



## REACTORES DE FISIÓN DEL FUTURO

F. Martín-Fuertes  
División de Fisión, CIEMAT

Esta Nota Técnica pretende ser una breve actualización del conocimiento sobre el estado en que se encuentran diversos proyectos de reactores futuros, entendiendo por tales los que se plantean a largo plazo, es decir, los denominados de Generación IV y sus diseños afines. La característica principal del formato de Nota Técnica es su brevedad, de manera que se ha hecho un esfuerzo de condensación que ha dejado fuera de consideración un gran número de detalles. El énfasis se ha puesto sólo en los aspectos más relevantes de cada proyecto, teniendo en cuenta que cada cual tiene su propio grado de madurez.

Como referencia básica se usa uno de los marcos quizá más cercanos a nuestro entorno y más comprometido con el desarrollo de estos reactores: la Plataforma Tecnológica Europea sobre Energía Nuclear Sostenible (SNE-TP), [www.snetp.eu](http://www.snetp.eu). Uno de los objetivos principales de esta Plataforma es elaborar y revisar periódicamente dos documentos: la Agenda Estratégica de Investigación y su Estrategia de Implementación. Se espera que la Unión Europea, en sus futuros Programas Marco, recoja muy literalmente las recomendaciones de la Agenda. Por otro lado, a escala mundial, iniciativas concretas co-

mo las apadrinadas por el OIEA, con el interés de que incorporan los espectaculares planes de países como India y China, o bien otras iniciativas multinacionales, como 'Generation IV International Forum' (GIF), mantienen sinergias importantes con los planteamientos europeos.

En la Agenda Estratégica hay espacio, en primer lugar, para los aspectos de interés de los reactores de agua ligera (LWR) actuales y evolutivos: envejecimiento de sistemas y su prevención, reducción de dosis operacional, optimización del combustible, aumento de potencia, desmantelamiento, etc. En una segunda parte la Agenda presenta el desarrollo de ciclos avanzados de combustible, cuyo planteamiento conduce al desarrollo de nuevas tecnologías de reactores rápidos. La Agenda recoge varias tecnologías: reactor rápido de sodio, SFR, de plomo, LFR, refrigerado por gas, GFR, y subcrítico con acelerador, ADS, pero prioriza sobre todo la de SFR. También menciona los reactores de gas a alta temperatura, HTR para otras aplicaciones de la energía nuclear. El desarrollo de estas tecnologías de espectro rápido tiene sus raíces en dos importantes aspectos relacionados con los ciclos avanzados:

- El cierre del ciclo de combustible, o bien del mayor número posible de los elementos que se descargan tras la irradiación (principio de minimización de residuos y optimización de los futuros repositorios de alta actividad).
- La reproducción del material fisible permitiría hacer frente a escenarios de agotamiento del uranio a medio plazo si se asume que el parque mundial de reactores se mantiene o multiplica a costa de diseños quemadores tradicionales tipo LWR (principio de sostenibilidad).

Es evidente además, que en políticas de liberalización económica, cualquier propuesta tecnológica deberá demostrar su rentabilidad durante la vida de la central y garantizar mecanismos razonables de financiación. Los estudios económicos vigentes muestran una amplia banda de incertidumbre en estos parámetros, ya que las líneas de producción no existen aún, o bien es difícil extrapolar datos disponibles a tamaños comerciales, o bien ciertas actividades estarían reguladas a nivel institucional, fuera del mercado. Así, se encuentran estimaciones que abaratan ligeramente el coste de producción final del kWh junto con otras que lo encarecen, como máximo entre el 20 y 30%. De país a país, la interpretación que cada uno hace de la situación hace que existan todas las posibilidades de patronazgo asumidas a nivel gubernamental. Por tanto, es posible encontrar un país con un decidido apoyo gubernamental al lado de otro con muy bajo apoyo.

## **Reactores rápidos refrigerados por sodio, SFR ('Sodium Fast Reactor').**

Dieciocho reactores SFR que han funcionado o lo están haciendo, y tres en construcción (Rusia, BN-800 de 2000 MWt, China, CEFR de 75 MWt, e India, PFBR de 1200 MWt), demuestran quizá que la tecnología del sodio es la más madura dentro de la de reactores rápidos. Japón es hoy el país líder en esta tecnología dentro de 'Gen-IV International Forum' y proyectan reanudar el funcionamiento del reactor MONJU, de 250 MWe. En Europa, Francia tiene la intención de poner en funcionamiento un prototipo entre 250 y 600 MWe en 2020 (Proyecto ASTRID) tras finalizar los correspondientes procesos de preselección (2012), diseño de detalle y construcción. La introducción de un reactor comercial de mayor potencia, 1500 MWe, se contempla para 2040.



### *Reactor MONJU (Japón)*

Actualmente, el proyecto europeo que considera el diseño de dicho reactor es el CP-ESFR, en el que participan 26 instituciones europeas. En este proyecto, los parámetros principales del núcleo son: potencia térmica de 3600 MW, combustible de óxidos mixtos U-Pu (como se-

gunda opción, carburos), con contenidos en Pu en torno al 15%, y razones de reproducción ligeramente por encima de la unidad. El diseño, además, considera en una segunda fase una carga de Actínidos Minoritarios (AM; se trata de los elementos Np, Am y Cm) suficiente para ser transmutados apreciablemente, sin deteriorar los parámetros de seguridad, es decir, garantizando que el reactor será perfectamente licenciable. Se contemplan cargas pequeñas homogéneas en todo el reactor (~4% en peso) o bien heterogéneas (capas o envueltas con cargas ~20%) tecnológicamente menos maduras en cuanto a la fabricación del combustible.

En cuanto al diseño de la vasija y del primario, se contemplan aún dos alternativas: reactor tipo piscina, con cambiadores integrados en la vasija, o tipo circuito, con vasija más pequeña. Se completa el proyecto esperando tener avances importantes en los capítulos de Seguridad y sistemas auxiliares cuando concluya en 2012.

La razón de reproducción del material fisionable es fundamental: las estimaciones indican que sólo planteándose razones por encima de la unidad es posible pensar en introducir parques completos de SFR a escala europea (o a escala similar en otras regiones) buscando una sustitución de LWR al cabo de un siglo desde fechas actuales. De acuerdo con estimaciones de diversos foros, entre uno y dos siglos sería el orden de magnitud de las reservas razonables de uranio para parques mundiales LWR, si se utilizan datos del 'Libro Rojo del Uranio' de la AEN/OCDE y OIEA (existe un

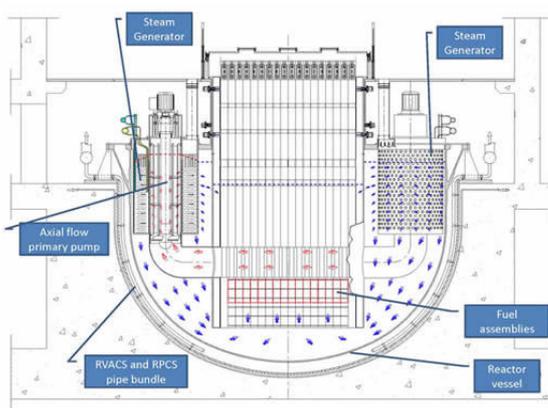
debate abierto porque podrían identificarse nuevas fuentes de suministro de uranio a precio razonable, o bien usar fuentes no convencionales, como fosfatos).

### **Reactores rápidos refrigerados por plomo, LFR ('Lead Fast Reactor').**

La tecnología del plomo se plantea en la Agenda Estratégica como una de las dos alternativas al reactor de sodio. En líneas generales, las prestaciones potenciales de producción energética y evolución isotópica del combustible (uso eficiente del uranio, minimización de residuos) son muy parecidas a las del reactor de sodio. Por otro lado, el plomo tiene características que lo hacen atractivo (baja presión de vapor a la temperatura de trabajo, reducción de dosis operacional por blindaje, ausencia de rejilla soporte del núcleo al poder flotar el combustible, es un elemento químicamente inerte con el agua y el aire), pero presenta importantes problemas tecnológicos (corrosión de estructuras, recargas a alta temperatura, etc). Las líneas de investigación comparten puntos en común con la tecnología ADS. La hoja de ruta del LFR considera la construcción de una planta piloto hacia 2020, entre 50 y 100 MWt, y de un prototipo hacia 2030.

En el proyecto europeo ELSY (19 organizaciones) se trabaja en el diseño de un reactor de 600 MWe. Quizá sea la vasija tipo piscina el elemento más innovador, ya que el núcleo se plantea a base de elementos combustibles tradicionales de paso cuadrado (alternativamente, elementos hexagonales). La innovación de la vasija consiste en

que es completamente desmontable y no dispone de elementos internos soldados. Los elementos combustibles están alojados en un barrilete cilíndrico y terminan en un largo eje que facilita su manipulación en el espacio relleno de gas por encima del nivel de plomo. Los ejes encajan en la cubierta superior de la vasija. Se prevén ocho cambiadores de calor, a base de tubos enrollados en hélice alrededor de un canal central que rellena el plomo caliente. Por los tubos circula agua del secundario, mientras que el plomo asciende por el canal del centro y gira para atravesar los tubos. En la parte inferior de cada cambiador va integrada una bomba de flujo axial que impulsa el líquido a baja velocidad ( $< 2$  m/s) para limitar la corrosión. En la vasija se alojan también cuatro sistemas enfriadores del calor residual, por inmersión de tubos tipo bayoneta. Otros sistemas y aspectos previstos en ELSY son: refrigeración de la pared de la vasija, robustez frente al escenario de rotura de tubos del generador de vapor, circuitos de agua y aire para la extracción de calor residual, diseño sísmico.

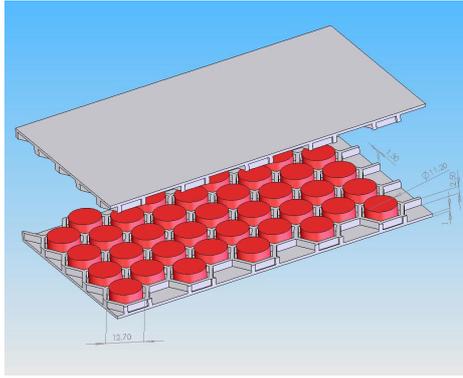


*Esquema del reactor en su vasija,  
Proyecto ELSY*

## Reactores refrigerados por gas, GFR ('Gas Fast Reactor').

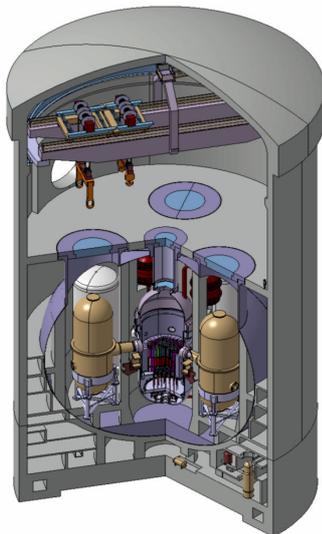
Los GFR se contemplan en la Agenda Estratégica como segunda alternativa al programa de reactores rápidos. Se trata de un diseño de reactor rápido refrigerado por gas (He) que comparte buena parte de los desarrollos tecnológicos del VHTR (descrito más adelante) pero incluye aspectos específicos, como el desarrollo de combustible en placas, aunque el combustible en barras es segunda opción.

La producción de gas a alta temperatura será la principal ventaja de estos reactores. Pero se plantean densidades de potencia apreciables ( $\sim 100$  MWt/m<sup>3</sup>) y por tanto es preciso desarrollar un combustible robusto con buenas propiedades térmicas. Se trabaja en la propuesta de un combustible innovador en forma de placas planas cerámicas, que alojan pequeñas pastillas a base de carburos, y que debe proporcionar excelentes cualidades de confinamiento de productos de fisión a altas temperaturas (1600 °C o más). Las placas se disponen dentro de elementos combustibles hexagonales. La caracterización del combustible se llevará a cabo por medio de campañas de irradiaciones en reactores de prueba de materiales, ya iniciadas, y se espera que hacia 2013 se complete la fase de selección del combustible.



*Placa del elemento combustible GCR ('Gas Cooled Reactor').*

El reactor comparte con los otros diseños de reactor rápido las prestaciones de reproducción de material fisionable (sin capa fértil reproductora preferentemente) y transmutación de transuránicos, con ciclo cerrado. La potencia de diseño es de 2400 MWt. Se prevé hacer uso de una vasija de combustible, y de tres lazos de recirculación del primario con generadores de vapor y soplantes integradas en un mismo elemento. También hay ya disponibles diseños del recinto de contención y disposición de los equipos auxiliares.



*Disposición del reactor GCR: primario y contención*

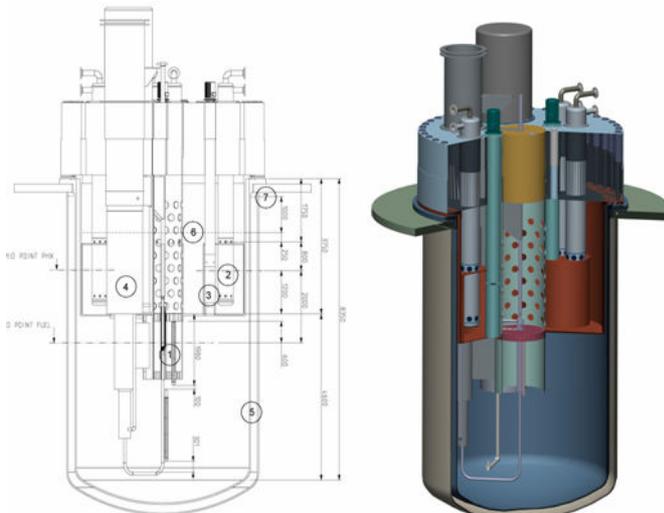
En el Proyecto Europeo GCFR, del Sexto Programa Marco de la UE, se estudió, además del diseño genérico de un GCR de potencia, el de un reactor demostrador de unos 80 MWt (Proyecto ALLEGRO). En la Agenda Estratégica de la SNE-TP consta que la fase de ingeniería de detalle de este prototipo debe comenzar hacia 2012 y su operación en 2020.

### **Reactores subcríticos accionados por acelerador, ADS ('Accelerator Driven System').**

Liberando a un conjunto multiplicador de neutrones de la condición de criticidad y diseñando un estado subcrítico se podría aumentar la carga de Actínidos Minoritarios. Para niveles de potencia equivalentes, por tanto, pueden obtenerse mayores valores absolutos de transmutación de AM. Así, cobra interés el planteamiento de parques de reactores críticos, dedicados a la producción de energía eléctrica y reproducción del material fisible, y otra fracción, más pequeña y geográficamente concentrada, dedicada a la eliminación de AM (junto con ciertas cantidades necesarias de Pu). En este supuesto, el múltiple reproceso del combustible ADS se realizaría en instalaciones anexas con métodos pirometalúrgicos, con lo que se alivia el problema del transporte de actínidos en comparación con otros escenarios.

En sistemas ADS, además de valores razonables de  $k_{ef}$  que garantizan una multiplicación útil hacen falta fuentes intensas de neutrones para mantener elevados valores de potencia. Por eso se recurre a fuentes

de espalación por protones, trabajando con corrientes de mA, y lo más cerca posible de la energía de espalación más eficaz (~1 GeV). El diseño más avanzado a nivel europeo es el que ha generado la sucesión de proyectos PDS-XADS, EUROTRANS (diseño XT-ADS), y recientemente su continuación, CDT-FASTEF. A lo largo de los años se ha venido trabajando en ellos en el diseño de la instalación de demostración MYRRHA, del SCK-CEN belga, que está presente en la Agenda Estratégica de la SNE-TP (capítulo de infraestructuras), con la fecha del año 2020 para su licenciamiento.



1. Núcleo subcrítico
2. Cambiadores de calor del primario
3. Bombas del primario
4. Circuito de espalación
5. Vasija interna y externa
6. Nivel de refrigerante frío
7. Nivel de refrigerante caliente

### Esquema de XT-ADS

El proyecto europeo vigente, CDT-FASTEF (18 instituciones) quiere dar un paso importante en el diseño tecnológico. La instalación se plantea como un conjunto subcrítico a base de unos 70 elementos combustibles de óxido mixto de U-Pu, con alto contenido de Pu (35%), pero capaz de albergar algunos ele-

mentos combustibles experimentales con altos contenidos en AM. El refrigerante es el eutéctico de plomo-bismuto, cuyo punto de fusión es menor que el del Pb puro, que presenta el problema de la producción de polonio a partir de capturas neutrónicas del Bi. El mismo líquido en un circuito independiente actúa como blanco de espalación, sin ventana para los protones. La potencia de diseño está fijada actualmente en 57 MWt y su  $k_{ef}$  de operación nominal en 0.95. El proyecto exige importantes propuestas tecnológicas sobre la operación continua del acelerador, control remoto de elementos, inspecciones en servicio, blindaje y seguridad, etc. El proyecto CDT-FASTEF incluye en una segunda fase un estudio de modificación del diseño para convertir la instalación en un demostrador de un reactor crítico de plomo al cabo de varios ciclos de operación como ADS.

El camino hacia MYRRHA cumplió un importante hito con la operación del blanco de espalación de Pb-Bi MEGAPIE, proyecto liderado por PSI de Suiza y participado por otras 9 instituciones de varios países. MEGAPIE funcionó como fuente continua de neutrones durante cuatro meses hasta diciembre de 2006, presentando un factor de disponibilidad del 95%. La corriente máxima de protones fue de 1,4 mA, a 51 MHz, y 575 MeV de energía incidente. Además de la caracterización detallada del campo neutrónico y del inventario radiactivo (información muy útil además para la validación de modelos nucleares), el proyecto ha permitido un importante desarrollo de equipos auxiliares, incluyendo el diseño de una ventana

de protones. También se han impulsado metodologías de licencia y de desmantelamiento de la instalación.



*Blanco de espalación MEGAPIE. El extremo inferior es la ventana donde inciden los protones.*

En el avance de la tecnología ADS cabe citar también el importante proyecto GUINEVERE, liderado por SCK-CEN, que prevé una instalación licenciada para finales de 2009. En este proyecto se acoplará un blanco de espalación a un conjunto subcrítico que desarrolla una potencia muy baja aún (potencia cero). Uno de los objetivos principales del proyecto es el desarrollo de equipos de medida en continuo de la subcriticidad del sistema, un requisito que será necesario para operar los ADS.

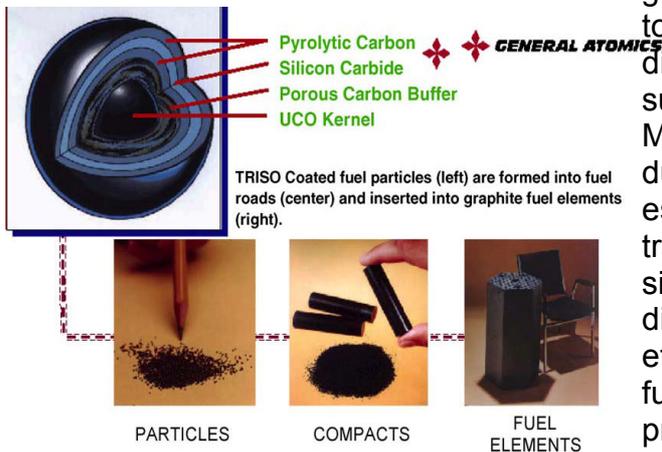
## **Reactores de gas de muy alta temperatura, HTR/VHTR ('Very High Temperature Reactor')**

Herederero de importantes desarrollos pasados en países como EEUU y Alemania (p.ej., proyecto AVR), se trata de un tipo de reactor que se contempla también en SNE-TP y Generación IV, aunque no es de espectro rápido (se emplea grafito en el núcleo), y es posible quizá que presente menor riesgo tecnológico que los de espectro rápido. Sin embargo sus planteamientos incorporan importantes aspectos innovadores respecto al avance tecnológico obtenido en el pasado.

En primer lugar, en este reactor se prioriza su aplicación hacia la producción de calor para procesos industriales, y en especial, a la producción de hidrógeno con alta eficiencia, mientras que la electricidad se plantea como un subproducto. Esto conlleva importantes capítulos dedicados a las condiciones de licencia cuando se acople a las instalaciones convencionales (con largas distancias de transporte de energía), y análisis de rendimiento económico. Y además condiciona aspectos tecnológicos como es el diseño de un cambiador intermedio de calor, de gran potencia térmica, eficiente y robusto para más de 600°C, o bien la selección de materiales para la vasija sometidos a alta temperatura (el refrigerante es helio en el rango de los 800 – 1000 °C).

En el reactor, el elemento básico son las bolitas (~1 mm) de UO<sub>2</sub> recubiertas por varias capas de SiC, PyC, y alternativamente se investiga el ZrC en lugar de SiC. Para el núcleo de la bola, la opción alternativa

es UCO. CEA podría plantearse una planta piloto encargada de los procesos de fabricación y montaje. Las microbolas pueden ir contenidas en otras bolas de grafito más grandes (~6 cm), las cuales constituirían un lecho fluido como reactor crítico, o bien pueden ir dispersas en elementos combustibles prismáticos. Los ejercicios de cálculo de reactividad y coeficientes han dado cierta dispersión de resultados con los códigos disponibles, lo cual implica una necesidad de desarrollo en códigos acoplados de neutrónica y termohidráulica.



*Elemento combustible HTGR de tipo prismático y sus partículas combustibles*

Tras el paso del combustible por el reactor hasta muy altos quemados (150-200 GWd/tHM) se opta por un ciclo abierto. Los recubrimientos del  $UO_2$  ofrecen un altísimo grado de confinamiento a los productos de fisión pero la caracterización del combustible es crucial. Por tanto, hay un programa de irradiaciones y medidas de liberación previsto (ITU-Karlsruhe) y de estimación global de liberaciones para cálculos de seguridad. Dado que el ciclo es abierto hay líneas de investigación en el

tratamiento de las bolas como residuo de alta actividad (es deseable separar y recuperar el grafito irradiado -ya que el grafito facilitaría la filtración de humedad en el repositorio- y acondicionar las bolitas irradiadas con vidrio o SiC). Por otro lado existe un programa de irradiación de los grafitos comerciales actualmente disponibles.

En Europa, el Proyecto RAPHAEL, recientemente concluido, es el que aglutina la mayor parte de los esfuerzos que hemos citado, pero otros países (EEUU, Rusia, China, Japón, Corea) también tienen programas importantes, incluyendo prototipos de reactor en operación o en diseño. Cabe destacar el proyecto sudafricano PBMR, 'Pebble Bed Modular Reactor' como el más maduro para la comercialización de esta tecnología. En la Agenda Estratégica de la SNE-TP se dan las siguientes fechas: 2012 inicio del diseño preliminar tras completar la etapa de la selección tecnológica fundamental, 2020 operación de un prototipo HTR, y a partir de 2025-2030 el despliegue industrial.

### Reactores de sales fundidas, MSR ('Molten Salt Reactors')

Aunque no está incluido en la Agenda de SNE-TP sí que lo está en la de GIF, de manera que es preciso hacer mención a este tipo de reactor para completar el panorama general. Ya los primeros impulsos tecnológicos importantes tuvieron lugar en Oak Ridge en los años 60 del siglo pasado. En GIF se menciona que el programa de I+D para esta tecnología debe establecer su viabilidad hacia 2018 y optimizar parámetros de operación

hacia 2025. La operación de prototipos se situaría entre 2031 y 2035.

Una primera familia de MSR tiene como línea principal el uso de una mezcla de sales fundidas, una de las cuales es una sal del actínido de interés, como el  $\text{ThF}_4$ . Las otras sales suelen ser fluoruros de litio y de sodio. En el caso citado se plantea por tanto la explotación del ciclo del torio, pero otra variante se plantea el uso de los actínidos provenientes de LWR, esto es,  $\text{PuF}_3$ , con interés en su eliminación o transmutación. Vemos además que es posible plantear reactores reproductores o quemadores, con presencia de capas fértiles reproductoras o sin ellas. En cuanto al espectro, tienen quizá más interés los de espectro rápido, pero también se pueden diseñar los de espectro térmico. Una ventaja muy importante de este tipo de reactores es que los de espectro rápido pueden presentar coeficientes de reactividad muy negativos (temperatura y huecos) lo cual les diferencia de los de combustible sólido y espectro rápido. Por supuesto, la otra gran ventaja de estos reactores es que permitirían el reprocesado del combustible en línea, sin necesidad de detener la operación del reactor. Esta posibilidad también permitiría ajustar la criticidad vía combustible 'fresco' inyectado, con lo cual se prescinde de grandes excesos de reactividad potencial a inicio de vida. Actualmente se ha llegado al planteamiento de primeros diagramas de flujo para la purificación del combustible líquido con parámetros y procesos prototípicos. La I+D tiene retos importantes con problemas de compatibilidad de materiales, que deben ser muy resistentes a la corrosión a altas temperaturas

(>750 °C). Se contemplan aleaciones de Ni-W-Cr.

Existe otra línea de interés (EEUU, República Checa) en la que la sal actúa sólo como refrigerante y el combustible es sólido, que iría dispuesto en elementos combustibles prismáticos similares a los reactores HTGR (elementos de bolas o prismas). La naturaleza química inerte de las sales frente al agua o aire es la principal ventaja de esta familia de reactores, además de permitir densidades de potencia de 4 a 6 veces superiores que los HTGR refrigerados por helio. Las sales fundidas además podrían cumplir perfectamente con la función de transporte de calor a largas distancias para aplicaciones térmicas.

EURATOM, en su Sexto Programa Marco, desarrolló el Proyecto ALL-SIA, con objetivos de revisión del estado de la tecnología y establecimiento de una red de socios. Existen actualmente iniciativas ISTC ('International Science and Technology Center', Rusia) y acuerdos bilaterales.

### **Reactores de agua ligera supercríticos, SCWR ('Supercritical Water Reactors').**

Al igual que los MSR, los SCWR no están contemplados en la Agenda SNE-TP pero sí en el GIF.

Esta línea de reactores trata de aprovechar los mayores rendimientos termodinámicos que se pueden obtener aumentando la temperatura de operación del agua, lo cual lleva en seguida a superar su punto crítico termodinámico (374 °C, 22,1 MPa). También puede hacerse uso

del ciclo directo a turbina. El estado actual se centra en explorar las prestaciones potenciales a nivel de estudios pre-conceptuales.

El concepto CANDU-SCWR maneja la tecnología de tubos de presión, espectro térmico y  $\text{UO}_2$  convencional (y también el ciclo del torio). La parte de conversión de potencia se trata de optimizar destinando algunos canales del núcleo para producir vapor sobrecalentado, que se conduciría a la turbina supercrítica. En teoría, podrían alcanzarse rendimientos del 50%.

El reactor de altas prestaciones HPLWR ('High Performance LWR') de EURATOM funcionaría a 25 MPa y 500°C con ciclo directo a turbina. Se han completado primeros estudios neutrónicos y termohidráulicos a potencia nominal, de deformación de materiales y de análisis de seguridad, incluyendo propuestas para el edificio de contención y sistemas alojados. Se pone un cierto énfasis en estudios de estabilidad del fluido al cruzar el núcleo, ya que se trata de evitar ondas de densidad que afecten a la reactividad.

Por su parte, Japón explora diseños SCWR con espectro térmico y rápido, y con vasija de presión. En el diseño térmico se ha demostrado la posibilidad de operación nominal de vaina por debajo de 700 °C y se han realizado evaluaciones de materiales. El diseño con espectro rápido ha buscado proporcionar coeficientes de huecos negativos y primeras estimaciones sobre transmutación.

En resumen, el panorama europeo y el mundial indican que la Tecnología

Nuclear de fisión tiene un horizonte de desarrollo muy interesante a medio y largo plazo, y quizás sirve como ilustración el hecho de que más de 10000 personas fueron contratadas por AREVA en 2008 (mayormente para participar en proyectos de Gen III+, si bien esta empresa participa en bastantes de los proyectos mencionados en esta nota). El desarrollo tecnológico nuclear en nuestro país durante los últimos 50 años ha permitido construir una importante industria que podría colocarse en una buena posición para aprovechar los planes futuros. Esperemos que, con el apoyo necesario, dichas oportunidades se materialicen en encargos y nuevos proyectos de relevancia para nuestra industria, ingenierías, universidades y centros de investigación.

*Agradecimientos: El autor agradece a sus compañeros de la Comisión Técnica de la SNE y a los de Terminología las revisiones del texto original.*