

MODELADO DE LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES POR IRRADIACIÓN DE COMBUSTIBLES DE TORIO

MODELLING OF SPECIES PRODUCTION BY IRRADIATION OF THORIUM FUELS

Martín E. González^a, Matías E. Loza Peralta^a, Edgar Bea^b y Alejandro Soba^{a,b}

^a*Sección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, CAC, CNEA, Av. Gral. Paz
1499, 1650 Buenos Aires, Argentina*

^b*CONICET*

Palabras clave: producción de especies, ciclo de torio, código DIONISIO.

Resumen. La simulación de combustibles basados en el ciclo de torio implica la apertura de una rama de cálculo que incluya todos los fenómenos relevantes, de manera análoga a lo realizado para combustibles de uranio. El paso inicial en esta dirección consiste en establecer la composición del material y su evolución en el tiempo, ya que esto determina las propiedades del mismo. Para ello es necesario resolver las ecuaciones de balance de Bateman de forma iterativa, las cuales requieren el cálculo previo de las secciones eficaces de los nucleídos involucrados, sus constantes de decaimiento y el flujo neutrónico. A partir de esta etapa es posible analizar la evolución de la concentración de cada isótopo en función del quemado y el radio de la pastilla, como respuesta ante historias de potencia variables. En este trabajo se presentan resultados que muestran la evolución de quemado y concentración de especies en función del tiempo incluidas dentro del código DIONISIO, para una pastilla constituida por dióxido de torio y de plutonio, siendo este último el material que actúa como especie fisible.

Keywords: species production, thorium cycle, DIONISIO fuel code.

Abstract. The simulation of nuclear fuels based on the thorium cycle requires a new branch of calculations that includes all the relevant phenomena, in analogy to the path followed for simulating uranium fuels. The first step in this direction consists in establishing the initial fuel composition and its evolution in time, as it determines the fuel properties. In order to achieve this, one needs to iteratively solve the Bateman balance equations, which require knowing the cross sections of the nuclides involved and their decay constants, as well as the neutron flux in each time step. From this stage it is possible to analyze the concentration evolution of each isotope, as a function of burnup and fuel pellet radius, in response to variable power histories. In this work some results are presented which show the evolution of species concentration in time, included in the DIONISIO code, for a fuel pellet composed of mixed thorium and plutonium dioxides, the latter of them being the initial fissile species.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles nucleares en base al torio estuvo entre las primeras posibilidades planteadas en los albores de la era nuclear. Al terminar la Segunda Guerra Mundial, la mayor parte de los esfuerzos en ciencia y tecnología nuclear estaban enfocados en el desarrollo de armamento. Sin embargo, con el inicio de la década de 1950 hubo un incremento y diversificación de la fuerza de trabajo, con el objetivo de llevar a cabo proyectos en paralelo al ámbito bélico, dedicados a los usos pacíficos de la energía atómica, con su componente principal orientada a la generación de energía a gran escala (IAEA, 2005). Si bien la investigación se centró principalmente en el ciclo del uranio, desde el año 2000 aproximadamente ha habido un resurgimiento en el interés por combustibles nucleares alternativos.

Las características del dióxido de torio (ThO_2) lo hacen más resistente a la proliferación que el dióxido de uranio (UO_2), dificultando su manipulación fuera de instalaciones adecuadas, además de presentar una cadena de decaimiento que favorecería la gestión de residuos radiactivos en la etapa final del ciclo. Adicionalmente, la necesidad de mezclar el dióxido de torio con un isótopo físil, en particular con plutonio ^{239}Pu , abre la posibilidad de adquirir este elemento desde el material que surge de los programas de reducción de armamento nuclear, lo que indirectamente alentaría la ejecución de los mismos (USNRC, 2014).

Por la importancia que adquieren este tipo de combustibles alternativos, es de interés contar con el conocimiento de las propiedades más relevantes, para desarrollar modelos de simulación que permitan comprender mejor su comportamiento bajo diversas condiciones de operación.

El comportamiento de los combustibles nucleares es regido fundamentalmente por el acoplamiento de fenómenos físicos de índole térmica, mecánica y nuclear. Para abordar la simulación integral de estos fenómenos, es importante conocer cómo evoluciona la concentración de nucleidos por irradiación y decaimiento del ^{232}Th , así como de aquellas especies en su cadena de decaimiento, ya que tienen efecto sobre el comportamiento termo-mecánico del material. Para ello, es necesario conocer con suficiente aproximación las secciones eficaces y constantes de decaimiento de los nucleidos involucrados.

En el presente trabajo se propone estudiar mediante simulación numérica el comportamiento de una barra combustible con contenido de torio, compuesta por pastillas de $(\text{Th,Pu})\text{O}_2$, que consisten en una mezcla de dióxidos de torio y plutonio. La composición de nucleidos del ciclo del torio, en el modelado del sistema, responde al flujo neutrónico correspondiente a una historia de potencia conocida. Este análisis es llevado a cabo mediante el código combustible DIONISIO (Soba y Denis, 2015, 2013; Goldberg et al., 2019), que evalúa la mayoría de los fenómenos que tienen lugar en una barra combustible durante la irradiación en un reactor nuclear, tanto en condiciones normales como accidentales. Los resultados se comparan con las predicciones del código neutrónico CONDOR (Villarino, 2002).

2. COMBUSTIBLES NUCLEARES ALTERNATIVOS. ÓXIDOS MIXTOS DE TH-PU

El hecho que el ^{235}U sea el único isótopo físil presente en la naturaleza en cantidades potencialmente rentables, hace que los ciclos de combustibles nucleares alternativos basados en otros isótopos físil artificiales, como ^{233}U o ^{239}Pu , requieran necesariamente una etapa de reprocesamiento, ya que deben ser obtenidos vía la iniciación de sus cadenas de decaimiento, por irradiación en reactores nucleares, de los nucleidos ^{232}Th o ^{238}U respectivamente. Sin embargo, para quemados bajos es posible evitar esta limitación, incluyendo barras combustibles con contenido de ^{232}Th . La presencia de este isótopo reduce la energía total extraída del ^{235}U por fisión, ya que su sección eficaz de absorción es mayor a la de este último, pero posibilita la

producción del ^{233}Th y su decaimiento a ^{233}U físil durante el ciclo de operación, que contribuirá entonces a la potencia generada en el combustible. La ventaja de este esquema es que la energía extraída de este combustible combinado es mayor a la que se obtendría del UO_2 convencional (IAEA, 2005). Si se extiende el quemado de extracción, la combinación de productos de fisión venenosos de ambos combustibles resulta en una penalización de reactividad mayor que en el caso de UO_2 . Por esta razón, el uso de este esquema parece más factible en reactores CANDU, ya que operan hasta un quemado de extracción no mayor a 10-15 MWd/kgHM.

Cuando los nucleidos físis se forman por irradiación de sus precursores, pueden dar lugar a reacciones de fisión con los neutrones presentes, liberando la correspondiente energía. Esto ocurre en los reactores nucleares, en los cuales el ^{239}Pu formado por captura neutrónica en el ^{238}U contribuye a la potencia liberada en la pastilla combustible. Sin embargo, la penalización en reactividad dada por la continua formación de productos de fisión, es muy superior a la componente de reactividad que puede aportar la fracción de isótopo físil generada. Por otra parte, el daño por radiación de los materiales estructurales del reactor y la acumulación de gases que incrementan la presión interna de la vaina, como ocurre usualmente, hacen que sea necesario extraer el combustible irradiado. Por estas razones debe someterse el combustible irradiado a una etapa de reprocesamiento, con el fin de utilizar el material físil producido en etapas posteriores (Lamarsh y Baratta, 2001; Murray, 2000; Olander, 1976).

3. MODELADO DEL CICLO DEL TORIO

La simulación de un combustible basado en torio requiere una serie de parámetros análogos a los utilizados en el cálculo de combustibles usuales del ciclo de uranio (Soba y Denis, 2013). Así, partiendo de la historia de potencia, la geometría y composición inicial del combustible, se busca calcular las propiedades térmicas y mecánicas de la barra y predecir su evolución en el tiempo. Dentro del código DIONISIO, esto se lleva a cabo mediante subrutinas, funciones y módulos que contienen los modelos numéricos adecuados para cada caso. El quemado alcanzado y la concentración de especies se calcula de forma similar, utilizando modelos que representan aproximaciones obtenidas *ad-hoc* a partir de los resultados de códigos neutrónicos, en particular de CONDOR.

Uno de los aspectos fundamentales del material que constituye a la pastilla combustible es, como se mencionó anteriormente, el conocimiento de las secciones eficaces de fisión y captura de los nucleidos involucrados. En códigos con las características y el enfoque de DIONISIO, una forma adecuada de lograr esto es mediante aproximaciones polinómicas de las secciones eficaces, expresadas como funciones del radio de la pastilla y el quemado alcanzado, lo cual permite una simplificación considerable con respecto a la gran complejidad de las bases de datos de secciones eficaces, permitiendo obtener valores que resultan correctos para los fines del código de combustibles.

3.1. Aproximación de secciones eficaces

A fin de calcular el balance de nucleidos en el ciclo del torio, utilizando subrutinas internas del código DIONISIO, es necesario llevar a cabo una etapa previa de clasificación y ajuste de datos provistos externamente por un código neutrónico. La complejidad de un cálculo de tales características suele ser prohibitiva para los códigos dedicados al análisis detallado del comportamiento térmico y mecánico de combustibles nucleares, como es el caso de DIONISIO, debido a que la simulación es de por sí muy demandante desde el punto de vista computacional.

Los códigos neutrónicos dedicados utilizan bibliotecas de secciones eficaces reconocidas en

el ámbito internacional. Mediante una serie de procedimientos acordes a los requerimientos de cada código, los datos nucleares de las bibliotecas son procesados y adecuados antes de su utilización en los programas, según el espectro de problemas a analizar.

En base a lo mencionado, es necesario utilizar los resultados de estos códigos como de datos de entrada, a fin de aproximar dichos datos mediante una parametrización adecuada. Esto da lugar a modelos que se incorporan al código DIONISIO y permiten evaluar la evolución temporal de cada especie presente en el material, en base a su cadena de decaimiento, en un amplio espectro de problemas, sin necesidad de recurrir continuamente a un código neutrónico como CONDOR.

3.2. Clasificación de datos provistos por CONDOR

A partir de una serie de simulaciones llevadas a cabo por el código CONDOR (Villarino, 2002), se extrajeron las secciones eficaces necesarias, que dependerán de los grupos de energía de neutrones a considerar. Para poder barrer un rango extenso de posibilidades, se solicitaron ejecuciones de diferentes composiciones iniciales (en este caso fue una mezcla de $(Th,Pu)O_2$ con fracciones en el rango 2 - 20 % en peso de Pu) y hasta quemados tan altos como 120 MWd/kgHM. El código CONDOR resuelve la ecuación de transporte para 69 grupos de energía, calcula la evolución de la concentración de nucleidos en cada paso de quemado y en función de la posición radial en la pastilla combustible. Por otra parte, en cada paso de tiempo toma nuevos valores de cada sección eficaz de la biblioteca correspondiente, los cuales varían de acuerdo a los parámetros mencionados (quemado, concentración de Pu y posición radial en la pastilla), para alcanzar una nueva iteración en el cálculo. La salida de cada iteración es condensada a dos grupos de energía, aptos para ser tratados por DIONISIO como entrada.

La clasificación de los valores proporcionados se hace a partir de la lectura de las salidas de CONDOR, a fin de generar una serie de archivos para cada nucleido involucrado. De esta forma, se ordenan las secciones eficaces de cada especie según el contenido inicial de Pu, el quemado alcanzado y la posición radial en la pastilla. Esta etapa permitió almacenar los datos de interés en nuevos archivos, a fin de poder tratarlos individualmente y obtener las primeras funciones que aproximan las secciones eficaces buscadas.

3.3. Desarrollo de funciones de aproximación

Para el estudio de la evolución temporal de las especies correspondientes al ciclo de Th como material fértil irradiado por neutrones térmicos, con agregado de Pu como nucleido físil inicial, se consideran los nucleidos producidos durante la irradiación (Stacey, 2001; Henry, 1975). Como el comportamiento térmico y mecánico del combustible depende de su composición, es necesario conocer la concentración de cada nucleido en el material, así como las propiedades termomecánicas particulares del mismo. De esta manera, la tarea se centra en resolver las ecuaciones de balance del ciclo de Th para analizar la evolución temporal de las especies presentes en el combustible. Debido a que estas ecuaciones requieren el conocimiento de la sección eficaz de captura y fisión de cada nucleido, es necesario incorporar expresiones que permitan calcularlas en cada paso temporal, como función de su posición radial en la pastilla, la concentración de Pu presente y el quemado alcanzado.

Los archivos generados permiten individualizar las secciones eficaces según el modo de interacción (absorción, fisión, etc.) y nucleido de la cadena de decaimiento. Hecho esto, se lleva a cabo una interpolación bicúbica por cada nucleido en función del quemado y del radio. Posteriormente, se analizan los coeficientes obtenidos en cada caso a fin de incluir la fracción

del ^{239}Pu presente como variable de ajuste, para finalmente expresarlos mediante un polinomio de tercer grado dependiente del contenido de nucleido fisible. Como resultado, se obtiene un conjunto de funciones bicúbicas, que dan el valor de cada sección eficaz de interés en función del radio y el quemado alcanzado, como aproximación a los datos originales de CONDOR. Estas funciones, que dan entonces las secciones eficaces según la dependencia $\sigma_{a,f} = f(r, b, q)$, tienen la forma general dada por la Ecuación 1

$$f(r, b, q) = c_1 + c_2 b + c_3 r + c_4 b^2 + c_5 r^2 + c_6 b^3 + c_7 r^3 + c_8 b r + c_9 b^2 r + c_{10} b r^2 \quad (1)$$

donde la variable r representa al radio de la pastilla, mientras que b corresponde al quemado alcanzado.

Los coeficientes $c_i = c_i(q)$ son, como se dijo, función de la fracción q de ^{239}Pu en el material, siendo específicos para cada nucleido.

3.4. Balance de especies

La concentración de cada uno de los isótopos presentes en el combustible nuclear evoluciona de acuerdo al balance de reacciones nucleares de producción y pérdida, descrito mediante un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, análogas a las ecuaciones de Bateman, pero con la adición del término de producción por fisión, que las hace inhomogéneas.

Nucleidos incluidos para la cadena del Th

^{232}Th , ^{233}Th , ^{233}Pa , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu

Tabla 1: Lista de nucleidos incluidos en el modelo de irradiación del Th.

En este trabajo se consideró un conjunto reducido de los principales nucleidos en la cadena del torio, enumerados en la Tabla 1, omitiendo en esta etapa aquellas especies cuya concentración resulta ser órdenes de magnitud menor que las seleccionadas. La cadena completa puede observarse en la Figura 1, donde se destacan las especies seleccionadas para este trabajo que pertenecen a la misma.

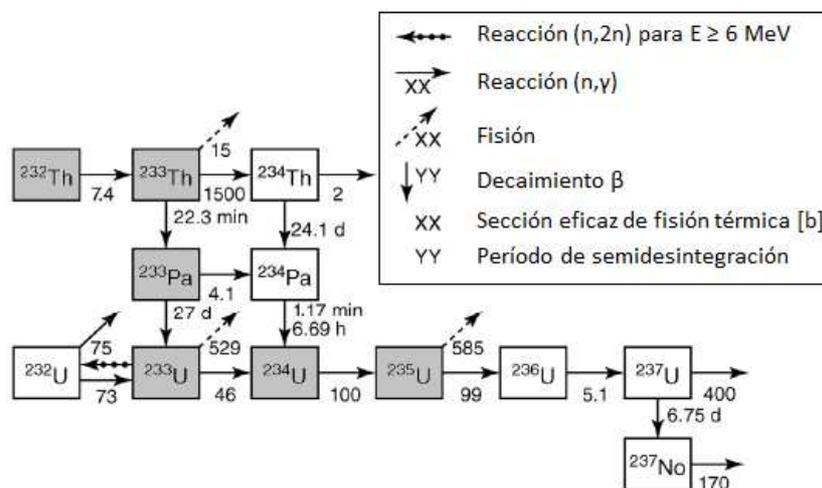


Figura 1: Cadena de decaimiento del torio.

En la [Ecuación 2](#) se presenta el sistema de ecuaciones de reacciones nucleares correspondientes al ciclo del torio. Para identificar al nucleido se utilizan supraíndices con notación np , donde el índice n representa el último dígito del número atómico del nucleido considerado, mientras que el índice p corresponde al último dígito del número másico ([Stacey, 2001](#); [Henry, 1975](#)). Este sistema de ecuaciones es el considerado para la inclusión del ciclo del torio en DIONISIO.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial n^{02}}{\partial t} &= -\sigma_a^{02} \phi n^{02} \\
 \frac{\partial n^{03}}{\partial t} &= \sigma_\gamma^{02} \phi n^{02} - (\lambda^{03} + \sigma_a^{03} \phi) n^{03} \\
 \frac{\partial n^{13}}{\partial t} &= \lambda^{03} n^{03} - (\lambda^{13} + \sigma_a^{13} \phi) n^{13} \\
 \frac{\partial n^{23}}{\partial t} &= \lambda^{13} n^{13} - \sigma_a^{23} \phi n^{23} \\
 \frac{\partial n^{24}}{\partial t} &= \sigma_\gamma^{23} \phi n^{23} + \sigma_\gamma^{13} \phi n^{13} - \sigma_a^{24} \phi n^{24} \\
 \frac{\partial n^{25}}{\partial t} &= \sigma_\gamma^{24} \phi n^{24} - \sigma_a^{25} \phi n^{25} \\
 \frac{\partial n^{49}}{\partial t} &= -\sigma_a^{49} \phi n^{49} \\
 \frac{\partial n^{40}}{\partial t} &= -\sigma_a^{40} \phi n^{40} + \sigma_\gamma^{49} \phi n^{49} \\
 \frac{\partial n^{41}}{\partial t} &= \sigma_\gamma^{40} \phi n^{40} - (\lambda^{41} + \sigma_a^{41} \phi) n^{41} \\
 \frac{\partial n^{42}}{\partial t} &= \sigma_\gamma^{41} \phi n^{41} - \sigma_a^{42} \phi n^{42}
 \end{aligned} \tag{2}$$

donde σ_a es la sección eficaz microscópica de absorción y σ_γ la correspondiente a la captura radiativa, y están relacionadas con la de fisión mediante la expresión $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$. En las [Ecuaciones 2](#) se considera que la captura neutrónica en el ^{233}Pa produce directamente ^{234}U , despreciando los decaimientos entre isótopos intermedios con períodos de semi-desintegración muy cortos. Por otra parte y para simplificar el análisis, no se consideró el ^{234}Th y su contribución a la formación de ^{234}U según la [Figura 1](#), ni los isótopos del uranio más allá del ^{235}U .

4. INCLUSIÓN DEL CICLO DEL TORIO EN EL CÓDIGO DIONISIO

En esta sección se detallan los procedimientos realizados para acoplar las funciones desarrolladas y tratadas en el capítulo anterior, en el cuerpo del código DIONISIO. Debido a que el mismo está actualmente diseñado para simular el comportamiento de combustibles nucleares basados en el ciclo del uranio, fue necesario modificar las subrutinas y módulos adecuados para incluir la simulación del ciclo del torio como una opción adicional al programa.

4.1. Evolución de especies por irradiación y decaimiento

El cálculo de la evolución de especies en el combustible se realiza mediante la resolución del sistema representado por la [Ecuación 2](#). La resolución del problema se implementó en DIONISIO mediante una subrutina que se basa en el método de Runge-Kutta de orden 4. Teniendo

en cuenta las variables que entran en juego en las ecuaciones de Bateman, es necesario conocer la composición de cada nucleido, así como su sección eficaz de absorción, constante de decaimiento, el flujo neutrónico presente y la sección eficaz de captura radiativa, todos ellos en cada paso temporal de la ejecución.

A partir de la composición inicial del combustible a simular, la cual es conocida, y teniendo en cuenta la historia de potencia ante la cual responderá el material irradiado, se calcula un valor aproximado del flujo neutrónico en cada sector de la barra combustible. Esta aproximación se realiza en cada paso temporal mediante una subrutina que resuelve la ecuación de Bessel, a fin de aproximar un valor para el flujo correspondiente.

Paralelamente a esto, se requieren las secciones eficaces mencionadas y constantes de decaimiento a sus respectivas subrutinas, a fin de iniciar el cálculo de la tasa de variación temporal de cada especie, dN_i/dt en la iteración actual, sumando el resultado al valor acumulado N_{i-1} hasta la iteración anterior, de forma tal que $N_i = N_{i-1} + (dN_i/dt) \Delta t$, donde Δt es la magnitud del paso temporal considerado.

Este proceso permite calcular la composición del combustible durante todo el período de irradiación, así como en la etapa de decaimiento luego de su período de vida en el reactor. La concentración de cada nucleido en el material es determinante para las propiedades térmicas y mecánicas del mismo, por lo que su conocimiento es fundamental para el análisis que el código DIONISIO permite llevar a cabo en este ámbito. De particular importancia es el conocimiento de la concentración de ^{233}U físil, formado durante la irradiación del ^{232}Th fértil con neutrones térmicos. Por otra parte, se considera la posibilidad de estudiar la evolución del combustible en la etapa post-irradiación, ya que la integridad física de la barra es crítica en la etapa de almacenamiento en piletas, mientras que su composición es particularmente importante con respecto a la radiotoxicidad del material y su evolución en el tiempo.

4.2. Estructura del código: subrutinas modificadas

En la [Figura 2](#) se presenta el diagrama de bloques de la estructura general del código, con detalle en la rama de cálculos relativos al ciclo de torio, en caso de cumplirse su condición de ejecución. La sucesión de fenómenos considerados es análoga a la correspondiente al ciclo de uranio, indicada simplemente con un bloque representativo.

5. RESULTADOS

En los párrafos que siguen se describen los resultados obtenidos al ejecutar el código DIONISIO utilizando una historia de potencia escalonada como entrada, a fin de evaluar el comportamiento del programa ante las variantes que pueden presentarse durante la misma. Se realiza un análisis centrado en el balance de especies presentes y su correlación con la evolución de potencia, a fin de corroborar la coherencia entre las curvas obtenidas y el comportamiento esperado en función de las propiedades de cada nucleido.

5.1. Evolución de especies ante cambios de potencia

Se buscó analizar el comportamiento de las especies presentes en la cadena del torio en respuesta a una historia de potencia con transitorios de 0.1 día (2.4 h) de duración cada uno. La misma se presenta en la [Figura 3](#), junto con la evolución del quemado y el flujo correspondiente.

La [Figura 4a](#) muestra evolución del ^{233}Th en cada etapa de la historia de potencia analizada, mientras se aprecia cómo disminuye la concentración de su predecesor ^{232}Th por absorción neutrónica. Esto presenta un claro acuerdo con lo esperado según las ecuaciones de Bateman y el

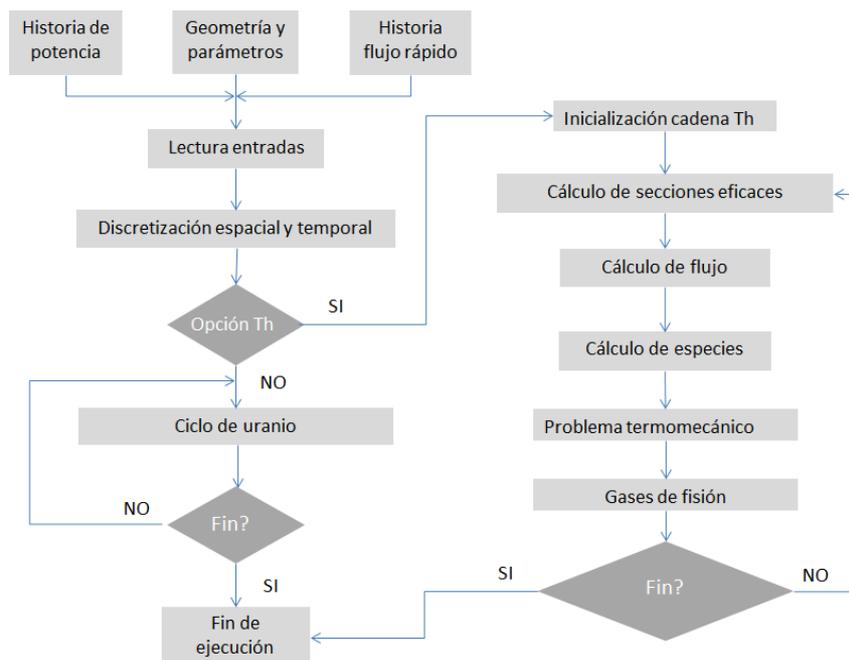


Figura 2: Esquema de la estructura del código con las subrutinas del ciclo de torio incorporadas.

equilibrio entre tasas de producción y pérdida. Así, la concentración de ^{233}Th muestra un comportamiento proporcional al flujo neutrónico, determinando la evolución de la concentración para las especies subsiguientes.

Análogamente, la **Figura 4b** muestra que la producción de ^{233}Pa acompaña a la de su predecesor en la cadena, ^{233}Th , hasta alcanzar un máximo en la tercera etapa de la historia de potencia. A partir de allí, la disminución en la formación de ^{233}Th hace que la tasa de pérdida del ^{233}Pa por decaimiento se vuelva dominante, con un retardo consistente con su período de semidesintegración, ya que la tasa de producción de su antecesor se ve disminuida por la potencia decreciente.

Con respecto a la producción de ^{233}U , en la **Figura 5** se observa una tasa de producción dominante en la etapa de transitorios positivos, debido a la continua formación del mismo a partir de la tasa de decaimiento del ^{233}Pa . Se ve que la tasa de formación del ^{233}U permanece

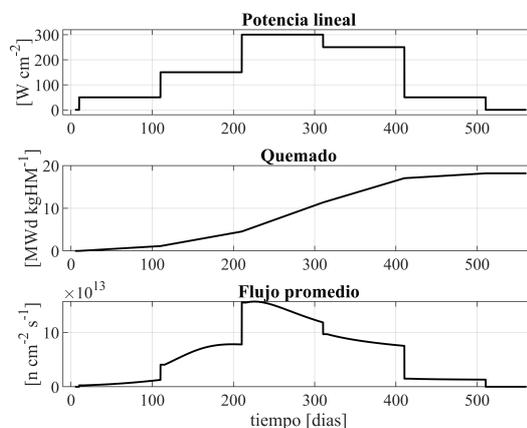
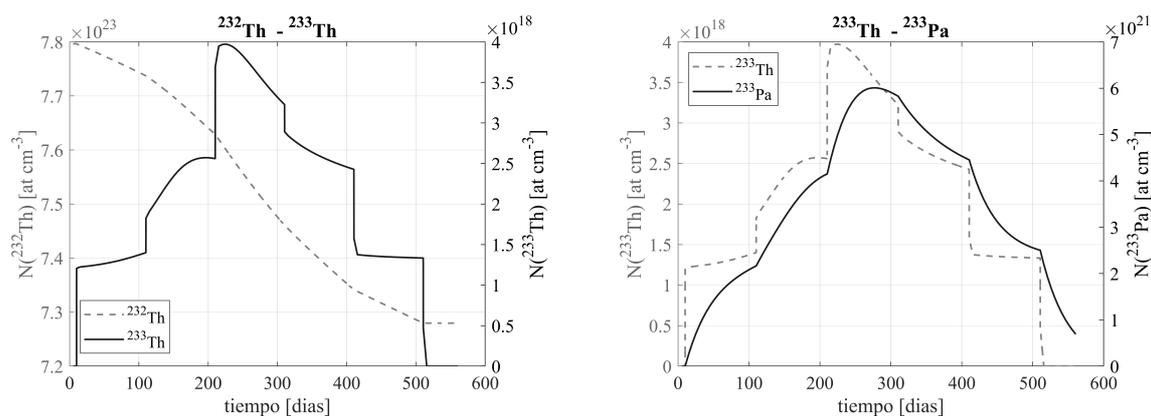


Figura 3: Evolución de quemado, flujo neutrónico y potencia lineal.



(a) Evolución de densidad de átomos de ^{232}Th y ^{233}Th . (b) Evolución de densidad de átomos de ^{233}Th y ^{233}Pa .

Figura 4: Evolución de densidad de átomos de ^{232}Th , ^{233}Th y ^{233}Pa .

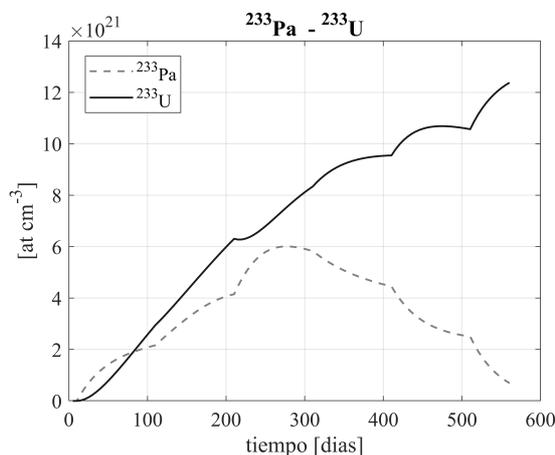


Figura 5: Evolución de densidad de átomos de ^{233}Pa y ^{233}U .

prácticamente constante durante los incrementos de potencia entre estacionarios, ya que es en parte compensada por sus pérdidas por irradiación. Esto cambia notablemente en la etapa de transitorios negativos, ya que cada paso de disminución de potencia reduce su ritmo de pérdidas, mientras que su producción continúa debido al decaimiento del ^{233}Pa , lo cual se hace evidente por los cambios de pendiente de las curvas durante dicha etapa.

5.2. Evolución de especies en función del radio de la pastilla

En este caso se muestran algunos resultados que muestran los cambios en la concentración de especies, en función de la posición radial en la pastilla de $(\text{Th,Pu})\text{O}_2$, con respecto a la evolución del quemado. En particular, la Figura 6 presenta curvas correspondientes al ^{233}U , el isótopo fisible que se forma durante la irradiación, comparando los resultados de DIONISIO con los valores proporcionados por CONDOR. Puede verse que la respuesta del modelo desarrollado está en buen acuerdo con lo esperado, mostrando una evolución coherente en todo el rango de quemado y de composición de plutonio, tanto en la región central de la pastilla (Fig. 6a) como en su periferia (Fig. 6b).

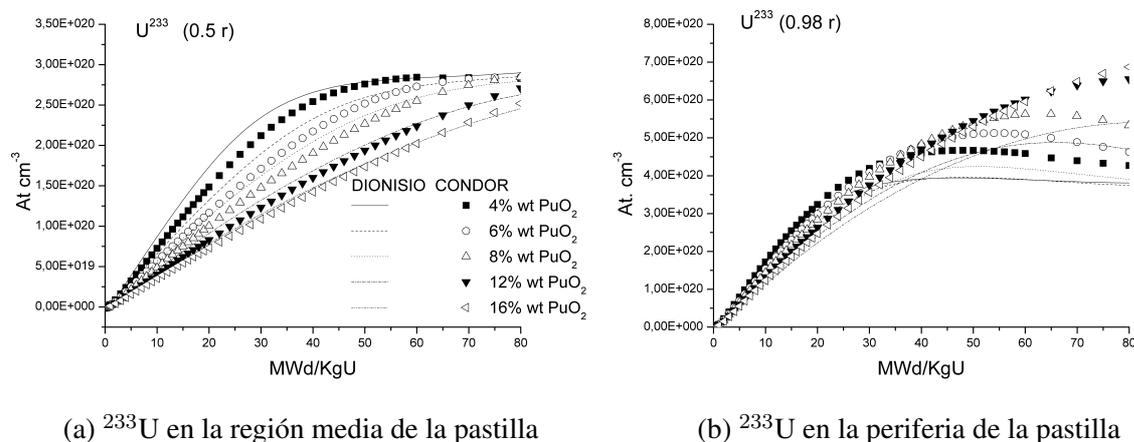


Figura 6: Comparación de concentraciones de ^{233}U en DIONISIO y CONDOR, para contenido de PuO₂ de 4, 6, 8, 12 y 16 wt %.

6. CONCLUSIONES

La aproximación de secciones eficaces, a partir de los resultados del código neutrónico CONDOR, permitió evaluar la población de las principales especies involucradas en el ciclo del torio y su evolución en función del quemado alcanzado.

Una vez que el modelo de especies para el ciclo de torio fue incorporado a DIONISIO, se procedió a realizar simulaciones con historias de potencia de prueba, con una variedad acotada de períodos de irradiación tanto en estado estacionario como en transitorios, con el objetivo de analizar la respuesta del programa. Los resultados obtenidos para la evolución de las nuevas especies incluidas, algunos de los cuales se presentan en este trabajo, son adecuados en relación a lo esperado cualitativamente, teniendo en cuenta las ecuaciones que rigen su comportamiento.

La comparación de los resultados de DIONISIO, relativos a la evolución de las especies involucradas, con los provistos por CONDOR, permite corroborar la obtención de una muy buena aproximación mediante un modelo relativamente simple desde el punto de vista computacional. Esto aporta autonomía al código de combustibles, así como capacidad de simular el comportamiento de materiales alternativos sin necesidad de recurrir continuamente a códigos neutrónicos dedicados.

El estado actual del modelo abre la posibilidad de extender la cadena del torio, además de incorporar nuevas cadenas de decaimiento, de forma relativamente sencilla, que permitan analizar el comportamiento del combustible no sólo durante su irradiación, sino en el período de decaimiento luego de su extracción del reactor.

REFERENCIAS

- Goldberg E., Loza M., y Soba A. Dionisio 3.0: Comprehensive 3d nuclear fuel simulation through pcmi cohesive and plenum models. *J. Nucl. Mater.*, 523:121–134, 2019.
- Henry A. *Nuclear reactor analysis*. MIT Press, 1° edición, 1975.
- IAEA. *IAEA TECDOC 1450*. International Atomic Energy Agency, 2005.
- Lamarsh J. y Baratta A. *Introduction to nuclear engineering*. Prentice Hall, 3° edición, 2001.
- Murray R. *Nuclear Energy: An introduction to the concepts, systems and applications of nuclear processes*. Butterworth-Heinemann, 5° edición, 2000.
- Olander D. *Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements*. Technical Information Cen-

- ter, Office of Public Affairs. Energy Research and development administration, 1° edición, 1976.
- Soba A. y Denis A. A high burnup model developed for the dionisio code. *J. Nucl. Mater.*, 433:160–166, 2013.
- Soba A. y Denis A. Dionisio 2.0: New version of the code for simulating a whole nuclear fuel rod under extended irradiation. *Nucl. Eng. & Design*, 292:213–221, 2015.
- Stacey W. *Nuclear reactor physics*. Wiley, 1° edición, 2001.
- USNRC. *Safety and regulatory issues of the thorium fuel cycle*. United States Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- Villarino E. Condor calculation package. *PHYSOR*, 7, 2002.