

DIONISIO 2.0: NUEVA VERSION DEL CODIGO DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BARRA COMBUSTIBLE DE POTENCIA BAJO IRRADIACION

Soba, A., Denis, A., Lemes, M., González, M.E.
Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear. CAC. CNEA

soba@cnea.gov.ar

denis@cnea.gov.ar; lemes@cnea.gov.ar; megonzal@cnea.gov.ar;

Resumen

Durante los últimos diez años, en el Sector Códigos y Modelos de la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear viene desarrollando el código DIONISIO, que simula buena parte de los fenómenos fundamentales que ocurren en una barra combustible de un reactor de potencia durante su quemado: distribución de temperatura, dilatación térmica, deformaciones elástica y plástica, fluencia, crecimiento por irradiación, interacción mecánica entre la pastilla y la vaina, liberación de gases de fisión, hinchado y densificación. Se supone que la simetría es axial y se emplean elementos finitos cilíndricos para discretizar el dominio. El código tiene estructura modular y comprende más de 40 modelos interconectados.

Recientemente se han introducido diversas subrutinas destinadas a extender la aplicación de DIONISIO al rango de alto quemado. Las nuevas herramientas de cálculo, diseñadas para combustibles de UO_2 en condiciones de LWR, predicen la distribución radial de potencia, quemado y concentración de diversos nucleidos en la pastilla. Paralelamente se está trabajando en el modelo de porosidad y liberación de gases en el 'rim' así como en la modificación que dicha zona introduce en la conductividad térmica de la pastilla.

Un desafío computacional de significación fue haber incluido la opción de simular una barra completa, dividiéndola en segmentos en la dirección axial, a elección del usuario, y resolviendo en cada sector un sistema completo similar. Todos los parámetros generales de la barra (presión, liberación de gases de fisión, volumen, etc.) se evalúan al final de cada paso temporal. Esta modificación permite tener en cuenta la variación axial de la potencia lineal del reactor, y como consecuencia, evaluar la dependencia con esa coordenada de todos los parámetros que miden el comportamiento de la barra combustible.

El código fue designado para participar en el proyecto FUMEX III de intercomparación de códigos, patrocinado por el OIEA, en el trienio 2008-2011. Los resultados de las simulaciones realizadas en el marco de ese proyecto fueron contrastados con más de 30 experimentos que involucran mediciones de diferentes parámetros efectuadas en más de 150 barras irradiadas. El alto número de casos testeados y la buena calidad de las predicciones obtenidas autorizan a considerar a DIONISIO como una herramienta confiable de simulación. Actualmente el código es utilizado para la simulación del comportamiento de combustible para el reactor CAREM.

DIONISIO 2.0: NEW VERSION OF THE CODE FOR SIMULATING THE BEHAVIOR OF A POWER FUEL ROD UNDER IRRADIATION

Abstract

During the latest ten years the Codes and Models Section of the Nuclear Fuel Cycle Department has been developing the DIONISIO code, which simulates most of the main phenomena that take place within a fuel rod during the normal operation of a nuclear reactor: temperature distribution, thermal expansion, elastic and plastic strain, creep, irradiation growth, pellet-cladding mechanical interaction, fission gas release, swelling and densification. Axial symmetry is assumed and cylindrical finite elements are used to discretize the domain. The code has a modular structure and contains more than 40 interconnected models.

A group of subroutines, designed to extend the application range of the fuel performance code DIONISIO to high burn up, has recently been included in the code. The new calculation tools, which are tuned for UO_2 fuels in LWR conditions, predict the radial distribution of power density, burnup and concentration of diverse nuclides within the pellet. New models of porosity and fission gas release in the rim, as well as the influence of the microstructure of this zone on the thermal conductivity of the pellet, are presently under development.

A considerable computational challenge was the inclusion of the option of simulating the whole bar, by dividing it in a number of axial segments, at the user's choice, and solving in each segment the complete problem. All the general rod parameters (pressure, fission gas release, volume, etc.) are evaluated at the end of every time step. This modification allows taking into account the axial variation of the linear power and, consequently, evaluating the dependence of all the significant rod parameters with that coordinate.

DIONISIO was elected for participating in the FUMEX III project of codes intercomparison, organized by IAEA, from 2008 to 2011. The results of the simulations performed within this project were compared with more than 30 experiments that involve more than 150 irradiated rods. The high number of tests and the good quality of the predictions suggest that DIONISIO can be considered as a reliable prediction tool. The code is presently used for simulating the behavior of the fuel for the CAREM reactor.

1. Introducción

DIONISIO es un código construido para la simulación del comportamiento termomecánico y termoquímico de una barra combustible bajo irradiación, en un reactor de potencia en condiciones normales de funcionamiento. Los materiales involucrados en el cálculo son: el combustible (UO_2 o combustible mixto $(\text{U,Pu})_2$) y la vaina de Zircaloy. Los modelos y condiciones utilizados en el código se adecuan a reactores LWR y PHWR suponiendo una historia de potencia de exigencia normal. Trabaja en un dominio que representa a una pastilla, el gap y la vaina y posee simetrías de revolución sobre el eje z, y axial sobre un plano que corta en dos la pastilla.

En todos los cálculos se utiliza la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones diferenciales involucradas, tanto para la distribución de temperatura como para el problema mecánico. El código posee un generador de mallas embebido que discretiza el dominio a partir de los datos de entrada, utilizando elementos de la familia de Lagrange, de primer orden (4 nodos, polinomios lineales). Para el problema de difusión de gases, considera un grano en el que supone simetría esférica y resuelve un sistema unidimensional con elementos finitos lineales. Para el problema de fractomecánica de la vaina se utilizan elementos cuadráticos de la familia serendípica, de ocho nodos con polinomios cuadráticos. En una instancia previa, la malla de elementos finitos puede ser visualizada antes de correr el programa.

La entrada de DIONISIO contiene, además de parámetros relativos al reactor y condiciones de operación, la historia de potencia a la que será sometida la barra. Para ingresar los pasos de la misma es posible elegir entre potencia lineal, potencia volumétrica o flujo de neutrones.

La cantidad de fenómenos mutuamente influyentes que se producen en materiales sometidos a irradiación requieren de modelos numéricos altamente no lineales. Así por ejemplo, dentro del UO_2 , se producen más de 700 nucleidos como consecuencia de las reacciones de fisión generadas por el bombardeo con neutrones y por la cadena de reacciones de decaimiento radiactivo. Muchos de ellos poseen corta vida y sólo unos pocos resultan fundamentales a la hora de describir el estado de un combustible irradiado. Desde el punto de vista neutrónico, los que deben ser tenidos en cuenta en cualquier cálculo de reactividad son los que poseen mayor sección eficaz de captura neutrónica como el ^{135}Xe y el ^{149}Sm y se comportan como venenos naturales de la reacción. El xenón y el kriptón son gaseosos e insolubles en el UO_2 y por esta razón precipitan formando burbujas en el interior de un grano de óxido o en el borde de grano; estas burbujas contribuyen al hinchado de la pastilla (swelling) y degradan su conductividad térmica. Cuando se ha acumulado suficiente gas en los bordes de grano, las burbujas se interconectan y el gas en exceso, migra hacia el volumen libre dentro de la barra, fundamentalmente el gap y el plenum. El cambio de composición gaseosa en el gap disminuye su transferencia de calor, ya que la conductividad del xenón es veinte veces menor que la del helio que se emplea en el llenado inicial. De este modo, la temperatura de todo el sistema aumenta. Los productos de fisión sólidos incluyen elementos metálicos u óxidos insolubles en la matriz de UO_2 , y contribuyen también al hinchado. El cesio y el yodo, que también son insolubles, migran hacia el gap e influyen en los mecanismos de corrosión de la vaina de Zircaloy (Zry).

Entre los diversos fenómenos que ocurren en la pastilla durante el servicio del combustible cabe destacar:

- a) Expansión térmica del cerámico UO_2 .
- b) Densificación de la pastilla: es un fenómeno que se produce al inicio de la irradiación del combustible, mediante el cual la porosidad con la que se fabrica la pastilla se destruye por efecto del bombardeo neutrónico.
- c) Hinchado o "swelling": este fenómeno, resultado de la acumulación de productos sólidos y gaseosos de fisión, provoca cambios fundamentales y permanentes que afectan el comportamiento de la barra al reducir la distancia pastilla-vaina, además de reducir la conductividad térmica del UO_2 . La cantidad de productos de fisión generados aumenta con el quemado. Durante las primeras etapas de la irradiación, el hinchado es compensado con la densificación pero, una vez completado este proceso, el hinchado continúa incrementándose a lo largo de todo el quemado.
- d) Liberación de gases de fisión: la presencia de los productos gaseosos (particularmente Xe y Kr) en el espacio libre de la barra aumenta la presión interna y deteriora la conductividad térmica del gap.
- e) Cambios microestructurales: debido al amplio rango de temperatura que se presenta en la pastilla, se observan zonas con diferente estructura cristalina. En la región central crecen granos alargados en la dirección radial, resultado de la migración de poros que ocurre en sentido contrario al gradiente térmico. En la franja intermedia de la pastilla se reconoce el crecimiento de granos equiaxiales, similares a los originales de la pastilla pero de mayor tamaño. En el anillo externo, los granos conservan las características del material de fabricación.
- f) Fluencia o "creep": es un fenómeno de deformación lenta producto de la tensión que actúa en forma continua sobre la pastilla.
- g) Deformación plástica: tiene lugar a altas temperaturas (mayores a 1400°C).

Por otro lado, a lo largo del quemado, la vaina, habitualmente de Zry, es sometida a un conjunto de tensiones que generan deformaciones instantáneas y permanentes. Asimismo, el contacto con el refrigerante por su lado externo, y con la cambiante atmósfera interna producto de agentes liberados por el quemado del combustible, como el cesio y el yodo, genera diferentes tipos de ataques corrosivos que pueden llevar a la falla y rotura del metal. En el exterior se produce el crecimiento de una capa de óxido (circonia), de baja conductividad térmica, que provoca un aumento en la temperatura exterior de la vaina y, en consecuencia de todo el sistema. (Una capa de óxido de $\sim 80 \mu\text{m}$ incrementa en 30°C la temperatura de la vaina). La presencia de especies químicas agresivas, combinada con la existencia de tensiones importantes puede dar lugar al fenómeno conocido como corrosión bajo tensiones (SSC Stress Corrosion Cracking), capaz de conducir a la rotura de la vaina.

El primer mecanismo de tensión-deformación de la vaina se produce por la dilatación térmica y las presiones externas e internas en la misma. La irradiación que experimenta el Zry con el paso del tiempo modifica ese campo tensión-deformación al agregar otros factores como:

- a) Creep: deformación progresiva y permanente bajo fuerzas constantes, que se suma a las instantáneas. Los aumentos de temperatura y la irradiación aceleran este fenómeno. Bajo irradiación, el flujo neutrónico participa en la movilidad de los defectos e incrementa la velocidad de deformación, contribuyendo en un 80% a la deformación total por creep.

b) Crecimiento por irradiación: se observa experimentalmente que las vainas de Zry sufren un crecimiento debido a la irradiación que se manifiesta en forma diferenciada en la dirección axial en contraste con la radial/circunferencial. La cantidad de deformación aumenta con el quemado y el tiempo. Este fenómeno globalmente causa la reducción progresiva del espacio entre las barras y las boquillas superiores e inferiores del elemento, por lo que debe tenerse en cuenta en el diseño.

Durante la operación del combustible, bajo condiciones normales, el gap entre la pastilla y la vaina disminuye. Debido a la evolución geométrica de la pastilla (hinchado, creep, reestructuración) y de la vaina (creep, crecimiento por irradiación) ambos materiales pueden llegar a ponerse en contacto, dando lugar a tensiones y deformaciones locales de consideración. Estos fenómenos se denominan genéricamente *pellet-cladding mechanical interaction* (PCMI) o PCI cuando se quiere involucrar también a procesos de origen químico.

DIONISIO posee modelos para cada uno de los fenómenos sucintamente descritos en este apartado. Detalles de funcionamiento del programa y descripciones generales del mismo pueden consultarse en las referencias [3-12]

2. Mejoras en la versión 2.0 del código

2.1. *Dominio de resolución*

En la versión previa de DIONISIO, así como en la mayor parte de los códigos de simulación, se ingresa un valor uniforme de potencia lineal para toda la barra. La elección de ese valor como la potencia promedio de la barra lleva a predecir tardíamente el inicio de la liberación de gases pues en la realidad ésta empieza a ocurrir en la zona más exigida de la barra, cuando la potencia media indica que aún no se debe liberar gas. Algo similar ocurre en cuanto a la predicción del contacto pastilla-vaina. En cambio, si la simulación se efectúa suponiendo que toda la barra se encuentra sometida a la potencia máxima, la predicción sobreestimaré la cantidad de gas liberado. Es por esto que la versión actual de DIONISIO resulta más realista que la anterior. Evidentemente, una correcta predicción de la liberación de gases, en cuanto al momento de inicio y al volumen liberado, tiene consecuencias en la predicción correcta de la presión interna en la barra, en la distribución de temperatura y, en general, en todos los parámetros de la barra.

Para subsanar esta limitación se procedió a efectuar una nueva discretización, dividiendo a la barra en segmentos axiales. En cada uno de ellos se aplicó el procedimiento ya usado en la versión anterior (discretizando un dominio correspondiente a media pastilla, gap y vaina, utilizando simetría de revolución alrededor del eje z y de reflexión en el plano $z=0$), y extendiendo luego los resultados al segmento considerado. La diferencia reside en que en cada segmento se ingresan los valores locales de potencia lineal o de flujo neutrónico. El código así evalúa los parámetros propios de cada segmento, para luego calcular los parámetros generales de la barra. En la figura 1 se propone un esquema de los diferentes dominios que el código trata además de un detalle del dominio local resuelto por el código.

2.2. *Conductividad térmica*

Las ecuaciones que describen la generación y transferencia del calor en un sistema pastilla-gap-vaina son:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa_r^h(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z^h(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q^h(r)$$

donde κ^h es la conductividad térmica para $h =$ pastilla, gap o vaina (el subíndice indica la posibilidad de anisotropía de la conductividad). El término independiente Q , medido en $W m^{-3}$, es

$$Q^h = \begin{cases} Q^{UO_2} & \text{potencia generada por la pastilla} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Dado que la distribución de temperatura en cada dominio resulta crucial en la resolución de todo el problema, determinar una correcta función de conductividad térmica es fundamental. En particular, para la pastilla combustible, el modelo implementado en DIONISIO está basado en la expresión general dada en el manual MATPRO [13], que tiene en cuenta la dependencia con la temperatura del combustible, el quemado, la porosidad y la desviación de la estequiometría. Además, incluye un término que contempla la presencia de Gd [23]. El modelo considerado es válido tanto para uranio natural, como para enriquecido hasta los valores más usuales para reactores de potencia, pudiendo también aplicarse a combustibles con enriquecimientos de hasta 15% de ^{235}U . La expresión correspondiente es

$$(1) \quad \kappa^{Pastilla}(T) = (1 - p^{0.66666}) \left(\frac{1}{A + BT + f_1(gd) + f_2(Bu)} - \frac{E}{T^2} \exp\left(\frac{F}{T}\right) \right)$$

donde A , B , E y F son constantes, p es fracción de porosidad en volumen del material, Bu el quemado [MWd/kgU], gd el porcentaje de gadolinio, f_1 y f_2 son dos relaciones empíricas dadas; T se expresa en K y κ en $W m^{-1} K^{-1}$.

En la figura 2 se superpone la curva, obtenida a partir del presente modelo, con datos experimentales obtenidos por Ronchi et. al.[25], para UO_2 sin irradiar, con 5% de porosidad. En la figura 3 se presenta una comparación entre curvas de conductividad térmica obtenidas mediante la ecuación (1), para diferentes valores de quemado del combustible. Una vez cumplidos los testeos previos, esta relación empírica será introducida en DIONISIO.

Para la conductividad térmica de la vaina se utiliza la expresión [13]

$$\kappa^{Vaina}(T) = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3$$

y para la del gap, $\kappa^{Gap}(T)$, se emplea un modelo según el cual su conductancia resulta de la contribución de tres términos: $h_{tot} = h_s + h_{rad} + h_{gasmix}$. El primero de ellos se debe al contacto de las porciones sólidas de las pastilla y la vaina (diferente de cero si el gap está parcial o totalmente cerrado); el segundo término expresa el aporte de la radiación (sólo significativo para altas temperaturas); el tercer término representa la conducción de calor a través de la mezcla de gases que compone la atmósfera del gap [13]. El modelo de conductividad térmica del gap fue incorporado a DIONISIO y se comprobó su buen ajuste con valores experimentales [5,12].

2.3. Condiciones de alto quemado

Los picos de absorción resonantes del ^{238}U y las cadenas de reacciones nucleares que se producen en consecuencia dan lugar a la formación, especialmente en la periferia de la pastilla, de diversos isótopos, algunos de los cuales son físiiles, como el ^{239}Pu y el ^{241}Pu . Ellos provocan el incremento local de la densidad de fisiones y

del quemado. Por este motivo, es necesario considerar la dependencia radial de estas magnitudes, que pueden alcanzar en la periferia de la pastilla valores dos o tres veces superiores al promedio. Las subrutinas que dan cuenta de estos efectos están formando parte de DIONISIO y fueron testeadas con éxito en un número muy significativo de casos experimentales [26].

Asimismo, en la corona externa de la pastilla se desarrolla una microestructura muy diferente a la del material original, con granos muy pequeños y poros de gran tamaño. Tiene un efecto marcado en la respuesta térmica del combustible y, posiblemente, en el proceso de liberación de productos gaseosos de fisión [14,15]. Se están realizando actualmente De igual modo se procedió a introducir un modelo completo que atiende a la descripción de la conformación de esa zona previamente descrita (zona rim) además de incluir un modelo de porosidad dentro de la misma. Dicho modelo describe la relación entre la micro estructura y la liberación de los gases de fisión.

Estos aspectos del trabajo se presentan en forma separada en este congreso [21,22].

3. Resultados

Para evaluar la calidad de las predicciones del código, se procedió a ejecutar una batería de tests que someten al mismo a diversas exigencias de carácter numérico y potencialmente extremas desde e punto de vista de los modelos. Para ello se utiliza una pastilla genérica de forma estándar. En la tabla I se presentan algunos de los valores y opciones seleccionados como entrada del código. En las figuras 4 y 5 se presentan los resultados para un test que involucra una serie de rampas de potencia que van desde los 300 a los 600 W/cm con una velocidad de rampa de 20W/cm/hora. En este caso se ejecutó el código para un solo sector y se extrajeron los gráficos de diversos parámetros de interés. En la figura 4 se analizan la longitud de la vaina y de la columna de pastillas, la presión interna, el porcentaje de gas liberado y la variación del volumen libre de la barra. En la figura 5, se dan la temperatura máxima en el centro de la pastilla, la potencia lineal, los radios interno de la vaina y externo de la pastilla, el crecimiento de capa de oxido, el hinchado de la pastilla y el creep de la vaina.

En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos para una barra dividida en 10 sectores. Las curvas representan parámetros de toda barra, como es el caso de la presión, volumen libre, fracción de gas liberado, así como crecimiento de la vaina y de la columna de pastillas. Esas salidas fueron obtenidas promediando los datos de todos los sectores. En al figura 7 se observan parámetros propios de cada sector en los que se divide el cálculo, como la temperatura máxima en el centro de una pastilla testigo, la potencia lineal, los radios interno de la vaina y externo de la pastilla, el crecimiento de la capa de oxido, el swelling de la pastilla y el creep de la vaina. Claramente, los grupos de curvas responden a las condiciones particulares que afectan a cada uno de esos sectores: diferentes condiciones de temperatura sobre la superficie externa de la vaina, diferente flujo neutrónico incidente y potencia lineal. Puede notarse cómo el contacto pastilla-vaina, por ejemplo, sólo se alcanza en los sectores de máxima potencia, que se hallan en el centro de la barra, mientras el gap permanece abierto para los dominios que se encuentran en las zonas superior e inferior.

4. Conclusiones

Con las mejoras introducidas hasta ahora, los resultados preliminares arrojados por DIONISIO 2.0 responden adecuadamente a las situaciones experimentales típicas de combustibles tipo PWR, BWR y PHWR. Las subrutinas correspondientes a alto quemado (presentadas en otros trabajos de este mismo congreso) sumadas a la inclusión de la dependencia de la conductividad térmica del UO_2 con el quemado y con la proporción de Gd presente en el combustible fresco, convierten a DIONISIO en un código que provee simulaciones que se pueden extender hasta un quemado medio del orden de 60 MWd/KgU.

DIONISIO 2.0 obtuvo muy buenos resultados en la simulación dentro del ejercicio ciego internacional organizado por el OIEA, dedicado a comparar códigos en la predicción del comportamiento de combustible en reactores PHWR [29], además de haber sido seleccionado por el mismo organismo [1,2] para participar del experimento internacional FUMEX III, recientemente concluido, cuyo propósito central fue la intercomparación de códigos de simulación, así como la comparación de esos resultados con valores medidos experimentalmente.

Actualmente se está completando la validación de código comparándolo con resultados experimentales. Se emplearán las bases de datos correspondientes a los experimentos FUMEX I, II, III, así como otros resultados provistos por el OIEA, lo que conforma una batería de más de 25 experimentos completos con más de 280 barras de testeo.

Referencias

- [1] A. Denis, R. Piotrkowski. Simulation of isothermal fission gas release, J. of Nucl. Mater. 229 149–154 (1996).
- [2] A. Denis, R. Piotrkowski. A fission gas release model. Water Reactor Fuel Element Modeling at High Burnup and Experimental Support, TECDOC-957, IAEA (1997).
- [3] “Simulación del comportamiento termomecánico de una barra combustible en operación”, Alejandro Soba. Tesis de doctorado, FCEyN, UBA
- [4] A. Denis, A. Soba. Simulation of Pellet-Cladding Thermomechanical Interaction and Fission Gas Release. Nucl. Eng. and Dgn. 223 (2003).
- [5] A. Soba and A. Denis, “Simulation with Dionisio 1.0 of thermal and mechanical pellet-cladding interaction in nuclear fuel rods”. J. of Nucl. Mater. 374 (2008).
- [6] A. Soba, A. Denis. Finite Element Simulation of the Thermoelastic Behavior of a Fuel Rod. Technical Committee Meeting on Fuel Chemistry and Pellet-Clad Interaction Related to High Burnup Fuel, IAEA, September 7-11, Nyköping, Suecia (1998).
- [7] A. Denis, A. Soba. Simulation of Pellet-Cladding Thermomechanical Interaction and Fission Gas Release. Technical Committee Meeting on Nuclear Fuel Behaviour Modelling at High Burnup and its Experimental Support, Windermere, (2000).
- [8] A. Soba, A. Denis. Modelo Termoelástico por Elementos Finitos de Deformaciones en Vainas de Elementos Combustibles. 83° AFA, La Plata (1998).
- [9] A. Soba, A. Denis. Simulación por elementos finitos de fenómenos térmicos, elásticos y plásticos en elementos combustibles. AATN, Bariloche, (1999).
- [10] A. Denis, A. Soba. Simulación de la interacción termomecánica entre la pastilla y la vaina y liberación de gases de fisión. AATN, Buenos Aires, (2000).
- [11] A. Soba, A. Denis. “Model of fracture for the Zry cladding of nuclear fuel rods included in the code DIONISIO 1.0”. Nucl. Eng. and Dgn, Vol. 238, Issue 12, (2008).
- [12] A. Soba and A. Denis, “Simulation of PHWR fuel rods behavior with the code DIONISIO 1.0”. Technical Meeting on “Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) Fuel Modelling”, (2006), India.

- [13] Handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel behavior, MATPRO version 11, NUREG/CR-0497, TREE-1280 (1979).
- [14] M. Morgensen, J. Pearce, C. Walker, Behavior of fission gas in the rim region of high burnup UO_2 fuel pellets with particular reference to results from XRF investigation, J. of Nucl. Mat. 264 (1999).
- [15] J. Spino, D. Baron, M. Coquerelle, A. Stalios, JI. of Nucl. Mat. 256 (1998).
- [16] K. Hayashi, H. Kikuchi, K. Fukuda, Radiation damage of UO_2 by high energy heavy ions. J. of Nucl. Mat. 248 (1997).
- [17] H. Matzke, Oxygen potential in the rim region of high burnup UO_2 fuel, J. of Nucl. Mat. 208 (1994).
- [18] Burnup Determination of High Burnup and Dry Processed Fuels Based on Isotope Dilution Mass Spectrometric Measurements, J.S. Kim, Y.S. Jeon, S.D. Park, S.H. Han, J.G. Kim. J. of Nucl. Sci. and Tech. Vol. 44, No. 7 (2007).
- [19] Research Program to Elucidate Outside-in Failure of High Burnup Fuel Cladding, H. Hayashi, K. Ogata, T. Baba, K. Kamimura. J. of Nucl. Sci. and Tech. Vol. 43, No. 9, (2006).
- [21] Denis, A., Soba, A. Alto quemado en el código DIONISIO. AATN 2012
- [22] Lemes, M., Denis, A., Soba, A. Estudio analítico y numérico de los efectos de la irradiación hasta alto quemado en combustibles de reactores de potencia. AATN 2012
- [23] A. R. Massih, S. Persson, Z. Weiss. Modeling of $(\text{UGd})\text{O}_2$ Fuel Behaviour in Boiling Water Reactors, J. Nucl. Mater 188 (1992) .
- [24] U.S. N.R.C. NUREG/CR-7024, Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON 3.4, FRAPTRAN 1.4 and MATPRO. (2011)
- [25] J. K. Fink, Thermophysical Properties of Uranium Dioxide. J. Nucl. Mater. 279 (2000).
- [26] A. Soba, A. Denis, L. Romero, E. Villarino, F. Sardella, A high burnup model developed for the DIONISIO code, J. Nucl. Mater. 433 (2013) 160-166.
- [27] <http://www.iaea.org>
- [28] <http://www.oecd-nea.org/science/fuel/ifpelst.html>
- [29] Simulation of PHWR fuel rods behavior with the code DIONISIO 1.0, Technical Meeting on Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) Fuel Modelling, A. Denis and A. Soba, 5 - 8 December 2006, Mumbai, India.

Figuras

Elemento combustible
PWR

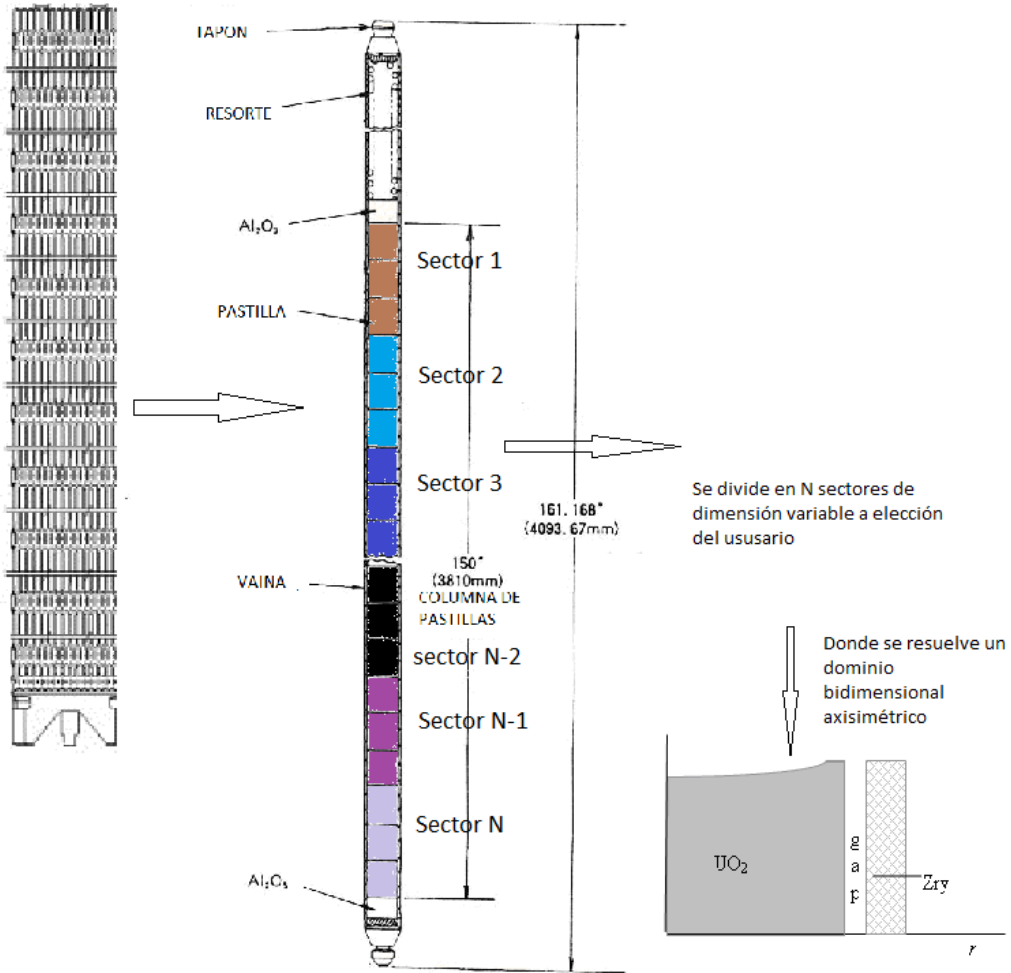


Figura 1: Esquema de una barra combustible tratada por DIONISIO y la porción del dominio resuelto en cada sector.

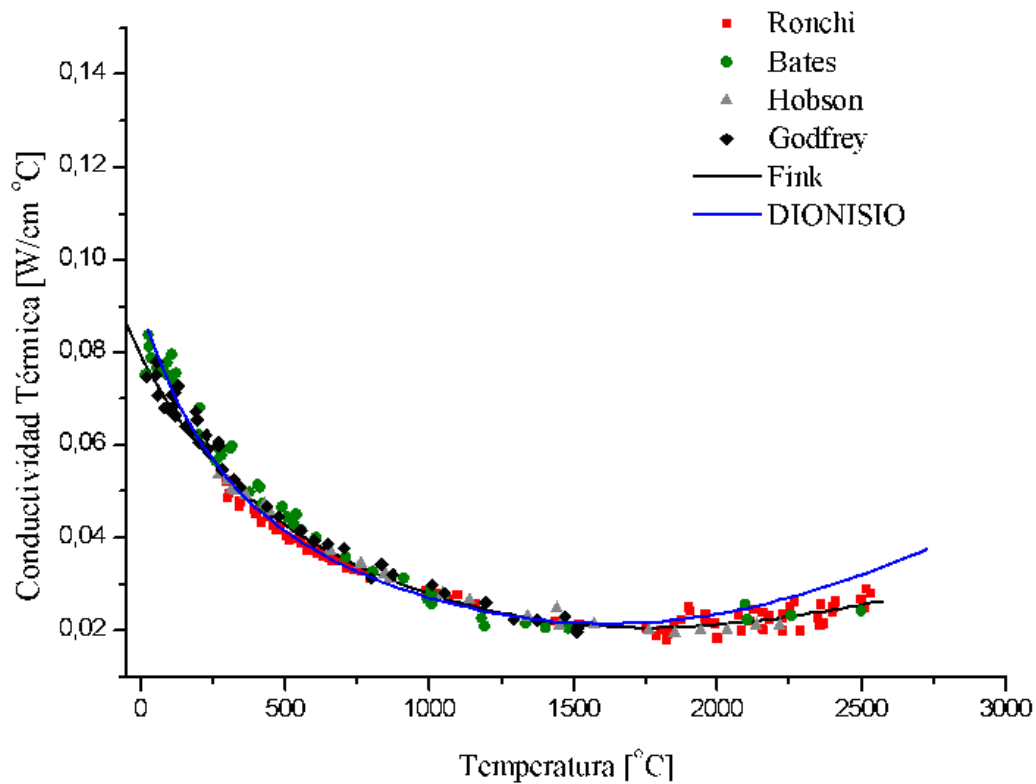


Figura 2: Conductividad térmica del UO_2 sin irradiar, con 5% de porosidad comparada con datos experimentales, obtenidos por Ronchi, Bates, Hobson y Godfrey [25].

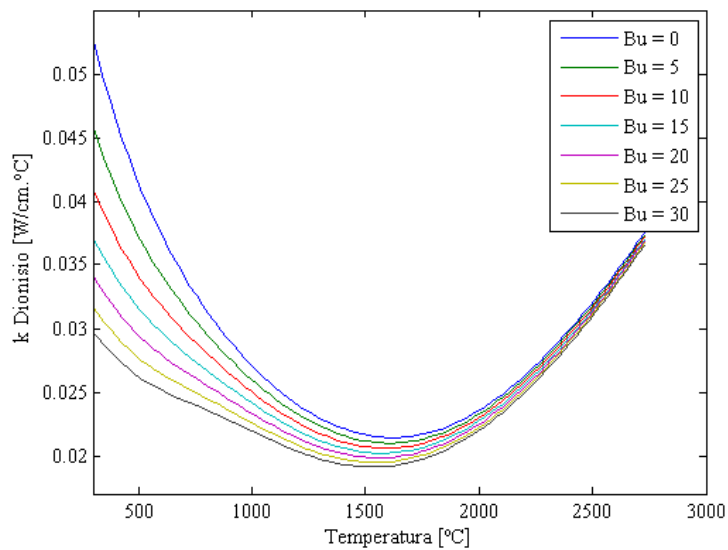


Figura 3: Modelo de conductividad térmica utilizado en DIONISIO [13], para quemados entre 0 y 35 MWd/kgU

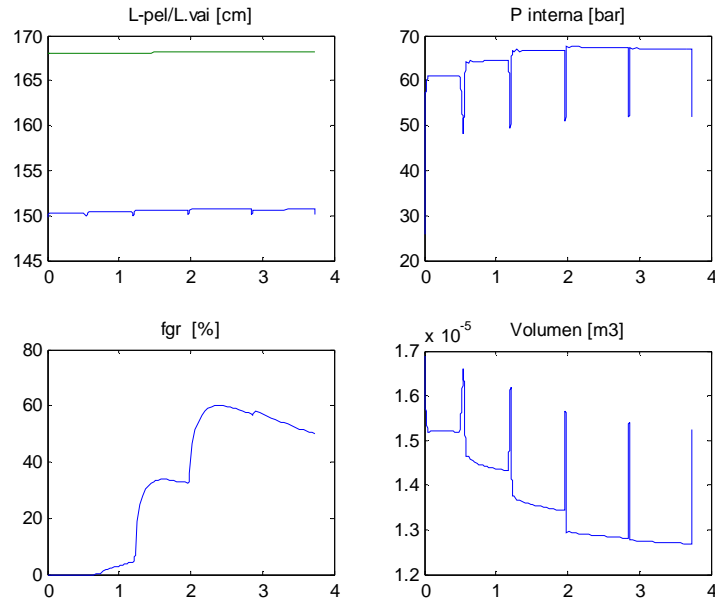


Figura 4: Test de rampas de potencia sucesivas: crecimiento de la vaina y de la columna de pastillas, presión interna, porcentaje de gas liberado y variación de volumen libre dentro de la barra.

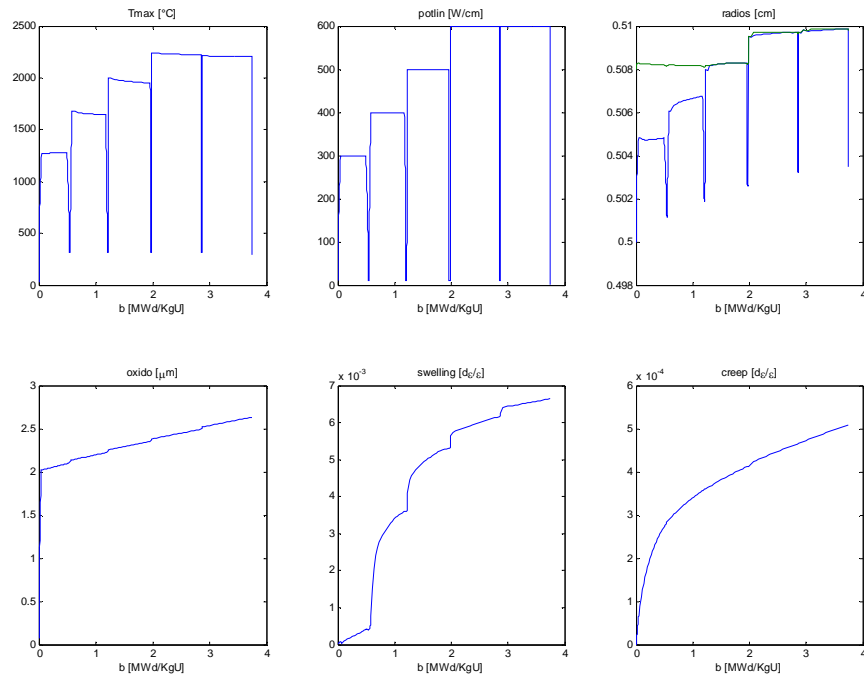


Figura 5: Test de rampas de potencia sucesivas: temperatura máxima en el centro de la pastilla, potencia lineal, radios interno de la vaina y externo de la pastilla, crecimiento de la capa de oxido, hinchado de la pastilla y creep de la vaina.

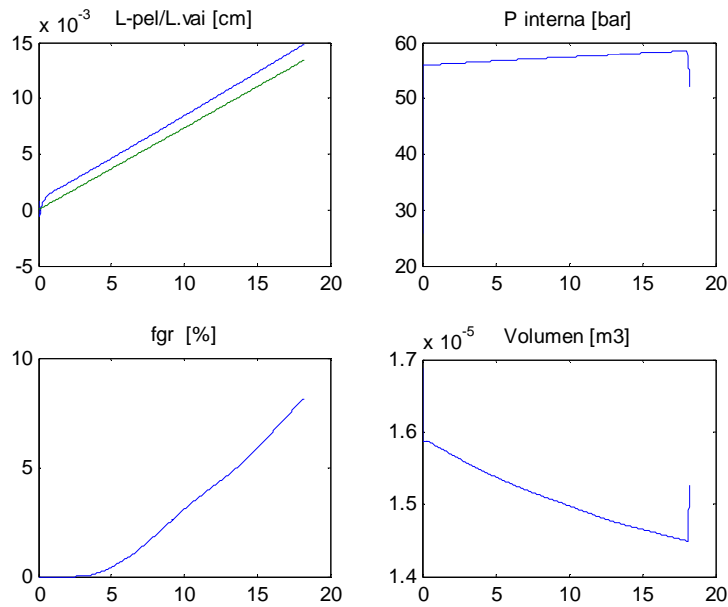


Figura 6: Test de sectores: Crecimiento de la vaina y de la columna de pastillas, presión interna, porcentaje de gas liberado y la variación del volumen libre dentro de la barra.

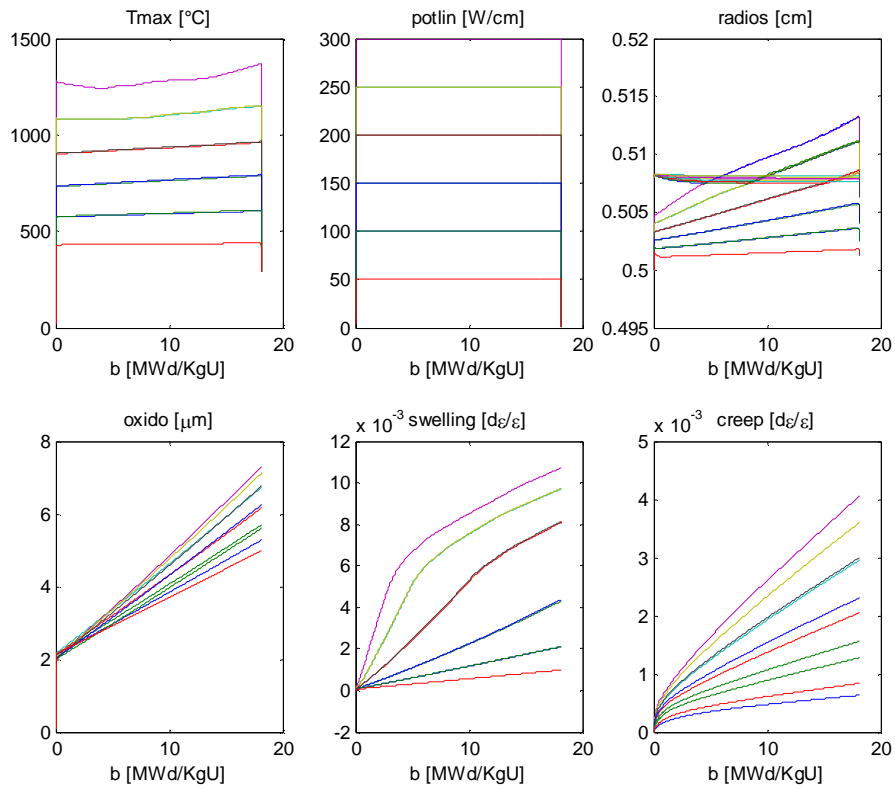


Figura 7: Test de sectores: temperatura máxima en el centro de la pastilla, potencia lineal, radios interno de la vaina y externo de la pastilla, crecimiento de la capa de oxido, swelling de la pastilla y creep de la vaina para cada uno de los sectores en los que se dividió la barra.

TABLA I: Archivo genérico de entrada de los test realizados con DIONISIO 2.0

PHYSICAL_PROBLEM

Geometry_definition

hole= No
 dishng= Si
 chamfle= Si
 radio= 0.5
 altura= 1.0
 r_dish= 0.35
 r_vaina_int= 0.508
 r_vaina_ext= 0.58
 h_dish= 0.03
 r_cham= 0.02
 h_cham= 0.01

end_geometry_definition

Physical_definition

T_externa= 300.0 #C
 P_externa= 1000.0 #N/cm2
 P_interna= 250.0 #N/cm2
 gas_inicial= 1.0,0.0,0.0,0.0,0.0
 open_por = 0.01
 porosidad= 0.04
 th_dens = 0.96
 enrique= 0.030
 grano0= 5.0
 Gadolinio= 0.0
 Npastillas= 150
 plenum= 15.0
 TipoFuel= UO2
 TipoMod= H2O
 TipoREAC= PWR
 fac_flux= 2.0E+011
 FAC_pic= 1.05

end_Physical_definition

Rod_definition

z_size: 165.0 #cm
 Pila_peso: 1000.0 #gr
 Pila_z: 150.0 #cm
 Velo_H2O: 300.0 # cm/seg
 caudal: 2.0 # kg/seg/cm2
 Ph: 7.0
 Tentrada: 290.0 #C
 Tsalida: 310.0 #C
 Function: COSE # forma del perfil PLAN/COSE/USER

end_rod_definition

end_problem_definition