

DESARROLLO DE UN MODULO DE ESPECIES INTEGRADO AL CODIGO DIONISIO

DEVELOPMENT OF A SPECIES MODULE INTEGRATED TO THE DIONISIO CODE

Martín E. González^a, Juan Campos^c, Mauricio Cazado^{a,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*

^c*Autoridad Regulatoria Nuclear*

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

Resumen. La irradiación del combustible nuclear genera diferentes cadenas de radionucleidos: actínidos menores, productos de fisión, algunos de ellos volátiles, y también productos de activación por captura neutrónica en el material. Todas estas especies dan lugar a nuevas fases gaseosas y a precipitados sólidos que afectan la matriz combustible o bien incrementan la presión interna de la barra al ser liberados al volumen libre. Asimismo, otras especies contribuyen a la corrosión. En este trabajo se describe la incorporación de un módulo de especies, contenido en el código DIONISIO, que modela la formación y decaimiento de radionucleidos, tanto durante el período de irradiación como en su etapa post-irradiación. En base a esta herramienta es posible determinar la concentración espacial de nucleidos en la pila de combustible de una barra en función del tiempo, pudiendo así estimar la actividad del material y los posibles riesgos implicados en caso de alcanzar una condición de falla. De esta manera, el presente trabajo contribuye a la extensión de la capacidad de cálculo de DIONISIO en todas las etapas de vida del combustible, permitiendo conocer la distribución y actividad de productos de fisión como resultado de una historia de irradiación.

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

Abstract. The irradiation of nuclear fuel produce different radionuclides formed through their decay chains: minor actinides, fission products, some of which are volatile, and also activation products by neutron capture in the material. These species give way to new gaseous phases and solid precipitates which can affect the fuel matrix or increase rod internal pressure when released to its free volume. Some of the species formed contribute to corrosion as well. This work aims to describe the implementation of a species related module into the DIONISIO code, which models the formation and decay of relevant radionuclides during both irradiation and post-irradiation stages of the fuel. Based on this tool it is possible to estimate the concentration of nuclides in the fuel pellet as a function of time, and hence their activity.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la operación de un reactor nuclear, la composición del combustible cambia continuamente en función del tiempo. Las especies presentes son transmutadas inicialmente por captura neutrónica, que puede dar lugar a la fisión en el caso de los núcleos físis, o en una cadena de decaimiento radiactivo a partir del nucleido formado por captura. Lógicamente, estas cadenas de decaimiento también tienen lugar a partir de los productos de fisión formados en el combustible [Lamarsh y Baratta \(2001\)](#).

En un reactor que utiliza UO_2 como combustible, la cantidad de ^{235}U (isótopo físil) disminuye por fisión. Al mismo tiempo, la captura de un neutrón por parte del ^{238}U (isótopo fértil) produce ^{239}Pu (también físil), el que a su vez es transmutado por captura de un neutrón a ^{240}Pu , ^{241}Pu y a otros actínidos mayores, algunos de los cuales también aportan una fracción de la energía liberada en el sistema por su propia fisión.

Ahora bien, al escindir el núcleo de una especie físil (p.ej.: ^{235}U o ^{239}Pu) se forman dos "productos de fisión", de masa intermedia y con un excedente de neutrones. Esto origina su decaimiento por emisión de una partícula beta o de un neutrón (asociado frecuentemente a la emisión de un fotón gamma). Asimismo, hay cierta probabilidad de que se forme una especie de mayor masa por captura de un neutrón adicional, lo cual dará lugar a una cadena de decaimiento alternativa [Stacey \(2001\)](#); [Henry \(1975\)](#).

Los desafíos que plantea cada una de las especies que se originan en el combustible son diferentes y la posibilidad de desarrollar una herramienta que estime la cantidad de cada una de ellas adquiere suma importancia.

2. SIMULACIÓN DE ESPECIES EN DIONISIO

El código DIONISIO es desarrollado en la Sección Códigos y Modelos, perteneciente a la Gerencia del Ciclo del Combustible Nuclear y con lugar de trabajo en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

La Sección Códigos y Modelos (SCM) desarrolla modelos numéricos destinados a la simulación del comportamiento térmico y mecánico de elementos combustibles para reactores de potencia y experimentales, unificados en el código DIONISIO, desarrollado íntegramente en la SCM [Soba y Denis \(2015, 2013\)](#); [M. Lemes \(2017\)](#); [Goldberg et al. \(2019\)](#).

Al tener una participación activa en programas internacionales de investigación, impulsados por el Organismo Internacional de Energía Atómica, la SCM tiene acceso a datos experimentales y posibilidades de intercomparación de códigos, lo cual permite la validación de la respuesta de DIONISIO ante diversas condiciones de simulación, estando así en constante evolución. Asimismo, la interacción con otros sectores de la CNEA permite simular escenarios propuestos por aquellos, a fin de estimar parámetros de comportamiento en sus diseños o geometrías de combustible bajo estudio.

Recientemente, se ha incorporado al código un conjunto de subrutinas que analizan el comportamiento de una barra combustible fuera del reactor, en condiciones de almacenamiento. La propuesta incluye contemplar la evolución bajo irradiación de todos los parámetros termomecánicos y termoquímicos que sufren los materiales de una barra combustible, como ser la cantidad de hidrógeno y oxígeno acumulado, la fragilización o el endurecimiento del material y analizar la historia posterior de esa barra en una historia de almacenamiento determinada por el usuario.

De esta manera se han desarrollado un conjunto de subrutinas para continuar la simulación de la vida de un combustible nuclear irradiado al pasar a condición de almacenamiento tanto en pileta como en seco. Deben considerarse los diferentes rangos temporales de cada etapa no

solo para programar los procesos, sino para generar las respectivas interfaces con los usuarios del código. El almacenamiento en piletas posee un rango temporal de entre 2 y 20 años. La etapa final en seco posee rangos desde 50 a 100 años por diseño [NEA/NSC/WPNCS/DOC \(2011\)](#); [Hiromi Tanabe y Takahashi \(2014\)](#); [Zoltán Hózer \(2009\)](#).

La formación y evolución de especies por irradiación, fenómeno en el cual se enfoca este trabajo, es de particular importancia para los resultados del código DIONISIO, ya que permite conocer la distribución de los nucleidos de interés en la geometría del combustible. Además de los isótopos principales de las cadenas de decaimiento del uranio y del torio, es de interés conocer con mejor aproximación la formación de productos de fisión. Así, los gases de fisión contribuyen a la presión interna en la vaina y a la formación de burbujas intra e intergranulares, mientras que los que precipitan como sólidos alteran la estructura de la matriz del material combustible, modificando parámetros como la conductividad térmica y las tensiones en el material. Por otra parte, es de interés conocer la evolución de la composición del combustible una vez finalizado el período de irradiación, para estimar la radiotoxicidad del mismo con el paso del tiempo [NEA/NSC/WPNCS/DOC \(2011\)](#); [Spykman \(2018\)](#).

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera. El presente capítulo es una introducción teórica al tema. El capítulo 2 contiene una breve descripción de los modelos implementados y la forma general de las ecuaciones de evolución de especies implementadas. El capítulo 3 contiene los principales resultados obtenidos. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE ESPECIES

En general, durante la operación de un reactor nuclear ocurren cambios en la composición del combustible. Los nucleidos presentes son transmutados por captura neutrónica, dando lugar a isótopos que pueden decaer o reaccionar con otros neutrones, generando así las cadenas de decaimiento correspondientes [Stacey \(2001\)](#); [Henry \(1975\)](#). Para reactores típicos que funcionan con el ciclo del uranio, el proceso da lugar a actínidos, mientras que para reactores basados en torio se producen algunos isótopos del uranio, en particular el ya mencionado ^{233}U físil, que es el objetivo principal de la utilización de torio en primer lugar.

En el proceso de fisión se forman dos productos de masas intermedias, que tienen la característica de ser ricos en neutrones. Este exceso de neutrones con respecto a la línea de estabilidad los hace inestables, por lo que tienden a emitir partículas β o neutrones, seguidos de la emisión de radiación γ , proceso que permite alcanzar un nuevo nucleído. Este último puede reaccionar capturando un neutrón, iniciando una nueva cadena de decaimientos. En la [Figura 1](#) se muestra un esquema con las principales reacciones entre isótopos y neutrones que se consideran en el análisis de reactores nucleares. Las flechas son usadas para indicar el sentido de la reacción, dirigidas desde el nucleído blanco hacia el nucleído producto. Las partículas involucradas en la reacción son listadas como pares (*proyectil*, *eyectil*) y rotuladas usando una nomenclatura con letras. En todos los casos se consideran reacciones iniciadas por un neutrón (n) como proyectil, mientras que los eyectiles pueden ser partículas α , dos o tres neutrones sucesivos ($2n$, $3n$) o un protón (p). En el caso de reacciones de captura radiativa o fisión, el eyectil será un fotón γ o bien un par de productos de fisión (f), respectivamente. Los nucleidos considerados están representados por su número másico A y su número atómico Z .

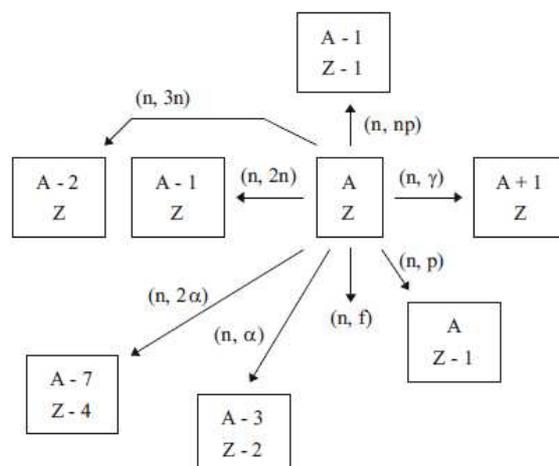


Figura 1: Reacciones de captura neutrónica consideradas en el análisis de reactores nucleares [Stacey \(2001\)](#).

En un combustible basado en el ciclo del uranio, que consiste en una combinación de ^{238}U y ^{235}U , la captura de neutrones en el primero de ellos da lugar al ^{239}Pu fisible, el cual puede fisiónar por neutrones térmicos o, con menor probabilidad, capturar un neutrón y dar lugar a ^{241}Pu mediante captura de dos neutrones sucesivos. Por otra parte, un combustible con el ciclo del torio comienza con el ^{232}Th fértil, el cual por captura de un neutrón térmico y sucesivos decaimientos β da lugar a ^{233}U fisible.

En general, las cadenas de decaimiento tienen un nucleido inicial, que por su rendimiento de fisión relativamente alto se forma directamente por dicha vía, en una proporción mayoritaria con respecto al resto de los constituyentes de la cadena en cuestión. Luego, por su propio decaimiento, dará lugar a la formación de sus sucesores. De todas formas, debe tenerse en cuenta que una fracción de estos sucesores también se forma directamente por fisión, aunque la contribución por decaimiento resulta dominante.

3.1. 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 [Stacey \(2001\)](#).

La ecuación general que satisface el proceso de producción-pérdida de cualquier producto de fisión i es:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \phi \left[\sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k + \sum_{m=1}^M \sigma_{fm} y_{mi} X_m \right] - (\lambda_i + \phi \sigma_i) X_i \quad (1)$$

donde X_i es la densidad atómica del nucleido i , N el número de nucleidos considerados, l_{ij} la fracción del tipo de desintegración radiactiva del nucleido j que da lugar al isótopo i , λ_i la constante de decaimiento del isótopo i , ϕ el flujo neutrónico, f_{ik} la fracción de absorción neutrónica en el nucleido k que lleva a la formación del isótopo i , σ_k la sección eficaz promedio de absorción del nucleido k . Con respecto a la contribución por fisión, M es la cantidad de nucleidos fisibles considerados en el modelo, σ_{fm} es la sección eficaz de fisión del nucleido fisible

m , y_{mi} es el yield o fracción de nucleido i -ésimo formada por fisión del nucleido m y X_m es la densidad atómica de nucleido físil m en el paso de tiempo considerado.

Las ecuaciones implementadas en el módulo de especies del código DIONISIO tienen la forma de la [Ecuación 1](#) y se resuelven por el método de Runge-Kutta de orden 4, lo que da una precisión satisfactoria para los fines del código en esta etapa del desarrollo del módulo de especies.

3.2. Selección de especies

Si bien dentro del combustible irradiado se forman cientos de productos de fisión, la mayoría tienen vidas medias muy cortas y desaparecen a los días o semanas de su formación. Sin embargo, la formación de algunas especies en la matriz del combustible es especialmente relevante, por lo que las especies a modelar se basaron en los intereses específicos que, dentro de distintas disciplinas, puedan poseer.

Las emisiones de material radiactivo al ambiente asociadas a un accidente severo podrían contener hasta un 10 % de productos de fisión volátiles, estando el ^{131}I y el ^{137}Cs entre los más importantes [IAEA \(2013\)](#). El primero, por la posibilidad de concentrarse en la glándula tiroides, generando riesgos a la salud por contaminación interna. El segundo, por la posibilidad de depositarse en el terreno durante largos períodos de tiempo ($t_{1/2} = 30$ años), generando riesgos a la salud en escenarios de resuspensión e inhalación y de irradiación externa.

Por otro lado, son de interés los venenos neutrónicos, con su potencial impacto negativo sobre la reactividad de un reactor. Se destaca en este subgrupo el ^{135}Xe que, con período de semidesintegración corto y alta sección eficaz de absorción de neutrones térmicos, es capaz de provocar el fenómeno denominado *envenenamiento por Xenón* [Henry \(1975\)](#); [Stacey \(2001\)](#).

Otra especie relevante es el ^{90}Sr , que puede ser confundido por Ca por los receptores celulares y ser incluido en el metabolismo óseo, lo que terminaría provocando su acumulación en ese tejido. Teniendo en cuenta que su período de semidesintegración es de 28 años, implica un riesgo prolongado sobre la salud por contaminación interna [Olander \(1976\)](#).

Por último, se modeló el comportamiento temporal del ^{99}Mo , debido a su utilización en radiofarmacia como fuente en los generadores de ^{99m}Tc . Este último es el radioisótopo más utilizado en medicina nuclear. Sin embargo, su corto tiempo de semidesintegración ($t_{1/2} = 6$ horas) hace que su almacenamiento y transporte sea imposible. De ahí la razón por la que se comercializa el ^{99}Mo en vez del ^{99m}Tc .

3.3. Descripción del código ORIGEN

ORIGEN [Croff \(1983\)](#) es un código desarrollado por Oak Ridge National Laboratory (ORNL) para el cálculo de formación, decaimiento y procesamiento de materiales radiactivos. Se utiliza en la simulación de ciclos de combustible y el cálculo de su composición isotópica, así como de algunas características de los elementos formados, como densidad de potencia de decaimiento, riesgo de exposición por inhalación o ingestión, etc.

ORIGEN incluye bibliotecas de secciones eficaces, yields de fisión y configuraciones de reactores cuyos ciclos pueden ser simulados, en particular reactores térmicos, en los cuales se centra este trabajo.

Actualmente hay una gran variedad de códigos disponibles para calcular la composición isotópica del combustible nuclear bajo irradiación. Algunos son muy complejos y altamente desarrollados, usando esquemas multigrupo para representar el espectro energético. Sin embargo, estos códigos suelen estar centrados en la etapa de irradiación del material en el reactor,

considerando un conjunto acotado de especies.

Por otra parte, hay una clase de problemas para los cuales estos códigos no son adecuados, o bien su aplicación dista de ser óptima. Estos problemas están relacionados con la etapa post-irradiación del combustible.

El presente trabajo pretende ubicarse en un punto intermedio entre estas clases de códigos, contribuyendo a un módulo auxiliar del código DIONISIO que sea capaz de estimar la evolución de la composición del combustible, centrado en especies de interés según el criterio de selección ya descrito. A su vez, se utiliza un método de resolución simple que no extienda en exceso el tiempo de cómputo.

4. RESULTADOS

4.1. Historias de flujo simuladas

Para realizar las ejecuciones del módulo de especies, se consideraron dos historias de flujo neutrónico. Una de ellas consistió en una etapa de irradiación de 365 días a un flujo constante de $1.0 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, seguida de 365 días sin irradiación.

Por otra parte, se consideró una historia de flujo con una etapa de irradiación de 365 días con flujo variable, seguida de un período de decaimiento de 50 años. Esta última etapa se consideró a fin de poder observar la evolución de los nucleídos de vida media larga, en particular productos de fisión y actínidos, y se expone en la [Figura 2](#).

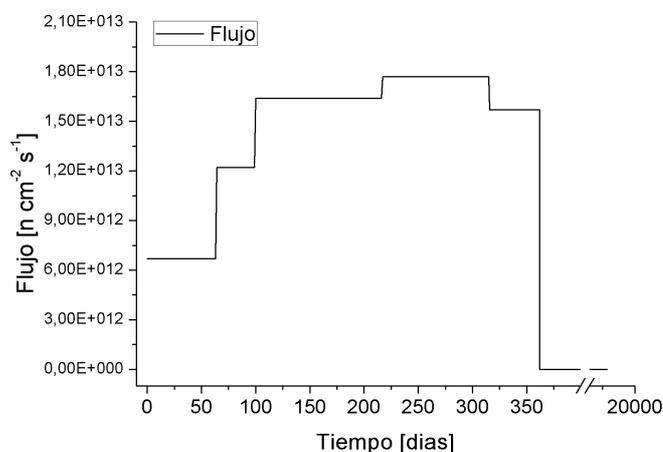


Figura 2: Perfil de flujo variable

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la ejecución de las historias de flujo antes mencionadas. Se compara la evolución de la actividad de los nucleídos considerados, simulados con el módulo de especies desarrollado para el código DIONISIO, con los resultados del código ORIGEN, un programa de referencia en lo que respecta al cálculo de especies por irradiación y decaimiento.

4.2. ^{135}Xe

En la [Figura 3a](#) se presenta la evolución de la actividad de ^{135}Xe durante una historia de irradiación de 365 días, seguida de una etapa de decaimiento de igual duración. El material irradiado es una pastilla con 8 g. de UO_2 enriquecido al 0.85 %, expuesta a un flujo neutrónico

de $1.0 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Se muestra todo el ciclo simulado, donde se nota la producción de ^{135}Xe durante la irradiación y su consecuente disminución por captura neutrónica. Una vez finalizada la etapa de irradiación, se aprecia claramente un pico de actividad de ^{135}Xe , ya que el mismo continúa formándose por decaimiento de sus progenitores en la cadena (^{135}Te , ^{135}I y ^{135m}Xe), pero no sufre pérdidas por captura neutrónica, ante la ausencia de flujo. Así, finalizada la irradiación, la actividad de este isótopo depende únicamente de su tasa de decaimiento β . Por otro lado, la Figura 3b detalla la variación de actividad durante el apagado del reactor.

Como puede verse, los resultados obtenidos con el módulo de especies, en línea sólida, están en excelente acuerdo con los arrojados por el código ORIGEN (puntos), para la misma historia de irradiación. La historia de entrada para este último fue acondicionada, ajustando el paso de tiempo de la simulación, de manera que se aprecie la variación de actividad durante el transitorio entre la etapa de irradiación y la de decaimiento.

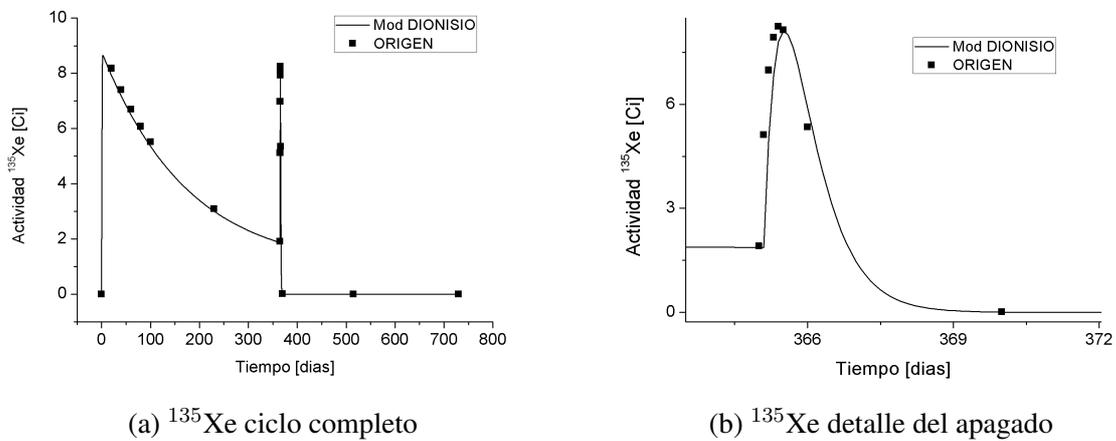


Figura 3: Evolución de actividad de ^{135}Xe durante una irradiación constante de 365 días seguida de 1 año de decaimiento

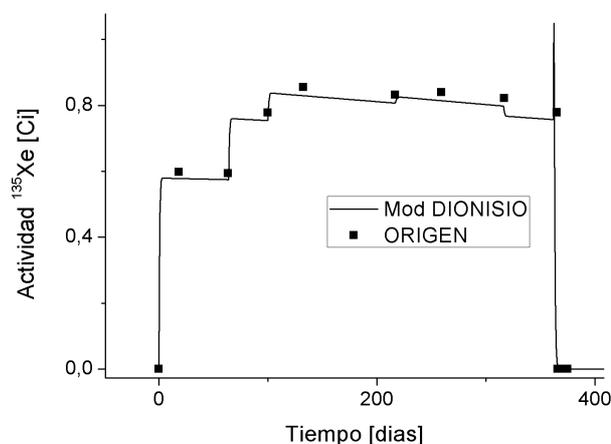


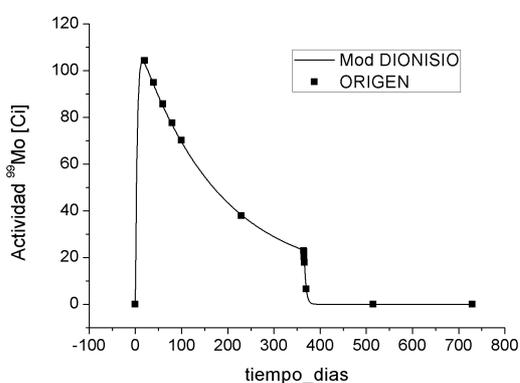
Figura 4: Evolución de actividad del ^{135}Xe durante una irradiación variable de 365 días seguida de 1 año de decaimiento - Detalle de la etapa de irradiación

La Figura 4 representa la evolución del ^{135}Xe ante una historia de irradiación variable, con un pico de actividad en el transitorio final entre la etapa de irradiación y la de decaimiento. El comportamiento es análogo al caso anterior, mostrando esta vez las variaciones de actividad en respuesta a los cambios en el flujo neutrónico de la historia simulada. El acuerdo con los resultados de ORIGEN también es muy bueno, teniendo en cuenta que tanto la cadena de decaimiento implementada como el método de resolución de las ecuaciones de Bateman, son una simplificación con respecto a los códigos comerciales dedicados al cálculo de especies.

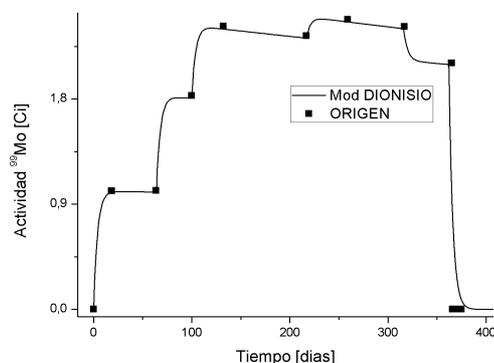
4.3. ^{99}Mo

El ^{99}Mo posee la posibilidad de formación directa, como producto de fisión, que es el caso en los reactores nucleares, o bien por captura neutrónica en el ^{98}Mo .

En la Figura 5a se grafica la evolución de actividad de ^{99}Mo ante una irradiación de 1 año, con flujo constante, seguida de 1 año de decaimiento.



(a) ^{99}Mo irradiación flujo constante



(b) ^{99}Mo irradiación flujo variable

Figura 5: Evolución de actividad de ^{99}Mo durante durante ambos esquemas de irradiación

Por otra parte, la Figura 5b muestra los resultados obtenidos para el ^{99}Mo , ejecutando la historia de flujo variable durante la etapa de irradiación. En ambos casos queda claro el buen acuerdo con los resultados de ORIGEN, tanto bajo irradiación como durante la etapa de decaimiento.

4.4. ^{137}Cs

Los resultados obtenidos para el ^{137}Cs , uno de los productos de fisión más importantes debido a su radiotoxicidad a largo plazo, se exponen a continuación.

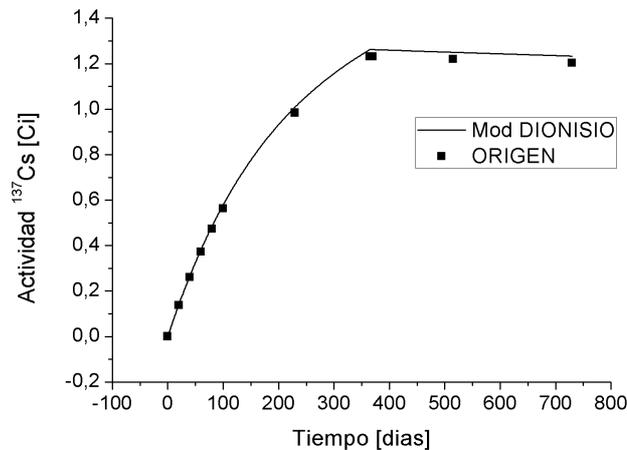


Figura 6: Evolución del ^{137}Cs bajo irradiación a flujo constante de 365 días seguida de 50 años de decaimiento

En el caso de la historia de irradiación con flujo constante, seguida de decaimiento, los resultados son acordes a lo esperado en función de los cálculos de ORIGEN, mostrando la Figura 6 un excelente acuerdo con este último. Se aprecia la formación de ^{137}Cs durante la irradiación, seguido de un decaimiento lento debido a su larga vida media.

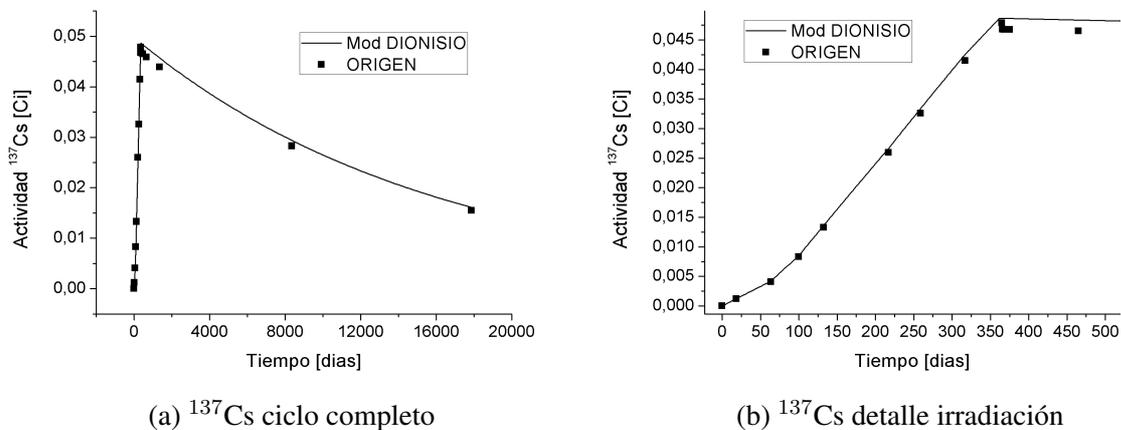


Figura 7: Evolución del ^{137}Cs bajo irradiación a flujo variable de 365 días, seguida de 50 años de decaimiento

En la Figura 7a se muestran los resultados para la historia de flujo variable, y se detalla la etapa de irradiación en la Figura 7b. En ambas se observa una muy buena aproximación a los resultados de ORIGEN, mostrando que aún existe actividad de ^{137}Cs transcurridos 50 años del fin de la irradiación.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una contribución al módulo en desarrollo de nacimiento y evolución de productos de fisión a ser incorporado como parte del código combustible DIONISIO. Se

han seleccionado algunas cadenas de interés nuclear para ser programadas y validadas contra el código de especies ORIGEN.

Las cadenas simuladas presentan resultados excelentes en dicha comparación, mostrando la eficacia del módulo en desarrollo y la correcta elección de las secciones eficaces y constantes de decaimientos seleccionadas para ser incorporadas en el código.

Cabe destacar que este módulo aportará autonomía al código de combustibles DIONISIO, así como capacidad de simular el comportamiento de materiales alternativos sin necesidad de recurrir continuamente a códigos neutrónicos dedicados de forma relativamente sencilla.

Por último, los modelos desarrollados predicen también el comportamiento del combustible en el período de decaimiento luego de su extracción del reactor, acoplándose adecuadamente al módulo de almacenamiento de reciente incorporación al código DIONISIO.

REFERENCIAS

- Croff A. Origen2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials. *Nuclear Technology*, 62, 1983.
- 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.
- Hiromi Tanabe Tomofumi Sakuragi H.M. y Takahashi R. Long-term corrosion of zircaloy hull waste under geological disposal conditions: Corrosion correlations, factors influencing corrosion, corrosion test data, and preliminary evaluation. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc*, 1665, 2014.
- IAEA. *ctions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor*. IAEA, 1° edición, 2013.
- Lamarsh J. y Baratta A. *Introduction to nuclear engineering*. Prentice Hall, 3° edición, 2001.
- M. Lemes A. Soba A.D. Inclusion of models to describe severe accident conditions in the fuel simulation code dionisio. *Nuclear Engineering and Design*, 315, 2017.
- NEA/NSC/WPNC/DOC N.S. *Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation*,. NEA, 1° edición, 2011.
- Olander D. *Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements*. Technical Information Center, 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.
- Spykman G. Dry storage of spent nuclear fuel and high active waste in germany. current situation and technical aspects on inventories integrity for a prolonged storage time. *Nuclear Engineering and Technology*, 50, 2018.
- Stacey W. *Nuclear reactor physics*. Wiley, 1° edición, 2001.
- Zoltán Hózer Emese Szabó T.P.I.B.V.T.B.G.F.N.V. Activity release from damaged fuel during the paks-2 cleaning tank incident in the spent fuel storage pool. *Journal of Nuclear Materials*, 392, 2009.