

INVESTIGACIÓN APLICADA SOBRE TERMO-MECÁNICA DE COMBUSTIBLE ALMACENADO EN SECO: RESPUESTA DEL CIEMAT A DESAFÍOS

La investigación sobre la seguridad del combustible nuclear almacenado en seco plantea una serie de retos asociados a entender y predecir su comportamiento en las condiciones previstas. Un foco de interés es el desarrollo de capacidades de análisis que permitan predecir la integridad de la vaina de las barras de combustible. La investigación llevada a cabo por el Ciemat en este sentido está permitiendo disponer de herramientas analíticas y metodologías de análisis con las que evaluar el cumplimiento de los objetivos de seguridad asociados. Para ello, la experiencia adquirida en termo-mecánica de barra en reactor está siendo extendida a la tecnología de almacenamiento en seco.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento temporal en seco de combustible gastado supone una vía complementaria al almacenamiento en piscinas en el medio y largo plazo. Los requisitos de seguridad que han de cumplir los sistemas que almacenan combustible en condiciones secas (e.g., contenedores, bóvedas) son (USNRC, 2000): dosis de radiación inferiores a los límites establecidos, subcriticidad, evacuación de calor, confinamiento y recuperabilidad del combustible que albergan. Su satisfacción requiere necesariamente el mantenimiento de la configuración del combustible o, en otras palabras, asegurar la integridad de la vaina como primera barrera de confinamiento del material de fisión de la barra de combustible.

Por tanto, el análisis de integridad de vaina es uno de los aspectos relevantes en investigación en seguridad nuclear de instalaciones de almacenamiento en seco. Se trata de estudiar los mecanismos de degradación potencialmente peligrosos para la vaina, con objeto de predecir el comportamiento del material a lo largo del periodo de almacén; esto permitirá analizar la probabilidad de fallo, así como caracterizar las condiciones del material ante posibles acciones de manejo o transporte. Dado el empleo extendido de las aleaciones de zirconio como material de vaina de

combustible nuclear, este es el material foco de estudio en el ámbito del almacenamiento en seco.

A pesar del buen comportamiento de las aleaciones de zirconio en condiciones en reactor (i.e., adecuado comportamiento mecánico, baja absorción neutrónica, buena respuesta frente a la corrosión y la transmisión de calor), existen inconvenientes de este material que se hacen especialmente patentes bajo las condiciones de temperatura y tensión (presión interna de barra) que sufre la vaina en el proceso de almacenamiento en seco (asociado a fase de secado previa y refrigeración del decaimiento de calor residual durante el periodo de almacén). Estos son su respuesta viscoplástica (i.e., fluencia mecánica), que podría llegar a desembocar en rotura, y la absorción de parte del hidrógeno liberado durante la corrosión en reactor, que implica una distribución/precipitación de este en el seno de la vaina (i.e., reducción de ductilidad). Las condiciones termo-mecánicas existentes podrían favorecer la reorientación radial de los hidruros que precipiten, siendo esta la orientación menos deseada desde el punto de vista de la ductilidad de vaina (i.e., favorable para la transición dúctil-frágil).

Adicionalmente a los mecanismos de degradación anteriores, la oxidación del propio combustible (UO_2) podría inducir el fallo de vaina. Esto se



FRANCISCO FERIA

Investigador senior de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear CIEMAT

Doctor en Ciencias Físicas.



JAIME PENALBA

Investigador de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear CIEMAT

Ingeniero industrial y máster en Ingeniería Nuclear.



LUIS ENRIQUE HERRANZ

Director de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear CIEMAT.

Doctor en Química Cuántica y diplomado en Ingeniería Nuclear.

APPLIED RESEARCH ON THERMAL-MECHANICS OF DRY STORED FUEL: CIEMAT RESPONSE TO CHALLENGES

The research on safety of dry stored nuclear fuel poses a number of challenges related to understand and predict its performance under the anticipated conditions. A focus of interest is the development of analysis capabilities that allow predicting the integrity of the fuel rod cladding. In this regard, the research carried out by CIEMAT is allowing the use of analytical tools and analysis methodologies whereby the compliance of the related safety goals would be assessed. To do so, the experience gained in fuel rod thermal-mechanics in reactor is being extended to the dry storage technology.

daría en caso de que el medio al que queda expuesto el combustible tras el proceso de secado contenga agentes oxidantes y éstos entren en contacto con la pastilla a través de algún defecto de vaina no detectado. En este escenario, la oxidación de UO_2 a U_3O_8 en magnitud suficiente supondría un aumento de volumen que podría dar lugar a una tensión adicional que provocara la propagación del defecto.

Con objeto de evitar la degradación del material de vaina por los mecanismos citados, la regulación existente impone límites de operación enfocados principalmente en temperatura y tensión. En el caso de la fluencia mecánica y la fragilización por reorientación radial de hidruros, la ISG-11 (revisión 3) de la NRC (USNRC, 2003) impone un límite de temperatura de 400°C en condiciones normales y operaciones de carga de corta duración, el cual sólo puede ser superado (hasta 570°C) por combustible de bajo quemado (menor de 45 GWd/tU) en operaciones de corta duración siempre y cuando la tensión circunferencial no supere 90 MPa . Para la oxidación de UO_2 se manejan distintas opciones, que de acuerdo a la ISG-22 de la regulación americana (USNRC, 2006) son: mantener el combustible en una atmósfera no oxidante (e.g., He), aumentar la eficiencia de detección de defectos, o determinar el tiempo de incubación necesario para propagar el fallo a partir de curvas empíricas que estimen dicho tiempo en función de la temperatura (denominadas curvas t-T).

A pesar de las medidas establecidas, factores como la tendencia a alcanzar mayores quemados, los nuevos materiales de vaina empleados o la extensión del periodo de almacén estimado (más allá de 100 años), conducen a una revisión continua de dicha regulación. Ello implica continuar la investigación al respecto, tanto a nivel experimental como analítico (Hanson et al., 2012).

En este marco, el principal objetivo de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear de el Ciemat está enfocado en el desarrollo de herramientas y metodologías de análisis del comportamiento termo-mecánico del combustible almacenado en seco. Este artículo ilustra el procedimiento seguido en la adquisición de capacidades predictivas ante los retos planteados. Además, se mues-

tran aplicaciones realizadas, principalmente centradas en análisis de sensibilidad, así como en el estudio de condiciones seguras.

CAPACIDADES DESARROLLADAS **Estrategia**

Dado el carácter termo-mecánico del análisis de integridad de barra, la estrategia seguida por el Ciemat para desarrollar capacidades analíticas al respecto se fundamenta en el empleo de un código de simulación termo-mecánica de barra válido para almacenamiento en seco. Puesto que las herramientas termo-mecánicas más consolidadas son aquellas aplicables a condiciones en reactor, se ha optado por escoger un código de referencia en el campo y extenderlo a condiciones de almacenamiento en seco. En concreto, se ha empleado FRAPCON-3, desarrollado por PNNL (*Pacific Northwest National Laboratory*) para la NRC (Geelhood et al., 2015).

FRAPCON-3 está dotado de una estructura que lo convierte en una plataforma óptima para su extensión a otros dominios, particularmente a almacenamiento en seco. Su arquitectura basada en tres módulos principales que se realimentan entre sí (térmico, mecánico y liberación de gases de fisión) ha permitido realizar un análisis de las limitaciones de la formulación original de cada módulo para simular condiciones de almacenamiento. Fundamentalmente, los módulos que han requerido adaptación son el mecánico y el térmico; los cambios específicos han sido:

- Módulo mecánico. Implementación de una ley de fluencia mecánica válida para almacenamiento en seco. También se ha incluido un criterio de inicio de propagación de fallo por oxidación de UO_2 , basado en el concepto de las curvas t-T.
- Módulo térmico. Implementación de ecuación ingenieril de evolución de temperatura de vaina en función de quemado y tiempo fuera de reactor.

Además ha habido otros cambios necesarios de carácter menor, como la desactivación del modelo de oxidación de vaina a partir del periodo de almacenamiento, asumiendo que el medio refrigerante es un gas inerte (e.g., He).

Los modelos desarrollados pueden, en general, calificarse de semi-em-

piricos; es decir, dotados de una estructura que trata de responder a la física del fenómeno, pero adaptados mediante el uso de coeficientes determinados a partir de datos experimentales obtenidos en la literatura. En el apartado siguiente se describirá dicho modelado. De modo excepcional, la ecuación de temperatura se ha derivado a partir de datos obtenidos de simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Para ello, el Ciemat también ha adquirido capacidades de análisis de la respuesta térmica del sistema de almacenamiento a partir del desarrollo de un modelo termofluidodinámico 3D con FLUENT (Herranz et al., 2015). Esto ha permitido conseguir un conocimiento preciso de la termofluidodinámica del sistema.

En lo que respecta a la fragilización por reorientación radial de hidruros, el desarrollo actual de la adaptación llevada a cabo permite modelar el efecto. En concreto, se asume reorientación radial de hidruros y transición dúctil-frágil en el largo plazo si la tensión y temperatura simuladas incumplen criterios basados en estudios experimentales de otros laboratorios (e.g., tensión límite para reorientación radial y temperatura de transición dúctil-frágil).

La extensión realizada se denomina FRAPCON-3xt, la cual se ha evaluado mediante verificaciones de consistencia a partir de simulaciones de escenarios postulados (Herranz y Fera, 2010; Fera y Herranz (2011, 2015)). La validación no es posible debido a la carencia de datos al respecto. Cabe destacar que FRAPCON-3xt permite un acoplamiento directo entre la simulación de la barra irradiada (i.e., condiciones iniciales para el periodo de almacén, asumiendo que el almacenamiento en piscina no cambia dichas condiciones) y el modelado bajo condiciones de contorno de almacenamiento en seco.

Por último, la determinación de la precisión del código en las predicciones realizadas es un aspecto importante que da un valor añadido a la metodología de análisis empleada. Por tanto, se han ampliado las capacidades computacionales al análisis de incertidumbres mediante el acoplamiento a FRAPCON-3xt de la herramienta DAKOTA (interfase entre códigos de simulación y métodos iterativos), desarrollada por SNL

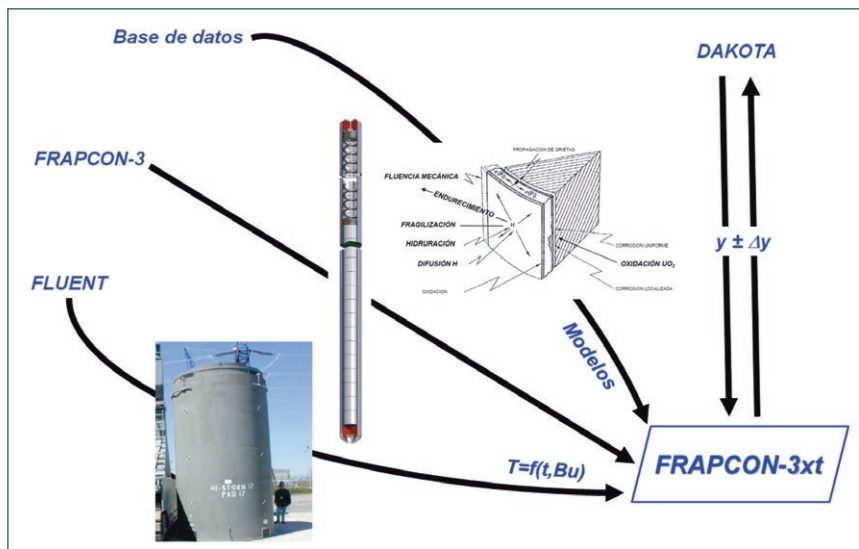


Figura 1. Estrategia de CIEMAT para adquirir capacidades de análisis de integridad de combustible almacenado en seco.

(Sandia National Laboratory) (Adams et al., 2014) y usada con códigos como FRAPCON-3. Esto permite aplicar la metodología BEPU (Best Estimate Plus Uncertainty), ampliamente empleada en otras áreas de la seguridad nuclear (OECD-NEA, 2016), en el ámbito del modelado termo-mecánico del combustible en almacenamiento en seco.

La estrategia descrita se ilustra en la Figura 1.

Modelos

La labor de modelado llevada a cabo por el Ciemat ha seguido pasos comunes para cada aspecto tratado:

- Construcción de base de datos sobre la que soportar los modelos.
- Determinación de variables primarias (i.e., factores con efecto impor-

tante en la variable modelada) y sus tendencias, para expresar los modelos en función de dichas variables.

- Derivación de modelos, buscando una fácil implementación en el código. Para ello, se han derivado ecuaciones lo menos parametrizadas posible, tratando de reproducir las tendencias experimentalmente observadas sin recurrir a aproximaciones polinómicas.

A continuación se muestran los modelos derivados (los parámetros de ajuste se expresarán con las letras a, b, c, d). La descripción detallada de la investigación realizada en cada caso está publicada en Herranz y Ferra (2009, 2010) y Ferra y Herranz (2011, 2015).

Fluencia mecánica

La base de datos construida para derivar una ley de fluencia mecánica se ha basado en datos recopilados de la bibliografía para material de vaina tanto no irradiado como irradiado (bajo y alto quemado). Los datos proceden de ensayos mecánicos bajo temperaturas y tensiones características de almacenamiento en seco. La información más completa encontrada al respecto corresponde a vaina de Zircaloy-4, de manera que la ley de fluencia mecánica derivada se ha ajustado a datos de dicho material.

Además de temperatura, T , tensión circunferencial, σ_θ , y tiempo de almacenamiento, t , otra variable primaria a tener en cuenta en la ley de fluencia mecánica es la fluencia de neutrones rápidos, ϕt , responsable del daño por irradiación que causa el endurecimiento de la vaina.

Con objeto de reducir la complejidad y parametrización de otros modelos existentes, manteniendo una exactitud razonable, la deformación por fluencia mecánica, ϵ_c , se ha expresado como una factorización de efectos (no se consideran efectos cruzados):

$$\epsilon_c = a \sigma_\theta^b \cdot \exp\left(\frac{-c}{T}\right) \cdot \exp(-d \cdot \phi t) \cdot t^{0.5}$$

Los rangos de validez son: 360-420 °C para temperatura, 75-250 MPa para tensión y $0-9 \cdot 10^{21}$ n/cm² para fluencia neutrónica. En la Figura 2a se muestra el buen acuerdo obtenido en la comparación entre modelo y datos (coeficiente de correlación R^2 de 0.96). La verificación

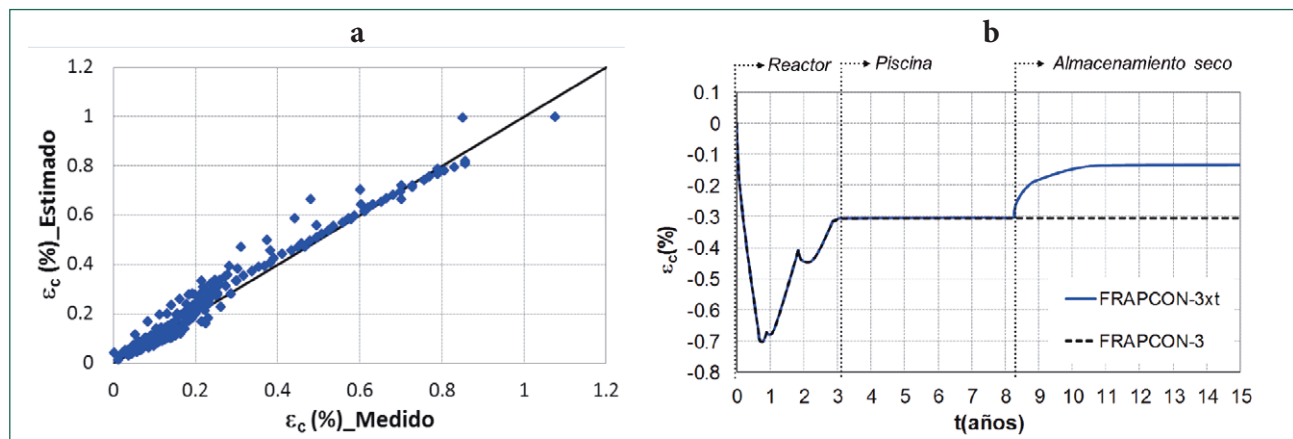


Figura 2. Ley de fluencia mecánica CIEMAT: comparaciones modelo-datos (a) y FRAPCON-3xt-FRAPCON-3 (b).

de consistencia realizada tras la implementación del modelo en FRAPCON-3xt se ilustra en la Figura 2b. La verificación se llevó a cabo a partir de la simulación de un escenario de barra irradiada a alto quemado (50 GWd/tU) y almacenada en torno a 10 años; los resultados mostrados en la Figura 2b ponen de manifiesto discrepancias significativas con la versión original del código a partir del periodo de almacenamiento en seco.

En la modelización de la fluencia mecánica, retos planteados como la recuperación del endurecimiento por recocido o el efecto del hidrógeno requieren de mayor información experimental para establecer modelos definitivos.

Oxidación de UO_2

El criterio establecido para el mecanismo de degradación asociado a la oxidación de UO_2 se ha basado en el tiempo de inicio de propagación de fallo. La base de datos se ha compilado a partir de trabajos experimentales disponibles en la literatura, realizados con combustible irradiado a bajo quemado.

El análisis de los datos obtenidos muestra temperatura, T , y quemado, Bu , como variables primarias (efecto acelerador de la temperatura y amortiguador del quemado), de manera que el tiempo de inicio de propagación de fallo se ha expresado en función de dichas variables:

$$t = a \cdot Bu^{-b} \cdot \exp\left[\frac{c \cdot \ln(Bu) - d}{T}\right]$$

El rango de validez de esta ecuación es 200-360 °C y 8-27 GWd/tU para temperatura y quemado, respectivamente. La Figura 3 muestra la comparación entre modelo y datos. Como puede observarse, la ecuación derivada captura las tendencias, aunque el coeficiente de correlación R^2 obtenido es de 0.87. La consideración conjunta de datos procedentes de combustibles PWR y BWR es parcialmente responsable de la dispersión observada y, por ende, del bajo valor de R^2 .

Cabe notar que la investigación sobre la que se fundamenta el modelo requiere de mayor experimentación a bajo quemado y de nuevos datos a alto quemado. Además, los experimentos se realizaron considerando una fuente ilimitada de agente oxidante, de manera que habría que ampliar la base de datos a condiciones más realistas.

Evolución de temperatura

La base de datos sobre la que se modela la evolución térmica es analítica. Como se comentó anteriormente, los datos se han obtenido de simulaciones CFD a partir del desarrollo de un modelo 3D con FLUENT. El sistema de almacenamiento modelado ha sido un contenedor vertical de hormigón del tipo HI-STORM (*Holtec International Storage and Transfer Operation Reinforced Module*) (Figura 4). Con

objeto de optimizar el coste computacional se han realizado cálculos estacionarios, empleando valores de decaimiento de combustible a lo largo del tiempo de almacenamiento en un rango de quemados representativo. El decaimiento de calor residual se ha definido de acuerdo a cálculos con ORIGEN obtenidos de la bibliografía (Álvarez et al., 2003).

Los datos térmicos obtenidos han permitido derivar una ecuación ingenieril de la evolución de la temperatura máxima alcanzada por la vaina, T_{max} , en función de quemado, Bu , y tiempo fuera de reactor, t_{out} (almacenamiento en piscina y en seco); para ello, se ha considerado dependencia exponencial con el tiempo modulada por el efecto del quemado:

$$T_{max} = T_{\infty} + \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \exp[b_i \cdot Bu^{-c} \cdot (t_{out} - t_{pmin})]$$

donde T_{∞} y t_{pmin} son la temperatura ambiente y el tiempo mínimo en piscina (asumiendo limitación de 400°C), respectivamente. Esta ecuación es válida para temperaturas inferiores a 400°C, valores de quemado en el rango 33-63 GWd/tU y tiempo fuera de reactor inferior a 300 años. La Figura 5 muestra el buen ajuste logrado entre la ecuación derivada y los datos (R^2 de 0.99).

La temperatura máxima obtenida permite hacer estudios conservadores de variables de interés (e.g., presión interna de barra). Un análisis de condiciones más realistas requeriría ampliar la base de datos con los perfiles axiales de temperatura. Además, la ecuación derivada es específica del contenedor simulado, así que su extensión a otro tipo de sistemas de almacenamiento implicaría el desarrollo de nuevos modelos CFD.

APLICACIONES

Las aplicaciones realizadas con FRAPCON-3xt se dividen en dos bloques. Por un lado, se realizan análisis de sensibilidad para determinar la importancia de los factores que afectan a los mecanismos de degradación postulados. Por otro lado, se evalúan aquellas condiciones que pueden ser limitantes en el comportamiento del combustible en su almacenamiento. Una amplia descripción de dichos estudios se puede encontrar en Herranz y Fera (2009) y Fera y Herranz (2011, 2015, 2016).

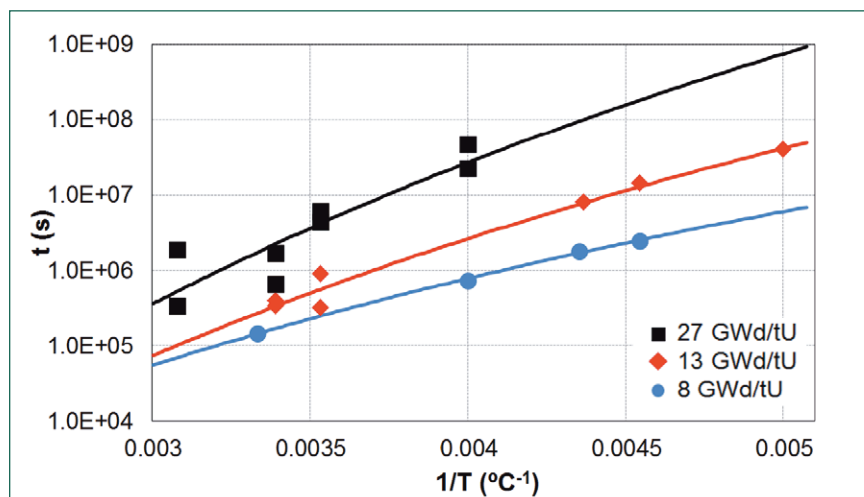


Figura 3. Comparación modelo-datos para el criterio de tiempo de propagación de fallo (símbolos y líneas representan datos y modelo, respectivamente).

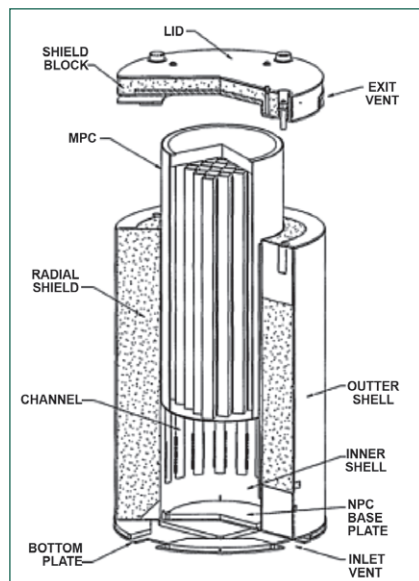


Figura 4. Ilustración descriptiva de contenedor HI-STORM.

A continuación se muestran los estudios enfocados en uno de los aspectos que suscita mayor interés actualmente: análisis de tensión en vaina como fuerza impulsora de la potencial reorientación radial de hidruros. Para realizar estos estudios se han simulado escenarios representativos de barra de combustible 17x17 PWR irradiada a alto quemado (65 GWd/tU) y, tras su paso por el almacenamiento en piscina, almacenada en contenedor asumiendo condiciones isotérmicas a la máxima temperatura permitida (i.e., 400°C). Las condiciones térmicas impuestas permiten estimar tensiones conservadoras.

Estudios de sensibilidad

Con objeto de analizar los factores que afectan a la tensión circunferencial en almacenamiento en seco, σ_θ , se ha determinado la desviación relativa, DR, debida a desviaciones del 5% de variables relacionadas. Las variables analizadas se dividen en tres bloques:

- Diseño. Volumen libre de plenum, V_p , y presión de llenado, Pf.
- Irradiación. Quemado, Bu.
- Almacenamiento en seco. Temperatura máxima inicial, T_i .

El estudio se ha realizado para distintas historias de irradiación simuladas (Figura 6a), descritas en NUREG-1754 (O'Donnell et al., 2001). Las desviaciones obtenidas (Figura 6b)

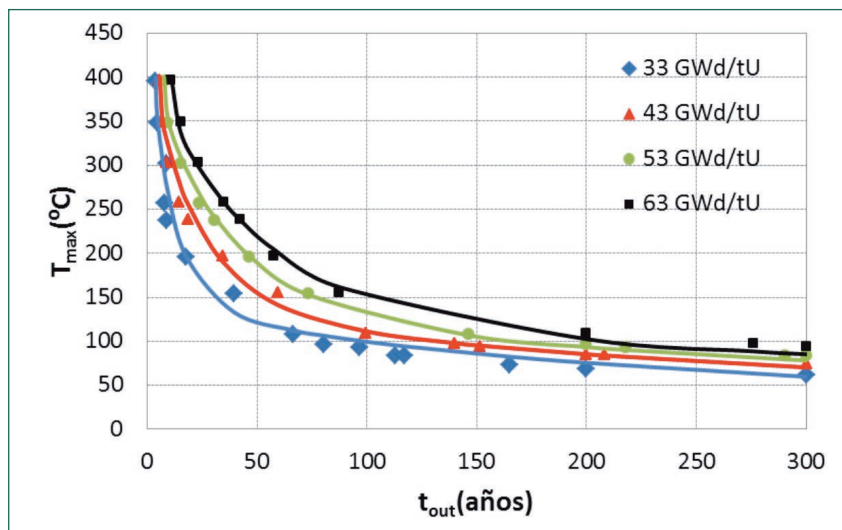


Figura 5. Comparación modelo-datos para evolución de temperatura (símbolos y líneas representan datos y modelo, respectivamente).

muestran que la tensión es ostensiblemente menos sensible a variables de diseño o temperatura de almacenamiento que al nivel de quemado. En cualquier caso, la sensibilidad con el quemado es moderada (DR inferior a 15%). En otras palabras, pequeños cambios de los factores analizados no implicarán cambios drásticos en la tensión de la barra almacenada. Las diferencias debidas a las distintas historias de irradiación simuladas se asocian a sinergias termo-mecánicas cuyo análisis detallado está fuera del alcance de este artículo.

Adicionalmente, se ha analizado la contribución a la sensibilidad obtenida con el quemado de factores asociados a la irradiación, como reducción de volumen libre de barra, número de moles de gases de fisión liberados y espesor de óxido en vaina. Se determina que, además de la reducción de volumen libre, la liberación de gases de fisión es uno de los principales contribuyentes al efecto de la irradiación sobre la tensión en almacenamiento, especialmente cuando la historia de potencia es demandante.

Evaluación de condiciones seguras

Basado en el escenario descrito anteriormente, se ha aplicado la metodología BEPU (empleo de FRAPCON-3xt con DAKOTA) para determinar la tensión en vaina bajo las condiciones de almacenamiento impuestas. Para

ello, se ha aplicado un análisis de incertidumbres probabilista considerando un 95% de nivel de confianza.

La Figura 7 ilustra los resultados logrados, tanto de mejor estimación, mostrando un aumento significativo de la tensión con el nivel de potencia, como de incertidumbre correspondiente. Asumiendo 90 MPa como límite de seguridad asociado a la reorientación radial de hidruros, solo la historia de potencia menos demandante resulta en una probabilidad superior al 95% de no alcanzar dicho límite (criterio 95/95). Cabe notar que la omisión del análisis de incertidumbres es particularmente importante en historias de potencia intermedias, donde la mejor estimación se sitúa a suficiente distancia del límite (la historia más agresiva de potencia se ubica tan próxima que, por conservadurismo, se consideraría alcanzado el límite establecido). Es para tales potencias intermedias para las que el análisis de incertidumbres señala que la estimación realizada podría en realidad alcanzar el umbral de tensión recomendado.

Para aquellas condiciones de irradiación que incumplen el criterio establecido, se ha realizado una evaluación de condiciones seguras (manteniendo nivel máximo de potencia, q'_{max}), tanto en términos de quemado (manteniendo T_i a 400°C) como de temperatura inicial en almacenamiento (manteniendo Bu a 65 GWd/tU). En concreto, se han determinado valores límite que

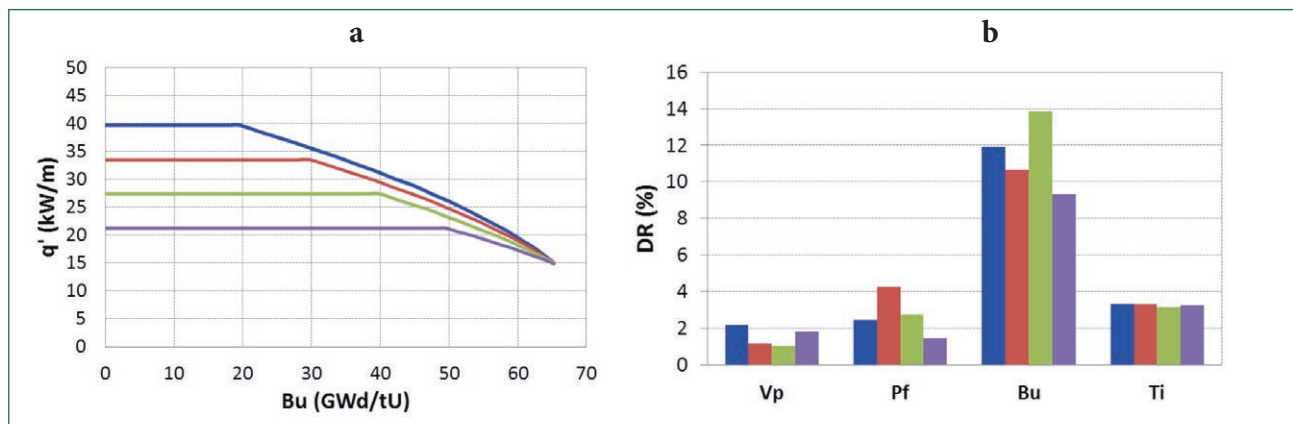


Figura 6. Análisis de sensibilidad de tensión en vaina: historias de potencia lineal promedio, q' , simuladas (a) y desviaciones relativas asociadas (en valor absoluto) (b).

aseguren la integridad de la vaina por reorientación radial de hidruros (i.e., cumplimiento de criterio 95/95). La Tabla 1 muestra los umbrales determinados. En ningún caso sería necesario reducir el quemado por debajo de 60 GWd/tU. En el caso del umbral de temperatura, las limitaciones parecen ser más drásticas a medida que aumentamos el nivel de potencia.

COMENTARIOS FINALES

La investigación del Ciemat sobre termo-mecánica de combustible almacenado en seco se está centrando en desarrollar capacidades analíticas que permitan establecer metodologías de evaluación de la integridad de barra. Para ello, se ha realizado la extensión a las condiciones previstas de un código de comportamiento termo-mecánico en reactor

como FRAPCON-3, denominado FRAPCON-3xt.

La citada extensión ha implicado generar nuevos modelos asociados a mecanismos de degradación postulados (i.e., ley de fluencia mecánica, criterio de fallo por oxidación de UO_2), así como modelar la caída de temperatura a lo largo del tiempo de almacenamiento. Esto último se ha basado en cálculos CFD, a partir de los cuales se ha derivado una ecuación ingenieril cuya implementación evita el aumento de coste computacional que supondría el acoplamiento de un código termohidráulico. Adicionalmente, con objeto de poder aplicar una metodología que tenga en cuenta la incertidumbre de la predicción (BEPU), se han ampliado las capacidades al análisis de incertidumbres.

Desde el punto de vista computacional, otra ventaja de FRAPCON-3xt radica en su capacidad para transmitir las condiciones de barra a final de vida en reactor como condiciones iniciales de almacenamiento, sin necesidad de acoplar dos códigos termo-mecánicos entre sí. Esto ha facilitado el estudio del efecto de la irradiación sobre mecanismos de degradación de interés como la reorientación radial de hidruros; en este caso, se ha determinado que fenómenos como la liberación de gases de fisión podrían tener mayor efecto sobre la tensión que produce la reorientación que las propias condiciones térmicas de almacenamiento.

La aplicación de la metodología BEPU a escenarios postulados de almacenamiento en seco ha mostrado la importancia de incluir incertidumbres en estudios de seguridad asociados. A falta de confirmación con un mayor número de casos más realistas, se ha determinado un umbral de quemado mínimo de 60 GWd/tU para evitar tensiones que degraden la vaina por reorientación radial de hidruros.

Dado que las capacidades adquiridas están sometidas a continua actualización y mejora, se prevé trabajo futuro en las siguientes líneas:

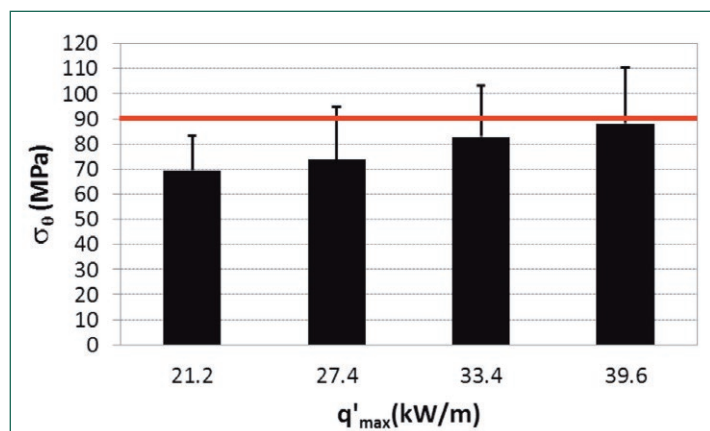


Figura 7. Predicciones BEPU de tensión en vaina para historias de potencia simuladas, representadas por potencia máxima, q'_{max} (línea roja representa límite de tensión establecido).

q'_{max} (kW/m)	Bu (GWd/tU)	T_i (°C)
27.4	64	380
33.4	62	350
39.6	60	300

Tabla 1. Umbrales de quemado y temperatura.



- Modelado de la reorientación radial de hidruros, abarcando los diferentes fenómenos que determinan dicho mecanismo (i.e., distribución de hidrógeno en vaina, disolución/precipitación, reorientación de hidruros).
- Extensión del modelado de la evolución de temperatura a otros sistemas de almacenamiento empleados (e.g., contenedores metálicos).
- Ampliación del rango de validez del criterio de fallo por oxidación de UO_2 a condiciones más realistas y alto quemado.
- Adaptación de la ley de fluencia mecánica a otros efectos (e.g., recuperación por recocido, efecto del hidrógeno) y otros materiales de vaina (e.g., Zircaloy-2, Zirloy).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro reconocimiento a Enresa por su financiación y, en particular, a Francisco Javier Fernández por el apoyo técnico. Asimismo, nuestro agradecimiento a Manuel Novo por las discusiones técnicas mantenidas durante el último año. ■

- Adams, B.M., Ebeida, M.S., Eldred, M.S., Jakeman, J.D., Swiler, L.P., Stephens, J.A., Vigil, D.M., Willey, T.M., Bohnhoff, W.J., Dalbey, K.R., Eddy, J.P., Hu, K.T., Bauman, L.E., Hough, P.D., 2014. DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.2 Reference Manual. SAND2014-5015.
- Álvarez R., Beyea, J., Janberg, K., Kang, J., Lyman, E., Macfarlane, A., Thompson, G., Von Hippel, F.N., 2003. Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States. Science and Global Security, 11, 1-51.
- Fera, F., Herranz, L.E., 2011. Creep assessment of Zry-4 clad high burnup fuel under dry storage. Progress in Nuclear Energy 53, 395-400.
- Fera, F., Herranz, L.E., 2015. On the way to enabling FRAPCON-3 to model spent fuel under dry storage conditions: The thermal evolution. Annals of Nuclear Energy, 85, 995-1002.
- Fera, F., Herranz, L.E., 2016. Application of the BEPU methodology to assess fuel performance in dry storage. Annals of Nuclear Energy. In press.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Raynaud, P.A., Porter, I.E., 2015. FRAPCON-4.0: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. PNNL-19418, Vol.1 Rev.2.
- Hanson, B., Alsaed, H., Stockman, C., Enos, D., Meyer, R., Sorenson, K., 2012. Gap analysis to support extended storage of used nuclear fuel. PNNL-20509.
- Herranz, L.E., Fera, F., 2009. Spent fuel rod splitting due to UO_2 oxidation during dry storage: assessment of the database. Progress in Nuclear Energy, 51, 201-206.
- Herranz, L.E., Fera, F., 2010. Extension of the FRAPCON-3.3 creep model to dry storage conditions. Progress in Nuclear Energy, 52, 634-639.
- Herranz, L.E., Penalva, J., Fera, F., 2015. CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: Model fundamentals and sensitivity studies. Annals of Nuclear Energy, 76, 54-62.
- O'Donnell, G.M., Scott, H.H., Meyer, R.O., 2001. Comparative Analysis of Fuel Designs. NUREG-1754.
- OECD-NEA, 2016. PREMIUM, a benchmark on the quantification of the uncertainty of the physical models in the system thermal-hydraulic codes: methodologies and data review. NEA/CSNI/R(2016)9.
- USNRC, 2000. 10 CFR Part 72.
- USNRC, 2003. Spent Fuel Project Office, Interim Staff Guidance N°11 (ISG-11, rev 3).
- USNRC, 2006. Spent Fuel Project Office, Interim Staff Guidance N° 22 (ISG-22).