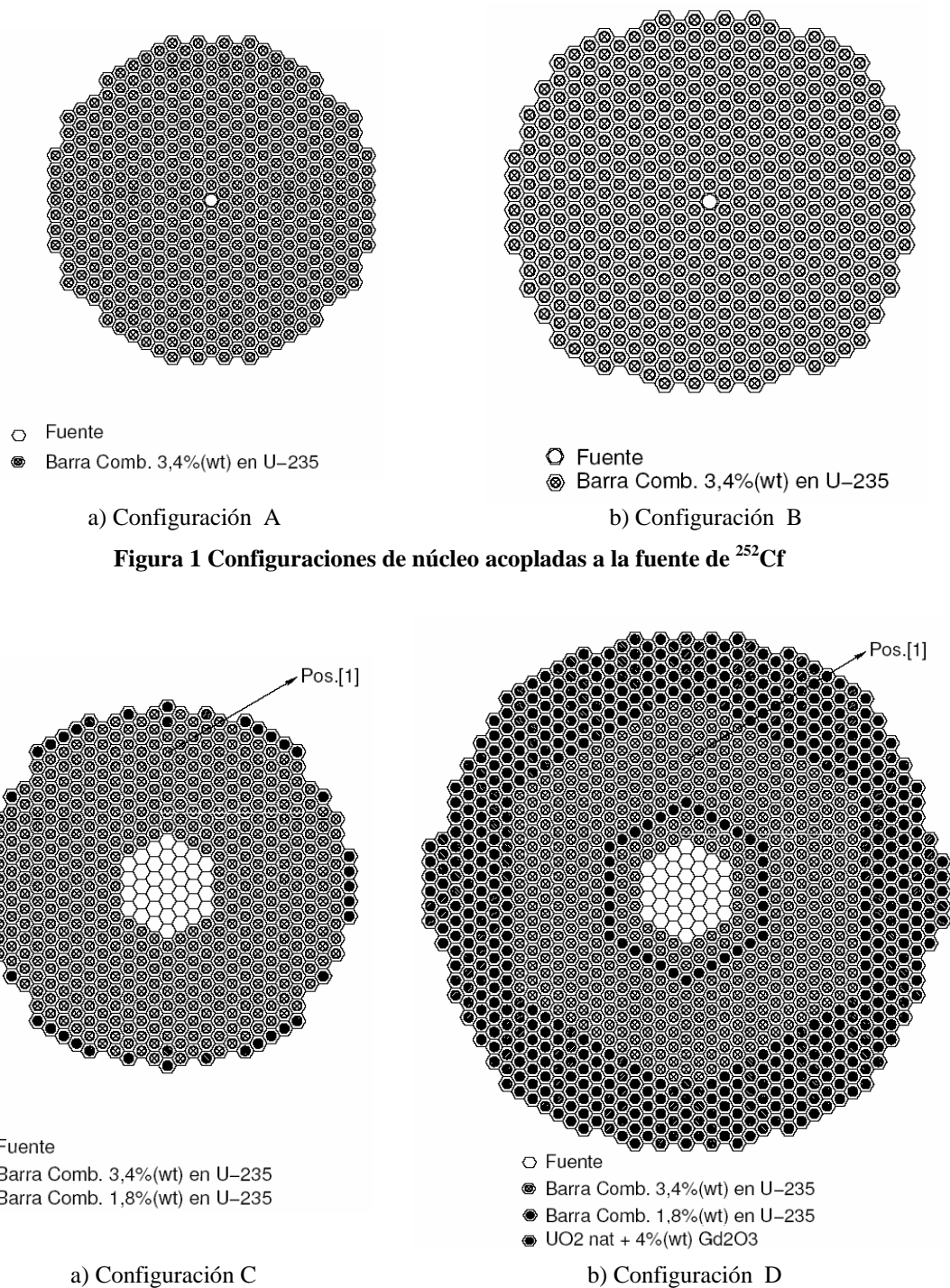
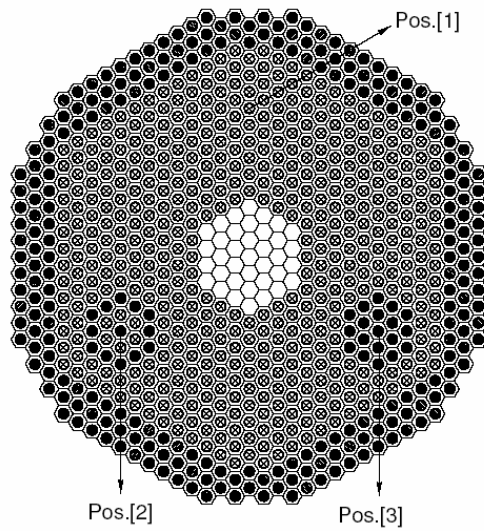


Figura 1 Configuraciones de núcleo acopladas a la fuente de ^{252}Cf



- Fuente
- Barra Comb. 3,4%(wt) en U-235
- Barra Comb. 1,8%(wt) en U-235
- UO2 nat + 4%(wt) Gd2O3

c) Configuración E

Figura 2 Configuraciones de núcleo acopladas a la fuente D-D

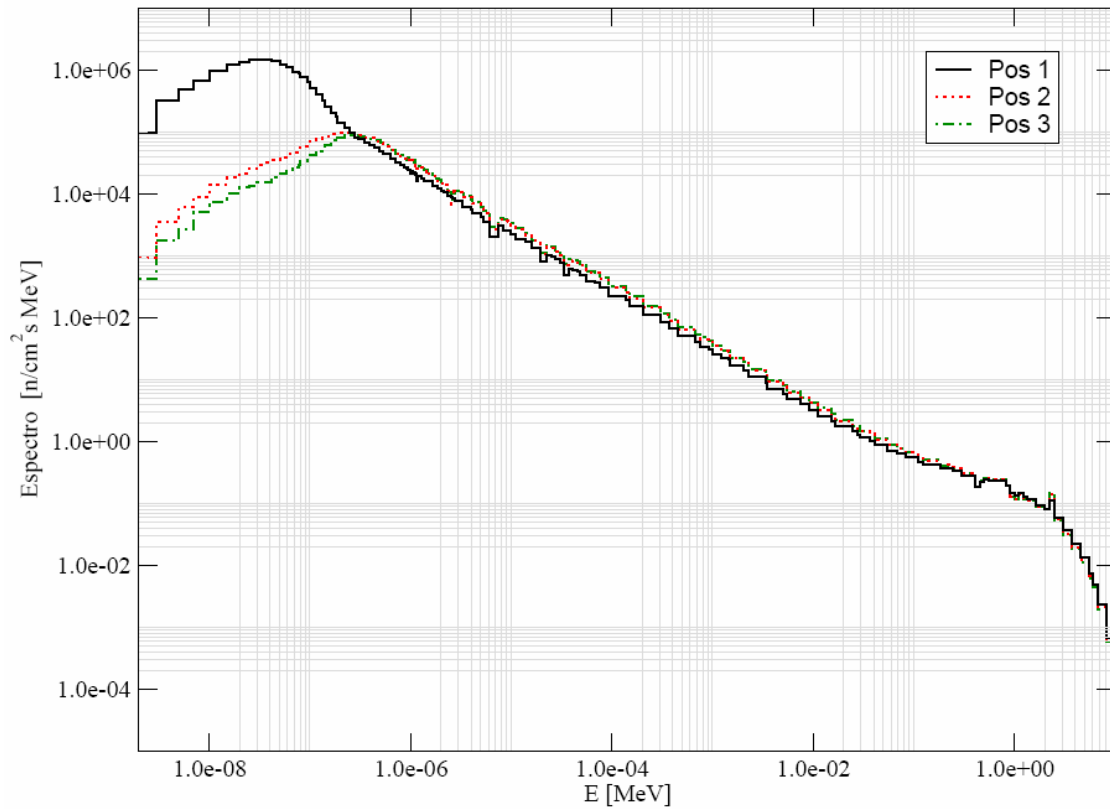
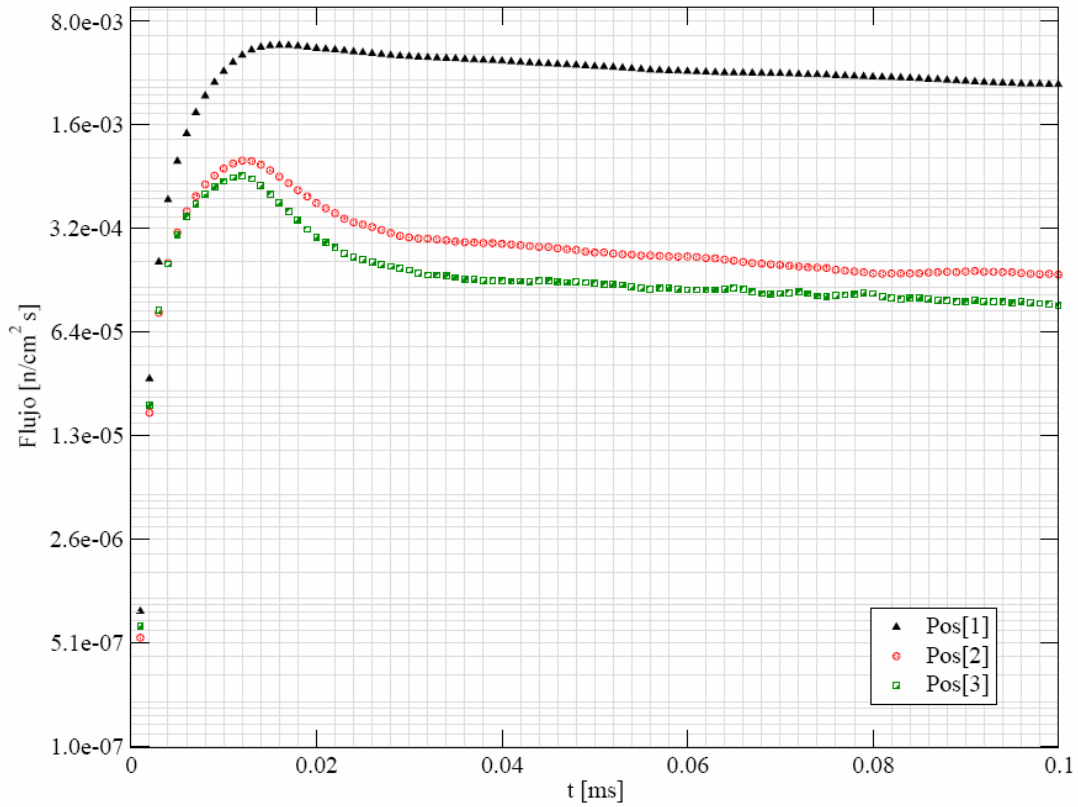
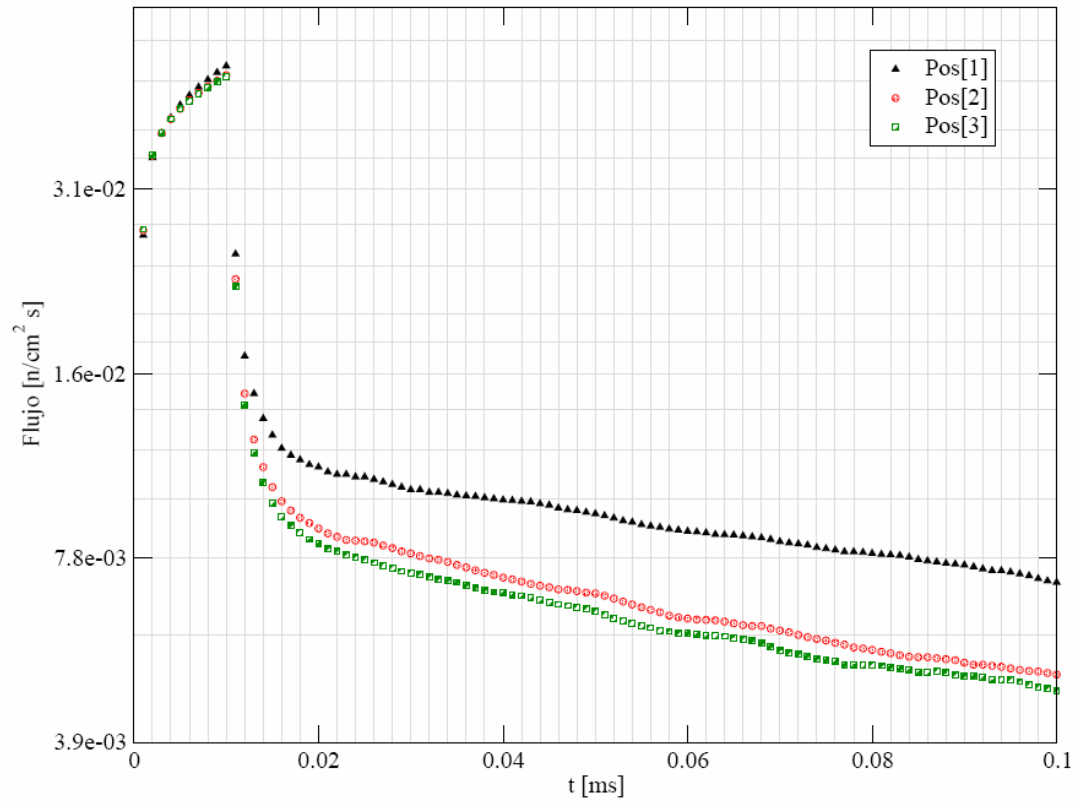


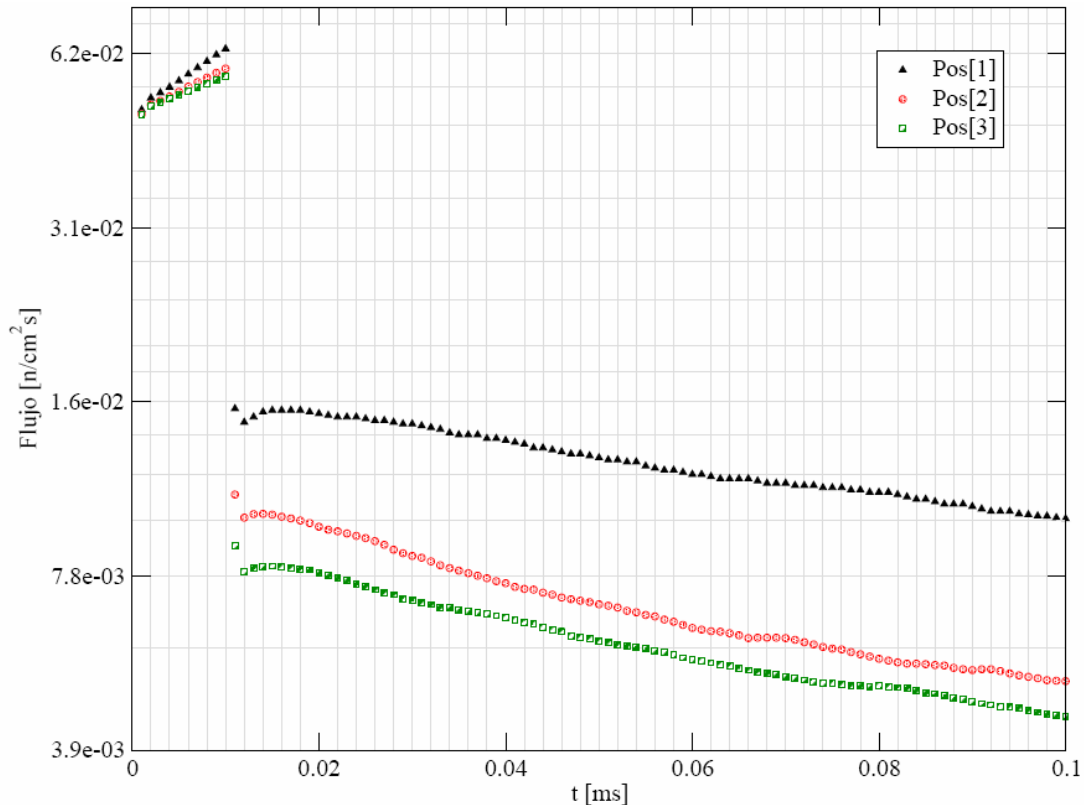
Figura 3 Espectro neutrónico en la configuración E



a) Evolución del flujo térmico en distintas posiciones del núcleo. El error relativo estadístico para cada posición es $\epsilon_{th}^1=1\%$, $\epsilon_{th}^2=3\%$ y $\epsilon_{th}^3=4\%$.



b) Evolución del flujo epitérmico en distintas posiciones del núcleo. El error relativo estadístico para cada posición es $\epsilon_{epi}^1=1\%$, $\epsilon_{epi}^2=1\%$ y $\epsilon_{epi}^3=1\%$.



c) Evolución del flujo rápido en distintas posiciones del núcleo. El error relativo estadístico para cada posición es $\varepsilon_{\text{fast}}^1=5\%$, $\varepsilon_{\text{fast}}^2=7\%$ y $\varepsilon_{\text{fast}}^3=7\%$.

Figura 4 Evolución del flujo en distintas posiciones de la configuración E, a tres grupos de energía.

7. REFERENCIAS

1. Hergenreder, D., 1999. *Desarrollo y puesta en operación de un sistema Experimento-Cálculo para la determinación de la Distribución de Potencia en el reactor RA-8*. Master's thesis, U.N. Cuyo, Bariloche, Argentina.
2. Hergenreder, D., Lecot, C., Villarino, E., 2007. *Kinetic parameters calculation and measurements during the opal commissioning*. In: International Group on Research Reactors (Ed.), Proceedings of IGORR 2007. Lyon, France.
3. High Tech Sources, 2008. *Neutron Source Specifications*. <http://www.hightechsource.co.uk/generalapplications.html>.
4. IAEA, 2007. *WIMS-D library update: final report of a coordinated research project*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
5. INVAP, 1996. *Informe Final de Seguridad del RA-8*. Bariloche, Argentina.
6. MCNP, 2003. *MCNP - A general Monte Carlo N- Particle Transport Code, Version 5*. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-03-0245. Los Alamos, USA.
7. NEA, 2001. *Comparison Calculations for an Accelerator-driven Minor Actinide Burner - NEA/NSC/DOC(2001)13*. Nuclear Energy Agency, OECD, Paris, France.
8. Nifenecker, H., Meplan, O., David, S., 2003. *Accelerator Driven Subcritical Reactors*. Institute of Physics, London, UK.
9. Persson, C., Seltborg, P., Ahlander, A., Gudowski, W., Stummer, T., Kiyavitskaya, H., Bournos, V., Fokov, Y., Serafimovich, I., Chigrinov, S., 2005. *Analysis of Reactivity Determination Methods in the Subcritical Experiment Yalina*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 554, 374– 383.
10. van der Marck, S., Meulekamp, R., 2004. *Calculating the Effective Delayed Neutron Fraction Using Monte Carlo Techniques*. In: American Nuclear Society (Ed.), Proceedings of PHYSOR 2004. Chicago, USA, pp. 25–29.

NEUTRONIC DESIGN OF AN ADS

ABSTRACT

We present a LEU-ADS design based on an existing Argentine experimental facility, the RA-8 pool type zero power reactor. The versatility of this reactor allows measurement of different core configurations using different fuel enrichment, burnable poison rods, water perturbations and different control rods types in critical or subcritical configurations with an external source.

To assess the feasibility of the LEU-ADS, multiplication factors, kinetic parameters, spectra, and time flux evolution were computed. Two external sources were considered: an isotopic ^{252}Cf source, and a D-D pulsed neutron source.

Parameters for different core configurations were calculated, and the feasibility of using continuous and pulsed neutron sources was verified.