

EXPERIENCIAS DE DISEÑO DE COMBUSTIBLE Y DE NÚCLEO EN CN COFRENTES

L. GARCÍA - M. T. LÓPEZ

La liberalización del mercado eléctrico en España está incrementando la necesidad de acometer reducciones de costes e implementar innovaciones en la producción de energía eléctrica de origen nuclear. En el área del combustible esto puede conseguirse mejorando los diseños de combustible y de núcleo y creando competencia entre vendedores. IBERDROLA ha realizado un importante esfuerzo para introducir núcleos mixtos con combustibles de varios vendedores en CN Cofrentes, usando la metodología propia de diseño nuclear (metodología GIRALDA) para su diseño y licenciamiento. Los códigos usados en esta metodología son independientes de los propios de los vendedores, y, por tanto, permiten comparaciones independientes de diferentes tipos de elementos combustibles.

CN Cofrentes comenzó su operación comercial en 1984 con ciclos de 12 meses a potencia nominal. Tanto la potencia térmica como la longitud del ciclo se han incrementado desde entonces, y la central se encuentra actualmente operando el ciclo 13 al 104.2% de su potencia nominal. Está previsto un nuevo incremento hasta el 110% en el ciclo 14. La evolución en el diseño geométrico de los elementos combustibles junto con un programa de diversificación de vendedores ha dado origen a núcleos mixtos con elementos combustibles del mismo suministrador hasta el ciclo 11, y de diferentes suministradores en ciclos sucesivos.

Se revisa en este artículo la experiencia adquirida en el diseño nuclear. En particular, se desarrollan los siguientes apartados: mejor entendimiento del núcleo, cooperación con los vendedores de combustible, puesta al día de las versiones de códigos, márgenes de diseño, respuesta al fallo de combustible del ciclo 12, comparación del seguimiento del núcleo y el diseño y herramientas auxiliares basadas en códigos de diseño.

La aplicación de la metodología GIRALDA al diseño y licenciamiento de las recargas de combustible de Cofrentes está dando resultados satisfactorios. Por una parte, esta metodología está demostrando su capacidad para reproducir adecuadamente el comportamiento del núcleo en los ciclos 12 y 13. Por otra parte, la competencia entre suministradores de combustible ha llevado a una reducción de costes, la meta principal en un mercado liberalizado. GIRALDA representa un reto continuo para IBERDROLA y el eje principal de su gestión de combustible nuclear.

The electricity market deregulation in Spain is increasing the need for innovations and cost reductions in nuclear power production. In the fuel area this can be achieved by improving fuel and core designs and by introducing vendors competition. IBERDROLA has made significant efforts towards the introduction of mixed cores with fuel from different vendors at Cofrentes Nuclear Power Plant using the in-house nuclear design methodology (GIRALDA methodology) for design and licensing. The codes used in this methodology are independent from fuel vendors' codes, thus permitting independent comparison of different types of fuel bundles.

Commercial operation started in C.N.Cofrentes in 1984 with 12-month cycles at rated power. Both cycle length and thermal power have been increased, and the plant is currently operating cycle 13 at 104.2% power. There are plans to further uprate to 110% in cycle 14. The evolution in bundle geometrical design together with the vendors diversification

program has resulted in mixed cores with bundles from the same supplier up to cycle 11, and from different suppliers thereafter.

The experience acquired in nuclear design is reviewed in this paper. In particular, the following items are addressed: better core understanding, cooperation with fuel vendors; update of code versions; design margins; response to a fuel failure in cycle 12; comparison of core follow and design, auxiliary tools based on the design codes.

The application of the GIRALDA methodology to the design and licensing of Cofrentes fuel loadings is giving satisfactory results. On the one hand, this methodology is showing its capability to adequately reproduce the core performance in cycles 12 and 13. On the other hand, the competition between fuel suppliers has led to fuel costs reduction, a major goal in a deregulated market. GIRALDA represents a continuous challenge for IBERDROLA and the main axis of its nuclear fuel management.

INTRODUCCIÓN

La liberalización del mercado eléctrico en España está incrementando la necesidad de acometer reducciones de costes e implementar innovaciones en la producción de energía eléctrica de origen nuclear. En el área del combustible esto puede conseguirse mejorando los diseños de combustible y de núcleo y creando competencia entre vendedores. IBERDROLA ha realizado un importante esfuerzo para introducir núcleos mixtos con combustibles de varios vendedores en CN Cofrentes, usando la metodología propia de diseño nuclear (metodología GIRALDA) para su diseño y licenciamiento [Ref.1]. Los códigos usados en esta metodología son independientes de los propios de los vendedores, y, por tanto, permiten comparaciones independientes de diferentes tipos de elementos combustibles.

CN Cofrentes es un reactor BWR con un núcleo de 624 elementos combustibles, una potencia nominal de 2.894 MWt y que se encuentra actualmente operando el Ciclo 13 al 104.2% de la

potencia nominal. Su operación comercial comenzó en 1984 con ciclos de 12 meses a potencia nominal. La potencia térmica y la longitud de los ciclos se han incrementado desde entonces. La potencia se aumentó al 102% en el Ciclo 4 y posteriormente al 104.2% en el Ciclo 11. Está previsto un nuevo incremento hasta el 110% en el Ciclo 14. Por su parte, la longitud de los ciclos se incrementó a 18 meses en el Ciclo 7. CN Cofrentes ha operado siempre con extensiones de ciclo: FFWTR (reducción final de agua de alimentación) y bajada final de carga.

El diseño geométrico de los elementos combustibles ha evolucionado desde las configuraciones de 8x8 varillas en los primeros ciclos, a 9x9 en el Ciclo 8 y 10x10 en el Ciclo 12, cuyos diseños avanzados son más apropiados para las condiciones de operación cada vez más exigentes. Esta evolución ha dado origen a núcleos mixtos con elementos combustibles del mismo suministrador hasta el Ciclo 11 y de distintos suministradores a partir del Ciclo 12.

EXPERIENCIAS DE DISEÑO NUCLEAR

Con el desarrollo de la metodología GIRALDA -que ha sido aprobada por el Consejo de Seguridad Nuclear para el diseño y licenciamiento de recargas de Cofrentes- IBERDROLA ha adquirido la plena responsabilidad en las actividades de diseño, tanto de elemento combustible como de núcleo, y licenciamiento a partir del Ciclo 12. La conexión entre las actividades de licencia y las experiencias de operación genera sinergias que redundan en beneficios de conocimiento de la central y la seguridad. Asimismo, los objetivos y tareas del equipo de diseño se han ampliado y se ha adquirido un compromiso para garantizar la precisión en la modelización y cálculos del núcleo.

Para diseño de combustible y de núcleos, la metodología GIRALDA emplea los códigos CASMO/SIMULATE desarrollados por Studsvik/Scanpower.

La experiencia adquirida en el diseño nuclear se desarrolla en los siguientes apartados.

CALIDAD

Todos los cálculos siguen los procedimientos y guías de calidad, de acuerdo con los documentos de la metodología GIRALDA, comenzando por los de carácter general tales como el "Reference Safety Report" y siguiendo

por los procedimientos específicos de los propios cálculos. Estas prácticas de calidad son esenciales para evitar errores y contribuyen a proporcionar un alto nivel de confianza en los resultados.

Para cada recarga se establece un Plan de Calidad específico, que sigue el Plan de Calidad del Proyecto GIRALDA, que a su vez cumple con el Programa de Garantía de Calidad de Cofrentes. Éste se desarrolla en forma de guías dentro del Manual de Garantía de Calidad de Cofrentes.

Los procedimientos administrativos y de organización del Grupo de Combustible Nuclear (CONUC) de IBERDROLA se detallan en el Manual de Organización y Procedimientos. El Plan de Calidad de GIRALDA identifica las acciones específicas de CONUC para cumplir con aquellas tareas relacionadas con el desarrollo y licenciamiento de los métodos analíticos.

MANTENIMIENTO Y PUESTA AL DÍA DE CÓDIGOS

La mejora continua de los códigos por parte de las empresas propietarias pone a disposición de los usuarios nuevas versiones. Sin embargo, su utilización no es inmediata, ya que el usuario tiene que comunicar a la autoridad reguladora el empleo de estas nuevas versiones y se podría requerir un nuevo proceso de "benchmarking" si los cambios en los códigos fueran significativos.

IBERDROLA ha incorporado nuevas versiones de CASMO y SIMULATE en el año 2000, después de llevar a cabo un proceso de "benchmark" con análisis completos para evaluar el impacto de los cambios y seleccionar las mejores opciones de cálculo para Cofrentes. En este proceso se han incluido datos de los Ciclos 1 a 11 y principio del Ciclo 12.

Los parámetros utilizados en la evaluación han sido: k-efectiva a plena potencia, k-efectiva en reproducciones de criticidades en frío, desviaciones nodales, axiales y radiales de TIP, picos de potencia y "axial offset". Estos análisis se dividieron en varios pasos para aislar los efectos de los cambios debidos únicamente a:

- Versión de SIMULATE.
- Código CASMO (CASMO-3 vs. CASMO-4) y librerías de secciones eficaces estándar.
- Datos de temperatura de combustible (del código INTERPIN).
- Uso de código de enlace (CMSLink) y opciones S3C de CASMO.
- Librerías de secciones eficaces (E4L, JEF-2.2).

Adicionalmente se realizaron comparaciones integrales a partir del paso d) para evaluar los efectos conjuntos de los pasos previos.

Como resultado se estableció el modelo a utilizar que incluye INTERPIN, CASMO-4, CMSLink y SIMULATE-3 (versión 6).

El "benchmarking" y su aplicación se realizó durante el proceso de diseño del Ciclo 13. Los diseños de los elementos combustibles se realizaron con los modelos y versiones antiguas de los códigos mientras que para diseño del núcleo se utilizaron los nuevos. Algunos mapas preliminares fueron evaluados con ambos métodos para estimar las diferencias.

Finalmente, es importante indicar que, independientemente de los cambios en las versiones de códigos, una actualización del "benchmark" ha de enviarse a la autoridad reguladora cada tres ciclos.

CONOCIMIENTO DEL NÚCLEO

La responsabilidad en la realización de los diseños permite al equipo de trabajo comprender mejor el comportamiento de los elementos combustibles y del núcleo junto con el acoplamiento neutrónico, termohidráulico y estabilidad. Este conocimiento ha demostrado su utilidad, por ejemplo, cuando se detectó la presencia de un elemento que fugaba durante la operación el Ciclo 12. Con objeto de apantallar la zona alrededor del elemento afectado, se insertaron completamente tres barras de control en maniobras sucesivas, y el reactor pudo continuar la operación durante ocho meses sin necesidad de realizar una parada para su sustitución. Sin embargo, la operación a plena potencia del Ciclo 12 se acortó en casi 400 MWd/ST debido a la reactividad negativa insertada por las barras de control. Este proceso tuvo un impacto importante en el diseño del Ciclo 13.

En primer lugar, cada maniobra requería una nueva estimación de las distribuciones de potencia y quemado usando las condiciones más actualizadas del Ciclo 12, y hubo que ajustar en consecuencia el mapa del Ciclo 13. Los resultados se proporcionaron a tiempo para preparar los análisis de transitorios y accidentes requeridos para el licenciamiento de la recarga.

Adicionalmente, la simetría especular en cuarto de núcleo que se mantiene habitualmente en Cofrentes se vio fuertemente afectada. La inserción de tres barras de control produjo asimetrías en quemado entre elementos simétricos de hasta 4.000 MWd/ST al final

del Ciclo 12. Estas diferencias se trasladan a ciclos posteriores y tienen que ser tratadas hasta que los elementos afectados se descarguen del núcleo.

Finalmente, siguiendo las recomendaciones de los suministradores de combustible, los elementos de la zona sombreada se colocaron en el núcleo del Ciclo 13 en zonas de baja potencia y cercanos a un TIP. Ésta es una buena práctica para minimizar el efecto del Pu producido en los elementos que operaron con un espectro más duro. Sin embargo, también conlleva una pérdida de energía debido a una carga del núcleo menos efectiva.

SEGUIMIENTO Y DISEÑO DEL NÚCLEO

Los resultados de seguimiento del núcleo se comparan con el comportamiento previsto por el diseño, y los valores reales se incorporan a la estadística para actualizar el autovalor de referencia y los márgenes de diseño de límites térmicos y margen de parada. Al igual que en el proceso de "benchmark", los parámetros de interés son: k-efectiva a plena potencia, k-efectiva de criticidades en frío, desviaciones nodales, axiales y radiales de TIP, picos de potencia y "axial offset".

Las predicciones se están aproximando mucho a los valores reales. Por ejemplo, la diferencia entre la criticidad real y la prevista para el arranque del Ciclo 13 fue de 0.035% Δ K/K. Además, el proceso independiente de seguimiento del núcleo ha ayudado a confirmar el comportamiento inadecuado de una máquina de TIP en un caso particular.

DISEÑO DEL CICLO 14: AUMENTO DE POTENCIA

Está previsto incrementar la potencia térmica de la central hasta un 110% de la potencia nominal al principio del Ciclo 14, en el primer trimestre de 2002. La viabilidad técnica ha sido demostrada con estudios para ciclos de equilibrio a esa nueva potencia. Ahora bien, una vez aumentada la potencia, hay una etapa de transición que cubre varios ciclos hasta alcanzar el equilibrio. Los ciclos de transición son diferentes a los ciclos de equilibrio debido principalmente a la menor reactividad de los elementos quemados que permanecen en el núcleo. Como resultado, la carga de elementos combustibles frescos en el Ciclo 14 tiene que ser mayor que la estimada en un ciclo de

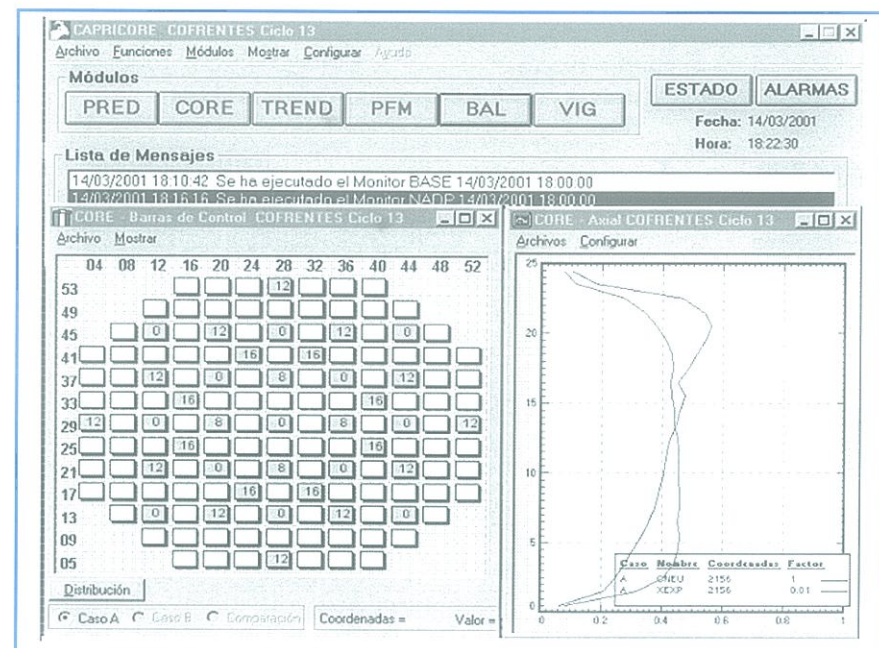


Figura 1. CAPRICORE: ventana principal, mapa de barras de control y perfil axial

equilibrio para alcanzar la misma energía. Para comprobar lo adecuado de los diseños de combustible y de núcleo para el Ciclo 14, ha sido necesario analizar el comportamiento esperado en los Ciclos 15 y 16.

Las características particulares del diseño del Ciclo 14 son:

- Contenidos de Gadolinio y enriquecimientos más altos que en otros ciclos.
- Reactividad más alta de los elementos combustibles frescos después del quemado de Gadolinio.
- Condiciones de operación más exigentes.

El diseño de los elementos combustibles del Ciclo 14 se ha fijado en el primer trimestre de 2001. El enriquecimiento medio para los elementos combustibles frescos es similar al estimado para los ciclos de equilibrio. El tamaño de la recarga se ha fijado en 196 elementos, mientras que en el ciclo de equilibrio se utilizaban 188 elementos [Ref. 2]. Actualmente se está trabajando en el diseño del núcleo.

Las lecciones aprendidas de otros aumentos de potencia son aplicables como información complementaria en el proceso de diseño [Ref. 3].

COOPERACIÓN CON LOS SUMINISTRADORES DE COMBUSTIBLE

Para propósitos de licencia, IBERDROLA tiene que intercambiar datos

con los vendedores de combustible y manejar su información confidencial.

En el diseño del elemento se mantiene una estrecha cooperación con los suministradores de combustible por varias razones, tales como el cálculo de R-factors. Sin embargo, IBERDROLA confirma la aceptabilidad del diseño final del elemento y tiene plena responsabilidad de su diseño nuclear.

También hay interacción en los diseños mecánicos de varilla y de elemento, ya que los diferentes suministradores son responsables con sus bases y su metodología.

OFERTAS DE COMBUSTIBLE

El primer paso hacia la diversificación de suministradores fue el establecimiento de un programa de elementos de demostración (LFA) en el Ciclo 9, con elementos de dos suministradores distintos. Las capacidades para reproducir diseños de combustible con un método independiente se usaron para el proceso de evaluación de ofertas de las recargas 11 y 13 con los dos suministradores participantes en el programa de LFA. Los análisis técnicos y económicos llevaron a incluir combustible de los dos suministradores en la misma recarga. De esta forma, la recarga 11 tenía combustible fresco de un solo suministrador y las recargas 12 y 13 se adjudicaron parcialmente a cada uno de los suministradores, con fracciones respectivas de 2/3-1/3 y 1/3-2/3 de combustible fresco.

Actualmente está en marcha una

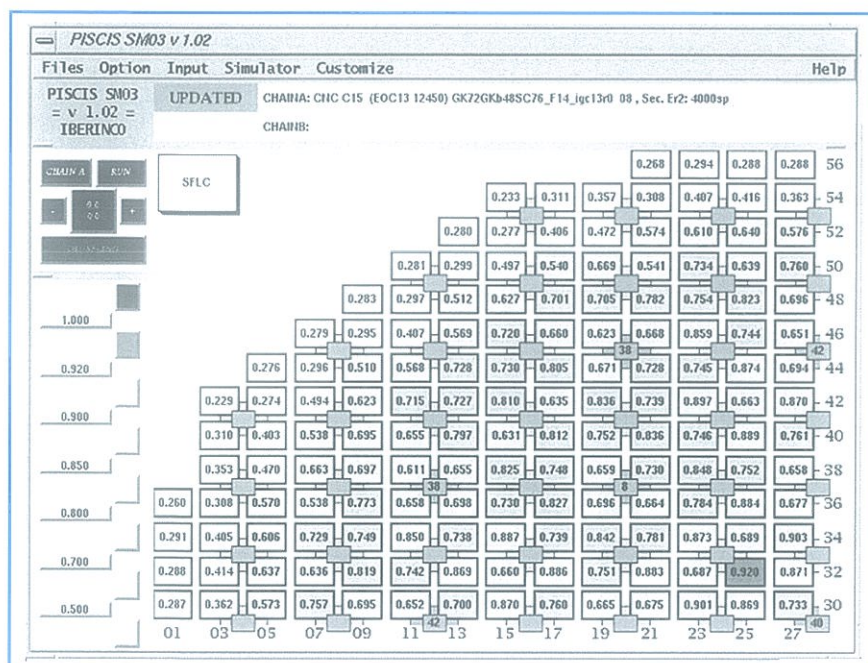


Figura 2. PISCIS: Ejemplo de distribución en cuarto de núcleo.

nueva evaluación de ofertas para las recargas 14 a 16 (años 2002-2006).

OTRAS HERRAMIENTAS

IBERDROLA ha desarrollado algunas herramientas basadas en SIMULATE que sirven de apoyo al diseño nuclear.

CAPRICORE es un sistema de monitorización del núcleo on-line que se instaló en CN Cofrentes en 1997 y que funciona en paralelo con el sistema de monitorización oficial [Ref. 4]. CAPRICORE toma datos de la planta y genera información de estados pasados y actuales. Asimismo, tiene capacidad de predicción para estimar condiciones futuras, que lo hacen muy útil para apoyar maniobras operacionales. Este sistema mejora la capacidad para vigilar el cumplimiento con las Especificaciones Técnicas, para controlar oscilaciones de Xenon y para comparar predicciones del núcleo con medidas de detectores. Finalmente, CAPRICORE es un sistema amigable para el usuario con una interfaz gráfica e interactiva, como puede verse en la Figura 1.

EVACOM es un sistema que ejecuta automáticamente análisis de multiciclos y cálculos económicos. En relación con el diseño nuclear, EVACOM se utiliza para el estudio de ciclos de equilibrio, para determinar el tamaño de la recarga de elementos frescos, o para evaluar el comportamiento de ciclos futuros.

PISCIS es una interfaz gráfica para procesar resultados de núcleos, cuyo

formato puede verse en la Figura 2. Es de gran utilidad para analizar distribuciones radiales y axiales, para comparar el comportamiento de mapas de núcleo, para ajustar secuencias de barras de control, etc. De hecho, es una herramienta necesaria para el diseño nuclear.

RESUMEN

La aplicación de la metodología GIRALDA al diseño y licenciamiento de las recargas de combustible de

Cofrentes está dando resultados satisfactorios y está demostrando su capacidad para reproducir adecuadamente el comportamiento del núcleo. GIRALDA representa un reto continuo para IBERDROLA y el eje principal de su gestión de combustible nuclear. El equipo de diseño nuclear está adquiriendo una experiencia inestimable para entender el comportamiento del núcleo, la cual es muy útil para responder a sucesos operacionales o emprender nuevas tareas tales como el aumento de potencia. En el presente artículo se han revisado otros trabajos de interés tales como el proceso de benchmarking para actualizar las versiones de códigos, las comparaciones de los valores previstos y reales del comportamiento del núcleo y el desarrollo de herramientas auxiliares al diseño.

REFERENCIAS

- [1] D. Molina. "Editorial: The utility manager's view of fuel advances", Nuclear Europe Worldscan, May-June 2000.
- [2] M. I. Gómez Bernal et al. "C.N.Cofrentes power uprate up to 110%. A challenge for cycle 14 core design". ICONE-9, Nice-France, 8-12 April 2001.
- [3] D. Molina, et al. "Power Uprate. Impact on the Fuel", 24th SNS Annual Meeting (Valladolid, 1998).
- [4] M. Albendea, A. Crespo. "Capricore, a new on-line core monitoring system" PHYSOR 2000, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 7-12. 2000.



Luis GARCÍA DELGADO es ingeniero industrial, especialidad Técnicas Energéticas, por la Universidad Politécnica de Madrid, e ingeniero nuclear por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Desde 1998 trabaja en el Departamento de Combustible Nuclear de Iberdrola Generación, encuadrado en el grupo de análisis neutrónico. Su trabajo se centra en el diseño de las recargas y apoyo a la operación de la Central Nuclear de Cofrentes.



María Teresa LÓPEZ CARBONELL es licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid y diplomada en Ingeniería Nuclear por la JEN. Comenzó su carrera profesional en Iberdrola (antigua Hidroeléctrica Española) en 1973 incorporándose al Proyecto de CN Cofrentes. Perteneció al Grupo de Combustible Nuclear de Iberdrola desde su creación.