

SIMULACIÓN DE UNA BARRA COMBUSTIBLE NUCLEAR EN CONDICIONES DE ALTA EXIGENCIA MEDIANTE EL CÓDIGO DIONISIO 2.3. FUTURO ENSAYO EN EL DISPOSITIVO DE IRRADIACIÓN DEL RA-10

SIMULATION WITH THE DIONISIO 2.3 CODE OF A NUCLEAR FUEL ROD IN HIGHLY DEMANDING CONDITIONS. FUTURE TESTING IN THE IRRADIATION FACILITY OF THE RA-10.

Martín Lemes^a, Alicia Denis^a, Luis Vázquez^b y Alejandro Soba^a

^a*Sección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, lemes@cnea.gov.ar, denis@cnea.gov.ar, soba@cnea.gov.ar*

^b*Gerencia Ingeniería Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Bariloche, lvazquez@cnea.gov.ar*

Palabras clave: Código DIONISIO, RA-10, Combustible nuclear, termohidráulica

Resumen. Durante los últimos años se han incorporado al código DIONISIO modelos que permiten analizar y cuantificar el comportamiento del fluido en un canal de refrigeración en función de la presión, la velocidad y el flujo del fluido. En un escenario de alta exigencia, el sistema puede registrar una disminución rápida de la presión y/o de la velocidad de circulación del refrigerante, dificultando la remoción del calor acumulado en las barras combustibles, lo que puede ocasionar un incremento en la temperatura. Como consecuencia, la vaina puede sufrir diversos fenómenos como crecimiento de nuevas fases, incremento de la capa de óxido, captura y liberación de hidrógeno debido a la disociación del vapor, deformaciones axiales y radiales, que pueden conducir al fenómeno de englobamiento (*ballooning*), entre otros. Con el propósito de extender el rango de aplicación del código a condiciones de alta exigencia para el combustible, se han simulado diversas situaciones de este tipo, cuyos resultados se presentan en este trabajo. Dichas condiciones podrán ser, además, reproducidas en el dispositivo de irradiación con que contará en el futuro el Reactor Nuclear Argentino Multipropósito RA-10, que se encuentra actualmente en construcción, a fin de validar las predicciones del código.

Keywords: DIONISIO code, RA-10, nuclear fuel, thermohydraulics

Abstract. During the latest years diverse models have been incorporated to the DIONISIO code to analyze and quantify the behavior of the coolant in a channel in terms of the pressure, velocity and flow rate of the fluid. In highly demanding conditions, the system pressure and/or coolant velocity can suffer a sudden decrease, hindering heat removal thus provoking temperature increase. As a consequence, the cladding can suffer several phenomena like growth of new phases, increase of the oxide layer thickness, hydrogen uptake and release due to water vapor dissociation, axial and radial strain that can lead to ballooning, among others. With the purpose of extending the application range of the code to high demand conditions, several situations of this type have been simulated, which results are presented in this work. The irradiation device that will be installed in the Argentine Multipurpose Nuclear Reactor RA-10, presently under construction, will allow testing such conditions, in order to validate the code predictions.

1 INTRODUCCIÓN

La Sección Códigos y Modelos de la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), viene desarrollando desde hace más de una década el código DIONISIO (Denis, A. Soba, A., 2003, Denis, A. Soba, A., 2003, Soba, A. and Denis, 2006; Soba, A., 2007; Soba and Denis, 2008), destinado a la simulación del comportamiento de una barra combustible bajo irradiación en un reactor de potencia en condiciones de operación normal y de quemado extendido (Soba and Denis, 2015; Lemes, Soba and Denis, 2015). El código está basado en tecnología de elementos finitos para discretizar los dominios involucrados y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales relacionadas con cada problema. Sin embargo, no es el único método numérico que utiliza ya que posee modelos resueltos en diferencias finitas, emplea interpolación y extrapolación lineal, métodos de integración no lineales en el tiempo mediante algoritmos de Runge-Kutta, entre otros. El código analiza las principales situaciones termohidráulicas, termomecánicas y termoquímicas a las que el combustible nuclear se ve sometido durante su permanencia en operación dentro del reactor.

El código posee, además, una versión destinada a la simulación del combustible típico de un reactor de investigación, tanto para el caso de material fisible en forma de placa monolítica como dispersa (Soba A. and Denis A., 2007).

En su última versión, DIONISIO 2.3, se ha incorporado una subrutina que es una versión simplificada de un programa termohidráulico. Ella contiene modelos para analizar y cuantificar el comportamiento de una barra combustible estándar tipo PWR (Pressurized Water Reactor) y el canal de refrigeración circundante, considerando las propiedades del fluido en distintos regímenes, en simple (líquido o vapor) y doble fase, en los diferentes sectores axiales de la barra (Lemes et al., 2017; Lemes, M., Denis, A., Soba, A., 2018). Esto permite extender la aplicabilidad del código a casos que exceden los de operación normal. Los modelos incorporados describen condiciones no estacionarias, donde los principales parámetros del sistema varían abruptamente. Las propiedades del refrigerante, su velocidad, régimen de flujo y presión adoptan modos que afectan fuertemente las condiciones de extracción de calor en la superficie de la vaina. Desde el punto de vista del cálculo, ellas están descritas por ecuaciones no lineales y han requerido modificaciones sustanciales en la programación.

Para el cálculo térmico de la barra se consideran diferentes fuentes de calor. Dentro de la pastilla de UO_2 , éste se produce, durante la operación, por las reacciones de fisión o, luego de la caída de las barras de control (*scram*), por decaimiento beta y gamma. En la vaina, la generación de calor proviene de la reacción exotérmica de oxidación de su superficie externa. Para calcular el flujo de calor entre la vaina y el refrigerante, el modelo considera un coeficiente efectivo de transferencia de calor dependiente de las condiciones del fluido en el canal, principalmente fracciones de vapor, presión y flujo de refrigerante (Lemes, Soba y Denis, 2014; Lemes, Soba y Denis, 2016; Lemes, Soba y Denis, 2017). Luego calcula los cambios físicos y químicos que sufre la vaina, que se supone constituida por una aleación de base Zr, en el rango de las altas temperaturas típicas de un accidente: cambios de fase por captura de oxígeno (α -Zr, β -Zr) y oxidación superficial (ZrO_2), captura y liberación de hidrógeno, deformación por *creep* y, eventualmente *ballooning*, si la presión interna debida a los gases de fisión es suficientemente alta y, en casos muy severos, rotura catastrófica del revestimiento (*burst*).

El código en su nueva versión ha sido comparado con un gran número de experimentos en condiciones de operación normal y de transitorios rápidos y ha participado en ejercicios internacionales de intercomparación de códigos de combustibles en condiciones de accidente. En particular, se menciona el CRP-FUMAC que se realizó entre 2014 y 2018 (Veshchunov, M., 2018) con el patrocinio del OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica). No obstante, la tarea de validación de un código, particularmente con la complejidad que ya alcanzó DIONISIO, requiere numerosas comprobaciones y para ello, la posibilidad de contar con un dispositivo de experimentación representaría una ayuda de enorme valor. En este sentido, y como parte del proyecto RA-10, se está diseñando un dispositivo de irradiación que permitirá emular en dicho reactor las condiciones de un reactor de potencia.

En este trabajo se presentan algunas propuestas de irradiaciones que podrían realizarse en dicho dispositivo y los resultados que DIONISIO predice para ellas. Diferentes escenarios en condiciones de operación con disminución en la presión del sistema, disminución del caudal de refrigerante y disminución de la potencia son considerados con el objetivo evaluar el comportamiento térmico del combustible, la vaina y el fluido refrigerante en condiciones de alta exigencia.

2 LOOP DE IRRADIACION DEL RA-10

El reactor RA-10 es un reactor experimental multipropósito (Blaumann et al., 2012) de 30 MW, de piscina abierta, actualmente en construcción en el predio de Ezeiza de la CNEA, diseñado íntegramente en la República Argentina. El núcleo es una matriz cuadrada de 5x5 con 19 elementos combustibles de tipo MTR (Materials Testing Reactor) que consisten en placas de siliciuro de uranio revestidas de aluminio. Las placas combustibles están dispuestas en forma paralela, dejando canales intermedios por los que, por medio de un flujo forzado de agua ascendente, se extrae el calor producido por las fisiones. El núcleo se encuentra contenido en la parte inferior de una pileta abierta de agua desmineralizada que proporciona refrigeración y protección contra la radiación del núcleo a los operarios en boca de tanque. El núcleo a su vez se encuentra rodeado por un tanque reflector que contiene agua pesada que posibilita un alto flujo de neutrones térmicos para los diferentes dispositivos de irradiación. Estos dispositivos, denominados *facilidades*, que se observan en la Figura 1.a, están dispuestos alrededor del núcleo con distintas finalidades: obtención de radioisótopos de uso medicinal o industrial (molibdeno, iridio, lutecio, etc.), dopado de silicio, direccionamiento de haces de neutrones y un dispositivo de irradiación denominado *loop*.

El *loop* es una facilidad de irradiación de barras combustibles de reactores de potencia en el cual se controlan y garantizan las condiciones de presión, temperatura y química del refrigerante en diferentes condiciones de operación. El objetivo del *loop* abarca la investigación y el desarrollo en áreas de daño por radiación, corrosión, nuevos materiales y calificación de nuevos elementos combustibles, dando soporte a grupos de ingeniería y validación de códigos de cálculo específicos.

El *loop* está compuesto por un módulo de irradiación donde se colocan las barras combustibles a irradiar. El dispositivo se ubica cerca del núcleo, dentro del tanque reflector, como puede verse en la Figura 1, y cuenta con un sistema de cañerías (sistema primario) que genera las condiciones de operación del combustible tales como presión del sistema, temperatura, caudal y química del refrigerante, similares a las de un reactor de potencia.

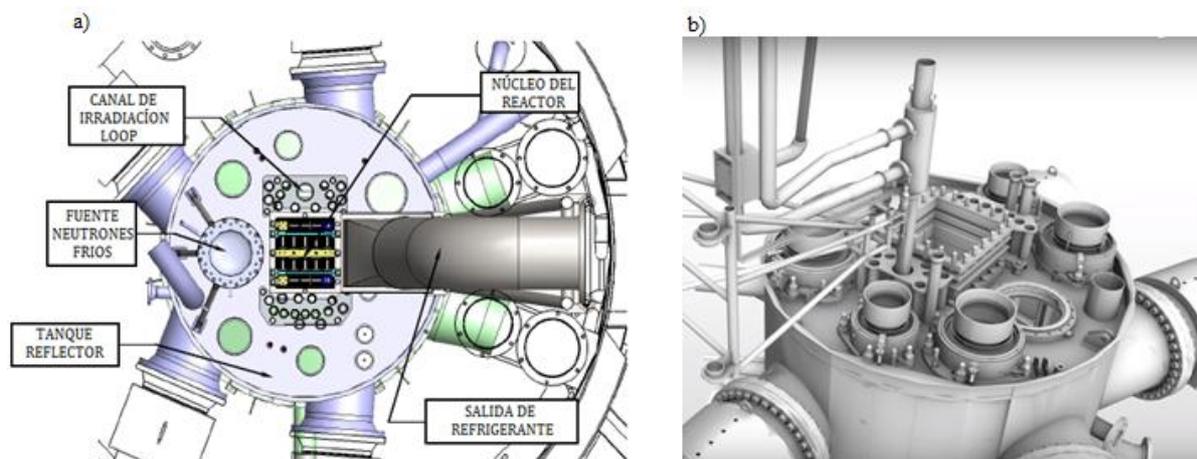


Figura 1: a) Vista superior del tanque reflector del RA-10 con sus principales componentes y facilidades. b) vista del tanque reflector y *loop* de irradiación con el sistema primario.

3 SIMULACION EN CONDICIONES DE ALTA EXIGENCIA

Con el propósito de consolidar la validación del código DIONISIO y ampliar su rango de aplicación, se han diseñado algunos experimentos ideales que, por una parte, representen condiciones de alta exigencia para el combustible y, por otra, puedan ser reproducidos en el dispositivo de irradiación con que contará el RA-10 en el futuro.

Para estas simulaciones se utilizó la nueva subrutina termohidráulica, recientemente incorporada en la versión DIONISIO 2.3. En este análisis se considera solamente el comportamiento térmico de la barra, evaluando la temperatura en diferentes puntos relevantes: en el centro de la pastilla, en el borde exterior de la vaina y en el seno del líquido en el canal refrigerante. Los escenarios considerados suponen condiciones de descenso de la presión del sistema, parada del reactor (*scram*) y caída del flujo refrigerante.

Para su ejecución se consideraron los diferentes parámetros geométricos del combustible descriptos en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Parámetros geométricos de la barra combustible considerados

Radio UO ₂ (cm)	0.607
Radio Interno Zry (cm)	0.612
Radio Externo Zry (cm)	0.6540
Canal efectivo por barra (cm)	0.8650
Pila de combustible (cm)	40.0
Tamaño de la barra combustible (cm)	50.0
Sectores considerados	10

Los principales datos de entrada para la ejecución del código son expuestos en la [Tabla 2](#).

Tabla 2. Datos de entrada para el caso a analizar

Barras combustibles (3)	CANDU.
Quemado promedio (MWd/KgU)	30.0
Long activa (cm)	40.0
Enriquecimiento	0.1
Presión inicial (Mpa)	14
Temperatura de entrada del ref.(°C)	320
Caudal (kg/seg)	0.8
Inventario de agua (kg)	150.0
Material circundante	Acero

Para evaluar el funcionamiento del código, se realizó un estudio paramétrico, que abarca diferentes aspectos. En primer lugar, se considera que las barras combustibles están sometidas a una historia inicial en operación normal hasta alcanzar quemados de entre 15 y 30 MWd/KgU. A continuación, se da inicio a la secuencia del evento en el cual la presión del sistema se mantiene constante en 14 MPa durante los primeros 20 s y luego desciende durante 60 o 120 s hasta alcanzar la presión atmosférica (Figura 2). Estos escenarios se complementan con distintos instantes de ocurrencia del *scram*: al cabo de 1, 10 y 20 s de comenzada la caída de presión. Por otro lado, también se contempla la posibilidad de una disminución del caudal previa al instante del *scram*, considerando caudales de 0.8, 0.4 y 0.1 kg/s que representan, respectivamente, el 100, 50 y 12.5% del caudal inicial.

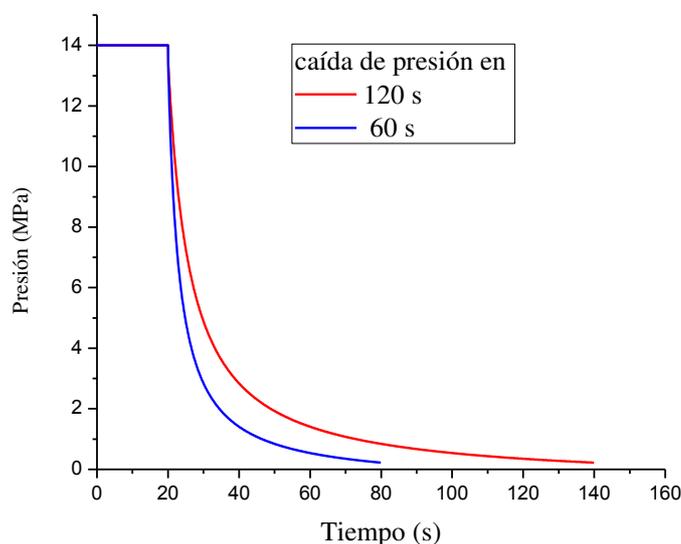


Figura 2. Historia de presión de sistema considerada en diferentes ejecuciones

Como ejemplo, en la Figura 3 se muestra el caso de caída de presión durante 60 s y *scram* a los 20 s de iniciado el descenso de la presión.

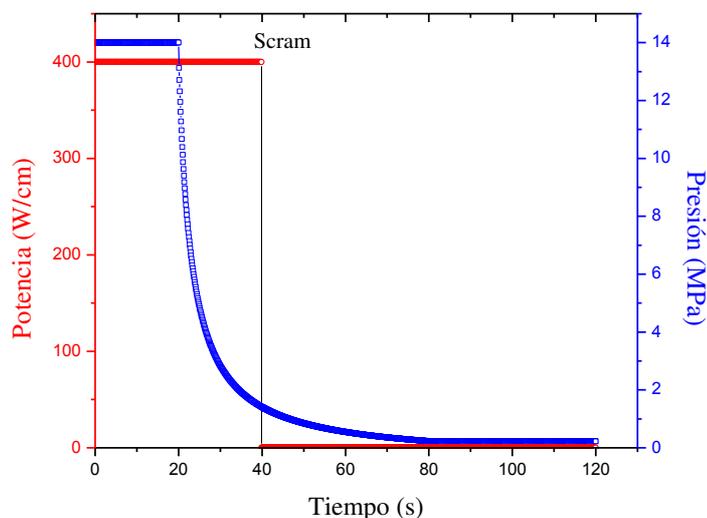


Figura 3. Historia de presión (azul) alcanzando la presión atmosférica luego de 60 s del inicio de la caída e historia de potencia (rojo); el *scram* ocurre luego de 20 s de comenzado el descenso de presión.

4 RESULTADOS

En esta sección se muestran los diferentes resultados obtenidos en las ejecuciones de DIONISIO con la nueva subrutina termohidráulica. Los escenarios analizados en el estudio paramétrico combinan los diferentes fenómenos descritos en la sección 3 actuando en forma simultánea, considerando diferentes duraciones de la caída de presión, magnitud de la disminución del flujo refrigerante antes del *scram*, como así también los instantes en que ocurre el *scram*.

En Figura 4 se observa la evolución de las temperaturas exterior de la vaina, promedio en el combustible y del refrigerante así como la calidad del vapor (fracción de vapor en volumen) en diferentes sectores axiales de la barra. El escenario propuesto considera que la caída de presión dura 60 s y el flujo del refrigerante desciende hasta el 12.5% del flujo inicial al momento del *scram* y supone diferentes instantes para el disparo del *scram*: al cabo de 1, 10 y 20 s del comienzo de la caída de presión. Allí se observa que durante los primeros 20 s, mientras las condiciones de operación (presión del sistema, caudal y potencia) se mantienen fijas, la temperatura de la vaina, del combustible y del refrigerante en los distintos sectores, así como las fracciones de vapor, se mantienen constantes. Luego de ese lapso, comienza el descenso de la presión del sistema y del flujo refrigerante, mientras se mantiene la potencia constante, lo que provoca un aumento de las temperaturas y las fracciones de vapor. Con la disminución drástica de la potencia en el instante del *scram*, ocurre el descenso de las temperaturas, salvo en la superficie exterior de la vaina, donde se incrementa debido a las condiciones defectuosas de evacuación del calor, hasta que, en la etapa final, el refrigerante, a pesar de su caudal limitado, logra hacerla descender. Esta secuencia puede observarse en la Figura 4.a.

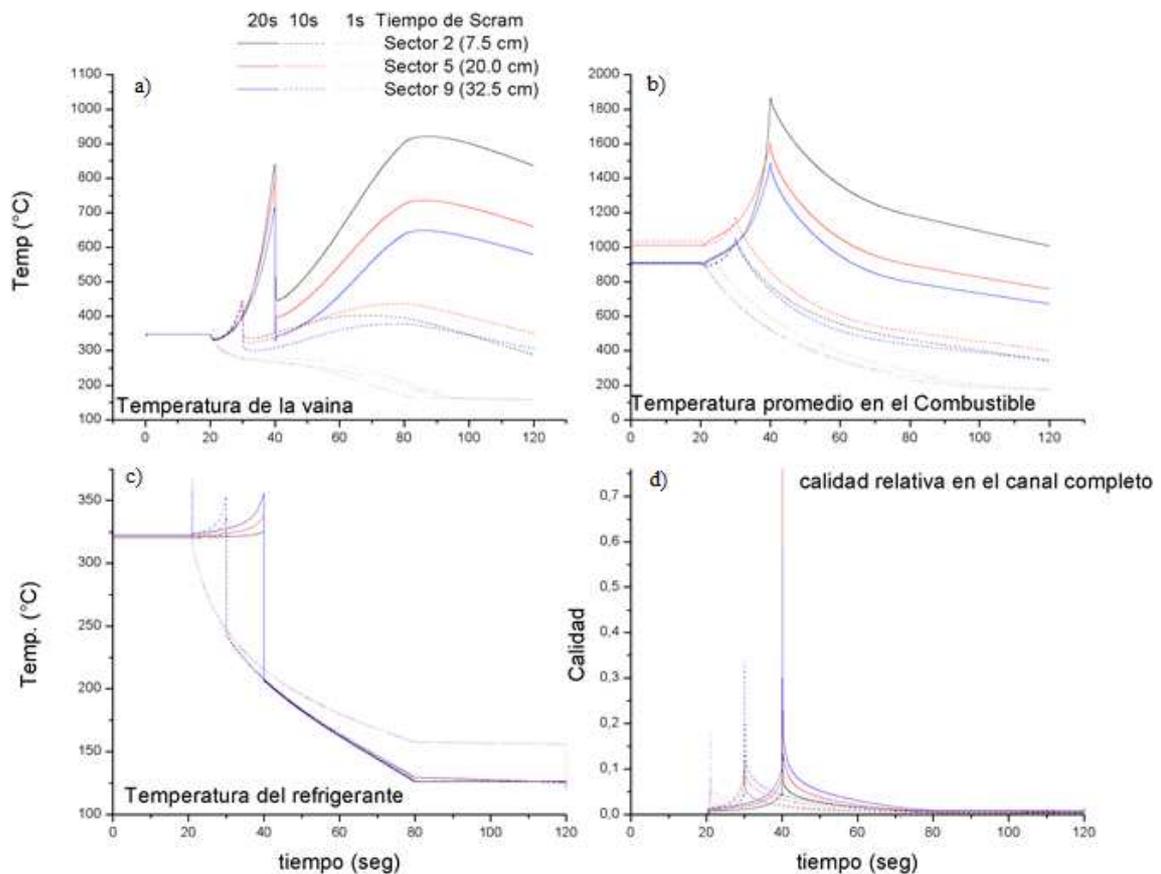


Figura 4. Evolución de a) temperatura en el exterior de la vaina, b) de la temperatura promedio en el combustible, c) temperatura del refrigerante y d) calidad del agua en el canal, en función del tiempo para el caso de caída de presión en 60 segundos, scram posicionado en 20, 10 y 1 s después de comenzada la caída y flujo final de 12.5% del inicial.

En la [Figura 5](#) se muestran los resultados de las temperaturas exterior de la vaina, promedio en el combustible y del refrigerante, obtenidos en diferentes sectores axiales (sectores 2, 5 y 9) considerando diferentes flujos finales del refrigerante al momento del *scram* (12.5%, 50% y 100% del flujo inicial). En todos estos casos se considera que el comienzo de la caída de presión es a los 20 s y desciende durante 60 s, produciéndose el *scram* en $t = 40$ s. Se puede observar que las temperaturas analizadas siguen un comportamiento similar al expuesto en la [Figura 4](#), destacando un mayor incremento en la temperatura de la vaina y del combustible en los escenarios donde se supone un menor flujo del refrigerante, como es de esperar.

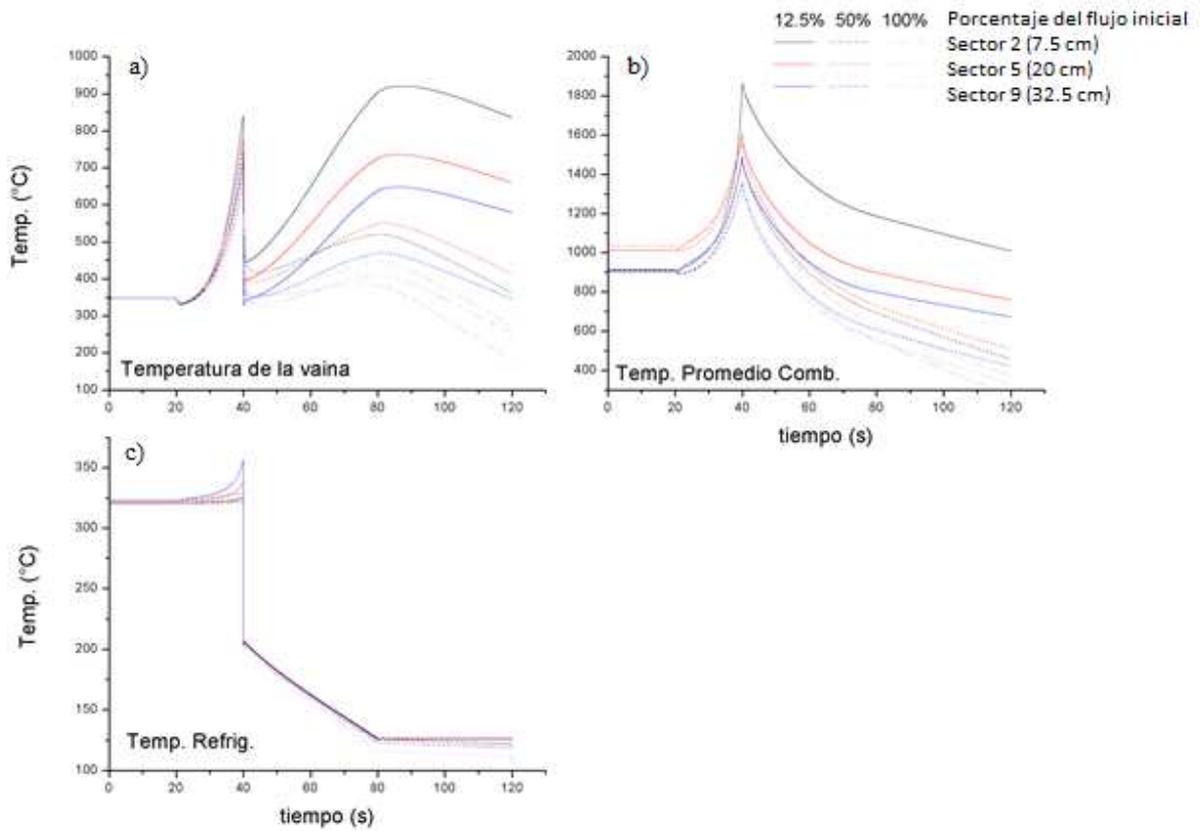


Figura 5. Evolución de la temperatura: a) exterior de la vaina, b) temperatura promedio en el combustible y c) temperatura del refrigerante para el caso de caída de presión en 60 segundos y distintos flujos finales: 100%, 50% y 12.5% del flujo inicial.

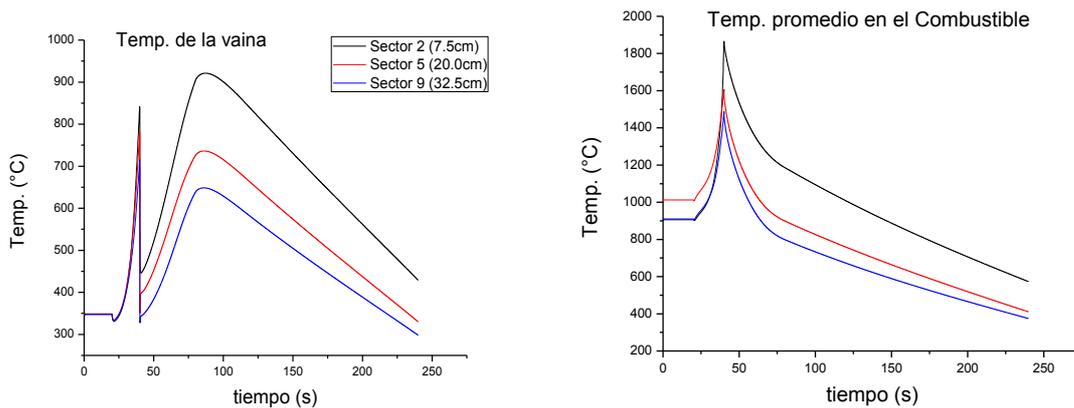


Figura 6. Temperatura sobre la vaina y promedio en el combustible para el caso de caída de presión en 60 s, flujo final 12.5% del inicial y posición de *scram* 20 s.

De los resultados analizados se observa que el caso más demandante es el graficado en la Figura 6, en el que se alcanza la máxima temperatura, que corresponde a la caída de presión más rápida, con el mínimo valor para el caudal y para el *scram* más tardío.

5 CONCLUSIONES

El código DIONISIO 2.3, con el módulo termohidráulico activado, fue empleado para simular diversos experimentos ideales. En ellos se supuso que el combustible está sometido a condiciones normales de operación hasta alcanzar un quemado de entre 15 y 30 MWd/KgU. A partir de ese momento se inicia el descenso de la presión del sistema con la consiguiente caída del flujo de refrigerante, generando condiciones de alta exigencia sobre el combustible.

Los casos analizados proponen una caída de presión que ocurre durante 60 y 120 s, con flujos finales de 100%, 50% y 12,5% del inicial y con tres instantes distintos de *scram*, esto es al cabo de 1, 10 y 20 s de iniciada la caída de presión.

En la [Figura 4](#) se muestra un estudio paramétrico del modelo donde se considera que la caída de presión ocurre en 60 s y el flujo final se encuentra en 0.1 kg/s, que representa el 12.5% del inicial. Los tres ejemplos considerados corresponden a distintos instantes de disparo del *scram*, al cabo de 1, 10 y 20 s de iniciado el descenso de la presión, cuando la misma ha llegado al 87%, 15% y 7% del valor inicial, respectivamente.

En la [Figura 5](#) el análisis paramétrico contempla diferentes valores de flujo del refrigerante al momento del *scram*: 12.5%, 50% y 100% del flujo inicial, manteniendo fijas las restantes condiciones en cuanto a duración de la caída de presión e instante de disparo del *scram*.

En el caso más demandante, la temperatura del conjunto alcanza los 300 °C en tiempos menores a los 250 s, lo que para el caso de caída de flujo a 0.1 Kg/s, implica un inventario de agua utilizada para refrigerar de 25 kg.

Para caudales altos, dicha temperatura se alcanza en tiempos menores a los 100 s, que implican un consumo de entre 40 y 80 kg de agua.

Las condiciones generales requeridas por estos ensayos pueden ser alcanzadas en el *loop* proyectado para el reactor RA-10 y representarán una contribución valiosa para la evaluación de la calidad de las predicciones que realiza DIONISIO en condiciones de alta exigencia del combustible, para las cuales los datos experimentales a los que tenemos acceso resultan sumamente escasos.

REFERENCIAS

- Denis, A. Soba, A., (2003), Simulation of Pellet-Cladding Thermomechanical Interaction and Fission Gas Release. *Nucl. Eng. and Dgn.* 223.
- Soba, A. and Denis, A.(2006), Simulation of PHWR fuel rods behavior with the code DIONISIO 1.0, *Technical Meeting on Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) Fuel Modelling*, Mumbai, India.
- Soba, A., (2007) Simulación del comportamiento termomecánico de una barra combustible en operación”, *Tesis de doctorado*, FCEyN, UBA.
- Soba, A. and Denis, A. (2008), Simulation with DIONISIO 1.0 of thermal and mechanical pellet-cladding interaction in nuclear fuel rods, *Journal of Nuclear Materials*, 374(1–2), pp. 32–43. doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.06.020.
- Soba, A. and Denis, A. (2015), DIONISIO 2.0: New version of the code for simulating a whole nuclear fuel rod under extended irradiation, *Nuclear Engineering and Design*. Elsevier B.V., 292, pp. 213–221. doi: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.008.
- Soba A. and Denis A., (2007). PLACA/DPLACA: un código para la simulación del comportamiento de un combustible tipo PLACA monolítico/disperso. *Métodos Numéricos*

para Cálculo y Diseño en Ingeniería: Vol.23, 2, 205-224

- Lemes, M., Soba, A. and Denis, A. (2015), An empirical formulation to describe the evolution of the high burnup structure, *Journal of Nuclear Materials*, 456, pp. 174–181. doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.09.048.
- Lemes, M., Soba, A., Daveri, H., and Denis, A. (2017), Inclusion of models to describe severe accident conditions in the fuel simulation code DIONISIO, *Nuclear Engineering and Design*, 315, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.02.015.
- Lemes, M., Soba, A., Denis, A. (2014) Modelo termoquímico de una barra combustible nuclear en condiciones normales y de accidente. *Revista Mecánica Computacional, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol XXXIII*.
- Lemes, M., Soba, A., Denis, A. (2016) Simulación de una barra combustible nuclear en condiciones de accidente mediante el código dionisio 2.0, *Revista Mecánica Computacional, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol XXXIV*.
- Lemes, M., Soba, A., Denis, A. (2017) Modelo de captura y liberación de hidrógeno a alta temperatura en vainas combustibles en el código dionisio. *Revista Mecánica Computacional, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol. XXXV*.
- Blaumann, H., Vertullo, A., Sanchez, F., Brollo, F., and Longhino, J. (2012). RA-10: A New Argentinian Multipurpose Research Reactor. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*:
- Lemes, M., Denis, A., Soba, A., (2018) Simulation of nuclear fuel behavior in accident conditions with the DIONISIO code, *Journal of Nuclear Engineering and radiation science*. Vol 5, doi: 10.1115/1.4042705
- Veshchunov, M. Stuckert, J., Van Uffelen , P., Wiesenack, W. Zhang , J., FUMAC: IAEA's Coordinated Research Project on Fuel Modelling in Accident Conditions, *TOPFUEL Fuel Performance Performance*, Praga, República Checa, 2018