

Mejora de la fiabilidad del combustible en Enusa

S. Choithramani y M. Quecedo

Enusa está firme y globalmente comprometida a proveer a sus clientes elementos combustibles con diseños que satisfagan los requisitos de eficiencia energética, flexibilidad en la operación y fiabilidad. Los combustibles que Enusa suministra para ambas tecnologías, PWR y BWR, incorporan las mejores prestaciones de diseño, que han sido desarrolladas a lo largo de la historia de la industria nuclear. A finales de enero de 2015, Enusa ha acumulado una experiencia de fabricación y operación de más de 20.000 elementos combustibles, siendo aproximadamente la mitad de ellos PWR y la otra mitad BWR, operando en múltiples condiciones que incluyen variaciones de potencia del núcleo, ampliaciones de longitud de ciclos y diferentes estrategias de operación y químicas del refrigerante.

Esta experiencia aporta el conocimiento necesario para modelar el comportamiento del combustible, y sirve como instrumento esencial para poder identificar y caracterizar los mecanismos de fallo en nuestro combustible.

A partir de la información obtenida durante todos estos años de operación, Enusa ha desarrollado e implantado progresivamente las necesarias acciones mitigadoras definidas a partir del conocimiento de las causas de fallo, las cuales forman parte del programa encaminado a conseguir la mejora de la fiabilidad y del comportamiento del combustible. Al mismo tiempo que se ha ido cumplimentado lo anterior se ha observado una tendencia positiva en cuanto a mejora en la fiabilidad del combustible.

ENUSA is committed to providing our customers with fuel designs that meet their needs for operational efficiency, power, energy, performance and reliability. ENUSAs current fuel designs, covering BWR and PWR technologies, incorporate highest performance with proven reliability features developed along nuclear power operation history. As of January 2015, ENUSA has manufactured more than 20.000 fuel assemblies (around half BWR and half PWR), with operating conditions reflecting varying reactor power densities, cycle lengths, operating strategies and water chemistry environments.

This experience brings the knowledge to model our fuel behavior and acts as the principal instrument to identify and characterize the failure mechanisms of our fuel. Based on the information obtained from all this years of operation, ENUSA has progressively developed and implemented numerous mitigating actions identified upon the knowledge on failure mechanisms, which are the bases for the fuel reliability improvement program. Contemporaneously to this implementation, a positive trend on ENUSA's fuel reliability has been observed.

INTRODUCCIÓN

El combustible MAEF fabricado por Enusa se corresponde en su diseño con el combustible RFA/RFA-2 fabricado por Westinghouse, del cual, por el número de plantas USA en el que opera, se dispone de gran información. Aunque este artículo se centra en la información del diseño fabricado en Enusa, ésta se complementará con la experiencia de toda la flota de este diseño.

FIABILIDAD DEL PRODUCTO

La identificación y mitigación con éxito de los mecanismos que provocan los fallos ha sido un factor clave en la mejora observada en la fiabilidad del combustible. Enusa sistemáticamente ha ido identificando mecanismos de fallo mediante inspecciones en central

y en celdas calientes, y realimentando los procesos de diseño y fabricación con lecciones aprendidas.

Del combustible MAEF/MAEF-2007, se han identificado desde 1998 y hasta fin de 2014, 44 barras con falta de estanqueidad en 51 elementos combustibles de los más de 2.000 elementos combustibles (más de 1,3 millones de barras) suministrados hasta 2014. Hoy en día, una minoría de las plantas operando con combustible Enusa experimenta fallos, y éstos están en los últimos años y de forma recurrente, relacionados con partículas extrañas.

El mecanismo de fallo que acapara el mayor número de elementos fallados, 41 %, es abrasión de la barra con la rejilla inferior en los diseños que carecen de rejilla protectora de este tipo de combustible, (Figura 1). La



SYLVIA CHOITHRAMANI

Responsable de Fiabilidad del Producto. Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos. ENUSA

Ingeniero industrial en ICAI y máster en Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica por ETSII-Tecnatom.



MANUEL QUECEDO GUTIÉRREZ

Responsable del Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos. ENUSA

Doctor ingeniero de Caminos por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

causa raíz de los fallos por abrasión en la rejilla inferior es la insuficiente sujeción de la barra por la rejilla inferior, causada por la relajación de los muelles por efecto de la irradiación, en combinación con los altos flujos cruzados en el núcleo. El uso de la rejilla protectora, aunque su función es prevenir los fallos por desgaste por vibración con partículas, proporciona mayor sujeción a la barra en una zona de altos flujos cruzados y constituye una barrera adicional al desgaste de la barra contra la rejilla. Los suministros de combustible con diseños sin rejilla protectora finalizaron en 2008, por lo que ya no quedan elementos sin rejilla protectora operando en las plantas donde aún se cargaba este tipo de combustible.

Es de notar que ninguno de los fallos en el combustible MAEF/MAEF 2007 se ha producido por mecanismo de desgaste barra-rejilla en

las rejillas intermedias. El diseño del MAEF/MAEF 2007 ha eliminado este mecanismo de fallo en las rejillas intermedias, existente en el diseño anterior AEF. La experiencia en la ausencia de fallos por desgaste en rejillas intermedias incluye varios elementos que han operado cuatro ciclos de 18 meses, es decir, tiempos de residencia de unos seis años. Esto confirma la eficacia de las mejoras incorporadas en el diseño MAEF con respecto a su antecesor AEF.

Tal como muestra la Figura 1, le sigue en proporción de fallos, 27 %, con 12 elementos fugados, el mecanismo de fallo más probable a día de hoy en la industria, abrasión por partículas extrañas, también conocido como debris fretting en la industria. El comportamiento global del combustible PWR MAEF/MAEF-2007 con cabezal inferior antipartículas y rejilla protectora suministrado por Enusa se considera efectivo ante fallos por partículas extrañas. Es importante destacar que se ha cuantificado la incidencia en el número de fallos en función de las distintas opciones de diseño frente a la abrasión que se incorporen. Si a los diseños que utilizan el cabezal antipartículas le sumamos la introducción de la rejilla protectora, la tasa de fallo se reduce un tercio. Si además, se incorpora el recubrimiento de óxido en las barras combustible, en fase de implantación en las fabricaciones de Enusa, la tasa de fallos se reduce a cero. Es de notar que no se han producido fallos en los más de 7.500 elementos combustibles que contienen estas tres opciones simultáneamente.

Finalmente, ha habido dos elementos cuyos fallos se atribuyeron a defectos de fabricación: ausencia de soldadura de sellado y contaminación interna por hidrógeno respectivamente, estando el resto de elementos fallados aún por inspeccionar.

Tal como muestra la Figura 2, en el año 2014 cerca de un 95 % de las plantas PWR suministradas por Enusa operaban libres de fallos. En 2014, de toda la flota de combustibles PWR suministrados por Enusa, se ha descargado sólo un elemento fallado en una central PWR española, atribuyéndose preliminarmente el mecanismo de fallo más probable a abrasión por partículas, mecanismo muy habitual en el resto de la industria.

EL PROCESO MEJORA DE LA FIABILIDAD DEL PRODUCTO

Cualquier comportamiento inesperado del combustible operando tiene un impacto negativo sobre la confianza en Enusa de nuestros clientes ya que esto implica contaminación por fugas en las barras combustibles, inspecciones para identificar y reparar el elemento con el

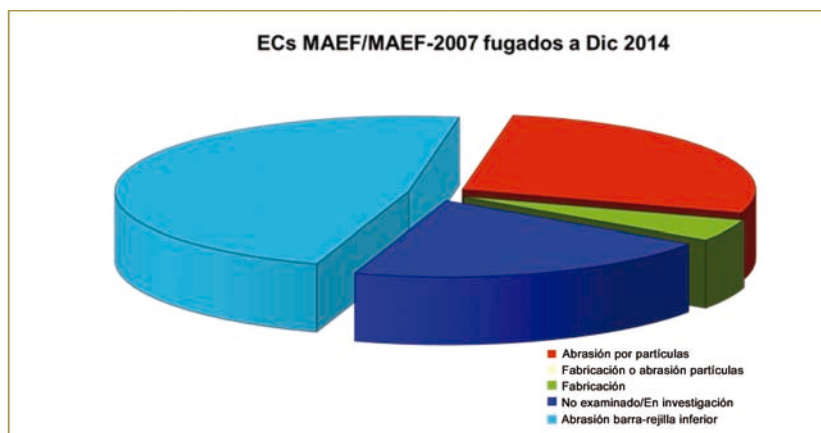


Figura 1. Distribución de elementos fallados en función del mecanismo de fallo.

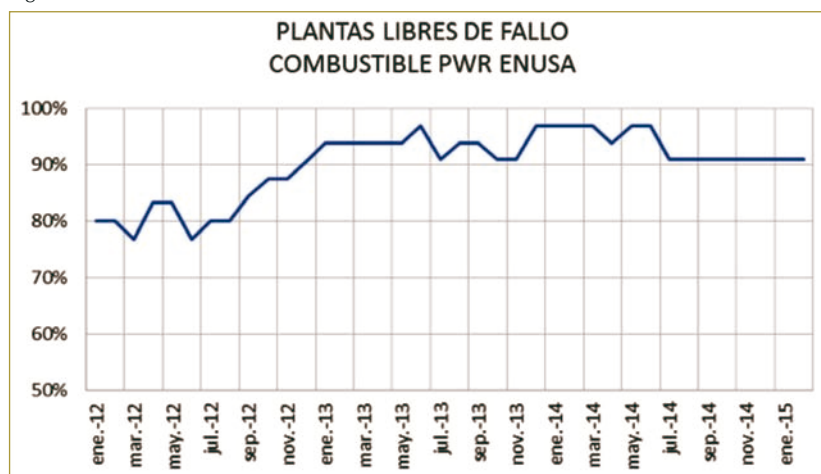


Figura 2. Evolución de la tasa de fallo en el combustible Enusa.

consiguiente aumento del tiempo de recarga, y posibles impactos en los diseños de los ciclos siguientes.

Por este motivo, Enusa siempre ha destinado esfuerzos y recursos considerables en proyectos de fiabilidad y de seguimiento de comportamiento de sus productos. Aun así, a principios de 2012 los niveles de los indicadores de fiabilidad supusieron una llamada de atención que identificó la necesidad de implantar un programa de mejora que disminuyera la tasa de fallo de nuestra flota. Enusa ha esforzado en alinearse con las iniciativas de la industria (INPO, EPRI) por mantener las plantas operando libres de fallos desde la década de los 2000, reforzando el seguimiento de conocidos programas de reducción de fallos de combustible, en los que Enusa ha participado activamente desde su creación.

Como decíamos, a principios de 2012, Enusa implantó un programa para la mejora del comportamiento y fiabilidad de sus combustibles. Éste sigue un proceso que permite anticiparse y prevenir los posibles eventos relacionados con la fiabilidad, y tiene sus bases en los procesos de mejora de Enusa ya existentes, como el programa

Seis Sigma de Mejora Continua, el programa de Acciones Correctoras, o el programa de Factor Humano.

El procedimiento de mejora de la fiabilidad de combustible de la Unidad de Negocio de Combustible se basa en asegurar que la información de experiencia operativa, procedente de todas las fuentes posibles, es retroalimentada a los procesos de diseño, fabricación, operación y gestión del combustible gastado. Estas fuentes de información pueden provenir, entre otras, de

- **Resultados de análisis de causa raíz de los fallos.** Los elementos fugados son una valiosa fuente de información para Enusa ya que, aunque su efecto es negativo tanto para las plantas como para Enusa, ofrecen información sobre la forma de operar que ha producido fallo, y sobre todo las áreas en las que tanto Enusa como la planta pueden ejercer acciones correctoras.
- **Inspecciones de combustible sano.** El seguimiento del comportamiento del combustible en operación proporciona la mayor realimentación a nuestros códigos y modelos de comportamiento. Conocer cómo evoluciona el elemento a lo largo de su

vida en operación, cambios dimensionales, su respuesta a la corrosión, etc. son factores importantes que constatan el diseño actual y alimentan diseños futuros.

- **Incidencias y cambios en la fabricación.** La fabricación de nuestros elementos está sometida a controles de calidad con los requisitos más exigentes de cualquier industria. Es por eso que nuestros procesos están en continua evaluación. Aun así, se hace adicionalmente un seguimiento especialmente sobre los Parámetros Críticos para la Fiabilidad que son características concretas de cada uno de los componentes del combustible que, de encontrarse fuera del valor especificado, afectarían al comportamiento del combustible. Para ello, las no conformidades de fabricación relacionadas con estos parámetros críticos son analizadas específicamente. Enusa, además, ha llevado a cabo varias sesiones de formación a la plantilla sobre los parámetros críticos para la fiabilidad y sobre su potencial impacto en el combustible.
- **Realimentación de nuestros clientes.** Enusa dispone de un sistema de medida de satisfacción del cliente, por el cual se obtiene el reporte de cualquier incidencia o queja que el cliente haya podido identificar durante un servicio suministrado por Enusa.
- **Información procedente de la caracterización para el almacenamiento del combustible gastado.** Hoy en día Enusa desarrolla proyectos de caracterización del combustible de las piscinas de las centrales nucleares españolas. Esta caracterización, con el fin último del almacenamiento del combustible, aporta información sobre las características relevantes para el comportamiento del combustible en la tercera parte del ciclo.
- **La realimentación de los servicios prestados** en la central nuclear, durante la inspección de recepción, la carga del núcleo o el manejo de los elementos combustibles, es crucial para los diseñadores por ejemplo para asegurar la compatibilidad de los elementos con el núcleo, con el contenedor de transporte o con el *rack* de la piscina de combustible.
- **Experiencia operativa de socios y competidores.** Nuestros socios tecnológicos son una fuente de información técnica muy valiosa de manera que cualquier evento relevante que les suceda en diseños de combustible análogos a los nuestros, siempre será de utilidad para nuestra realimentación. También es importante conocer el estado del arte de la industria, para lo cual el personal de Enusa acude a cursos y congresos internacionales de más alto nivel para conocer la problemática de otras tecnologías y los desarrollos en los que se está trabajando.
- **I+D+i.** Enusa participa en programas de investigación que incluyen actua-

ciones en celdas calientes sobre barras irradiadas en nuestras centrales para profundizar al máximo en el conocimiento del comportamiento de sus materiales en irradiación. Además, Enusa es centro de referencia de Unesa para el programa de mejora de la fiabilidad del combustible (BASE-TAC) de EPRI, donde se discuten a nivel global temas en investigación como nuevos equipos de inspección en desarrollo o técnicas de reducción de material extraño (*Foreign Material Exclusion*) tanto a nivel de fabricación como a nivel de operación. Además, Enusa participa en el programa de investigación financiado y promocionado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) de *Accident Tolerant Fuel* (ATF), en el que se presentan diseños en investigación, como nuevos materiales y aleaciones tanto de vaina como de pastilla, que se comportan mejor ante accidente severo, como el caso del carburo de silicio, actualmente en pruebas para validación como material de canales BWR.

Todas estas entradas son examinadas, analizadas y priorizadas por un grupo de expertos en Enusa. Este grupo, denominado "Grupo de Fiabilidad de Combustible" (GFC) está formado por ingenieros senior de Ingeniería Operacional del Combustible, Ingeniería de Desarrollo de Tecnología, Ingeniería de Calidad de Fabricación, y un representante de Mejora Continua.

La evaluación desarrollada por el GFC deriva en propuestas de proyectos clasificados por áreas de mejora: Diseño, Materiales, Fabricación, Experiencia Operativa y Combustible Gastado (caracterización y almacenamiento) que son enviadas al Comité de Seguimiento de Fiabilidad. Este comité, gobernado por la dirección de Enusa, sanciona y aprueba en función de su relevancia los proyectos considerados estratégicos. Además, comprueba que se destinan los esfuerzos y recursos necesarios para asegurar la continuidad de los proyectos y monitoriza el estado de los mismos hasta su cierre, mediante el seguimiento los indicadores desarrollados para ello.

Además, este mismo proceso se ha extendido para abarcar al mercado europeo en el marco del *European Fuel Group* (EFG), donde también existe un Comité de Seguimiento conjunto con Westinghouse en el que se tratan proyectos estratégicos que generalmente tienen aplicación a nuestra flota nacional.

El proceso descrito ha sido incluido en el Sistema de Calidad de Enusa introduciéndolo en el más alto nivel, como Procedimiento Operativo de Enusa,

concretamente en el de Realimentación de la Experiencia. De esta manera, la implicación de la Unidad de Negocio de Combustible en su totalidad, así como la de las direcciones de Calidad de Enusa está asegurada.

Con el procedimiento establecido, Enusa ha alcanzado niveles en su indicador de plantas con combustible Enusa PWR libres de fallo de hasta un 97 %, descargándose únicamente dos elementos combustibles en 2013 y uno en 2014. Con la introducción del combustible MAEF-2012, que ya opera las plantas españolas, se pretende mantener e incluso mejorar los estándares de calidad de nuestro producto. Además, se está implantando en la fábrica de Juzbado el sistema de preoxidación de la barra en su parte inferior, introduciendo una capa protectora a la vaina que evitará su abrasión en los primeros ciclos de operación del elemento combustible.

EL RESULTADO

Aunque Enusa siempre ha apostado por implementar herramientas la mejora de sus procesos y productos, el impulso a la fiabilidad en los últimos años ha sido muy importante. El seguimiento de los indicadores de comportamiento y fiabilidad ha supuesto una base de información sobre la que realimentamos nuestros códigos, modelos y diseños. La implantación del proceso de mejora de fiabilidad de combustible ha supuesto la estandarización de un sistema de evaluación de experiencia propia y ajena que asegura la anticipación a eventos no deseados en la fiabilidad y el comportamiento de los combustibles. Igualmente, propone un sistema de identificación de áreas de mejora robusto que asegura la cobertura de todas las áreas de la unidad de negocio de combustibles así como las áreas de calidad de Enusa. De esta manera, por ejemplo, dado que la abrasión por partículas es el mecanismo de fallo más probable, se han destinado múltiples esfuerzos en promocionar e implantar programas de exclusión de material extraño, tanto en la planta de fabricación de Juzbado como en las plantas a las que Enusa suministra combustible.

CONCLUSIÓN

Enusa, una vez establecido el Proceso de Mejora de la Fiabilidad de Combustible, ha elevado los programas de calidad a un nuevo nivel, en el que el foco es la fiabilidad y calidad de nuestro producto, en todas las áreas de competencia: Materiales, Diseño, Fabricación, Experiencia Operativa y Combustible Gastado. Enusa está globalmente comprometida a suministrar combustible con cero defectos a nuestros clientes, satisfaciendo sus metas de flexibilidad, comportamiento y fiabilidad. ■