

Diseño conceptual de un Sistema Nuclear Avanzado para la Transmutación de Desechos y Aplicaciones Energéticas Sostenibles

Autoría principal

Carlos Rafael García Hernández¹.

Otros autores

Jesús Rosales García¹, Laura García Fajardo¹, Lázaro García Parra¹, Jesús Pérez Curbelo¹, Daniel González Rodríguez¹.

Colaboradores

Alberto Abánades Velazco², Ángel Pérez-Navarro Gómez³, Alberto Facundo Escriba Castell³, Carlos Brayner de Olivera Lira⁴, Amaury Muños Oliva¹, Fernando Rosales García¹, Leorlen Rojas Mazaira¹, Daniel Milián Pérez¹, Lorena del Pilar García¹, Daniel Milián Lorenzo¹.

Entidad ejecutora principal

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba.

Entidades participantes

²ETSII/Universidad Politécnica de Madrid. España.

³Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia. España.

⁴Departamento de Energía Nuclear. Universidad Federal de Pernambuco. Brasil.

Autor para correspondencia

Carlos Rafael García Hernández

Dirección Postal: Ave. Salvador Allende, esquina Luaces, Quinta de los Molinos. Plaza de la Revolución, La Habana 10600, AP 6163.

Teléfono: 878-9858

Correo Electrónico: cgh@instec.cu

Aporte científico de cada autor al resultado

- ✓ **Carlos Rafael García Hernández (30%)**: Dirigió la investigación, es autor principal de dos de los 6 artículos que contienen el resultado presentado, y es coautor del resto. Es o fue el tutor de trabajos de tesis de grado, maestría y/o doctorado del resto de los autores.
- ✓ **Jesús Rosales García (20%)**: Trabajó en el diseño conceptual de la neutrónica del TADSEA, en análisis de los ciclos combustibles y de transmutación de los desechos de larga vida y en el desarrollo de los modelos geométricos detallados para la descripción de la doble heterogeneidad de los reactores de lecho de bolas. Defendió su tesis de grado y de maestría con los resultados obtenidos.
- ✓ **Laura García Fajardo (20%)**: Trabajó en el diseño termo hidráulico del TADSEA, además desarrolló un método geométrico para calcular el número real de bolas que cabe en un núcleo cilíndrico de un ADS, en relación a sus dimensiones y geometría. Basados en los anteriores resultados analizó la influencia que ejerce la fracción de empaquetamiento en las principales características del TADSEA. Defendió su tesis de maestría y de doctorado con los resultados obtenidos.
- ✓ **Lázaro García Parra (10%)**: Diseñó conceptualmente una instalación que acoplada al TADSEA sirve para producir hidrógeno por el método lodo-Sulfuro. Desarrolló un modelo

para estudiar la sensibilidad respecto a los parámetros termodinámicos de la producción de hidrógeno por el método Iodo-Sulfuro a partir de la energía obtenida en un TADSEA. Los resultados obtenidos forman parte de su tesis doctoral en etapa de defensa.

- ✓ **Jesús Pérez Curbelo** (10%): Trabajó en el desarrollo de modelos aleatorios probabilistas para describir el comportamiento de la neutrónica del TADSEA, estudió variantes de ciclos combustibles propuestas para el TADSEA. Defendió su tesis de grado y de maestría con los resultados obtenidos.
- ✓ **Daniel González Rodríguez** (10%): Participó en el desarrollo de un modelo para estudiar la sensibilidad respecto a los parámetros termodinámicos de la producción de hidrógeno por el método Iodo-Sulfuro a partir de la energía obtenida en un TADSEA. Defendió su tesis de grado y de maestría con resultados relacionados a la propuesta.

Resumen

Antecedentes.

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 de las centrales nucleares. Los sistemas nucleares avanzados de muy alta temperatura están considerados dentro de los futuros dispositivos que cumplen dichas expectativas.

Problema que se ha resuelto de acuerdo con los objetivos del trabajo.

En el trabajo se presenta el diseño conceptual de un dispositivo nuclear avanzado para la transmutación de los desechos de larga vida del combustible gastado en los reactores nucleares actuales de agua ligera y para aplicaciones energéticas sostenibles de muy alta temperatura, especialmente la producción de hidrógeno de origen nuclear por métodos avanzados.

Resultados:

En el contexto del desarrollo sostenible de la energía nuclear se evaluaron las potencialidades de un diseño conceptual de un sistema transmutador de lecho de bolas refrigerado por gas. Este dispositivo permite aplicaciones energéticas de alta eficiencia, en modo de cogeneración, tanto para la producción de electricidad como calor e hidrógeno. Una característica particular del sistema diseñado 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. Esta característica permite la posibilidad de reducir las cantidades de residuos nucleares y además aprovecharlos para la producción de energía con una alta eficiencia.

El TADSEA es un sistema manejado por acelerador (ADS) refrigerado por helio y moderado por grafito que utiliza el combustible nuclear en forma de partículas recubiertas llamado combustible TRISO, confinadas en bolas de grafito de 3 cm de radio formando una configuración en el núcleo del reactor llamada lecho de bolas. El dispositivo ha sido concebido para demostrar sus potencialidades para la transmutación de Actínidos Menores e isótopos del Plutonio que provienen de los desechos del combustible nuclear tradicional gastado. Como otros resultados relacionados fueron evaluados ciclos combustibles basados en mezclas de Uranio-Torio y de Plutonio-Torio en un sistema híbrido de muy alta temperatura

del tipo lecho de bolas diseñado para obtener un quemado profundo del combustible TRISO en un ciclo de un paso. El sistema está compuesto por un reactor crítico y dos ADS del tipo TADSEA. Varios parámetros que permiten evaluar las ventajas de los ciclos combustibles propuestos fueron analizados y comparados, entre otros, el coeficiente de reproducción de los isótopos fisiles y la acumulación de actínidos menores e isótopos del plutonio en el combustible gastado. Dentro de los estudios realizados para el diseño conceptual del TADSEA fue desarrollado un método geométrico para calcular el número real de bolas que cabe en un núcleo cilíndrico de un ADS, en relación a sus dimensiones y geometría. Basados en estos resultados fue estudiada la influencia que ejerce la fracción de empaquetamiento en las principales características del TADSEA y se realizó un rediseño de las configuraciones anteriores con el objetivo de cumplir los requisitos establecidos inicialmente para el sistema. Los resultados de los cálculos realizados 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. Se desarrolló un modelo para estudiar la sensibilidad respecto a los parámetros termodinámicos de la producción de hidrógeno por el método Iodo-Sulfuro a partir de la energía obtenida en un TADSEA. Los resultados anteriores aparecen publicados en 6 artículos de tres revistas internacionales de reconocido impacto en la ingeniería nuclear.

Conclusiones

Los resultados presentados han elevado el nivel científico del departamento de energía nuclear del InsTEC y permitido la formación de recursos humanos con una tesis doctoral, 5 tesis de maestría y 7 tesis de grado defendidas.

Comunicación Corta

Introducción

Las posibilidades de desarrollo de la energía nuclear aumentan considerablemente con el incremento de la demanda energética mundial. Sin embargo, el manejo de los residuos provenientes del combustible nuclear gastado de las plantas nucleares convencionales es actualmente uno de los principales problemas que enfrenta el uso de esta fuente de energía. El objetivo del presente trabajo consistió en realizar el 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 helio, que puede utilizar como combustible elementos transuránicos que forman parte del combustible nuclear gastado de las centrales nucleares convencionales de agua ligera. El combustible está encapsulado en forma de partículas TRISO (TRIStructural-ISOtropic). El TADSEA permite lograr transmutar los elementos radiactivos de larga vida presentes en el combustible gastado en estables o de corta vida, disminuyendo la masa y la radiotoxicidad de dichos residuos, y además, permite utilizar las altas temperaturas que puede alcanzar el refrigerante a la salida del núcleo en este tipo de sistemas para producir hidrógeno a partir del agua, mediante el ciclo termoquímico yodo-azufre (I-S) o la electrólisis de alta temperatura.

Para el modelo considerado se desarrolló un método analítico con el objetivo de calcular la porosidad real del lecho de bolas, aspecto muy importante para los cálculos neutrónicos y termo-hidráulicos. Se realizó el diseño neutrónico del TADSEA considerando la porosidad real, y teniendo en cuenta otros factores como son la posición de la fuente de neutrones. Para las características preestablecidas en el diseño se obtuvieron en el núcleo las distribuciones uniformes de densidad de potencia para los diferentes estados de trabajo del sistema mediante el código de transporte de partículas MCNPX. Se realizó el diseño simplificado del esquema general de la planta para garantizar una temperatura del refrigerante a la salida del núcleo lo suficientemente alta para la producción de hidrógeno mediante los procesos antes mencionados y se obtuvieron los perfiles de temperatura del refrigerante utilizando el software ANSYS CFX. Se crearon dos modelos computacionales para estudiar la distribución de temperatura dentro de los elementos combustibles y comprobar que no sobrepasan los límites de temperatura establecidos para el tipo de combustible utilizado. También se calculó la caída de presión del refrigerante a su paso por el núcleo. Se desarrolló un modelo para estudiar la sensibilidad respecto a los parámetros termodinámicos de la producción de hidrógeno por el método Iodo-Sulfuro a partir de la energía obtenida en un TADSEA.

DISEÑO CONCEPTUAL DEL TADSEA.

El diseño preliminar del sistema consistió en definir las características de las principales partes que lo componen: el acelerador de partículas, el blanco de espalación, el núcleo, el combustible, el refrigerante, etc. Estas características constituyeron el punto de partida para realizar los análisis y cálculos necesarios que permitieron hacer un diseño conceptual detallado del dispositivo y evaluar su viabilidad para cumplir con los objetivos propuestos: disminuir la masa y la radiotoxicidad del combustible nuclear gastado de las centrales nucleares convencionales y alcanzar muy altas temperaturas del refrigerante a la salida del núcleo para la producción de hidrógeno.

Un diseño anterior de un transmutador del tipo lecho de bolas llamado PBT (pebble-bed transmutation) demostró la capacidad de un ADS con espectro de neutrones térmicos de reducir considerablemente la masa de los isótopos del plutonio y de algunos actínidos menores, logrando la disminución de la radiotoxicidad de los residuos en el tiempo. Sin embargo, el PBT sólo fue concebido como un transmutador de transuránicos y no como un sistema capaz de contribuir adicionalmente a la producción de calor o electricidad.

Con el objetivo de utilizar la energía producida mediante las reacciones nucleares que tienen lugar en el núcleo de un transmutador como el PBT en la generación de hidrógeno, debido a la prevista demanda de este vector en un futuro escenario energético, se concibió un nuevo dispositivo llamado TADSEA (Transmutation Advanced Device for Sustainable Energy Applications). El TADSEA, al igual que el PBT, es un ADS de lecho de bolas refrigerado por gas, que utiliza como combustible elementos transuránicos encapsulados en forma de partículas TRISO. Para esto, se consideró diseñar el TADSEA con la máxima potencia posible, buscando valores del orden de lo que requiere una instalación piloto. En la instalación piloto la potencia del

núcleo tiene que ser lo suficientemente elevada como para representar la de un transmutador a escala industrial. Se han estudiado las potencias óptimas para este tipo de sistema, y los valores varían entre 80 MW_t y 100 MW_t así que se seleccionó el valor de 100 MW para la potencia térmica del TADSEA.

El acelerador propuesto para el TADSEA es un LINAC, en lugar del ciclotrón que se había escogido para el diseño conceptual del antiguo PBT de 10 MW, debido a la necesidad de incrementar la energía e intensidad del haz de protones, siguiendo las directivas de proyectos de ADS como el proyecto europeo PDS-XADS que sugiere utilizar un acelerador de 1 GeV y 10 mA para núcleos subcríticos con $K_{\text{eff}} < 0.95$.

Se eligió la aleación de plomo-bismuto (LBE) como material para el blanco de espalación del TADSEA, con un diseño en forma cónica de la ventana de separación entre el tubo del haz y el blanco para lograr un ensanchamiento de la fuente neutrónica y reducir el factor de pico térmico en el núcleo.

Este blanco fue estudiado detalladamente para el PBT, para establecer las condiciones de trabajo del material. Este estudio fue desarrollado estimando la generación del calor con el código FLUKA. El análisis térmico del blanco se hizo con un código comercial de dinámica de fluidos computacional. El máximo valor de deposición del calor en la ventana está en el orden de los 200 W/m³·mA. Las temperaturas en la ventana no exceden los 490°C y la diferencia de temperatura entre la cara exterior e interior del cono no exceden los 18°C, lo que sugiere una tensión termo-mecánica aceptable ya que los diseños en desarrollo aguantan diferencias de temperatura entre 120°C y 580°C.

Se ha escogido como refrigerante para el TADSEA el gas helio, que a pesar de ser más costoso que otros gases como el CO₂ o el nitrógeno, posee dos características que justifican su uso:

- (1) Al ser un gas noble es químicamente inerte. Esto es muy importante en cuanto a mantener la integridad de los elementos combustibles pues no provoca oxidación del grafito.
- (2) Debido a su baja sección eficaz no interacciona con los neutrones presentes en el reactor, es decir, es neutrónicamente transparente. Esto hace que no se produzca moderación de los neutrones a su paso por el refrigerante por lo que el espectro quedará determinado únicamente por el diseño del combustible, y por otro lado no existirá un coeficiente de reactividad debido a la temperatura del refrigerante, ya que una variación en la densidad del helio producirá un incremento despreciable en su sección eficaz macroscópica.

El núcleo del TADSEA está compuesto por un lecho de bolas, que son los elementos combustibles del reactor. Se consideran bolas de 6 cm de diámetro y 5 cm para la zona de combustible. En la zona interior de las bolas se ubican las partículas combustibles revestidas llamadas TRISO y una zona exterior moderadora. Para alcanzar la potencia térmica deseada de 100 MW en el TADSEA, se optó por incrementar las dimensiones del núcleo y mantener la misma composición del combustible. Desde el punto de vista técnico es posible incrementar la potencia incrementando las dimensiones del núcleo y

manteniendo la densidad de potencia promedio en el rango máximo permitido de 7 W/cm^3 . Esto se hizo imponiendo como condición que el incremento fuera tal que se conservaran las capacidades de transmutación y no se deterioraran los perfiles de potencia. La fracción de empaquetamiento del PBT se consideró igual a 0.74 por ser este el mayor grado de compactación que se puede alcanzar en un lecho de bolas, y que corresponde a una configuración compacta hexagonal en un medio infinito, por lo que se decidió mantener inicialmente para el TADSEA la disposición de bolas y la fracción de empaquetamiento del PBT, aunque estudios posteriores demostraron un valor más real de fracción de empaquetado para este caso de 0.64.

En la **Tabla** se resumen las características básicas del TADSEA.

Parámetro	valor
núcleo	
Radio interno (cm)	15
Radio externo (cm)	125.75
Altura (cm)	293.94
Volumen Total (m^3)	14.38
Volumen ocupado por combustible (m^3)	10.64
Ancho del Reflector (cm)	60
Numero de bolas	94092
Masa de combustible [kg]	124.50
Fracción de empaquetamiento	0.64
K_{eff}	0.943
Potencia térmica [MW]	100
Densidad de potencia promedio [W/cm^3]	7
Temperatura a la entrada del núcleo ($^{\circ}\text{C}$)	590
Temperatura a la salida del núcleo ($^{\circ}\text{C}$)	950
Refrigerante	helio
Flujo másico del refrigerante (kg/seg))	53
Presión del refrigerante (MPa)	7
Potencia de bombeo (MW)	5
Parámetros del acelerador	
Potencia máxima del acelerador [MW]	10
Energía del haz de protones [MeV]	1000
Intensidad del haz de protones [mA]	10
Consumo de electricidad (MW)	6.82
Producción de hidrógeno	
Ciclo	I-S
Producción (Kg/seg)	0.39
Producción de Energía (MW)	46.8
Ciclo de producción de electricidad	Brayton regenerativo
Eficiencia del ciclo	0.45
Producción de electricidad (MW)	45

Para garantizar los parámetros escogidos para la instalación se realizó un estudio de la dependencia entre el factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) y el espesor del reflector. Los resultados indican que para las condiciones más extremas, un grosor radial del reflector menor que 70 cm garantiza un K_{eff} por debajo de 0.95, por lo que se escogió para el TADSEA un grosor del reflector de 60 cm.

Los datos de la tabla anterior constituyeron el diseño preliminar del TADSEA, su capacidad de transmutación fue estudiada y comparada con la del antiguo PBT, demostrando que un dispositivo con estas características es capaz de reducir la masa y la radiotoxicidad de algunos transuránicos presentes en el combustible nuclear gastado de los LWRs. Se realizó la modelación computacional neutrónica del dispositivo mediante el código MCNPX, se estudió la variación de los isótopos peligrosos al final del ciclo de combustible. Los resultados mostraron que la masa total de Pu disminuye en un 78.4%, la de AM en un 34% y la de Pu+AM en un 73.7%.

Con las nuevas características del TADSEA, se obtuvieron los perfiles de densidad de potencia axial y radial para los tres estados característicos de trabajo del sistema, la carga inicial, el comienzo del ciclo estacionario y el fin del ciclo estacionario. El perfil axial de densidad de potencia para la carga inicial es bastante simétrico, para los estados estacionarios los perfiles axiales de densidad de potencia no son simétricos sino que presentan una disminución en la parte inferior del núcleo debido al quemado del combustible. Con el objetivo de obtener un mayor aplanamiento de dichos perfiles sin deteriorar considerablemente el perfil inicial se estudió el desplazamiento de la fuente de neutrones hacia abajo a lo largo del canal axial central del núcleo. Los resultados mostraron que la mejor posición para el blanco de espalación es la que había sido considerada en el diseño inicial del dispositivo donde se obtienen los menores valores del factor de pico.

Se calcularon los parámetros termo-hidráulicos de la instalación para garantizar valores de 950°C de temperatura del refrigerante (gas helio) a la salida del núcleo, y se obtuvieron los perfiles de temperatura del mismo para los tres estados de trabajo del sistema, a partir de los perfiles de densidad de potencia axial obtenidos de los cálculos neutrónicos. La modelación se realizó con el software ANSYS CFX, introduciendo los perfiles de densidad de potencia axial, radial y axial-radial como los valores discretos promediados en cada zona del núcleo, obtenidos con el MCNPX para los tres estados del sistema estudiados. Los resultados mostraron una adecuada correspondencia entre los perfiles de temperatura y los perfiles axiales de densidad de potencia, y la posibilidad de obtener la temperatura deseada del refrigerante a la salida del núcleo.

Se desarrollaron dos modelos analíticos para obtener la distribución de temperatura dentro de los elementos combustibles críticos y se comprobó la temperatura máxima que alcanzan durante el estado estacionario es menor que la temperatura límite de este tipo de combustible. También se realizaron pruebas de pérdida parcial y total de refrigerante.

Como parte del diseño preliminar de los parámetros termo-hidráulicos de una planta de producción de hidrógeno, se realizó el cálculo de la caída de presión del helio a su paso por el núcleo del TADSEA mediante el software ANSYS CFX, utilizando el modelo de pérdida direccional para medios porosos, y también mediante la correlación semiempírica de la Guía de Seguridad Alemana [KTA3102.3](#). Ambos resultados se compararon entre sí mostrando una adecuada correspondencia.

Fueron estudiados varios ciclos combustibles basados en el uso de mezclas con Torio en un sistema híbrido compuesto por un reactor de alta temperatura del tipo lecho de bolas y dos ADS del tipo TADSEA. Las principales ventajas de dichos ciclos fueron analizadas y evaluados algunos parámetros que describen el comportamiento de dichos ciclos combustibles así como la acumulación de elementos transuránicos.

La extensión de los ciclos combustibles con Torio en un segundo paso en un TADSEA conduce a un incremento del quemado y de la reproducción del combustible fisil y a un decrecimiento en el porcentaje de material fisil en el combustible de desecho. Además se obtiene en el segundo paso una mayor contribución de los nuevos isótopos fisiles, obtenidos a partir del Torio, a la energía producida y una notable reducción de los isótopos del Plutonio y los Actínidos Menores.

Conclusiones.

Se presenta el diseño conceptual de un sistema nuclear avanzado de muy alta temperatura que permite aplicaciones energéticas sostenibles y la trasmutación del combustible gastado de los reactores nucleares tradicionales, el cual fue llamado TADSEA por sus siglas en inglés.

Publicaciones

1. A. Abánades, C. García, L. García, A. Escrivá, A. Pérez-Navarro, J. Rosales. Application of gas-cooled Accelerator Driven System (ADS) transmutation devices to sustainable nuclear energy development. *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011) 2288–2294
2. C. García, J. Rosales, L. García, A. Pérez-Navarro, A. Escrivá, A. Abánades. Performance of a transmutation advanced device for sustainable energy application. *Progress in Nuclear Energy* 53 (2011) 1151-1158.
3. L. García, J. Pérez, C. García, A. Escrivá, J. Rosales, A. Abánades. Calculation of the packing fraction in a pebble-bed ADS and redesigning of the Transmutation Advanced Device for Sustainable Energy Applications (TADSEA). *Nuclear Engineering and Design* 253 (2012) 142–152.
4. C. García, J. Rosales, L. García, A. Muñoz, F. Rosales, C. Brayner, J. Pérez. Evaluation of uranium thorium and plutonium thorium fuel cycles in a very high temperature hybrid system. *Progress in Nuclear Energy* 66 (2013) 61-72
5. J. Rosales, L. García, J. Pérez, A. Muñoz, C. García, A. Escrivá, D. Sanchez, A. Abánades. 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* 69 (2013) 2-8.
6. Lázaro García, Daniel González, Carlos García, Laura García, Carlos Brayner. Efficiency of the sulfure-iodine thermochemical water splitting process for hydrogen production based on ADS (accelerator driven system). *Energy* 57 (2013) 469-477