

MODELADO INTEGRAL DE BARRAS COMBUSTIBLES NUCLEARES CON EL CÓDIGO DIONISIO

INTEGRAL MODELING OF NUCLEAR FUEL RODS WITH THE DIONISIO CODE

Mauricio E. Cazado^{a,b,c}, Francisco Rotea^a y Alejandro Soba^{b,c}

^a*Instituto Sábató, Universidad Nacional de San Martín/Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, B1650KNA San Martín, Buenos Aires, Argentina, <https://www.isabato.edu.ar/>*

^b*Sección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, B1650KNA San Martín, Buenos Aires, Argentina, <http://www.cnea.gov.ar/>*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, CABA, Buenos Aires, Argentina, <https://www.conicet.gov.ar/>*

Palabras clave: Barra combustible, dióxido de uranio, zircaloy, DIONISIO.

Resumen. Recientemente, se han incorporado nuevos modelos al código de combustibles DIONISIO para tratar fenómenos que se desarrollan tanto en la pastilla de UO₂ (densificación, hinchamiento, liberación de gases de fisión) y en las vainas de Zircaloy (crecimiento por irradiación) como el tratamiento del fluido refrigerante. En trabajos anteriores, cada modelo fue probado de forma independiente para evaluar su comportamiento. En este trabajo se presenta un estudio integral sobre el comportamiento de las barras de combustible nuclear en un reactor de potencia bajo condiciones normales de operación utilizando el código DIONISIO. Para ello se emplearon diferentes experimentos disponibles en la literatura y los resultados muestran una mejora significativa al compararlos con la versión anterior del código.

Keywords: Nuclear fuel rod, uranium dioxide, zircaloy, DIONISIO

Abstract. Recently, new models have been incorporated into the DIONISIO fuel code to address phenomena that take place in both the UO₂ pellet (densification, swelling, fission gas release) and Zircaloy cladding (irradiation growth) as well as the treatment of the coolant. In previous work, each model was tested independently to evaluate its behavior. In this work, a comprehensive study on the behavior of nuclear fuel rods in a nuclear power plant under normal operation conditions using the DIONISIO code is presented. For this purpose, different experiments available in the literature were used and the results show a significant improvement when compared to the previous version of the code..

1. INTRODUCCIÓN

La Sección Códigos y Modelos perteneciente a la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear (GCCN) de la CNEA ha desarrollado un código denominado DIONISIO que en forma genérica se compone de un conjunto de modelos destinados a simular el comportamiento de combustibles nucleares bajo irradiación dentro de un reactor de potencia o de experimentación, tanto en condiciones de operación normal como de accidente. Aunando todas sus características, DIONISIO es un código multidimensional, ya que posee modelos uni, bi y tridimensionales acoplados entre sí.

Este código ha sido seleccionado para participar, como único representante de la Argentina, en proyectos internacionales destinados a la inter comparación y validación de códigos de simulación de combustibles de potencia, patrocinados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Uno de ellos fue la tercera edición del proyecto *Fuel Modelling for Extended Burnup* (FUMEX III) (Killeen et al., 2009). Esta tarea se cumplió mediante el contrato *IAEA Research Contract N°15177*, que abarcó entre 2008 y 2012. Posteriormente, el grupo de investigación participó en otro proyecto similar, *Fuel Modeling under Accident Conditions* (FUMAC) que se inició en 2014 y finalizó en 2018, en este caso bajo el contrato *IAEA Research Contract N°18536* (FUMAC, 2019).

Así mismo, el sector responde a los requerimientos de distintos grupos de diseño de combustibles de la GCCN - CNEA. En particular, en relación con el proyecto CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) (CAREM, 2018), se han realizado cálculos predictivos del comportamiento de su combustible, contribuyendo al diseño del mismo. Asimismo, se han llevado a cabo trabajos de índole similar en el marco del proyecto de reactor de investigación RA-10 (RA-10, 2018).

Existen numerosas publicaciones y presentaciones a congresos en el contexto internacional, referidas al código y los modelos en los que se basa, que avalan sus resultados (Lemes et al., 2017; Soba et al., 2014; Soba y Denis, 2009, 2008b,a; Denis y Soba, 2003; Goldberg et al., 2019; Lemes et al., 2019).

En su versión destinada a reactores de potencia, el código es tri- o bidimensional (con simetría axial) a elección del usuario. Trabaja sobre un dominio compuesto por una pastilla y el segmento de vaina y gap correspondientes. Este pequeño dominio es resuelto en distintas posiciones axiales en las que se divide una barra combustible completa (Figura 1), respondiendo a las condiciones de contorno locales de cada segmento en el reactor. En efecto, a lo largo de una barra varía no solo el flujo neutrónico al que está sometida, sino también las condiciones termohidráulicas. Este modo de simular, prácticamente estandarizado en la gran mayoría de códigos de combustible, responde a una dimensionalidad $X+1/2$, $X=2,3$, y la fracción representa la discretización longitudinal de la barra (Goldberg et al., 2019; Williamson et al., 2012).

El código se ve sometido a continuas revisiones y actualizaciones, tanto en lo referente a

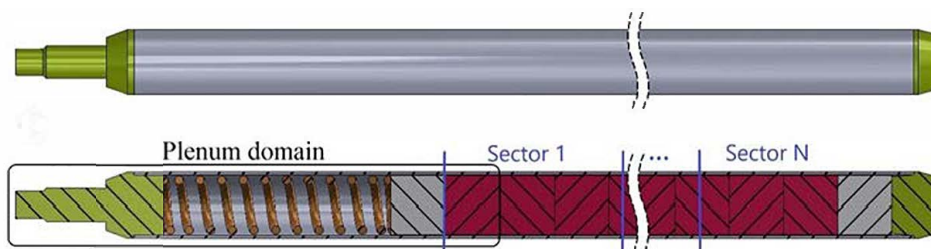


Figura 1: División del dominio en sectores a diferentes alturas.

modelos físicos, como numéricos. Por ese motivo se dispone de una batería de experimentos controlados que forman parte de la base de datos de la OIEA y la NEA (*Nuclear Energy Agency*), que nos permiten analizar la respuesta del código ante modificaciones realizadas en el mismo. Recientemente, se han incorporado al código modelos para la descripción del canal refrigerante en doble fase (Cazado, 2023), así como nuevos modelos para la densificación y el hinchamiento gaseosos y sólido de la pastilla (Cazado, 2019; Rotea et al., 2022). En este trabajo presentamos una comparación de las predicciones de DIONISIO con estos nuevos modelos incorporados contra resultados de experimentos de barras completas. Este tipo de experimentos tienen la característica de poseer datos para numerosos sectores de la barra y mediciones detallada de parámetros que dependen de la altura de la misma, situación que resulta de interés para analizar cómo funciona DIONISIO al tratar sectores diferenciados.

2. SIMULACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS US-PWR

Los experimentos del programa US-PWR 16x16 LTA para alto quemado se diseñaron para observar el comportamiento de barras combustibles con vainas de Zircaloy-4 hasta alcanzar quemados cercanos a 60 [MWd/kgU]. Las irradiaciones se realizaron en un reactor comercial estadounidense tipo PWR. El diseño de las barras combustibles de aproximadamente 4 metros de longitud consistió en pastillas de UO_2 enriquecidas, sólidas para algunas barras y huecas en otras, recubiertas con una vaina de Zircaloy-4. Las barras combustibles se presurizaron con He. Dos de las barras ensayadas se utilizaron para llevar a cabo una gran cantidad de mediciones postirradiación, incluyendo quemado, densidad del combustible, crecimiento de óxido sobre la superficie externa de la vaina combustible y el contenido de hidrógeno producto de la captura durante el proceso de corrosión (Lyon y Turnbull, 2005).

En la Tabla 1 se presentan las geometrías y condiciones operacionales generales para estos experimentos.

Por similitud con el material de la vaina del experimento TRIBULATION (2002), se utiliza-

ítem	parámetro	TSQ002/TSQ004	TSQ022/TSQ024
combustible	material	UO ₂	
	largo [mm]	9.906	
	diámetro [mm]	8.255	
	diámetro central [mm]	-	2.34
	tamaño de grano [μ m]	10	
	número de pastillas	384	
	enriquecimiento ²³⁵ U %	3.48	
	densidad [% TD]	95	
Vaina	material	Zircaloy-4	
	condición	tratamiento para aliviar tensiones	
	diámetro interno [mm]	8.433	
	diámetro externo [mm]	9.703	
parámetros de irradiación	máx. potencia lineal [W/cm]	260	
	flujo rápido [(n/cm ² s)/(W/cm)]	5.41 × 10 ¹¹	5.29 × 10 ¹¹
presión	presión interna de la barra [MPa]	2.62 (He)	
	presión del sistema [MPa]	15.51	

Tabla 1: Dimensiones, parámetros de irradiación y principales características de la serie de experimentos US-PWR (Lyon y Turnbull, 2005)

ron un trabajado en frío del 60 %, 10 $[\mu\text{m}]$ de tamaño de grano y de Fong (2013) se obtuvieron los factores de Kearns $f_{zz} = 0,18$, $f_{rr} = 0,54$ y $f_{\theta\theta} = 0,28$. La distribución de porosidad de la pastilla no se encontraba disponible, por lo que a partir del tamaño de grano del combustible, el código selecciona una distribución de las que tiene por *default*.

La información sobre la historia de potencia y los resultados postirradiación, se suministraron dividiendo en 25 zonas o sectores a las barras combustibles (aunque no todas las zonas presentaron medidas experimentales). En la Figura 2 a) se muestran las historias de potencia, promediada a lo largo de las barras combustibles, para los dos experimentos analizados: TSQ002 y TSQ022. En los extremos de las barras la potencia fue de 0.6 veces la potencia promedio y en el centro de 1.1 veces, aproximadamente. Si bien no existe una diferencia importante entre las potencias promedios en ambos experimentos, la barra TSQ022 consistió en pastillas huecas. Este efecto puede observarse en la Figura 2 b), en donde se muestran las temperaturas centrales promedio obtenido por medio del cálculo (en el caso de pastilla huecas, las temperaturas se evalúan en la periferia del hueco). Aquí se observa que la temperatura es menor para TSQ022 que para TSQ002, con una diferencia entre 150 y 200 [K]. Lamentablemente, no se reportaron mediciones de temperatura para las pastillas en los informes, pero como veremos a continuación, el resto de los parámetros analizados presentan un buen acuerdo al comparar las simulaciones realizadas en este trabajo con los datos experimentales disponibles.

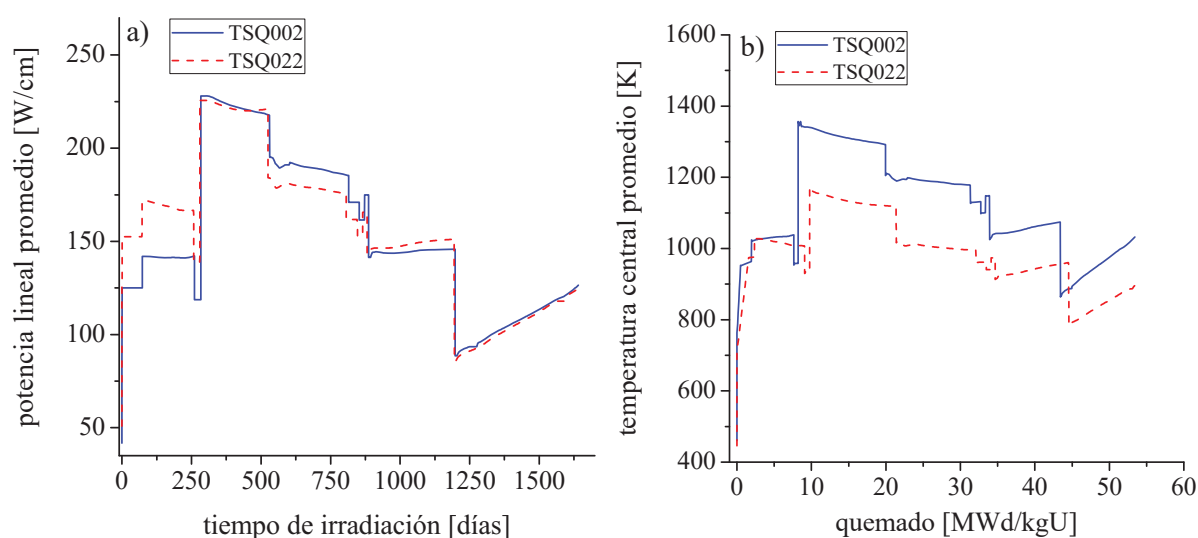


Figura 2: Potencia lineal promedio en función del tiempo y en b) evolución de temperatura central promedio de las barras TSQ002 y TSQ022 de los experimentos US-PWR 16x16 LTA.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros más relevantes medidos experimentalmente y los resultados obtenidos por medio del cálculo computacional. Se puede observar que existe un buen acuerdo general entre los valores obtenidos con el código y los medidos experimentalmente para las diferentes variables analizadas. En particular, el valor experimental de FGR (*Fission Gas Release*) indicado corresponde a una estimación en base a otras barras combustibles utilizadas. En los casos evaluados, existe una sobre-estimación de este parámetro, debido a que la liberación por debajo del 10 % es difícil de predecir mediante código de combustible por la cantidad de incertidumbres presentes en las variables empleadas. Sin embargo, siguiendo la sugerencia de evaluación de Pastore et al. (2015), los bajos valores obtenidos con DIONISIO son satisfactorios. En cuanto al *swelling* de las pastillas, se analizaron en dos secto-

res: 3 y 18, que corresponden a los sectores inferior y superior, respectivamente. Los resultados obtenidos para el hinchamiento se encuentra dentro de la banda de error medida. Por otro lado, los resultados computacionales obtenidos para las variables que intervienen en la corrosión de la vaina (espesor de óxido y captura de hidrógeno) presentan un muy buen acuerdo con los datos experimentales.

parámetro	TSQ002		TSQ022	
	exp.	sim.	exp.	sim.
Vol. libre inicial [cm ³]	25.42	24.47	37.22	37.18
Vol. libre final [cm ³]	17.8	17.42	31	29.02
Quemado promedio [MWd/kgU]	53.2	53.43	58.1	55.03
FGR [%]	<0.8	4.6	<0.8	3.0
Espesor de óxido máx. [μ m]	50 \pm 4	47	44 \pm 4	43.5
Captura de H máx. [ppm]	410 \pm 20	424	360 \pm 20	393
$(\Delta D/D_0)_{vaina}$	-0.69	-0.69	-0.65	-0.71
<i>swelling</i> [%] sector 3	2.6 \pm 0.7	2.48	2.4 \pm 0.7	2.07
<i>swelling</i> [%] sector 18	2.5 \pm 0.6	2.75	2.3 \pm 0.4	2.39

Tabla 2: Selección de los resultados obtenidos para los experimentos US-PWR (Lyon y Turnbull, 2005)

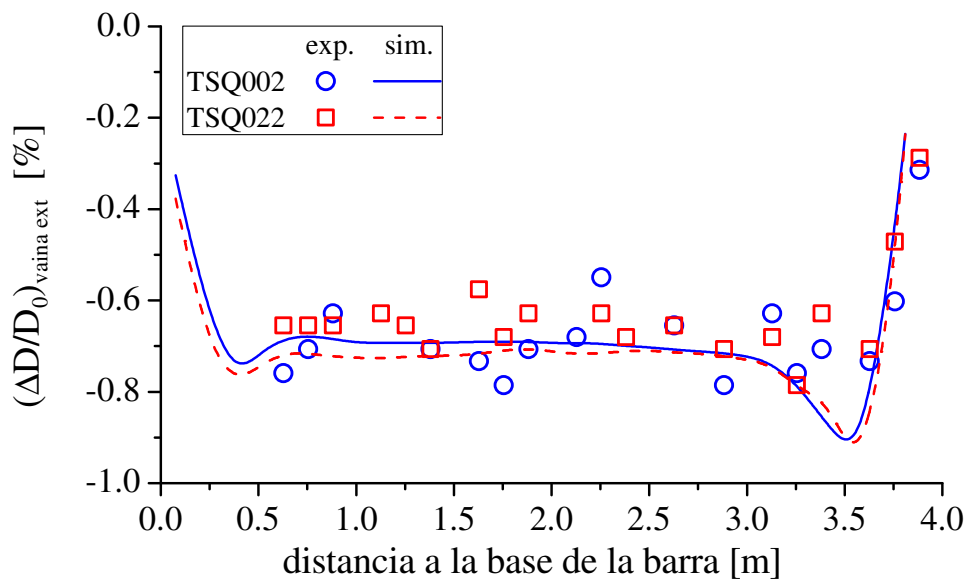


Figura 3: Perfil de la deformación relativa del diámetro exterior de la vaina a lo largo de la barra combustible para los casos TSQ002 y TSQ022.

En la Figura 3 se presenta el perfil de la deformación porcentual relativa de las vainas para dos casos US-PWR. Los valores mostrados corresponden al diámetro exterior corregido, es decir, eliminando la presencia de óxido tanto en los datos medidos como en los simulados. Se observan ciertas desviaciones para el caso con pastillas huecas, aunque las diferencias en promedio son menores al 10%. Esto es consecuencia de que el *swelling* obtenido no alcanza a compensar la deformación negativa debido al *creep* y componente radial del crecimiento por irradiación en el mismo grado que sucede en el experimento. Sin embargo, se han obtenido buenos resultados con la nueva versión del código DIONISIO.

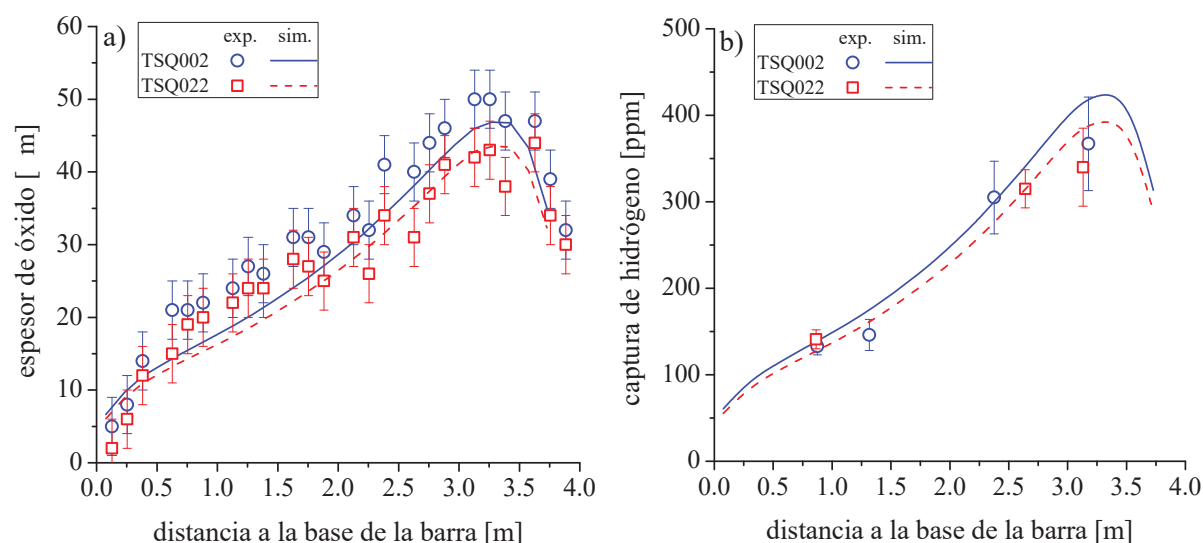


Figura 4: Perfil final del espesor de óxido (a) y de la captura de hidrógeno asociada (b) de las barras TSQ002 y TSQ022 de los experimentos US-PWR 16x16 LTA.

En general no se dispone de los datos experimentales de la temperatura externa en el *cladding*, por lo que en este trabajo se evalúa el comportamiento termohidráulico a partir de variables relacionadas. En las Figuras 4 a) y b) se muestran los perfiles finales para el espesor del óxido de zirconio y la captura de hidrógeno. Los errores experimentales para las mediciones de óxido son ± 4 [μm] (nivel de confianza de 1σ), mientras que para la captura de hidrógeno oscilan entre 10 y 54 [ppm] (Krasnorutskyy y Slyepton, 2009). Se observa un buen acuerdo entre los valores medidos y los calculados para ambos casos. Por un lado, se puede notar que los niveles alcanzados de espesor y de hidrógeno son menores en los casos de pastillas huecas, debido principalmente a una menor temperatura desarrollada, por lo que los fenómenos térmicamente activados se ven ralentizados. Este comportamiento también se evidencia experimentalmente. En a), se notan ciertas desviaciones en el cálculo, en especial entre 0.5 y 2.0 [m] desde la base de la barra. Esto fue analizado por Krasnorutskyy y Slyepton (2009), quienes evaluaron sus códigos con modelos para incluir los productos de corrosión que son arrastrados por el refrigerante y depositados en la vaina (CRUD), alcanzando una leve mejora en dicha zona. Aun cuando se sugiere contemplar el CRUD sobre la vaina para estos casos en particular, este fenómeno no está indicado en las observaciones en el reporte técnico del experimento.

A pesar de las desviaciones observadas, la nueva versión del código presenta un comportamiento satisfactorio capturando con detalles los principales fenómenos.

3. SIMULACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS OSIRIS

Los experimentos bajo la sigla NEA-1622 IFPE/OSIRIS se componen de cuatro barras combustibles tipo PWR irradiadas en el reactor OSIRIS, destinadas al estudio de la oxidación y deformación de la vaina, la liberación de gases de fisión y el hinchamiento, entre otros. En este caso, se estudió el comportamiento de las barras designadas G07 y H09 que fueron irradiadas hasta alcanzar un quemado promedio de ~ 34.8 y ~ 46 [MWd/kgU], respectivamente.

En la Tabla 3 se indican las geometrías y condiciones operacionales generales para las barras G07 y H09.

No se especificó el tratamiento termomecánico de la vaina de Zircaloy-4, por lo que se usaron

ítem	parámetro	G07	H09
combustible	material	UO ₂	
	largo [mm]	13.741	14.020
	diámetro [mm]	8.193	8.190
	tamaño de grano [μm]	10.20 - 12.40	8.83 - 10.02
	longitud activa [m]	~3.66	
	enriquecimiento ²³⁵ U %	4.488	3.249
	densidad [% TD]	95.45	95.30
Vaina	material	Zircaloy-4	
	diámetro interno [mm]	8.357	8.350
	diámetro externo [mm]	9.490	9.508
plenum	largo [cm]	16.10	16.41
parámetros de irradiación	pot. media temporal [W/cm]	210	190
	flujo rápido [(n/cm ² s)/(W/cm)]	$3.8 \times 10^{11} - 4.8 \times 10^{11}$	
presión	presión interna de la barra [MPa]	2.5 (He)	3.1 (He)
	presión del sistema [MPa]	15.51	
refrigerante: agua	temperatura de ingreso [°C/K]	287.7/560.85	
	flujo másico [kg/cm ² s]	0.3606	

Tabla 3: Dimensiones, parámetros de irradiación y principales características de la serie de experimentos OSIRIS (Menard, 1998a,b)

los mismos parámetros que en el caso descrito anteriormente.

parámetro	G07	H09
tipo	bimodal	bimodal
r_g [μm]	5.65	4.65
r_{medv1} [μm]	1.0	1.0
r_{medv2} [μm]	10.0	10.0
porosidad 1 ^{er} pico [%]	4.0	3.2
porosidad 2 ^{do} pico [%]	0.55	1.5
porosidad total [%]	4.55	4.7

Tabla 4: Parámetros de la distribución inicial de porosidad usados en las simulaciones

En cuanto a la porosidad inicial de las pastillas, cierta información estaba disponible, por lo que basándonos en esos datos se seleccionaron distribuciones bimodales. En la Tabla 4 se encuentran los parámetros utilizados y en la Tabla 5 una comparación de la porosidad acumulada entre la distribución inicial simulada y la informada en los experimentos. En ambos casos, la porosidad acumulada se encuentra normalizada para que la porosidad máxima coincida con la porosidad obtenida a partir de la densidad en [% TD]. Esto se debe a que, generalmente, puede haber diferencias en la porosidad medida por medio de conteo de poros con la medida geoméricamente o por inmersión en agua o alcohol (Cazado, 2019). En la comparación para la distribución inicial de porosidad de estos combustibles, se observa una sobreestimación para el rango de radios de poros entre 1 y 2.5 [μm] y en consecuencia una subestimación en el rango entre 2.5 y 5 [μm]. Este efecto ocurre en aquellos combustibles con distribuciones anchas de porosidad, que el modelo actual no logra capturar. Si bien los resultados obtenidos son razonables, nuevas distribuciones se deberían incorporar al modelo de densificación.

radio de poros [μm]	G07		H09	
	porosidad [%]			
	exp.	sim.	exp.	sim.
0 - 1	1.21	1.31	1.30	1.79
1 - 2.5	1.27	2.46	1.04	1.37
2.5 - 5	1.61	0.29	0.82	0.20
5 - 142.5	0.46	0.49	1.54	1.34

Tabla 5: Comparación de la distribución inicial de porosidad experimental y calculada para los experimentos OSIRIS

Para los experimentos analizados aquí, las barras fueron divididas axialmente en 18 sectores irregulares para indicar la historia de potencia y los resultados postirradiación. En la Figura 5 a) se muestran las historias de potencia, promediada a lo largo de las barras combustibles en función del tiempo de irradiación. En los extremos de las barras la potencia fue de 0.5 veces el valor promedio indicado y en las zonas centrales de 1.1 veces, aproximadamente. En la Figura 5 b) se muestran las temperaturas centrales para el sector más exigido de ambas barras, que corresponde al sector 8 (entre 1.2 y 1.8 [m] desde la base de la barra). Las temperaturas alcanzadas para la barra G07 son superiores que en H09 luego de los 7 [MWd/kgU], debido a que la potencia es mayor. Se puede observar, en particular, que para G07 entre 7 y 21 [MWd/kgU] de quemado, la temperatura desciende aun cuando la potencia se mantiene constante. Esto se produce como consecuencia de la reducción del *gap*, lo que aumenta la extracción del calor por el refrigerante (Ver Figura 6). A partir de los 21 [MWd/kgU], si bien el *gap* se cierra, la variación de volumen debido al *swelling* hace que se produzca un aumento en la porosidad y, por lo tanto, descienda la conductividad térmica de la pastilla combustible. El efecto de la reducción del *gap* para H09 es mucho menor, por lo que la variación de temperatura en relación a esto es menor. A partir de 10 [MWd/kgU] existe una tendencia a aumentar la temperatura central de la pastilla cuando la potencia se mantiene constante y se debe al aumento de porosidad por *swelling*.

La evolución de la variación relativa de volumen porcentual de la pastilla y del *gap*, para el sector más exigido de ambas barras, se encuentran en la Figura 6. En primer lugar, se muestra

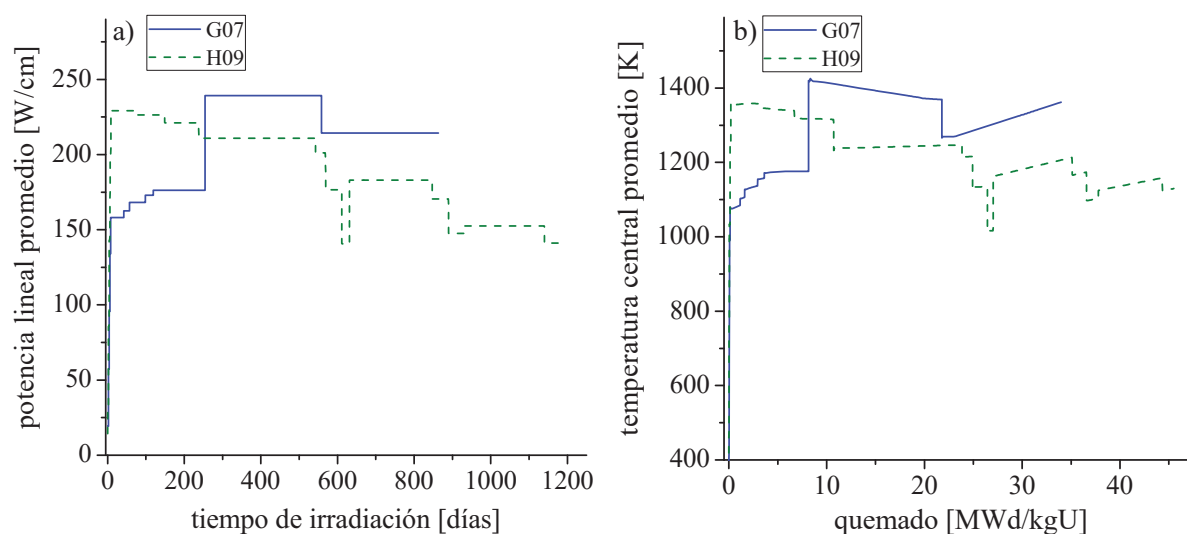


Figura 5: Potencia lineal promedio en función del tiempo (a) y evolución de temperatura central para el sector más exigido de las barras G07 y H09 de los experimentos OSIRIS (Menard, 1998a,b)

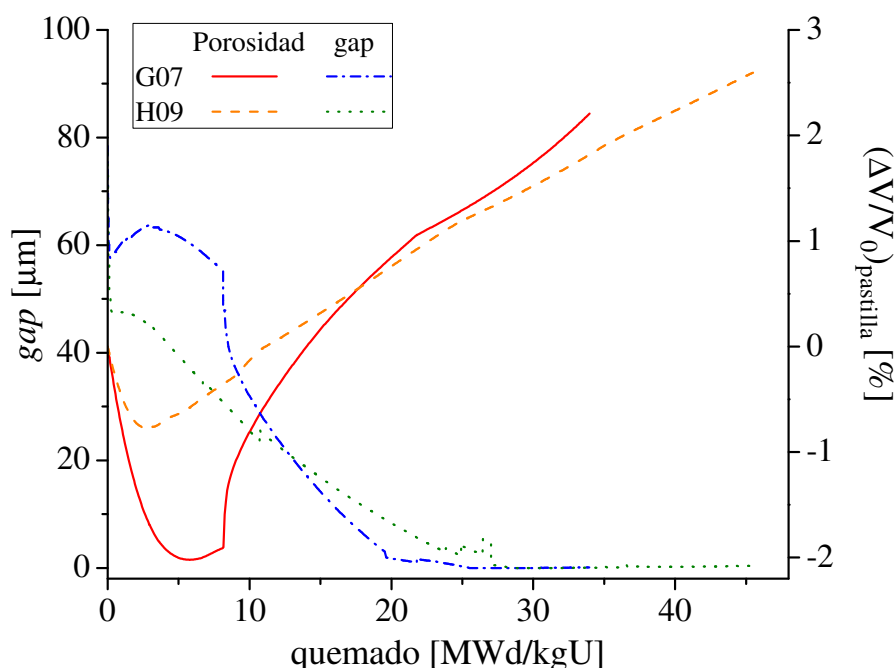


Figura 6: Evolución del *gap* (a) y de la variación de volumen de una pastilla del sector más exigido para las barras G07 y H09

una abrupta reducción del volumen de la pastilla para G07 causado por la densificación y luego rápidamente crece como consecuencia del hinchamiento. En este sentido, el *gap* desciende rápidamente en unos primeros instantes debido a la dilatación térmica del conjunto pastilla-vaina, pero luego a causa de la densificación crece levemente para posteriormente decrecer por aumento del volumen de la pastilla. Por otro lado, para H09, la densificación es menor y no logra superar al *creep* por irradiación de la vaina para que el *gap* aumente como en el caso anterior, si no que este desciende con menor velocidad hasta que luego se hace más pronunciado por el hinchamiento.

parámetro	G07		H09		
	exp.	sim.	exp.	sim.	
Quemado promedio [MWd/kgU]	34.8	36.6	46.0	45.3	
FGR [%]	0.49	6.02	0.8	3.63	
Espesor de óxido máx. [μm]	30.9	28.9	59.8	58.8	
Captura de H máx. [ppm]	362	310	471	582	
swelling [%]	sector 6	-	2.98	2.2 ± 0.4	2.82
	sector 8	2.2	2.21	-	-
	sector 10	-	1.95	2.4	2.42
	sector 12	-	1.77	2.5 ± 0.2	2.56

Tabla 6: Selección de los resultados obtenidos para los experimentos OSIRIS (Menard, 1998a,b)

En la Tabla 6 se presentan algunas comparaciones para diferentes parámetros obtenidos en los experimentos OSIRIS. En general, los resultados obtenidos con el código presentan buen acuerdo al comparar con los datos experimentales. Al igual que en los casos analizados anteriormente, existe una sobreestimación en los valores de FGR para ambas barras. Además, para el caso H09 el máximo valor del contenido de hidrógeno calculado es 24 % mayor que

el medido, aunque no se reportaron desviaciones estándar para estos valores. Para las medidas de *swelling* disponible, los valores obtenidos son satisfactorios considerando las diferencias señaladas previamente en cuanto a la distribución inicial de porosidad de fabricación.

El perfil del espesor del óxido para las barras estudiadas se indican en la Figura 7. Existe un buen acuerdo general entre los cálculos y las medidas experimentales. Las mayores desviaciones ocurren en la zona inferior de la barra H09 en donde los datos medidos son ligeramente superiores a los calculados, mientras que ocurre una ligera subestimación en el cálculo en la zona inferior para la barra G07. Las fuertes depresiones en la medida del óxido que ocurre de forma oscilatoria en los datos experimentales ocurren en los sectores cortos de la barra. Dichos sectores corresponden a los espaciadores de las barras, por lo que en esas zonas la potencia se ve fuertemente reducida. DIONISIO en sí puede considerar sectores de diferentes longitudes, mientras que la nueva subrutina termohidráulica incorporada solo considera zonas axiales regularmente divididas. Esto hace que parte de esta información se pierda en las interpolaciones lineales que se realizan en el código durante la transferencia de información entre las subrutinas involucradas, a menos que las longitudes de los sectores tratados por el módulo termohidráulico sean iguales al mínimo sector en DIONISIO aumentando considerablemente los nodos requeridos en este caso en particular. Sin embargo, a pesar de estas diferencias se logra un buen comportamiento del código.

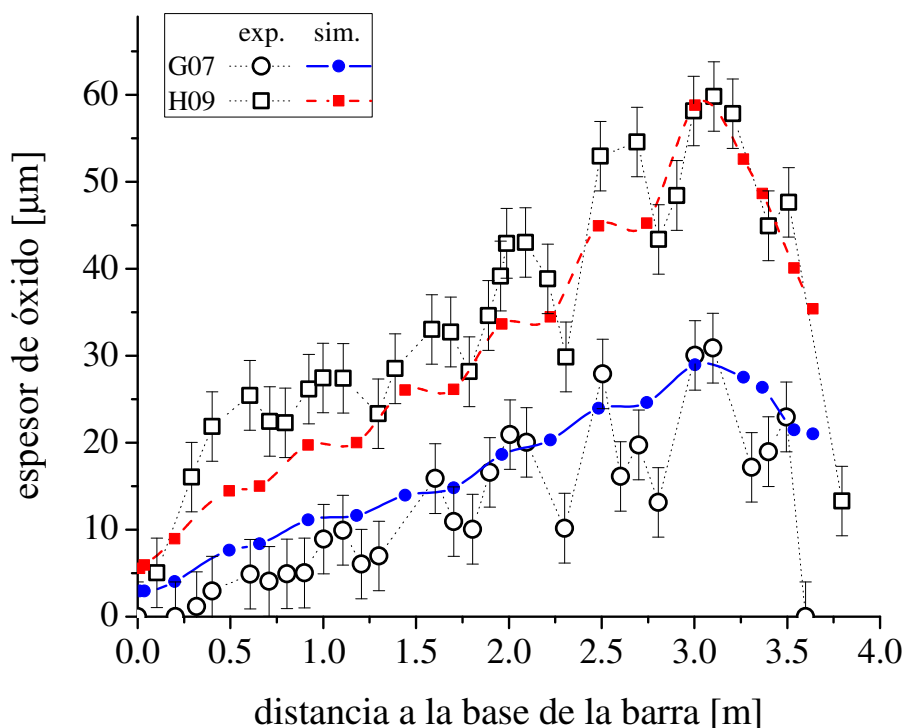


Figura 7: Perfil del espesor del óxido para las barras G07 y H09. Las barras de error corresponden a ± 4 [μm], tomando como referencia las medidas del experimento OSIRIS (Menard, 1998a,b)

En las Figuras 8 a) y b) se presentan las variaciones relativas del diámetro exterior de la vaina con el óxido desarrollado incluido y aplicando una corrección para no considerarlo. En ambas barras, se puede observar un muy buen acuerdo, a pesar de las diferencias que se observan, en especial en la barra G07.

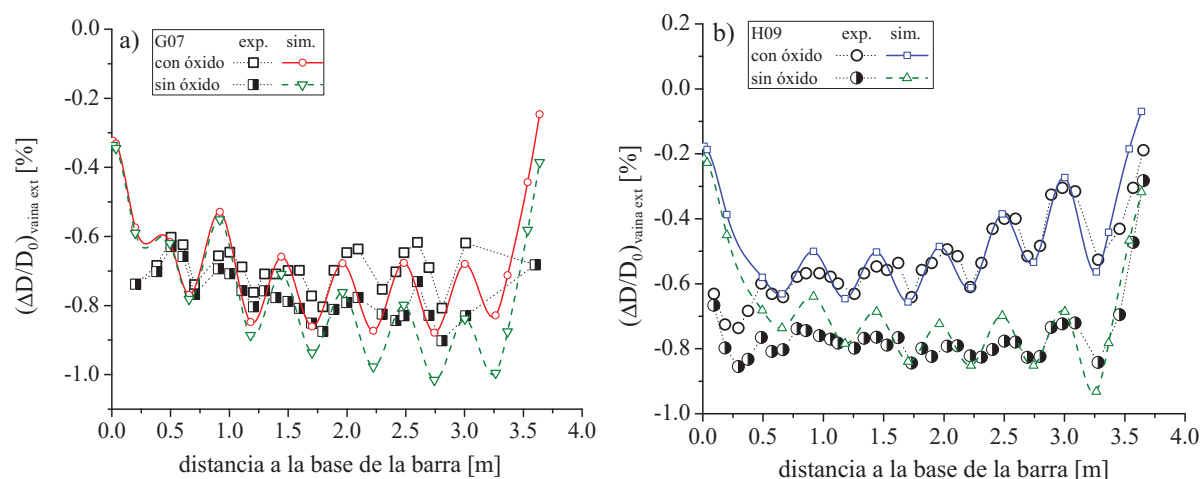


Figura 8: Perfil de la variación relativa del diámetro exterior de las barras G07 y H09 de los experimentos OSIRIS (Menard, 1998a,b). Se indican las variaciones con y sin capa de óxido.

4. CONCLUSIONES

Como pudo verse en la comparación del código DINISIO con los resultados de los experimentos de barras combustibles integrales, la nueva versión utilizada permite realizar una descripción detallada y realista de los procesos que se desarrollan en una barra irradiada. Existen aún nuevas mejoras que deben implementarse para reducir las incertidumbres en algunos modelos y para ampliar el rango de validez de los mismos. Sin embargo, los resultados obtenidos para los diferentes parámetros muestran un comportamiento satisfactorio del código.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Asociación Estratégica UNSAM-KIT (SPUK) y parcialmente por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, Argentina (PICT-2018-01568).

REFERENCIAS

- CAREM. Reactor argentino CAREM. 2018.
- Cazado M.E. *Evolución microestructural en pastillas combustibles bajo irradiación. Master's Thesis ITS/TM 206/19*. Master thesis, Universidad Nacional de San Martín, 2019.
- Cazado M.E. *Simulación multi-escala del comportamiento de elementos combustibles en condiciones de irradiación dentro de un reactor nuclear. ITS/TD-166/23*. Ph.d. thesis, Universidad Nacional de San Martín, 2023.
- Denis A. y Soba A. Simulation of pellet-cladding thermomechanical interaction and fission gas release. *Nuclear Engineering and Design*, 223(2):211–229, 2003. ISSN 0029-5493. doi:10.1016/S0029-5493(02)00390-4.
- Fong R.W.L. Anisotropy factors from texture and mechanical strain in Zircaloy-4 fuel sheaths. *Journal of Nuclear Materials*, 440:288–297, 2013. doi:10.1016/j.jnucmat.2013.04.089.
- FUMAC. *Fuel Modelling in Accident Conditions (FUMAC)*. número 1889 En TECDOC Series. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2019. ISBN 978-92-0-163919-6.
- Goldberg E., Loza Peralta M.E., y Soba A. DIONISIO 3.0: Comprehensive 3D nuclear fuel simulation through PCMI cohesive and PLENUM models. *Journal of Nuclear Materials*,

- 523:121–134, 2019. ISSN 0022-3115. doi:10.1016/j.jnucmat.2019.06.005.
- Killeen J., Sartori E., y McGrath M. FUMEX-III: A new IAEA Coordinated Research Project on Fuel Modelling at Extended Burnup. En *Proceedings of the Water Reactor Fuel Performance Meeting - WRFPM / Top Fuel 2009*. Paris, France, 2009.
- Krasnorutskyy V. y Slyeptson O. Fuel Rod Performance Evaluation of CE 16x16 LTA Operated at Steady State using TRANSURANUS and PAD Codes. Informe Técnico, 2009.
- Lemes M., Denis A., y Soba A. Simulation of Nuclear Fuel Behavior in Accident Conditions With the DIONISIO Code. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 5(2), 2019. ISSN 2332-8983. doi:10.1115/1.4042705.
- Lemes M., Soba A., Daverio H., y Denis A. Inclusion of models to describe severe accident conditions in the fuel simulation code DIONISIO. *Nuclear Engineering and Design*, 315:1–10, 2017. ISSN 0029-5493. doi:10.1016/j.nucengdes.2017.02.015.
- Lyon W.F. y Turnbull J. *IFPE/US-PWR-16 X 16 Lead Test Assembly Extended Burnup Demonstration Program*. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2005.
- Menard M. *Rapport d'Assurance Qualite Crayon FF06E2BV/G07/1067*. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 1998a.
- Menard M. *Rapport d'Assurance Qualite Crayon FF0EFELX/H09/5007*. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 1998b.
- Pastore G., Swiler L.P., Hales J.D., Novascone S.R., Perez D.M., Spencer B.W., Luzzi L., Van Uffelen P., y Williamson R.L. Uncertainty and sensitivity analysis of fission gas behavior in engineering-scale fuel modeling. *Journal of Nuclear Materials*, 456:398–408, 2015.
- RA-10. Reactor multipropósito RA-10. 2018.
- Rotea F., Cazado M., y Soba A. Avances en el modelado del hinchamiento de pastillas combustibles bajo irradiación. En *XXXVIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, páginas 1142–1150. MECOM, 2022. ISSN 2591–3522.
- Soba A. y Denis A. Model of fracture for the Zry cladding of nuclear fuel rods included in the code DIONISIO 1.0. *Nuclear Engineering and Design*, 238(12):3292–3298, 2008a. ISSN 0029-5493. doi:10.1016/j.nucengdes.2008.06.026.
- Soba A. y Denis A. Simulation with DIONISIO 1.0 of thermal and mechanical pellet-cladding interaction in nuclear fuel rods. *Journal of Nuclear Materials*, 374(1):32–43, 2008b. ISSN 0022-3115. doi:10.1016/j.jnucmat.2007.06.020.
- Soba A. y Denis A. Contacto intermitente y localizado entre dos superficies. Aplicación al caso de la interacción pastilla-vaina (PCI) en un combustible nuclear de potencia. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 25(1), 2009.
- Soba A., Denis A., Lemes M., y Gonzalez M.E. Modelado del comportamiento del combustible nuclear bajo irradiación mediante DIONISIO 2.0. *Revista de la CNEA*, (53–54), 2014.
- TRIBULATION N..I. Fuel rod behaviour at high burnup. Informe Técnico, 2002.
- Williamson R.L., Hales J.D., Novascone S.R., Tonks M.R., Gaston D.R., Permann C.J., Andrs D., y Martineau R.C. Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *Journal of Nuclear Materials*, 423(1):149–163, 2012. ISSN 0022-3115. doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.01.012.