

Reactores rápidos de metal líquido: Situación técnica y económica

En los últimos años se ha avanzado notablemente en la tecnología de los LMFR

por Simcha Golan, Jean Leduc e Hiroshi Nakagawa

Con la experiencia de 40 años de desarrollo y demostración técnica de los reactores rápidos de metal líquido (LMFR), el Japón, Europa Occidental, la Unión Soviética y los Estados Unidos avanzan hacia la próxima fase de los proyectos LMFR. En este artículo se examina brevemente y desde diferentes ángulos el estado de los conocimientos técnicos, las expectativas actuales respecto de la viabilidad económica y algunos criterios sobre el emplazamiento de las centrales de LMFR.

Estado de los conocimientos técnicos

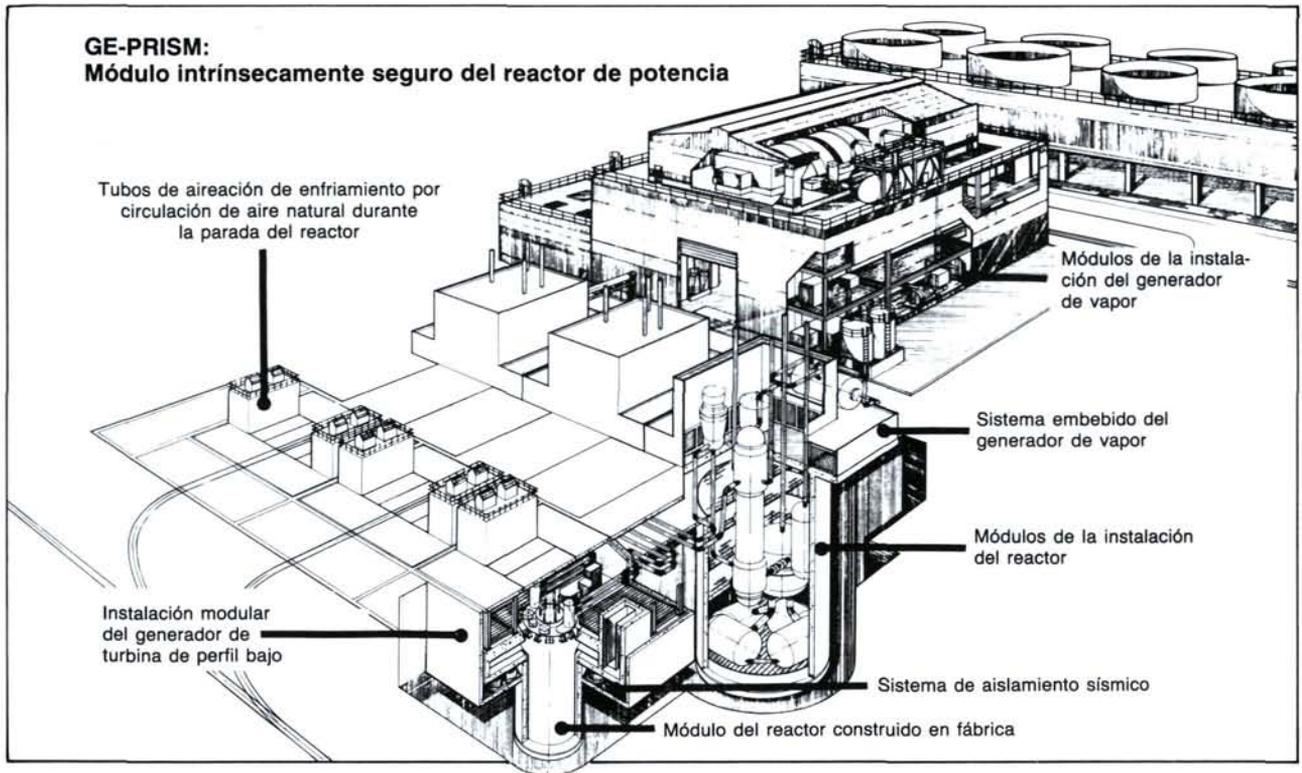
La explotación durante cerca de 200 años-reactor de unidades de potencia LMFR experimentales y de tamaño mediano ha demostrado que los reactores rápidos refrigerados con sodio son fiables, tan fáciles de operar como los reactores de agua ligera (LWR) actuales, necesitan un mantenimiento sencillo con dosis de exposición profesional relativamente bajas y reducen al mínimo las operaciones rutinarias de generación y manipulación de desechos radiactivos. La experiencia acumulada con respecto a reactores prototipos tales como el Phénix de 250 MWe (15 años) de Francia, el PFR de 250 MWe (16 años) del Reino Unido, el BN-350 (16 años) de la URSS y el FFTF de 400 MWt de los Estados Unidos ha sido particularmente valiosa. Todos estos prototipos han estado funcionando últimamente con una alta fiabilidad. Además, el BN-600 de la URSS ha estado funcionando solamente para la producción comercial de electricidad durante casi nueve años y el LMFR mayor del mundo, el Superphénix de 1250 MWe de Francia, alcanzó su plena capacidad en diciembre de 1986. En mayo de 1987, como resultado de una fuga del tanque de almacenamiento de combustible externo, se procedió a su parada y tras su reparación satisfactoria y la modificación de los procedimientos de explotación, se puso nuevamente en marcha en enero de 1989.

En varios países se ha demostrado el quemado de combustible en exceso de 100 000 MWd/t y los experimentos indican que existen posibilidades para quemados superiores a 200 000 MWd/t tanto en el caso de los combustibles en forma de óxido como de los combustibles metálicos. Los quemados alcanzados en el Phénix y el PFR son de unos 130 000 MWd/t en condiciones análogas a las de los LMFR comerciales. En Francia, el Rei-

no Unido y los Estados Unidos se ha demostrado el cierre del ciclo del combustible en una escala notable. En Francia, la fabricación de combustible para el Phénix y el Superphénix ha brindado una amplia base de experiencia respecto de la producción de combustible de óxidos mixtos. También en Europa durante los últimos 15 años se ha logrado reelaborar alrededor de 25 toneladas de combustible de óxido gastado, y los desechos de los productos de fisión provenientes de la reelaboración se han vitrificado en previsión de su almacenamiento a largo plazo. En el Laboratorio Nacional de Argonne (ANL), Estados Unidos, se han logrado progresos sustanciales en el desarrollo del combustible metálico ternario (U-Pu-Zr) y la tecnología de reelaboración conexas. En los conjuntos combustibles de ensayo EBR-2 se han alcanzado quemados superiores a 185 000 MWd/t. También se ha avanzado significativamente en la piroelaboración del combustible metálico, que permite la recuperación de componentes valiosos de combustible, uranio y plutonio, y la eliminación de productos de fisión. Una característica notable de este proceso es que la mayor parte de los elementos actínicos acompañan al plutonio en todo el proceso y, en consecuencia, se eliminan de la corriente de desechos. En estos momentos se efectúan modificaciones en las instalaciones en que se halla emplazado el EBR-2 para demostrar este ciclo de combustible en mayor escala a mediados de los años noventa, incluidas la reelaboración, la fabricación del combustible y la gestión de desechos.

Es importante observar que la experiencia acumulada hasta el presente ha sido principalmente con reactores terminados antes de mediados de los años setenta y la tecnología desarrollada en los años sesenta o anteriormente. En los años más recientes se han dado grandes pasos de avance en la tecnología de los LMFR, adelantos que sólo se manifestarán en la próxima generación de centrales. Las nuevas direcciones técnicas para los diseños de la próxima generación denotan grandes logros en la investigación y el desarrollo, así como en la experiencia alcanzada más recientemente en las centrales en explotación. La clave ha sido aprovechar las propiedades favorables intrínsecas del LMFR para aumentar la seguridad y reducir el costo al mínimo. Quizás las tres propiedades más importantes estén relacionadas con la presión de trabajo esencialmente en la atmósfera del sistema de refrigeración del reactor, el gran margen establecido para la ebullición del refrigerante del reactor en su temperatura de trabajo, y la retroalimentación de una fuerte reactividad negativa del reactor con el aumento de la temperatura. Esas propiedades, conjuntamente

El Sr. Golan es Director de Sistemas de Energía Nuclear, Investigación y Desarrollo de Bechtel. El Sr. Leduc es Director Internacional y de Estrategia de Novatome, y el Sr. Nakagawa es Director Ejecutivo para el Desarrollo de la Ingeniería de la Japan Atomic Power Company.



con la capacidad del sodio para resistir las altas temperaturas, su compatibilidad con una amplia gama de materiales y su alta conductividad térmica y eléctrica, siguen desafiando a los diseñadores a producir un producto LMFR superior.

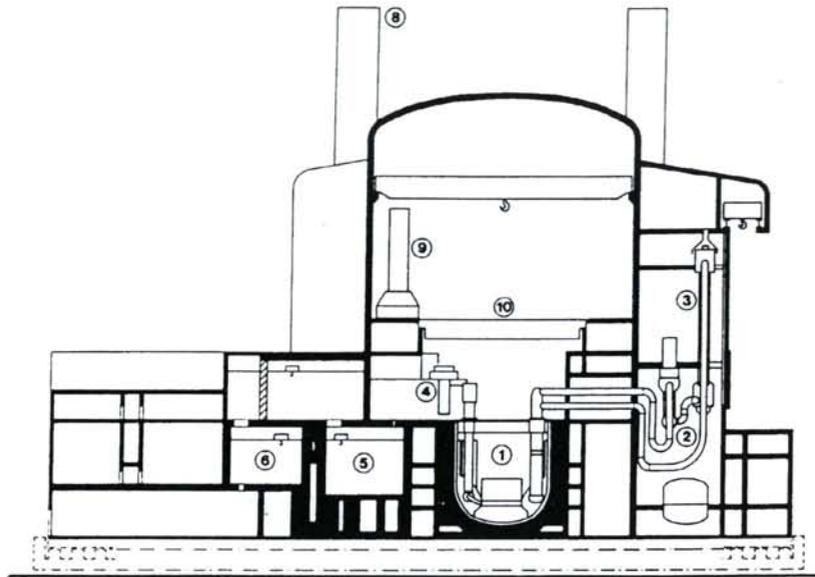
Hace muy poco, tras un proceso competitivo, los Estados Unidos decidieron centrarse en los reactores modulares pequeños (equivalentes de 471 MWt/155 MWe) alimentados con aleaciones metálicas ternarias. Los reactores modulares permiten un mayor trabajo de preensamblaje en el taller, mayores economías de producción en serie, dispositivos de seguridad pasiva más simples y adiciones de capacidad de generación más graduales. La aleación metálica también permite diseños del núcleo con respuestas benignas ante casos de accidente y el uso de procesos pirometalúrgicos compactos para el reciclado del combustible que podría facilitar un cierre económico del ciclo del combustible durante el período inicial de introducción de los LMFR. Por su parte, el Japón, la URSS, la India y los países europeos siguen actualmente una vía más tradicional orientada a los reactores monolíticos de gran tamaño (800 a 1500 MWe) alimentados con una mezcla de óxidos de uranio y plutonio, ya que consideran que los reactores grandes reportan economías de escala sustanciales tanto en la construcción como en la explotación. La experiencia acumulada en la construcción y la explotación inicial del Superphénix indica la posibilidad de que se reduzcan considerablemente los costos con las futuras centrales monolíticas de gran tamaño. La tecnología del combustible de óxidos mixtos está mejor establecida y se basa en la experiencia adquirida en la reelaboración y la fabricación del combustible del LWR. Así, actualmente existen otros enfoques respecto de la industria de los LMFR comerciales. Si bien los diseños específicos son diferentes,

los principios son similares y brindan las bases para la colaboración internacional.

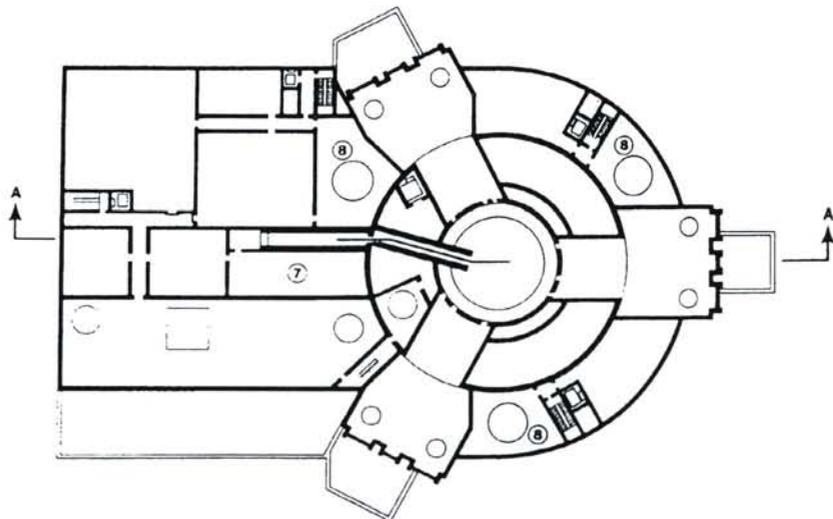
Estados Unidos. El objetivo fundamental de los Estados Unidos, bajo la dirección de la General Electric, es desarrollar un bloque de potencia de tamaño mediano (PRISM) que pueda aumentarse en forma de módulos y alcanzar mayores potencias nominales. Cada bloque de potencia consta de tres módulos de reactores de 471 MWt conectados a un solo generador de turbina de 465 MWe (*Véase la figura adjunta.*) He aquí algunos ejemplos significativos de las características innovadoras de la central: módulos compactos de reactor construidos en fábricas que pueden ser transportados por vía terrestre; empleo de combustible de metal ternario con reelaboración pirometalúrgica; parada y estabilización inherentes del reactor mediante las características de respuesta térmica y de radiactividad del reactor, incluso en condiciones de accidente extremadamente improbables; sistemas pasivos de extracción del calor de desintegración; aislamiento sísmico del reactor para altos márgenes sísmicos y una mayor flexibilidad para el emplazamiento de una central típica; contención consistente en una vasija de guarda alrededor de la vasija del reactor y un cierre del reactor con penetraciones soldadas herméticamente; utilización de bombas electromagnéticas y no de bombas mecánicas primarias; eliminación de sistemas de refrigeración auxiliares que consumen energía y generadores diesel de emergencia de seguridad; construcción de módulos con preensamblaje integral en el taller; construcción independiente de secciones de la central relacionadas con la seguridad y de tipo convencional; y certificación reglamentaria de un diseño normalizado basado en amplios ensayos previos de un módulo prototipo de tamaño natural para una amplia gama de sucesos normales y anormales.

Primer diseño compatible del EFR

- ① Circuito primario
- ② Circuito secundario
- ③ Generadores de vapor
- ④ Cofre para transporte de combustible
- ⑤ Celda para transporte de combustible
- ⑥ Almacenamiento del combustible gastado
- ⑦ Almacenamiento del combustible nuevo
- ⑧ Tubos de aireación DHR
- ⑨ Cofre de transferencia de componentes activos
- ⑩ Mesa polar



Section A-A



Europa. El principal objetivo en Europa, bajo la dirección del European Fast Reactor Utilities Group (EUFRUG), es crear una unidad de potencia (EFR) de 1500 MWe que cumpla los requisitos económicos y de seguridad del Reino Unido, Francia y la República Federal de Alemania. El diseño del EFR, que se basa en diseños nacionales europeos anteriores, como por ejemplo el CDFR, el SNR-2 y el Superphénix-2, y que realizan EFR Associates (Ansaldo, Belgonucléaire, Interatom, NCC, y Novatome), indica que se pueden alcanzar reducciones de costos significativas que propicien la competitividad económica con las actuales centrales LWR de Europa. (Véanse las figuras adjuntas.) Entre las características más notables del EFR que contribuyen a su viabilidad económica figuran las siguientes: combustible de óxidos mixtos con alto grado de quemado (más de 150 000 MWd/t); un reactor de piscina único de 3600 MWt con componentes de gran capa-

cidad para la transferencia de calor (tres bombas primarias, seis intercambiadores de calor intermedios, y tres o seis circuitos secundarios); una contención primaria compacta compuesta por la vasija y el cierre del reactor con un edificio del reactor cilíndrico de hormigón armado que constituye una contención secundaria; un sistema sencillo y directo para la eliminación del calor de desintegración del reactor; seis generadores de vapor de acero ferrítico de paso único y de tubos rectos; y un ciclo de vapor térmicamente eficiente (entrada a la turbina de 490°C/185 bar). También se realiza un gran esfuerzo a fin de aumentar la seguridad del EFR elevando la fiabilidad de los dispositivos de seguridad pasiva.

Unión Soviética. Sobre la base de la experiencia acumulada con cuatro LMFR en explotación (BR-10, BOR-60, BN-350 y BN-600), la URSS ha finalizado recientemente el diseño de la versión ampliada del BN-800 y ha comenzado la construcción de las centrales en dos

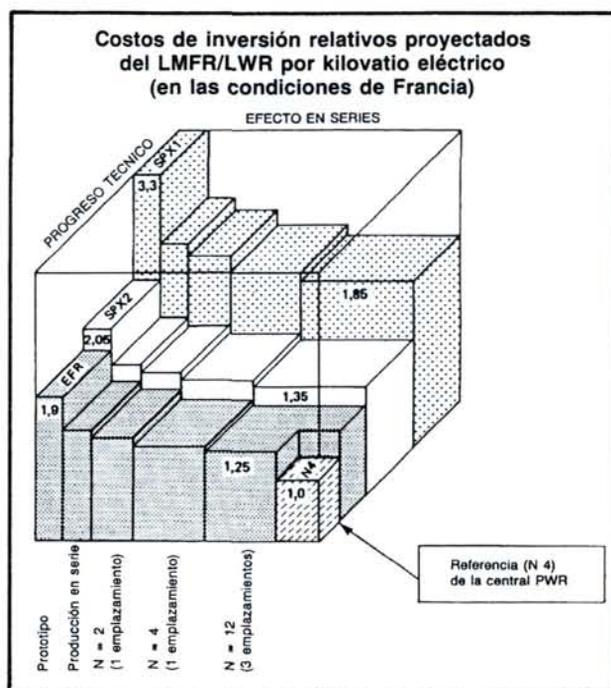
emplazamientos, Beloyarsk y los Urales meridionales. Aunque el BN-800 incorpora varias mejoras generales en la central, también utiliza al máximo los equipos fabricados para el BN-600. Por ejemplo, la vasija del reactor es del mismo tamaño que la del BN-600, si bien el tamaño del núcleo es mayor. Esto se logró reduciendo el blindaje en la vasija como resultado de la experiencia operacional del BN-600. Para mejorar el comportamiento del generador de vapor, se ha reducido ligeramente la temperatura del sodio secundario en comparación con la del BN-600 (505°C frente a 520°C) y la temperatura del vapor es también algo menor (490°C frente a 505°C). El BN-800 también utiliza un generador de turbina único. El próximo paso en la evolución del diseño en la URSS es el BN-1600, considerado como el prototipo para los futuros reactores comerciales. En 1988, se examinó el diseño y se tomó la decisión de continuar su desarrollo con objeto de mejorar sus características de seguridad y lograr mejores resultados económicos.

Japón. Sobre la base de la explotación satisfactoria del Joyo (11 años) y la experiencia de fabricación y construcción del prototipo Monju de 280 MWe, cuya criticidad está prevista para 1992, las compañías de electricidad del Japón están a punto de seleccionar las especificaciones fundamentales para el próximo proyecto de demostración del LMFR, que se espera que se comience a construir a fines de los años noventa. Luego de casi seis años de estudios sobre la reducción de los costos y el desarrollo complementario, es probable que la próxima central tenga una capacidad de 800 a 1000 MWe; utilizará combustible de óxido, así como un generador de vapor de paso único de acero ferrítico y arrollado helicoidal. Las decisiones fundamentales que aún deben tomarse están relacionadas con la elección entre la configuración del tipo piscina y la de circuito con entrada superior para el sistema de transferencia de calor, y el tipo de características antisísmicas que se necesitarían para satisfacer las condiciones de diseño para fuertes terremotos del Japón.

India. En la India, el reactor reproductor rápido de prueba (FBTR) alcanzó la criticidad en octubre de 1985. La experiencia operacional con este reactor se incorporará al diseño del reactor reproductor rápido prototipo de piscina (PFBR) de 500 MWe, sobre el cual se ha completado el diseño conceptual.

Viabilidad económica

Las centrales LMFR actualmente en explotación, incluida la Superphénix de 1250 MWe, se basaron principalmente en los criterios de seguridad del LWR y en márgenes de diseño excesivamente conservadores. Los nuevos datos e instrumentos de cálculo y la utilización de nuevos diseños innovadores del núcleo han permitido la concepción de criterios de seguridad únicos en relación con el LMFR, la compactación del bloque de potencia del reactor y la simplificación de los sistemas y estructuras auxiliares. La dependencia de la convección natural para la extracción del calor de desintegración, la ubicación de los sistemas relacionados con la seguridad muy próximos al reactor, la reducción al mínimo de los requisitos de potencia asociados a la seguridad y, por otra parte, el aprovechamiento de las características físicas favorables del sodio, han contribuido a la elabora-



ción de diseños más simples y con menos gastos de capital. Por ejemplo, la mayor comprensión de la termodinámica del sodio lograda gracias a las mediciones de temperatura efectuadas en el Superphénix ha permitido obtener una estructura más compacta para el EFR, y un peso potencial del acero al 62% por reducción de MWe en el sistema primario.

Una cuestión fundamental es el costo de inversión previsto para una central LMFR n-ésima en una serie en relación con una central LWR equivalente. (Véase la figura adjunta, en la que se ilustran las actuales expectativas sobre la base de la experiencia acumulada respecto del Superphénix y los estudios de diseño más recientes realizados en Europa.) En la columna izquierda de este gráfico se muestran las mejoras previstas a partir del progreso técnico que se alcance. En el EFR se esperan reducciones muy sustanciales en los pesos del acero de los componentes y en los volúmenes de hormigón por megavatio eléctrico en comparación con el Superphénix, con las consiguientes reducciones importantes del costo de inversión. Con el emplazamiento en serie del EFR, se esperan mayores reducciones de costos, como lo ha demostrado el programa de emplazamiento de unidades múltiples del LWR francés. Para el caso específico de las condiciones de Francia, se calcula que el costo de una central EFR n-ésima en una serie se reduciría a un nivel casi 25% superior al del costo de una central LWR avanzada comparable. Por otra parte, con un combustible de alto grado de quemado, se espera que el costo del ciclo del combustible del EFR sea significativamente menor que los costos de combustible de un LWR, aun cuando se alimente con uranio cotizado a precios módicos, con el resultado neto de que el costo de generación total estaría muy próximo al del LWR cuando el LMFR se produjese en serie.

Estudios recientes realizados independientemente en los Estados Unidos y el Japón han arrojado resultados

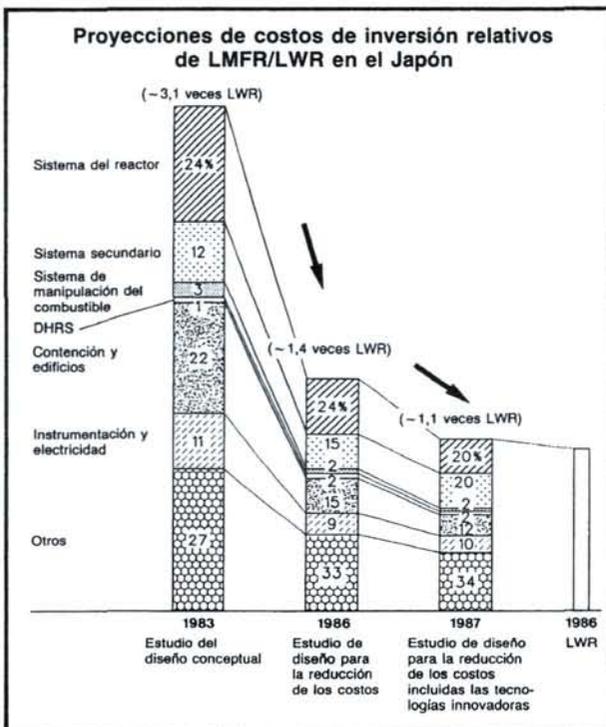


Sala de mando del reactor reproductor rápido Superphénix en Francia. (Foto: CEA)

análogos si no algo más alentadores. Las compañías de electricidad japonesas han utilizado una metodología general de estimación de costos basada en computadoras desarrollada con la cooperación de proveedores estadounidenses experimentados, para efectuar la intercomparación coherente entre los últimos diseños de LMFR avanzados y el reajuste de los costos sobre la base de la experiencia del LWR. (Véase la figura de la pág. 34, en la que se resumen las tendencias de los costos de inversión a partir de los estudios realizados recientemente en el Japón.) Estos estudios indican un potencial por índices de costo de inversión del LMFR y el LWR de alrededor de 1,1, índices de costo muy inferiores a 1,0 para el combustible metálico y de aproximadamente 1,0 para el combustible de óxido incluso a los precios corrientes del uranio. Las proyecciones de costos de los Estados

Unidos para las centrales LMFR de 1400 MWe normalizadas (tres bloques de potencia PRISM) indican relaciones entre el costo de inversión y el costo de generación total de casi una unidad. En el nivel actual de definición de los costos no es posible distinguir ninguna diferencia de costos significativa entre un LMFR y un LWR en las condiciones de los Estados Unidos. (Véase la figura adjunta). No obstante, todo aumento futuro en los costos del uranio beneficiará al LMFR. Así, en los estudios japoneses y estadounidenses se prevé que las futuras centrales LMFR sean económicamente competitivas con las centrales LWR cuando se construyan en serie como centrales normalizadas comerciales.

Es importante señalar que en estas comparaciones económicas relativas entre el LMFR y el LWR se reflejan las experiencias y las condiciones previstas en los países respectivos y no se toman en cuenta las grandes diferencias que existen entre estos países en lo que atañe al costo de inversión absoluto del LWR. La competitividad del LMFR en Francia probablemente sea un problema mayor que en otros países a causa de los bajos costos de sus centrales LWR. En consecuencia, el 25% de exceso de los costos de inversión del LMFR en Francia no significa forzosamente que una central tenga mayores costos de inversión en términos absolutos en comparación con los costos proyectados en los Estados Unidos o en Japón.

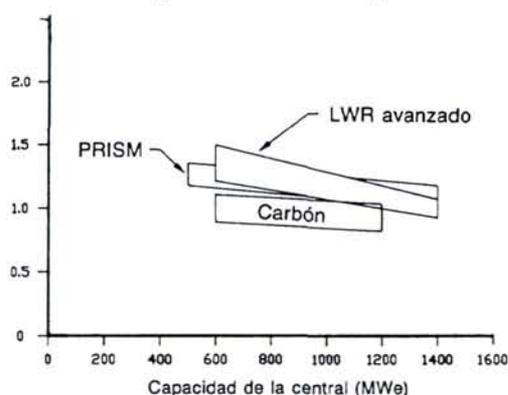


Despliegue comercial

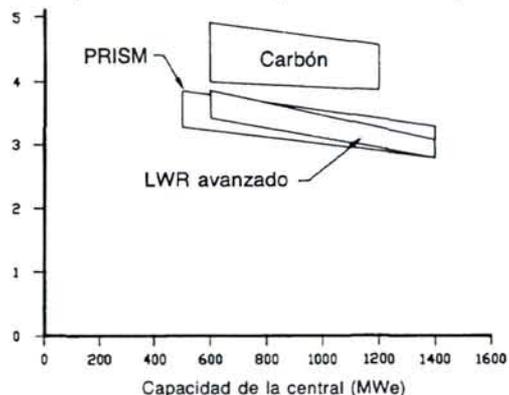
El criterio que prevalece actualmente en el Japón es que quizás las centrales tengan que ser sometidas a una o dos etapas adicionales sucesivas de demostración antes de que se pueda comenzar a comercializar el LMFR de unidades múltiples, tal vez en fecha tan lejana como el 2030. Actualmente en Europa se considera que después del 2010 las centrales LMFR comenzarían a reemplazar las centrales LWR clausuradas y a entrar en competencia con las LWR avanzadas de que se dispondría para ese entonces. Ello hace suponer que durante el próximo decenio poco más o menos se habrá construido una central de demostración económica del tipo EFR. En los Estados Unidos, como en Europa y el Japón, el proceso de adopción de decisiones pertinente para el momento

Competitividad de los costos del LMFR (PRISM) en las condiciones de los Estados Unidos

Costo de inversión relativo por 24 horas
(dólares de los Estados Unidos
por kilovatio eléctrico)



Costo de electricidad relativo
en la barra colectora
(milésimas de dólar por kilovatio hora)



oportuno del despliegue comercial del LMFR entraña muchas variables, como por ejemplo: la demanda de electricidad, la disponibilidad de recursos de combustible fósil y nuclear de costos módicos, las opciones nucleares y las restricciones ambientales derivadas del quemado del combustible fósil. En consecuencia, resulta muy difícil, si no imposible, prever el momento específico en que el LMFR será absolutamente necesario. Esta importante cuestión puede analizarse desde diferentes puntos de vista.

Según un punto de vista, se reconoce la gran inversión (más de 30 000 millones de dólares de los Estados Unidos en 1988) que ya se ha hecho a escala mundial en el desarrollo y la demostración de esta tecnología singular y el valor potencial que tendría el contar al final del siglo con esta tecnología como una opción energética asequible y como una póliza de seguro contra un número de posibles trastornos en el suministro de energía en el futuro. Debido a que el costo remanente necesario para que esta tecnología pueda comercializarse es relativamente modesto, esta perspectiva sugiere que la terminación de su desarrollo tiene sentido en términos económicos.

Conforme al segundo punto de vista, el criterio acerca de la energía global se verá influido por la explosión demográfica prevista en el mundo en desarrollo (un aumento de más de 1500 millones hacia el final del primer cuarto de siglo venidero), las expectativas económicas cada vez mayores de la población de todo el mundo y las crecientes preocupaciones sobre el medio ambiente, como la lluvia ácida y el "efecto de invernadero". Para facilitar el crecimiento económico del mundo en desarrollo sin dañar indebidamente el medio ambiente global, los países industrializados deben reducir la tasa de consumo de combustibles fósiles y de recursos de uranio de bajo costo y ahorrarlos para que puedan emplearse en centrales nucleares y de combustible fósil que sean asequibles y de fácil explotación en los países en desarrollo. Esto sugiere que los países industrializados deberán considerar la posibilidad de emplazar las centra-

les LMFR antes de lo previsto, incluso a un costo algo más alto durante el período inicial de introducción, con objeto de conservar los recursos de uranio de bajo costo para el mundo en desarrollo.

El tercer punto de vista tiene que ver con una relación simbiótica entre el LWR y el LMFR. En su mayoría, los núcleos de puesta en marcha para las nuevas centrales LMFR estarán alimentados con el plutonio extraído del combustible gastado del LWR. Durante su vida útil un LWR produce plutonio suficiente para poner en marcha una central LMFR de tamaño mediano. Por lo tanto, sobre la base de la capacidad del LWR prevista para el 2010, a escala mundial, debe existir plutonio suficiente para alimentar más de 200 gigavatios eléctricos de capacidad del LMFR. No hay mejor forma para "almacenar" y utilizar el plutonio que una central LMFR. El reciclado de plutonio en los LMFR también permitiría el "quemado" de los desechos transuránicos asociados de período extremadamente largo, en particular el neptunio 237 y otros actínidos secundarios, lo que reduciría el tiempo de aislamiento necesario para los desechos de alto nivel de decenas de miles de años a cientos de años para los productos de fisión solamente. Esta otra importante misión de los LMFR está suscitando interés a nivel mundial como resultado de la creciente preocupación sobre la evacuación segura de los desechos de período largo provenientes de las centrales nucleares.

Todos estos puntos de vista indican claramente que debemos continuar fomentando el desarrollo y la demostración del LMFR hasta que al menos se autoricen y demuestren plenamente los diseños normalizados de un LMFR viable desde el punto de vista comercial. El verdadero despliegue de esos diseños probados puede dejarse en manos del mundo mercantil después del final del siglo. El LMFR es la única tecnología probada que puede brindar nuevos materiales fisionables prácticamente ilimitados provenientes de las grandes reservas mundiales de uranio empobrecido, uranio natural de baja calidad y torio para satisfacer la mayor demanda de energía nuclear que se experimentará a partir del próximo siglo.