

INSPECCIONES DE COMBUSTIBLE: NECESIDADES PRESENTES Y FUTURAS



LUCILE FALLOT

Ingeniera del producto
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A. S.M.E.



PALOMA VIÑAS PEÑA

Ingeniera del producto
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A. S.M.E.



ALICIA SÁNCHEZ SIGÜERO

Jefa de Gestión de Equipos
(Servicios en Central)
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A. S.M.E.

INTRODUCCIÓN

Las inspecciones realizadas durante todas las fases del ciclo de combustible nuclear son uno de los principales medios utilizados para garantizar la fiabilidad del combustible, es decir asegurar el correcto comportamiento del elemento combustible durante su operación y su posterior gestión como residuo de alta actividad.

La fiabilidad del combustible es un factor clave en la operación de las centrales nucleares; y su análisis permite, entre otros objetivos, identificar comportamientos anómalos del combustible como:

- Defectos en la vaina, los tapones o sus soldaduras, que provocan la liberación de los productos de fisión desde el interior de la vaina al refrigerante del circuito primario. La fuga de los productos de fisión al refrigerante se detecta mediante el análisis de la actividad del refrigerante del circuito primario.
- Fracturas de los componentes estructurales del elemento combustible o deformaciones excesivas de su geometría que impidan su correcto manejo.

Las inspecciones llevadas a cabo durante el proceso de fabricación del combustible aseguran la ausencia de defectos que podrían dar lugar a fallos de combustible durante

la operación. Dichas inspecciones son requisitos indicados en los procedimientos de fabricación de ENUSA y cumplen los requisitos más exigentes indicados en la normativa de garantía de calidad para este tipo de producto.

Una vez que el combustible inicia su irradiación en el reactor, ENUSA diseña y realiza en las centrales nucleares campañas de inspecciones mediante técnicas no destructivas. Los objetivos específicos de las inspecciones y los métodos empleados difieren en función de las necesidades. Los resultados de dichas inspecciones permiten evaluar la fiabilidad del combustible y caracterizarlo para su almacenamiento en contenedores.

El análisis del comportamiento del combustible durante la operación, así como la gestión del combustible gastado para su almacenamiento en seco durante largos periodos de tiempo identifica áreas donde es necesario la obtención de datos diferentes a los obtenidos en las inspecciones realizadas en planta. Por ello, ENUSA desarrolla programas de I+D+i para obtener datos experimentales que permitan un conocimiento más exhaustivo del comportamiento del combustible y que incluyen inspecciones en celdas calientes.

Este artículo se centra en la presentación de los distintos objetivos de las campañas de inspección del combustible irradiado y de los métodos empleados. A modo de conclusión se identifican las futuras necesidades en cuanto a las inspecciones del combustible en la industria nuclear nacional e internacional.

OBJETIVO DE LAS INSPECCIONES DE COMBUSTIBLE NUCLEAR EN CENTRAL: ANÁLISIS DE FIABILIDAD Y CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE GASTADO

Los elementos combustibles son irradiados durante varios ciclos de entre 12 y 24 meses, según la planta. Las inspecciones de combustible en central se llevan a cabo durante las actividades de recarga o mientras el elemento combustible permanece en la piscina de combustible gastado (PCG).

Dichas inspecciones responden a objetivos y alcances diferentes. No son sistemáticas y se planifican en función de las necesidades de la operación de la central y del análisis del comportamiento del combustible.

Desde el punto de vista del comportamiento del combustible en operación y de acuerdo con la referencia [1], los programas de inspección se diseñan y planifican con el objetivo de:

- Obtener un mayor conocimiento del comportamiento del combustible bajo las condiciones de operación de cada planta.
- Determinar los márgenes reales de operación frente a los criterios de seguridad.
- Identificar áreas de mejora del combustible.
- Monitorizar el comportamiento del combustible tras un cambio en el diseño del combustible o en las condiciones de operación: cambio de la química del refrigerante, de la estrategia de operación (longitud del ciclo, extensión del quemado máximo alcanzado por los elementos combustibles, diseño del núcleo, etc.).
- Conocer las capacidades predictivas de los modelos de cálculo empleados para el diseño del combustible y del núcleo de los reactores.
- Soportar las respuestas a los requisitos de licenciamiento.

Un ejemplo de programa de vigilancia del comportamiento del combustible es el desarrollado por Enusa junto con las centrales PWR (*Pressurized Water Reactor*)-Westinghouse españolas para seguir el comportamiento del nuevo diseño de elemento combustible MAEF-2012 con vainas de **ZIRLO Optimizado™⁽¹⁾**. Se planificaron y llevaron a cabo distintos tipos de inspecciones en cuatro de las cinco plantas participantes: inspecciones visuales, medidas del espesor de la capa de óxido en las barras periféricas de los elementos y caracterización dimensional (crecimiento del elemento combustible, de las barras periféricas, de las rejillas, y deformaciones geométricas: arqueado, inclinación y torsión). Cada campaña tuvo un alcance de entre 4 y 12 elementos combustibles por planta después de uno, dos y tres ciclos de

irradiación. Como resultado de este programa se comprobó que el nuevo diseño de elemento combustible presentaba un excelente comportamiento en operación y las barras de combustible de ZIRLO Optimizado un mejor comportamiento frente a la oxidación.

En el caso de que existan indicaciones de fuga de productos de fisión al refrigerante del circuito primario durante la operación del reactor (detectadas mediante el análisis de la actividad del refrigerante), se realizan inspecciones relacionadas con la estanqueidad durante las actividades de recarga para identificar las fugas en el combustible y evitar la reinserción de un elemento fugado al núcleo. Adicionalmente, se pueden llevar a cabo inspecciones visuales de la barra fugada para determinar el mecanismo de fallo y la causa que llevaron a producir la fuga. De esta manera se definen acciones correctivas cuyo objetivo es evitar fugas debidas al mismo mecanismo de fallo.

Con respecto al combustible gastado, su gestión contempla su almacenamiento y posterior transporte en contenedores. Para poder llevar a cabo esa gestión de manera adecuada es necesario clasificar el combustible en función del cumplimiento de las funciones de seguridad:

- Blindaje.
- Confinamiento de los productos de fisión.
- Criticidad.
- Evacuación del calor.
- Recuperabilidad.

El proceso de caracterización y clasificación de combustible gastado de ENUSA identifica las principales fenomenologías que afectan a la integridad tanto de la barra como del elemento combustible. En base a dicho análisis, se identifican los elementos combustibles afectados y se planifican las inspecciones para poder conocer el grado de afectación de estos elementos combustibles. Los principales tipos de inspección que se realizan para caracterizar el combustible gastado son visuales y las relacionadas con la estanqueidad de las barras combustibles. Atendiendo a los resultados de dichas inspecciones, los elementos combustibles quedan debidamente caracterizados y pueden ser analizados en relación al cumplimiento de las funciones de seguridad durante el almacenamiento y transporte en contenedores.

INSPECCIONES Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS SOBRE EL COMBUSTIBLE EN CENTRAL

ENUSA utiliza diversos equipos de inspección, algunos de los cuales forman el conjunto de equipos SICOM (Figura 1), desarrollados en el marco de una colaboración ENUSA/TECNATOM. Se pueden emplear para inspeccionar elementos combustibles irradiados en reactores de tipo PWR y BWR (*Boiling Water Reactor*). Los equipos SICOM se utilizan bajo agua, y emplean técnicas no destructivas, es decir que no alteran las propiedades del elemento y sus barras combustibles. Dichas técnicas se presentan a continuación.

Inspecciones visuales

Para comprobar el estado superficial de las barras periféricas y la integridad de los componentes estructurales del elemento combustible, se realizan inspecciones visuales con

¹ZIRLO Optimizado™ es una marca comercial de Westinghouse Electric Company LLC en los Estados Unidos y puede registrarse en otros países. Todos los derechos están reservados y su uso sin autorización prohibido.

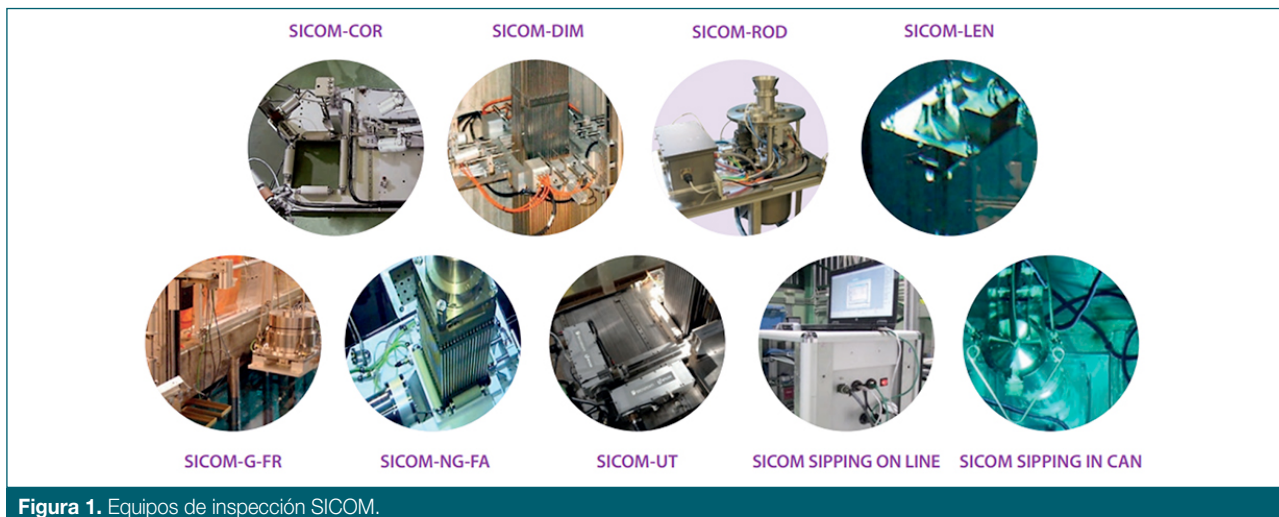


Figura 1. Equipos de inspección SICOM.

cámaras sumergibles resistentes a la radiación. Se posiciona la cámara encima de los racks de la PCG, se posiciona el elemento a inspeccionar delante y se graban imágenes de las 4 caras del elemento, incluyendo sus cabezales inferior y superior. Durante la inspección, el elemento está sujeto del mástil de la máquina de manejo y va subiendo y bajando verticalmente.

También se puede proceder a la inspección magnificada de una barra combustible extraída del elemento combustible, con el fin de caracterizar una fuga o evaluar las marcas de desgaste rejilla-barra combustible. Una vez inspeccionada, se vuelve a insertar la barra dentro del elemento combustible, el cual puede volver a operar.

ENUSA dispone de equipamiento específico (cámaras sumergibles, sistemas de grabación y utillaje auxiliar) para realizar adecuadamente estas inspecciones visuales.

Medida del espesor de la capa de óxido

Durante la operación del elemento combustible en el reactor, se forma una capa de óxido en la superficie de las barras debido a las condiciones químicas y térmicas del refrigerante. Una corrosión excesiva de la vaina puede llegar a fragilizarla, por lo tanto se debe comprobar que el espesor del óxido es inferior al valor máximo permitido.

El equipo SICOM-COR (Figura 2) permite medir el espesor de la capa de óxido formada en las varillas periféricas del elemento mediante corrientes inducidas. Se coloca el equipo encima de los racks de la PCG, y se posiciona la sonda del equipo junto a la barra a inspeccionar. Mientras el elemento combustible se mueve verticalmente, se va registrando las medidas de la sonda para obtener el perfil axial del espesor de la capa de óxido. El material de la sonda del equipo y el metal de la vaina son dos materiales conductores. Las características de la corriente en la sonda y de la corriente inducida en la vaina dependen de la distancia entre ambos componentes, es decir el espesor de la capa del óxido, no conductor.

Si se desea inspeccionar una barra no periférica, es necesario extraerla y realizar la inspección con el equipo SICOM-ROD, que también permite medir el espesor de la capa de óxido mediante corrientes inducidas.

Inspecciones dimensionales

Se pueden emplear dos métodos para medir las dimensiones del elemento y de la barra combustible.

El primer método consiste en emplear una banda métrica que se posiciona al lado del elemento combustible o de la barra combustible a inspeccionar y un módulo de visión artificial con tratamiento de la imagen. El equipo SICOM-LEN se basa en esta técnica para medir la longitud de una barra combustible extraída. También se usa esta técnica, aunque sin módulo de visión artificial, para medir la longitud de los canales de los elementos combustibles BWR.

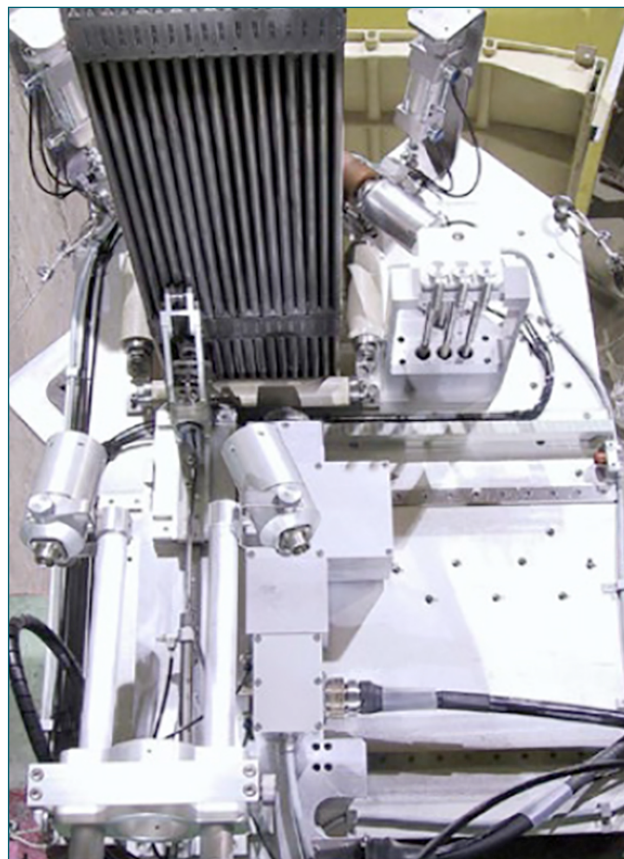


Figura 2. Inspección de un elemento combustible con el equipo SICOM-COR.

Otro método consiste en utilizar transductores de desplazamiento lineal (LVDT): son dispositivos electromecánicos que convierten un desplazamiento en señales eléctricas variables que permiten calcular las medidas de un componente. El sistema de medida del equipo SICOM-DIM, compuesto por 12 LVDTs, permite medir la longitud del elemento combustible, el ancho de las rejillas y las deformaciones geométricas del elemento (arqueado, torsión e inclinación).

Otro equipo de la familia SICOM, el SICOM-ROD, dispone de 2 LVDTs para realizar un examen perfilométrico de una barra combustible extraída.

Determinación de los niveles de quemado

ENUSA y TECNATOM desarrollaron conjuntamente dos equipos para medir el quemado de los elementos combustible (SICOM-NG-FA) y barras combustibles extraídas (SICOM-G-FR). Se utilizan en la PCG para caracterizar el combustible tras un período de varios años de enfriamiento. Ambos sistemas están equipados con detectores de radiación que permiten medir el perfil axial de emisión gamma y el espectro neutrónico del elemento combustible en el caso del SICOM-NG-FA y el perfil de emisión gamma de la barra combustible con el SICOM-G-FR. A partir de estos datos, se calcula el perfil axial de quemado. Adicionalmente, el equipo SICOM-G-FR permite la medida de la concentración de Kr-85 en el plenum, que puede utilizarse para determinar la presión interna de barra.

Detección de una fuga en un elemento combustible

Durante la operación del reactor, los análisis radioquímicos de la actividad del refrigerante permiten detectar cambios anómalos en la actividad de los radioisótopos liberados al agua del primario, señal de que se ha producido una fuga en una barra combustible.

En los reactores BWR, es posible identificar además la zona del núcleo donde se encuentra el elemento fugado mediante un "Power Suppression Test" (PST). Consiste en subir y bajar secuencialmente las barras de control a potencia reducida, y monitorizar los cambios inducidos en la actividad de los gases de fisión. Mover las barras de control cerca de un elemento con fuga aumenta la liberación de los productos de fisión de la barra fallada. En los reactores PWR, no existe un proceso equivalente.

Una vez el ciclo con fuga termina, se realizan inspecciones para identificar el elemento fugado, tanto en reactores PWR como BWR. Durante las actividades de recarga, ENUSA utiliza el equipo SICOM ON-LINE SIPPING en línea con la descarga del núcleo e inspecciona todos los elementos combustibles al salir de la vasija. Una vez el elemento está dentro del mástil de la máquina de recarga, se recoge una muestra de agua mediante el sistema de succión. La muestra pasa por la unidad de proceso del equipo, donde se separa el gas de la misma para posteriormente medir la actividad del Xe-133: una alta actividad de Xe-133 es una indicación de que el elemento está fugado.

En el caso de elementos almacenados en PCG que requieran una inspección de integridad, se puede usar el SICOM IN-CAN SIPPING. La unidad de proceso es la misma que el SICOM ON-LINE SIPPING, pero el sistema de toma de

muestra es distinto. En este caso, el equipo está compuesto por una caja hermética que se dispone en la PCG, en la cual se coloca el elemento a inspeccionar. Se realiza una aspiración para recoger una muestra de agua, la cual pasa por la unidad de proceso, donde se separa el gas de la misma y se analiza la actividad del gas Kr-85.

Los equipos de SIPPING permiten detectar la presencia de una fuga en un elemento combustible, sin identificar la barra fugada. Para ello, es necesario inspeccionar el elemento combustible con el equipo SICOM-UT, que está compuesto por dos palpadores ultrasónicos que se posicionan horizontalmente alrededor de la barra a inspeccionar, sin necesidad de extraerla del elemento (Figura 3). Uno de los palpadores emite una señal ultrasónica, que atraviesa la barra combustible hasta llegar al otro palpador. En el caso de que la barra esté fugada, entrará agua dentro de la varilla y si la barra es estanca, no habrá agua dentro. El agua atenúa la señal ultrasónica, por lo cual una señal recibida atenuada indica que la barra está fugada. Con el SICOM-UT, se inspeccionan todas las barras combustibles de un elemento sin extraerlas.

INSPECCIONES Y ENSAYOS REALIZADOS EN CELDAS CALIENTES

Para algunos programas de investigación o para caracterizar en profundidad una fuga de combustible, se necesita obtener más información de la que se dispone mediante ensayos no destructivos. Con este objetivo, se traslada el combustible (en general, una o varias varillas extraídas o componentes estructurales sueltos) a un recinto con contención donde se puede manipular material radiactivo (laboratorio de celdas calientes) y realizar ensayos destructivos.

ENUSA participa en el desarrollo de programas de I+D+i para obtener un conocimiento más exhaustivo del comportamiento del combustible, los cuales, en algunas ocasiones incluyen ensayos destructivos en celdas calientes. Como



Figura 3. Palpadores del equipo SICOM-UT.

resultado de estos programas, se han obtenido los datos experimentales necesarios para justificar el buen comportamiento del combustible en operación y el cumplimiento de las funciones de seguridad del combustible gastado con defectos en vaina.

Cuando una barra combustible o un componente estructural de un elemento combustible irradiado se traslada a una instalación de celdas calientes, su análisis puede incluir los siguientes ensayos no destructivos:

- Inspecciones visuales.
- Detección de defectos superficiales y medida del espesor de la capa de óxido mediante corrientes inducidas.
- Caracterización dimensional de las barras combustibles mediante perfilometría.
- Obtención de la posición de las pastillas y su estado mediante radiografía de neutrones.
- Obtención del perfil axial cualitativo del quemado de la barra mediante gamma escáner.

Con el objetivo de extraer la máxima cantidad posible de información, se pueden realizar los siguientes ensayos destructivos:

- Ensayo de pinchazo para determinar la presión interna de la barra combustible y la composición de los gases de fisión mediante espectrometría de masas.
- Microscopía óptica o electrónica para ver las principales características microestructurales del componente a inspeccionar (Figura 4) [2]. Para estos ensayos es necesario haber segmentado la barra o componente estructural a analizar.
- Ensayos de inmersión de pastilla para determinar su densidad.
- Ensayos de dilución de pastilla para analizar su composición isotópica,
- Ensayos de extracción al vacío en caliente para medir la concentración de hidrógeno.
- Ensayos mecánicos para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales tras irradiación: ensayos de tracción, compresión, fatiga, etc.

Todo este conjunto de ensayos permiten la caracterización de las muestras tanto a nivel macro como microscópico y proporcionan los datos necesarios para evaluaciones relacionadas con el comportamiento del combustible.

CONCLUSIONES: FUTURAS NECESIDADES

Las inspecciones realizadas en central son una herramienta imprescindible para el seguimiento del comportamiento del combustible nuclear a lo largo de su irradiación, el análisis de los fallos de combustible y la caracterización del combustible gastado para su almacenamiento y posterior transporte en contenedores.

Los equipos de inspección visual de ENUSA junto con los equipos de inspección SICOM, desarrollados por ENUSA y TECNATOM, emplean técnicas no destructivas basadas en inspecciones visuales, corrientes inducidas, ultrasonidos y transductores de desplazamiento lineal. Dichos equipamientos han demostrado tener una alta fiabilidad y han permitido caracterizar un gran número de elementos combus-

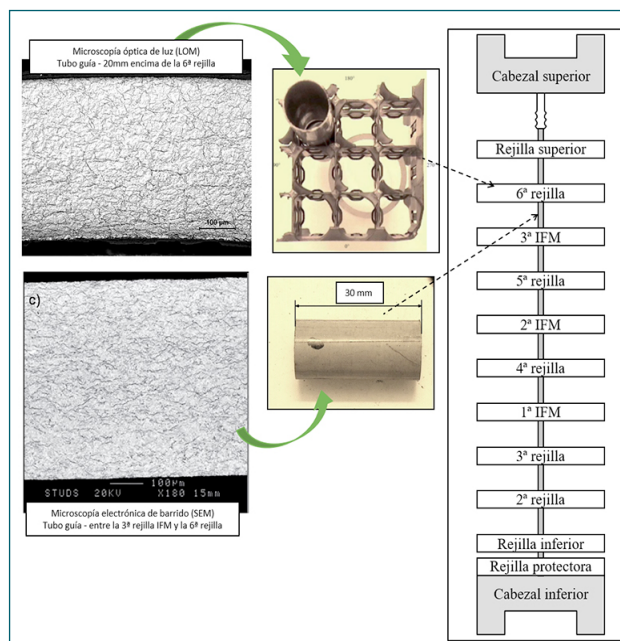


Figura 4. Microscopía del tubo guía de un elemento combustible.

tibles. No obstante, la posible aparición de defectologías en el combustible durante la operación hace necesario desarrollar metodologías que permitan obtener un conocimiento más exhaustivo para justificar el buen comportamiento del combustible tanto en operación como durante el almacenamiento y transporte en contenedores. Con este fin, ENUSA ha planificado y llevado a cabo programas de I+D+i donde se han incluido ensayos en celdas calientes.

La necesidad de las inspecciones tanto en un futuro inmediato como en un horizonte más a largo plazo es incuestionable dentro del sector nuclear ya que han demostrado ser de vital importancia en el proceso de licenciamiento de nuevos productos, para la operación de las centrales y por último para la gestión del combustible gastado. Es por ello que dentro del desarrollo internacional de nuevos diseños de combustible avanzado “Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels” (ATFs), una parte fundamental es la obtención de datos reales del comportamiento de este nuevo combustible mediante inspecciones de combustible en central y en celdas calientes, planificadas hasta después de los primeros ciclos de irradiación de estos combustibles del futuro en los reactores comerciales. Además, la caracterización de estos nuevos productos impulsa la necesidad de desarrollar nuevos métodos de inspección.

Las inspecciones de combustible han sido, son y seguirán siendo una de las herramientas más importantes para asegurar la fiabilidad del combustible en todas las etapas del ciclo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. “Fuel Reliability Guidelines: Fuel Surveillance and Inspection, Revision 4”, EPRI, Palo Alto, CA: 2022. 3002025295.
- [2]. J. M. García-Infanta et al., “Oxidation and Hydrogen Uptake of ZIRLO Structural Components Irradiated to High Burn-Up”, ASTM 17th International Symposium, 2013. ■