

Cálculos de la Transmutación de Actínidos con HELIOS para Combustibles de Reactores de Agua Ligera

Juan Luis François Lacouture y Juan Rafael Guzmán Arriaga
Universidad Nacional Autónoma de México – Facultad de Ingeniería
Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos
jlfl@fi-b.unam.mx; maestro_juan_rafael@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se efectúa una comparación de los resultados obtenidos con el código HELIOS y los obtenidos por otros códigos similares, utilizados en la comunidad internacional, respecto a la transmutación de actínidos menores. Para esto se analiza el benchmark internacional: “Calculations of Different Transmutation Concepts”, de la Agencia de Energía Nuclear. En este benchmark se analizan dos tipos de celda: una pequeña correspondiendo a un PWR estándar, y otra grande correspondiendo a un PWR altamente moderado. Se consideran dos tipos de quemados de descarga: 33 GWd/tHM y 50 GWd/tHM. Se abordan los siguientes tipos de resultados: la k_{eff} como una función del quemado, las densidades atómicas de los principales isótopos de los actínidos, la radioactividades en el momento en que se apaga el reactor y en los tiempos de enfriamiento desde 7 hasta 50000 años, la reactividad por vacíos y la reactividad Doppler. Los resultados son comparados con los obtenidos por las siguientes instituciones: FZK (Alemania), JAERI (Japón), ITEP (Rusia) e IPPE (Federación Rusa). En el caso del eigenvalor, los resultados obtenidos con HELIOS mostraron una discrepancia alrededor del 3% $\Delta k/k$, la cual se encontró también entre otros participantes. Para las concentraciones isotópicas: ^{241}Pu , ^{242}Pu , y $^{242\text{m}}\text{Am}$, los resultados de todas las instituciones presentan una discrepancia cada vez mayor, conforme aumenta el quemado. En lo referente a las actividades, la discrepancia de resultados es aceptable, excepto en el caso del ^{241}Pu . En el caso de los coeficientes Doppler la discrepancia de resultados es aceptable, excepto para las celdas con moderación alta; en el caso de los coeficientes de vacíos, la discrepancia de resultados aumenta conforme aumenta la fracción de vacíos, siendo bastante alta a 95% de vacíos. En general, los resultados son consistentes y en buen acuerdo con los obtenidos por todos los participantes en el benchmark. Los resultados están dentro de los límites establecidos por el grupo de trabajo sobre Combustibles de Plutonio y Ciclos de Combustibles Innovativos de la Agencia de Energía Nuclear.

1. INTRODUCCIÓN

La transmutación de actínidos menores (MA, *Minor Actinides*) jugará un papel muy importante en la reducción de los inventarios de desechos radiactivos. Sin embargo, los cálculos de transmutación de actínidos menores no están bien establecidos, debido a que los datos nucleares

para los actínidos menores no son muy exactos y las cadenas de decaimiento no están completamente modeladas en los códigos. Por lo tanto, es conveniente evaluar los cálculos de transmutación de los MA con el código que se emplea.

En este trabajo se realiza una comparación entre los resultados obtenidos con el código HELIOS-1.5 [1] y los resultados reportados por los participantes del benchmark de la NEA: "Calculations of Different Transmutation Concepts" [2], referente al quemado de una celda. El benchmark se basa en una celda moderada con agua ligera y cuyo combustible es: U, Pu y los actínidos menores (Np, Am, Cm). Los resultados obtenidos con HELIOS (UNAM, México) de los eigenvalores, las concentraciones isotópicas, los coeficientes de reactividad de vacíos y Doppler dependientes del quemado, y las radioactividades como una función del tiempo se comparan con los siguientes códigos: KAPROS/KARBUS (FZK, Alemania), SRAC95 (JAERI, Japón), TRIFON (ITEP, Federación Rusa), WIMS (IPPE, Federación Rusa). Todos estos códigos resuelven la ecuación de transporte de neutrones utilizando el método de probabilidades de colisión. Para la celda de combustible se consideran ocho regiones azimutales en la zona del moderador y dos regiones radiales en la zona del combustible, lo cual es la nodalización estándar para el cálculo de combustibles de reactores de agua ligera con HELIOS. Se consideran dos tipos de quemado de descarga: 33 GWd/tHM y 50 GWd/tHM (HM=Metal Pesado, de sus siglas en inglés). Se abordan los siguientes tipos de resultados:

- El factor de multiplicación de neutrones (k_{∞}) como una función del quemado.
- Las densidades atómicas de los isótopos Np237, Pu241, Pu242 y Am242m.
- La radioactividades en el momento en que se apaga el reactor y en los tiempos de enfriamiento: 7, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000 años.
- Las reactividades por vacíos para las fracciones de vacíos: 40%, 70% y 95%.
- Las reactividades Doppler para el rango de temperaturas desde 660° a 960°C.

2. MODELO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Las características de la celda de combustible utilizada en este benchmark se muestran en las Tablas I y II. La geometría de la celda se especifica en la Figura 1. El paso (*pitch*) y el radio de la celda corresponden a dos tipos de celda: una pequeña (*lattice* normal) correspondiendo a un PWR estándar, y otra grande (*lattice* aumentada) correspondiendo a un PWR altamente moderado. Las razones volumétricas del moderador respecto al combustible, V_m/V_f , son 1.92 y 3.0 para la celda normal y la ampliada respectivamente. La influencia del ácido bórico y de los materiales estructurales no son tomadas en cuenta.

Tabla I. Especificación de la celda benchmark para el PWR

| Parámetro | Valor |
|--|---|
| Razón moderador a combustible <i>Estándar</i> <i>Aumentada</i> | 1.929 3.0 |
| Radio del combustible (cm) Radio del encamisado (cm) | 0.4095 0.475 |
| Pitch del lattice (cm) <i>Estándar</i> <i>Aumentada</i> | 1.333 1.513 |
| Radio del moderador (cm) <i>Estándar</i> <i>Aumentada</i> | 0.741 0.8536 |
| Potencia específica (MW/tHM) Potencia lineal (W/cm) | 38.30 183.02 |
| Densidad del UO ₂ teórica (g/cm ³) Densidad del PuO teórica (g/cm ³) Densidad del oxido de combustible (g/cm ³) Densidad del Zirconio (g/cm ³) Densidad del agua (g/cm ³) | 10.96 11.46 10.29 6.55 0.7136 |
| Temperatura del combustible (°C) Temperatura del moderador (°C) | 660.0 363.3 |

Tabla II. Densidades atómicas de la celda UO₂ en BOL

| Zona | Isótopo | Concentración (núcleos/cm ³) | |
|-------------|------------------|--|------------------------|
| | | 3.25% ²³⁵ U | 4.65% ²³⁵ U |
| Combustible | O | 4.5934E+22 | 4.5941E+22 |
| | ²³⁵ U | 7.5564E+20 | 1.0811E+21 |
| | ²³⁸ U | 2.2211E+22 | 2.1889E+22 |
| Encamisado | Zr | 4.3365E+22 | 4.3365E+22 |
| Moderador | H | 4.7769E+22 | 4.7769E+22 |
| | O | 2.3885E+22 | 2.3885E+22 |

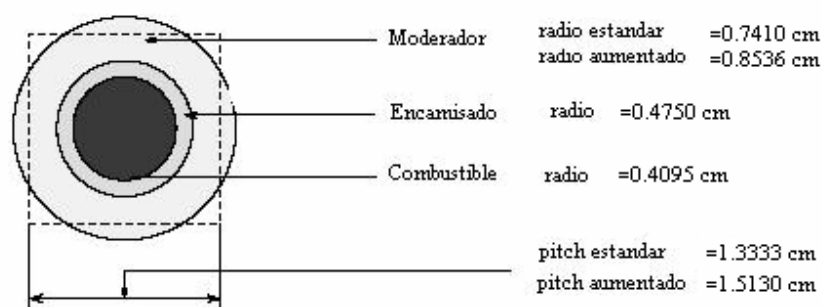


Figura 1. Geometría de la celda benchmark

Dos valores de quemado de descarga son establecidos para los combustibles UO₂ y MOX: 33 GWd/tHM y 50GWd/tHM. Para la especificación del benchmark se consideran cuatro tipos de combustibles:

- MOX11, combustible formado por plutonio y MA, los cuales resultan del reprocesamiento del combustible UO₂ enriquecido al 3.25% y quemado a 33 GWd/tHM.
- MOX21, combustible formado por plutonio y MA, los cuales resultan del reprocesamiento del combustible UO₂ enriquecido al 4.65% y quemado a 50 GWd/tHM.
- MOX12, combustible formado por plutonio y MA, los cuales resultan del reprocesamiento del combustible MOX11 quemado a 33 GWd/tHM.
- MOX22, combustible formado por plutonio y MA, los cuales resultan del reprocesamiento del combustible MOX21 quemado a 50 GWd/tHM.

En todos los combustibles MOX se consideran 7 años de enfriamiento antes de proceder a reprocesarlos, y 3 años para la fabricación de éstos. Las cantidades de actínidos menores considerados son: 0.0%, 1.0% y 2.5%. Las densidades atómicas de los constituyentes de los ensambles de combustibles MOX se muestran en las Tablas III y IV.

Para los cálculos benchmark, los casos MOX12 y MOX22 se toman en cuenta para la celda normal y el caso MOX22 para la celda aumentada. Los casos MOX12 y MOX22 de la celda normal y MOX22 de la celda aumentada toman en cuenta dos tipos de ensambles: ensambles compuestos con uranio, plutonio y actínidos menores (Np, Am y Cm); y ensambles compuestos con uranio, plutonio y sin actínidos menores, ver Tablas III y IV. Para el caso MOX12 de la celda normal se consideró un quemado de descarga de 33 GWd/tHM, y para los casos MOX22 de la celda normal y MOX22 de la celda aumentada se consideró un quemado de descarga de 50 GWd/tHM.

Para el cálculo de las actividades se realizaron los siguientes pasos:

- 1- Directamente del código Helios se obtienen las densidades atómicas de cada actínido $n_i \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right)$, $i = U235, U238, Np237, \dots$; la densidad del metal pesado inicial $\rho \left(\frac{\text{grHM}}{\text{cm}^3} \right)$; y las constantes de decaimiento de cada actínido $\lambda_i \left(\text{seg}^{-1} \right)$.

2- La actividad de cada actínido $A_i \left(\frac{Bq}{grHM} \right)$ se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$A_i = \frac{\lambda_i N_i}{\rho} \quad (1)$$

Tabla III. Densidades atómicas de la *lattice* PWR normal

| MA(%) | MOX12 (33 GWd/tHM) | | | MOX22 (50 GWd/tHM) | | |
|-------------------|--------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
| | 0.0 | 1.0 | 2.5 | 0.0 | 1.0 | 2.5 |
| ²³⁵ U | 4.6618E-05 | 4.4263E-05 | 4.1190E-05 | 1.4144E-04 | 1.3547E-04 | 1.2639E-04 |
| ²³⁸ U | 2.0673E-02 | 1.9628E-02 | 1.8265E-02 | 1.9752E-02 | 1.8918E-02 | 1.7651E-02 |
| ²³⁷ Np | 0.0000E+00 | 1.0332E-05 | 2.5881E-05 | 0.0000E+00 | 1.0105E-05 | 2.5357E-05 |
| ²³⁸ Pu | 5.6777E-05 | 7.8873E-05 | 1.0646E-04 | 1.2477E-04 | 1.5081E-04 | 1.9044E-04 |
| ²³⁹ Pu | 9.7176E-04 | 1.3499E-03 | 1.8222E-03 | 1.2751E-03 | 1.5412E-03 | 1.9462E-03 |
| ²⁴⁰ Pu | 6.7695E-04 | 9.4041E-04 | 1.2694E-03 | 9.2817E-04 | 1.1219E-03 | 1.4167E-03 |
| ²⁴¹ Pu | 2.3366E-04 | 3.2459E-04 | 4.3814E-04 | 3.1953E-04 | 3.8622E-04 | 4.8771E-04 |
| ²⁴² Pu | 2.0745E-04 | 2.8819E-04 | 3.8900E-04 | 3.4388E-04 | 4.1564E-04 | 5.2487E-04 |
| ²⁴¹ Am | 3.7123E-05 | 1.4349E-04 | 3.5946E-04 | 5.1734E-05 | 1.3366E-04 | 3.3540E-04 |
| ²⁴³ Am | 0.0000E+00 | 5.5790E-05 | 1.3976E-04 | 0.0000E+00 | 5.9941E-05 | 1.5041E-04 |
| ²⁴⁴ Cm | 0.0000E+00 | 1.9974E-05 | 5.0037E-05 | 0.0000E+00 | 2.5952E-05 | 6.5121E-05 |
| O | 4.5807E-02 | 4.5768E-02 | 4.5813E-02 | 4.5873E-02 | 4.5798E-02 | 4.5839E-02 |

Tabla IV. Densidades atómicas de la *lattice* PWR aumentada

| MA(%) | MOX22 (50 GWd/tHM) | | |
|-------------------|--------------------|------------|------------|
| | 0.0 | 1.0 | 2.5 |
| ²³⁵ U | 1.4994E-04 | 1.4400E-04 | 1.3317E-04 |
| ²³⁸ U | 2.0939E-02 | 2.0109E-02 | 1.8596E-02 |
| ²³⁷ Np | 0.0000E+00 | 1.0084E-05 | 2.5286E-05 |
| ²³⁸ Pu | 7.3785E-05 | 9.9693E-05 | 1.4991E-04 |
| ²³⁹ Pu | 7.5405E-04 | 1.0188E-03 | 1.5320E-03 |
| ²⁴⁰ Pu | 5.4889E-04 | 7.4162E-04 | 1.1152E-03 |
| ²⁴¹ Pu | 1.8896E-04 | 2.5531E-04 | 3.8392E-04 |
| ²⁴² Pu | 2.0336E-04 | 2.7476E-04 | 4.1317E-04 |
| ²⁴¹ Am | 3.0594E-05 | 1.3339E-04 | 3.3446E-04 |
| ²⁴³ Am | 0.0000E+00 | 5.9819E-05 | 1.4999E-04 |
| ²⁴⁴ Cm | 0.0000E+00 | 2.5899E-05 | 6.4939E-05 |
| O | 4.5873E-02 | 4.5798E-02 | 4.5839E-02 |

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objeto de facilitar el análisis de la variación de k_{∞} contra el quemado, sólo se mostrarán las figuras de los siguientes ensambles MOX: MOX 22 con razón de moderación normal, 1.0% y 2.5% de MA; MOX 22 con razón de moderación aumentada, 1.0% y 2.5% de MA.

La variación de k_{∞} contra el quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 1.0% de MA, se muestra en la Figura 2. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a la institución rusa ITTE y la UNAM) y el valor menor (correspondiendo a la institución rusa IPPE) de k_{∞} se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 2.5%. Los resultados obtenidos por nosotros concuerdan bastante bien con la institución rusa ITEP; mientras que los resultados obtenidos por la institución alemana FZK y la rusa IPPE tienden a alejarse más de nuestros resultados (con valores más pequeños) conforme aumenta el quemado. Los resultados de la institución japonesa JAERI se encuentran en medio de los demás resultados.

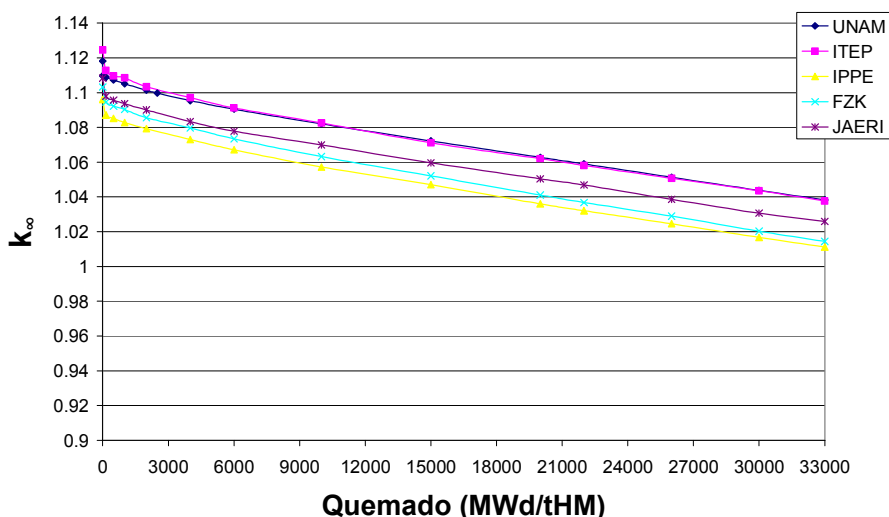


Figura 2. k_{∞} como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM) y 1.0 % de MA

La variación de k_{∞} contra el quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA, se muestra en la Figura 3. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a nuestros resultados) y el valor menor (correspondiendo a la institución rusa IPPE) de k_{∞} se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 3.0%. Los resultados obtenidos por la institución alemana FZK y la rusa IPPE tienden a separarse de la tendencia principal de los demás resultados (con valores más pequeños) conforme aumenta el quemado. Los resultados de las instituciones JAERI e ITEP se encuentran en medio de los demás resultados.

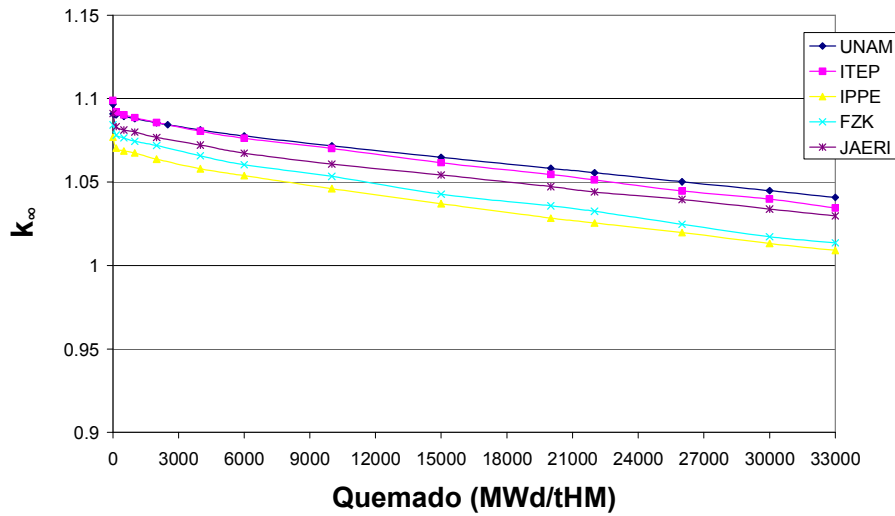


Figura 3. k_{∞} como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5 % de MA

La variación de k_{∞} contra el quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación aumentada y 1.0% de MA, se muestra en la Figura 4. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a la institución ITEP) y el valor menor (correspondiendo a la institución FZK) de k_{∞} se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 1.9%. Todos los resultados excepto los obtenidos por FZK (los cuales tienden a separarse de la tendencia principal con valores más pequeños) concuerdan bastante bien.

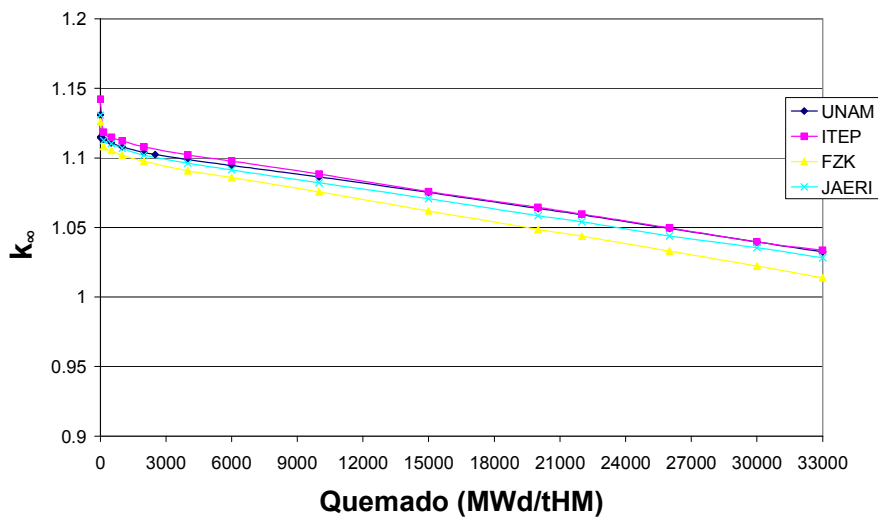


Figura 4. k_{∞} como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM), celda aumentada y 1.0% de MA

La variación de k_{∞} contra el quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación aumentada y 2.5% de MA, se muestra en la Figura 5. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a nuestros resultados) y el valor menor (correspondiendo a la institución FZK) de k_{∞} se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 2.1%. Todos los resultados excepto los obtenidos por FZK (los cuales tienden a separarse de la tendencia principal) concuerdan bastante bien.

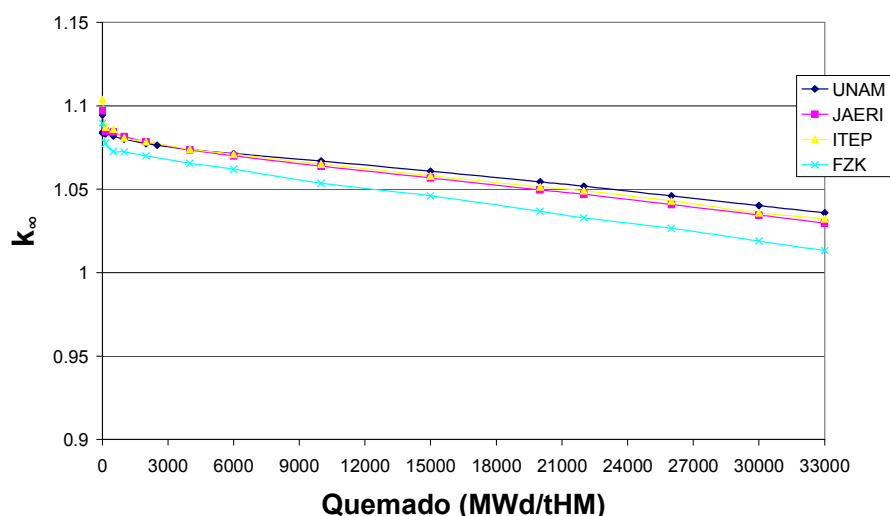


Figura 5. k_{∞} como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM), celda aumentada y 2.5% de MA

Resumiendo, el análisis de la variación de k_{∞} contra el quemado para las celdas presentadas en este trabajo y los demás celdas (las cuales no fueron presentados por cuestión de espacio) se tiene que la discrepancia respecto a todos los casos es a lo más del 3%. Se observa que la diferencia de reactividad se modera conforme aumenta la concentración de MA. Esta tendencia se observa más fuertemente en celda normal que en la aumentada y en los casos MOX12 que en los MOX22.

Con el objeto de facilitar el análisis de la densidad atómica contra el quemado, sólo se mostrarán las figuras de las siguientes densidades atómicas: Np237 y Pu241 para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA.

La densidad atómica del Np237 como una función del quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA, se muestra en la Figura 6. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a la institución FZK) y el valor menor (correspondiendo a nuestros resultados) se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 12%. Todos los resultados, excepto los obtenidos por FZK (los cuales tienden a separarse de la tendencia principal con valores más grandes) concuerdan bastante bien.

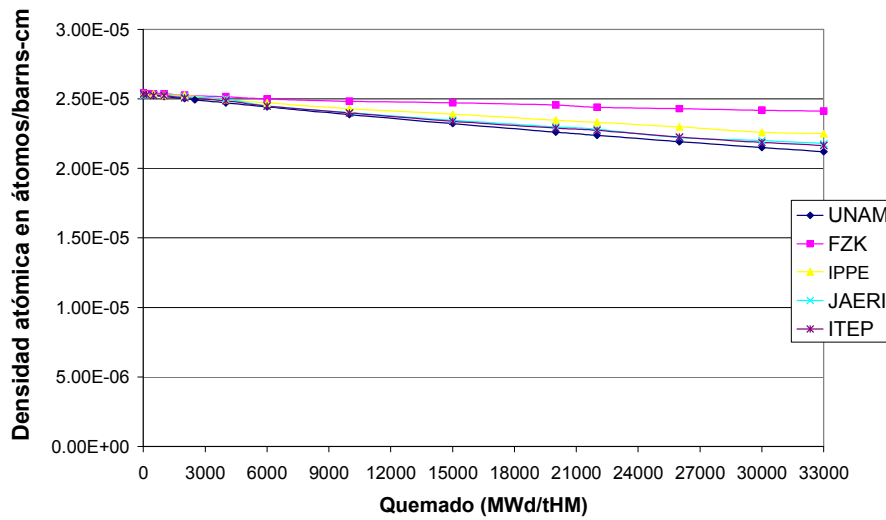


Figura 6. Densidad atómica del Np237 como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5% MA

La densidad atómica del Pu241 como una función del quemado para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA, se muestra en la Figura 7. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a la institución FZK) y el valor menor (correspondiendo a nuestros resultados) de la densidad atómica se presenta al final del ciclo de irradiación con un valor de 4.6%. Se observan discrepancias entre todos los participantes, no únicamente para la densidad del Np237 sino además para la densidad del Pu242 y Am242m.

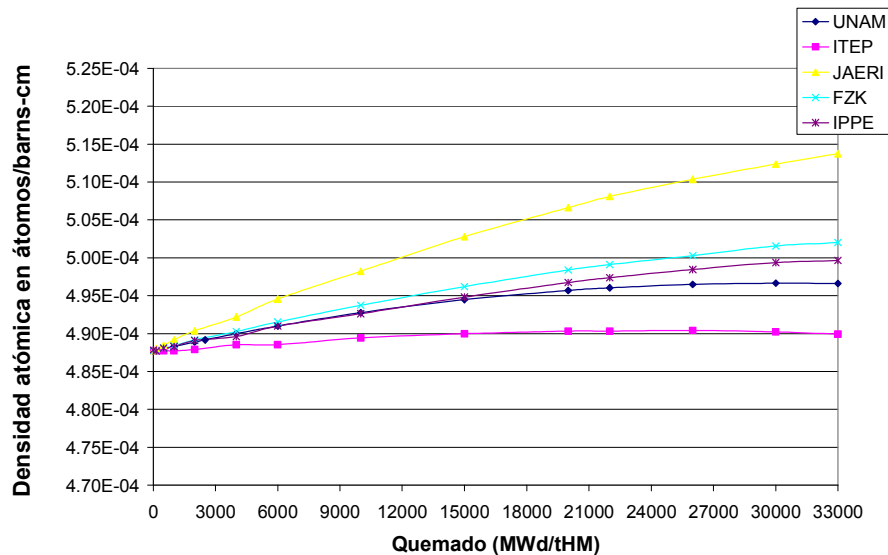


Figura 7. Densidad atómica del Pu241 como función del quemado para el MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5% MA

Con el objeto de facilitar el análisis de las actividades como una función del tiempo de decaimiento, sólo se mostrarán las figuras de las radioactividades de los siguientes elementos: Pu239, Pu241 y Cm243 para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA.

La radioactividad del Pu239 como una función del tiempo de decaimiento se muestra en la Figura 8. Los resultados entre todos los participantes concuerdan bastante bien excepto nuestros resultados, los cuales resultan ser más pequeños alrededor de los 10,000 años. Sin embargo, la discrepancia resulta ser a lo más del 9.1%.

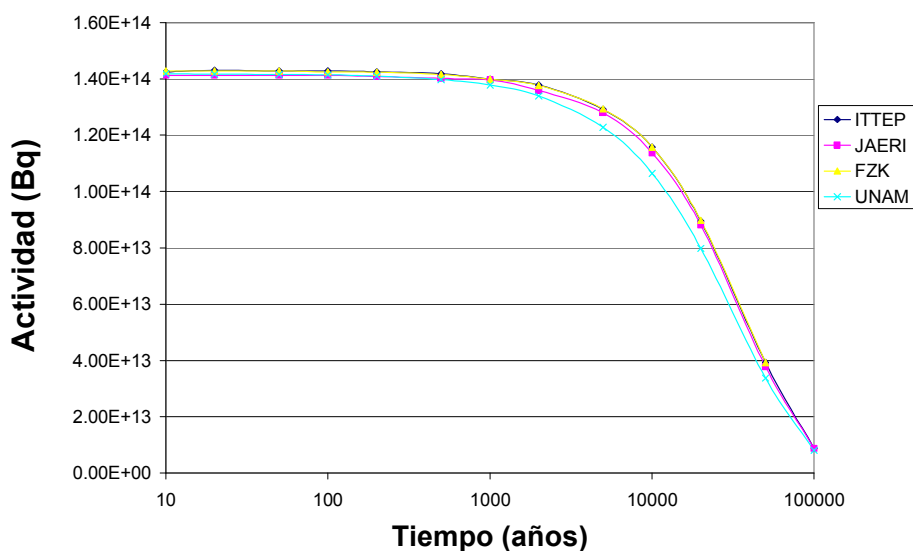


Figura 8. Radioactividad del ²³⁹Pu como una función del tiempo de decaimiento para MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5% de MA

La radioactividad del Pu241 como una función del tiempo de decaimiento se muestra en la Figura 9. Los resultados entre todos los participantes concuerdan bastante bien hasta unos cuantos cientos de años. La actividad predicha por JAERI y por nosotros es casi nula alrededor de 5000 años, en contraste con los demás resultados, debido a que los códigos (SRAC95 y HELIOS) no toman en cuenta el decaimiento alfa del Cm245 en Pu241.

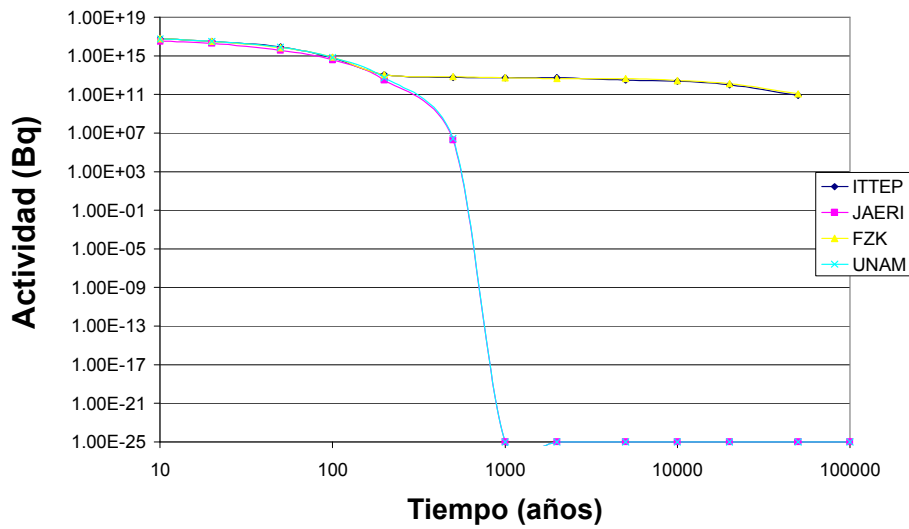


Figura 9. Radioactividad del ^{241}Pu como una función del tiempo de decaimiento para MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5% de MA

La radioactividad del Cm243 como una función del tiempo de decaimiento se muestra en la Figura 10. La discrepancia más grande entre el valor mayor (correspondiendo a la institución FZK) y el valor menor (correspondiendo a la institución ITEP) de la actividad, se presenta al inicio del tiempo de decaimiento (apagado del reactor) con un valor del 50%. Todos los resultados excepto los obtenidos por FZK (los cuales tienden a separarse de la tendencia principal con valores más grandes) concuerdan bastante bien.

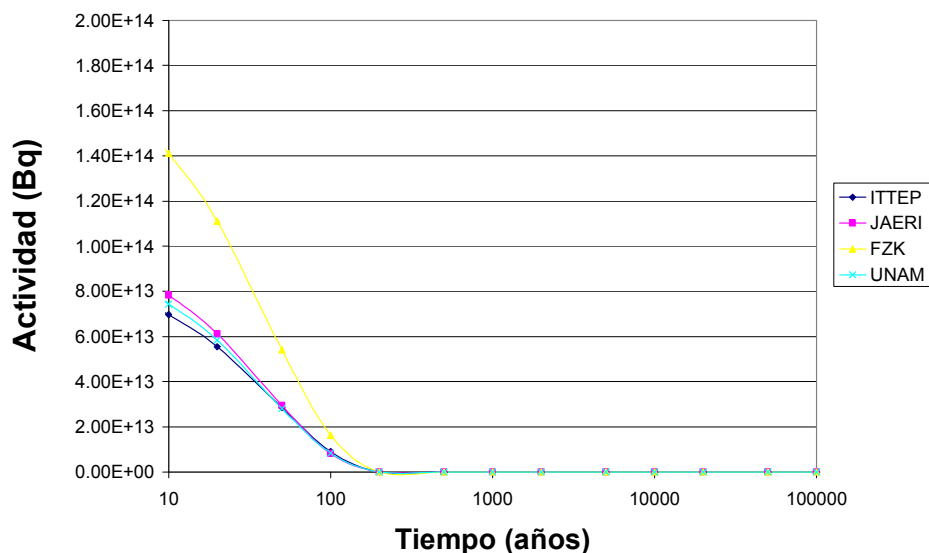


Figura 10. Radioactividad del ^{243}Cm como una función del tiempo de decaimiento (años) para MOX22 (50 GWd/tHM) y 2.5% de MA

Con el objeto de facilitar el análisis de los coeficientes de reactividad Doppler y de vacíos sólo se mostrarán las tablas de los siguientes ensambles MOX representativos: MOX 22 con razón de moderación normal, 1.0% y 2.5% de MA; MOX 22 con razón de moderación aumentada y 1.0% MA.

La reactividad Doppler y de vacíos para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 1.0% de MA se muestra en la Tabla V. En las reactividades por vacíos, las discrepancias entre los resultados aumentan conforme aumenta la fracción de vacíos y el quemado llegando a ser bastante notables a 95 por cientos de vacíos y al final del ciclo de irradiación. Este aumento de la discrepancia se observa también para los demás ensambles. La discrepancia entre el valor mayor (correspondiendo a la institución japonesa JAERI) y el valor menor (correspondiendo a nuestros resultados) de la reactividad de vacíos al final del ciclo de irradiación y fracción de vacíos de 95% tienen un valor de 48.8%; en contraste, con la discrepancia entre el valor mayor (correspondiendo a la institución rusa ITEP y la UNAM) y el valor menor (correspondiendo a la institución rusa IPPE), al inicio de irradiación y fracción de vacíos del 40%, la cual tiene un valor de 18.6%. En las reactividades Doppler, los resultados concuerdan razonablemente bien, con un valor a lo más de 7.6% al inicio del ciclo de irradiación y un valor a lo más de 8.3% al final del ciclo de irradiación.

Tabla V. Coeficientes de reactividad Doppler y vacíos para el ensamble MOX22 con razón de moderación normal, 50 GWd/tHM, 8.45% Pu-f, y 1.0% MA

| a) Quemado = 0 GWd/tHM (BOL) | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------|---------|----------|---------|
| | Tohoku Univ. | ITEP | JAERI | UNAM | FZK |
| Fracción de vacíos | k0 | | | | |
| 0 | 1.10426 | 1.1257 | 1.10968 | 1.1097 | 1.10371 |
| | $\Delta k' = k' - k0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0346 | -0.0404 | -0.0348 | -0.03286 | -0.0338 |
| 0.7 | -0.0186 | -0.0328 | -0.0170 | -0.02161 | -0.0148 |
| 0.95 | 0.0752 | 0.0626 | 0.0988 | 0.06832 | 0.0855 |
| Doppler (+300°C) | -0.0085 | -0.0089 | -0.0084 | -0.00854 | -0.0091 |
| b) Quemado = 50 GWd/tHM (EOL) | | | | | |
| Fracción de vacíos | k0 | | | | |
| 0 | 1.00207 | 1.0089 | 0.99864 | 1.007 | 0.97986 |
| | $\Delta k' = k' - k0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0405 | -0.0430 | -0.0420 | -0.04091 | -0.0400 |
| 0.7 | -0.0342 | -0.0400 | -0.0360 | -0.04128 | -0.0319 |
| 0.95 | 0.0547 | 0.0544 | 0.0707 | 0.03615 | 0.0617 |
| Doppler (+300°C) | -0.0075 | -0.0076 | -0.0077 | -0.00724 | -0.0079 |

La reactividad Doppler y por vacíos para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA se muestra en la Tabla VI. En las reactividades por vacíos, la discrepancia entre el valor mayor (correspondiendo a la institución JAERI) y el valor menor (correspondiendo a nuestros resultados) al final del ciclo de irradiación y fracción de vacíos de 95% tienen un valor de 27.2%. Comparando las Tablas V y VI, se observa que las reactividades por vacíos tienden a ser positivas conforme aumenta la concentración de MA. En las reactividades Doppler, las discrepancias presentan los siguientes valores: un valor a lo más de 14.6% al inicio del ciclo de irradiación y un valor a lo más de 13.7% al final del ciclo de irradiación.

Tabla VI. Coeficientes de reactividad Doppler y vacíos para el ensamble MOX22 con razón de moderación normal, 50 GWd/tHM, 10.65% Pu-f, y 2.5% MA

| a) Quemado = 0 GWd/tHM (BOL) | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|---------|---------|----------|---------|
| | Tohoku Univ. | ITEP | JAERI | UNAM | FZK |
| Fracción de vacíos | k0 | | | | |
| 0 | 1.08556 | 1.0989 | 1.09186 | 1.09071 | 1.08391 |
| | $\Delta k' = k' - k_0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0070 | -0.0132 | -0.0075 | -0.00789 | -0.0056 |
| 0.7 | 0.0437 | 0.0293 | 0.0450 | 0.03546 | 0.0492 |
| 0.95 | 0.1948 | 0.1811 | 0.2193 | 0.16913 | 0.2083 |
| Doppler (+300°C) | -0.0075 | -0.007 | -0.0075 | -0.00723 | -0.0082 |
| b) Quemado = 50 GWd/tHM (EOL) | | | | | |
| Fracción de vacíos | k0 | | | | |
| 0 | 1.01163 | 1.014 | 1.00707 | 1.0169 | 0.98577 |
| | $\Delta k' = k' - k_0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0137 | -0.0166 | -0.0154 | -0.01643 | -0.0108 |
| 0.7 | 0.0274 | 0.0215 | 0.0255 | 0.016 | 0.0300 |
| 0.95 | 0.1722 | 0.1685 | 0.1900 | 0.13815 | 0.1812 |
| Doppler (+300°C) | -0.0069 | -0.0069 | -0.0071 | -0.00638 | -0.0074 |

La reactividad Doppler y por vacíos para el ensamble MOX 22 con razón de moderación normal y 2.5% de MA se muestra en la Tabla VII. En las reactividades por vacíos, la discrepancia entre el valor mayor (correspondiendo a la institución rusa ITEP y la UNAM) y el valor menor (correspondiendo a la institución rusa IPPE) al final del ciclo de irradiación y fracción de vacíos de 95% tienen un valor de 9.65%. Comparando las Tablas VI y VII, se observa que las reactividades por vacíos tienden a tomar valores más negativos conforme aumenta la razón de moderación. En las reactividades Doppler, las discrepancias presentan los siguientes valores: un valor a lo más de 36.5% al inicio del ciclo de irradiación y un valor a lo más de 14.8% al final del

ciclo de irradiación. La alta discrepancia en la reactividad Doppler al inicio del ciclo de irradiación se debe a que los datos de ITEP difieren en cierta medida de los demás datos.

Tabla VII. Coeficientes de reactividad Doppler y vacíos para el ensamble MOX22 con razón de moderación aumentada, 50 GWd/tHM, 5.6% Pu-f, y 1.0% MA

| a) Quemado = 0 GWd/tHM (BOL) | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------|---------|----------|---------|
| | Tohoku Univ. | ITEP | JAERI | UNAM | FZK |
| Fracción de vacíos | k0 | | | | |
| 0 | 1.12559 | 1.1427 | 1.13115 | 1.11411 | 1.12469 |
| | $\Delta k' = k' - k0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0904 | -0.0864 | -0.0902 | -0.08009 | -0.0908 |
| 0.7 | -0.1622 | -0.1648 | -0.1611 | -0.14343 | -0.1608 |
| 0.95 | -0.1404 | -0.1479 | -0.1161 | -0.13179 | -0.1318 |
| Doppler (+300°C) | -0.0081 | -0.0069 | -0.0080 | -0.0078 | -0.0083 |
| b) Quemado = 50 GWd/tHM (EOL) | | | | | |
| | k0 | | | | |
| 0 | 0.99288 | 0.993 | 0.98909 | 0.98932 | 0.96772 |
| | $\Delta k' = k' - k0$ | | | | |
| 0.4 | -0.0936 | -0.0898 | -0.0944 | -0.08524 | -0.0923 |
| 0.7 | -0.1826 | -0.1794 | -0.1840 | -0.16633 | -0.179 |
| 0.95 | -0.1935 | -0.1818 | -0.1764 | -0.18801 | -0.1845 |
| Doppler (+300°C) | -0.0069 | -0.0095 | -0.0070 | -0.00603 | -0.0072 |

4. CONCLUSIONES

Se compararon los resultados obtenidos con el código HELIOS con los reportados por los códigos: KAPROS/KARBUS (FZK, Alemania), SRAC95 (JAERI, Japón), TRIFON (ITEP, Federación Rusa), WIMS (IPPE, Federación Rusa). Los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites del reciclado múltiple del plutonio, establecido por la NEA Working Party on Plutonium Fuels and Innovative Fuel Cycles. Se pueden destacar las principales discrepancias:

La discrepancia en la variación de k_{∞} como una función del quemado, respecto a todos los casos, es a lo más del 3%. Se observa que la diferencia de reactividad se modera conforme aumenta la concentración de MA. Esta tendencia se observa más fuertemente en celda normal que en la aumentada y en los casos MOX12 que en los MOX22.

Respecto a las densidades atómicas como una función del quemado, se tienen discrepancias significativas entre todos los participantes para los resultados del Pu241, Pu242 y Am242. Los resultados para el Np237 obtenida por FZK son más grandes con respecto a los demás resultados

En lo que respecta a las actividades como una función del tiempo de decaimiento, los resultados concuerdan bastante bien en el caso del Pu239, mientras que para los isótopos del Am242m y Cm243 se presentan discrepancias significativas. En el caso del Pu241, la actividad predicha por JAERI y por nosotros es casi nula alrededor de 5000 años, debido a que los códigos no toman en cuenta el decaimiento del alfa del Cm245 en Pu241. Por consiguiente, sería conveniente agregar en HELIOS el decaimiento alfa del Cm245.

Las reactividades Doppler concuerdan razonablemente bien, excepto por los resultados obtenidos por ITEP en el caso de la celda con moderación alta. En las reactividades por vacíos, las discrepancias entre los resultados aumentan conforme aumenta la fracción de vacíos, llegando a ser bastante notable a 95% de vacíos. Las reactividades por vacíos tienden a ser positivas conforme aumenta la concentración de MA. Conforme se aumenta la razón de moderación, las reactividades por vacíos tienden a tomar valores más negativos.

Los datos presentados aquí y en el benchmark de la NEA son insuficientes para validar los códigos, debido a que no se tiene datos experimentales. Sin embargo, el hecho de que los códigos concuerdan razonablemente bien, implica que la física descrita por estos códigos podría ser demostrada posteriormente con datos experimentales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo a través del proyecto NSF-2004-C01-9.

REFERENCIAS

1. HELIOS, versión 1.5, Fuel Management System, Studsvik Scandpower (1998).
2. NEA Nuclear Science Committee, *Calculations of Different Transmutation Concepts, an international benchmark exercise, February 2000*, Nuclear Energy Agency Organisation for Economic and Co-operation Development, ISBN 92-64-17638-1 (2000).