

MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BARRA COMBUSTIBLE NUCLEAR EN CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

NUCLEAR FUEL ROD BEHAVIOR MODELING IN STORAGE ENVIRONMENT

Gonzalo Bergás^c, Matías Loza Peralta^a, Ezequiel Goldberg^a y Alejandro Soba^{a,b}

^a*Sección Códigos y Modelos, Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, CAC, CNEA, Buenos Aires, Argentina*

^b*CONICET*

^c*Facultad de Ingeniería, UBA, CABA, Argentina*

Palabras clave: Código combustible nuclear, DIONISIO, almacenamiento, modelado numérico.

Resumen. Una vez finalizada su vida útil dentro de un reactor nuclear, los elementos combustibles comienzan su etapa de almacenamiento. Primero en pileta, sumergido en agua los primeros años y posteriormente en seco, generalmente en atmósfera de gas inerte durante periodos mucho más prolongados. Durante estas etapas el combustible sufre diferentes sollicitaciones termomecánicas y termoquímicas que, dados los largos tiempos involucrados, pueden producir la falla en su integridad. En el presente trabajo se muestra el diseño conceptual e implementación de un módulo dentro del código DIONISIO que simula el comportamiento del combustible en cada una de las etapas de almacenamiento. Para ello fue necesario ampliar el rango de validez de los modelos que describen los parámetros termomecánicos y termoquímicos incluidos en el código a las condiciones térmicas y atmosféricas de almacenamiento, y el desarrollo de nuevos modelos que describen el crecimiento de óxido, las condiciones termohidráulicas de almacenamiento, la captura, difusión y precipitación de hidrógeno en la vaina y el fenómeno de *creep* para la etapa de almacenamiento en seco.

Keywords: Fuel Nuclear code, DIONISIO, storage, numerical models.

Abstract. At the end of the useful life inside a nuclear reactor, the nuclear fuel elements begin the storage stage. First in a pool, submerged in water for a few years and later in dry storage, generally in an inert gas environment for much longer periods. During the storage history, the fuel element suffers different thermochemical and thermomechanical stresses that, because of the long periods involved, can produce failure in their integrity. In this work, a conceptual design and implementation within the DIONISIO code of a module that simulates the behavior of the fuel element in each storage stage are presented. For that purpose, it was necessary to expand the range of validity of the models included in the code to thermal and atmospheric storage conditions and to develop new models that describe oxide growth, thermohydraulic conditions for storage, hydrogen uptake, diffusion and precipitation in the cladding and the creep model for dry storage stage.

1. INTRODUCCIÓN

Un elemento combustible, después de su ciclo de irradiación, permanecerá almacenado en pileta los primeros años para pasar probablemente a un repositorio en seco durante un periodo que puede llegar a alcanzar décadas. En todo este proceso de post irradiación, el combustible debe pasar por diferentes sollicitaciones termomecánicas y termoquímicas que pueden afectar su estabilidad. Por un lado, desde el punto de vista del combustible, se debe garantizar la extracción del calor residual generado por decaimiento radiactivo, así como tener en cuenta la difusión al volumen libre de diferentes productos de fisión generados durante la irradiación, algunos de los cuales son altamente corrosivos. Asimismo, la presión y la temperatura interna de cada barra combustible tendrán una evolución en función del tiempo que debe ser contemplada. Por otro lado, desde el punto de vista de la vaina, la corrosión interna, dada por los productos de fisión liberados al volumen libre, se suma a la externa, dada por el tipo y forma de refrigerar el combustible gastado (Johnson jr, 1977; IAEA, 1982). Esta puede ser tanto líquida, durante la permanencia en pileta, como gaseosa, si el almacenamiento es en seco mediante aire.

Cada uno de los procesos mencionados anteriormente, si bien introducen cambios de pequeñas magnitudes en el corto plazo, producen importantes alteraciones si consideramos décadas de almacenamiento, variaciones que pueden afectar la integridad de dichos combustibles y la seguridad de las instalaciones de contención (Kaminski, 2005; Lavigne et al., 2012). Realizar experimentos sobre este tipo de situaciones no solo es costoso, sino que muchas veces resulta inviable, ya que los tiempos involucrados en los procesos son extremadamente largos y dependientes de factores en muchos casos aleatorios, que requieren una estadística de muestreo adecuada (Lavigne et al., 2012; Peehs y Fleisch, 1985). Esta situación convierte a las herramientas de simulación en atractivos medios para producir conocimiento predictivo en forma económica. Contar con un software de predicción de comportamiento post irradiación que contemple todas las situaciones involucradas en una historia completa de almacenamiento, teniendo en cuenta la cantidad de fenómenos involucrados e interdependientes que evolucionan durante cientos de años, puede resultar de interés para todo organismo involucrado en la conservación y seguridad de los elementos combustibles (EECC) gastados (Peehs y Fleisch, 1985; Leenaers et al., 2003).

La Sección Códigos y Modelos de la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear ha desarrollado el código DIONISIO (Lemes et al., 2019), actualmente en su versión 3.0. Dicho código predice el comportamiento del combustible nuclear bajo irradiación, en condiciones de operación normal del reactor o en condiciones de accidente tipo LOCA. El código permite estudiar combustibles de reactores de potencia del tipo PWR, BWR, PHWR y SMR o de investigación, del tipo placa. El rango de trabajo y los modelos que contiene, han permitido simular el comportamiento de combustibles de todos los reactores de Argentina, colaborando en el diseño de algunos de ellos (Williamson et al. (2012)).

En este trabajo se muestran los modelos implementados que permiten predecir el comportamiento de una barra combustible en todas las etapas de almacenamiento. También se muestran los resultados de un ejemplo hipotético que simula la vida completa de un EECC, cuyo objetivo es mostrar la funcionalidad de todos los módulos trabajando en conjunto.

En la figura 1 se muestra un esquema de la lógica de funcionamiento donde se puede ver el módulo de operación y como se acoplaron los módulos de transición, almacenamiento en pileta y almacenamiento en seco, que son los desarrollados en este trabajo.

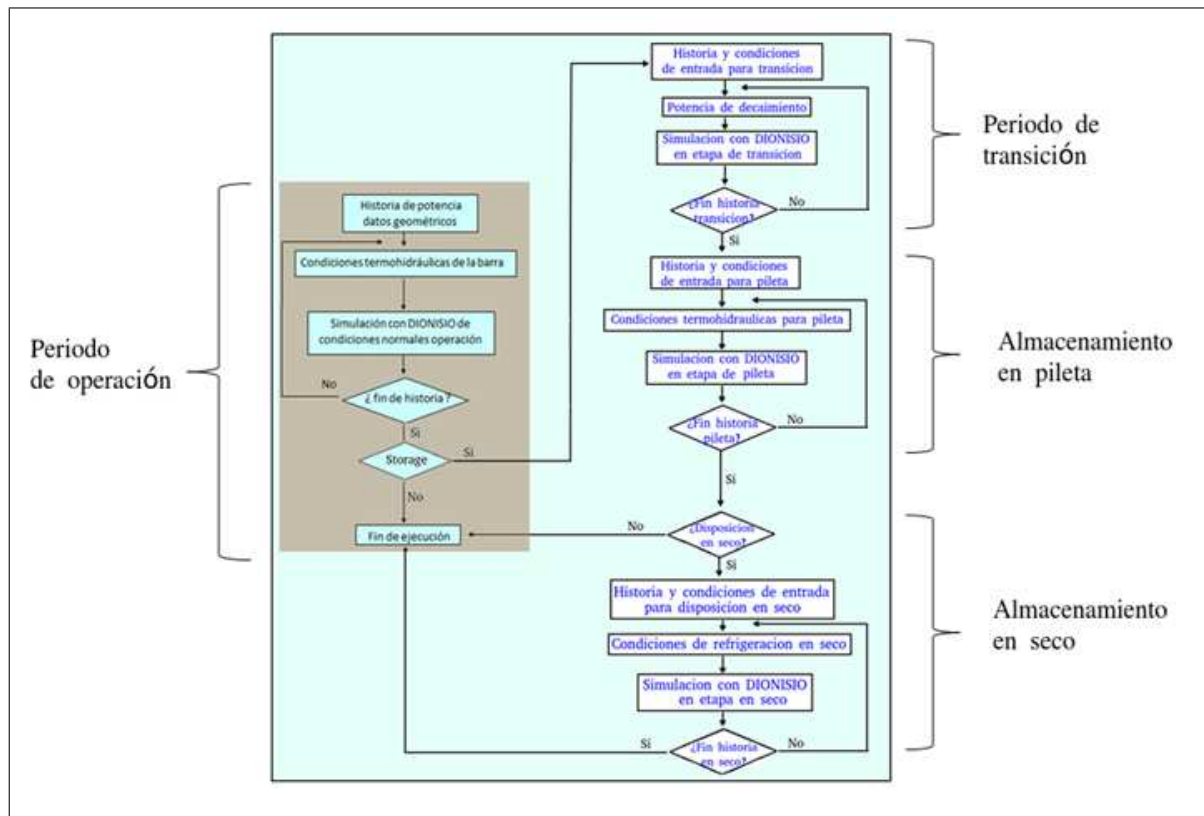


Figura 1: Esquema de funcionamiento de DIONISIO detallando las etapas de almacenamiento.

2. PARÁMETROS TÉRMICOS Y MECÁNICOS

Las expresiones que representan los parámetros térmicos y mecánicos implementados en DIONISIO (Lemes et al., 2019) para etapa de operación, son los reportados en Hagrman y Reymann (1993), y Geelhood y Luscher (2014). Estos modelos se extrapolaron a las temperaturas y condiciones de almacenamiento y se compararon con modelos cuya validez en estas condiciones era conocida. Se encontró que, salvo leves modificaciones, los modelos ya implementados en DIONISIO son aptos para ser utilizados en las subsecuentes etapas de almacenamiento (Bergás y Goldberg (2021))

3. MODELOS PARA ALMACENAMIENTO

3.1. Calor de decaimiento

Una vez que el combustible finaliza su etapa de irradiación para pasar a las etapas de almacenamiento, finalizan las fisiones dentro del combustible, que son las responsables de la producción de energía. Los productos de fisión creados durante la operación del reactor decaen por diferentes mecanismos durante años, generando un calor residual o de decaimiento. El calor de decaimiento depende del tiempo de operación del reactor, desde el encendido hasta el apagado, y se debe principalmente a la emisión de partículas beta negativas y gamma, y en menor medida a la desintegración de isótopos generados por activación neutrónica durante el periodo de operación. El modelo desarrollado se basa en el trabajo de Ragheb (2014). Este modelo contempla tanto el decaimiento de los productos de fisión, como el decaimiento de los isótopos ^{239}U y ^{239}Np , producidos durante la etapa de operación.

En la Eq. (1) se describe el modelo.

$$\begin{aligned}
P_1(t) &= \sum_{i=1}^{n-1} P_{0(i,i+1)} \left\{ 6,48 \times 10^{-3} \left[(t + t_0 - t_{i+1})^{-0,2} - (t + t_0 - t_i)^{-0,2} \right] + \right. \\
&\quad \left. 0,0025 \left[e^{-42,3529t} - e^{-42,3529(t+t_0)} \right] + 0,0013 \left[e^{-0,2979t} - e^{-0,2979(t+t_0)} \right] \right\} \\
P_2(t) &= \sum_{i=1}^{n-1} P_{0(i,i+1)} 0,1 \left\{ (t + t_0 - t_{i+1} + 10)^{-0,2} - (t + t_0 - t_i + 10)^{-0,2} - \right. \\
&\quad \left. 0,87 \left[(t + t_0 - t_{i+1} + 2 \times 10^7)^{-0,2} - (t + t_0 - t_i + 2 \times 10^7)^{-0,2} \right] \right\} \quad (1)
\end{aligned}$$

si $P_1(t) > P_2(t)$:

$$P(t) = P_1(t)$$

si no:

$$P(t) = P_2(t)$$

Donde el subíndice i simboliza los instantes de comienzo y finalización de las rampas de potencia; t el tiempo transcurrido desde el apagado del reactor [días]; t_0 representa el tiempo total de operación del reactor [días]; $P(t)$ la potencia en el instante t , después del apagado del reactor [MWth]; $P_{0(i,i+1)}$ es la potencia media con la que operó el reactor entre el periodo t_i y $t_{(i+1)}$ [MWth].

3.2. Modelo termohidráulico

Almacenamiento en pileta

En las etapas de almacenamiento, el modelo de convección forzada implementado en DIONISIO para la etapa de operación no es aplicable, ya que las condiciones termohidráulicas cambian. Para la etapa en pileta, el agua se encuentra en estado estanco y el mecanismo que entra en juego en estas condiciones es el de convección natural.

En este caso el problema se modeló suponiendo una sola barra sumergida en el fluido. Bajo esta aproximación, resulta de interés el estudio correspondiente a cilindros verticales sumergidos en agua, particularmente la categoría denominada *cilindros verticales esbeltos o delgados*.

El parámetro de entrada disponible en las barras combustibles es el flujo de calor debido a la potencia generada por el decaimiento de los productos de fisión, siendo la temperatura de la superficie el parámetro a determinar en este problema. En definitiva, el modelo buscado debe contemplar régimen turbulento, cilindro esbelto y flujo de calor como condición de borde. Se encontró que las correlaciones que mejor se ajustan a estos requerimientos son las obtenidas por [Fujii et al. \(1970\)](#).

El código DIONISIO realiza una discretización en sectores de la longitud axial de la barra combustible y realiza los cálculos en cada uno de los sectores. El modelo de Fujii calcula el número de Nusselt local, por lo que el problema se resuelve calculando el mismo en la mitad de cada sector, asignando ese valor a todo el sector. Con este valor se calcula el coeficiente de transferencia térmica por convección y luego la temperatura en la superficie en cada sector mediante la ley de enfriamiento de Newton. El modelo se implementa de forma iterativa, comenzando con una temperatura de superficie arbitraria.

En las Eq. (2) a Eq. (4) se describe el modelo:

$$G_{rx}^* = \frac{g\beta q'' x^4}{k\nu^2} \quad (2)$$

Para régimen laminar ($1 \times 10^8 < G_{rx}^* Pr \leq 1 \times 10^{13}$):

$$(Nu_x)_e = 0,58(G_{rx}^* Pr)_e^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Para régimen turbulento ($1 \times 10^{13} < G_{rx}^* Pr \leq 1 \times 10^{15}$):

$$(Nu_x)_e = 0,215(G_{rx}^* Pr)_e^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Donde el subíndice $()_e$ indica que las propiedades del líquido deben ser calculadas a la temperatura $T_e = T_s - \frac{1}{4}(T_s + T_\infty)$, a excepción del coeficiente de expansión térmica β , que se debe calcularse en $T_m = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty)$. El subíndice x indica que se trata de magnitudes locales. T_s y T_∞ representan la temperatura de superficie de la vaina y del agua respectivamente [K]. Nu es el número de Nusselt [adim]; G_r^* el número Grashof modificado [adim]; q'' la potencia o flujo de calor por unidad de superficie [W/m^2]; k el coeficiente de conductividad térmica [$W/m^\circ C$] y ν la viscosidad cinemática [m^2/s].

Almacenamiento en seco

En la etapa de almacenamiento en seco, el combustible se coloca dentro de contenedores denominados silos que se encuentran inmersos en aire, que actúa en general como medio refrigerante por convección natural. El repositorio se considera cilíndrico, de un radio efectivo similar al del elemento combustible. Este contenedor puede estar construido de cemento, acero o Zircaloy.

Se considera un modelo muy conservativo para analizar la temperatura sobre la barra más exigida. El mismo considera la barra en el centro del repositorio, rodeada por un pseudo-material efectivo que consiste en una mezcla del gas inerte con el resto de las barras. Este pseudo-material posee una conductividad efectiva de mezcla y debe disipar el total de la potencia del elemento combustible. De este modo, se determina la temperatura del contorno de la barra central. Para modelar el interior del contenedor, se utilizan las siguientes aproximaciones:

$$T_{BC} = T_{cool} + \frac{q}{2\pi} \left[\frac{\ln \left(\frac{r_{ext_contenedor}}{r_{int_contenedor}} \right)}{K_{contenedor}} + \frac{\ln \left(\frac{r_{int_contenedor}}{r_{barra}} \right)}{K_{mezcla}} \right] \quad (5)$$

Donde T_{BC} = temperatura que se toma como T condición de contorno en el modelo térmico de la barra [K]; T_{cool} = temperatura del refrigerante del contenedor (aire) [K]; q = potencia total a extraer [W/cm]; $r_{ext_contenedor}$ = radio externo del contenedor [cm]; $r_{int_contenedor}$ = radio interno del contenedor [cm]; r_{barra} = radio externo de la barra en el centro del contenedor [cm]; $K_{contenedor}$ = conductividad térmica de la pared del contenedor [$W/cm.K$]; K_{mezcla} = conductividad térmica de pseudo-material conformado por la mezcla del gas inerte y el resto del material del EC dentro del contenedor [$W/cm.K$].

3.3. Crecimiento de óxido en la superficie externa de la vaina

En condiciones de operación normal del reactor, este fenómeno ocurre en dos etapas: la primera de ellas denominada de pre-transición, donde el crecimiento de la capa de óxido obedece a

una ley no lineal, y luego se llega a un espesor crítico denominado de transición, a partir del cual el crecimiento está representado por un comportamiento lineal, denominado post-transición. Se puede asumir que el combustible llega a la piletta con un espesor mayor al de transición de la capa de óxido, por lo que el crecimiento en este periodo estará determinado por las leyes que gobiernan la etapa de post-transición. Para la etapa de almacenamiento en seco, al ser una atmósfera inerte, este fenómeno no se manifiesta.

Existen diversos trabajos que publican valores de crecimientos de la capa de óxido en etapa de almacenamiento, obtenidos mediante procedimientos experimentales Rothman (1984); IAEA (1998); Johnson (1977); IAEA (2002). En IAEA (2002) se reportan curvas de valores estimados de crecimiento de óxido en vainas de Zircaloy en etapa de almacenamiento, que muestran que el espesor de óxido alcanza aproximadamente 3,7 μm en los 2 primeros años y luego es despreciable. Este es sin lugar a duda el resultado más conservador de los consultados. Utilizando estos resultados, se implementó el método de mínimos cuadrados para encontrar una función que ajuste los datos en los dos primeros años. Se encontró que el mejor ajuste se obtiene utilizando un polinomio de grado 5 (Eq. (7)). Para el periodo posterior a los dos años, se utilizó el modelo de Hagerman y Reymann (1993) y se modificó realizando ajustes en los coeficientes para representar los valores más conservadores reportados en las referencias mencionadas (Eq. (8)).

Se obtuvo el siguiente modelo:

si $t < 0,1$:

$$Ox = 5t \quad (6)$$

si $0,1 < t < 2$:

$$Ox = 1,207 t^5 - 7,163 t^4 + 16,06 t^3 - 17,12 t^2 + 9,975 t - 0,329 \quad (7)$$

si $t \geq 2$:

$$A = 1,203 \times 10^2 e^{(-7,118 \times 10^{-3} T_c)} \quad (8)$$

$$Ox = 3,625 + 1388,2(At)e^{-\frac{14080}{T}}$$

Donde Ox es el espesor de capa de óxido [μm]; t el tiempo total acumulado [años]; T la temperatura de la interfase óxido-metal [K] y T_c la temperatura interfase óxido-refrigerante [K].

3.4. Captura de hidrógeno

Una fracción del hidrógeno total generado en el proceso de oxidación ingresa a través de las vacancias del oxígeno en la superficie de la capa de óxido e ingresa a la vaina. La cantidad de hidrógeno capturado depende de la temperatura y de la etapa en la que se encuentre la barra (*in-pile* o *out-of-pile*). Comparado con la etapa de operación del reactor, la tasa de captura de hidrógeno en etapa de almacenamiento en piletta es baja (relacionado con el lento crecimiento de la capa de óxido en esta etapa). Sin embargo, aquí toma mayor importancia el precipitado de hidruros debido a las bajas temperaturas. Para la etapa de almacenamiento en seco la captura es nula, ya que no está presente el fenómeno de oxidación.

Hagerman y Reymann (1993) propone correlaciones para determinar la cantidad de hidrógeno capturado por la vaina en condiciones *in-pile* y *out-of-pile*. Sin embargo, las correlaciones *out-of-pile* son solo válidas para el rango de temperaturas similar al de operación, es decir $500K < T < 650K$. Esta restricción está determinada por el parámetro que representa la fracción de hidrógeno capturado (C_{hup}), que es válido solo para dicho rango. En Kato et al.

(2014) se realizaron mediciones de crecimiento de óxido y captura de hidrógeno en la vaina para condiciones de almacenamiento similares a las de piletta ($303K < T < 353K$), donde se encontraron valores de C_{hup} válidos para este rango. Por lo tanto, para la etapa de almacenamiento en DIONISIO se utilizará el modelo reportado por Hargman y Reymann (1993), pero utilizando el valor de C_{hup} propuesto por Kato et al. (2014).

El modelo resultante es el siguiente:

$$H = H_0 + H_1 + H_{cf}$$

$$H_{cf} = \left[\frac{(9 \times 10^5) d_0}{d_0^2 - d_i^2} \right] \frac{C_{hup}}{8} (Ox - Ox_{ANT}) + H_{ci} \quad (9)$$

Donde H_0 es la concentración inicial de hidrógeno debido a impurezas de fabricación [ppm]; H_1 la concentración de hidrógeno debido al contenido de agua en el combustible [ppm]; H_{cf} la fracción en peso de hidrógeno capturado por la vaina al final de un paso temporal [ppm]; H_{ci} la fracción en peso de hidrógeno capturado por la vaina al inicio de un paso temporal [ppm]; d_0 el diámetro externo de la vaina [m]; d_i el diámetro interno de la vaina [m]; Ox el espesor de capa de óxido al final del paso temporal [m]; Ox_{ANT} el espesor de capa de óxido al inicio del paso temporal [m] y C_{hup} es 0,88 para el rango de temperaturas de almacenamiento.

3.5. Distribución y precipitación de hidrógeno en la vaina

El estudio de la distribución de hidrógeno en la vaina resulta de interés para el estudio de la fragilización. Esta distribución está determinada por tres fenómenos: la difusión de hidrógeno en solución sólida gobernada por la ley de Fick, la difusión de hidrógeno en solución sólida gobernada por el efecto Soret (Courty et al. (2014)) y la precipitación de hidrógeno cuando se supera el límite de solubilidad (TSS) para una determinada temperatura.

Cuando se supera el límite de solubilidad TSS , comienza el precipitado de hidrógeno. Existen dos límites: TSS_d que corresponde al de solubilidad, por debajo del cual el hidrógeno se encuentra en solución sólida; y TSS_p , por encima del cual el hidrógeno precipita formando hidruros. Entre ambos límites se produce un proceso de histéresis. Esto se muestra en la figura 2 y en las ecuaciones 10 y 11 se muestran las expresiones para cada curva.

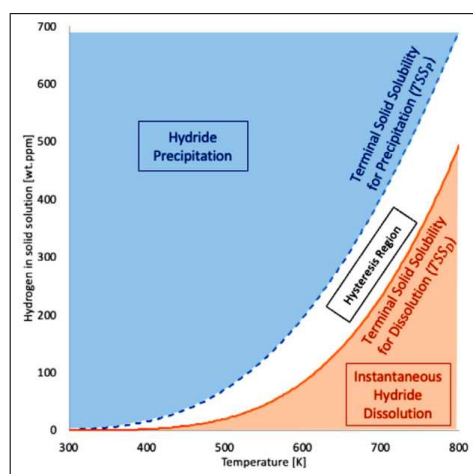


Figura 2: Concentración de hidrógeno vs. temperatura.

$$TSS_d = 10644e^{-\frac{4328,67}{T}} \quad (10)$$

$$TSS_p = 138746e^{-\frac{4145,72}{T}} \quad (11)$$

Una vez que se supera el límite TSS_p , comienza el precipitado de hidrógeno sujeto a una ley temporal. El modelo cinético utilizado en el trabajo de Courty et al. (2014) es el desarrollado por Marino (1971), que propone que la tasa de precipitación es proporcional a la diferencia entre la solución sólida sobresaturada y el límite de saturación TSS_p .

Luego del apagado del reactor, la temperatura desciende rápidamente debido a la disminución pronunciada de la potencia, por lo que en primer término se anula el efecto de Soret y luego el efecto de Fick cuando se equilibran las concentraciones. Esto produce un perfil plano de concentración en solución sólida (C_{ss}), que comienza a precipitar a medida que baja la temperatura, según la ley cinética propuesta por Marino Marino (1971). Sin embargo, la disminución de la temperatura también disminuye el valor del coeficiente de precipitación, ralentizando la cinética de la precipitación. Es por esto que, durante las etapas de almacenamiento, las bajas temperaturas prácticamente inhiben el proceso de precipitación, conservando el perfil de hidrógeno precipitado muy próximo al que se obtuvo al momento del apagado del reactor.

Las expresiones de difusión y precipitación reportadas en Courty et al. (2014) se discretizaron mediante el método de diferencias finitas, asumiendo geometría unidimensional y coordenadas cartesianas y se implementaron en el código DIONISIO en la etapa de operación.

Precipitación ($C_{ss} > TSS_p$):

$$C_{ss(n)}^{(i+1)} = C_{ss(n)}^{(i)} - \left[D \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - 2C_{ss(n)}^{(i)} + C_{ss(n-1)}^{(i)}}{\Delta x^2} \right) - \frac{DQ^*}{RT^2} \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - C_{ss(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) \left(\frac{T_{(n+1)}^{(i)} - T_{(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) - \alpha_{(n)}^2 \left(C_{ss(n)}^{(i)} - TSS_{p(n)}^{(i)} \right) \right] \Delta t \quad (12)$$

$$C_{pp(n)}^{(i+1)} = C_{pp(n)}^{(i)} + \alpha_{(n)}^2 \left(C_{ss(n)}^{(i)} - TSS_{p(n)}^{(i)} \right) \Delta t$$

Histéresis ($TSS_p > C_{ss} > TSS_d$):

$$C_{ss(n)}^{(i+1)} = C_{ss(n)}^{(i)} - \left[D \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - 2C_{ss(n)}^{(i)} + C_{ss(n-1)}^{(i)}}{\Delta x^2} \right) - \frac{DQ^*}{RT^2} \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - C_{ss(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) \left(\frac{T_{(n+1)}^{(i)} - T_{(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) \right] \Delta t \quad (13)$$

$$C_{pp(n)}^{(i+1)} = C_{pp(n)}^{(i)}$$

Disolución ($C_{ss} \leq TSS_d$ y $C_{pp} > 0$):

$$C_{ss(n)}^{(i+1)} = C_{ss(n)}^{(i)} - \left[D \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - 2C_{ss(n)}^{(i)} + C_{ss(n-1)}^{(i)}}{\Delta x^2} \right) - \frac{DQ^*}{RT^2} \left(\frac{C_{ss(n+1)}^{(i)} - C_{ss(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) \left(\frac{T_{(n+1)}^{(i)} - T_{(n)}^{(i)}}{\Delta x} \right) + \beta_{(n)}^2{}^{(i)} \left(C_{ss(n)}^{(i)} - TSS_{p(n)}^{(i)} \right) \right] \Delta t \quad (14)$$

$$C_{pp(n)}^{(i+1)} = C_{pp(n)}^{(i)} - \beta_{(n)}^2{}^{(i)} \left(C_{ss(n)}^{(i)} - TSS_{p(n)}^{(i)} \right) \Delta t$$

Donde los subíndices i y n indican el tiempo y el nodo respectivamente; D es el coeficiente de difusión [m^2/s]; T es la temperatura [K]; R es la constante de los gases [$\text{J}/\text{mol.K}$]; Q^* es una constante.

3.6. Modelado del Creep

Durante la etapa de almacenamiento en seco, debido a las condiciones térmicas y a los largos tiempos involucrados, el fenómeno de fluencia mecánica o *creep* se torna relevante por el riesgo potencial que conlleva para la integridad de un elemento combustible. Este fenómeno no resulta importante durante la etapa de almacenamiento en pileta debido a las bajas temperaturas que inducen bajas tensiones.

Se implementó en DIONISIO un modelo basado en el trabajo realizado por [Herranz y Feria \(2010\)](#), quienes a partir de un modelo complejo, generan uno más simple para ser incluido en el código FRAPCON-3.3 ([Geelhood y Luscher \(2014\)](#)).

El modelo se muestra en las Eq. 15 a Eq. 18. Los parámetros utilizados en la ecuación se muestran en la tabla 1.

$$\dot{\epsilon}_\theta = f_1(\sigma_\theta) f_2(T) f_3(\phi t) t^{-0,5} \quad (15)$$

$$f_1(\sigma_\theta) = \frac{1}{2} a \sigma_\theta^b \quad (16)$$

$$f_2(T) = e^{-\frac{c}{T+273}} \quad (17)$$

$$f_3(\phi t) = e^{-d\phi t} \quad (18)$$

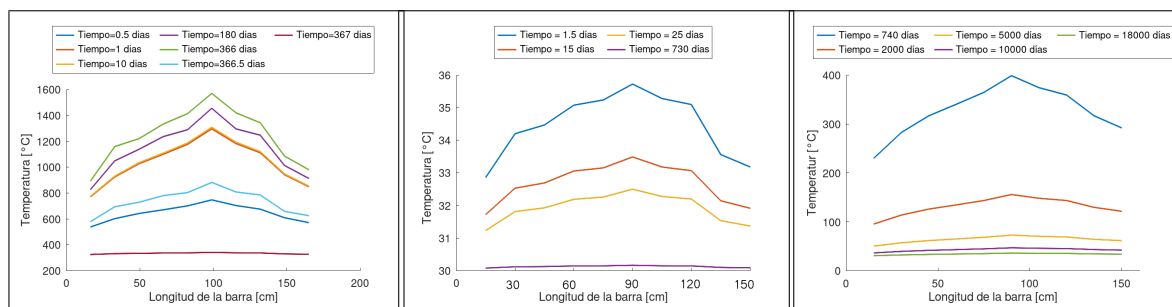
Donde $\dot{\epsilon}_\theta$ = la deformación circunferencial por *creep* [%]; σ_θ = tensión de *hoop* [MPa]; ϕ = flujo de neutrones rápidos [$\text{n}/\text{s.cm}^2$]; ϕt = fluencia de neutrones rápidos [n/cm^2].

Parámetro	Sin irradiar	Irradiado
a	6×10^4	300
b	1,84	2,95
c	15000	15000
d	0	$2,8 \times 10^{-22}$

Tabla 1: Constantes reportadas en [Herranz y Feria \(2010\)](#) para el modelo de CIEMAT.

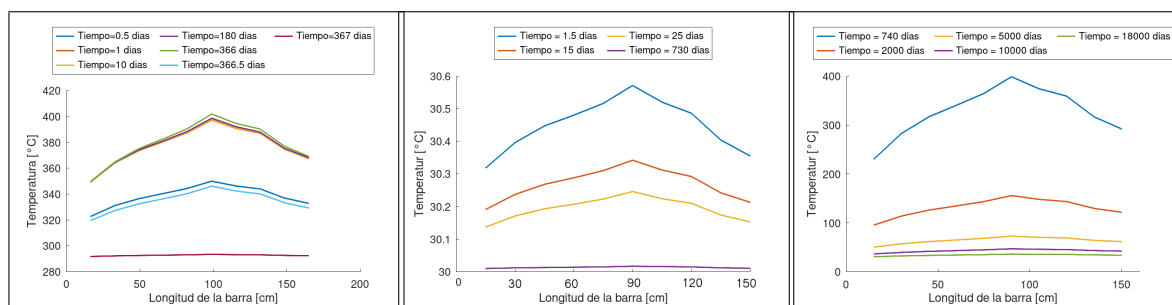
4. RESULTADOS

A modo de prueba, se realizó la simulación de un caso hipotético que corresponde a un reactor tipo PWR, con barras de 1,5 metros de longitud, que operó durante 367 días incluyendo 1 día para el encendido, 365 días a operación constante y 1 día para el apagado. Luego del periodo de operación, el combustible permaneció 2 años en almacenamiento en pileta y 40 años en almacenamiento en seco. La longitud axial de la barra se discretizó en 10 sectores. A continuación se muestran alguno de los resultados más importantes de la simulación:



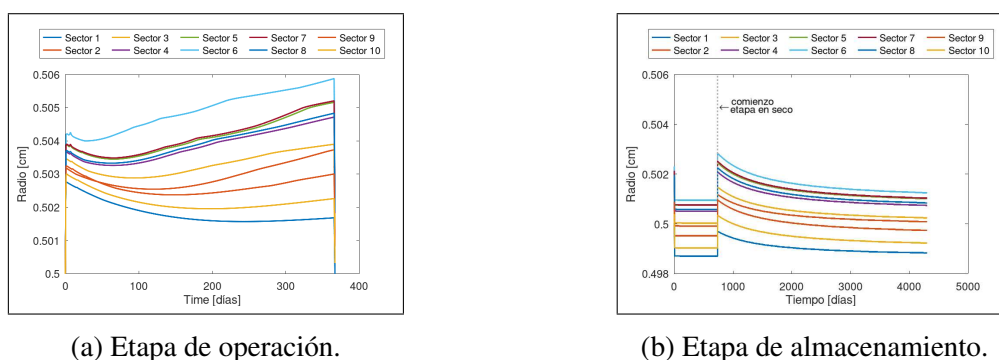
(a) Etapa de operación. (b) Almacenamiento en pileta. (c) Almacenamiento en seco.

Figura 3: Temperatura de la pastilla en función de la longitud axial, para diferentes periodos de tiempo y cada una de las etapas.



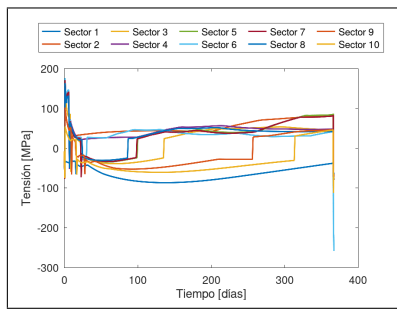
(a) Etapa de operación. (b) Almacenamiento en pileta. (c) Almacenamiento en seco.

Figura 4: Temperatura interna de la vaina en función de la longitud axial, para diferentes periodos de tiempo y cada una de las etapas.

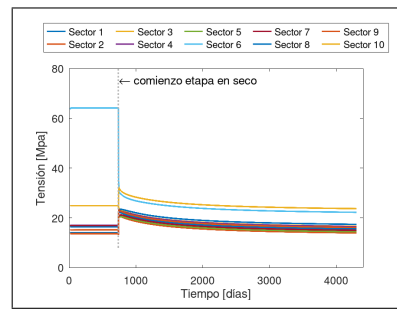


(a) Etapa de operación. (b) Etapa de almacenamiento.

Figura 5: Radio de la pastilla vs. tiempo para cada sector.

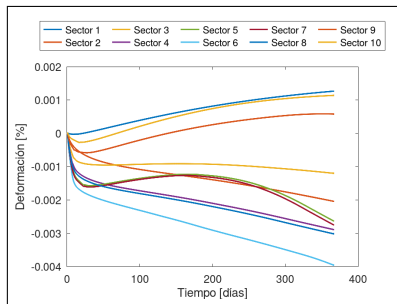


(a) Etapa de operación.

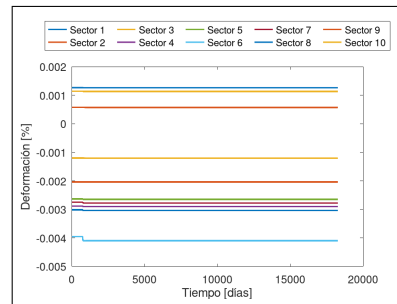


(b) Etapa de almacenamiento.

Figura 6: Tensiones de *hoop* vs. tiempo para cada sector.

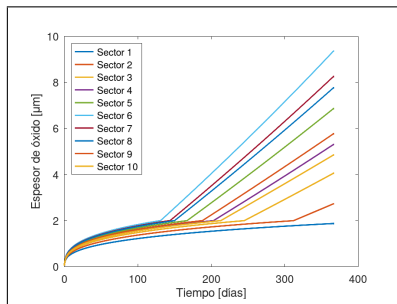


(a) Etapa de operación.

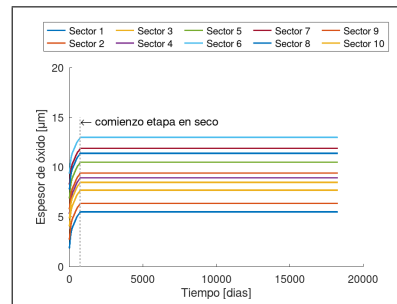


(b) Etapa de almacenamiento en seco.

Figura 7: *Creep* vs. tiempo para cada sector.

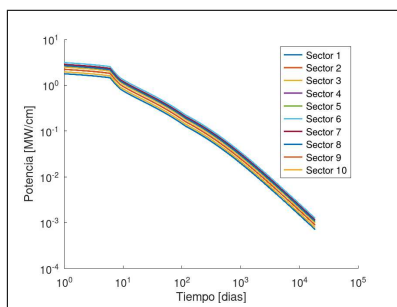


(a) Etapa de operación.

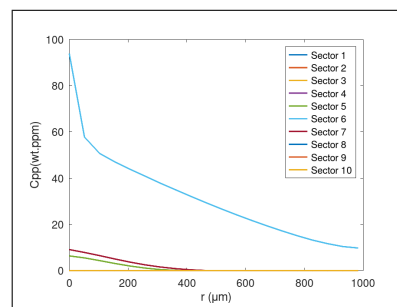


(b) Etapa de almacenamiento.

Figura 8: Crecimiento de óxido vs. tiempo para cada sector.



(a) Potencia de decaimiento.



(b) Hidrógeno precipitado.

Figura 9: Potencia de decaimiento y perfil de hidrógeno precipitado en función del tiempo, para cada sector.

5. CONCLUSIONES

Se verificó que los modelos correspondientes a parámetros térmicos y mecánicos implementados en DIONISIO para etapa de operación resultaron aptos, después de leves modificaciones y las correspondientes pruebas, para ser utilizados en el rango de temperaturas características del periodo de almacenamiento.

Se desarrollaron modelos para el calor de decaimiento, la termohidráulica de la etapa completa de almacenamiento, el crecimiento de la capa óxido y la captura de hidrógeno en almacenamiento en pileta, la distribución y precipitación de hidrógeno, y el fenómeno de *creep* durante el almacenamiento en seco.

Se ha verificado que la tasa de crecimiento de óxido y la captura de hidrógeno en el periodo de almacenamiento resultan relativamente bajas. También se observó que la tasa de precipitación de hidrógeno durante las etapas de almacenamiento resulta despreciable, conservando el mismo perfil que al final del periodo de operación.

Los modelos obtenidos se implementaron en el código y se realizó la simulación de la vida completa de un EECC tipo PWR para corroborar el funcionamiento en conjunto de todos los módulos. Se obtuvieron resultados satisfactorios.

Entre los trabajos a futuro más inmediatos resta la realización de *benchmarks* que posibiliten comparar los resultados del módulo con datos medidos experimentalmente. Queda también pendiente el acople de los módulos de almacenamiento con los módulos de mecánica de fractura, lo que posibilitaría el estudio de generación y propagación de fisuras. Finalmente, restaría estudiar el efecto de la corrosión interna de la vaina debido a los productos de fisión liberados al volumen libre, que podría también contribuir a la fragilización de la vaina.

REFERENCIAS

- Bergás G. y Goldberg E. Modelado de una barra combustible en condiciones de almacenamiento post-irradiación en pileta. *Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, 37:325–337, 2021.
- Courty O., Motta A., y Hales J. Modeling and simulation of hydrogen behavior in zircaloy-4 fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*, 2014.
- Fujii T., Takeuchi M., Fujii M., Suzaki K., y H. U. Experiments on natural-convection heat transfer from the outer surface of a vertical cylinder to liquids. *J Heat Mass Transfer*, 1970.
- Geelhood K. y Luscher W. *FRAPCON-3.5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup*. 2014.
- Hagrman D. y Reymann G. *MATPRO: A Handbook of Materials Properties for use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod BEHAVIOR*. 1993.
- Herranz L. y Fera F. Extension of the frapcon-3.3 creep model to dry storage conditions. *Progress in Nuclear Energy*, 52:634–639, 2010.
- IAEA. Storage of water reactors spent fuel in water pools, survey of world experienc. *TECHNICAL REPORTS SERIES*, No. 218, 1982.
- IAEA. *Durability of spent nuclear fuels and facility components in wet storage*. IAEA-TECDOC-1012, 1998.
- IAEA. *Long Term Storage of Spent Nuclear Fuel Survey and Recommendations*. IAEA-TECDOC-1293, 2002.
- Johnson A. *Behaviour of Nuclear Fuel in Water Pool Storage*. Pacific Northwest Laboratory, USA, 1977.
- Johnson jr A. *Behavior of Spent Nuclear Fuel in Water pool Storage*. PNL-Battelle, 1977.

- Kaminski M. Engineered product storage under the advanced fuel cycle initiative. *Journal of Nuclear Materials* 347, Part II: Conceptual storage scenarios, 2005.
- Kato O., Tanabe H., Sakuragi T., Nishimura T., y Tateishi T. *Corrosion Tests of Zircaloy Hull Waste to Confirm Applicability of Corrosion Model and to Evaluate Influence Factors on Corrosion Rate under Geological Disposal Conditions*. Research Institute Inc. JAPAN, 2014.
- Lavigne O., Shoji T., y Sakaguchi K. On the corrosion behavior of zircaloy-4 in spent fuel pools under accidental conditions. *Journal of Nuclear Materials* 426, 2012.
- Leenaers A., Sannen L., y Van den Berghe S.; Verwerft M. Oxidation of spent uo2 fuel stored in moist environment. *Journal of Nuclear Materials* 317, 2003.
- 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, 2019.
- Marino G. Hydrogen supercharging in zircaloy. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 7, 1971.
- Peehs M. y Fleisch j. *LWR Spent Fuel Storage Behaviour*. 1985.
- Ragheb M. Decay heat generation in fission reactors. 2014.
- Rothman A. *Corrosion and Degradation Mechanisms of Zircaloy Cladding on Spent Nuclear Fuel in a Tuff Repository*. Lawrence Livermore National Laboratory. USA, 1984.
- Williamson R., Hales J., Novascone S., Tonks M., Gaston D., Permann C., Andrs D., y Martineau R. Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *Journal of Nuclear Materials* 423, 2012.