

EL CICLO DE LA BARRA COMBUSTIBLE: FABRICACIÓN, INSPECCIÓN Y CERTIFICACIÓN



MARIO TOLENTINO BÁRTULOS

Ingeniero de Calidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS

INTRODUCCIÓN

ENUSA, mediante su instalación puesta en marcha en el año 1985 en Juzbado (Salamanca), es responsable de la fabricación y suministro de elementos combustibles a seis de las siete centrales nucleares nacionales en explotación, así como a otras centrales europeas localizadas en Francia, Bélgica, Finlandia o Suecia.

El elemento combustible que llega a las centrales nucleares consiste eminentemente en una estructura metálica en la que se insertan barras combustibles; la cantidad de barras depende del diseño. La energía que convierte a este elemento en combustible la proporcionan las pastillas de uranio alojadas en el interior de las barras.

El diseño del combustible nuclear está determinado por la tecnología de generación de energía nuclear de la central de destino y por el propio diseño del reactor. En el caso de la

fábrica de ENUSA, actualmente se trabaja con las tecnologías PWR (*Pressurized Water Reactor*), BWR (*Boiling Water Reactor*) y VVER (Reactor Energético de Agua-Agua).

Este artículo se centra en la barra combustible, generalizando conceptos que pueden variar entre tecnologías o diseños, para realizar un recorrido completo sobre su ciclo de fabricación e inspección (**Figura 1**).

El análisis de este ciclo aporta una visión global de las características de diseño y de los parámetros de proceso que se controlan y verifican mediante la aplicación de técnicas de inspección y equipos de ensayos no destructivos (END) con la tecnología más avanzada.

COMPONENTES DE UNA BARRA COMBUSTIBLE

Las barras son el elemento principal de un combustible nuclear, siendo la barrera física entre el material fisionable y el núcleo del reactor.

Una barra combustible consta de un tubo o vaina, pastillas de óxido de uranio (UO_2), un tapón inferior, un tapón superior, helio y un muelle. Algunos modelos de barra combustible también introducen pastillas de uranio con determinados enriquecimientos de gadolinio.

Los requisitos funcionales de la barra combustible desde el punto de vista de diseño son la integridad y estanqueidad estructural para evitar fugas de productos de fisión, la generación de calor (y transferencia al refrigerante), así como alcanzar el quemado y tiempo de residencia establecido en el diseño.

La certificación final de las barras combustibles implica la verificación previa de las características de diseño de sus componentes, lo cual se realiza mediante diferentes revisiones

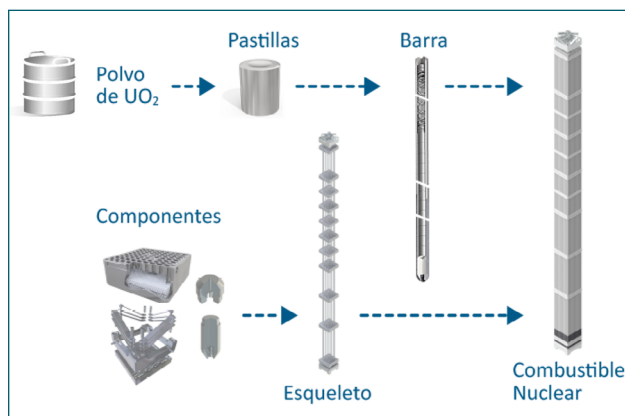


Figura 1. Esquema básico de la fabricación de combustible nuclear PWR.

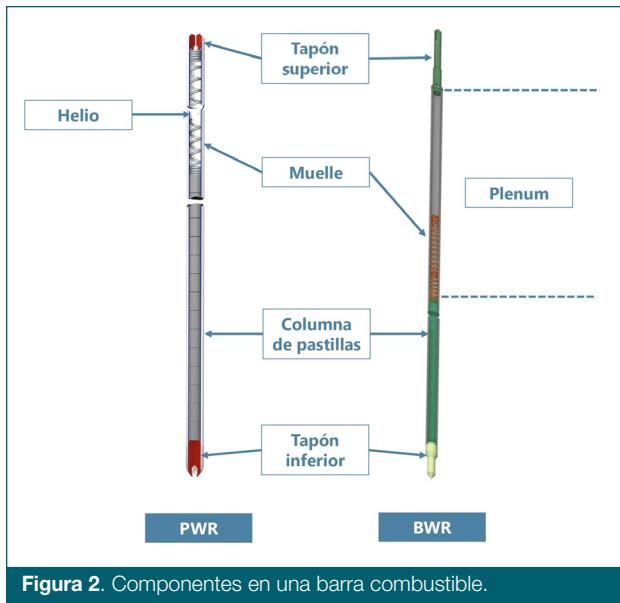


Figura 2. Componentes en una barra combustible.

documentales e inspecciones.

En la **Figura 2** se muestra un esquema del diseño mecánico de una barra combustible PWR (la tecnología más extendida en el mundo) y de una barra combustible BWR.

Tubo o vaina

El tubo combustible, vaina o varilla es una pieza hueca de forma cilíndrica y de aleación de zirconio, que habitualmente tiene una longitud cercana a los 4 m y un diámetro exterior de unos 10 mm. Los tubos, al igual que el resto de los componentes, se someten a una inspección visual y dimensional en su recepción en la que se verifican características como su longitud, diámetro interior, diámetro exterior, rectitud o perpendicularidad.

Pastillas

Las pastillas de UO_2 , fabricadas en una etapa anterior en el área cerámica, se caracterizan por su porcentaje de enriquecimiento del isótopo uranio-235 (^{235}U), así como por el porcentaje de enriquecimiento de gadolinio cuando aplica, presentado también en su forma de óxido, Gd_2O_3 .

El diámetro y longitud de las pastillas varía; se puede considerar como estándar una longitud entre 8 mm y 10 mm y un diámetro de 9 mm (siendo este ligeramente superior en las pastillas BWR que en las de PWR).

Para la certificación de las pastillas es necesario obtener resultados aceptables en los análisis físico-químicos que se realizan en el laboratorio químico de control de calidad: enriquecimiento (^{235}U), contenido isotópico (^{234}U y ^{236}U), contenido en uranio (%U), composición (contenido en halógenos, impurezas y otros), densidad, densificación (ensayo de estabilidad térmico), porosidad, ceramografías, etc. Del mismo modo, las pastillas deben superar una inspección visual y dimensional al final de su proceso de fabricación.

Tapones

La geometría exterior final de la barra combustible se obtiene tras la soldadura de dos tapones, uno superior y otro inferior, de dimensiones y configuraciones diferentes. La configuración de los tapones, ambos de aleaciones de zirconio, también varía

entre tecnologías y diseños. El denominado tapón inferior es el que se suelda primero, convirtiendo a la vaina en un receptáculo adecuado para la posterior carga de pastillas. Tras la carga, se suelda el tapón superior, el cual lleva un taladro pasante de pequeño diámetro que permite la presurización de la barra.

Los tapones también se someten a inspecciones previas a su puesta en la línea, en las cuales se toman muestras representativas de cada lote para verificar que todas sus cotas dimensionales, tanto externas como internas mediante ensayos destructivos (ED), son conformes al plano.

Muelle y helio

Los muelles son resortes helicoidales de acero inoxidable cuya función es aportar fuerza de sujeción sobre la columna de pastillas para impedir su movimiento y daños durante las manipulaciones y transporte.

Por su parte, el helio es un componente que consigue la estanqueidad de la barra completando el volumen sobrante en su interior. El helio se recibe del suministrador en botellas a presión y debe cumplir con unos valores de pureza y composición definidos.

Diferencias entre tecnologías PWR y BWR

En este punto es interesante destacar que, mientras que en la tecnología BWR, un mismo elemento combustible utiliza barras de diferentes modelos mecánicos (diferentes tapones y longitudes de tubo) y modelos nucleares (cada barra cuenta con varias zonas con pastillas de uranio de diferentes enriquecimientos y/o porcentajes de gadolinio), en la tecnología PWR, cada elemento combustible utiliza una sola configuración o modelo mecánico y las barras son más uniformes en cuanto a los enriquecimientos base.

PROCESOS DE FABRICACIÓN E INSPECCIÓN

A continuación, se realiza un seguimiento del ciclo de fabricación e inspección de las barras combustibles, profundizando en cuáles son las características que han de controlarse y verificarse para la certificación final del producto y en cómo se realiza dicho control y verificación.

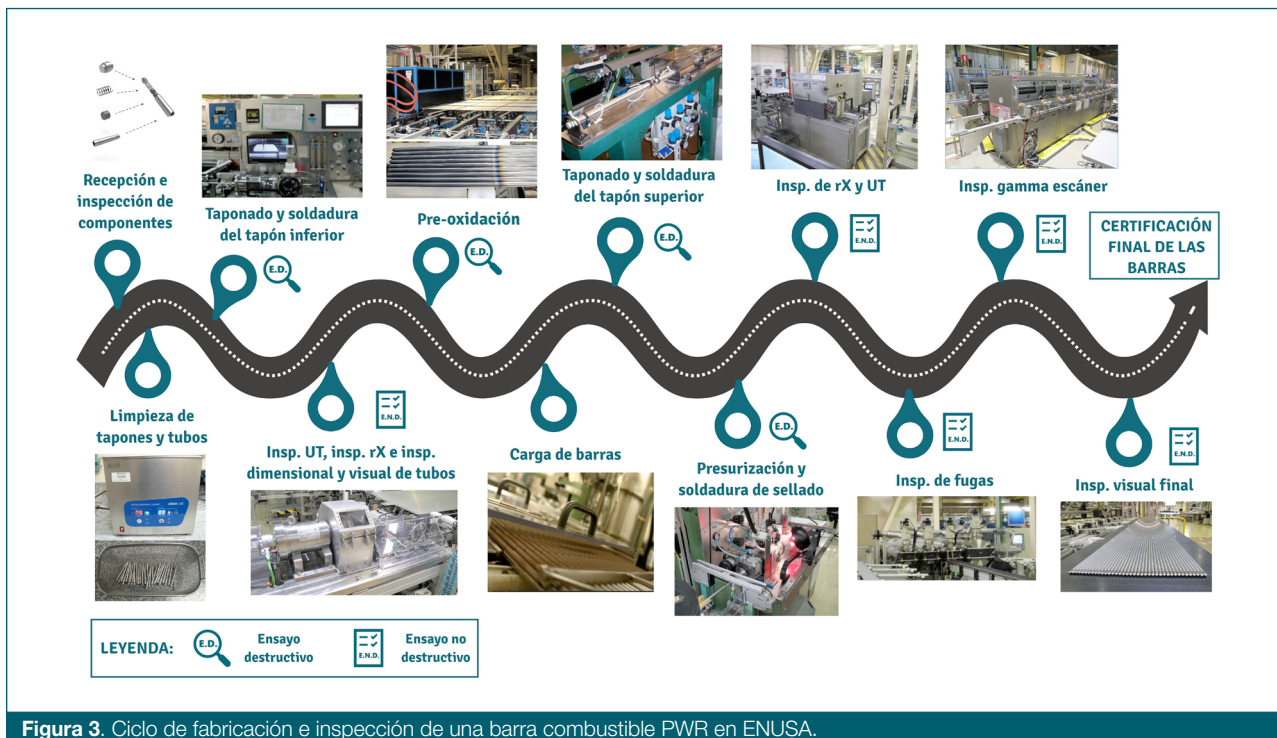
El seguimiento de la fabricación y del control de la calidad del producto se realiza con la herramienta Power BI, facilitando y mejorando la toma de decisiones debido a su rápida visualización e interpretación.

El ciclo de la barra combustible en ENUSA se puede segmentar en tres secciones principales: fabricación e inspección del conjunto tubo-tapón inferior; procesos de carga de barras, soldadura final y presurización; y procesos de inspección de barras.

Fabricación e inspección del conjunto tubo-tapón inferior

De manera previa al proceso de soldadura, los tapones y los tubos (en sus extremos) se someten a un proceso de limpieza. Posteriormente, se realiza el proceso de taponado de manera automática a una presión fija.

La soldadura del tapón inferior o primera soldadura es una soldadura TIG automática, con electrodo de tungsteno, atmósfera inerte de helio y con sistemas de visión artificial.



Trabaja con reglas informáticas que no inician la soldadura si no se dan las condiciones adecuadas (intensidades iniciales y finales, tensión, tiempos de subida y de bajada, desplazamiento axial, presión de vacío, etc.). Los parámetros de la soldadura están cualificados y son controlados y verificados periódicamente por un inspector. Además, existe un software de registro y evaluación automática que rechaza aquellas soldaduras con gráficos anómalos.

Adicionalmente, la calidad de las soldaduras se garantiza mediante la realización de ensayos destructivos de corrosión y metalografía. En el caso de que una muestra resulte rechazada, se debe realizar un remuestreo puesto que cada muestra avala a un lote soldado en las mismas condiciones.

Seguidamente, la soldadura del tapón inferior debe superar tres inspecciones mediante ensayos no destructivos:

inspección por ultrasonidos, inspección radiográfica e inspección dimensional y visual. Las dos primeras serán explicadas más adelante, puesto que también se realizan para evaluar la soldadura del tapón superior. En cuanto a la tercera, en esta se comprueba el diámetro máximo de la soldadura y la apariencia visual e integridad de la soldadura y del tapón.

Por último, los conjuntos tubo-tapón inferior de la tecnología PWR se someten a un proceso de pre-oxidación o *coating* que mejora la resistencia al desgaste y a daños por fricción. Este proceso, completamente automático, extrae el aire del interior del tubo, lo llena de argón y lo introduce en un horno con temperaturas cercanas a los 600 °C durante unos 20 minutos. Como se mostraba en la **Figura 3**, tras el proceso de *coating* o pre-oxidación se realizan de nuevo ensayos destructivos. En este caso, se toman muestras para evaluar el espesor de la capa de óxido de zirconio formada (ZrO_2), que suele estar en torno a las 3 µm.

Carga de barras, soldadura final y presurización

Una vez que los conjuntos tubo-tapón inferior han finalizado su proceso de fabricación e inspección, pasan al área cerámica. En filas de 25, los tubos se cargan por vibración con las pastillas de acuerdo a la distribución de zonas o enriquecimientos que aplique. La longitud de cada zona de enriquecimiento, así como el “*plenum*” (zona superior libre de material fisil), se comprueban con galgas por un inspector.

Una vez completada la carga de la columna, se inserta el muelle y se tapon. Posteriormente, se realiza la soldadura del tapón superior o segunda soldadura, la cual es muy similar a la anterior. Por último, la barra se presuriza con helio por al taladro de presurización del tapón superior a una presión específica de diseño y se realiza una soldadura de sellado sobre la entrada de este taladro.

Junto con los sistemas automáticos de evaluación de las

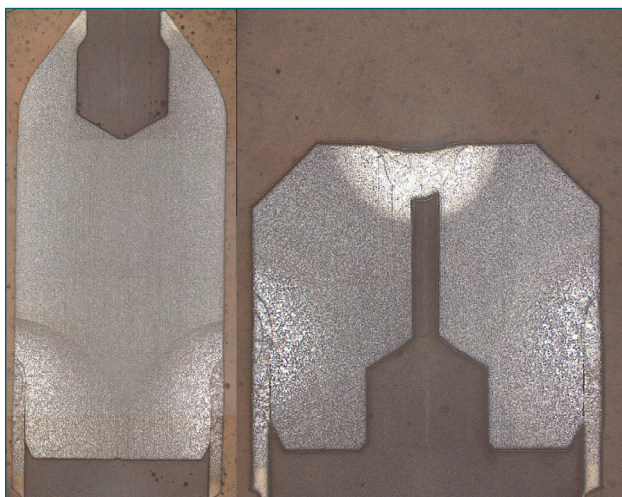


Figura 4. Ejemplos de metalografías de tapón inferior (izqda.) y tapón superior (dcha.).

MÉTODO		FENÓMENO FÍSICO	CARACTERÍSTICA CERTIFICADA
Radiografía industrial (RT)		Radiaciones ionizantes	- Penetración y ausencia de defectos en sellado. - Inclusiones en soldadura circular. - Componentes internos.
Ultrasonidos (UT)		Ondas mecánicas elásticas	- Penetración y ausencia de defectos en soldaduras circulares.
Ensayo de fugas (LT)		Presión	- Estanqueidad.
Inspección en gamma escáner pasivo	Espectrometría gamma	Radiaciones ionizantes	- Longitud de plenum, columna y zonas. - Ausencia de huecos. - Enriquecimiento y ausencia de pastillas desviadas.
	Corrientes inducidas (ET)	Corriente eléctrica de Foucault	- Ausencia de defectos superficiales y en el interior de la columna. - Variaciones en contenido de gadolinio.
Inspección visual (VT)		Luz visible	- Ausencia de defectos superficiales. - Rectitud, longitud y sobreespesor soldadura. - Paralelismo tapón-barra combustible.

Tabla 1. Ensayos no destructivos utilizados en la inspección de barras combustibles en ENUSA.

soldaduras, se realizan de nuevo ensayos destructivos tanto para la soldadura del tapón superior como para de sellado. Para la soldadura del tapón superior se realizan ensayos de corrosión y metalografía, mientras que para la de sellado, a los anteriores se añade un ensayo para determinar la presión del gas de llenado y la pureza del mismo.

Procesos de inspección de barras

Para garantizar la calidad de las soldaduras, así como la de la propia barra en sí, esta se somete a una serie de ensayos no destructivos que deberán resultar aceptables para poder certificar en última instancia.

Inspección de rayos-X

La radiografía digital permite la inspección de las soldaduras de sellado del taladro de presurización, pudiendo determinar la penetración de la misma e identificando cualquier defecto que haya podido aparecer (inclusiones, poros o grietas). Se emiten rayos-x mediante un tubo generador que atraviesan la barra e inciden sobre el escáner digital,

que realiza un barrido generando la imagen o placa en el software. Posteriormente, un inspector valora esa imagen visualmente y utilizando las herramientas del sistema.

Además de la calidad de las soldaduras, la inspección de rayos-x se utiliza para verificar otro tipo de defectología previamente detectada en el gamma escáner pasivo, como, por ejemplo: longitud del plenum, longitud del muelle o integridad de columna.

Inspección de ultrasonidos

La inspección por ultrasonidos se utiliza para la detección de defectos en las dos soldaduras circulares, utilizando los principios de la emisión y recepción de energía acústica. Los tres palpadores de 50 MHz de frecuencia con los que cuenta el equipo se encuentran colocados en un cabezal rotatorio que recibe continuamente un chorro de agua que actúa como acoplante.

El equipo lleva integrado un software de inspección y análisis automático que evalúa las señales generadas. Las

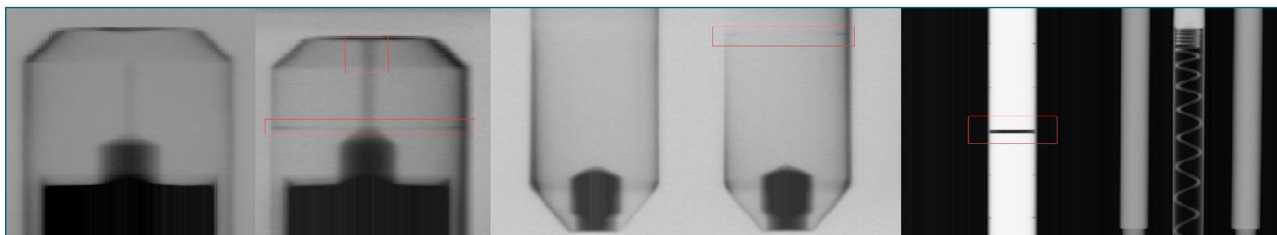


Figura 5. Ejemplos de placas radiográficas (de izda. a dcha.: tapón superior en barra PWR soldada y sellada; tapón superior en barra PWR sin sellar ni soldar, tapón inferior en barra PWR soldada, tapón inferior en barra PWR sin soldar, hueco en columna de pastillas, medida del plenum o muelle).



Figura 6. Inspección por ultrasonidos (señales en el equipo y software y control del proceso con el PowerBI).

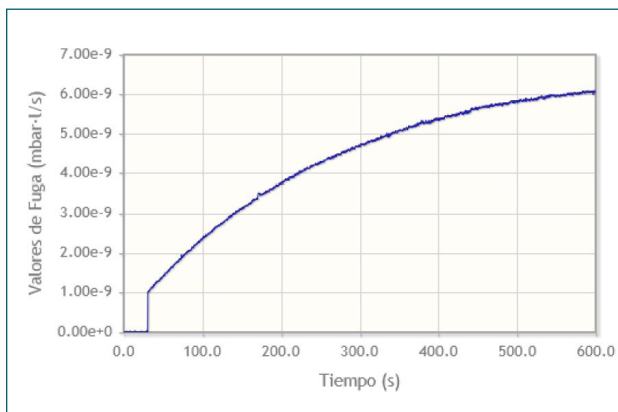


Figura 7. Inspección de fugas (gráfica de ensayo de fugas).

basado en la tecnología de espectrometría gamma (con detectores gamma para emisión U^{235} y gamma densitómetro con fuente de Am^{241}) y corrientes inducidas (equipo multifrecuencia envolvente para el tubo y sensores de gadolinio para enriquecimiento e integridad de la columna), es un complejo equipo de inspección que permite asegurar múltiples características de la barra combustible.

Algunas de estas características son: defectos en la superficie del tubo, longitud de barra, longitud de columna, longitud de zonas, longitud de zona de compresión del muelle en tecnología BWR, huecos o falta de material en pastillas, enriquecimiento de U^{235} , pastillas desviadas en enriquecimiento, enriquecimiento de Gd, pastillas desviadas en gadolinio y partículas metálicas en pastillas.

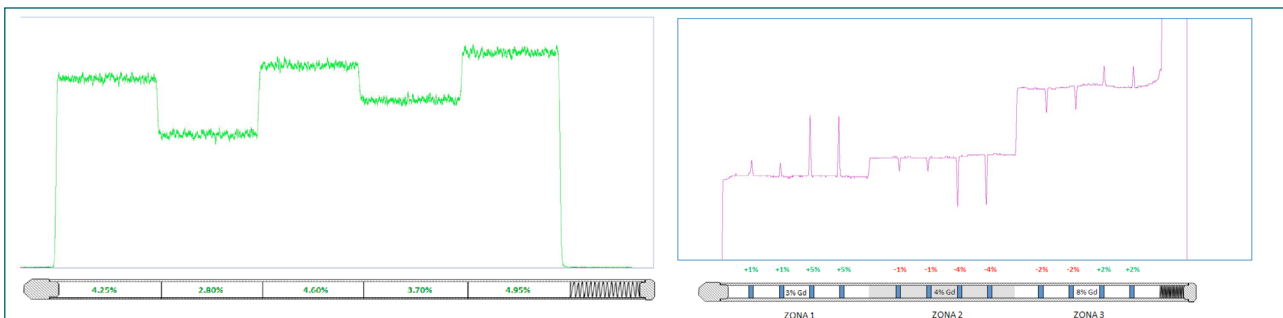


Figura 8. Inspección en Gamma Escáner (patrón con diferentes zonas de enriquecimiento ^{235}U y patrón con diferentes zonas y pastillas desviadas de Gd).

condiciones de la inspección se verifican diariamente con patrones certificados con las mismas características a inspeccionar (espesor de pared, tamaño de poro, grietas, etc.).

Inspección de fugas

La inspección de fugas evalúa la estanqueidad de la barra combustible. El ensayo consiste en introducir las barras en unas cámaras de vacío, reducir la cantidad de helio de fondo mediante un sistema de bombas, y medir el flujo de helio remanente con un equipo de detección basado en espectrometría de masas.

El ajuste del equipo de medida y la verificación se realizan con una fuga patrón de helio certificada.

Inspección gamma escáner

El escáner pasivo de doble línea con el que cuenta ENUSA,

Inspección visual y dimensional de la barra

Al igual que el resto de las inspecciones, la inspección visual y dimensional la realizan inspectores cualificados. En la inspección visual se controla la iluminación del área y se dispone de patrones visuales de ayuda.

Por su parte, la inspección dimensional se realiza con galgas y útiles controlados por metrología y se centra en garantizar los requisitos de plano.

LA CERTIFICACIÓN

La certificación final de las barras garantiza el cumplimiento de todos los requisitos, características e inspecciones mencionadas anteriormente. La certificación se fundamenta en tres pilares:

- Muestras de control de proceso para ensayos

destructivos: se deben haber tomado todas las muestras de control de proceso necesarias y los resultados de los ensayos deben ser aceptables.

- Pastillas: para certificar las barras, los lotes de pastillas con los que hayan sido cargadas deben tener asociados los correspondientes análisis de laboratorio que los avalen. El proceso de fabricación de ENUSA requiere que las barras puedan ser certificadas con algunos resultados pendientes, realizando esta verificación con posterioridad, antes de la certificación del elemento combustible.
- Estados de las barras combustibles: todas las etapas de fabricación e inspección anteriormente explicadas

han de haber transcurrido sin incidencias: se comprueba toda la trazabilidad, así como los códigos de rechazo, posibles retenciones y desviaciones o evaluaciones pendientes.

CONCLUSIONES

La certificación de una barra combustible implica el control y la revisión de innumerables características de diseño y parámetros de los procesos de fabricación e inspección. Solo así, mediante un procedimiento tan exhaustivo y minucioso, se puede garantizar la calidad y seguridad de las barras combustibles y su adecuado comportamiento en el reactor. ■