

DIEZ AÑOS DE ENERGIA DE ORIGEN NUCLEAR

Han transcurrido diez años desde que la primera central nuclear comenzó a suministrar energía eléctrica en Rusia; a su vez, este acontecimiento se produjo doce años después de lograrse en Chicago la primera reacción controlada en cadena.

Estos dos períodos constituyen etapas de decisiva importancia en el camino que lleva a la energía atómica desde el terreno de las ideas abstractas al de su aplicación industrial corriente. Les precedió otro período de investigación pura y de trabajos de laboratorio que culminó con la realización, por Enrico Fermi, de un sistema mediante el cual se podían controlar las fuerzas encerradas en el átomo. Seguidamente se hizo necesario encontrar los medios de utilizar la reacción en cadena con fines prácticos y en escala industrial. Por último, y una vez demostrado en 1954 que tal aprovechamiento era técnicamente factible, faltaba todavía convertirlo en un proceso económico.

Todo esto exigía resolver innumerables problemas de carácter teórico y técnico, desde los problemas esenciales de la física, proyecto y construcción de reactores, hasta cuestiones secundarias relativas al equipo auxiliar. No sólo era preciso utilizar en escala industrial toda una serie de nuevos materiales que, hasta entonces, sólo se habían manipulado en el laboratorio, sino también de que la radiactividad en gran escala daba una nueva dimensión a las operaciones industriales. En efecto, incluso los metales de empleo corriente en la industria pueden comportarse de una manera anómala después de una prolongada irradiación en las condiciones de funcionamiento propias de una central nuclear. Además, las radiaciones planteaban el problema del blindaje y el de idear medios para llevar a la práctica en gran escala complejas operaciones químicas y metalúrgicas en condiciones económicas satisfactorias, proporcionando, al mismo tiempo, una completa seguridad al personal.

Diffícil resulta encontrar un precedente al esfuerzo que durante el pasado decenio han venido desplegando las naciones que se han colocado a la cabeza en el desarrollo de la energía de origen nuclear. Esto se debe a que la "energía atómica" no constituye una rama particular de la ciencia o de la tecnología que dispone de sus propios especialistas. Por el contrario, el átomo interviene en una gran diversidad de técnicas que requieren especialistas de múltiples disciplinas. Lo mismo puede coadyuvar a la realización de los ensayos biológicos más delicados que mantener en funcionamiento una gran central nucleoelectrónica o remover millones de toneladas de tierra. Por ello, una central nuclear es el resultado de los esfuerzos combinados de físicos, químicos, metalúrgicos, ingenieros y otros muchos especialistas.

La central nuclear ha hecho sus pruebas desde el punto de vista de la técnica y de la ingeniería. La tercera fase de su evolución ha consistido en lograr que llegue a competir, en el terreno económico, con otras posibles fuentes de producción de energía, meta que, al parecer, estamos alcanzando ya, si bien con un ritmo algo más lento que el previsto hace diez años.

El mundo da muestras de sentirse hambriento de energía -especialmente de energía eléctrica- y, en los países adelantados, el índice de inversiones en los recursos energéticos tiende a ser superior al índice general de nuevas inversiones. La posibilidad de que se acentúe la escasez de los combustibles fósiles que puedan obtenerse a precios razonables ha venido constituyendo un constante motivo de preocupación. Para satisfacer la creciente demanda, se ha procedido una y otra vez a ampliar los recursos disponibles, bien mediante el descubrimiento de nuevos yacimientos, tales como los campos petrolíferos del Oriente Medio y del norte de Africa, bien mediante nuevos métodos de explotación, tales como la extracción mecanizada del carbón y la perforación de pozos de petróleo submarinos, e incluso mediante nuevos métodos de utilización del combustible. Ahora bien, todo ello se basa en el aprovechamiento de recursos limitados y, dado que los mejores de ellos se han agotado, es lógico que los costos tiendan a aumentar.

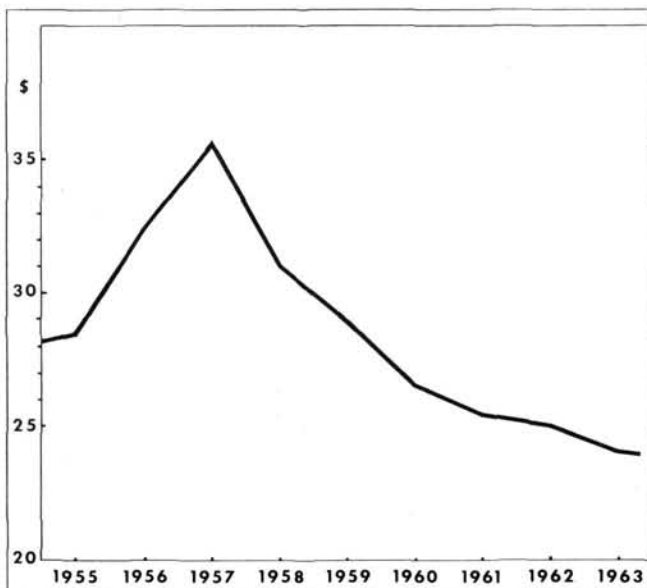
Hubo un período en el que los temores que suscitaba tal escasez llegaron a ser tan hondos que con ello se le dio a la energía nucleoelectrónica comercial su primer gran impulso. Era inevitable que las mentes se volvieran hacia la nueva fuente de energía que se había aprovechado con fines bélicos, como medio para compensar la insuficiencia de los recursos energéticos. Cuando por vez primera la energía nucleoelectrónica se hizo realidad, proliferaron las especulaciones fáciles sobre ese medio de obtener energía barata y en cantidades prácticamente ilimitadas, y entre los temores que se abrigaban sobre una escasez de energía de origen tradicional y las esperanzas cifradas en una abundancia de energía de origen nuclear, prevalecieron estas últimas, con un exceso de optimismo, hasta fines de 1957.

Los países industrialmente adelantados se embarcaron en vastos programas de investigación y desarrollo con dos metas principales: la de satisfacer sus propias necesidades energéticas, y la de crear una industria nuclear capaz de satisfacer la demanda de los mercados de exportación, a la vez que las necesidades interiores. En el Reino Unido predominó la primera de esas consideraciones, en tanto que la segunda imperó en los Estados Unidos.

Hacia 1950, varias naciones decidieron dar un atrevido impulso al desarrollo de la energía de origen nuclear. En aquella época, toda la Europa occidental, y en especial el Reino Unido, sufrían las consecuencias de una escasez de carbón que se temía que fuera agudizándose cada vez más. En 1955 el Reino Unido dio a conocer un plan de construcción de centrales nucleares destinado a superar esa situación deficitaria. En un plazo de diez años se construirían doce centrales con una capacidad total de 1 500 a 2 000 MW. Estas centrales se sumarían a la de Calder Hall y a otras del mismo tipo que estaban destinadas principalmente a producir plutonio, pero que generaban electricidad como subproducto. Más tarde se elevó aún más el objetivo perseguido, de modo que actualmente se prevé que, para 1969, las centrales nucleares representarán una potencia de unos 5 000 MW, o sea, el 12 por ciento del total de la potencia instalada en el Reino Unido.

Sin embargo, en 1957-1958 la situación experimentó un cambio radical. Se descubrieron nuevos yacimientos de petróleo, se redujeron los fletes marítimos y la escasez de combustible se transformó súbitamente en excedente. Las minas de carbón habían ido mejorando gradualmente sus métodos de explotación y su equipo, elevando así su rendimiento. En varios países -tales como la Alemania occidental- se inició un proceso de racionalización tan pronto como disminuyó la presión ejercida sobre el suministro de carbón. Se procedió al cierre de los pozos antieconómicos y se aumentó el número de máquinas empleadas. La producción experimentó un considerable aumento: por ejemplo, de 1957 a 1961 el promedio de aumento anual de la producción minera fue del 7 por ciento, cifra muy superior al índice de aumento correspondiente al conjunto de la industria.

Precio del petróleo bruto (por barril) en el Reino Unido.
(Boletín Mensual de Estadística de las Naciones Unidas)



La relativa abundancia de carbón y de petróleo, unida al mejoramiento de los métodos de explotación, dio lugar, como es natural, a una disminución de los precios de los combustibles clásicos en el mundo entero. Otra característica de este período fue la elevación de los tipos de interés. Como el monto de las inversiones para las centrales nucleares es considerablemente superior al de las centrales clásicas, estas últimas se ven favorecidas en relación a las primeras cuando el tipo de interés es elevado.

De esta forma, al cabo de unos pocos años pudo apreciarse que las previsiones según las cuales la energía nucleoelectrica podría competir en regiones importantes con la de origen tradicional hacia 1965, resultaron prematuras. La urgencia se hizo sentir menos y disminuyó el ritmo de desarrollo de los planes nacionales de producción de energía nucleoelectrica. También se modificaron un tanto las perspectivas a largo plazo de la situación en materia de combustibles. En 1962, la Conferencia Mundial de la Energía, con la cooperación de los gobiernos de diversas naciones, realizó un estudio panorámico de los recursos energéticos y una evaluación de las reservas de combustibles fósiles -hulla, lignitos, turba, petróleo, aceite de esquistos y arenas bituminosas y gas natural- que probablemente podrían aprovecharse en condiciones económicamente satisfactorias. El equivalente en carbón se evaluó en total en unos 3 billones de toneladas, cantidad que representa de 700 a 800 veces el consumo anual del mundo en la hora actual. Por otra parte, el índice de consumo aumenta constantemente, habiéndose elevado en un 60 por ciento durante el pasado decenio, sin que nada sugiera que ese aumento vaya a tener fin.

La conclusión extraída del mencionado estudio es que, por lo que respecta al mundo considerado en su conjunto, no reina escasez de energía. El problema es de índole económica. En efecto, los costos varían considerablemente según las regiones debido a la distribución desigual de los recursos y a los elevados gastos que con frecuencia entraña el transporte de los materiales y de la energía en sus diversas formas.

Este es el panorama que ha servido de fondo a los progresos recientes registrados en la esfera de la energía de origen nuclear. En algunas regiones, esta energía puede competir, marginalmente al menos, con la de otras fuentes, y las naciones que han emprendido intensivos programas de desarrollo han visto reafirmada su confianza, siendo únicamente el momento en que ha de alcanzarse esa capacidad de competencia lo que constituye el factor variable en este proceso.

Programas nacionales

Los objetivos principales de los programas nacionales de investigación y desarrollo eran, al iniciarse su ejecución, adquirir conocimientos y experiencia, formar personal de diverso grado de capa-

citación, y sentar los cimientos de la ingeniería nuclear y de las industrias conexas. La experiencia previamente adquirida con la producción de armas nucleares sirvió de punto de partida para algunos de los países que se situaron en cabeza en el desarrollo de tales actividades, pero otros, que no habían pasado por dicha etapa, se apresuraron a ganar terreno para ponerse a la altura de aquéllos.

Hace diez años eran muchas y muy diversas las posibilidades de elección llegado el momento de planear un reactor de potencia: el combustible, el refrigerante, el moderador, el empleo de neutrones rápidos o de neutrones térmicos para el proceso de fisión, la utilización de sistemas reproductores, etc.; todos estos elementos ofrecían cierto número de alternativas. No obstante, en un principio fue la simplicidad lo que se impuso, quedando para una fase ulterior de la aplicación industrial la introducción de perfeccionamientos tales como el proceso de reproducción.

La elección de un determinado sistema dependía en cierta medida de las condiciones nacionales. Los Estados Unidos disponían de una gran planta de difusión construida en un principio con fines militares. Esta planta separa el uranio fisionable, ^{235}U , del uranio natural, y ha proporcionado a los Estados Unidos combustible "enriquecido" para reactores de potencia, es decir, combustible en el que la proporción de ^{235}U es mayor que en el uranio natural. Partiendo de esta base, ha sido posible idear y construir reactores de agua hirviente y de agua a presión, cuyas características ofrecen considerable interés.

Por el contrario, el Reino Unido y Francia, al no disponer de una fuente análoga de enriquecimiento del uranio, prefirieron centrar sus primeros esfuerzos en los reactores refrigerados por gas y con moderador de grafito, en los que se emplea uranio natural como combustible. Los gastos de inversión de estos reactores son más elevados que los de las instalaciones americanas que utilizan agua, pero los costos del combustible son inferiores. La Unión Soviética también ha construido o iniciado la construcción de varios reactores de agua, y el Canadá está trabajando en el desarrollo de reactores que utilizan agua pesada como moderador y uranio natural como combustible.

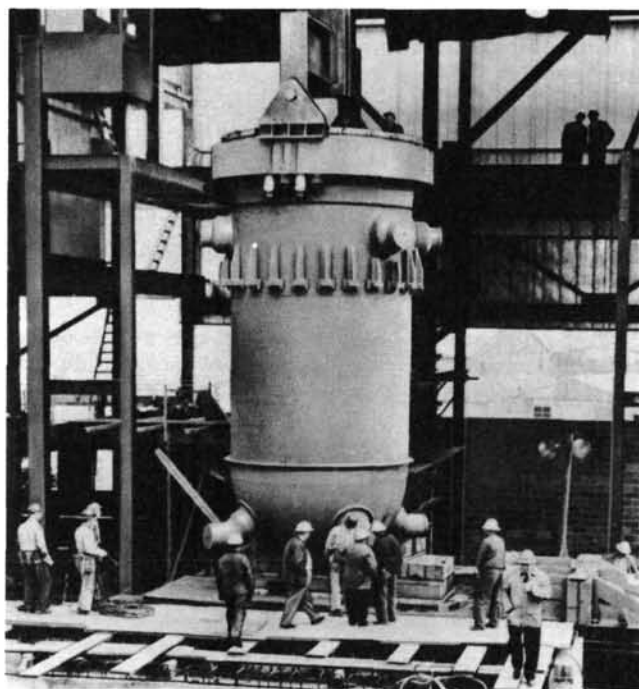
Además, en diversos países se han construido instalaciones experimentales y prototipos de otros muchos reactores, algunos de ellos meras variantes o perfeccionamientos de sistemas ya establecidos, y otros basados en principios radicalmente distintos y más avanzados.

Los pormenores que a continuación se dan sobre algunos programas nacionales no pretenden constituir una enumeración completa o detallada, sino más bien servir de ilustración de las diversas corrientes que imperan en el desarrollo de los reactores de potencia actualmente en funcionamiento.

Estados Unidos de América

En los Estados Unidos, las primeras investigaciones sobre reactores se dedicaron a cuestiones tales como la producción de plutonio y la propulsión de buques, y en 1953 entró en servicio el primer prototipo de reactor de agua a presión, en el que se empleaba agua ligera y uranio enriquecido. Estas investigaciones sirvieron de punto de partida para iniciar, en el mencionado año, un programa quinquenal de carácter experimental para el desarrollo de la energía de origen nuclear con fines civiles.

Aunque los Estados Unidos cuentan con abundantes recursos energéticos tradicionales en la mayor parte de su territorio, su programa de investigaciones y desarrollo es el más amplio y más diversificado del mundo.



Instalación del recipiente de 235 t para el reactor de Shippingport, Estados Unidos (Foto USAEC).

Además de construirse varios reactores de potencia experimentales, se emprendió en Shippingport la construcción de una central prototipo que quedaría integrada en la red de distribución de energía eléctrica. Dos años más tarde, vino a sumarse a estas actividades un programa de producción de energía de origen nuclear con fines de demostración, en virtud del cual la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos y la industria privada colaboraron en la construcción y explotación de varias centrales nucleares destinadas a producir electricidad. Con arreglo a uno de los procedimientos empleados, la Comisión se encargaba de construir y explotar los reactores y vendía el vapor generado a empresas de

servicio público; en otros casos, la Comisión ayudaba a las compañías a diseñar y construir sus propios reactores sin exigir ningún pago por la utilización del combustible arrendado por el Gobierno para la explotación de esos reactores durante los primeros años. En 1958, la Comisión publicó estudios detallados del rendimiento de los diversos tipos de reactor.

A partir de entonces, la labor de investigación y desarrollo ha continuado progresando en un amplio frente, ensayándose muy diversos sistemas en reactores experimentales o para fines de demostración: reactores moderados por agua pesada, reactores con moderador orgánico, reactores de sodio y grafito, reactores de alta temperatura refrigerados por gas y reactores de neutrones rápidos.

No obstante, la mayor parte de los resultados prácticos logrados hasta la fecha se han conseguido con reactores de agua a presión o de agua hirviente, en los que se utiliza agua ligera como refrigerante y moderador, y uranio enriquecido como combustible. Tres centrales se encuentran en servicio desde hace largo tiempo: la de Shippingport, la de Dresden y la Yankee (con reactor de agua hirviente la segunda y de agua a presión las dos restantes). Más recientemente entraron en servicio otras tres centrales importantes: la de la Consolidated Edison o central de Indian Point, la de Big Rock Point y la de Humboldt Bay (con reactor de agua a presión la primera, y de agua hirviente las dos restantes).

La central de Shippingport está equipada con un reactor de agua a presión de 60 MW(e); se empezó a construir en 1955, alcanzando la plena potencia a finales de 1957. Su finalidad no era producir energía en condiciones rentables, sino servir de laboratorio en gran escala para el estudio de los problemas relativos a la construcción y explotación de una central de carácter industrial. Al perfeccionar la tecnología de los reactores refrigerados con agua ligera, Shippingport podía señalar el camino de una posible reducción de los costos y obtener a la vez mejores rendimientos que por mero perfeccionamiento de las técnicas ya utilizadas. Seis años de experiencia práctica han demostrado que las centrales nucleares equipadas con reactores de agua a presión pueden satisfacer los siguientes criterios fundamentales: posibilidad de su incorporación a una red de distribución, reducidos tiempos muertos para las operaciones de carga y conservación, y seguridad radiológica satisfactoria. La respuesta de la central a las variaciones transitorias del factor de carga ha sido superior a la de las centrales clásicas que alimentan a la misma red de distribución, y las normas reglamentarias sobre el control de las radiaciones han resultado "sobradamente adecuadas" para el mantenimiento de una protección radiológica eficaz.

El reactor de agua a presión de la central Yankee, que actualmente desarrolla una potencia de 175 MW(e) entró en servicio en noviembre de 1960, y ha dado

mejores resultados que los que se esperaba. Se proyectó como planta de demostración, antes de que se pensara en que la energía nucleoelectrica pueda ser rentable. No obstante, el costo promedio de la electricidad producida con el primer cuerpo del reactor fue inferior a 9,5 mills (milésimas de dólar) por kWh. Los costos correspondientes para la electricidad producida en una central de tipo clásico de la misma potencia y construida al mismo tiempo que aquella en Nueva Inglaterra (en donde está situada la central Yankee) son del orden de 8 mills. La compañía explotadora ha manifestado que "en esta primera etapa, el costo de la energía producida por la central Yankee está más cerca del punto de competencia económica de lo que habíamos esperado".

El reactor de Indian Point, de 275 MW(e), combina el empleo de uranio totalmente enriquecido, como combustible, con el de torio como material fértil. Durante el proceso de fisión, el torio se transforma en uranio fisionable, con lo que se produce combustible. El reactor genera vapor saturado que seguidamente se sobrecalienta con petróleo. La construcción de esta central fue financiada por la compañía explotadora, sin subvención de ninguna clase, y la mejor prueba de su éxito la constituye el hecho de que, poco después, la propia compañía decidiera construir una segunda central nuclear en las mismas condiciones financieras, pero esta vez con una potencia de 1 000 MW.

La central de Dresden viene funcionando sobre una base comercial análoga, ya que fue construida con arreglo a un contrato a tanto alzado extendido por una empresa industrial, y se ha señalado que su funcionamiento ha sido excelente en todo momento en las condiciones normales de suministro de electricidad, para el cual la continuidad y estabilidad constituyen un requisito primordial. Desde este punto de vista, cabe afirmar que esta central es comparable a la mejor central térmica de la red de distribución de la Commonwealth-Edison Company.

Los gastos de inversión de las centrales de Dresden y Yankee se evaluaron, respectivamente, en 250 y 224 dólares por kW de potencia neta instalada, y los gastos iniciales de combustible se estimaron del orden de 4 mills/kWh. Sin embargo, posteriormente varias empresas se han ofrecido a construir centrales -con potencia de 400 MW o superiores- garantizando costos del orden de 132 a 210 dólares por kW para la construcción y de 1,8-2,25 mills/kWh para el combustible. La reducción de los gastos de inversión se debe principalmente al aumento previsto de la potencia de las centrales, y la de los gastos de combustible, al mejoramiento de los métodos de elaboración y a una prolongada irradiación del combustible.

Prácticamente todos los reactores que emplean agua han rebasado la potencia nominal prevista en un principio. El de Dresden, diseñado para producir

629 MW(t), aumentó su potencia hasta los 700 MW(t); el Yankee, la elevó de 392 a 485 y, con el empleo de la segunda carga, a 540 MW(t). Aunque este mayor rendimiento con respecto al valor inicialmente calculado -que también se ha registrado en el caso de otros tipos de reactor en distintos países- es alentador, se ha señalado que pone también de manifiesto un cierto desconocimiento por parte de los proyectistas. No obstante, una de las finalidades de las plantas de demostración es, precisamente, proporcionar la experiencia necesaria para subsanar esas deficiencias.

Los Estados Unidos han construido también otros reactores para satisfacer necesidades militares o de carácter especial que, si bien no pueden ser considerados como "rentables" en el sentido habitual de la palabra, han sido prueba indiscutible de la diversidad de aplicaciones y de la seguridad de las centrales nucleoelectricas. A fines de 1961, se envió por vía marítima a McMurdo Sound, en la Antártida, un reactor de agua a presión cuya producción de 1 500 kW(e) basta para satisfacer las necesidades científicas de los Estados Unidos en aquella región, resolviéndose así importante problema de transporte de combustible.

En la esfera de la propulsión nuclear de buques de guerra, y especialmente de submarinos, se ha logrado un éxito sobresaliente. El "Nautilus", primer submarino de propulsión nuclear, fue botado en enero de 1955 y, en un período de 26 meses recorrió 69 138

millas empleando la primera carga de su reactor; con la segunda carga navegó 93 000 millas en un período análogo. Además, el submarino "Sarge" realizó la travesía del Artico por debajo de la capa de hielo.

Los reactores navales -pequeños, compactos y que ofrecen muchas características especiales- son demasiado costosos para poder ser utilizados en la propulsión de buques mercantes, pero su éxito ha dado impulso a la labor de investigación y desarrollo en la esfera de la propulsión de estos últimos. El "Savannah" es un buque mercante de 22 000 t equipado con un reactor de agua a presión de 69 MW(t) que le proporciona 22 314 CV de potencia al freno y una velocidad máxima de 24 nudos. Las pruebas realizadas han demostrado que el buque puede efectuar largas travesías a una elevada velocidad. Lo mismo que el reactor de Shippingport, el "Savannah" no fue concebido con miras a una producción rentable sino como prototipo experimental, dotado de numerosos aparatos especiales para fines de investigación.

Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas

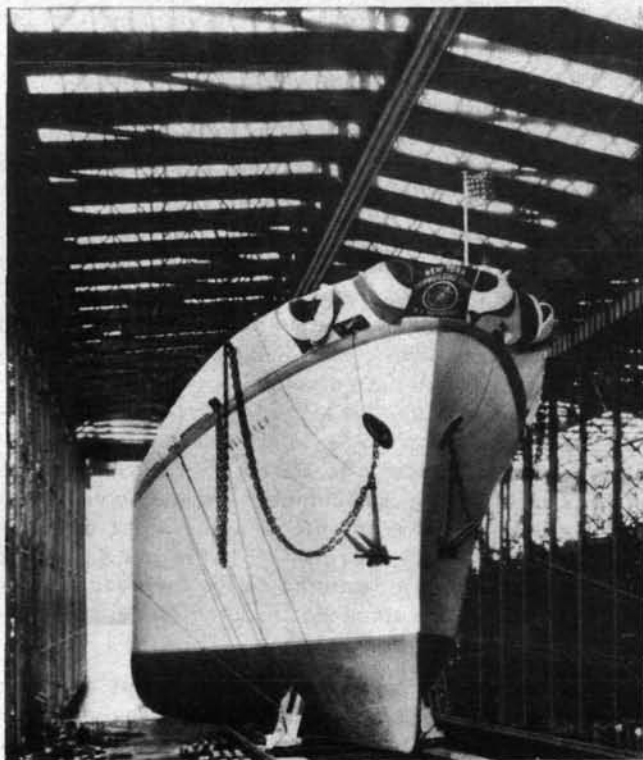
La Unión Soviética terminó la construcción de una central nuclear de tipo industrial en 1954, que entró en servicio en junio de ese mismo año. Está equipada con un reactor de agua a presión, con moderador de grafito, que utiliza como combustible uranio enriquecido en un 5 por ciento de ^{235}U . Su potencia térmica es de 30 MW, siendo la eléctrica de 5 MW.

El objeto perseguido era resolver los problemas científicos y tecnológicos que planteaba la construcción de una central nucleoelectrica de carácter industrial cuyo funcionamiento fuere satisfactorio por todos conceptos. El costo de la electricidad producida era mucho más elevado que el de la generada por las grandes centrales térmicas, pero se deseaba adquirir experiencia respecto de los aspectos técnicos y económicos de su explotación, y emplear la central como medio de formación profesional. La central alcanzó su objeto demostrando ser, a lo largo de diez años de funcionamiento, una instalación segura y eficaz, que preparó el terreno para la construcción de reactores de mayores dimensiones y de rendimiento más elevado.

Resultado de ello es que en Siberia funciona un reactor de agua a presión de 100 MW(e), y que se acaba de terminar la construcción de otras dos grandes centrales, de 210 y de 100 MW(e) respectivamente, la última de ellas con sobrecalentamiento nuclear.

Un hecho sin precedentes lo constituyó la construcción del rompehielos "Lenin", cuya botadura tuvo lugar en 1957. Este potente buque posee una autonomía de navegación prácticamente ilimitada, y es capaz de recorrer todas las zonas del Artico. Desplaza 16 000 t y su velocidad máxima en aguas libres de hielo asciende a 18 nudos. Era necesario disponer

Botadura del buque nuclear «Savannah» en julio de 1959
(Foto US Maritime Administration).





El rompehielos nuclear Lenin.

de una instalación nuclear compacta de gran potencia, capaz de funcionar regularmente en condiciones difíciles; balanceos, vibraciones y choques. Esto se consiguió mediante tres reactores de agua a presión con uranio enriquecido como combustible; la altura del cuerpo de los reactores es de sólo 1,6 m, y su diámetro de 1 m. Hubiera sido más económico emplear un solo reactor, pero se decidió instalar tres (uno de ellos de reserva) para mayor seguridad. Con esta instalación, las turbinas desarrollan 44 000 CV.

El "Lenin" ha efectuado ya con éxito varias travesías. En los tres primeros años recorrió 50 000 millas, la mayor parte con mar difícil por las condiciones del hielo. Durante esos tres años sus reactores funcionaron sin necesidad de renovar la carga de combustible.

Reino Unido

El programa británico de desarrollo de la energía nucleoelectrica se ha centrado paralelamente en las tres direcciones siguientes:

Construcción de reactores destinados a la producción de plutonio que generen cierta cantidad de electricidad como subproducto;

Construcción de una serie de centrales destinadas exclusivamente a la producción de electricidad con fines comerciales, basadas en el mismo sistema que los reactores plutonígenos;

Investigación y desarrollo de modelos más perfeccionados, con miras a la construcción y explotación de prototipos.

Calder Hall, primera de las centrales plutonígenas, emplea uranio natural como combustible, en forma de metal revestido de una aleación de magnesio (magnox), con grafito como moderador y anhídrido carbónico como refrigerante. El primer reactor alcanzó la criticidad en 1956, año en que comenzó a suministrar energía eléctrica a la red nacional de dis-

tribución. Por su parte, el primer reactor de la central gemela de Chapelcross alcanzó la criticidad en 1958 y, para 1960, trabajaban a plena potencia un total de ocho reactores.

Aunque la producción de electricidad constituía solamente un aspecto secundario, el rendimiento de las centrales resultó en el plano técnico algo superior a lo esperado. Se había previsto para los reactores una potencia de 180 MW(t), pero gracias al perfeccionamiento de las técnicas de explotación se logró elevar considerablemente esa cifra, de manera que llegaron a alcanzarse potencias del orden de 230 e incluso de 250 MW(t). Se redujo considerablemente el tiempo invertido en la conservación de las instalaciones y en el reabastecimiento de combustible, lo que permitió alcanzar factores de carga total del 94 por ciento. Se aumentaron las temperaturas y presiones en los reactores, y se dotó de nuevos álabes a las turbinas para elevar su potencia nominal de 21 a 27-30 MW(e), de modo que la producción neta de electricidad pasó de 34,5 a 45 MW(e).

La experiencia adquirida inicialmente con la central de Calder Hall permitió introducir diversos perfeccionamientos técnicos en los reactores del mismo tipo. Una de las principales innovaciones consistió en aumentar en un 50 por ciento el espesor de las placas de acero que podían soldarse satisfactoriamente para constituir el recipiente a presión del reactor. Esto permitió construir cuerpos de mayor diámetro,

Un elemento combustible tipo «Magnox» en una vaina de grafito (Foto UKAEA).



con una distribución más uniforme del calor producido en los mismos y alcanzar presiones de gas más elevadas. Del estudio de las superficies de intercambio de calor, y de modificaciones introducidas en la superficie de los elementos combustibles derivaron otras mejoras. También se idearon procedimientos satisfactorios para renovar el combustible con el reactor en marcha, sin interrumpir la producción de energía.

En 1955 se anunció un programa de construcción de centrales nucleares destinadas exclusivamente a la producción de electricidad. En él se preveía que doce centrales para 1965 quedarían terminadas, con una potencia global de unos 1 500 a 2 000 MW. En 1957 se decidió elevar esta cifra a 5 000 - 6 000 MW, lo que representaría una cuarta parte de las necesidades totales del país.

Sin embargo, si bien el rendimiento técnico de las primeras centrales satisfizo plenamente las esperanzas que en ellas se habían puesto, no sucedió lo mismo con las previsiones económicas iniciales. En un principio, se pronosticó que los gastos de capital no pasarían de 120 libras esterlinas por kW instalado, más unas 30 libras para las existencias iniciales de combustible (frente a las 55 libras por kW, aproximadamente, para una central térmica de potencia equivalente), previéndose también que las primeras centrales nucleares podrían producir electricidad a razón de 0,6 peniques el kilovatio-hora.

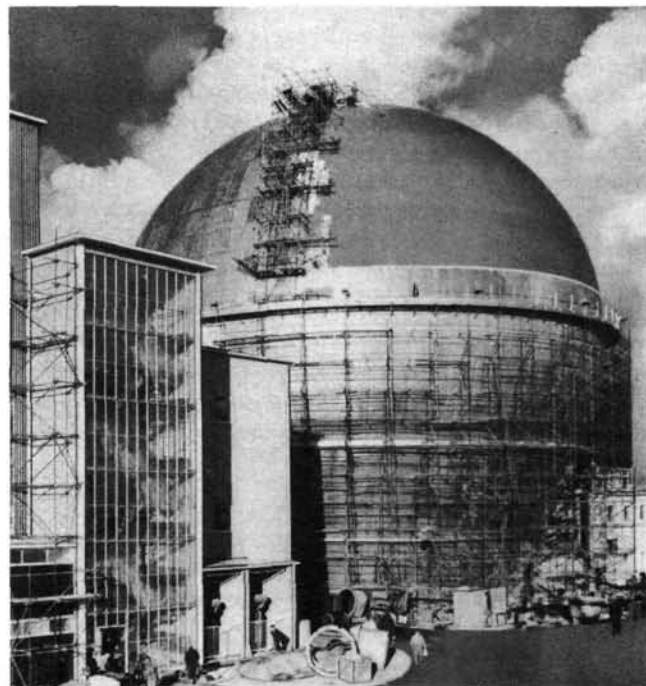
Todas estas cuestiones eran sumamente problemáticas y aleatorias en una época en que ninguna central nucleoelectrónica se hallaba en servicio y era preciso decidir aún sobre muchos detalles de su diseño. Por ello, a nadie pudo sorprender que, cuando disminuyó la escasez de combustibles, se aminorase un tanto el ritmo de ejecución del programa y se ampliase el plazo establecido para su terminación. Además, la experiencia demostró las ventajas que ofrecía la construcción de un número más reducido de centrales de mayor potencia.

Una vez modificado, el programa presentó la siguiente forma:

Central	Año de puesta en servicio del primer reactor	Potencia neta en MW(e)
Berkeley	1962	275
Bradwell	1962	300
Hinkley Point	1963	500
Trawsfynydd	1964	500
Dungeness	1964	550
Hunterston	1964	300
Sizewell	1965	580
Oldbury	1966	560
Wylfa	1968	1 180

Todas estas centrales utilizan combustible con revestimiento de magnox, el cual ofrece las ventajas de que los materiales empleados son relativamente baratos y fáciles de obtener, de que no se precisa proceder al enriquecimiento, y de que la elaboración de los elementos combustibles es relativamente económica. En compensación, el magnox impone una temperatura de funcionamiento relativamente baja -unos 420°C-, lo cual limita el rendimiento, así como la posible evolución de este tipo de central.

Al diseñarse las primeras centrales, la idea fundamental fue concebir el reactor y su funcionamiento de la manera más sencilla posible, prescindiéndose con frecuencia de introducir diversos perfeccionamientos en beneficio de una mayor sencillez mecánica. Cada una de las centrales anteriormente enumeradas cuenta con dos reactores.



Últimas etapas de la construcción del reactor avanzado refrigerado por gas de Windscale, Reino Unido, en 1961 (Foto UKAEA).

Aunque las centrales de Berkeley y Bradwell, construidas exclusivamente para producir electricidad, representan un progreso respecto de la de Calder Hall, las ofertas en respuesta a los pliegos de condiciones para su construcción se presentaron en 1955 y los contratos se adjudicaron al año siguiente, de forma que las obras se iniciaron sin que se pudiera tener en cuenta la experiencia práctica adquirida en Calder Hall. Gran parte de la labor de diseño y fabricación se realizó antes de que dispusieran de resultados completos sobre los trabajos de investigación y desarrollo, lo que significó numerosas modificaciones y algunas dificultades. En Berkeley, las

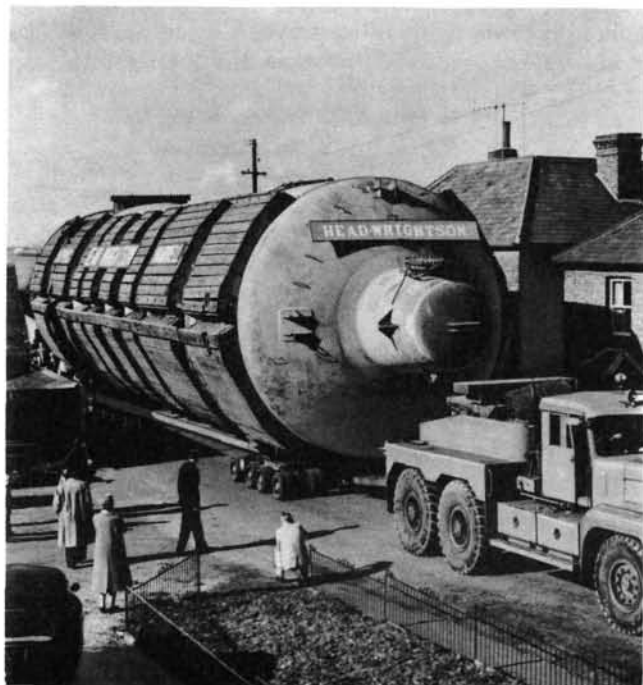
obras se retrasaron en total 14 meses, y el costo total de las modificaciones que fue necesario introducir en el diseño se elevó a 5 100 000 libras esterlinas. Los gastos de inversión por kilowatio se elevaron de las 145 libras calculadas a 173 libras.

En Bradwell, el costo total de producción se había calculado en 1,12 peniques por kWh, de cuya cifra 0,80 peniques correspondían a gastos de capital y 0,32 peniques a gastos de explotación. Estas cifras son necesariamente provisionales, toda vez que se basan en determinadas hipótesis -como, por ejemplo, una vida útil de 20 años para el reactor, y una irradiación equivalente a 3 000 MWd/t de uranio.

Sin embargo, parece que, en conjunto, estas hipótesis pecan más bien por exceso de prudencia. En efecto, se ha comprobado que las centrales funcionan de una manera flexible y segura, y se espera poder mejorar su rendimiento, en parte como resultado del aumento de sus dimensiones. En la de Hinkley Point, que trabaja con una presión más elevada del refrigerante y con un rendimiento eléctrico neto más alto, se espera que los costos de producción sean de 1,02 peniques por kWh.

Mientras se ejecutaba este programa de centrales de tipo magnox, el Reino Unido ha venido trabajando asimismo en el perfeccionamiento del denominado reactor perfeccionado refrigerado por gas (Advanced Gas-Cooled Reactor) que utiliza elementos combustibles cerámicos ligeramente enriquecidos. Un prototipo de este reactor, construido en Windscale, alcanzó la potencia prevista en 1963.

Transporte de un intercambiador de calor destinado a la central eléctrica de Bradwell, Reino Unido (Foto UKAEA).



Otra orientación escogida desde un principio condujo a la construcción, en Dounreay, de un reactor reproductor de neutrones rápidos que alcanzó la criticidad inicial en 1959 y se utiliza actualmente para el ensayo de elementos combustibles.

Francia

Francia ha seguido un camino muy semejante al elegido por el Reino Unido, pero avanzó con mayor lentitud y poniendo más empeño en la adquisición de experiencia que en la producción de electricidad. En la elección del sistema de uranio natural y grafito para sus reactores, influyó en cierta medida la disponibilidad de los materiales, ya que Francia posee yacimientos de minerales uraníferos, así como una importante industria del grafito.

El programa francés se centra en la construcción de una serie de plantas generadoras, encargándose el Commissariat à l'énergie atomique de la fase experimental y la Electricité de France de la fase de ejecución. Con arreglo a dicho programa, había de construirse una central cada 18 meses, cada una de las cuales habría de ofrecer una mayor potencia y rendimiento que la precedente.

Como la finalidad principal de este programa es la de proporcionar experiencia, cada reactor tenía que presentar características distintas de las de sus predecesores; por ejemplo, en la central G2 se utilizó un confinamiento de hormigón, así como canales horizontales para la carga del combustible, mientras que la primera de las centrales EDF fue dotada de un recipiente de presión de acero y de canales verticales. Teniendo en cuenta la experiencia adquirida y los progresos técnicos, se fueron concibiendo tipos de reactor cada vez más perfeccionados. Esta política ofrece, a la larga, la ventaja de que se adquiere una experiencia amplia y completa, pero también entraña inconvenientes evidentes. En efecto, el diseño de cada reactor ocasiona grandes gastos derivados de la labor de desarrollo, y además, se restringen las oportunidades de realizar economías en virtud de la normalización de ciertos elementos.

En las primeras centrales no se ha procurado alcanzar un muy alto grado de regularidad de funcionamiento. Por el contrario, se estimó que podía obtenerse un conocimiento más completo de los materiales y de los componentes utilizándolos en las condiciones límite admisibles. Las especificaciones son, con todo, muy estrictas. Ningún elemento esencial se pone en servicio antes de que un prototipo haya completado, sin el menor tropiezo, ensayos equivalentes a 2 000 años de servicio como mínimo. Al cabo de cuatro años de explotación, las centrales G2 y G3 han demostrado que su funcionamiento ofrece grandes garantías de seguridad.

Aunque el sistema a base de uranio natural y grafito es el mismo que se emplea en el Reino Unido, la tecnología de los reactores franceses se ha apartado

El programa de construcciones es el siguiente:

Central	Potencia		Entrada en servicio
	MW(t)	MW(e)	
G2	250	37	1959
G3	250	37	1960
EDF-1	300	68	1963
EDF-2	800	198	1964
EDF-3	1 560	480	1966
EDF-4			1968
* EDF-5		500	1971

* Datos provisionales

en varios aspectos de la de los reactores británicos. Por ejemplo, el empleo de hormigón pretensado como material de confinamiento así como de blindaje eliminó la necesidad de recipientes de presión de acero soldado, y permitió construir reactores mucho más compactos con cuerpos de mayores dimensiones y presiones de gas más elevadas. Otra diferencia reside en la construcción de los intercambiadores de calor. Los especialistas del Reino Unido prefieren un corto número de intercambiadores de muy grandes dimensiones, que se montan e instalan in situ. En Francia, donde existe la tendencia a concertar contratos con diversas empresas especializadas, resulta más ventajoso construir pequeños intercambiadores de calor en la propia fábrica; este procedimiento de producción en serie permitió realizar algunas economías.

Se ha ido incrementando paulatinamente el rendimiento de las centrales nucleares introduciendo mejoras en los planos y aprovechando la experiencia adquirida durante el funcionamiento. En los reactores G2 y G3, la potencia máxima específica era de 3,5 MW(t) por t de uranio; en el reactor EDF-3 este valor se está elevando a 6,2 MW. El rendimiento del canal más cargado del G2 era de 260 kW; en el EDF-3 es de 660 kW. Estos aumentos han sido resultado de cierto número de modificaciones introducidas en el diseño y la composición de los elementos combustibles.

La práctica seguida de renovar el combustible con el reactor en funcionamiento ha resultado un éxito, ya que además de aumentar el tiempo de que puede disponerse de éste, permite ejecutar el programa de renovación del combustible en condiciones óptimas. La utilización repetida de un mismo diseño para diversos componentes de los reactores ha permitido reducir ligeramente los costos, y la experiencia adquirida en la elaboración de elementos combustibles se tradujo en una disminución del número de piezas que han de rechazarse.

Además de esta serie de reactores, la Electricité de France colabora con un consorcio belga para la construcción, en Chooz, de un reactor de agua a pre-

sión de 242 MW, y, por su parte, el Commissariat à l'énergie atomique ha construido un prototipo de reactor refrigerado por gas y moderado por agua pesada, de 80 MW(e), y está trabajando en el desarrollo de otros de diversos tipos.

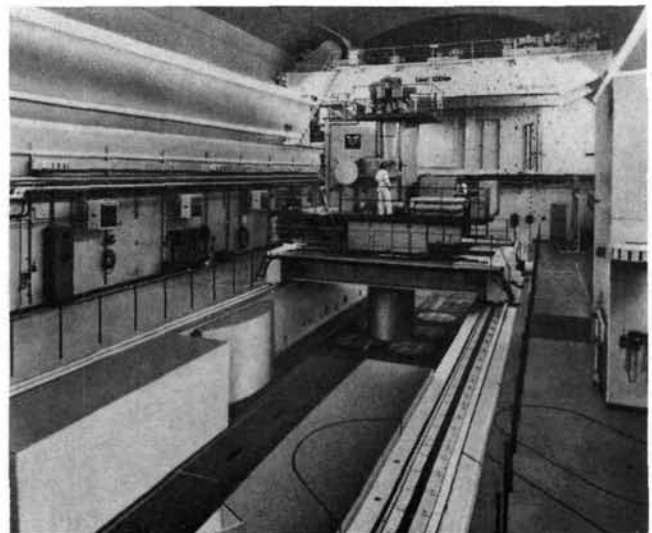
Canadá y Suecia

El Canadá, país donde la energía eléctrica de fuentes tradicionales ha sido, por lo general, fácil de obtener y poco onerosa, ha adoptado un programa que, a largo plazo, permitirá a los fabricantes canadienses diseñar y construir centrales nucleoelectricas con miras a atender tanto la demanda nacional como la del mercado exterior. A este respecto, ha elegido como solución técnica principal los reactores de agua pesada.

Al reactor NRX de pequeña potencia terminado en 1947, siguió en 1957 el NRU y, posteriormente, el NPD, que alcanzó su plena potencia en 1962. Se trata de un reactor de uranio natural y agua pesada, con una potencia de 20 MW(e). El más reciente reactor de esa serie es el CANDU, de grandes dimensiones, que tiene una potencia de 200 MW(e) y se encuentra en las últimas etapas de la construcción y ensayo.

Suecia se mostró en un principio sumamente interesada por la energía nuclear como posible fuente para la calefacción centralizada de distritos urbanos. No obstante, más adelante se percató de que la potencia de la central y el factor de carga ejercían una influencia tan grande sobre el costo unitario de la energía, que no iba a ser fácil conseguir que el sistema resultase rentable, toda vez que sólo sería preciso atender la carga máxima durante un breve período invernal. Por esta razón, en 1958 las dos centrales proyectadas se combinaron en una sola: la construida en Ågesta. Esta central emplea un reactor de agua a presión de uranio natural y agua pesada. De la energía generada, 10 MW se destinarán a la pro-

Central nucleoelectrica Ågesta, Suecia.



ducción de electricidad y 55 MW a la calefacción por sectores; la central entró en servicio en fecha reciente. También han comenzado los trabajos para la construcción de una central nuclear de agua hirviente, de 200 MW(e), destinada a atender la carga básica. Su entrada en servicio está prevista para 1968.

Italia y el Japón

Italia, en contraste con la mayoría de los países anteriormente mencionados, se ha interesado principalmente por el problema un tanto acuciante del suministro de energía y, por ello, ha adoptado la política de encargar a firmas extranjeras la construcción de sus centrales nucleares. En 1958 contrató la construcción en Latina de una central de tipo magnox, muy semejante a la británica de Bradwell, con una potencia de 200 MW(e). Al año siguiente, adjudicó a una empresa americana un segundo contrato para que construyera, en la desembocadura del Garellano, otra central de 150 MW(e) con reactor de agua hirviente, de características muy parecidas a la de Dresden. La central de Latina comenzó a suministrar electricidad a la red en mayo de 1963, y la del Garellano algunos meses más tarde. Próxima a terminarse se encuentra la construcción de una tercera central en Trino. Está equipada con un reactor americano de agua a presión, similar al de la central Yankee; su potencia bruta asciende a 270 MW(e).

La ejecución de estos contratos ha brindado al mismo tiempo a la industria nacional la oportunidad de adquirir una experiencia valiosa al participar en la construcción de tres tipos distintos de reactores. Las importaciones con destino a las tres centrales representan entre una tercera parte y la mitad del total de las inversiones. Fue preciso recurrir al extranjero cuando se trataba de aplicar técnicas especializadas y procurarse piezas cuya fabricación en Italia hubiera resultado demasiado onerosa.

El Japón ha seguido un camino muy semejante al emprendido por Italia y movido por las mismas razones que ésta: la escasez de combustible, que obligaba a importarlo en cantidades crecientes. Como las necesidades energéticas totales y la potencia de las centrales recientemente construidas aumentan cada vez más, la situación ofrece favorables perspectivas para la energía nucleoelectrica. No obstante, el Japón tropieza con problemas especiales en materia de seguridad tales como los que le plantean los movimientos sísmicos y la densidad de su población, al primero de los cuales se ha hecho frente mediante la preparación de diseños especiales de las centrales y, al segundo, mediante una elección cuidadosa de su emplazamiento. También Italia ha tenido que tener en cuenta ambos problemas.

Se ha adjudicado un contrato para la construcción en Tokai Mura, con participación de la industria nacional, de una central nucleoelectrica de tipo británico. Su potencia será de 158 MW(e) y deberá quedar terminada en 1965.

El Japón también se interesa por el perfeccionamiento de los reactores de agua hirviente.

Enseñanzas del decenio

El primer decenio de producción de energía de origen nuclear se inició con muy diversas posibilidades de elegir entre distintos tipos de reactores; al término de ese período, dos tipos principales han hecho sus pruebas -los reactores de agua y los moderados por grafito y refrigerados por gas- quedando numerosas e interesantes posibilidades en estudio. Además, dentro de un determinado sistema de reactor, cabe introducir múltiples variantes, y los programas nacionales han puesto de manifiesto las ventajas respectivas de algunas de las posibles soluciones, tales como el empleo de hormigón pretensado y el de recipientes de presión de acero.

La elección de un sistema de reactor destinado a una central nucleoelectrica civil depende tanto de consideraciones de carácter económico como de factores técnicos; los tipos de reactores de agua que utilizan combustible enriquecido son de menores dimensiones y exigen inversiones más reducidas que los reactores de gas y grafito, pero el costo del combustible es más elevado. Desde el punto de vista de su funcionamiento, ambos tipos han resultado satisfactorios. La experiencia ha demostrado que ofrecen una gran seguridad de funcionamiento -tal vez incluso superior a la de las centrales de tipo tradicional-, así como seguridad y flexibilidad de empleo. Pueden adaptarse sin dificultad a una caída total de la carga así como a la recuperación de la misma a un ritmo adecuado. Se les puede incorporar a una vasta red que comprende centrales que producen electricidad a partir de fuentes diferentes. La formación del personal encargado de la explotación no ha planteado problemas excesivamente arduos, y a medida que los equipos van adquiriendo experiencia, han conseguido gradualmente dar un mayor rendimiento, especialmente en operaciones tales como la de renovación de la carga de combustible.

Cada central nucleoelectrica ha sugerido la introducción de innovaciones que han permitido mejorar las características y rendimiento técnico de las que se construyeron ulteriormente. Se han conseguido muchos perfeccionamientos en materia de diseño e ingeniería. Se ha estudiado detenidamente la forma y composición de los elementos combustibles, y el rendimiento de éstos ha sido superior al calculado en un principio. Otras modificaciones introducidas en los materiales y en los planos han permitido alcanzar mayores temperaturas y presiones de funcionamiento, consiguiéndose resultados más halagüeños.

La influencia de la potencia de la central sobre su rentabilidad ha quedado ampliamente demostrada. En un principio, se había esperado que las pequeñas centrales de 30 a 50 MW resultarían rentables. Esta

esperanza debió abandonarse, al menos por el momento, y han sido los países más adelantados los que han podido sacar mayor partido de la energía nuclear. Aun en ellos, se considera que los reactores de una potencia considerablemente superior a la de los que ya se encuentran en servicio -es decir, reactores de 500 MW o más- son los que mayores ventajas económicas ofrecen, y no son muchas las redes en que pueden incorporarse reactores de esa potencia. No obstante, el aumento de la demanda de electricidad, unido al desarrollo de nuevas aplicaciones tales como la desalinización del agua, justifican la construcción de esas instalaciones de tan gran potencia.

Los costos han venido disminuyendo progresivamente. En los cuatro primeros años de ejecución del programa británico, el monto de las inversiones necesarias para la construcción de una central de tipo magnox se redujo en una tercera parte. Las reservas de uranio también han resultado ser mucho más abundantes de lo previsto al comenzar el decenio, por lo que su precio también ha disminuido.

Resumiendo: la energía nucleoelectrica comienza apenas a poder competir con la de origen tradicional. Como resultado de concursos recientemente anunciados para la construcción de plantas nucleoelectricas de gran potencia destinadas a la central de New Jersey (en Oyster Creek) y a la de Niágara-Mohawk (en Nine-Mile Point), se ha afirmado que la energía nucleoelectrica no subvencionada resulta decididamente menos costosa que su rival, la energía de fuentes tradicionales.

Ha sido difícil pronosticar con exactitud cuándo y dónde se alcanzará la paridad. En la primera mitad del decenio se desplegaron loables esfuerzos para determinar, por cálculos muy afinados y por extrapolación de un exiguo número de datos, el momento en que la energía nucleoelectrica será más barata que la de origen tradicional.

Ahora bien, la información acopiada en el curso de los últimos dos o tres años confirma la convicción

inicial, a saber, que tarde o temprano la energía nucleoelectrica sería rentable, y por ello nos contentamos con progresar paso a paso. Por otra parte, se empieza a disponer de los primeros datos fidedignos sobre los costos, en particular por lo que se refiere a las inversiones, así como de informaciones mucho más abundantes sobre los gastos de explotación. No obstante, quedan aún por resolver múltiples incógnitas, entre ellas la vida útil de la central, el costo futuro del combustible nuclear, el crédito por el combustible irradiado, etc.

Las comparaciones internacionales pueden muy bien dar una impresión equivocada de la realidad, ya que las bases para el cálculo de factores tales como las cargas financieras, los impuestos, etc., difieren sensiblemente de un país a otro. Es más, el único cálculo válido es el realizado respecto de una situación determinada, teniendo en cuenta todos los aspectos de la situación local y las exigencias de la red de distribución.

Además, cuando se trata de elegir un determinado tipo de central nuclear, los costos de la producción de energía distan mucho de ser el único factor determinante, y ni siquiera constituyen el más decisivo. Aun cuando sea posible demostrar que una central nuclear podrá dar a la larga los mejores resultados, el monto de las inversiones iniciales puede constituir un importante obstáculo. Es posible que un país que disponga de reservas de combustibles fósiles o de recursos hidroelectricos prefiera aprovecharlos con el propósito de ahorrar divisas o de conservar su independencia respecto de las fuentes de abastecimiento de uranio situadas en el extranjero.

Ahora bien, el pasado decenio ha puesto claramente de manifiesto que la producción de energía nucleoelectrica constituye una realidad técnica y que las perspectivas de disminución de los costos de producción son sumamente favorables, de modo que ya no cabe abrigar dudas sobre el futuro de esta forma de energía.