

Programas coordinados para caracterizar márgenes de diseño e investigar mejoras del combustible PWR-W en España

J. M. Alonso, M. Novo y G. Rubio

Desde la década de los 90 ANAV, CNAT y ENUSA llevan realizando planes conjuntos de investigación y vigilancia del comportamiento del combustible en las centrales de Almaraz, Ascó y Vandellòs, con los siguientes objetivos:

- cuantificar los márgenes de operación del combustible "normal" mediante la caracterización de sus variables críticas: corrosión de vaina, variaciones dimensionales, marcas de abrasión, y, en caso de fallo, sus causas
 - explorar la viabilidad de escenarios de operación más efectivos para la optimización del ciclo del combustible (p.e., mayor quemado o potencia, cambios en la química del primario,...) mediante el establecimiento de caracterizaciones más específicas
 - validar innovaciones en el diseño del combustible que posibiliten mejores márgenes (p.e., nuevos materiales) mediante programas de irradiación de elementos de demostración (LTA)
- El artículo describirá el alcance de las principales actividades en curso o previstas en los próximos años, presentando un modelo de colaboración entre centrales y suministradores que en muchos aspectos concuerda con el que en estos momentos la industria del combustible está tratando de adoptar en EE UU (p.e., objetivo "CERO 2010" del INPO).

Since the early 90's ANAV, CNAT y ENUSA have been carrying out, on a continuous bases, joint fuel research and surveillance programs at Almaraz, Ascó and Vandellòs NPP's, aiming to the following objectives:

- *Assessing "normal" fuel operating margins by the characterization of critical performance parameters, such as cladding corrosion, dimensional variations, fretting marks, or, in case of fuel failure, root cause analyses.*
- *Feasibility of more convenient fuel operating scenarios from fuel cycle optimization viewpoint (i.e., increase discharge burnup, power uprates, advance water chemistry,...) by specific fuel characterization programs*
- *Proving and validating new design features that provides better margins (i.e., new alloys) by establishing the corresponding LTA program*

Present paper is describing the scope of on-going joint programs. It is important to highlight the good alignment of this model of collaboration followed by the Spanish Plants since the 90's, with the new guidelines for fuel surveillance and inspection that the fuel industry is currently trying to adopt in the US (i.e., INPO's "zero by 10").

INTRODUCCIÓN

La caracterización del comportamiento del combustible en los reactores PWR españoles de origen tecnológico Westinghouse (Almaraz I y 2, Ascó I y II, y Vandellòs II) ha sido objeto de planes de investigación y vigilancia que al amparo de los Contratos de Suministro y de diferentes convenios de colaboración entre la Asociación Nuclear Ascó - Vandellòs II A.I.E (ANAV), las Centrales Nucleares Almaraz - Trillo A.I.E. (CNAT) y ENUSA han permitido generar una extensa base de datos

y una continuada monitorización de los márgenes operativos.

Por otra parte, con el fin de explorar la viabilidad de nuevos escenarios de operación más efectivos para la optimización del ciclo del combustible, o bien de validar innovaciones en el diseño del combustible que posibiliten mejores márgenes, se han venido emprendiendo programas específicos de irradiación de elementos combustibles especialmente concebidos y sometidos a un exhaustivo plan de inspecciones y ensayos complementarios en celda caliente.



JOSÉ MANUEL ALONSO. Ingeniero Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es el jefe de Tecnología y Programas de I+D+i de ENUSA.



MANUEL NOVO. Jefe del departamento de Combustible de las Centrales Nucleares Almaraz-Trillo A.I.E.



GENIS RUBIO. Jefe de Combustible Nuclear de la Dirección de Servicios Técnicos de la Asociación Nuclear Ascó - Vandellòs II A.I.E.

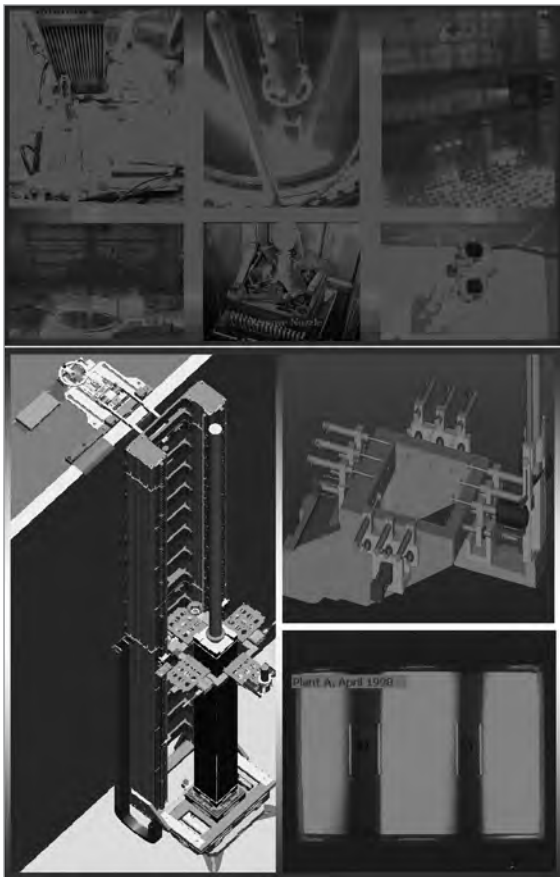


Figura 1: Capacidades de inspección y reparación del combustible.

La figura 1 muestra varios dispositivos y equipos empleados tanto en la caracterización en central por técnicas no destructivas de propiedades del combustible irradiado, como para operaciones de extracción de barras para su inspección o envío a celda caliente, y la posterior reconstrucción del elemento.

Este artículo tiene por objeto presentar el estado actual de la colaboración entre las citadas compañías en relación con los trabajos de investigación para caracterizar en central el comportamiento del combustible que opera en las centrales mencionadas.

VIGILANCIA Y CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE MAEF (figura 2)

El combustible MAEF es el actualmente en operación en los reactores operados por ANAV y CNAT. El diseño se basa en el que Westinghouse comercializa en EE UU como RFA. Se trata de un combustible 17x17 de 12 pies de longitud activa cuyas principales características se resumen en la tabla 1.

Se han considerado como parámetros significativos del comportamiento para este combustible, y por ello objeto necesario de su vigilancia y caracterización, los siguientes:

— Corrosión de la vaina

La corrosión de la vaina sigue siendo el principal indicador del margen de diseño real con el que cuenta el combustible al término de su vida útil, y es además un buen parámetro para valorar las posibles limitaciones en la manipulación y tratamiento del combustible gastado.

Por otra parte se debe señalar la amplia experiencia publicada sobre casos de efectos no esperados asociados a una corrosión excesiva sobre los que conviene mantenerse atentos.

— Variaciones dimensionales inducidas por la irradiación

La estabilidad dimensional del combustible MAEF es por diseño notablemente superior a la del combustible AEF al que sustituyó hace años. No obstan-

te, es preciso mantener cierto nivel de vigilancia sobre la evolución del arqueo, la distorsión y las variaciones dimensionales relativas de las diferentes partes constituyentes, con el fin de confirmar el buen comportamiento esperado, cuantificar los nuevos márgenes y descartar que aparezcan procesos de incubación de situaciones de deformación generalizada que comprometan la funcionalidad de las barras de control y las operaciones de manejo del combustible durante la recarga.

— Marcas de desgaste por vibraciones inducidas por el refrigerante

El problema de fiabilidad que más ha afectado a la industria del combustible PWR en la última década es la perforación de la vaina por desgaste en sus puntos de contacto con las celdillas de las rejillas. La causa de este problema son diferentes mecanismos de vibraciones inducidas por el paso del refrigerante a través del elemento combustible.

El combustible MAEF está especialmente ideado para evitar esos mecanismos, como son la presencia de la rejilla protectora en la parte inferior para reforzar la sujeción de la barra a la entrada de agua en el núcleo, o bien la disposición equilibrada de aletas mezcladoras en la rejillas intermedias, el

Masa de uranio		~ 460 kg	
Longitud total		406 cm	
Anchura		21 cm	
Red		17x17	
Paso entre barras combustibles		12,6 mm	
Número de barras combustibles		264	
Número de tubos guía		24	Zirlo
Número de tubos de instrumentación		1	Zirlo
Número de rejillas	Estructurales extremas	2	Inconel
	Estructurales intermedias	6 (con aletas mezcladoras)	Zirlo
	Protectora antipartículas	1	Inconel
	Mezcladoras (IFM)	3	Zirlo
Material de los cabezales			Acero inoxidable
Cabezal inferior		con filtro antipartículas	
Longitud de la barra combustible		388 cm	
Tapón inferior largo para mayor protección antipartículas			
Altura de la columna de combustible		366 cm	UO ₂ 6 UO ₂ +Gd ₂ O ₃
Diámetro de la pastilla		8,2 mm	
Densidad de la pastilla		95,5% DT	
Diámetro exterior de la vaina		9,5 mm	Zirlo
Diámetro interior de la vaina		8,4 mm	

Tabla 1: Características generales del combustible MAEF.

unidad	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Almaraz 1	C-18	C-19	C-20	C-21		
inspección de corrosión						
Almaraz 2	C-16	C-17	C-18	C-19		
LTA nuevas vainas						
Ascó I	C-19	C-20	C-21			
Ascó II	C-17	C-18	C-19	C-20		
Inyección Zn						
Vandellós II	C-15	C-16	C-17	C-18		
LTA alto quemado						
Inyección Zn						

Figura 2: Plan tentativo de inspección de combustible.

diseño de las propias celdillas y una mayor superficie de contacto entre vaina y rejilla, que contribuyen a evitar el acoplamiento fluido estructura y a disminuir la tasa de desgaste.

Por lo tanto, parece oportuno completar un plan de vigilancia y caracterización que sea suficientemente concluyente sobre la ausencia de indicios que comprometan la fiabilidad del combustible por esta causa.

— Investigación de la causa de fallo en el caso de barras combustibles no estancas

La operación sin fallos de combustible es una de las prioridades fundamentales para las centrales y la principal demanda al suministrador de combustible. Por lo tanto, mientras se sigan observando fallos resulta imprescindible investigar su naturaleza y la causa que lo produjo como primera medida para establecer acciones correctoras que eviten su repetición y dotar al combustible de todas las protecciones tecnológicas para evitar los daños por partes sueltas.

Además, se ha de estudiar atentamente la información disponible al respecto de la industria, de manera que se haya suficiente nivel de conocimiento sobre cualquier potencial mecanismo de fallo que pudiera comprometer la fiabilidad del combustible, y así poder decidir sobre posibles medidas preventivas.

INVESTIGACIÓN DE LOS EFECTOS SOBRE EL COMBUSTIBLE DE CAMBIOS EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL COMBUSTIBLE

La química del agua del primario tiene dos efectos principales sobre el comportamiento del combustible, por un lado actúa sobre la cinética de corrosión de sus materiales, y por otro condiciona la formación y la evolución de los

depósitos de productos de corrosión “crud” sobre las vainas, lo que a su vez produce efectos secundarios sobre la propia corrosión y sobre la potencia nuclear local.

Por su parte, la química del primario está condicionada por las necesidades y limitaciones del propio sistema del primario tales como: la corrosión de los materiales estructurales del primario, la presencia de depósitos que aumentan los campos de radiación y la prevención de fallos por corrosión bajo tensión, entre otras.

En las centrales nucleares de Vandellós II, Ascó I y Ascó II se está un proceso de modificación de la química del primario caracterizado por las siguientes variables:

— Química B-Li coordinada, en la que es preciso operar con niveles de Li relativamente elevados al comienzo del ciclo (próximos a los 3,5 ppm durante los primeros meses) con el fin de conseguir un pH suficientemente elevado ($\geq 7,1$) y mantenerlo lo más constante posible hasta final de ciclo, es decir una química coordinada. Los efectos potenciales de estas concentraciones de Li sobre la corrosión y los depósitos de “crud” deben ser debidamente investigados.

— Programa de inyección de Zn en el primario, con el que se pretende conseguir márgenes frente a la vida útil de los elementos estructurales del reactor, principalmente Inconel 600 al aumentar la resistencia frente al PWSCC y reducciones sustanciales en la presencia de productos de activación del primario (reducción de dosis)

En conexión con estos cambios en la química se ha establecido un plan de vigilancia e investigación por el que se caracteriza la corrosión de las vainas, se examinan los cambios en la naturaleza y composición del “crud”, se analiza de forma continuada la radioquímica del primario en función del

nivel de inyección de Zn y se contrasta con las predicciones de los modelos disponibles.

El EPRI, a través del “Fuel Reliability Program” (FRP), está participando en la experiencia sobre la inyección de Zn en CN Vandellós II para evaluar los efectos sobre el combustible en una central representativa con altas tasas de ebullición subenfriada.

En paralelo se ha acometido un plan de investigación en laboratorio con el fin de comprender los mecanismos básicos que gobiernan la precipitación y disolución de compuestos de boro y litio en el “crud” depositado en la superficie de las barras combustibles. Para ello se ha construido un lazo hidráulico conectado a una autoclave en donde poder reproducir condiciones prototípicas de la operación, lo que permite llevar a cabo numerosas series de ensayos en las que, entre otras variables, se estudian los efectos asociados al pH, o a la naturaleza y composición del “crud”.

PROGRAMAS DE LTA PARA INVESTIGAR, CARACTERIZAR Y VALIDAR CAMBIOS EN EL DISEÑO DEL COMBUSTIBLE O EXTENSIÓN EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Un programa de irradiación de elementos combustibles de demostración, LTA, se caracteriza, en mayor o menor medida, por lo siguiente:

- irradiación de varios elementos combustibles (normalmente 4) en un reactor como parte de la operación normal, pero con el objetivo de someterlo a una determinada historia de operación de interés (quemados o potencias elevadas)
- los elementos incorporan innovaciones o variaciones de diseño objeto de la investigación (p. e., nuevas aleaciones, cambios en algún componente)
- caracterización exhaustiva de los materiales y dimensiones durante la fabricación, incluyendo una amplia gama de ensayos que proporcione las propiedades significativas con las que se justifican los márgenes de diseño
- inspecciones en piscina de combustible al final de cada ciclo (corrosión, visual y dimensional) que confirman y cuantifican los márgenes de diseño
- extracciones de barras (u otros elementos) al final de algunos ciclos para su envío a celda caliente
- inspecciones complementarias en celda caliente mediante la realización de una variedad amplia de ensayos (no destructivos y destructivos)
- irradiación complementaria en algún reactor de ensayo de materiales (en condiciones extremas de operación,

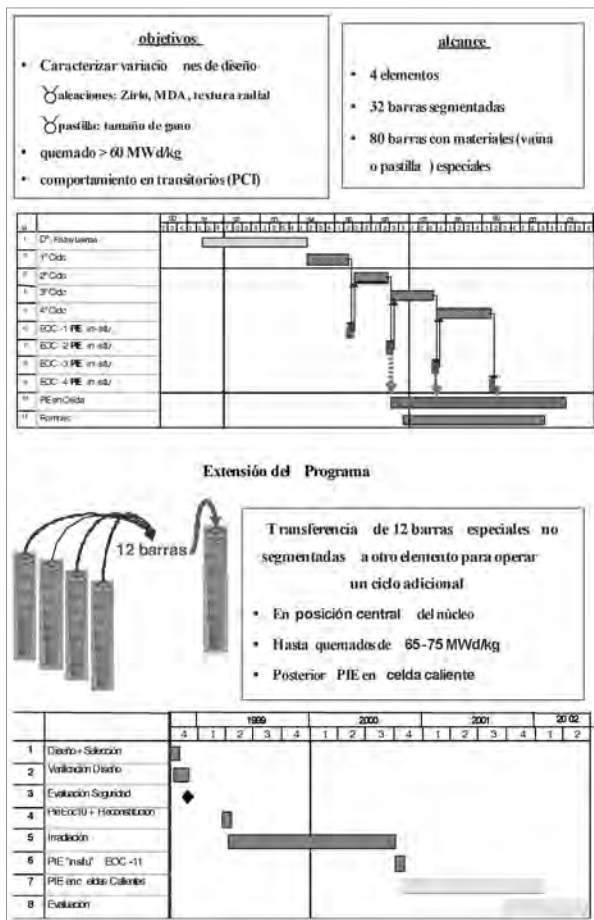


Figura 3: Programa de LTA de barras segmentadas en Vandellós II.

o de transitorios operacionales o de accidente)

Entre los programas de LTA acometidos en los reactores PWR españoles, y realizados dentro de un amplio marco de colaboración con otros socios o entidades de carácter internacional, destacan los que a continuación se señalan:

— Programa de Barras Segmentadas (figura 3)

Programa emprendido a comienzos de la década de los 90 destinado a investigar el comportamiento de varias aleaciones de vaina y diseños de pastilla a alto quemado y bajo transitorios de operación (margen frente a PCI durante "rampas" de potencia).

Los 4 LTA de este programa se irradiaron durante 4 ciclos consecutivos en C.N.Vandellós II hasta alcanzar un quemado medio de 53 MWd/kgU. De estos LTA se extrajeron un total de doce barras, con quemados comprendidos entre 48 y 57 MWd/kgU y diferentes tipos de vaina, y se transfirieron a otro elemento combustible en el que operaron un ciclo adicional, con lo que en alguna de las barras se alcanzó un quemado de casi 75 MWd/kgU.

Complementariamente, parte del material se ha empleado, o se prevé emplear, en Programas internacionales de I+D como los de seguridad en accidentes del Cabri francés o ALPS japonés, o bien los de fiabilidad SCIP sueco o HRP noruego.

El principal retorno para la actual operación del combustible comercial en los reactores españoles ha sido la completa y satisfactoria caracterización efectuada del material Zirlo, actualmente empleado en los cinco PWR españoles con NSSS de Westinghouse.

— Programa de Alto Quemado (figura 4)

Es en cierta medida un programa complementario del anterior también llevado a cabo en C.N. Vandellós II, en el que además de atender al comportamiento del material de vaina a elevados quemados se interesa por el comportamiento del material estructural. El objetivo ha sido alcanzar un elevado quemado en el conjunto del elemento combustible, próximo a 70 MWd/kgU, en sólo cuatro ciclos de operación, de manera que la historia de operación fuera lo suficientemente demandante y representativa de la esperada en una operación comercial.

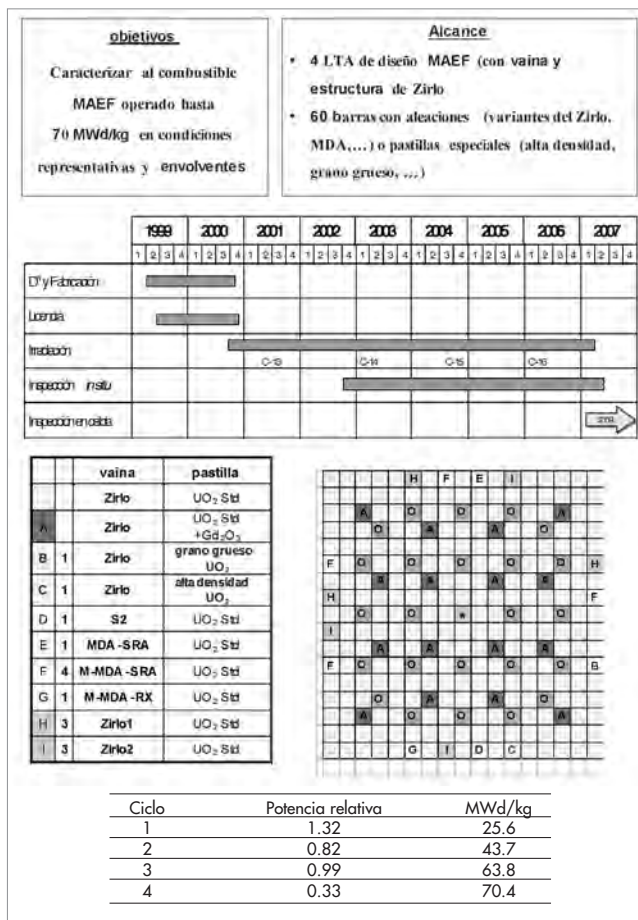


Figura 4: Programa de LTA de alto quemado en Vandellós II.

También se ha aprovechado para ensayar algunas variantes o mejoras de las aleaciones estudiadas en el programa previo, por ejemplo el Zirlo de bajo estano (precedente del actual Zirlo Optimizado).

En 2007 concluyó la primera fase con la terminación de la irradiación de los cuatro ciclos en C.N.Vandellós II y la caracterización no destructiva en piscina a final de cada uno de los ciclos. En estos momentos se está discutiendo el alcance de un programa complementario que incluya envíos de materiales a celda caliente, ensayos destructivos y posible irradiación adicional en reactores de ensayo.

— Programa de aleaciones avanzadas de vaina (figura 5)

En 2006 se emprende un programa de irradiación en C.N. Almaraz 2 con el fin de investigar el comportamiento de aleaciones de vaina que en a medio plazo ofrezcan alternativas fiables a las actuales y proporcionen unas prestaciones significativamente mejoradas. Las fases y alcances del programa se resumen seguidamente:



Figura 5: Programa de LTA de nuevas alteraciones en Almaraz 2.

a. Características de los LTA

- 4 LTA con vainas avanzadas desarrolladas por Westinghouse, que en total incluyen 18 barras de cada uno de los 4 tipos de aleaciones denominadas Axiom, y otras 88 de Zirlo optimizado
- 4 LTA con vainas avanzadas desarrolladas por un consorcio PWR japonés liderado por MHI, que en total incluyen hasta 102 barras con estas aleaciones, denominadas J1, J2 y J3

b. Plan

- los dos subprogramas se están realizando de manera totalmente independiente y cuentan con diferentes participantes

- en una primera etapa se irradiarán hasta tres ciclos en posiciones relativamente demandantes para alcanzar unos quemados en el entorno de los límites actuales de licencia (con quemado máximo de barra < 62MWd/kgU)
- se contempla la posibilidad de una etapa 2 en la algunas barras se traspasen a otro elemento para una irradiación complementaria hasta superar los 70 MWd/kgU
- finalmente, en una segunda fase del Programa se completará la investigación mediante el envío de algunas barras a celda caliente y la realización de ensayos complementarios, rampas de poten-

cia un la integración de parte del material en otros programas de investigación.

HOJA DE RUTA DEL COMBUSTIBLE PARA ANAV / CNAT

La experiencia de estos programas realizados con diferentes grados de colaboración entre Enusa y sus clientes españoles ha permitido desarrollar una sólida base de datos de comportamiento del combustible, está proporcionando de manera continuada una cuantificación de los márgenes de diseño disponibles, permite valorar los efectos de cambios deseados o necesarios en la operación, y va a aportar una valiosa información sobre significativas variaciones potenciales al actual diseño del combustible.

Recientemente, se ha querido dar un paso adelante en este trabajo conjunto con el fin de plantearse objetivos comunes y compartidos sobre escenarios deseables de operación a medio plazo que sirvan de guía para orientar adecuadamente el conjunto del esfuerzo común en los programas de I+D+i.

Al amparo del actual Contrato de suministro de Combustible se cuenta con una estructura administrativa estable para la definición y ejecución de un Plan de I+D+i, cuyas bases son las siguientes:

- asegurar la fiabilidad del combustible (ningún fallo) y cuantificar los márgenes disponibles
- necesidad de LTA para investigar y decidir toda innovación significativa en la operación o en el diseño del producto
- conseguir un mayor grado de integración de los programas de I+D+i propios en los internacionales en los que la industria española participe
- definir unos objetivos concretos a medio plazo

- escenario de operación que optimice el ciclo
- envolvente de operación asociada a dicho escenario óptimo
- mejoras precisas para esa operación, incluyendo tanto cambios en el diseño del producto y de sus materiales, así como de la metodología (modelos, códigos, criterios, procedimientos,...) de diseño
- desarrollo de nuevas capacidades de inspección del combustible irradiado, o perfeccionamiento de las actuales
- plan para atender la "licenciabilidad" del nuevo escenario

En consecuencia, sobre esas premisas, se está estableciendo una hoja de ruta que oriente y coordine todo el esfuerzo investigador hacia las metas fijadas y con un horizonte temporal enfocado al año 2012. ■