

# Tecnología y diseño avanzados para los reactores de agua pesada

*Algunos países están haciendo inversiones en el constante desarrollo de los HWR*

por J.J. Lipsett y J.T. Dunn

Actualmente hay 44 reactores de agua pesada (HWR) (comerciales) en explotación o en construcción en seis países. Durante varios años estos HWR han sido los primeros a escala mundial en el logro de elevados factores de capacidad anual y durante la vida útil, y han demostrado ser una alternativa viable de los reactores de agua ligera.

Además de alcanzar elevados factores de capacidad en las centrales de carga básica, los HWR, cuando se ha requerido, también han prestado un servicio muy bueno de seguimiento de carga. El comportamiento operacional de estos reactores en aspectos críticos como el combustible y los generadores de vapor ha sido excelente, y sus costos de carga de combustible han sido muy bajos debido al uso de combustible de uranio natural.

Los HWR representan una tecnología relativamente nueva, y se están explorando activamente sus posibilidades de desarrollo por medio de investigaciones de diseño de HWR avanzados en la Argentina, el Canadá, la India y el Japón.

## Características básicas de los reactores de agua pesada

Se han desarrollado dos tipos básicos de HWR comerciales. Uno de ellos, creado por Siemens/KWU en la República Federal de Alemania, emplea una vasija de presión que contiene el núcleo completo del reactor. El otro tipo, el reactor Candu, fue desarrollado en el Canadá por la Atomic Energy of Canada Limited (AECL) en colaboración con la Ontario Hydro e industrias manufactureras canadienses.\* Este reactor emplea varios cientos de tubos de presión en lugar de una vasija de presión única. Ambos tipos de HWR comerciales emplean agua pesada como moderador y comparten varias características básicas:

- Una economía neutrónica excelente que permite el uso práctico del ciclo del combustible abierto de uranio natural. También es posible emplear muchas otras opciones del ciclo del combustible.
- La recarga de combustible durante el funcionamiento del reactor, lo que ofrece varios beneficios fundamentales: factores de capacidad más elevados mediante la eliminación de paradas periódicas para la recarga de combustible, menos necesidad de reactividad inter-nuclear y mecanismos de control de la distribución del

## Reactores de agua pesada comerciales que se encuentran en explotación o en construcción

	Nº de unidades	Total de potencia generada (MWe)
<i>Tipo de vasija de presión</i>		
Argentina	2	367-750
<i>Tipo de tubos de presión</i>		
Argentina	1	648
Canadá	22	540-935
India	12	220-250
Pakistán	1	137
República de Corea	1	679
Rumania	5	705
<b>Total</b>	<b>44</b>	<b>25 013</b>

flujo, sustitución en funcionamiento del combustible defectuoso, y fácil acceso para la inspección en servicio.

● Los cambios de reactividad en el rango total de condiciones de explotación, desde la parada en frío hasta la potencia completa, son de poca magnitud. Esto disminuye la reactividad necesaria para utilizar los dispositivos de control, y reduce al mínimo las alteraciones de la distribución del flujo local así como posibles problemas debidos al excesivo calentamiento local transitorio del combustible. También facilita el control automático de la reactividad por circuito cerrado, lo que mejora la flexibilidad en el seguimiento de la carga.

La separación geométrica relativamente grande de las celdas del retículo de los HWR permite separar físicamente el refrigerante del moderador. En todos los HWR comerciales que se encuentran en explotación se emplea agua pesada a presión como refrigerante; sin embargo, algunos países han construido prototipos y unidades experimentales de HWR con tubos de presión, a fin de evaluar el empleo de dióxido de carbono, agua ligera, y fluidos orgánicos como opciones de refrigerantes. Recientemente, el Japón anunció su intención de construir un reactor de demostración de tamaño comercial (600 MWe), que emplea agua ligera en ebullición como refrigerante.

En la actualidad, la mayoría de los HWR emplean combustible de uranio natural, a menudo con objeto de independizarse de las instalaciones de enriquecimiento del uranio. El uso de combustible de uranio ligeramente enriquecido mejora significativamente el costo del ciclo del combustible y la utilización del uranio. El plutonio y el uranio procedente del combustible gastado de reactores de agua ligera (LWR) también pueden ser quemados eficazmente en los diseños actuales de HWR, lo cual establece un sinergismo entre los HWR y los LWR.

\* Candu es una marca registrada.

El Sr. Lipsett y el Sr. Dunn participan en el Proyecto sobre el reactor Candu Avanzado, Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Canadá.

A largo plazo, puede reducirse notablemente la dependencia del uranio mediante el uso del torio.

### Objetivos de diseño y desarrollo

El problema que afrontan los continuos programas de diseño y desarrollo es reducir los costos de generación y a la vez mantener una elevada seguridad nuclear y un buen comportamiento. También será importante lograr una mayor confianza en la seguridad de los diseños de los HWR avanzados, dado que esta constituye una tendencia mundial para todos los tipos de reactores. Ello se logrará demostrando que la mejora de la seguridad se basa en la experiencia operacional, en tecnologías comprobadas, y en una investigación y desarrollo con resultados concluyentes.

**Aumento de la seguridad.** Ya se ha demostrado la seguridad de los HWR durante las operaciones, y se ha venido mejorando continuamente la seguridad de las centrales en explotación mediante la incorporación de las experiencias adquiridas y el desarrollo tecnológico. En cuanto a las centrales futuras, varios países se han trazado una serie de objetivos para mantener o mejorar la seguridad de las centrales, de los trabajadores y del público, así como aumentar la confianza en esa seguridad.

Un objetivo que persiguen varios programas nacionales es la reducción de la carga radiológica sobre el personal de explotación y mantenimiento. Esto se está logrando por medios tales como la optimización cautelosa de la gestión del tritio, la detección temprana de fugas, la rápida localización del combustible deteriorado y su extracción durante el funcionamiento, el perfeccionamiento del blindaje y la purificación del refrigerante, así como un mejor control de los materiales de sellado. En algunos países, se persigue el objetivo conexo de mantener o reducir la emisión normal de la central, que ya es típicamente menos del 1% del límite de la emisión reglamentaria.

Se están creando centros de control Candu avanzados para mejorar la efectividad del operador y reducir la posibilidad de errores operacionales. Estos centros de control avanzados se fundamentan en los muchos años de experiencia con reactores Candu comerciales provistos de controles por computadoras digitales. Las mejoras incluirán la utilización de sistemas especializados y otras técnicas asistidas por computadoras para reducir la carga de trabajo del operador y aumentar la calidad de la información presentada.

Muchas de las cualidades básicas de los HWR proporcionan características de seguridad inherentes. Reviste interés en particular la gran proporción de agua respecto del combustible, dado que el moderador dota al sumidero de calor de un circuito de enfriamiento propio. El moderador refrigerado de los HWR del tipo de tubos de presión también proporciona un medio ambiente benigno para los dispositivos de control de la reactividad y permite el empleo de barras de caída totalmente independientes y sistemas de parada por inyección de veneno líquido. Esto contribuye a alcanzar bajas frecuencias de fusión del núcleo.

La adición de métodos de refrigeración pasivos al sistema de refrigeración del moderador se considera la medida lógica siguiente para mejorar esta característica.

La incorporación de la eliminación en el medio ambiente del calor de desintegración pasivo, por medio del enfriamiento de la contención o el enfriamiento del moderador, reduciría sustancialmente la probabilidad de accidentes graves y aumentaría el período de gracia del reactor.

**Reducción del costo.** Los gastos de inversión de la central son el aspecto más significativo de los costos de generación. Para reducir eficazmente los gastos de inversión, es necesario reducir el costo del equipo y de la mano de obra, así como reducir al mínimo el interés durante la construcción. Estos objetivos se satisfacen de diferentes maneras: 1) la introducción de cambios básicos en la disposición de la central con miras a reducir notablemente el calendario de construcción; 2) el desarrollo de grandes módulos de tuberías o elementos de construcción que pueden ser hechos en fábricas y transportados por mar o por tierra hasta el emplazamiento definitivo. Esto no sólo reduce el costo, sino que también mejora el calendario de construcción y el control de calidad; 3) el empleo de diseños tipo de centrales que sean idóneos para una amplia gama de emplazamientos, así como acuerdos contractuales para reducir el costo y el calendario de construcción; 4) se está mejorando e integrando la aplicación de computadoras al diseño, el proyecto, la documentación y los sistemas de gestión, con el propósito de reducir el costo directo de los recursos humanos y mejorar la calidad del trabajo.

**Mejora del rendimiento de la central.** Con miras a mantener factores de capacidad elevados, se están abordando varios objetivos de diseño. Se ha establecido como objetivo para algunos diseños nuevos un factor de capacidad durante la vida útil del 94%. En el próximo decenio, a medida que un número mayor de reactores llegue al final de su vida de diseño, más se concentrará la atención de las empresas de servicios públicos en la vida de diseño y en la posibilidad de ampliarla mediante la sustitución de componentes o la restauración. Dado que las centrales nucleares se caracterizan por un elevado gasto de inversión, y un bajo costo de explotación, sería atractivo desde el punto de vista económico que pudiesen funcionar por un período prolongado.

### Perspectivas de desarrollo y distribución

De acuerdo con los pronósticos energéticos, la demanda mundial de electricidad se elevará sostenidamente durante el próximo siglo debido a los aumentos de población, una mayor urbanización y el aumento previsto del consumo de electricidad *per capita*, en particular en los países que se encuentran en el umbral de la industrialización. Las aplicaciones domésticas e industriales de las electrotecnologías son flexibles, limpias, seguras y eficientes. La electricidad fiable y de bajo costo que se genera con la energía nuclear ofrece oportunidades de empleo no sólo en la tecnología nuclear, sino también en otras tecnologías avanzadas que buscan posiciones que les reduzcan los costos de producción.

**Unidades de generación de HWR de tamaño grande y mediano.** La mayoría de los HWR que se encuentran en servicio comercial tienen una capacidad de generación total que oscila entre 540 y 935 MWe. Se espera que esta escala de generación siga siendo de interés para

aquellos países que poseen grandes redes bien establecidas y para los que prevén una tasa de crecimiento relativamente alta.

El diseño de la central Candu-6 (anteriormente Candu-600), central normalizada de una sola unidad, se basó en la central Pickering A ( $4 \times 540$  MWe) de Ontario, Canadá, que tuvo resultados muy satisfactorios. Ya se encuentran en servicio cuatro centrales Candu-6 con HWR, de una sola unidad (dos en el Canadá, una en Argentina, y una en Corea del Sur), y hay cinco más en construcción en Rumania. La capacidad de generación total de estas nueve unidades es de 640 a 680 MWe. Durante los últimos cinco años, se ha mejorado el diseño Candu-6, que ahora se denomina Candu-6 Mark 2 y puede generar en total 800 MWe. En el diseño Candu-6 Mark 2 se han incluido mejoras relativas a la seguridad, la disponibilidad y la capacidad operacional. Además se le han introducido algunos cambios para reducir los gastos de inversión y el calendario de construcción.

La central de generación nuclear Darlington ( $4 \times 935$  MWe en total) está a punto de terminarse en Ontario, Canadá. La central Darlington representa el constante perfeccionamiento de las centrales de unidades múltiples Candu desarrolladas a partir de las centrales Bruce-A (generación total:  $4 \times 826$  MWe) y Bruce-B (generación total:  $4 \times 845$  MWe) que han estado en servicio durante varios años. Los avances en este diseño se han centrado en el perfeccionamiento de las estructuras principales, la reducción del número de componentes principales del sistema, mayor acceso a los componentes y sistemas, y mejor uso de las computadoras para el control de la central así como su empleo en el funcionamiento y vigilancia del sistema de seguridad.

En la República Federal de Alemania se originó la línea de HWR a presión de la Siemens a partir del reactor de investigaciones de fines múltiples MZFR (57 MWe). Esta línea de HWR, que emplea una vasija de presión, se continuó en el reactor Atucha-1 y en el Atucha-2, un HWR de 750 MWe que se está construyendo en la Argentina. Se han logrado mejoras en cuanto a reducción del contenido de tritio, barras de control hidráulicas, capacidad de almacenamiento de combustible, y en variantes del ciclo del combustible.

El programa de HWR de la India se ha fundamentado en unidades de HWR con tubos a presión y un régimen de 235 MWe. En la actualidad, se están preparando diseños nuevos de unidades gemelas de 500 MWe, y se han destinado seis unidades de 500 MWe para la explotación comercial a partir de 1997. Los diseños del reactor de 500 MWe incorporarán mejoras en la disposición de la central, la contención, los sistemas del reactor, la manipulación del combustible y la recarga durante el funcionamiento, así como en los sistemas de seguridad. Continúa siendo un importante tema subyacente en el programa de la India el desarrollo de las capacidades autóctonas en todos los aspectos de la investigación y el desarrollo, la ingeniería, la fabricación, la construcción y la explotación. Este tema se refleja en la incorporación de cambios evolutivos y la normalización de varias características de diseño.

En el Japón, el reactor térmico avanzado (ATR) moderado con agua pesada y refrigerado con agua ligera en ebullición se está diseñando para utilizarlo con

plutonio. El diseño del ATR se basa en el Fugen, un prototipo de reactor de 165 MWe que se encuentra en explotación comercial desde 1979. El rendimiento previsto del combustible MOX se ha comprobado con éxito en el funcionamiento del Fugen. Según el programa del reactor de demostración ATR de 606 MWe, la explotación comercial tendrá lugar en 1997.

**Unidades de generación HWR pequeñas.** Las unidades más pequeñas prometen adaptarse mejor a la tasa de bajo crecimiento de la carga, a sistemas de redes eléctricas más pequeños y a las presiones del financiamiento, factores que son típicos de la situación de muchos países.

El Argos, un nuevo HWR de 380 MWe desarrollado por una compañía de estudios técnicos de la Argentina en cooperación con la firma Siemens, de la República Federal de Alemania, representa un modelo avanzado de la serie de PHWR de la Siemens que incluye varias características para elevar la seguridad y la economía en la explotación, así como limitar los gastos de inversión.

En el Canadá, la AECL está desarrollando un nuevo modelo de Candu, el Candu-3, cuya generación total de electricidad es de 480 MWe. El diseño del Candu-3 incluye un aumento de la seguridad, un factor de capacidad durante la vida útil de 94%, un calendario de construcción de 30 meses y adaptabilidad a la mayoría de los emplazamientos en el mundo entero, tanto con una configuración de unidad única como de varias unidades. Se están celebrando conversaciones con empresas de servicios públicos canadienses y varios países, que se espera den por resultado encargos para la pronta construcción de una o más unidades.

En la India se está ampliando la base existente de cuatro HWR de 235 MWe, del tipo de tubos de presión, con ocho unidades que se construyen actualmente y cuatro más cuya explotación comercial está programada para después de 1996.

Además de la producción de electricidad fiable a bajo costo, la tecnología de los HWR tiene un uso potencial en la calefacción urbana y en la producción de calor industrial apropiado, por ejemplo, para la producción *in situ* de petróleo a partir de depósitos de arena impregnada de brea.

## Resumen

Los HWR comerciales han alcanzado muchos éxitos como sistemas de generación de electricidad. Entre estos figuran un historial de seguridad excelente, elevados factores de capacidad anual y durante la vida útil, bajo costo del combustible y una amplia gama de otras ventajas en el rendimiento que indican en su conjunto que la tecnología es fundamentalmente sólida.

Los HWR tienen excelentes posibilidades de desarrollo continuo. La separación de los sistemas de refrigeración y moderación permite el desarrollo de mejores características de seguridad. La capacidad conocida que aún no se ha explotado plenamente, así como las oportunidades futuras que brinda la flexibilidad en cuanto a ciclos del combustible avanzados y diversas aplicaciones, indican que la tecnología de los HWR seguirá proporcionando sólidos dividendos con respecto a las inversiones que se hagan en su investigación, desarrollo y diseño.