

A LA BÚSQUEDA DEL QUEMADO IDEAL

D. MOLINA

El artículo presenta un método para determinar, en un primer paso, la longitud óptima del ciclo de operación y, en un paso posterior, el quemado de descarga del combustible que resulta mas adecuado para dicho ciclo. Como los resultados prácticos (que se presentan para el caso de C.N. Cofrentes) indican un importante potencial de mejora ligado al aumento del quemado, se describen en el artículo las bases, objetivos y expectativas del programa de investigación y desarrollo de "Combustible Robusto" que ha sido diseñado a escala internacional para facilitar, entre otras cosas, el licenciamiento de combustibles de alto quemado.

IBERDROLA ha desarrollado un modelo analítico de funcionamiento económico del ciclo basado en la separación de costes por grandes conceptos, y dentro de cada uno de ellos por fijos y variables. En los grandes conceptos figuran los costes de operación, recarga y combustible. Por su parte, los fijos son aquellos que son independientes de la producción, mientras que los variables son proporcionales a ella. Por las propias incertidumbres del modelo, se puede decir que el óptimo matemático del caso de referencia sitúa entre 21 y 22 meses la longitud óptima del ciclo de equilibrio de C.N. Cofrentes.

Conocida la energía producible en el ciclo y el tamaño del lote de recarga, se puede determinar el enriquecimiento medio necesario mediante el uso de un simulador nodal tridimensional. Para estos fines, IBERDROLA ha desarrollado un sistema denominado EVACOM capaz de realizar análisis muy detallados de un esquema de multiciclos desde una situación real hasta el equilibrio, con modelos acoplados neutrónicos, termohidráulicos y económicos con los que se han cuantificado las ventajas asociadas a tres etapas de mejora del quemado en las que se hace uso de los márgenes existentes de quemados de varilla, de enriquecimiento límite, o de prestación mecánica del combustible.

Para facilitar la resolución técnica de cualquier aspecto ligado al diseño y uso de combustibles de alto quemado se puso en marcha el "Robust Fuel Program" (RFP) como una iniciativa de las Empresas Eléctricas norteamericanas (al que se ha incorporado UNESA) en su deseo de incrementar la fiabilidad del combustible, aumentar sus márgenes operativos y obtener con ello un mejor rendimiento económico de la operación de sus centrales.

This paper shows a two steps method able to establish optimum operating cycle length and associated fuel batches discharge burnup. Application results (performed for Cofrentes NPP) indicate a potential improvement linked to burnup increases. An international research effort called "Robust Fuel Program" has been launched to facilitate, among other issues, high burnup licensing. This paper summarizes bases, objectives and expectations for such a program.

IBERDROLA has developed a method to analyse economical cycle performance by using relevant concepts within a fix and variable cost model. Relevant concepts means power operation, refueling and fuel. In the other hand, fix costs are independent of production while variable costs are proportional to it. Taking into account model uncertainties, it can be established that reference case (Cofrentes NPP) optimum is obtained for equilibrium cycle lengths between 21 and 22 months.

Once cycle energy and reload batch fraction are established, average enrichment can also be known by using a 3D nodal simulator. For such applications, IBERDROLA has already

developed a system called "EVACOM" able to perform very detailed fuel cycle scoping calculations covering from current conditions to equilibrium. By means of neutronic, thermohydraulic and economic coupling models some advantages of burnup increases have been analysed in a three steps schedule: available pin burnup margin, available enrichment limit and mechanical performance limit.

"Robust Fuel Program" (RFP) was launched to facilitate technical resolution of any issue linked to design and licensing of advanced fuel, particularly high burnup fuel. Initiative for such development was taken by US electrical utilities (with the participation of UNESA) looking to a target of increasing fuel reliability and operating margins to obtain power operation enhanced economical results.

INTRODUCCIÓN

En un sistema de mercado desregulado, los productores de energía nuclear deben buscar su posicionamiento y continuidad a largo plazo mediante la obtención del mejor rendimiento técnico y económico alcanzable en sus instalaciones, que además, deben presen-

tar de forma sostenida un comportamiento fiable y seguro, dentro de los límites impuestos por los requisitos y bases de licenciamiento.

En éste nuevo entorno el margen de explotación se optimiza desde los ámbitos de la operación, el mantenimiento, la gestión del combustible y las mejoras de diseño, combinando tecnología y rendimiento.

No se trata, por tanto, de alcanzar altos quemados siguiendo una moda internacional, sino que se trata de diseñar un ámbito de funcionamiento del reactor en términos de longitud de ciclo, fracción de recarga, potencia y disponibilidad, que conduzca al óptimo económico compatible con el estado del arte de la tecnología.

A lo largo del artículo desarrollaremos estos conceptos con ámbito genérico, pero aportando datos particulares que hagan mas concretos y realistas los procesos seguidos hasta el momento por IBERDROLA a la búsqueda del quemado ideal.

LONGITUD ÓPTIMA DEL CICLO

La mayoría de los reactores españoles comenzaron su operación en ciclos anuales. En la década de los 90 se produjo una transición bastante generalizada hacia ciclos mas largos,



C. N. Cofrentes.

encontrándose en la actualidad operando en ciclos con contenidos energéticos nominales del orden de los 500 Días Efectivos a Plena Potencia, representativos de los ciclos de 18 meses. Se mantienen, no obstante, algunas excepciones correspondientes a reactores que, por limitaciones técnicas o razones económicas propias, se mantienen en un ciclo anual o que incluso llegan al ciclo de 24 meses.

Los factores que en su día aconsejaron el ir a ciclos más largos fueron el aumento de la generación de energía por la reducción del número de paradas de recarga y una reducción de costes imputables a la realización de las paradas para recarga, teniendo como contrapartida un incremento en los costes de combustible, en razón del mayor coste de compra por incremento del enriquecimiento y de la menor eficacia de su quemado. En la mayoría de los casos, las mejoras en producción y gastos compensaban con creces el mayor coste de combustible.

Con la nueva regulación eléctrica y con la experiencia adquirida operando con ciclos de 18 meses IBERDROLA ha desarrollado un modelo analítico para determinar cual sería al día de hoy la duración óptima del ciclo de combustible. En el nuevo escenario ya no se retribuye directamente el coste de combustible y el óptimo de funcionamiento pasará por obtener el máximo margen de explotación, el cual dependerá de la retribución del mercado, deduciéndose de la misma los costes de explotación y de combustible.

El modelo establece todas las fronteras que suponen limitaciones mínimas y máximas a la duración del ciclo desde planteamientos puramente técnicos y, a continuación, dentro del espacio

producción se ha recurrido a la separación de costes por grandes conceptos, y dentro de cada uno de ellos por fijos y variables. En los grandes conceptos figuran los costes de operación, recarga y combustible. Por su parte, los fijos son aquellos que son independientes de la producción, mientras que los variables son proporcionales a ella.

Para evitar la subjetividad inherente a este tipo de modelos se ha procurado, en la medida de lo posible, evitar datos teóricos o procedentes de experiencias ajenas y confiar más en datos propios resultantes de la historia de operación de la central.

Existen unos costes de operación y mantenimiento que son prácticamente independientes de la producción. Se puede establecer una correlación lineal de forma que tenga un término constante y una parte linealmente dependiente de la duración en días del ciclo. Existen unos costes de recarga que siguen una correlación similar, es decir, un término constante e independiente de la duración de la recarga y otro término que es linealmente dependiente de la duración de la recarga en días.

El modelo de costes de combustible sigue la misma aproximación del resto de costes, es decir, se descompone en una parte fija y una variable. El núcleo se visualiza como un fondo de energía al que cada año se le añade una recarga con la que se aumenta la reactividad y que se consume íntegramente durante el ciclo. La situación que se alcanza al final del ciclo es tal que la reactividad vuelve al valor de fondo inicial.

Este modelo es el habitual para los ciclos de equilibrio en los que toda la energía del ciclo se puede considerar que la produce la última recarga mien-

técnicamente viable que se haya determinado, se define la función económica a maximizar y, consecuentemente, el punto óptimo de funcionamiento. En el caso de que no coincidiera el ciclo óptimo con el actual, el modelo permite diseñar una estrategia de transición de uno a otro, evaluando también su impacto económico.

Para elaborar el modelo de funcionamiento económico del sistema de

tras que el resto del núcleo es un fondo de reactividad que se traslada en idénticas condiciones de un ciclo a otro.

Nuestro modelo económico de costes de la primera parte del ciclo de combustible nuclear supone que el valor de la última recarga debe amortizarse con la producción del propio ciclo y constituye la parte variable del coste. Adicionalmente, el valor del resto del núcleo (que en el modelo no se quema sino que se traslada intacto de un ciclo a otro), constituye un inmovilizado permanente cuyo coste financiero y la dotación para la amortización final constituyen la parte fija del coste del combustible.

Dado que la recarga de combustible se abona con un calendario de pagos que tiene su centro de gravedad seis meses antes del comienzo del ciclo (BOC), el valor total de la recarga a BOC se obtendrá sumando a su valor real un coste financiero de 6 meses a una tasa de interés determinada. El valor del núcleo residual se obtiene descontando del valor total del núcleo el de la recarga.

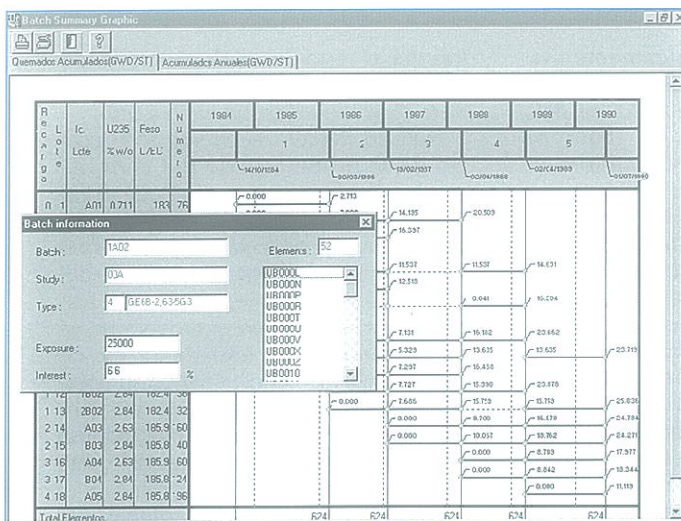
Los resultados obtenidos para un primer caso de referencia, que está constituido por la mejor estimación de la situación real de C.N. Cofrentes, indican que el margen máximo diario está asociado a un ciclo de equilibrio de 21,5 meses, con una pendiente muy ligera en su entorno inmediato. Por las propias incertidumbres del modelo, se puede decir que el óptimo matemático del caso de referencia sitúa entre 21 y 22 meses la longitud óptima del ciclo de equilibrio de C.N. Cofrentes, pero el coste de la transición y la indisponibilidad de combustibles suficientemente avanzados hacen inviable la extensión del ciclo de 18 meses vigente.

Numerosos análisis de sensibilidad realizados sobre los parámetros que caracterizan el modelo indican que las conclusiones sólo pueden verse afectadas, en lo que a la longitud óptima se refiere, por la duración relativa de las paradas de recarga respecto de los días de operación del ciclo.

QUEMADO OPTIMO DE DESCARGA DEL COMBUSTIBLE

Una vez definida la longitud del ciclo, se debe resolver la siguiente etapa del proceso de optimización que consiste en determinar la fracción de recarga y el enriquecimiento medio, lo que unívocamente lleva a un quemado de descarga objetivo.

Operativamente, no resulta viable recargar pocos elementos de forma muy frecuente porque se reduciría de forma



EVACOM: Gráfico resumen de lotes.

inaceptable la disponibilidad del reactor. En el otro extremo, tampoco resulta aceptable recargar el núcleo casi completo porque descargaríamos elementos de media reactividad o bien tendríamos que aprovecharlos en operaciones muy prolongadas de "Coastdown" que, de nuevo, supondrían un fuerte deterioro de la disponibilidad. La fracción de recarga admite un rango de valores aceptables que pueden oscilar entre 1/4 del núcleo para los ciclos cortos y casi 1/2 para los muy largos. Refiriéndonos a ciclos de 18 meses situaremos el rango de aceptación de la fracción de recarga en el entorno de 1/3.

Conocida la energía producible en el ciclo y el tamaño del lote de recarga, se puede determinar el enriquecimiento medio necesario mediante el uso de un simulador nodal tridimensional. Existen métodos mas simplificados para estimar el enriquecimiento, pero el uso directo del simulador permite obtener simultáneamente información valiosa sobre la viabilidad del ciclo propuesto. Para estos fines, IBERDROLA ha desarrollado un sistema denominado EVACOM capaz de realizar análisis muy detallados de un esquema de multiciclos desde una situación real hasta el equilibrio, con modelos acoplados neutrónicos, termohidráulicos y económicos. Algunas de sus "pantallas" de comunicación con el usuario se han utilizado para ilustrar este artículo.

Recientemente el EPRI circuló una encuesta para determinar el interés de las empresas eléctricas explotadoras de reactores nucleares en el alto quemado. Dividía su encuesta en tres etapas en orden creciente de dificultad de consecución, a saber, agotamiento de los márgenes existentes, incremento del quemado licenciado sin superar los

límites de enriquecimiento, y, finalmente, incremento del enriquecimiento hasta un cierto quemado alto objetivo. Mediante análisis paramétricos realizados con EVA-COM se han determinado, de nuevo para el caso específico de C.N. Cofrentes, las ventajas asociadas a cada una de dichas etapas:

a) Agotamiento del margen existente respecto de los valores de quemado de varilla licenciados en la actualidad: Consiste en un aumento del enriquecimiento hasta conseguir que el quemado pico medio de varilla sea de 62 MWd/KgU. Esta hipótesis conduce a un enriquecimiento medio del lote ligeramente superior al 4 w/o y un quemado de descarga de 52 MWd/KgU. En las condiciones actuales de precios de concentrados, conversión, enriquecimiento y fabricación el coste de la primera parte del ciclo del combustible se reduciría en un 4%.

b) Agotamiento del margen existente respecto de los valores de enriquecimiento licenciados en la actualidad: Consiste en un aumento del enriquecimiento de todas las varillas posibles hasta el 5 w/o. Por razones de limitación de picos locales (por tratarse de un reactor BWR), esta hipótesis conduce a un enriquecimiento medio del lote en el entorno del 4,20 w/o y a un quemado de descarga de lote de 55 MWd/KgU. Se requeriría una extensión de la licencia actual para los quemados de varilla ya que se superarían los 62 MWd/KgU llegándose a 65 MWd/KgU. En las condiciones actuales de mercado el coste de la primera parte del ciclo del combustible se reduciría, respecto de la etapa anterior, en un 1%.

c) Consecución de un objetivo de alto quemado de 70 MWd/KgU pico medio de varilla: Este

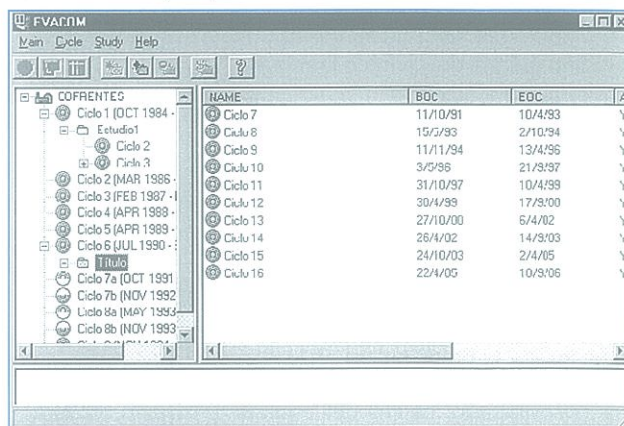
caso requeriría elevar no sólo la licencia de los quemados de varilla sino también los enriquecimientos límites por encima del 5 w/o (concretamente hasta el 5,3-5,4 w/o) para todas las instalaciones involucradas (fabricación, transporte, ...). Las dificultades, por tanto, son altas. La ventaja es que el coste de la primera parte del ciclo del combustible se reduciría, respecto de la etapa anterior en otro 2%.

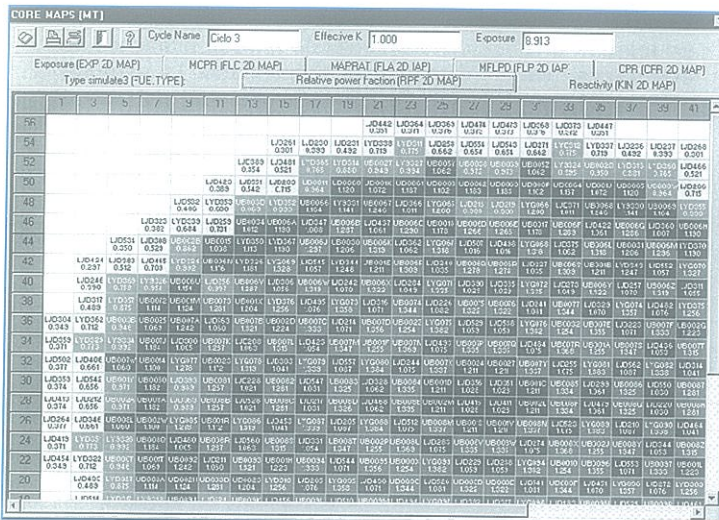
La conclusión evidente de lo anterior es que el incremento del quemado de descarga debe realizarse por etapas y analizarse cada objetivo en términos de coste-beneficio (técnico y económico) como cualquier inversión importante.

Hasta ahora no se han mencionado las limitaciones técnicas asociadas, que vienen dadas por las propias prestaciones del material de las vainas, la reactividad del combustible y del núcleo, el comportamiento térmico de las pastillas, el comportamiento operativo de las varillas, las limitaciones asociadas a los accidentes de inserción de reactividad, la interacción pastilla-vaina, el margen de parada, y numerosos aspectos (traducidos a criterios limitativos) de criticidad, transporte, métodos analíticos, diseño mecánico, fiabilidad del combustible, inventario de actividad, etc. Estos aspectos se consideran como parte del esfuerzo internacional que describiremos en el último apartado del artículo.

Un efecto que no hemos desarrollado adecuadamente, y que sí que presenta un saldo neto siempre positivo a favor del aumento del quemado es el coste de la segunda parte del ciclo del combustible nuclear. En efecto, a mayor coste de gestión de los elementos combustibles gastados mayor incentivo para reducir su número y, consecuentemente, mayor tendencia a incrementar los quemados de descarga. Es por

EVACOM: Pantalla principal.





EVACOM: Gráfico de mapa del núcleo.

ello que resulta frecuente observar tendencias nacionales en los quemados de descarga que van mas allá de estrategias individuales de reactores o empresas y que están fundamentalmente dirigidas a minimizar los costes de la segunda parte del ciclo.

El ritmo al que se cubran las etapas citadas puede, por tanto, acelerarse o dilatarse en el tiempo en función del tratamiento de los costes de la segunda parte del ciclo, de la evolución de precios del mercado y de las prestaciones que nuevos materiales o diseños puedan ofrecer de manera fiable y comercialmente demostrada.

Los objetivos mas ambiciosos de alto quemado descritos suponen la adopción de estrategias de operación avanzadas, a saber, núcleos diseñados con el criterio de bajas fugas radiales, potencias relativas mayores, incremento en los quemados de descarga y en la longitud de los ciclos, así como un entorno químico cada vez más complejo. Todo ello entraña una serie de retos que si no se resuelven sólidamente podrían obstaculizar esa pretendida optimización económica, al menos en el actual marco tecnológico y regulador.

"ROBUST FUEL PROGRAM"

El "Robust Fuel Program" (RFP) se generó a partir de una iniciativa de las Empresas Eléctricas norteamericanas en su deseo de incrementar la fiabilidad del combustible, aumentar sus márgenes operativos y obtener con ello un mejor rendimiento económico de la operación de sus centrales. Estos objetivos que, en lo que atañe a la seguridad eran además plenamente compar-

tidos por el Organismo Regulador estadounidense, aconsejaron encomendar a EPRI la definición y gestión de un programa de amplio alcance orientado a conseguir estos efectos.

Los paralelismos existentes entre la situación de los reactores españoles y la de las centrales americanas han conducido, a los citadas en primer lugar a adoptar también, desde finales del 98, la decisión de participar asimismo en el Programa.

La justificación de la puesta en marcha de RFP puede traducirse en el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Resolución de aquellos aspectos que pudieran cuestionar, con los diseños que en la actualidad se utilizan, una operación plenamente adecuada del combustible.
- Profundización en el conocimiento de todos los fenómenos que tienen relación con la operación del combustible en condiciones de alta sollicitación, de modo que puedan establecerse, con precisión, los márgenes reales de que se dispone y evitar, como inmediata consecuencia, la imposición de restricciones operativas innecesarias.
- Adquisición del bagaje tecnológico necesario que permita justificar la aceptación de las innovaciones que se introduzcan en el diseño de los nuevos tipos de elementos combustibles y sostener documentadamente que, satisfaciendo ciertos requisitos, puede extenderse el quemado de descarga más allá de aquellos valores que ahora son aceptados por la Autoridad Reguladora. La definición de esos requisitos es, en cierto modo, el objetivo que sintetiza las aspiraciones del programa.

En el programa RFP se considera que la mejora integral de las prestaciones del combustible nuclear es un objetivo estratégico de las compañías eléctricas explotadoras de centrales nucleares, objetivo que se trasladará, en su mo-

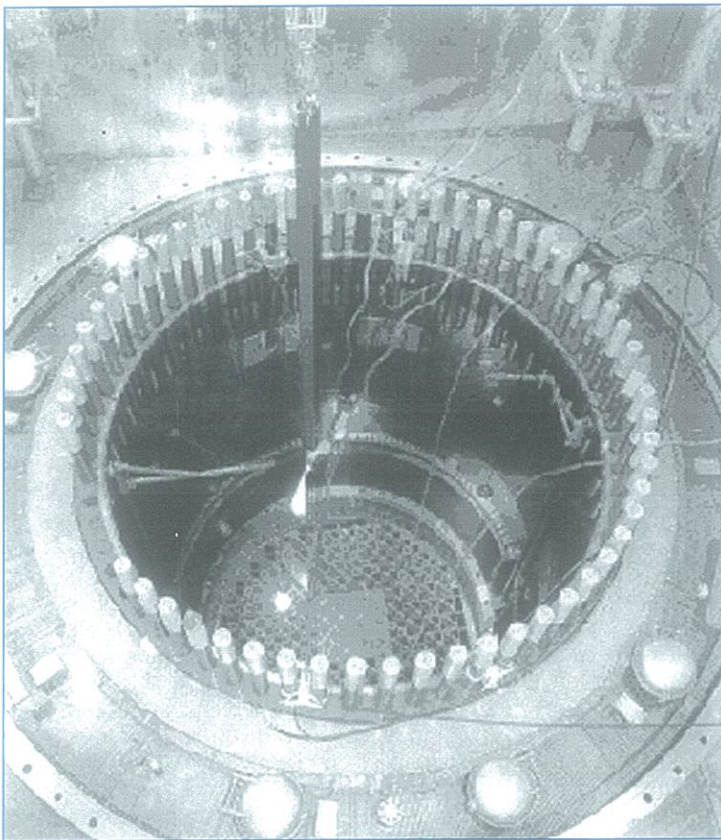
mento, al suministrador de combustible como un criterio de diseño y fabricación, por lo que este tipo de proyecto debe ser liderado por los propietarios de los reactores, articulando los mecanismos oportunos de integración de los suministradores y estableciendo las conexiones adecuadas que garanticen el proceso de licenciamiento por parte del Organismo Regulador.

El programa RFP, aún cuando sus miembros son empresas eléctricas (mayoritariamente americanas), y no debe olvidarse que los mayores interesados en que ese Programa arribe a buen puerto son precisamente esas empresas, se plantea así como un esfuerzo conjunto de fabricantes y responsables de la operación de las centrales, con el soporte añadido de centros de investigación que lleven a efecto los ensayos que se requieran. Organizaciones externas al Programa, como INPO y NEI participan también activamente en el mismo, sirviendo esta última de nexo con la NRC. La intervención de EPRI como asesor en otros programas internacionales en curso, como NFIR, HALDEN o CABRI, asegura que se dispondrá de una posibilidad de contraste o alimentación externa de datos que pueden ser analizados por RFP.

Las Empresas Eléctricas españolas han asumido la totalidad de los objetivos de RFP. Más aún, participar supone conseguir, simultáneamente a su generación, una completa información que permita plantear, en el ámbito de la industria nuclear española, un esquema de interrelación parejo en todos los sentidos al del modelo americano, como fórmula más idónea para aprovechar y obtener beneficio de esa participación en el Programa.

Técnicamente, pueden aventurarse diversas teorías sobre la aparición de nuevas problemáticas relacionadas con el comportamiento del combustible en el preciso momento en que las mejoras introducidas en los combustibles actuales habían permitido ya resolver aspectos como las siguientes: fallos debidos a partículas metálicas arrastradas por el refrigerante, formación de hidruros que fragilizan la vaina, problemas hidrodinámicos entre la vasija y el barrilete o la interacción de vaina y pastilla, por citar los más conocidos.

La explicación más plausible apunta a que las nuevas condiciones de operación, más exigentes que las anteriores, conforman un escenario aún no suficientemente conocido. De hecho los programas de inspección más exhaustivos parecen evidenciar que buena parte de los conflictos surgidos obedecen a una no completa



Núcleo de C.N. Cofrentes

aplicabilidad de los actuales modelos predictivos del comportamiento termomecánico y estructural del combustible.

Se dispone ya de algunos elementos susceptibles de mejora plenamente identificados: el diseño mecánico, incluyendo los materiales utilizados y la química del refrigerante, como condición de entorno susceptible de favorecer ciertos problemas. Los fabricantes continúan trabajando en la búsqueda de soluciones, pero todavía sin el contraste teórico y experimental adecuados que avalen lo correcto de sus líneas de investigación.

Existe además cierta inquietud, especialmente entre los Organismos Reguladores, acerca de la validez de los límites contemplados en los Análisis de Accidentes para el rango de quemados de descarga que hoy se ha convertido ya en estándar. Su posición es la de requerir ensayos que aporten información sobre el comportamiento del combustible en condiciones de accidentes de inserción de reactividad (RIA) y de pérdida de refrigerante (LOCA). Frente a ésta, la posición de la industria debe de ser la de asegurar que tales ensayos se ciñan a condiciones realistas de operación.

Para atender todos estos requisitos,

las vainas o efectos de la inyección de aditivos en el refrigerante.

- Grupo de Transitorios, que se ocupa de conseguir la aceptación de las Bases de Diseño para transitorios, considerando nuevos diseños y la extensión del quemado. Participará en la gestión de los ensayos RIA de CABRI, con el alcance que convenga y contrastará los tests LOCA de la NRC en el Argonne National Laboratory.

- Grupo de Alto Quemado, que se centra en la caracterización del comportamiento del combustible en esas condiciones, desarrollando en primera instancia los requisitos que deba cumplir en tal entorno y demostrando que se dispone de los márgenes apropiados para una operación libre de problemas.

- Grupo de Fallos, cuyo cometido es el de investigar las causas y mecanismos de los fallos en el combustible, con objeto de establecer qué condiciones tiene que cumplir el diseño para prevenirlos o mitigar su efecto.

En síntesis, se puede concluir que la participación activa en RFP, liderada por las empresas eléctricas propietarias de reactores nucleares, está plenamente justificada en el contexto de resolu-

ción de los problemas actuales y de licenciamiento de nuevos márgenes de diseño para el quemado. La explotación de resultados del RFP potenciará los niveles de calidad, fiabilidad, seguridad y economía de la operación del combustible nuclear en las centrales nucleares españolas, con beneficio para el suministrador de recargas y para los equipos de investigación participantes.

Parece apropiado añadir, como cierre, las expectativas que ha generado este Programa, de amplísimo espectro, que, más que una panacea que contribuya a solucionar presentes dificultades, que también es sin duda su objetivo, debería ser considerado como el medio más apropiado de impulsar un salto cualitativo decisivo hacia una optimización del diseño del combustible que, en años venideros, permita seguir incluyendo la generación nuclear como una de las fuentes más seguras y económicas de producir energía eléctrica.

Parece apropiado añadir, como cierre, las expectativas que ha generado este Programa, de amplísimo espectro, que, más que una panacea que contribuya a solucionar presentes dificultades, que también es sin duda su objetivo, debería ser considerado como el medio más apropiado de impulsar un salto cualitativo decisivo hacia una optimización del diseño del combustible que, en años venideros, permita seguir incluyendo la generación nuclear como una de las fuentes más seguras y económicas de producir energía eléctrica.

AGRADECIMIENTOS:

A todos los integrantes del equipo de Combustible Robusto, y en especial a Fernando Rojo, Pedro González y Luis Rebollo, sin cuyos comentarios y aportaciones no hubiera sido posible este artículo.



Diego MOLINA ORERO es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada (1979). Comenzó su actividad profesional en el Instituto Tecnológico de Postgraduados (ITP) desarrollando programas de investigación en Análisis Termohidráulicos, Física de Reactores y Análisis de Cobertura de la Demanda Eléctrica. En 1983 se incorporó a Hidroeléctrica Española con funciones de soporte técnico para la puesta en marcha de la C.N. Cofrentes. En 1985 se incorporó al Departamento de Ingeniería y Análisis Nucleares para desarrollar un sistema de gestión del combustible con capacidad independiente para diseñar y licenciar recargas BWR, que culminó con la creación de la Unidad de Combustible Nuclear de Iberdrola, de la que es responsable desde 1994. Es miembro de la SNE desde 1982.