

Desarrollo del reactor avanzado de agua ligera en los Estados Unidos de América

Aplicación de varios conceptos de diseño

por J.J. Taylor, K.E. Stahlkopf y J.C. DeVine, hijo

En 1983 el Electric Power Research Institute (EPRI) inició un dinámico programa para desarrollar una nueva generación de reactores de agua ligera (LWR) para su incorporación a la red de compañías eléctricas de los Estados Unidos.* El programa se acometió a instancias de la dependencia consultiva del EPRI para las compañías, eléctricas, la cual se había percatado de que si no se emprendía un programa de desarrollo, la industria eléctrica no podría contar con un diseño de LWR mejorado y viable que permitiera su emplazamiento a fines de 1990 para hacer frente al crecimiento de la carga previsto para las compañías eléctricas. La creación de este programa se basó en dos aspectos fundamentales:

- El establecimiento de un sólido comité directivo de compañías eléctricas que orientara las actividades del programa y garantizara que la experiencia adquirida por estas compañías en la explotación de las 110 centrales nucleares comerciales del país se retroalimentara de forma eficaz en el diseño de la nueva generación.
- Una relación de trabajo estrecha y oportuna con la Comisión de Reglamentación Nuclear (NRC) para garantizar que los diseños elaborados a efectos del programa del reactor avanzado de agua ligera (ALWR) no sólo respondiese a las necesidades operacionales de las compañías eléctricas, sino también a los mandatos de reglamentación de la NRC, ayudando así a garantizar un proceso de concesión de licencias rápido y expedito respecto del producto final.

Desde el acto de fe hecho inicialmente por las compañías eléctricas que diseñaron el ALWR, el programa relativo a este reactor se ha afianzado y desarrollado hasta el punto en que hoy constituye un factor importante en la nueva tendencia surgida en la tecnología del LWR. Su idea inicial del próximo LWR ha cristalizado en un concepto de diseño de central con las características siguientes:

- es mucho menos complejo en comparación con las centrales nucleares existentes;

- su configuración es sólida y adaptable con un margen sustancial de diseño;
- se basa fundamentalmente en tecnología de fiabilidad comprobada; es "avanzado" en el sentido de que se aplican las mejores experiencias de las centrales existentes;
- se centra fundamentalmente en la interfaz hombre-máquina y en las necesidades del operador que debe asegurar su funcionamiento seguro y eficaz.

Una "central de tipo evolutivo"

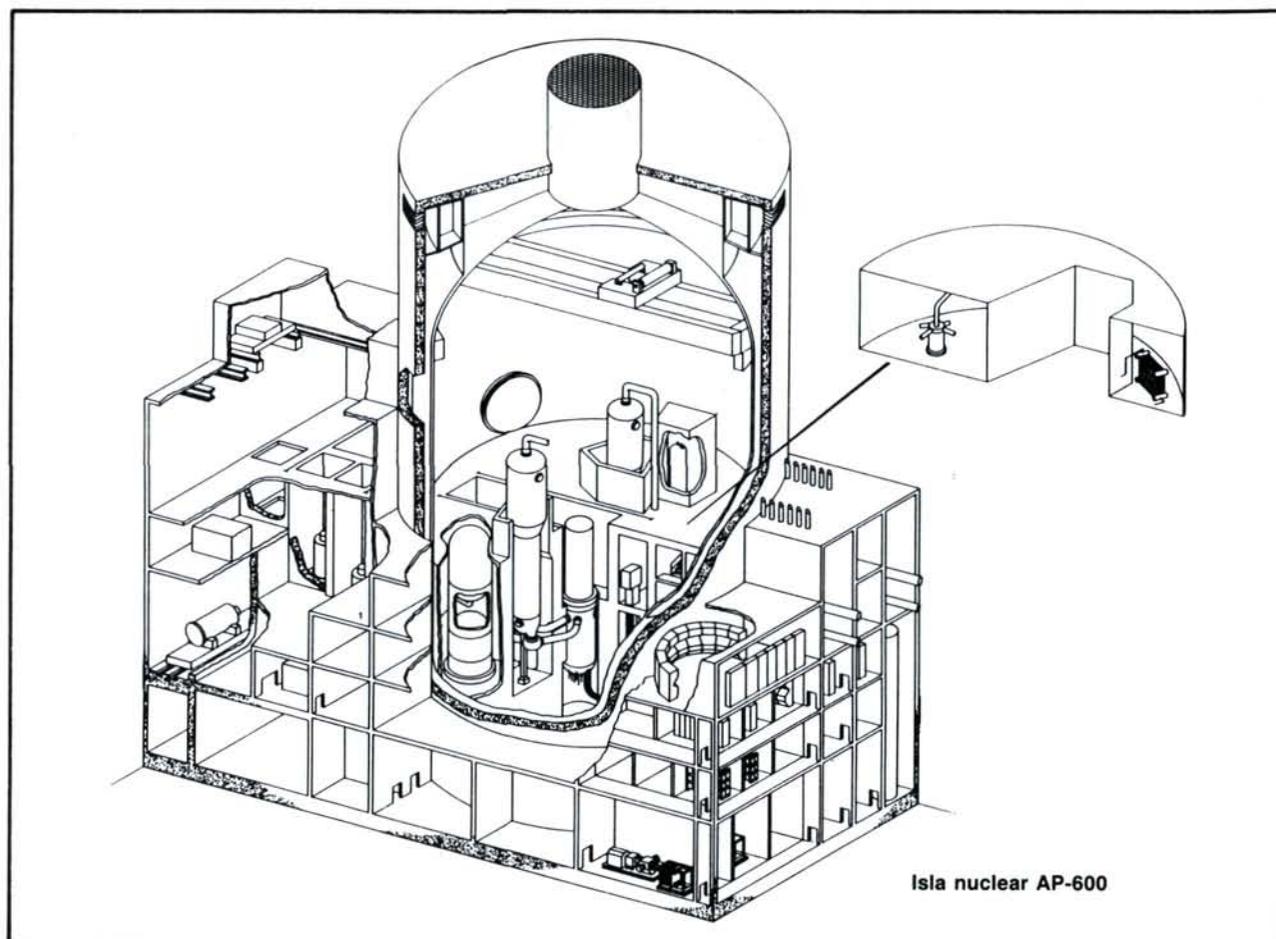
Para aplicar estos principios, el equipo de trabajo del programa ALWR se dio a la tarea de crear un documento en que se recogieran los requisitos de las compañías eléctricas, es decir, en que se hiciera una exposición general de los requisitos de comportamiento y diseño necesarios para una versión de una central ALWR "de tipo evolutivo".* Se prevé que esta central de tipo evolutivo sea una unidad de gran tamaño, de aproximadamente 1200 megavattios eléctricos (MWe), que simplifique y mejore considerablemente los sistemas de seguridad de la central así como sus sistemas de instrumentación y control. Este diseño proviene directamente de los actuales ALWR, y sus sistemas de seguridad y base de reglamentación se basan fundamentalmente en métodos convencionales. Como parte de la creación de este documento de requisitos, el equipo de trabajo del ALWR trabajó estrechamente con la NRC para definir y solucionar cuestiones pendientes importantes relativas a la seguridad del reactor e incorporar estas soluciones al documento de requisitos del ALWR.

La labor relacionada con este documento de requisitos sigue estando encaminada hacia el objetivo final de lograr un documento acabado y exhaustivo que refleje el consenso de los usuarios de las futuras compañías eléctricas y sea aprobado por un informe de evaluación de la seguridad de la NRC. Se han elaborado doce de sus 13 capítulos y ya el documento sirve de referencia a usuarios de los Estados Unidos y de todo el mundo, y sus indicaciones han influido en el diseño de reactores que podrían emplazarse a finales de este siglo.

El Sr. Taylor es Vicepresidente de la División de Energía Nucleoeléctrica del Electric Power Research Institute (EPRI) en Palo Alto, California, Estados Unidos. El Sr. Stahlkopf es Director del Departamento de Desarrollo de Materiales y Sistemas y el Sr. DeVine es Director Superior de Programas de la División de Energía Nucleoeléctrica.

* "Next Generation of Light Water Reactor", por Stahlkopf, K.E., Noble, D.M. y Taylor, J.J., *Proceedings of the American Power Conference*, volumen 48, Illinois Institute of Technology (1986).

* "US ALWR Program Set Out Utility Requirements for the Future", por Stahlkopf, K.E., DeVine, J.C., y Sugnet, W.R., *Nuclear Engineering International* (noviembre de 1988), y "Light Water Cooled Reactors — Expected Developments", por Culler, F.L., Stahlkopf, K.E., y Braun, C., *Revue Roumaine de Physique* (abril de 1988).



En el documento de requisitos del ALWR se incluyen mejoras de diseño en materia de seguridad y fiabilidad, entre ellas las siguientes: 1) aumentos de los márgenes térmicos; 2) reforzamiento de los requisitos relativos a la reactividad, es decir, el coeficiente negativo de temperatura durante todo el ciclo del combustible; 3) reducción de las temperaturas máximas del refrigerante del reactor; 4) mayor resistencia a la fragilidad en las vasijas del reactor; 5) vasijas del reactor fabricadas con piezas forjadas en forma de anillos de forma tal que no sean necesarias las soldaduras verticales; 6) una fuente de CA sustitutiva en el lugar; 7) remoción del calor residual por circulación natural; 8) sistemas de remoción del calor residual a mayor presión; 9) mayores existencias de refrigerante; 10) contenciones de mayor tamaño y solidez; 11) separación de las funciones del sistema de seguridad de las funciones del sistema normal de explotación; 12) una interfaz hombre-máquina mucho mayor, es decir, salas de control mucho más fáciles de operar en condiciones de seguridad.

Conjuntamente con el progreso técnico alcanzado por el programa ALWR hasta la fecha, este se ha convertido en centro de coordinación y catalizador de la cooperación entre los Estados Unidos y las compañías eléctricas internacionales, al dirigir el curso de futuros diseños de reactores nucleares. Desde su etapa inicial como programa incipiente del EPRI y las compañías eléctricas de los Estados Unidos, la labor sobre el ALWR se ha ganado el reconocimiento y respeto de los participantes estadounidenses y ha atraído el apoyo técnico y finan-

ciero de varios participantes de compañías eléctricas de Asia y Europa. En la actualidad son copartícipes activos en el programa ALWR compañías tales como Kansai Electric, Japón; Taipower, Taiwán, China; KEPCO, República de Corea; EdF, Francia; ENEL, Italia; y KEMA, Países Bajos. El efecto sinérgico de esta creciente colaboración entre los Estados Unidos y las compañías eléctricas internacionales ha sido muy significativo. A medida que se han incorporado más copartícipes internacionales al programa, éste ha acrecentado rápidamente su capacidad y credibilidad técnicas, en tanto que también ha aumentado la influencia de los resultados técnicos del programa en los proveedores estadounidenses e internacionales y estadounidenses de sistemas nucleares de suministro de vapor, lo que a su vez ha fomentado un mayor apoyo en los Estados Unidos y a escala internacional.

“Central pasiva”

A medida que se avanzaba en la formulación de los requisitos para una central de tipo evolutivo, el equipo de trabajo del programa ALWR comenzó a explorar un nuevo concepto de LWR, que denominaron “central pasiva”. * Esta central pasiva estaba concebida como un

* “The US Advanced Light Water Reactor Programme — A Case for Simple Passive Safety Systems”, por Taylor, J.J., y Stahlkopf, K.E., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (mayo de 1988).

pequeño reactor que utilizaría fundamentalmente medios pasivos como la gravedad, la circulación natural y la energía almacenada para el desarrollo de sus funciones esenciales de seguridad.

Se consideró que el concepto de diseño del ALWR pasivo tendría posibilidades de resultar atractivo a los inversionistas de las compañías eléctricas por varias razones:

- La simplicidad intrínseca del concepto de seguridad pasiva podría ofrecer la oportunidad de efectuar una simplificación en gran escala (con la reducción de un gran número de válvulas, bombas, tanques, instrumentos, y otros) que traería aparejado un mejoramiento desde el punto de vista de los costos y el calendario de construcción, la operabilidad de la central y la capacidad de mantenimiento.

- Al eliminar la dependencia de los componentes activos y la intervención humana, la central pasiva podría hacer frente a una amplia gama de condiciones adversas y riesgos internos y externos de la central, como por ejemplo, la pérdida total de energía eléctrica.

En los estudios sobre la central pasiva se escogió un tamaño de referencia de 600 MWe. Teóricamente, la central pasiva podría tener cualquier tamaño, pero es probable que las dimensiones muy superiores a los 600 MWe resulten impracticables o ineficaces en función de los costos dado el tamaño relativamente grande de los componentes que necesitaría (como la vasija del reactor y los tanques de agua de refrigeración). Por otra parte, las centrales de menor tamaño podrían resultar en sí una ventaja, ya que las centrales de 500 a 600 MWe pueden adaptarse con más facilidad a los sistemas de planificación de la capacidad de la mayoría de las compañías eléctricas estadounidenses. Asimismo, las centrales de menor tamaño posibilitan un plazo de construcción más breve, una modularización más amplia del equipo de la central, la repetición de la curva de aprendizaje y otros factores que pueden mejorar la economía general de la central.

En la primera fase de la labor de diseño de la central pasiva del ALWR se realizó una competencia de diseño en que se escogieron dos prometedores diseños conceptuales pasivos de 600 MWe, a saber, un reactor de agua a presión (PWR) y un reactor de agua en ebullición (BWR) para su posterior desarrollo. Ambos conceptos se basan en sistemas de seguridad pasiva, y constituyen notables avances en comparación con las centrales existentes. El más importante de éstos es el criterio de diseño según el cual no se necesitaría la acción de un operador hasta tres días después de un acontecimiento base de diseño para proteger la central o al público.

En la segunda fase de desarrollo de la central pasiva ALWR, que se llevó a cabo con la colaboración del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), se ampliaron los detalles de estos conceptos mediante extensos estudios técnicos y actividades de desarrollo relacionadas con el equipo y los sistemas.

Estos diseños de centrales pasivas, si bien se encuentran aún en su fase técnica preliminar, tienen muchas perspectivas de lograr un desarrollo satisfactorio. A continuación se ofrecen breves descripciones de los conceptos de diseño del PWR y el BWR:

Concepto de diseño del PWR. El concepto de seguridad pasiva del PWR, denominado AP-600, se desarrolla

Comparación cuantitativa global entre el AP-600 y el reactor tipo de agua a presión de doble circuito

Componentes	Reducción (%)
Válvulas	60
Bombas de gran tamaño	50
Tuberías	60
Intercambiadores de calor	50
Conductos ventilación, calefacción y refrigeración	35
Volumen de la estructura sísmica	60
Cable de control	80

por un equipo de diseño dirigido por la Westinghouse con la asistencia de Avondale Industries, Burns & Roe y otros.* Este PWR de 600 MWe cuenta con una mejor configuración del sistema refrigerante del reactor que utiliza bombas de refrigerante del reactor con motor blindado acopladas directamente a la salida del generador de vapor. (Véase la figura adjunta.) Este tipo de configuración elimina el "ramal de transición" del sistema de refrigeración del reactor (RCS), lo que reduce la resistencia global del sistema al flujo y mejora el funcionamiento en caso de que ocurra un pequeño accidente con pérdida de refrigerante (LOCA). Esta disposición simplificada también permite utilizar un soporte único, para el conjunto del generador de vapor y las bombas, lo que simplifica en gran medida la configuración de apoyo al circuito del RCS.

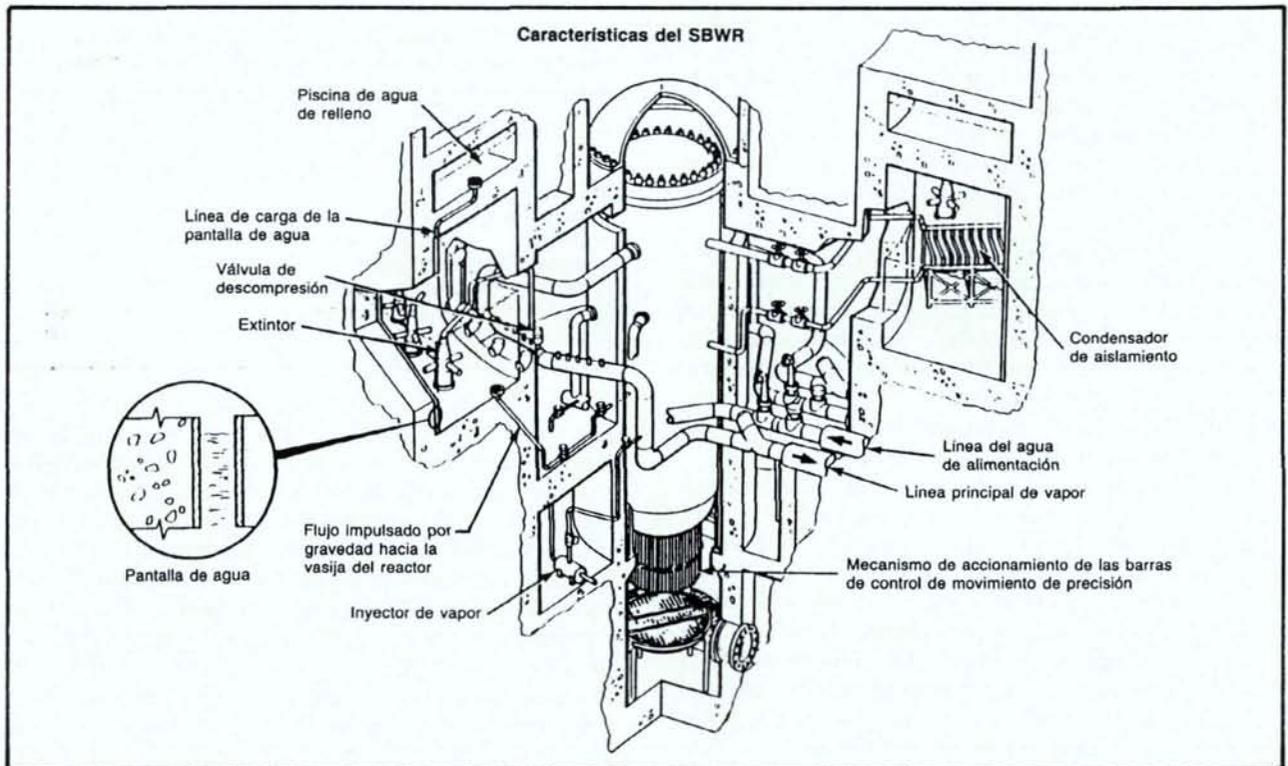
El AP-600 consta también de un intercambiador de calor de circulación natural que elimina el calor residual del RCS a temperatura y presión máximas, lo que excluye la necesidad de un sistema de seguridad de alimentación de agua de emergencia por bombeo. El sistema de refrigeración de emergencia del núcleo accionado por gravedad (ECCS) con tanques de relleno del núcleo totalmente presurizados, tanto en almacenamiento del agua de recarga en la contención y la capacidad de descompresión, eliminan la necesidad de un ECCS por bombeo.

Con el concepto AP-600 se logra de forma pasiva la función de refrigeración de la contención. El edificio cilíndrico de acero de la contención está rodeado de un edificio ventilado con blindaje de hormigón; la circulación del aire entre las dos estructuras elimina el calor del blindaje de contención. El agua se puede drenar por gravedad fuera del blindaje de acero con el fin de elevar el coeficiente de transferencia de calor por evaporación al menos el primer día después de un accidente.

Todas las características antes dichas cumplen las funciones de seguridad necesarias de la central pasiva, con la consiguiente reducción sustancial de las bombas, válvulas y sistemas de refrigeración y eléctricos de apoyo necesarios.

La eliminación del sistema activo de refrigeración de emergencia del núcleo con las bombas, válvulas y tuberías asociadas, conjuntamente con otras características de diseño pasivas, permite simplificar en gran medida el diseño en comparación con otras centrales convencionales. Esta simplificación del AP-600 muestra

* "AP-600 Development", por Vijuk, R. y Bruschi, H., *Nuclear Engineering International*, 33, pág. 23 (noviembre de 1988).



una reducción de componentes y piezas generales al compararse con una central nuclear convencional de 600 MWe diseñada por la Westinghouse (Véase el cuadro adjunto.)

Concepto de diseño del BWR. Un equipo de diseño dirigido por la General Electric Co., y que incluye la Bechtel y el MIT, está bastante avanzado en el desarrollo de una versión BWR del ALWR pasivo, denominada SBWR.* (Véase la figura de la página 16.)

El SBWR es una unidad de 600 MWe destinada a responder a objetivos igualmente ambiciosos, incluida la no dependencia de la acción del operador durante tres días después de un suceso en que el núcleo sufra daños y un período de construcción de tres años.

El reactor SBWR está diseñado para su explotación a plena potencia sin bombas de recirculación. La eliminación de las bombas y tuberías de recirculación permite un diseño más simple de la vasija del reactor, reduce la vulnerabilidad ante los accidentes con pérdida de refrigerante, así como los requisitos de mantenimiento. La vasija del reactor de mayores dimensiones necesaria para la circulación natural reporta un beneficio adicional, ya que permite disponer de mayores existencias de agua sobre el núcleo al momento de producirse cualesquiera condiciones anormales.

Las características de seguridad de los SBWR son ingeniosas y a la vez muy simples. Entre ellas se incluye: un sistema de refrigeración con drenaje por gravedad que mantendrá el núcleo cubierto y refrigerado en caso de que se produzca un accidente con pérdida de

refrigerante; un sistema de inyección de vapor que utiliza el vapor residual como fuerza impulsora para inyectar el agua en el reactor a fin de compensar una fuga cuando no se disponga de corriente alterna; un condensador de aislamiento ubicado en un tanque de agua elevado, que permite la eliminación del calor residual por circulación natural y una contención por relajación de presión que se refrigera de forma pasiva en condiciones de accidente.

La capacidad que brindan las características de seguridad pasiva en las centrales AP-600 y SBWR puede ajustarse a cualquier tipo de accidente base de diseño, por lo que no es preciso contar con un generador diesel de emergencia y seguridad o un sistema de distribución de CA clase 1E.

Reactor de seguridad integrada

Además de los reactores SBWR y AP-600 desarrollados en virtud del programa EPRI/DOE, se ha producido otra innovación en la carrera de diseño de reactores de agua ligera avanzados de carácter pasivo con la introducción del reactor de seguridad integrada (SIR), que desarrollan de forma conjunta Combustion Engineering, Rolls Royce and Associates, Ltd., Stone & Webster Engineering Corporation y el Organismo de Energía Atómica del Reino Unido.* Este concepto utiliza un sistema de refrigeración primario en que el núcleo del reactor, el presurizador y los generadores de vapor están contenidos en una sola vasija de presión del reactor, en uno de cuyos lados se ubican las bombas de refrigeración. Con ello se elimina todo el sistema de tuberías del sistema de circuito primario de refrigeración del reactor tradicionalmente asociado con reactores de

* "ASBWR, An Advanced Simplified Boiling Water Reactor", por Duncan, J.D. y McCandless, R.J., y "Improvements in Boiling Water Reactor Designs and Safety", por Wolfe, B.R. y Wilkins, D.R., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (mayo de 1988).

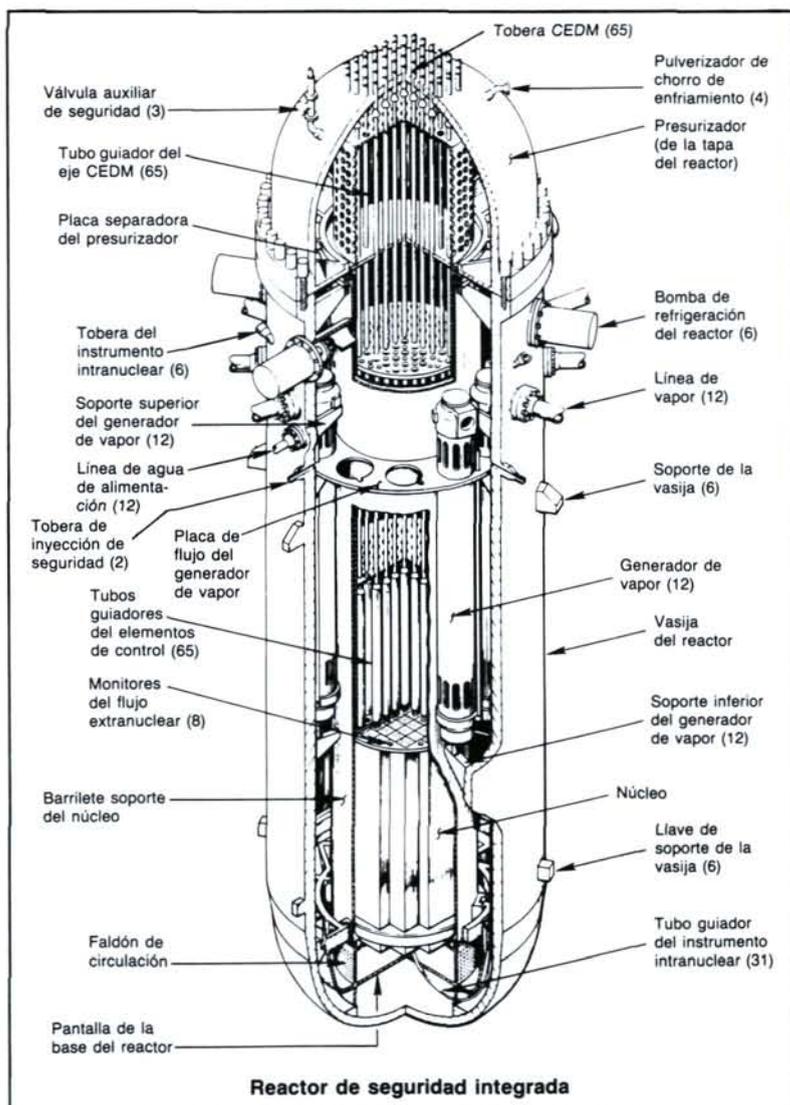
* "The SIR Project", por Hayns, M., *Atom* (junio de 1989).

agua a presión más convencionales. (Véase la figura adjunta para un diseño de sistema más simplificado.)

Los sistemas de seguridad del SIR son fundamentalmente pasivos, ya que se basan en la circulación natural y en una gran capacidad calorífica y no en medios activos como la energía y el equipo de CA. El reactor SIR tiene una capacidad de 325 MWe; su tamaño está limitado por los requisitos prácticos de construcción y transporte de la vasija del reactor, que contiene no solo el núcleo, sino también todos los sistemas del circuito primario. El SIR tiene varias características singulares en el sentido de que consta de una contención por eliminación de la presión y de 12 generadores cilíndricos de vapor abiertos, de los cuales sólo se necesitan 11 para alcanzar la potencia completa.

En el SIR el control del reactor se mantiene utilizando barras de control y venenos consumibles y se elimina la compensación de boro tradicionalmente asociada al PWR para lograr una mayor simplicidad del sistema y la protección contra la corrosión. Aunque en la actualidad no forman parte del programa ALWR del EPRI/DOE, los diseñadores del SIR han manifestado su intención de cumplir los requisitos del LWR pasivo desarrollado en virtud del programa ALWR.

Al principio, el desarrollo de esta central nuclear pasiva se consideró como un elemento interesante del programa ALWR, aunque no se le otorgó mucha importancia. parecía un concepto prometedor, pero requería una ardua labor y lo que era aún más importante, un cambio radical de filosofía técnica y de dirección en el diseño de reactores. No obstante, a medida que se ha avanzado en los trabajos se ha evidenciado un cambio notable en los intereses de las compañías eléctricas de los Estados Unidos y de todo el mundo. Las dos primeras etapas han resultado fructíferas desde el punto de vista técnico y auguran mejores resultados para el futuro. Los diseños elaborados cumplen a todas luces el concepto y los principios técnicos establecidos por el comité directivo de compañías eléctricas del ALWR al inicio del programa. Las centrales pasivas pueden simplificarse extraordinariamente en comparación con las actuales centrales, de diseño austero y márgenes de diseño conservadores, y son objeto de una notable acogida por parte de los operadores, sobre todo porque permiten largos períodos de gracia antes de que se requiera su acción en caso de condiciones anormales o de emergencia. Al mismo tiempo, se basan en fundamentos y en una tecnología de fiabilidad comprobada: el reactor pasivo es un "diseño retrospectivo" en que se incorporan las principales experiencias acumuladas (algunas quizás olvidadas



temporalmente) desde los inicios de la tecnología del LWR.

Una vez concluida la fase actual de trabajo (segunda fase de la central pasiva), programada para la primera mitad de 1990, el concepto de la central pasiva habrá sido plenamente investigado. Se habrá elaborado un documento de requisitos respecto de la central nuclear pasiva ALWR, que será aprobado por el comité directivo de compañías eléctricas del ALWR, y se habrá creado la base de reglamentación sobre seguridad pasiva.

Se habrán concluido los diseños conceptuales relativos a los diseños de centrales pasivas mencionados anteriormente, los que en su conjunto constituirán una base excelente para el desarrollo futuro de las centrales pasivas. con todo, queda aún mucho por hacer para que las centrales pasivas sean consideradas atractivas por los inversionistas, tanto desde el punto de vista técnico como el de la concesión de licencias.

Es necesario emprender un programa de seguimiento —tercera fase de la central pasiva— a fin de lograr que las centrales pasivas sean realmente un candidato viable del ALWR, que demuestren ser capaces de responder a las necesidades de las compañías eléctricas, los reglamentadores y el público, y que constituyan una sólida base para la inversión en las compañías eléctricas.