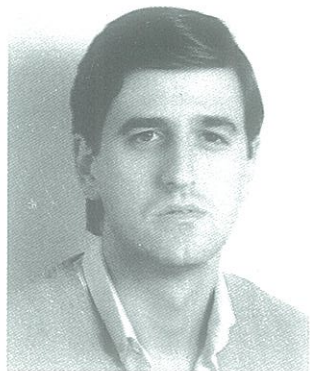




José M. ALONSO PACHECO es Ingeniero de Caminos por la ETSICCP de Madrid.

En la actualidad es jefe de Análisis y Ensayos dentro de la División del Combustible de ENUSA, donde trabaja desde 1981. Su especialización en el campo nuclear comienza dentro de la ingeniería civil de las centrales nucleares para, a continuación, centrarse principalmente en el área de la tecnología mecánica y termo-mecánica del combustible. En estos últimos temas cuenta, además, con la experiencia de un año de trabajo en la División del Combustible de General Electric. Recientemente ha dirigido, como coordinador de proyecto, el programa de desarrollo del combustible 14 x 14 LOLOPAR.



José E. GUTIERREZ ELSON es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ha trabajado como Ingeniero de Análisis de Tuberías de la Central Nuclear de Trillo en Empresarios Agrupados, S. A. En la actualidad es Ingeniero de Diseño Mecánico en el Departamento de Ingeniería del Producto de ENUSA. Durante seis meses ha colaborado con GE en el proyecto GE9 en San José (California).

COMBUSTIBLES AVANZADOS DE ENUSA

J. M. ALONSO-J. E. GUTIERREZ

El mercado mundial del Combustible Nuclear se encuentra en un proceso de evolución permanente. Los distintos fabricantes desarrollan continuamente nuevos productos o mejoran los ya existentes. Su objetivo es dar una respuesta eficiente y fiable a las exigentes demandas de sus clientes, realizando esfuerzos notables dirigidos a crear productos que permitan reducir los costes del ciclo del combustible. Las soluciones no son únicas y dependen de un conjunto de condicionantes que determinan cuál es el combustible óptimo para cada reactor. Entre los factores que influyen en esa decisión pueden citarse: las características y la estrategia de operación de la central, los costes de la segunda parte del ciclo del combustible, la política general del sector nuclear y el marco legal de cada país, los requisitos de los organismos reguladores, etc. Para diseñar, licenciar y fabricar combustibles que respondan debida-

mente a los requisitos del mercado, se necesita contar con una tecnología muy especializada. Dadas las particulares características de estos productos, se trata de una tecnología que implica elevadas inversiones, tanto en investigación y desarrollo como en formación del personal capacitado para aplicarla. ENUSA está asociada, mediante sendas licencias, con Westinghouse y GE, líderes mundiales en tecnología de reactores de agua ligera. Esto nos permite aplicar los últimos avances relativos a mejoras en el combustible y a participar en importantes programas de desarrollo. De esta forma, ENUSA cuenta con un equipo de profesionales y con una tecnología que le capacita para adaptar los combustibles más avanzados a las necesidades de los clientes y desarrollar sus propios productos.

Esta tecnología precisa de dos componentes muy interrelacionados. Por una parte se necesita un conjunto de

modelos de comportamiento, códigos y procedimientos de diseño que permitan un sistema fiable para simular los fenómenos que afectan al combustible y justificar su diseño. Por otra parte, el combustible nuclear es una realidad física integrada por una serie de elementos, fabricados con unos materiales muy específicos y siguiendo unos procesos estrictamente controlados, de manera que se requiere componer adecuadamente el conjunto resultante y garantizar su integridad y funcionalidad durante toda su vida útil. Será esta segunda perspectiva la que utilizaremos para presentar nuestros combustibles avanzados.

PRINCIPALES OBJETIVOS

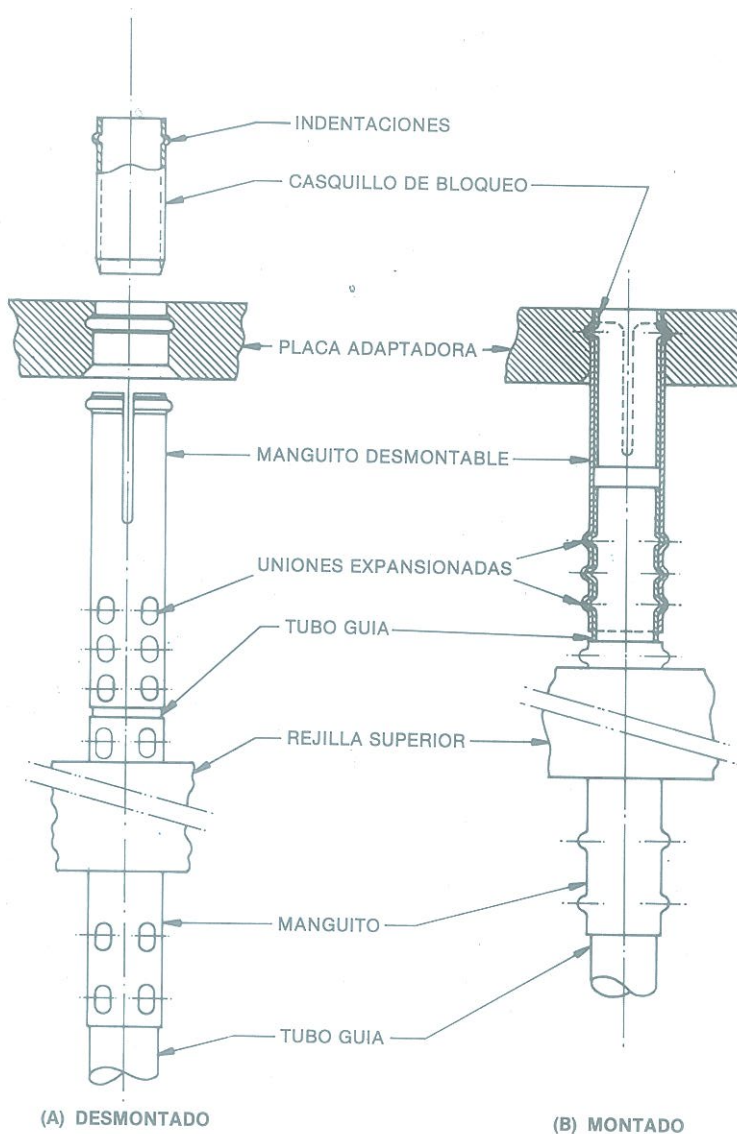
Según estudios realizados, las necesidades fundamentales de las centrales nucleares —tanto de las de Agua a Presión como de las de Agua en Ebullición— son: aumentar la fiabilidad y seguridad de la central, aumentar los quemados de descarga, reducir los costes del ciclo del combustible, aumentar los márgenes de operación, aumentar la longitud de los ciclos, extender la vida de la central, etc. Estas necesidades sugieren los siguientes objetivos concretos a seguir con los nuevos combustibles avanzados:

- Altos quemados de descarga. 45000 MWD/TMU es el quemado medio por región que se trata de alcanzar. Entre las consecuencias más notables de este aumento destacan el mayor aprovechamiento del uranio y la menor cantidad de residuos.

- Ampliar los márgenes de operación de la planta. Las centrales tienen unas limitaciones termohidráulicas, nucleares o mecánicas que reducen la eficacia de la operación. Incrementar, por ejemplo, los márgenes frente al DNB o al LOCA, puede ser prioritario.

- Alargar la longitud de los ciclos. Extender la longitud de los ciclos, ofreciendo la posibilidad de 12, 18 o 24 meses, permite a las centrales reducir sustancialmente los tiempos de parada que suponen las recargas y, con ello, elevar su factor de utilización.

- Aumentar la fiabilidad del combustible. Eliminar todas las posibles causas de fallo en el combustible contribuye a reducir la actividad en el primario, con el consiguiente descenso en las dosis que recibe el personal de la central, y a eliminar las hipotéticas paradas por fallo.



FI Esquema del sistema de unión del cabezal superior con el tubo guía.

COMBUSTIBLES AVANZADOS PARA CENTRALES PWR

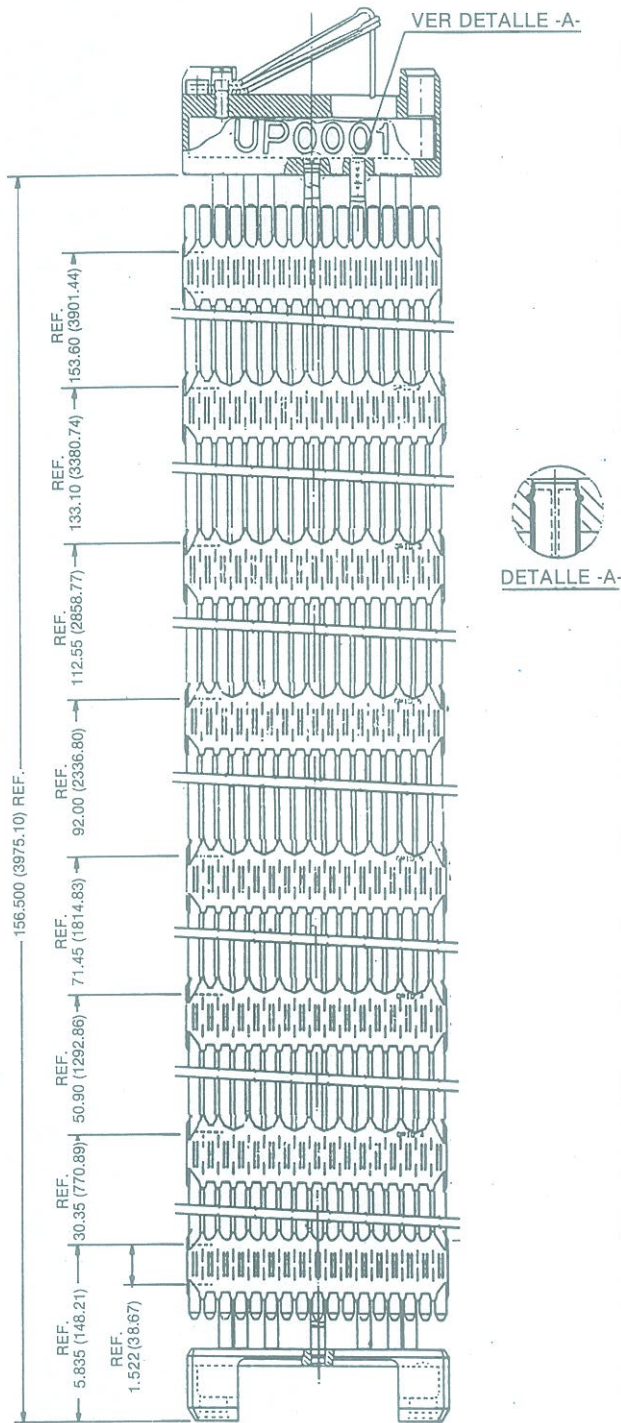
ENUSA ofrece actualmente a las centrales de tipo PWR dos combustibles avanzados: el «Advanced European Fuel» (AEF) para las que cargan conjuntos 17 x 17 y el LOLOPAR para las de tipo 14 x 14.

ADVANCES EUROPEAN FUEL

Con el fin de dar respuesta a las necesidades de las centrales españolas, expuestas más arriba, era necesario modificar los diseños actuales para dotarles de mayores márgenes de crecimiento por irradiación, de

sistemas que reduzcan la posibilidad de fallo, de mecanismos tales que en caso de que éste se produzca permitan separar con facilidad el elemento dañado, y de materiales con menor absorción de neutrones, por un lado, y con mayor resistencia frente a la corrosión, por otro.

Ante la preferencia de parte de nuestros clientes de utilizar la Barra Combustible Estándar, ENUSA impulsó el desarrollo de este nuevo elemento y participó con Westinghouse en el proceso de diseño. La adaptación para Europa de este producto la hemos realizado bajo el nombre de «Advances European Fuel» (AEF). Existe, además, una versión de este combustible con casi todas las innovaciones que se van a describir, pero



CONJUNTO COMBUSTIBLE 17x17 AEF

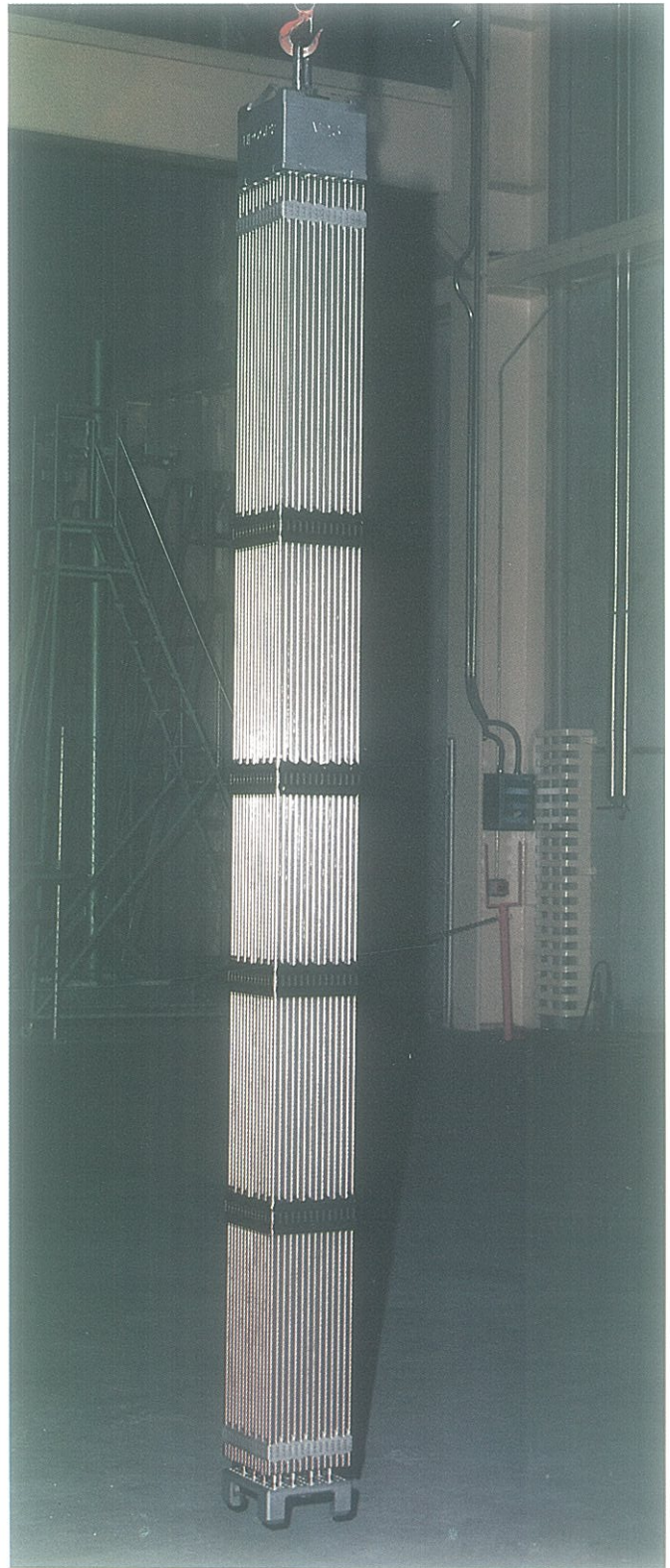
FII Combustible avanzado europeo.

empleando la Barra Combustible Optimizada.

Las novedades más importantes del AEF son:

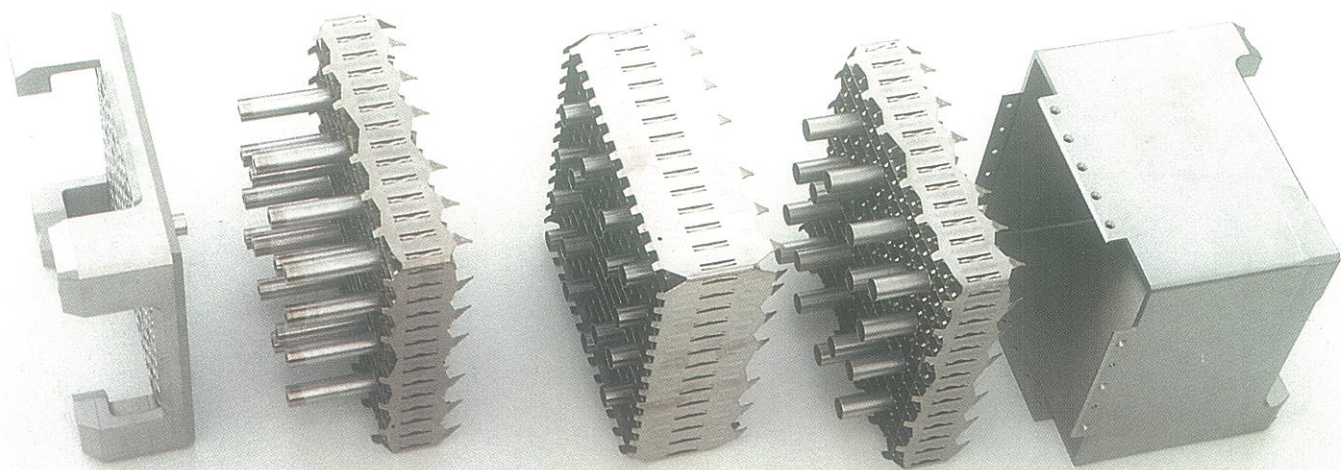
— Geometría de Alto Quemado. Un paso intermedio entre los Elementos

Estándar y Optimizado y el AEF es el Estándar de Alto Quemado, que en estos momentos está fabricando ENUSA. Con el fin de dar mayor espacio a la barra para que crezca, se ha disminuido la altura del cabezal



FIII Conjunto combustible LOLOPAR.

inferior, con lo que se ha aumentado la distancia entre cabezales. Parte de ésta ha sido absorbida por el aumento de la longitud de la barra, necesario para conseguir más volumen interior para alojar el exceso de ga-



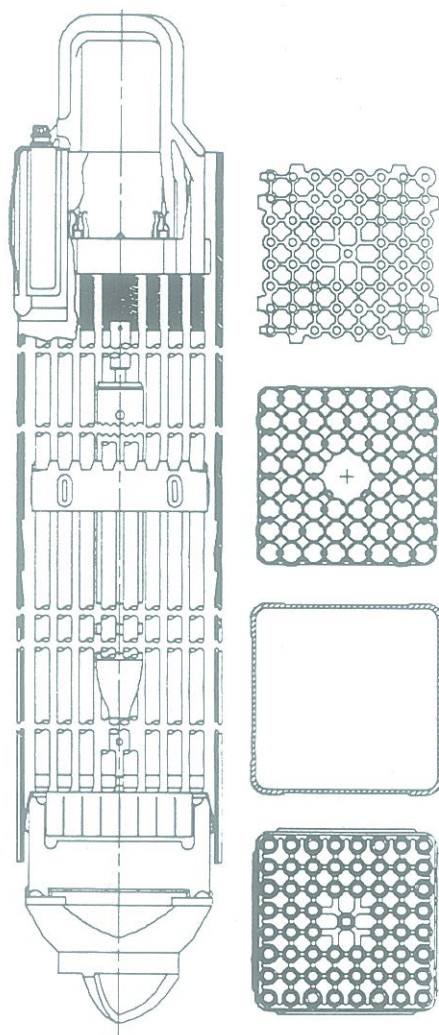
FIV Componentes del combustible LOLOPAR.

ses de fisión que se produzca al alargar el tiempo quemado.

— Cabezal Superior Desmontable. Hasta ahora las operaciones de reparación de un elemento dañado sólo se podían realizar invirtiéndolo y quitando el cabezal inferior. Esto resultaba muy complicado y costoso, por lo que se ha buscado la forma de hacerlo retirando el cabezal superior. La solución adoptada, que puede verse en la figura 1, consiste en un juego de manguitos unidos por expansiones y fijados al cabezal por un casquillo de bloqueo.

— Cabezal Inferior Filtro. Una de las principales causas de fallo de una barra combustible son pequeñas esquirlas metálicas que están presentes en el refrigerante y que el flujo lanza contra las vainas, dañándolas progresivamente hasta perforarlas. Para retener estas esquirlas en el cabezal, se ha reducido el diámetro de los taladros de la placa, se ha aumentado su número y se ha modificado su distribución, manteniendo sus características termohidráulicas.

— Rejillas Intermedias de baja pérdida de carga. Las Rejillas Intermedias del AEF son, igual que las del optimizado, de zircaloy, material de baja absorción neutrónica, pero de menor resistencia mecánica que el inconel. Para compensar este último efecto, de forma que no sea necesario aumentar excesivamente el espesor de las bandas, se ha diseñado una banda con muelles inclinados 45° respecto a la horizontal, resultando una rejilla de similares características hidráulicas y mecánicas que las de la anterior de inconel.



FV Conjunto combustible GE 10.

— **Rejillas Extremas Antienganche.** Se han modificado las bandas exteriores y la geometría de las esquinas de las rejillas superior e inferior, para evitar los enganches entre elementos durante la recarga.

A este combustible es posible incorporar algunas otras innovaciones, cuyo desarrollo ya está concluido y que en un plazo corto podremos ofrecer en España, como son:

— **Rejillas Intermedias mezcladoras de flujo.** Estas rejillas se sitúan en los tres vanos superiores del elemento, con el objetivo principal de aumentar el margen frente al DNB.

— **Venenos Integrados,** para aumentar la flexibilidad del esquema de recarga y disminuir el volumen de residuos.

— **Manto Fértil axial,** productor de material físil y reductor de las pérdidas de neutrones.

LOLOPAR

ENUSA ha desarrollado un nuevo combustible para las centrales PWR con elementos 14×14 para sustituir al HIPAR que actualmente utilizan. Los dos objetivos fundamentales que se perseguían con este nuevo diseño eran: reducir el material parásito en la zona activa e incorporar los dispositivos que facilitan el montaje y desmontaje del elemento en la central.

Las principales características del nuevo combustible, en relación con las del antiguo, son:

— **Rejillas Intermedias de zircaloy** en sustitución de las de inconel, con lo que se consigue reducir la cantidad de éste en un 80 %.

— **Tubos Guías y de Instrumentación de zircaloy.** El combustible HIPAR los tenía de acero inoxidable; con este cambio, se elimina el 90 % del acero presente en la zona activa.

— **Las uniones entre las Rejillas y los Tubos Guías** se hace mediante expansiones mecánicas en vez de soldaduras, debido al cambio reseñado en el apartado anterior.

— **Cabezal Superior desmontable,** con un sistema igual al descrito más arriba y que se muestra en la figura II.

— **Cabezal Inferior desmontable.** El nuevo cabezal se une al esqueleto con tornillos escalonados reutilizables.

En la figura III se muestra un Conjunto Combustible LOLOPAR y en la figura IV algunos de sus componentes.

Con la introducción del combustible LOLOPAR en la central nuclear de José Cabrera se van a conseguir importantes ventajas económicas. Como ejemplo, podemos citar que para una energía dada y fijado el número de elementos frescos de la recarga, el enriquecimiento se podría reducir de un 3,6 % a un 3,4 % gracias al cambio de combustible.

COMBUSTIBLES AVANZADOS PARA CENTRALES BWR

Después del paso del elemento GE7 al GE8, que no supuso importantes modificaciones mecánicas, GE ha introducido sustanciales novedades en su línea de productos. Los combustibles GE9 y GE10 y en futuro no muy lejano el GE11, constituyen un importante avance en el área BWR.

GE9/GE10

Desde un punto de vista mecánico, estos dos elementos son idénticos. Las dos únicas diferencias del GE10 con respecto al GE9 son: el Canal Interactivo y el Cabezal Inferior Compensador, aplicable, éste último únicamente a las celdas de tipo D.

Las principales innovaciones comunes a ambos elementos combustibles son:

— **Rejilla de alto rendimiento.** La clásica rejilla de bandas —utilizada tanto en combustibles PWR como BWR— ha sido sustituida por otra formada por celdas cilíndricas. Este nuevo diseño ha permitido reducir el tamaño de los muelles, con lo que la cantidad de Inconel X-750 se reduce en aproximadamente un 70 %. Por otro lado, este sistema aumenta la rigidez de la rejilla, simplifica su fabricación —se sustituye la soldadura TIG por la láser— y permite reducir su altura.

— **Barra de Agua Central.** Las barras de agua de los diseños anteriores tienen una geometría similar a la del resto de las barras de combustible y van alojadas en las 2 o 4 (GE8) posiciones centrales del elemento. En el nuevo diseño se ha optado por una única barra central, de mayor diámetro y espesor, y con un área de paso equivalente a la de cuatro barras de agua antiguas (ver la fig. V). Los efectos de esta barra son: aumenta la reactividad del elemento, aplanan su distribución de potencia y reduce el coste del ciclo.

— **Enriquecimiento variable a lo largo de las barras de UO_2 .** La columna combustible se divide en varias zonas axiales con diferentes enriqueci-

mientos. Esta modificación es similar a la que se introdujo en las barras de Gadolinio del elemento GE8 y que se mantiene en éste.

Por lo que se refiere al elemento GE10, las dos innovaciones, citadas más arriba, son:

— **Canal Interactivo.** Dos son los cambios introducidos en el canal: de material y de geometría. El zircaloy-4 ha sido sustituido por zircaloy-2 mejorado, material más resistente frente a la corrosión, lo que permite que con un menor espesor de pared se consiga, a final de vida, la misma resistencia mecánica que antes. Los cambios geométricos van dirigidos a eliminar material. Para ello se ha reducido el espesor de las paredes, manteniendo o aumentando, según el caso, el de las esquinas. Además, se han practicado rebajes verticales exteriores en la parte inferior del canal y rebajes horizontales interiores en la parte superior. Estos últimos actúan, a su vez, como perturbadores del flujo, lanzando a éste contra el elemento.

— **Cabezal Inferior Compensador.** En estos cabezales se ha modificado la posición del cono inferior con respecto al resto, con el fin de desplazar la celda 40 milésimas de pulgada hacia la barra de control, y conseguir con ello acercar una celda de tipo D a una de tipo C.

Con estos nuevos elementos se consigue: aumentar la longitud de los ciclos, incrementar los márgenes térmicos, mayor flexibilidad en el diseño del elemento, reducir los costes del ciclo, mayor flexibilidad de parada y mayor eficiencia neutrónica.

CONCLUSIONES

Los esfuerzos de desarrollo no se paran aquí y es necesario seguir trabajando con objeto de mejorar el combustible.

En el área de combustible para centrales de tipo PWR, las líneas de trabajo se dirigen en dos direcciones: conseguir mayor espacio para el crecimiento de la barra y del elemento, a costa de modificaciones en la geometría del cabezal superior, y obtener aleaciones más resistentes frente a la corrosión, que permitan alcanzar mayores quemados.

Los esfuerzos de desarrollo en el área BWR se centran en el elemento GE11, cuyo diseño se encuentra muy avanzado. Este nuevo combustible, además de tener una celda de 9×9 , es la culminación de la serie de innovaciones que se han ido introduciendo a partir del GE9.