

Programa de Vigilancia de Combustible PWR en España

F. Culebras, J.C. Martínez Murillo, M. Quecedo y C. Muñoz-Reja

En el año 2000 Enusa Industrias Avanzadas y las empresas que explotan comercialmente los 5 reactores PWR - Centrales Nucleares Almaraz-Trillo (CNAT) y Asociación Nuclear Ascó-Vandellós (ANAV) - crearon conjuntamente el Programa de Investigación Coordinada (PIC) con el objetivo de alcanzar la máxima fiabilidad en el combustible suministrado por Enusa. Este artículo presenta los objetivos, el alcance y los resultados del programa a lo largo de los años y cómo se gestionan los distintos cambios que afectan al combustible para garantizar su integridad. El excelente comportamiento del combustible suministrado por Enusa es el mejor indicador de que los objetivos del programa se alcanzan.

In the year 2000 the PWR utilities: Centrales Nucleares Almaraz-Trillo (CNAT) and Asociación Nuclear Ascó-Vandellós (ANAV), and ENUSA Industrias Avanzadas developed and executed a coordinated strategy named PIC (standing for Coordinated Research Program), for achieving the highest level of fuel reliability. The paper will present the scope and results of this program along the years and will summarize the way the changes are managed to ensure fuel integrity.

The excellent performance of the ENUSA's manufactured fuel in the PWR Spanish NPPs is the best indicator that the expectations on this program are being met.

INTRODUCCIÓN

La fiabilidad del combustible es un factor fundamental en la operación de las centrales nucleares, no solo por razones de seguridad, también económicas y de percepción de cara al público.

Por ello, en el año 2000, Enusa Industrias Avanzadas y las empresas que explotan comercialmente los cinco reactores PWR - Centrales Nucleares Almaraz-Trillo (CNAT) y Asociación Nuclear Ascó-Vandellós (ANAV) - crearon conjuntamente el **Programa de Investigación Coordinada (PIC)** con el objetivo de alcanzar la máxima fiabilidad en el combustible suministrado por Enusa.

El primer paso de este programa se centró en monitorizar los cambios dimensionales y la corrosión de la vaina de un nuevo diseño de combustible 17x17 MAEF ZIRLO (equivalente al diseño RFA de Westinghouse). Los objetivos iniciales de este programa de monitorización eran (1) ver si los cambios introducidos en el nuevo diseño se comportaban adecuadamente y (2) construir una base de datos con las condiciones de operación específicas de cada central española PWR (Almaraz, Ascó y Vandellós) que ayudase

a mejorar los códigos de comportamiento. Con el tiempo, el PIC aumentó su alcance para hacer frente a nuevos objetivos y adaptarse a las tendencias de la industria.

Además de monitorizar el comportamiento del combustible, una de las actividades principales del programa es el compromiso de inspeccionar y analizar la causa raíz de cualquier fallo con fuga en el combustible.

En las siguientes secciones se presentan los objetivos, el alcance y los resultados del PIC a lo largo de los años y cómo se han seguido los cambios en el diseño y las condiciones de operación.

OBJETIVOS DEL PIC

El objetivo de cualquier programa de inspecciones es asegurar un comportamiento adecuado del combustible para evitar fallos en el mismo. El hecho de no haber tenido fallos en el pasado no garantiza la ausencia de los mismos en el futuro, por lo que es necesario mantener un programa proactivo de inspecciones. Además de todos los objetivos mencionados anteriormente, el PIC nos ayudará a identificar áreas de mejora. Comprende varias líneas de actuación, todas



FRANCISCO J. CULEBRAS GARCÍA

Jefe de Combustible Nuclear
ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ-VANDELLÓS II
Ingeniero Industrial, Especialidad Técnicas Energéticas por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.



JUAN CARLOS MARTÍNEZ-MURILLO MÉNDEZ

Jefe de Combustible
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ-TRILLO
Doctor ingeniero industrial por la ETSII de Madrid.



MANUEL QUECEDO GUTIÉRREZ

Responsable del Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.
ENUSA

Doctor ingeniero de Caminos por la ETSI de Caminos, Canales y Puerto de la Universidad Politécnica de Madrid.



CRISTINA MUÑOZ-REJA RUIZ

Responsable de Tecnología de Combustible en el Depto. de Desarrollo de Tecnología y Equipos
ENUSA

Licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Madrid.

ellas relacionadas entre sí y que se describen a continuación:

a. Inspecciones de referencia para la caracterización del combustible

El primer objetivo de las inspecciones es establecer una línea base, o baseline, de comportamiento de combustible bajo las condiciones de operación específicas de cada central, y a partir de ahí, establecer unos márgenes de comportamiento. Ante cualquier cambio significativo (diseño, química del refrigerante, estrategia de operación...) se efectuarán las inspecciones necesarias para verificar que los cambios están dentro de los márgenes establecidos en la línea base y que no hay efectos colaterales.

Toda la información obtenida de las inspecciones formará parte de una base de datos que nos servirá, además de para determinar la línea base y los márgenes reales de diseño, para verificar la aplicabilidad de los modelos de predicción y caracterizar las propiedades de los materiales.

La monitorización y seguimiento de la química del refrigerante, inspecciones visuales, de corrosión y de dimensiones en central y exámenes en celda caliente son ya parte de las inspecciones rutinarias de base del programa PIC.

b. Inspecciones asociadas a cambios en las condiciones de operación

Entre los cambios más significativos que se han llevado a cabo en los últimos años se encuentran los cambios en el diseño (de AEF a MAEF), cambios en los programas de química y aumentos de potencia. Ante estos cambios, se evalúan los efectos sobre el combustible y se establecen unos márgenes de operación.

Entre las actividades de base que forman parte de estas inspecciones asociadas a cambios se encuentran: medidas de espesor de óxido y caracterización dimensional antes y después de cualquier cambio, eliminación de CRUD, limpieza por ultrasonidos o programas de investigación con ensayos en autoclave.

Finalmente, y asociado a los cambios en operación, ha habido últimamente una tendencia en la industria de aumentar la potencia y quemado. Estos aumentos también forman parte de las acciones del PIC y el impacto en la corrosión y en la caracterización dimensional es incorporado a la línea base.

c. Prevención y monitorización de fallos en el combustible.

Para detectar a tiempo cualquier fallo en operación es necesario hacer un seguimiento radioquímico del refrigerante durante la operación. La pronta detección de un fallo nos permitirá adoptar las medidas necesarias que deben llevarse a cabo durante la parada para minimizar el impacto del fallo en la central.

Cuando se detecta un fallo, se lleva a cabo una inspección combinada con un análisis de causa raíz. El mantenimiento de una base de datos detallada que incluya todos los fallos en la industria en los combustibles PWR permite la identificación de los diferentes mecanismos de fallo y un importante feedback para encontrar áreas de mejora en el diseño, fabricación y operación que ayude a evitar futuros fallos.

ALCANCE DEL PIC

Desde el comienzo del programa en el año 2000, se han sucedido distintas etapas cuyas actividades siguen vigentes. Aunque todas ellas comparten objetivos, cada una de ellas se centra en un aspecto diferente que depende de las tendencias de la industria en ese momento. En este sentido, la construcción y mantenimiento de una base de datos de comportamiento de combustible, seguimiento de la radioquímica y características del refrigerante para fallos de las centrales nucleares españolas, han sido actividades comunes a lo largo de la vida del PIC.

Las diferentes etapas del programa se resumen a continuación:

a. La primera etapa se centró en la inspección del nuevo diseño MAEF que sustituía al anterior diseño AEF (equivalente al V5H de Westinghouse) [1] con nuevos materiales y características.

Consistió en un total de cinco campañas de inspección en central, entre los años 2001 y 2004, que incluían medidas de espesor de óxido, inspecciones visuales, caracterización dimensional de elementos combustibles (longitud, arqueado, inclinación...), medidas de desgaste rejilla-vaina y medidas de crecimiento de barra.

b. La segunda etapa alargó el alcance de la etapa anterior para incluir nuevos objetivos. Otras 5 inspecciones se llevaron a cabo en centrales nucleares españolas que incluían inspecciones visuales y de corrosión.

En esta etapa se llevaron a cabo cambios en la química del refrigerante hacia un pH constante y más alto (lo que supuso un aumento de la exposición del combustible al litio). Las actividades llevadas a cabo durante los años 2003 a 2006 se centraron en evaluar el impacto de este cambio en el combustible. Además, a esta actividad se le unió una recolección y análisis de datos de la química del refrigerante y unos ensayos en autoclave para estudiar la deposición de boro en el CRUD - que puede resultar en un AOA (Axial Offset Anomaly) -. Este programa se lanzó posteriormente en Studsvik en colaboración con EPRI.

c. La tercera etapa se desarrolló de 2005 a 2010. Se llevaron a cabo un total de 11 inspecciones. Estas inspecciones mantuvieron los objetivos de las etapas previas pero aumentó el alcance y la diversificación de actividades.

Las tres centrales de Ascó y Vandellós iniciaron un programa de inyección de cinc y durante este periodo se estableció el objetivo de estudiar su impacto en el combustible. Este objetivo incluía, además de los objetivos iniciales de inspecciones visuales y de corrosión, eliminación de CRUD para su caracterización química y estructural y ensayos en autoclave para entender su efecto en los AOA.

d. Las actuaciones entre 2011 y 2014, aparte de las habituales de análisis de química y causa raíz de fallos, comprendieron inspecciones de corrosión y crecimiento en piscina, diseño y caracterización de elementos de demostración, extracción de barras para envío a celdas calientes o para transferencia a elementos frescos e inspecciones en celdas calientes.

El interés fundamental se centró en extraer experiencia, en las condiciones específicas de operación de las centrales nucleares españolas, de un nuevo material altamente resistente a la corrosión: el ZIRLO Optimizado. Además se produjeron uprating de potencia en algunas centrales por lo que, se establecieron las nuevas líneas bases para esta nueva forma de operar.

RESULTADOS DEL PIC

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes actividades a lo largo de la vida del programa clasificados por categorías y/o objetivos de las inspecciones. Se incluyen ejemplos para ilustrar cómo se utiliza la información de las inspecciones para alcanzar los objetivos del programa.

Inspección y caracterización del combustible

Inspección de corrosión en la barra combustible

Más de 2.000 barras de ZIRLO™ en más de 100 elementos combustibles diferentes que operaron en las centrales españolas PWR han sido inspeccionadas por el método de corrientes inducidas para determinar el espesor de óxido. Cada campaña de inspección de corrosión se lleva a cabo conjuntamente con una inspección visual detallada que se utiliza posteriormente para el análisis de los datos.

La principal conclusión que se puede extraer de estas inspecciones, como se muestra en la Figura 1, es que no se ha observado una aceleración de la corrosión de la vaina en el amplio espectro de condiciones de irradiación. De hecho, la base de datos comprende un amplio abanico de variables como diferencias de diseño, quemados, índice de desempeño y entorno químico (operación con alta concentración de litio, adiciones de cinc o estrategias de pH).

Estas inspecciones corroboraron los márgenes a la corrosión extra proporcionados por la rejilla IFM (*Intermediate Flow Mixing*) [1], incluidas en el diseño MAEF y que tiene por objetivo mejorar la refrigeración de la barra.

Otro de los resultados del programa de inspecciones de corrosión en barra fue el impacto del programa de inyección de cinc en la central de Vandellós II, donde la experiencia operativa en la industria era limitada [2]. Las medidas de espesor de óxido en barra fueron tomadas justo antes del primer ciclo operado con cinc y en los siguientes ya con el cinc inyectado (ciclo 15), con el propósito de establecer la línea base. Las inspecciones incluyeron barras con uno, dos y tres ciclos de quemado y altas concentraciones de litio. La Figura 2 muestra los resultados del primer ciclo con inyección de cinc (ciclo 15) junto con la base de datos de anteriores inspecciones. Los resultados muestran que no se produjo un aumento de la velocidad de corrosión en Vandellós II [3].

Un ejemplo de aplicación de los resultados de una inspección de corrosión a la cuantificación de mejoras del nuevo material de vaina (ZIRLO Optimizado) frente al material actual (ZIRLO), es el que se ilustra en la Figura 3. En esta ocasión, el programa PIC incluyó, como parte de la introducción de ZIRLO Optimizado, la inspección de barras del nuevo material insertadas en elementos de demostración y que operaron en

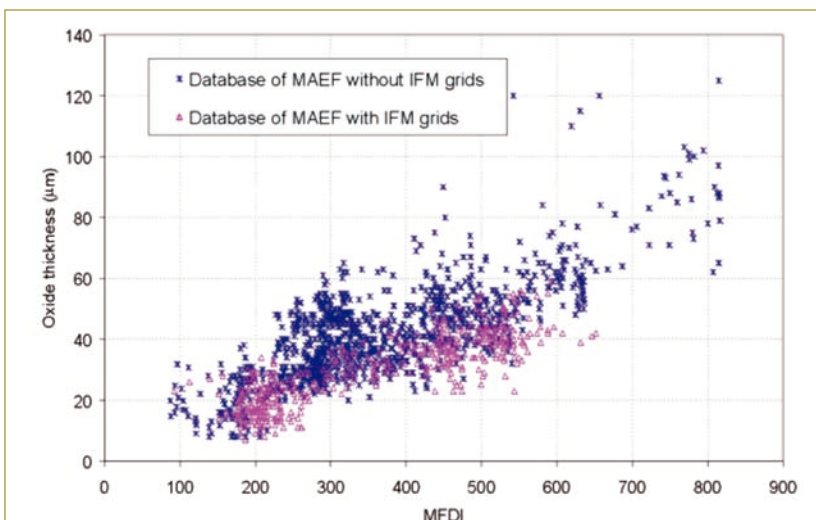


Figura 1. Base de datos de corrosión del ZIRLO™ (PIC).

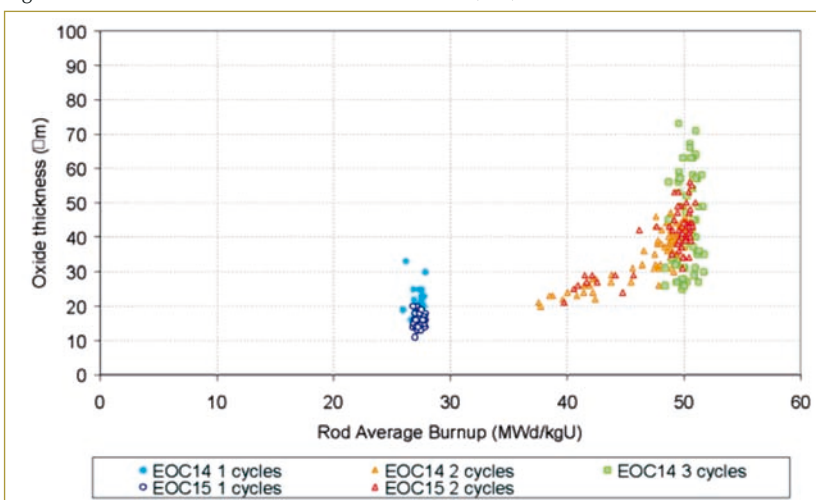


Figura 2. Espesor máx. de óxido vs. quemado medio de barra en Vandellós II.

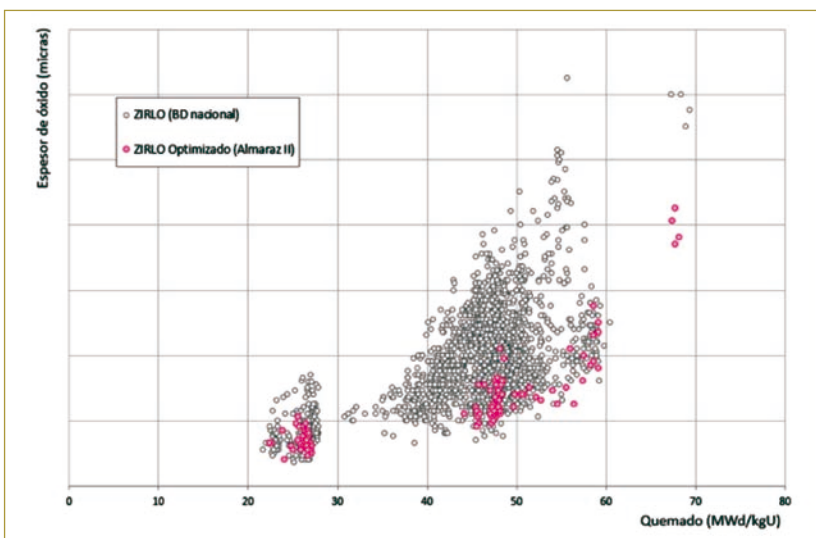


Figura 3. Espesor de óxido en las nuevas vainas de ZIRLO Optimizado (PIC).

Almaraz-II hasta alto quemado. Los resultados evidencian una corrosión del orden del 40 % menor que la del ZIRLO, especialmente a altos quemados.

Inspección dimensional de elementos combustibles

Más de 100 elementos combustibles se han inspeccionado desde el inicio del PIC. Se han obtenido datos de

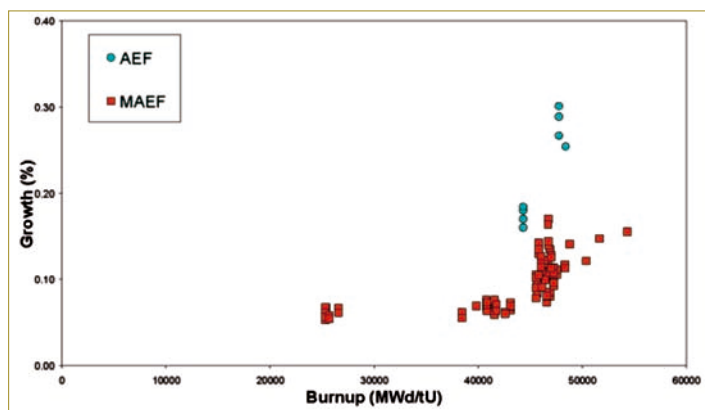


Figura 4. Base de datos de crecimiento de elementos combustibles (PIC).

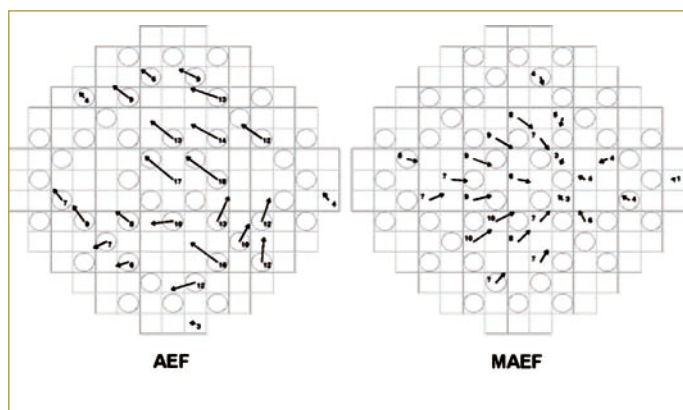


Figura 5. Caracterización del arqueo de un elemento combustible (PIC).

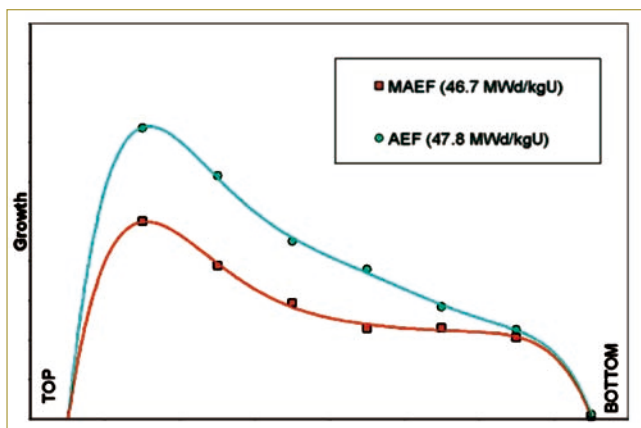


Figura 6. Crecimiento de rejilla (PIC).

crecimiento, arqueado e inclinación de elementos combustibles y de crecimiento de rejillas después de uno, dos y tres ciclos de operación, con diferentes objetivos.

Los resultados de la Figura 4 muestran el excelente comportamiento del diseño MAEF con esqueleto de ZIRLO frente al anterior diseño AEF con esqueleto de Zircaloy-4. Cuantitativamente, el crecimiento del elemento combustible es un 40% menor en el nuevo diseño.

La base de datos para la caracterización dimensional de los elementos combustibles cubre hasta niveles de quemado de hasta 70 GWd/tU.

En referencia al seguimiento de las medidas de arqueado algunas conclusiones interesantes pueden extraerse de la Figura 5. La figura indica gráficamente con una flecha la dirección del arqueado y la longitud de ésta expresa la magnitud del arqueado en milímetros. Se puede concluir que el nuevo diseño MAEF disminuye considerablemente la deformación del elemento combustible y, por consiguiente, se reduce el riesgo de IRI (Incomplete Rod Insertion). El arqueado máximo se ha reducido de 18 mm hasta 10 mm. Otra observación signi-

ficativa es el cambio en el patrón de arqueado en el núcleo.

La rejilla también sufrió cambios en el diseño y en el material, pasando de Zr-4 a ZIRLO. Estos cambios también han sido monitorizados como parte del PIC. La figura 6 muestra los resultados de las inspecciones, donde se observa una mejora del 30% en el crecimiento de las rejillas ZIRLO frente a la anterior de Zircaloy-4.

Inspecciones visuales

Las inspecciones visuales siempre son un complemento para la mayor parte de las actividades de inspección. No obstante, una de las aplicaciones más interesantes de las inspecciones visuales para los objetivos del PIC es la valoración de la resistencia al desgaste rejilla-vaina del nuevo diseño MAEF. Esta es la principal causa de

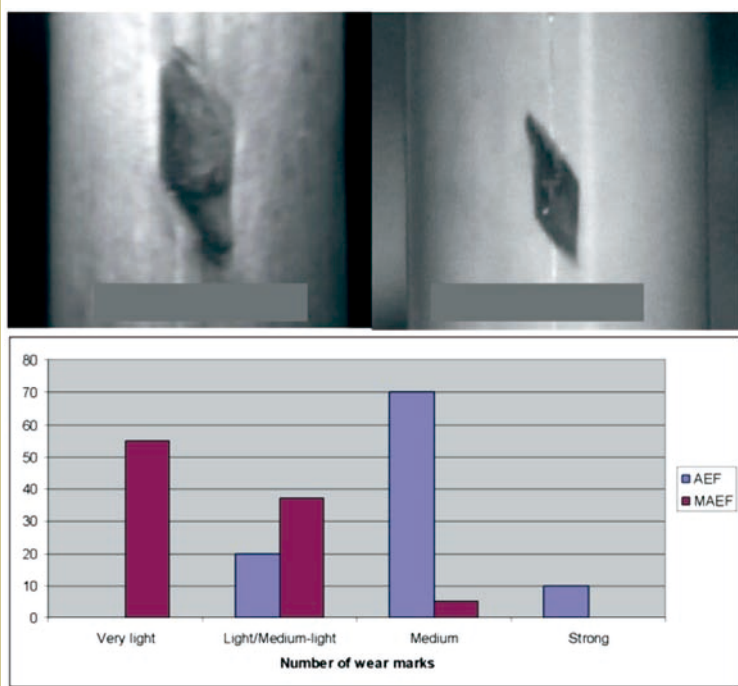


Figura 7: a la derecha, marca de desgaste en MAEF, a la izquierda marca en AEF [4].

fallo en los combustibles PWR, por lo que su estudio es uno de los objetivos clave del PIC.

En la Figura 7 se incluyen las fotografías de dos marcas de desgaste rejilla-vaina. La foto de la derecha, tomada durante una campaña de inspección del PIC, corresponde a una barra de diseño MAEF que ha operado durante tres ciclos. La foto de la izquierda corresponde al diseño anterior AEF (V5H de Westinghouse) en una campaña en Wolf Creek [4]. También se incluye en la Figura 7 un gráfico con la mejora de la resistencia al desgaste del nuevo diseño, en el cual no se ha detectado ninguna marca profunda, tan solo unas pocas marcas de profundidad media.

Más mejoras se han conseguido tras la incorporación de las rejillas

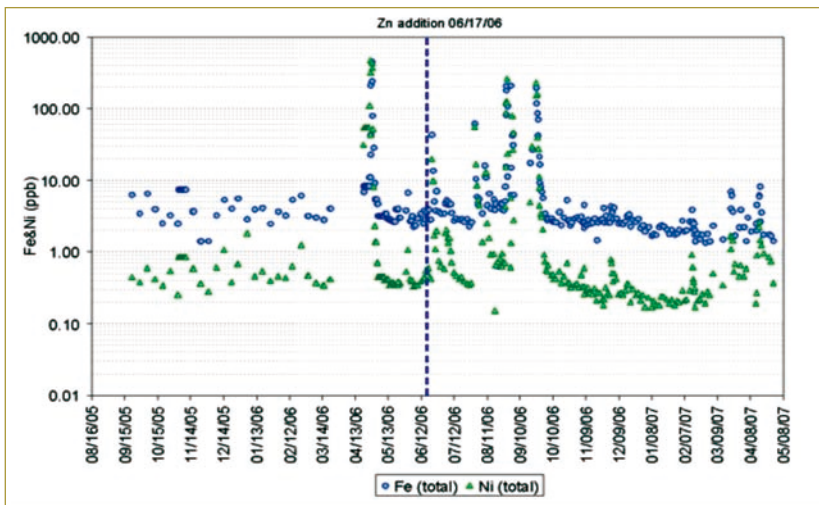


Figura 8. Concentraciones de Fe y Ni en refrigerante de Vandellós II.

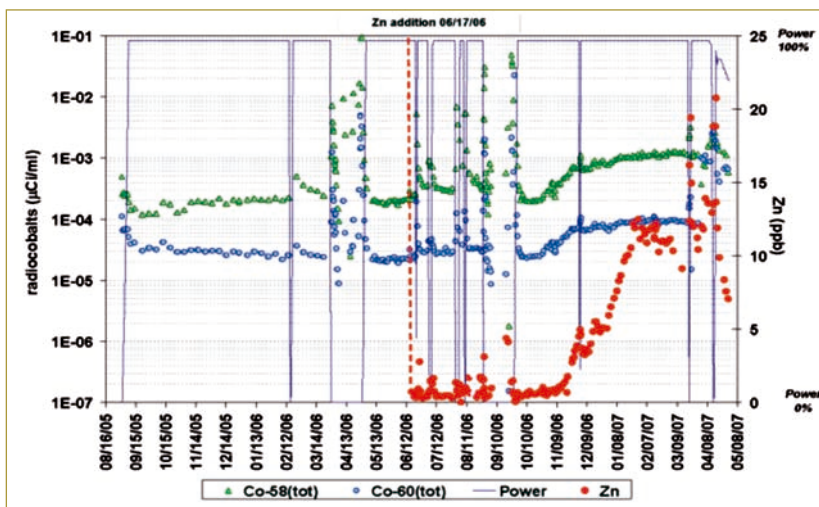


Figura 9. Potencia del reactor, concentración de Zn y ^{58}Co and ^{60}Co en Vandellós II.

IFM, con una mayor área de contacto entre la barra y los muelles y resaltes. Los fallos por desgaste que se producían en el anterior diseño AEF han sido eliminados en este nuevo diseño MAEF.

Seguimiento de la química y radioquímica

Uno de los objetivos de la química del refrigerante es evitar la degradación de los materiales que lo componen garantizando la integridad tanto del combustible como del circuito primario.

En esta sección se presentan los resultados de las actividades que se centran en la comprensión y mitigación de los efectos de la química sobre el combustible. El seguimiento de la química y la radioquímica en las centrales PWR españolas ha

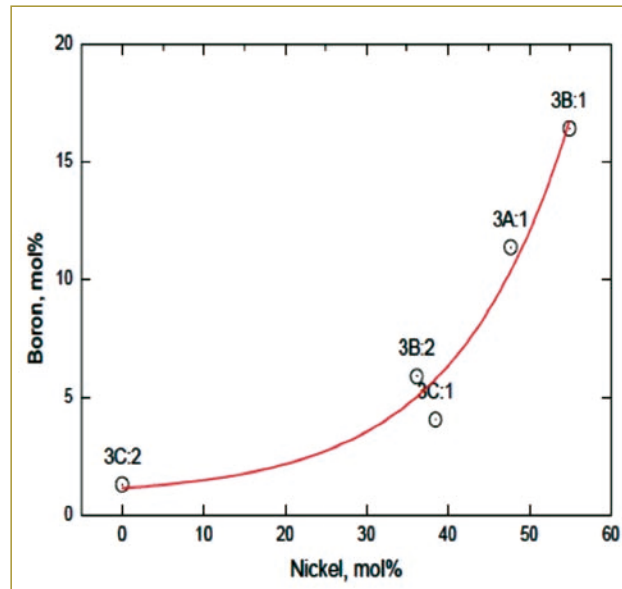


Figura 10. Correlación entre las concentraciones de boro y níquel en el CRUD. Programa de investigación bajo el alcance del PIC.

sido llevado a cabo como parte del PIC. Este seguimiento en diferentes centrales permite compararlas entre ellas y con el resto de la industria para identificar los diferentes efectos en el combustible asociados a una central específica.

Una de las aplicaciones del seguimiento de la química del refrigerante es la evaluación de los efectos de la inyección de cinc sobre el combustible. El cinc puede adherirse a los depósitos de corrosión sobre el combustible (CRUD), formados principalmente por Ni y Fe liberados de los componentes del circuito primario. Este CRUD puede causar alteraciones en la transferencia de calor entre la vaina y el refrigerante, la temperatura aumenta y se incrementa la corrosión. Los depósitos de boro incrementan el riesgo de CIPS (CRUD Induced Power Shifts).

El seguimiento de los productos de corrosión (Ni y Fe) y de los productos de activación ^{58}Co , ^{60}Co , es un indicador importante ya que variaciones significativas de estos elementos podrían significar un aumento del riesgo de CIPS. En la Figura 8 se muestran las concentraciones de Ni y Fe durante el ciclo 15 de Vandellós II [3]. No se observa una elevación de estos metales como consecuencia de la adición de cinc al refrigerante.

La Figura 9 representa la concentración de cinc, las actividades de ^{58}Co , ^{60}Co y la potencia durante el ciclo 15 [3]. Como se esperaba, las actividades de los dos radioisótopos aumentaron como consecuencia de la adición de cinc.

Programas de investigación

El PIC ha incluido también programas específicos de investigación como el realizado en Studsvik Nuclear AB en colaboración con EPRI [2, 3] con el propósito de entender los mecanismos de deposición de boro en el CRUD. Uno de estos programas demostró que la deposición de boro en el CRUD decrece cuando disminuye la concentración de níquel en los depósitos y que esta dependencia prevalece sobre otros factores que potencialmente podrían afectar, tales como pequeños cambios de pH o exposición prolongada al cinc [6].

La Figura 10 muestra que cuando el contenido de Ni decrece a cero, la concentración de B del CRUD alcanza el valor más bajo.

ACTIVIDADES FUTURAS

Con objeto de dotar al Programa de una mayor flexibilidad que permita respuestas más rápidas a las necesidades y tendencias del sector nuclear español, el alcance del PIC deja de definirse para periodos de varios años, como se venía haciendo hasta el 2012. El comité de Dirección de I+D+i que gestiona el programa, formado por las empresas propietarias de las centrales PWR, Endesa Generación, S.A.U., Iberdrola Generación Nuclear, S.A.U., Gas Natural SDG, S.A. y por Enusa Industrias Avanzadas S.A.; aprueba las propuestas y establece las prioridades de las actuaciones de forma anual.

En general, las actividades a futuro en este 2015 y siguientes se centran en dos objetivos, ambos relacionados con cambios de diseño del combustible:

- El primero de ellos, la introducción paulatina y vigilada del nuevo material de vaina ZIRLO Optimizado, permitirá a las plantas españolas hacer frente sin restricciones en la operación asociadas al combustible, a la futura y más limitante regulación LOCA y RIA. Para ello, el foco de las actuaciones está siendo y será el análisis de las inspecciones y ensayos realizados principalmente entre los años 2010-2014. Como resultado de este análisis se ha conseguido o se conseguirá, entre otros, disponer de un soporte sólido para licenciar, ante el CSN,

el uso en recargas del ZIRLO Optimizado; disponer de leyes específicas de comportamiento del material que permiten ganar márgenes de diseño y/o soportar una operación a quemados más elevados de los actualmente licenciados.

- El segundo, el seguimiento del comportamiento del nuevo diseño de combustible, MAEF-2012, permitirá la verificación y cuantificación de las mejoras que aporta este diseño en cuanto a algunas de las preocupaciones mayores de la industria actualmente: estabilidad dimensional, desgaste barra-rejilla y protección ante debrís.

CONCLUSIONES

La Central Nuclear de Almaraz-Trillo (CNAT), la Asociación Nuclear Ascó-Vandellós (ANAV) y Enusa Industrias Avanzadas, han desarrollado y ejecutado una estrategia coordinada para alcanzar el máximo nivel de fiabilidad del combustible. El excelente comportamiento del combustible fabricado por Enusa para las plantas PWR españolas es el mejor indicador de que las expectativas del programa se cumplen.

REFERENCIAS

- [1]. M. Pedroche. Evolución del combustible PWR suministrado por ENUSA. Reunión de la SNE. Murcia 2008.

- [2]. A. Sánchez, N Doncel, G Rubio, JL Gago. Fuel evaluation under zinc injection in Ascó I/II and Vandellós II NPP. Proceedings of the 2006 International Meeting on LWR Fuel Performance. Salamanca

- [3]. A Sánchez, N Doncel, G Rubio, JL Gago, J Deshon. Spanish experience of fuel performance under zinc injection conditions in high duty plans. 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting. Korea

- [4]. S D Ferguson, O Correal-Pulver, Post irradiation examination of the Lead Westinghouse Robust Fuel Assemblies after three cycles of operation in the Wolf Creek generating station. ENS Top Fuel. Würzburg (Germany) 2003.

- [5]. Fuel Reliability Guidelines: Fuel Surveillance and Inspection Rev. 2. Electric Power Research Institute (EPRI), 2014.

- [6]. N. Doncel, J Chen, P Guillen, H Bergvist. On the role of nickel deposition in CIPS occurrence in PWR.VGB Konferenz NPC'08. Berlin.■