

# ESQUEMAS DE RECARGA DE COMBUSTIBLE DE ALTO QUEMADO Y LIMITACIONES ASOCIADAS

**C. AHNERT - J.M. ARAGONÉS - O. CABELLOS - N. GARCÍA-HERRANZ - A. LABAY**

Para realizar el análisis, diseño y la vigilancia en línea de los reactores de agua a presión son necesarios cálculos 3D detallados del núcleo. El desarrollo y la mejora de los códigos se hace cada vez más necesaria debido a la creciente heterogeneidad de los reactores PWR (elementos combustibles nuevos, recargas de combustible complejas, junto a especificaciones de operación del reactor más exigentes). El sistema de códigos SEANAP ha sido ampliamente validado en un conjunto de Centrales españolas y en este caso se ha utilizado para analizar las especificaciones del combustible de alto quemado y ciclos de operación largos.

Ultimamente, se han desarrollado algunos programas (con participación española) para estudiar las limitaciones del combustible quemado: Programa "Robust-Fuel", Programa de Barras Segmentadas y Programa de Alto Quemado. El objetivo de estos programas es alcanzar quemados mayores. Estos programas sirven para suministrar la tecnología y para obtener la aceptación del organismo regulador del diseño y operación de estos nuevos combustibles.

*The analysis, design and on-line surveillance of pressurized water reactors require extensive and detailed 3D core calculations. The development and the improvement of codes are required due to the increasing heterogeneity in PWR (new type of fuel assemblies, complex loading patterns and safety and reliability requirements of nuclear reactor operation). The SEANAP system has been extensively validated and this system has been used to analyze high burnup fuel specifications and several types of long cycles.*

*Some Programs (with Spanish participation) have been developed to study limitations for fuel burnup extensions: Robust Fuel Program, Segmented Rods Program and High Burnup Program. The aim of these programs is to provide technology and gain regulatory acceptance of fuel design and operation to higher burnup levels.*

## INTRODUCCIÓN

La creciente heterogeneidad de los núcleos PWR y la complejidad de los esquemas de recarga, con las limitaciones impuestas en el diseño, está obligando al desarrollo y la mejora de las

herramientas de cálculo. El sistema de códigos SEANAP ha sido utilizado para el estudio de la gestión del combustible de alto quemado, así como para estudiar la sensibilidad de la gestión de combustible en ciclos largos, dentro de las limitaciones actuales en el quemado del combustible de 60.000 MWd/TmU por barrita de combustible.

En los últimos años se han desarrollado un conjunto de Programas, con participación nacional, para analizar el comportamiento del combustible de alto quemado: Programa "Robust-Fuel", Programa de Barras Segmentadas y Programa de Alto Quemado. El objetivo es diseñar combustibles capaces de alcanzar 70.000 MWd/tU de quemado.

## LIMITACIONES ACTUALES EN EL QUEMADO DEL COMBUSTIBLE

La reducción del coste en la primera parte del Ciclo de Combustible está asociada al aumento del quemado de descarga de los elementos combustibles (EC) del núcleo. Con el fin de mantener la misma producción energética, esto es, los días efectivos de operación a plena potencia (DEPP), el aumento en el quemado de descarga se traduce en una reducción del número de elementos frescos a cargar en cada

ciclo de quemado, obligando a un mayor enriquecimiento. Esto supone adicionalmente una reducción en el coste de la segunda parte del ciclo, ya que reduce el número de elementos quemados a almacenar al final de cada ciclo de quemado.

En la situación del mercado actual y previsible a medio-largo plazo, el ahorro en la cantidad de Uranio y en la fabricación del combustible al reducir el nº de EC, compensa el coste del aumento del enriquecimiento.

Las limitaciones para realizar esta optimización se encuentran actualmente en:

- Un límite estratégico-administrativo de un enriquecimiento máximo del combustible del 5% (4,95% real incluyendo las tolerancias).
- Un límite técnico de quemado máximo por barrita combustible de 60.000 MWd/TmU.
- Una concentración máxima de Boro crítico en la situación de BOL-HFP (principio de ciclo y plena potencia), con concentración de Xenon de equilibrio. Esta debe ser tal que, la concentración de Litio en el refrigerante sea la recomendada para mantener una química del Sistema Primario (PH) que limite la corrosión en los componentes estructurales del circuito, la producción de adherencias en las zonas

calientes de la barra combustible y las dosis al personal.

Los ciclos actuales con alta densidad de potencia, de 18 meses de duración y alto factor de carga (98,5%), llevan asociados altas concentraciones de boro a BOL. Para reducir la concentración de Boro se introducen un número adecuado de barras de combustible con óxido de Gadolinio, incluyendo barras de baja y alta concentración (2%-6%-8%), con mayor presencia del 2%. Esta solución puede hacerse mezclando dos concentraciones distintas de óxido de Gadolinio en el mismo elemento combustible, o con una sola concentración por elemento.

De esta manera se consigue: una concentración de boro aceptable, un coeficiente de temperatura del moderador (CTM) más negativo, una química del primario adecuada, un menor impacto en los análisis de seguridad que son limitantes por alta concentración de Boro, y una menor penalización por el Gadolinio residual al final de ciclo. En conclusión, se obtienen ciclos más largos que si se utilizasen sólo venenos de alta concentración para el mismo objetivo.

Con estos planteamientos y dado que interesan ciclos de quemado de alta producción y disponibilidad, y con un elevado factor de carga, las estrategias más adecuadas son los ciclos de 18 meses de duración o superiores.

## GESTIÓN DE COMBUSTIBLE EN CICLOS LARGOS

### Ciclos de 18 meses

La carga típica de combustible en núcleos PWR de 157 EC, para ciclos de 18 meses de duración, incluyendo un mes de parada para recarga de combustible, es de 64 EC frescos con un enriquecimiento medio del 4,50%.

En esta situación no aparece ninguna de las limitaciones mencionadas anteriormente, ya que se obtiene una producción de 510 DEPP por ciclo (17 meses), con un quemado medio de descarga de 50.000 MWd/TmU y utilizando una carga mínima de absorbentes consumibles para controlar los picos de potencia, una concentración de Boro a BOL-HFP-Xe de 1750 ppm.

Se puede conseguir una reducción del coste del combustible, respecto al caso anterior, introduciendo 60 EC frescos de 4,75 w/o. El enriquecimiento y la concentración de Boro de BOL-HFP-Xe son inferiores a los límites permitidos, con un número aceptable de barras de Gadolinio de alta y baja concentración (entre 700 y 750 barri-

**Tabla 1**  
Resumen de estrategias de recarga para ciclos de 18 meses

DEPP	EC frescos	w/o	Quemado medio descarga (MWd/tU)	Boro BOL
510 con alargamiento	64	4,50	50.000	Boro aceptable 700 Gd
510 con alargamiento	60	4,75	53.000	Boro aceptable 750 Gd
510 con alargamiento	56	4,95	57.000	Boro aceptable > 750 Gd

tas). Esta recarga permite cubrir los 17 meses de producción, pero da lugar a un quemado medio de descarga de 53.000 MWd/TmU que nos acerca mucho más al límite de quemado en los elementos de tres ciclos quemados de la periferia del núcleo.

Un esquema más agresivo consistiría en recargar 56 EC frescos. Entonces para mantener la misma producción energética, se debería aumentar el enriquecimiento de estos elementos al 5%, pero dado que no es posible, lo tomamos al 4,95% y realizamos un alargamiento del ciclo algo superior. En este caso se hace más compleja la búsqueda de esquemas de recarga al contar con una alimentación más corta y muy enriquecida. Una vez encontrado el esquema adecuado, se observa que la concentración de Boro a BOL-HFP-Xe es aceptable, y el número de barras de absorbentes consumibles suficiente para controlar los picos de potencia. Sin embargo, el quemado de descarga aumenta un 7%, sobrepasando el límite de 60.000 MWd/TmU. Desde este punto de vista, ya no es posible optimizar más el coste del combustible.

### Ciclos mayores de 18 meses

Para aumentar la producción energética, es decir, los DEPP equivalentes, manteniendo el factor de carga del ciclo en torno al 98,5% como en los casos anteriores, se deben buscar ciclos más largos. Dado que existe la limitación de enriquecimiento, se elige el máximo posible (4,95%).

Un ciclo de 24 meses de operación, con 30 días de parada para la recarga del combustible, requiere recargar como mínimo 92 EC frescos. Esto supone una producción de:

$$(365 \times 2 - 30) \times 0,985 = 689,5 \text{ DEPP.}$$

Para un esquema con 92 EC frescos y sin alargamiento de ciclo se obtienen 675 DEPP (22,5 meses de producción), descargando a la piscina 28 EC con un quemado medio de 33.700 MWd/TmU. La limitación aparece en el quemado

de descarga, que obligaría a no superar los 26.062 MWd/TmU de quemado del ciclo. Esta limitación supone una reducción hasta los 650,3 DEPP (21,7 meses de producción), lejos de la duración objetivo y con 100 ppm de concentración de boro en el refrigerante en el momento de terminar el ciclo.

Para analizar ciclos algo más cortos pero con mayor producción que los ciclos de 18 meses se ha seleccionado una recarga de 76 EC frescos (4,95 w/o). Este esquema produce 602 DEPP (20 meses de producción) sin alargamiento del ciclo. En este caso la gestión del combustible mejora, ya que se tendrían esquemas de 76, 76, y 4 EC y un quemado de descarga medio de 49600 MWd/TmU frente a los 45700 teóricos del caso anterior. El análisis de los resultados muestra que no se alcanza el límite de quemado y que incluso aparentemente se pueden efectuar alargamientos de ciclo hasta 623 DEPP (20,7 meses).

Ahora bien, si se realiza el mencionado alargamiento, dependiendo de su magnitud, se alcanza el quemado límite antes de completarlo (al contar con elementos que comienzan el ciclo con un mayor quemado), pudiendo quedar limitada la duración del ciclo. Esto lleva a buscar el alargamiento óptimo, que para este caso es de 15,1 DEPP. Así se consiguen ciclos de 650 días (21,4 meses), incluyendo un mes de parada para la recarga de combustible.

Si no existieran limitaciones en el enriquecimiento máximo, se podrían recargar 76 EC al 5,75%, para obtener ciclos de 24 meses. Sin embargo, aparecen unos condicionantes que dificultan su realización práctica, como son:

1) La criticidad en piscinas de almacenamiento para el combustible nuevo y gastado. Por lo general no presentan problemas para enriquecimientos inferiores del 5%, pero podrían presentarlos para valores mayores.

2) La capacidad de almacenamiento en las piscinas de combustible nuevo y gastado, debido al elevado número de elementos combustibles cargados. Las

piscinas actuales del combustible nuevo no tienen la capacidad necesaria, y para las de combustible gastado debería evaluarse la descarga térmica que se genera en la piscina, así como las fechas de saturación de su capacidad de almacenamiento.

3) Altas concentraciones de boro a BOL, por encima de las 2400 ppm a HFP-XE-BOL, con un número usual de barras de Gd de baja-alta concentración que permita el control de los picos de potencia. Las soluciones adoptadas han sido:

a) Incrementar notablemente el nº de barras de Gd al 2% (en 850 a 1500) dependiendo de la longitud del ciclo. Esto implica un acortamiento por penalización debida al Gd residual de 7-12 DEPP, además del encarecimiento económico.

La utilización más o menos masiva de óxido de Gd al 2%, produce un máximo de la concentración crítica de boro a 4.000 MWd/TmU. Por lo tanto se favorece la existencia de CTM más positivos a esos quemados que a BOL-HFP-Xe, situación que debe evaluarse cuidadosamente, y además produce una química asociada al incremento de la concentración del Litio que no es recomendable.

b) Utilizar boro enriquecido con un porcentaje superior al 30%. Debido a su coste, se recomienda la revisión y puesta a punto de los sistemas actuales de recuperación del boro utilizado en las centrales.

c) Utilizar una estrategia mixta con boro enriquecido y Gd al 2%.

4) Posibles derivas en la instrumentación y vigilancia periódica. Al aumentar la longitud de los ciclos, deben revisarse todas las cuestiones relativas a estos temas.

## PROGRAMAS PARA LA UTILIZACIÓN DE COMBUSTIBLE DE ALTO QUEMADO

### Nuevos diseños de elemento combustible

El programa "Robust-Fuel" que está llevando a cabo el EPRI, con participación española, pretende crear las bases para que la NRC licencie un nuevo combustible capaz de alcanzar quemados de 75.000 MWd/TmU. El producto final debe solucionar de forma clara los problemas surgidos recientemente como consecuencia de la actual gestión del combustible como son: defor-

mación, crecimiento, corrosión y en general todos los aspectos mecánicos, nucleares, termohidráulicos y de análisis de accidentes para altos quemados de descarga.

El programa generará unas especificaciones que deberá cumplir el fabricante del combustible para obtener un producto que supere todas las solicitudes planteadas. El acuerdo con la NRC consiste en suministrar al organismo regulador el producto evaluado y revisado.

Este es un programa ambicioso con muchos puntos comunes con el Programa de Demostración de Alto Quemado, que se está llevando a cabo en Vandellós-II como se expone en el próximo apartado, y que persigue en esencia los mismos objetivos.

### Programa de Barras Segmentadas

El Programa de Barras Segmentadas que se ha realizado en Vandellós-II ha sido el resultado de un acuerdo entre ENDESA-ENUSA-MHI-KANSAI-Westinghouse.

Su objetivo era analizar en un reactor comercial el comportamiento con el quemado de diferentes aleaciones de materiales, tanto actuales como avanzados, con distintas texturas, distintas pastillas combustibles (anulares y sólidas), y distinto tamaño de grano.

También se trataba de estudiar la respuesta ante transitorios y rampas de potencia a que fueron sometidos en el reactor experimental de Halden, tras haber sido irradiados en el reactor comercial. El objetivo es contribuir a generar unas bases de datos experimentales para el combustible con quemados más elevados que los utilizados actualmente.

Los 4 elementos combustibles de Barras Segmentadas fueron de diseño tipo MAEF (Modified-Advanced-European-Fuel) con 4,50% de enriquecimiento, con 8 barras segmentadas (7 segmentos), y 20 barras de referencia. El resto de las barras son las normales MAEF pero con vaina de ZIRLO.

Se han irradiado durante los ciclos 7, 8, 9, 10 de Vandellós-II, y a partir de su segundo ciclo de estancia en el núcleo se han ido extrayendo hasta el total de 32 barras segmentadas, para su irradiación en el reactor experimental, y su posterior análisis en celdas calientes.

**Tabla 2**  
Resumen de estrategias de recarga para ciclos mayores de 18 meses

DEPP	EC frescos	w/o	
650	92	4,95	Q.ciclo: 44.100 MWd/tU
612 con alargamiento	76	4,95	Q.ciclo: 50.300
690	76	5,75	Utiliza Boro enriquecido y 1300 Gd del 2%

Como consecuencia del Programa de Extensión de Irradiación de C.N. Vandellós-II, al final del ciclo-10 (con un quemado medio por EC de 53.000 MWd/TmU) se tomó la decisión de seleccionar 12 barras de referencia, y colocarlas en un elemento combustible quemado. Este elemento ocupa la posición 5-1 (x-y en el octavo de núcleo) en el ciclo-11 actualmente en operación, donde las barras alcanzarán quemados de 70.000 MWd/TmU.

### Programa de Alto Quemado

El Programa de Alto Quemado de Vandellós-II es el resultado de un acuerdo entre ENDESA-ENUSA-MHI-KANSAI. Consiste en irradiar 4 EC con 4,90% de enriquecimiento, durante los ciclos 12, 13, y 14 ocupando posiciones interiores del núcleo, pasando en el ciclo 15 a la periferia del núcleo, hasta alcanzar un quemado medio por elemento de unos 73.000 MWd/TmU. Se pretende demostrar la viabilidad de alcanzar mayores quemados que los actualmente licenciados.

Los elementos son de diseño MAEF, con esqueleto y vainas de Zirlo, e incorporan algunas modificaciones en la geometría y los materiales con el fin de: garantizar que se cumplen los márgenes impuestos por el diseño mecánico, mejorar sus prestaciones, y analizar el comportamiento a altos quemados de diversas aleaciones o combinaciones avanzadas del material de vaina con variantes en su composición.

Se realizarán inspecciones visuales dimensionales y de corrosión tras cada ciclo de irradiación, para verificar el comportamiento progresivo de los elementos en cuanto a deformaciones, torsión, crecimiento y corrosión. Adicionalmente está prevista una inspección en celda caliente al finalizar el Programa.

Los 4 EC de demostración incorporan en su primer ciclo de irradiación 16 barras de Gadolinio con un contenido del 8%, siendo el Uranio de 3,95% de enriquecimiento. Estos elementos tras dos ciclos de irradiación



Figura 1. Programa tkrecarga para el seguimiento y el análisis de distintos esquemas de recarga de combustible.

en posiciones calientes del núcleo representativas de una operación habitual, alcanzarán un quemado medio de 49.000 MWd/TmU y su reactividad residual los haría candidatos a ocupar su tercer y último ciclo en la periferia y descargarse con un quemado de 56.000 MWd/TmU.

Sin embargo, como parte de este Programa de Demostración, entrarán en su tercer ciclo de quemado en el interior del núcleo hasta alcanzar un quemado de unos 67.500 MWd/TmU, y pasarán luego a la periferia del núcleo en el cuarto ciclo de irradiación, hasta alcanzar los 73.000 MWd/TmU de quemado requeridos.

## SISTEMA SEANAP PARA SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE RECARGA

Para analizar los diferentes esquemas de recarga presentados en este trabajo se ha utilizado el sistema de códigos SEANAP (Sistema Español de Análisis de Núcleos de Agua a Presión). Este sistema ha sido utilizado y validado en todos los ciclos de operación de las Centrales de Ascó I-II y Vandellós II, por las ingenierías de núcleo de ambas centrales y con óptimo aprovechamiento.

Hasta hace algún tiempo la metodología matemática de optimización de la recarga del combustible que se utilizaba era la experiencia del ingeniero de diseño de recarga. Esta experiencia de gestión del combustible junto a un número de reglas heurísticas, permitían obtener esquemas de configuración más o menos optimizados.

La utilización de interfases gráficas para el seguimiento de distintos esquemas, mediante ensayos de prueba y error, agiliza la búsqueda del esquema de recarga óptimo en tiempos relativamente pequeños de computación (ver figura 1, programa tkrecarga).

Conceptualmente, la gestión del combustible se reduce a un problema de optimización, caracterizado por atributos matemáticos. Para 1/4 de núcleo de un reactor tipo PWR, se pueden considerar alrededor de  $10^{100}$  esquemas de recarga diferentes (función del número y disposición de elementos combustibles frescos, número de absorbentes consumibles, disposición en el reactor de elementos quemados en ciclos previos, ...).

La función objetivo a optimizar y las restricciones aplicadas son factores altamente no lineales de las variables de decisión. De ahí que la utilización de aproximaciones lineales o cuadráticas presenten deficiencias para resolver este tipo de problemas.

Actualmente, los nuevos desarrollos para resolver el problema de la optimización de la gestión del combustible emplean métodos estocásticos en lugar

de métodos deterministas. Algunos de los algoritmos más utilizados (Simulated Annealing, Genetic Algorithm, ...) fueron presentados en la reciente Conferencia Internacional MC&99.

## CONCLUSIONES

Los Programas de Alto Quemado que se están realizando permitirán en un futuro alcanzar quemados de descarga superiores a los admitidos actualmente de 60.000 MWd/TmU de quemado por barrita.

Para mejorar la gestión del combustible actual de ciclos de 18 meses de duración, bastaría con poder alcanzar un quemado de 65.000 Mwd/Tmu, o incluso menor. Esto es debido a que enseguida aparece la limitación por enriquecimiento, que según se ha visto sería difícil de superar.

En definitiva, ambas limitaciones (enriquecimiento y quemado de descarga) son restrictivas a la hora de minimizar el coste del combustible. Sin embargo, aumentar una de ellas (quemado de descarga) y no aumentar la otra (enriquecimiento), no es equilibrado desde el punto de vista de la gestión del combustible según se ha analizado en este artículo.

Para realizar este proceso de análisis de recargas de combustible se precisan herramientas de computación validadas a lo largo de los ciclos de operación de las centrales. Con el sistema de cálculo SEANAP se puede realizar un extenso estudio de posibilidades de recargas de alto quemado, y así determinar las estrategias de futuro.

• Carol AHNERT. Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Nuclear y del Instituto de Fusión Nuclear en la ETS Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid. Fue investigadora de la Junta de Energía Nuclear, hoy CIEMAT. Ha sido consultora de la OCDE/NEA Data Bank e investigadora principal de varios proyectos de investigación coordinados por la División de Reactores de Potencia de la OIEA(1980-93). Actualmente es subdirectora del Dpto. De Ingeniería Nuclear de la UPM.

• José M<sup>a</sup> ARAGONÉS. Catedrático del Departamento de Ingeniería Nuclear y del Instituto de Fusión Nuclear en la ETS Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Fue Jefe del Grupo de Cálculo y Teoría de Reactores de la Junta de Energía Nuclear, hoy CIEMAT (1974-75). Ha sido Director del Departamento de Ingeniería Nuclear de la U.P.M (1988-95). Director científico de proyectos de investigación internacionales coordinados por el OIEA(1981-92). Desde 1980 es consultor de la OCDE/NEA Data Bank y de la División de Reactores del OIEA. Desde 1990 es miembro del comité editor de la revista "Nuclear Engineering and Design" y del Nuclear Science Committee de la OCDE/NEA. Desde 1994 es miembro de la International Nuclear Academy.

• Óscar CABELLOS. Profesor Titular Interino del Departamento de Ingeniería Nuclear de la ETS Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Colabora desde 1993 en el grupo de Física de Reactores del Instituto de Fusión Nuclear de la U.P.M.

• Nuria GARCÍA-HERRANZ. Profesora Ayudante de Escuela Universitaria del Departamento de Ingeniería Energética de la UNED. Colabora desde 1996 en el grupo de Física de Reactores del Instituto de Fusión Nuclear de la U.P.M. En este año ha obtenido el grado de Doctora Ingeniera Industrial por la UPM.

• Agustín LABAY. Licenciado en Físicas por la Facultad de Zaragoza. Se incorporó a C.N. Ascó en 1976. Responsable de la Gestión Intranuclear de C.N. Ascó I-II desde 1987, y de Vandellós II desde 1998.