

# Diseño conceptual de un sistema nuclear avanzado para la transmutación de desechos y aplicaciones energéticas sostenibles

Jesús Rosales García<sup>1</sup>, Carlos Rafael García Hernández<sup>1</sup>, Leorlen Rojas Mazaira<sup>1</sup>, Carlos Brayner de Olivera Lira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas (InSTEC)

Ave. Salvador Allende y Luaces. La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Departamento de Energía Nuclear. Universidad Federal de Pernambuco. Brasil

jrosales@instec.cu

## Resumen

En el trabajo se evaluaron los avances en el diseño conceptual de un sistema transmutador de lecho de bolas refrigerado por gas. El dispositivo permite aplicaciones energéticas de alta eficiencia en modo de cogeneración, tanto para la producción de electricidad como calor de alta temperatura para la producción de hidrógeno. Una característica particular del sistema es su operación en modo subcrítico, manejado por una fuente de neutrones activada por un acelerador. Lo anterior produce una significativa ventaja desde el punto de vista de la seguridad y flexibilidad en la operación con tipos de combustible nuclear no tradicionales, lo que posibilita reducir las cantidades de residuos nucleares y además aprovecharlos para la producción de energía con una alta eficiencia. En el trabajo se evaluaron las posibilidades del sistema para transmutar los desechos del combustible gastado de los reactores nucleares de agua ligera.

*Palabras clave:* reactor VHTR; sistema asistido por acelerador; residuos radiactivos; desarrollo sostenible; reactores de lecho de bolas

## Conceptual design of advanced nuclear system for waste transmutation and sustainable energy applications

### Abstract

In this paper the progress in the conceptual design of a gas cooled pebble bed transmuter system was evaluated. This device allows highly efficient energy applications in cogeneration mode, both, for electricity power production and high temperature heat for hydrogen production. A particular feature of the system is subcritical operation mode, driven by a neutron source activated by an accelerator. This produces a significant advantage from the point of view of safety and operational flexibility in the operation of nuclear non-standard fuel types, allowing the possibility of reducing the amount of nuclear waste and also using them for high efficiency energy production. The possibilities of the system to transmute nuclear reactors spent fuel wastes into light water were evaluated.

*Key words:* VHTR reactor; accelerator driven transmutation; radioactive wastes; sustainable development; pebble bed reactors

## Introducción

Dentro de los retos más importantes de la energía nuclear del futuro están el manejo de los desechos de larga vida de los actuales reactores nucleares de fisión, la eliminación del peligro de proliferación nuclear, la seguridad y la competitividad económica. Los sistemas nucleares avanzados de la llamada Generación IV diseñados para responder a estas demandas y dentro de ellos se le concede especial importancia por sus innegables ventajas a los reactores nucleares de muy alta temperatura (VHTR).

En [1,2] se presentan las ideas iniciales del diseño conceptual de un dispositivo llamado TADSEA (*Transmutation Advanced Device for Sustainable Energy Applications*), el cual es un sistema nuclear controlado por un acelerador (ADS), del tipo lecho de bolas, refrigerado por gas helio y moderado por grafito, que puede utilizar como combustible los elementos transuránicos que forman parte del combustible gastado de las centrales nucleares convencionales de agua ligera (LWR), permitiendo transmutar los elementos radiactivos de larga vida presentes en el combustible gastado en estables o de corta vida, disminuyendo su masa y la

radiotoxicidad asociada a esos residuos. Además, permite utilizar las altas temperaturas que puede alcanzar el refrigerante a la salida del núcleo para producir hidrógeno, mediante el ciclo termoquímico iodo-azufre (I-S) o la electrólisis de alta temperatura.

Dentro de los estudios originales para el diseño conceptual del TADSEA [3,4] se realizaron cálculos neutrónicos y termohidráulicos que demostraron la capacidad del sistema de alcanzar en forma segura temperaturas del refrigerante a la salida del núcleo lo suficientemente altas como para permitir aplicar la energía producida en la obtención de hidrógeno por métodos avanzados de muy alta temperatura.

En [5] se publicó un modelo para estudiar la sensibilidad de la producción de hidrógeno por el método iodo-sulfuro a partir de la energía obtenida en un TADSEA respecto a los parámetros termodinámicos. En [6] se evaluaron ciclos combustibles basados en mezclas de uranio-torio y de plutonio-torio en un sistema híbrido de muy alta temperatura.

En el presente trabajo se evalúan los avances en el rediseño del TADSEA, se presenta una metodología para calcular el quemado del combustible, simulando un esquema de pases múltiples de las bolas por el núcleo y se obtienen perfiles de densidad de potencia por la altura del núcleo más precisos para los estados de carga inicial y estacionario, los cuales permiten cálculos termohidráulicos más reales. Se obtienen otros parámetros importantes relacionados con la transmutación del combustible gastado.

## Materiales y Métodos

### Rediseño del núcleo del TADSEA

Un ADS está compuesto por un acelerador de partículas donde se producen protones de alta energía que reaccionan con los metales pesados del blanco de espalación para producir neutrones. Este blanco se sitúa en el centro de un núcleo subcrítico donde pueden estar, además del combustible nuclear, productos de fisión de larga vida y elementos transuránicos. En el diseño conceptual del TADSEA, el acelerador presenta una energía de los protones de 1 GeV, el blanco de espalación está compuesto por una mezcla eutéctica de plomo-bismuto y utiliza combustible TRISO. Las partículas TRISO son aproximadamente de 1 mm de diámetro, compuesta por varias capas de grafito, una capa de carburo de silicio (SiC) y la zona central donde se encuentra el combustible ("kernel") (figura 1). Estas partículas son empaquetadas de manera aleatoria en una matriz de grafito para conformar elementos combustibles prismáticos o de lecho de bolas. El combustible TRISO retiene eficientemente los productos de fisión gaseosos y metálicos, característica que lo hace adecuado para someterlo a la estrategia de quemado profundo, la cual propone obtener altos grados de quemado del combustible, para lograr una mayor disminución de las masas de los isótopos más importantes. En el TADSEA se propone como combustible mezclas de elementos transuránicos provenientes del combustible gastado de los reactores

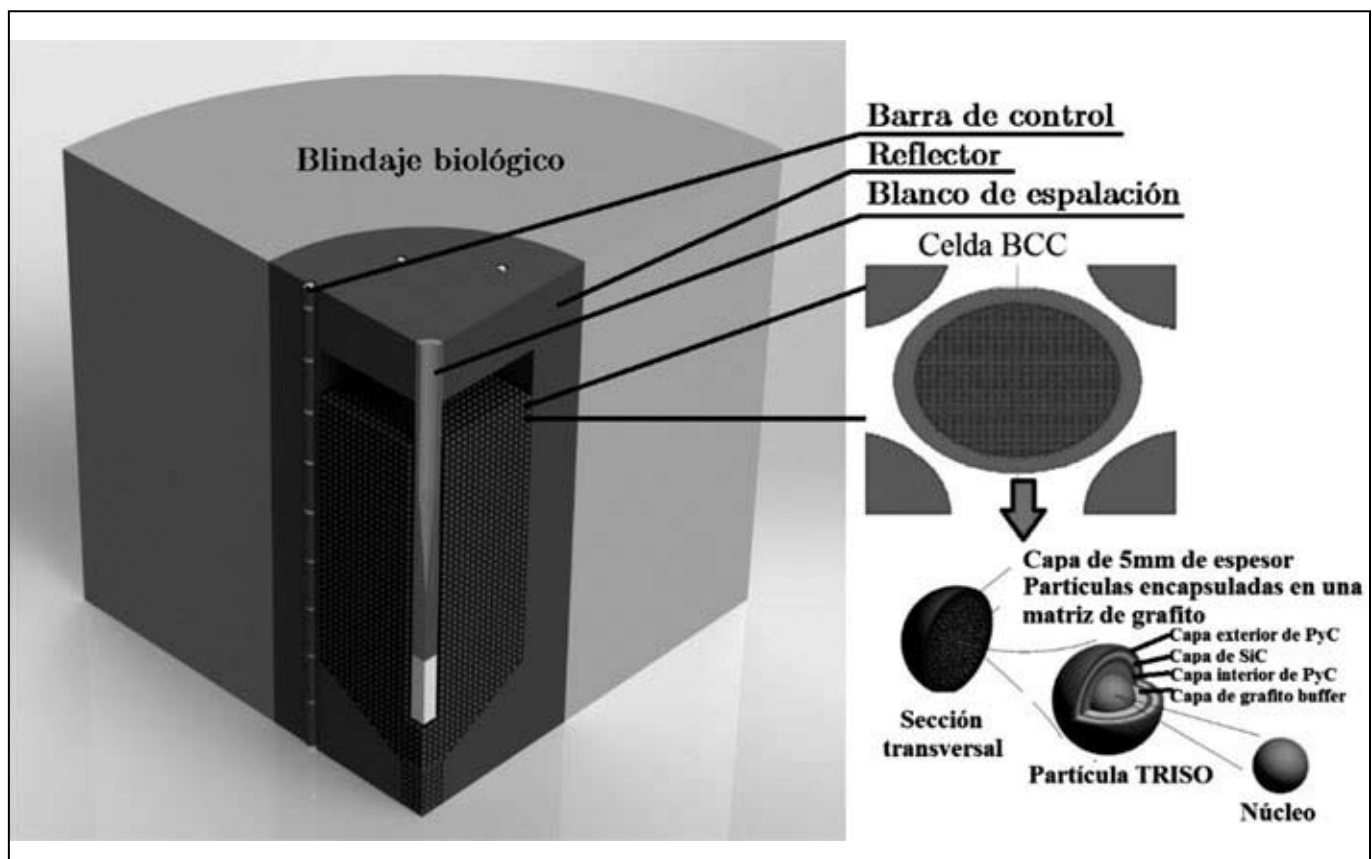


Figura 1. Esquema del TADSEA rediseñado.

**Tabla 1.** Composición de los elementos combustibles en el TADSEA

Elemento	Np237	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Am241	Am243	Cm244
Fracción másica	0.0395	0.0122	0.4526	0.2098	0.0702	0.0430	0.0453	0.0081	0.0014

de agua ligera después de 15 años de decaimiento. La tabla 1 muestra su composición.

Para mejorar el diseño conceptual del TADSEA se desarrollaron nuevos modelos computacionales para el cálculo neutrónico que consideran la doble heterogeneidad del combustible nuclear en el lecho de bolas [7].

En esta nueva actualización del diseño se proyectó y modeló una estrategia de quemado del combustible que simula el método de recarga continua con pases múltiples de las bolas por el núcleo. Lo anterior permite obtener una distribución del campo de liberación de energía axial más aplanada para los diferentes estados operacionales del sistema y por lo tanto, realizar cálculos termohidráulicos más reales que permitan determinar con mayor precisión la temperatura del refrigerante a la salida del núcleo y acercarse de forma segura a los valores límites. Además, se tuvieron en cuenta elementos de seguridad no considerados en diseños anteriores como el sistema de barras absorbentes con funciones de seguridad, el blindaje biológico del núcleo, así como una descripción detallada de la geometría y materiales del sistema. Esta vez se incluyen las cavidades para la entrada de las bolas en la parte superior del núcleo y se tiene en cuenta el cono y el tubo de descarga de las bolas en la parte inferior.

Estudios realizados en [8] demostraron que el tamaño del “kernel” de la partícula combustible encapsulada (TRISO), que garantiza un valor adecuado del coeficiente de multiplicación efectivo del núcleo del reactor, es de 0.025 cm. Se estudió además, la influencia en las propiedades multiplicativas de diferentes modelos de distribución de las partículas TRISO dentro de la bola.

Para realizar la simulación de la neutrónica del TADSEA para el rediseño se usó un modelo que tiene en cuenta la doble heterogeneidad del combustible; para la distribución de las partículas TRISO dentro de las bolas se usó un modelo fijo ordenado del tipo cúbico uniforme, el cual garantiza una buena exactitud de los resultados [7]; para la distribución de las bolas dentro del núcleo se usó la configuración cúbica centrada en el cuerpo (BCC) con una fracción de empaquetamiento de 0.64. La configuración BCC representa una celda cúbica unitaria compuesta por una bola en su interior y ocho octavos de esferas en los vértices, por lo que la celda unitaria está compuesta por dos bolas de combustible. La fracción de empaquetado del núcleo es considerada en la celda unitaria en las dimensiones del cubo. Finalmente esta celda es repetida en el interior del núcleo, aprovechando las herramientas de estructuras repetitivas que brinda el código MCNPX (Monte Carlo N-particle X tended). Con el objetivo de evitar los efectos de corte axiales, que se producen cuando se modela, usando estructuras repetitivas, se diseñó la altura

del núcleo con un valor múltiplo de la celda elemental BCC usada. En este caso la altura del núcleo que garantiza los parámetros deseados fue fijada en 282.81 cm, inferior en algunos centímetros al diseño original. Por otro lado, se adicionó al núcleo, un espacio en la parte superior para simular el lugar de entrada de las bolas. La altura de ese espacio fue considerada igual a la del reactor chino HTR-10 [9]. Otros elementos geométricos adicionados durante el rediseño fueron el cono y el tubo de descarga de las bolas, también proyectados de manera similar al HTR-10. Aunque el control del TADSEA es simple por ser un sistema subcrítico manejado por acelerador, se añadieron al proyecto como medida de seguridad en el nuevo diseño diez barras absorbentes, las cuales son insertadas en el reflector en caso de emergencia. Las barras se insertan en huecos ubicados en el reflector a 30 cm del núcleo y los materiales y su composición se tomaron igual a las del HTR-10. El resto de las características del sistema se mantuvieron como en el diseño original. La figura 1 muestra el esquema de la instalación según el proyecto actualizado, y los principales parámetros geométricos y de operación se resumen en la tabla 2.

Uno de los parámetros importantes en el diseño del núcleo subcrítico es la masa de combustible por bola, valor que debe garantizar la potencia térmica deseada (100 MWt), la subcriticidad permitida ( $K_{\text{eff}} < 0.97$ ) y un valor de quemado del combustible proyectado, que en este caso es un valor alto dadas las características de quemado profundo que se persigue con el combustible TRISO. El valor de masa de combustible por bola seleccionado después de estudiar su dependencia de las propiedades multiplicativas fue de 4.5 g. Para este valor de masa se obtuvo un valor de  $K_{\text{eff}}$  de 0.95930, garantizando la subcriticidad deseada y un alto valor de quemado del combustible como se mostrará más adelante.

Para la simulación de la neutrónica el núcleo del TADSEA fue dividido en 10 zonas por la altura. La densidad de potencia fue calculada y su distribución normalizada al valor total de potencia permitido por diseño para el núcleo completo de 100 MWt. Se obtuvo un factor de pico por la altura de 1.24. En la figura 2 se muestra la distribución axial de la densidad de potencia por zonas en función de la altura del núcleo para la primera carga del reactor.

El valor máximo posible de potencia térmica producida en el núcleo del TADSEA en el estado de carga inicial se calculó en 434 MWt. Como se dijo anteriormente la potencia de trabajo está limitada por el diseño a 100 MWt, y se controla manejando la corriente del acelerador de partículas. El valor obtenido de potencia térmica posible para el estado inicial demuestra que el sistema subcrítico diseñado con la fuente externa del acelerador a máxima capacidad supera la potencia de diseño.

**Tabla 2.** Parámetros geométricos y de operación del TADSEA rediseñado

Parámetro	Magnitud	Valor
Potencia térmica	MW	100
Intensidad del haz	MeV	1000
Radio del núcleo	cm	125.75
Altura del núcleo	cm	282.81
Altura de la cavidad de entrada de las bolas	cm	41
Corriente del haz	mA	10
Espesor del reflector radial	cm	60
Espesor del reflector axial	cm	100
Lado de la celda BCC	cm	7.07
Refrigerante Helio		
Número de barras de control	-	10
<b>"Kernel" de la partícula TRISO</b>		
Radio	cm	0.025
Densidad del combustible	g/cm <sup>3</sup>	10.33
<b>Capas de la partícula TRISO</b>		
Materiales de las capas		PyC/PyC/SiC/PyC
Espesor de las capas	cm	0.009/0.004/0.0035/0.004
Densidad de las capas	g/cm <sup>3</sup>	1/1.9/3.18/1.9

### Variación de la composición isotópica del combustible

Los reactores de lecho de bolas utilizan un esquema de recarga del combustible en forma casi continua, lo cual se logra inyectando bolas con combustible fresco o parcialmente quemadas por la parte superior del núcleo y extrayendo bolas quemadas por la parte inferior, en un proceso casi continuo. Las bolas extraídas se analizan en función de su nivel de irradiación para comprobar si alcanzan el grado de quemado permitido, en caso afirmativo se retiran hacia una zona de almacenamiento y en caso negativo se reinsertan en el núcleo. El esquema real de quemado de cada bola es prácticamente imposible de simular exactamente y el problema es mucho más complejo cuando se modela usando una descripción detallada de las partículas TRISO dentro de las bolas.

En el modelo, para considerar el quemado del combustible y su consecuente influencia en la variación en la composición isotópica, se hacen las siguientes consideraciones: las 10 zonas materiales en la dirección axial se cargan con combustible fresco. Se calcula la variación de la composición isotópica del combustible para cada zona durante un período de 2000 días a potencia nominal (100 MWt), con pasos por el tiempo de 100 días.

Al final del ciclo la bola combustible presenta un grado de quemado promedio de 632.2 MWd/Ton. El tiempo promedio de irradiación de una bola en el núcleo es de 2000 días y esta debe haber efectuado 10 pases antes de ser retirada. Para simular la composición representativa del estado estacionario, en el cual el valor del grado de quemado aumenta en la dirección

axial desde la parte superior a la inferior del núcleo, se tomaron tres composiciones promedio para las diferentes zonas axiales, las cuales consideran la mezcla de bolas con diferentes grados de quemado y número de pases por el núcleo.

Las tres zonas superiores del núcleo en la dirección axial se cargaron con una composición material igual a la obtenida de la zona dos, que fue sometida al proceso de quemado durante 900 días del ciclo, con un valor del grado de quemado de 284.5 MWd/Ton. Las siguientes cuatro zonas se cargaron con una composición material correspondiente a la zona cinco para 1000 días de trabajo y que presenta un grado de quemado promedio de 316.2 MWd/Ton.

Finalmente las últimas tres zonas se cargaron con una composición material perteneciente a la zona nueve, con un quemado equivalente a los 1100 días de trabajo a potencia nominal (347.7 MWd/Ton).

Lo anterior se hizo considerando una dependencia lineal entre el tiempo de irradiación a potencia nominal y el grado de quemado. Entonces, para el estado estacionario del núcleo se obtiene una mezcla de bolas con un valor de quemado aproximadamente igual a la mitad del valor final. Para considerar que las bolas siguen una línea de flujo en el núcleo que va de la zona uno a la diez, se tomó para las primeras tres zonas un valor de quemado igual al 10 % inferior al valor de la zona central y para las últimas tres zonas el 10 % superior.

Usando la composición material anterior se calculó para el estado estacionario, la distribución axial de potencia (figura 2). En comparación con la distribución obtenida para la primera carga se observa un aumento en la no uniformidad dado por un factor de pico de

1.43. La comparación de estos resultados con los del proyecto original del TADSEA arroja una distribución de liberación de energía axial más uniforme. Para el estado estacionario se calculó un valor de potencia posible de 159 MWt, superior al valor de diseño, lo cual significa que el TADSEA puede producir 100 MWt en todos los estados operacionales.

Para evaluar la capacidad del TADSEA de transmutar los desechos de los LWR se calculó la variación de la composición isotópica del combustible. En la figura 3

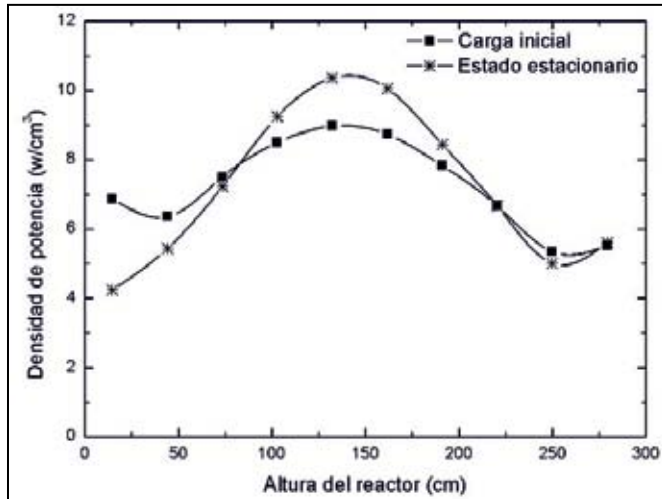


Figura 2. Distribuciones axiales de la densidad de potencia para el TADSEA en los estados de carga inicial y estado estacionario.

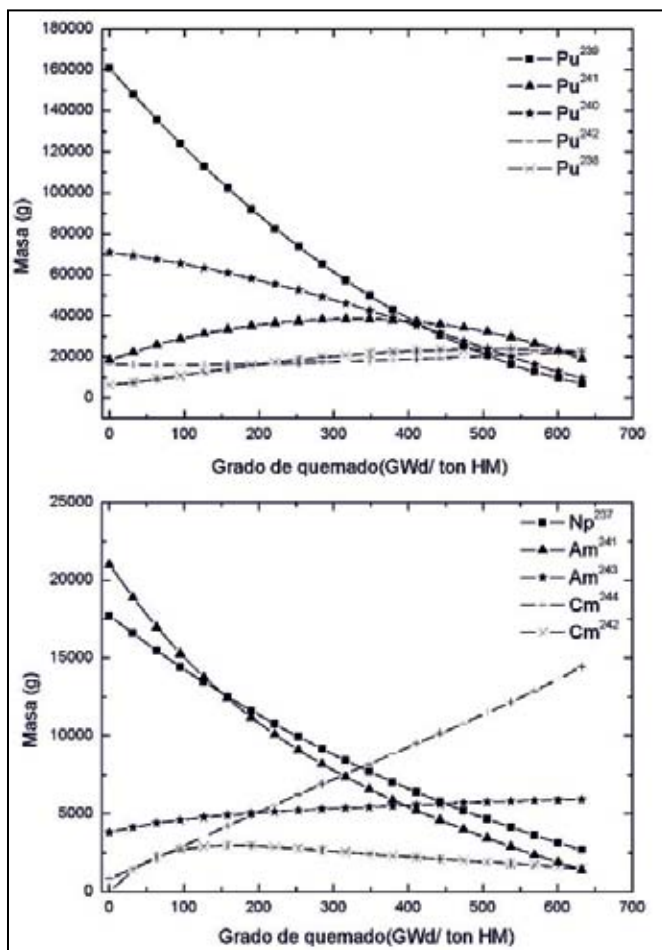


Figura 3. Variación de las masas de los actínidos menores (arriba) y los isótopos del plutonio (abajo) en el núcleo del TADSEA.

se muestra la variación en la concentración isotópica con el grado de quemado de los isótopos del plutonio y actínidos menores que componen el combustible.

Se obtuvo que las masas de los isótopos del plutonio más abundantes en el combustible gastado ( $^{239}\text{Pu}$  y  $^{240}\text{Pu}$ ) sufren una disminución considerable, el  $^{239}\text{Pu}$  disminuye en un 95.6 % de su masa inicial, mientras el  $^{240}\text{Pu}$  lo hace un 86.4 %. Aunque se obtiene un ligero incremento de las masas del  $^{238}\text{Pu}$  y del  $^{242}\text{Pu}$ , la masa total de todos los isótopos del plutonio disminuye en un 66.8 %. La masa del  $^{237}\text{Np}$  y la del  $^{241}\text{Am}$  disminuyen en un 84.8 % y 93.3 % respectivamente y el  $^{244}\text{Cm}$  es el que mayor incremento presenta, y es uno de los mayores contribuyentes en la radiotoxicidad del combustible descargado, decayendo rápidamente a  $^{240}\text{Pu}$ . En resumen, al final del quemado en el TADSEA los actínidos menores que componen el combustible reducen sus masas en un 40.2 %.

Uno de los objetivos de la transmutación de los isótopos de larga vida provenientes del combustible gastado de los reactores nucleares es la disminución de la radiotoxicidad asociada a este a largo plazo. En el estudio se comparó el comportamiento en el tiempo de la radiotoxicidad aportada por el combustible descargado de los LWR antes de ser cargado y a la descarga del TADSEA. En la figura 4 se muestra el comportamiento en el tiempo de la radiotoxicidad debida a la inhalación del combustible a la carga (composición del combustible gastado proveniente de los LWR) y a la descarga del TADSEA. Se observa una disminución notable de la radiotoxicidad a la descarga después de los 300 años.

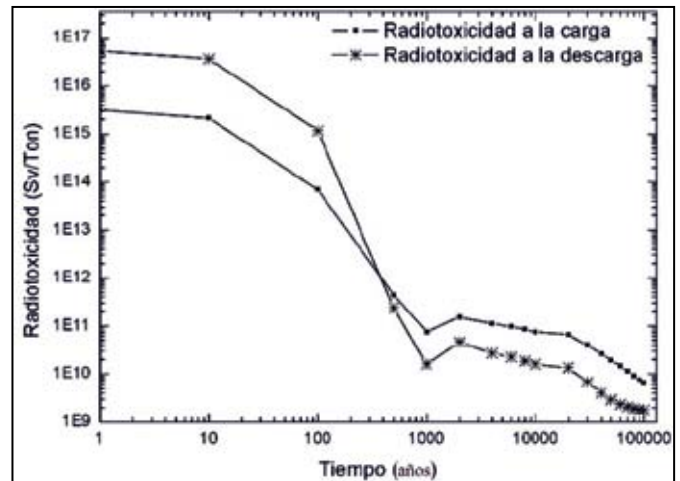


Figura 4. Variación de la radiotoxicidad en el tiempo.

## Conclusiones

En el trabajo se exponen los avances en el rediseño del TADSEA, se calculó el quemado del combustible simulando un esquema de pases múltiples de las bolas por el núcleo. Se obtuvieron los perfiles de densidad de potencia por la altura del núcleo, los cuales resultaron más aplanados para los estados de carga inicial y estacionario que en el diseño original. Estos permiten cálculos termohidráulicos más reales. La masa de combustible por bolas se estableció en 4.5 g, lo cual garantiza un quemado profundo del combustible y valores de

subcriticidad y de potencia adecuados para todos los estados operacionales. Al final del quemado del combustible la masa de los isótopos del plutonio se reduce en un 66.8 % y la masa de los actínidos menores se reduce en un 40.2 %, lo que significa en conjunto una notable reducción de las masas de los elementos transuránicos.

## Referencias

- [1] ABÁNADES A, GARCÍA C, GARCÍA L, et. al. Application of gas-cooled Accelerator Driven System (ADS) transmutation devices to sustainable nuclear energy development. *Nuclear Engineering and Design*. 2011; 241(6): 2288-2294.
- [2] GARCÍA C, ROSALES J, GARCÍA L, et. al. Performance of a transmutation advanced device for sustainable energy application. *Progress in Nuclear Energy*. 2011; 53(8): 1151-1158.
- [3] ROSALES J, GARCÍA L, PÉREZ J, et. al. Advances in the conceptual design of a gas-cooled Accelerator Driven System (ADS) transmutation device for a sustainable nuclear energy development. *Progress in Nuclear Energy*. 2013; 69: 2-8.
- [4] GARCÍA L, PÉREZ J, GARCÍA C, et. al. Calculation of the packing fraction in a pebble-bed ADS and redesigning of the Transmutation Advanced Device for Sustainable Energy Applications (TAD-SEA). *Nuclear Engineering and Design*. 2012; 253: 142-152.
- [5] GARCÍA L, GONZÁLEZ D, GARCÍA C, et. al. Efficiency of the sulfur-iodine thermochemical water splitting process for hydrogen production based on ADS (accelerator driven system). *Energy*. 2013; 57: 469-477.
- [6] GARCÍA C, ROSALES J, GARCÍA L, et. al. Evaluation of uranium thorium and plutonium thorium fuel cycles in a very high temperature hybrid system. *Progress in Nuclear Energy*. 2013; 66: 61-72.
- [7] ROSALES J, MUÑOZ A, GARCÍA C, et. al. Computational Model for the Neutronic Simulation of Pebble Bed Reactors Core Using MCNPX. *Inter Journal of Nuclear Energy*. 2014; Article ID 279073: 1-12.
- [8] ROSALES J. Modelagem detalhada de sistemas nucleares avançados do tipo leito de bolas com combustível encapsulado [tesis de doctorado]. Recife: Universidad Federal de Pernambuco, 2015.
- [9] IAEA. Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10. IAEA-TECDOC-1382. Vienna: IAEA, 2003.

**Recibido: 22 de octubre de 2015**

**Aceptado: 27 de noviembre de 2015**