

# LAS CENTRALES NUCLEARES AVANZADAS

Por JAVIER GOICOLEA

Ingeniero de Caminos.

*Se describen las características principales de los cuatro tipos de reactores que ofrecen mejores perspectivas técnicas y económicas en los Estados Unidos. Se examinan después los costes de establecimiento y de la energía, comparándolos con los de centrales térmicas de combustible fósil. Se hacen consideraciones sobre las perspectivas futuras de cada uno de los tipos. Se pasa revista a los reactores de gas ingleses de la generación actual, y se describe el programa de desarrollo en curso.*

## Los reactores americanos.

La Comisión de Energía Atómica Americana ha realizado en el año en curso un estudio comparativo de centrales nucleares de diversos tipos, contratando con varias Compañías privadas los proyectos correspondientes.

Los proyectos realizados son los siguientes:

a) Centrales nucleares con reactor moderado por agua pesada (H.W.R.). El contratista ha sido Sargent and Lundy, asistido en la parte nuclear por Nuclear Development Corporation (N.D.A.).

b) Central basada en el reactor de agua a presión (P.W.R.). Fué contratada con Stone and Webster, asistida por Combustion Engineering.

c) Central con reactor de agua en ebullición (B.W.R.). Se contrató con Ebasco Services, asistidos por la General Electric Company.

d) Central a base de un reactor refrigerado por líquido orgánico (O.C.R.). Este concepto fué contratado con la Bechtel Corporation, asistida por Atomic International.

A estos contratistas les fueron asignados los siguientes objetivos:

a) Proyectar el tipo y el tamaño del reactor, para obtener la central más económica, cuya construcción pudiera comenzarse en julio de 1960.

b) Preparar un proyecto suficientemente detallado para determinar los costes de establecimiento y de funcionamiento.

c) En el caso del reactor moderado por agua pesada, debería ser capaz de funcionar con uranio natural, aunque el proyecto pudiera utilizar uranio enriquecido para hacerlo óptimo.

Es interesantísimo conocer el resultado de la evaluación hecha por la Comisión Americana sobre los proyectos enviados por los contratistas, ya que es el estudio más autorizado y serio existente sobre la situación real de la energía nuclear.

Como observación previa, hemos de decir que las centrales estudiadas no se pueden construir hoy.

Todas ellas necesitan investigación y desarrollo, si bien éstos se han tratado de mantener en un valor mínimo al fijar la fecha de julio de 1960 como límite para comenzar la construcción. Esto significa que las Compañías creen que tendrán resueltos los problemas técnicos existentes, en los proyectos que han realizado, para dicha fecha.

Los reactores que caracterizan a las cuatro centrales son los que ofrecen mejores perspectivas en los Estados Unidos para producir en fecha próxima energía eléctrica a precios competitivos con las centrales tradicionales de combustible fósil.

La central de agua pesada no ofrece perspectivas tan inmediatas, pero tiene la ventaja de poder utilizar uranio natural como combustible. El sistema a base de agua pesada tiene el inconveniente de ser muy sensible a las fugas, que contribuyen de manera importante al coste de la energía. Por otra parte, este tipo requiere más investigación y desarrollo que los otros. El reactor consta de un tanque de aluminio, que contiene el moderador (agua pesada), atravesado por unos tubos de Zircalloy-2 que albergan el combustible (óxido de uranio en barras). El refrigerante a presión (agua pesada), circula de abajo arriba por estos tubos, transportando el calor producido en el combustible. El refrigerante hierve dentro de los tubos, produciendo así el vapor necesario, que se separa del agua saturada en los tanques cabezales superiores, pasando posteriormente a la turbina.

Damos a continuación las características principales del reactor:

Temperatura del refrigerante a la entrada	259° C.
Idem íd. a la salida	268° C.
Calidad del vapor	14 %
Presión de vapor (seco y saturado)	54 Kg./cm. <sup>2</sup>
Temperatura del moderador	93° C.

Las inversiones necesarias para investigación y desarrollo de este sistema son de 642 millones de pesetas.

El reactor P.W.R. de agua a presión ofrece características y mejoras interesantes respecto a los tipos anteriores. En primer lugar, el diseño permite la ebullición nucleada por agua. El rendimiento ha mejorado notablemente gracias al aumento en la presión del vapor generado, que es el de 68 Kg./cm.<sup>2</sup>, y la adición en la turbina de un separador de humedad y recalentador intermedio. Se ha llegado así a un rendimiento total en la generación de la energía eléctrica del 34,5 por 100, superior incluso a las centrales térmicas más modernas. La capacidad de la central, que es de 236 000 kilovatios, está limitada por la imposibilidad actual de fabricar recipientes de presión mayores.

La construcción de esta central sería un gran paso adelante en la tecnología de reactores, pero es dudoso se puedan resolver para julio de 1960 los problemas técnicos que presenta.

El reactor B.W.R., en ebullición, de un tipo promovido técnica y comercialmente por la General Electric, es, de todos los que estudiamos, el que menos incógnitas presenta, debido a que se hallan en construcción la central de Dresden (Chicago), de 180 000 kilovatios, y la del Garellano (contratada por la Sociedad SIENN), en Italia, de 150 000 kilovatios.

La central proyectada, en nuestro caso, es de bastante más capacidad: 300 000 kilovatios. Pertenecen, como las citadas antes, al tipo llamado de ciclo doble, con circulación forzada. La presión del vapor es 68 kilogramos/cm.<sup>2</sup>, como en Dresden y Garellano, y la temperatura es la correspondiente al vapor saturado. Los problemas que plantea una turbina con vapor saturado han llevado a la General Electric a diseñar un nuevo tipo, provisto de dispositivos para la separación continua de la humedad, de un excelente rendimiento. Este mejora también por aumento del vacío del condensador, si bien esto queda compensado por una temperatura inferior en el agua de alimentación. El rendimiento total es del 31 por 100.

La central O.C.R. pertenece al tipo basado en reactores orgánicos, desarrollados por Atomic International. Las mejoras que presenta respecto a la central del mismo tipo de Piqua, de 11 400 kilovatios, actualmente en construcción, son notables. En primer lugar está el aumento de capacidad, ya que la proyectada ahora es de 300 000 kilovatios. En segundo lugar, el rendimiento, que pasa del 25 a un 31 por 100. Esta mejora se basa en dos características fundamentales: el uso del S.A.P. (polvo de aluminio y óxido de aluminio sinterizado), como envolvente en los elementos combustibles, y el permitir la ebullición nucleada en la zona de alto flujo del reactor. El S.A.P. tiene las propiedades de ser poco absorbente de neutrones y conservar resistencia relativamente elevada a temperaturas mucho más altas que el aluminio y otros metales utilizados para el mismo propósito. Se podría emplear acero inoxidable, como se hace en el P.W.R. y el B.W.R., anteriormente descritos, pero

ello requería un enriquecimiento del uranio mucho mayor.

De este modo se han alcanzado temperaturas mayores que en los otros reactores, junto con presiones pequeñísimas, característica muy ventajosa de los refrigerantes orgánicos del tipo de los polifenilos, tales como la mezcla Santowax-R, utilizada en este reactor como moderador y refrigerante. En efecto, la temperatura de este último, a la salida del reactor, es de 358° C., a una presión de 3 Kg./cm.<sup>2</sup>, lo que permite generar vapor a 40 Kg./cm.<sup>2</sup> y 349° C. Ello, unido a sólo un 4,2 por 100 necesario como potencia auxiliar, permite un rendimiento total del 31 por 100. Las incertidumbres técnicas del O.C.R. parecen mayores que en los tipos B.W.R. y P.W.R., debido a la mayor extrapolación en potencia que exige respecto a los prototipos. Por otra parte, requiere un esfuerzo de investigación y desarrollo muy extenso, y es dudoso que éste pudiera estar terminado para julio de 1960.

Para España, el O.C.R. ofrece un gran interés, ya que es igual en muchos aspectos (el refrigerante, el S.A.P., las temperaturas, etc.) al reactor de 30 000 kilovatios que Atomic International ha diseñado preliminarmente para la Junta de Energía Nuclear, proyecto en el que ha colaborado el autor de estas líneas.

Este reactor, igual que los dos anteriores, utiliza como combustible óxido de uranio en barras, ligeramente enriquecido (P.W.R., 2,6 y 3,4 por 100, en las zonas interior y exterior, respectivamente; B.W.R., 1,9 por 100, y O.C.R., 2,5 por 100).

Los proyectos presentan mejoras muy interesantes en el núcleo de los reactores, que permiten obtener mayores potencia específica y densidad de potencia. La selección cuidadosa de la relación combustible a moderador, la colocación de las barras de control, el uso de veneno consumible en el B.W.R., etc., son los factores que han hecho posibles tales mejoras. El grado de quemado del combustible aumenta también notablemente, siendo de 13 000 megavatios-día por tonelada, en el P.W.R., y 12 000 y 10 000, en el B.W.R. y en el O.C.R., respectivamente.

Como resumen de todo lo anterior, mostraremos la comparación económica, que no señala gran diferencia en los costes que se esperan obtener en cada uno de los tres conceptos P.W.R., B.W.R. y O.C.R. Los costes de la central de agua pesada son superiores, como mínimo, en 6 céntimos por kilovatio a los de los otros sistemas.

Los sistemas B.W.R. y O.C.R. tienen la potencia óptima para reducir al mínimo los costes de la energía, de acuerdo con las posibilidades técnicas en la construcción de turbinas. El sistema P.W.R. conseguiría una reducción de unos 4,2 céntimos por kilovatio-hora, de ser posible fabricar unidades de 300 000 kilovatios, pero esto es actualmente dudoso.

Comparación económica.

	P.W.R.	B.W.R.	O.C.R.	H.W.R.
Potencia (M <sub>w</sub> ) . . . . .	236	306	300	221
Inversiones (Ptas./Kw.) . . . . .	15120	174000	14220	19260

Los costes de la energía son los que figuran en la siguiente tabla, en céntimos por kilovatio-hora :

	P. W. R.	B.W.R.	O C.R.	H.W.R.	Central de carbón
Intereses fijos (14 %). . . . .	30,6	32,4	28,2	34,8	19,8
Inventario de agua pesada (12,5 % año) . .	—	—	—	9,0	—
Coste del combustible. . . . .	16,2-18,6	16,2-19,6	15-18	12-15	19,8
Entretención y explotación. . . . .	3,0	3,0	3,0	4,2	1,2
Pérdidas de orgánico o agua pesada. . . .	—	—	3,6	1,2	—
Coste total de la energía (cts./kwh) . . . .	49,8-52,2	51,6-52,8	51,6-52,8	64,8-70,8	40,8

Se han hecho las siguientes hipótesis para la comparación anterior. Emplazamiento idéntico en los Estados Unidos; vida de la central, treinta años; factor de utilización, 80 por 100; 1 dólar igual a 60 pesetas, y precios, los de Estados Unidos. Las dos cifras dadas en el coste del combustible, obedecen a que se han tomado dos diferentes grados de quemado: 13 000 y 10 000 Mwd./Tn., para los P.W.R., B.W.R. y O.C.R., y 7 500 y 5 000, para el H.W.R.

El coste del carbón empleado en la central térmica es 83,50 pesetas por 10<sup>6</sup> Kcal.

**Los reactores ingleses.**

El programa inglés, concentrado hasta ahora en los reactores de uranio natural, moderados por grafito y refrigerados por gas, ofrece también un considerable interés. La principal central en vías de construcción es la de Hinkley Point, de 500 000 Kw. de potencia, producida en dos reactores iguales.

Cada uno de los reactores va encerrado en una esfera metálica de 20,4 m. de diámetro, fabricada con chapa de 76 mm. de espesor, soldada *in situ*. La fecha propuesta para su terminación es a finales de 1962.

El rendimiento térmico de la central es del 26 por 100, presentando la característica de poder cargar y descargar el reactor estando la central en marcha.

Las características del vapor producido en los cambiadores de calor son 371° C. y 44 Kg./cm<sup>2</sup>.

El proyecto y la construcción están siendo realizados por el consorcio English Electric & Wicox-Taylor Woodrow.

Las inversiones tan elevadas en las primeras cen-

trales inglesas, han descendido en ésta a la cifra de 20 400 pesetas Kw./hora, y el coste de la energía que citan es solamente 45,6 céntimos/Kw.-hora, si bien las normas contables inglesas son distintas a las americanas, por lo cual las cifras no son perfectamente comparables.

Pero esta central no es la última etapa de desarrollo, pues los ingleses están trabajando intensamente en el perfeccionamiento de su sistema. Sus proyectos de desarrollo más importantes son el A.G.R. (reactor avanzado refrigerado por gas) y el H.T.G.R. (reactor refrigerado por gas a alta temperatura).

El A.G.R. no supone más que un paso adelante en la línea de los reactores del tipo de Calder Hall. Utiliza berilio como material envolvente del elemento combustible (el cual permite temperaturas más elevadas en el gas de refrigeración (575° C.) que el magnox, empleado anteriormente) y óxido de uranio enriquecido (1,65 por 100) como combustible. Así se obtiene un mayor rendimiento y un tamaño menor del reactor para iguales potencias. El refrigerante es CO<sub>2</sub> a 18 Kg./cm<sup>2</sup>.

La potencia de esta central es de 28 000 Kw., producidos en un grupo turbogenerador, y se trata de obtener vapor a 45 Kg./cm<sup>2</sup> y 454° C., es decir, de características muy superiores al de las centrales hoy en construcción. Se está construyendo en los terrenos de Windscale y la fecha prevista para su terminación es 1962.

No damos cifras de los costes de instalación y de la energía, porque se trata de una central cuyo propósito no es económico, sino simplemente el desarrollo ingenieril del sistema.

El H.T.G.R. es un proyecto más ambicioso, puesto que el objetivo es lograr una temperatura de salida en el gas de refrigeración de 750° C., es decir, mucho

más elevada que en cualquier otro reactor. Esta temperatura permite obtener un vapor de características iguales al de las modernas centrales térmicas y ofrece perspectivas de poder llegar a emplear la turbina de gas, lo que reduciría su coste (al prescindir de los cambiadores de calor) y elevaría el rendimiento térmico muy significativamente. El combustible proyectado varía radicalmente de los empleados hasta ahora. Cada elemento combustible está formado por 7 barras juntas, en distribución hexagonal, que constan de una capa envolvente al exterior, de grafito, y una mezcla de grafito, uranio 235 y torio en el interior. Ello da la ventaja de que no se introduce un material absorbente, como suele ser la envolvente metálica de otros tipos de elementos combustibles. En cambio, pese a los esfuerzos realizados para conseguir un grafito impermeable, su naturaleza porosa hará muy difícil el evitar el escape de productos de fisión al refrigerante, lo cual dará lugar a unos circuitos contaminados, altamente radiactivos, difíciles y peligrosos de operar.

Parece ser que el refrigerante escogido será el helio, debido a su poca absorción de neutrones, y a que no reacciona con el grafito y los otros materiales, como ocurriría con el  $\text{CO}_2$  a tan elevada temperatura.

Este concepto es el objeto de un proyecto llamado Dragón, en el cual colaboran doce naciones europeas miembros de la ENEA (Agencia Europea de Energía Nuclear) y del Euratom. Consta de dos etapas: la primera es la construcción del reactor Zenith, de potencia cero, y que se pondrá en funcionamiento a fines de 1959. La segunda, ya en marcha, es la construcción de un reactor de 10 000 Kw. de energía térmica en Winfrith Heath. No se piensa en generar energía eléctrica en este prototipo.

Basadas en estos conceptos, las Compañías inglesas han enviado proyectos para barcos mercantes con propulsión nuclear, en concurso abierto en Inglaterra recientemente.

La General Eléctrico-Simon Carves ha redactado un diseño, fundado en el A.G.R., pero con importantes mejoras, que reducen los gastos de instalación, según ellos, a 10 000 ptas./Kw., cifra que, de confirmarse prácticamente, sería sensacional, y que aún sería menor para reactores de mayor potencia.

### Resumen.

Resumiendo la exposición anterior, vemos que, en un inmediato futuro, la energía nuclear no puede competir en precios con las centrales térmicas de combustible fósil. Pero se prevé que la situación cambiará en un plazo de seis a siete años, es decir, en 1965 ó 1966, y a partir de entonces la energía nuclear será más barata que la producida por los medios tradicionales.

### Referencias.

1. A.E.C. Summary and Evaluation Report of Four Power Reactor Design & Studies, T.I.D.-8504 (mayo 1959).
2. T.I.D.-8500, sobre el proyecto B.W.R.
3. T.I.D.-8501, sobre el proyecto O.C.R.
4. T.I.D.-8502, sobre el proyecto P.W.R.
5. T.I.D.-8503, sobre el proyecto H.W.R.
6. Conferencia de Ginebra, 1958, P./312. Advances in the design of gas cooled graphite moderated reactors.
7. Conferencia de Ginebra, 1958, P/314. The possibilities of achieving high temperatures in a gas-cooled reactor.
8. *Nuclear Engineering*, vol. IV, núm. 39 (1959).
9. *Nuclear Power*, vol. IV, núm. 36 (1959).