

EL PORVENIR ECONÓMICO DE LA ENERGÍA NUCLEAR (*)

I. PROBLEMAS TÉCNICOS

Por R. ORTIZ FORNAGUERA

JUZGAR de antemano los efectos que la introducción de una nueva técnica, o la aparición de un invento nuevo, determinará sobre una economía en un futuro inmediato o remoto constituye siempre un problema muy difícil de economía teórica. El problema es difícil incluso en aquellos casos en que se puede partir de datos tecnológicos y económicos más o menos precisos proporcionados, por ejemplo, por la operación de una planta piloto durante un cierto tiempo, o basados acaso en el conocimiento de datos análogos relativos a un proceso parecido y bien estudiado. En el caso particular de la energía de origen nuclear faltan ambas fuentes de información. La situación es, en esquema, la siguiente: Todo intento de estudio de los aspectos económicos de la energía nuclear, cualquiera tentativa de prever, tanto la marcha de un desarrollo como la influencia de su disponibilidad, a un precio económicamente razonable, sobre la economía de ciertas industrias y la economía en conjunto de una nación, tropieza desde el primer momento con tres dificultades de principio:

a) Existen, y en un estadio relativamente avanzado, proyectos de plantas para la producción de energía nuclear industrial. Cabe incluso elegir entre tipos diversos y aun discutir ventajas e inconvenientes de un tipo de planta en comparación con otro. Pero *no existe* todavía ni

* El presente trabajo quedará completado con la publicación, en el próximo número, de otro artículo con el mismo título y con el subtítulo: II. *El problema de los costos*. Ambos estudios se complementan y deben, por tanto, analizarse los dos para enjuiciar adecuadamente el problema de las posibilidades económicas de la energía nuclear.

una sola planta piloto, no digamos ya una industria de la energía nuclear, siquiera rudimentaria.

b) La información que se ha logrado acopiar merced a la operación de los reactores existentes es no sólo fragmentaria en más de un aspecto, sino clasificada (secreta) ¹ —e inaccesible, por tanto, salvo para una minoría— en puntos realmente esenciales.

c) Incluso cuando se contara con la citada información, su valor para un estudio de las perspectivas económicas de la energía nuclear es más bien discutible. Dichos datos, en efecto, han resultado de operar en condiciones totalmente anómalas desde el punto de vista económico. Por ejemplo, la Comisión de Energía Atómica norteamericana conoce, con toda seguridad, el costo del combustible nuclear obtenido de acuerdo con diferentes métodos y en función del grado de enriquecimiento en materia fisionable. Pero este costo es un dato clasificado, y a la vez un dato esencial para estimar el costo de la energía nuclear. Y, sin embargo, aun en el supuesto de que se conociera, no sería prudente utilizarlo sin tomar ciertas precauciones. Porque inmediatamente surgiría la cuestión de apreciar cuál es su significado para el estudio de la viabilidad económica de la energía nuclear en un ambiente económico normal. ¿Sería el mismo el costo en un mercado libre que en el actual mercado único (el propio Gobierno)? ¿No cabe, en lo posible, que, pasados unos años de experiencia industrial, se idee un tipo de reactor que produzca el combustible nuclear a un costo apreciablemente inferior? ¿Cuál sería el precio del mineral de uranio si no existiera la necesidad urgente de cumplir determinados programas militares? Es claro que cualquiera de estas cuestiones tiende a disminuir el valor de aquel dato.

Todas esas dificultades nos obligan a contentarnos con estimaciones más o menos justificadas, pero siempre imprecisas. Y es evidente que, en estas condiciones no cabe pretender llegar sino a conclusiones de carácter muy general y cualitativo las más de las veces. Sin embargo, aun con estas limitaciones, acaso merezca la pena intentar el análisis, aunque sólo sea para centrar el problema que plantea la posibilidad de una industria de la energía nuclear en gran escala. Conforme

¹ Siguiendo la terminología de la Comisión Americana de Energía Atómica empleamos la voz «clasificada» para designar los datos técnicos mantenidos en secreto por el Gobierno federal.

se verá, el resultado del análisis no justifica en modo alguno el optimismo extremo que refleja a veces la prensa, en algunas declaraciones y en ciertos artículos, pero todavía menos da apoyo a la actitud pesimista, que niega posibilidades económicas a la energía nuclear. Repetidas veces se ha dicho que el potencial energético de 1 kg. de combustible nuclear equivale al de 2.700 toneladas de carbón de buena calidad, y también se ha anunciado que se encuentra mineral de uranio, de mayor o menor grado, prácticamente en todas partes. Por otro lado, es del dominio público que el submarino accionado por la energía nuclear es casi una realidad. Parece, pues, que conseguir energía nuclear abundante y los medios de utilizarla para fines prácticos es algo que se encuentra a la vuelta de la esquina. Y no es así. Los problemas que una realización práctica, en sentido económico, plantea a la técnica son problemas nuevos los más, y en cualquier caso difíciles. La resolución de estos problemas implica un acrecentamiento previo de la experiencia en el nuevo campo de la tecnología de los reactores, y, por consiguiente, requiere ante todo tiempo. Sin embargo, no parece que, aparte de mayor experiencia, haga falta para resolverlos más que la aplicación de técnicas ya existentes y el conocimiento de datos que habrán de proporcionar los experimentos sistemáticos en curso. Hoy no se puede ya poner en duda la posibilidad técnica de producir energía eléctrica en una central alimentada por la energía térmica liberada en la fisión. No cabe dudarlo simplemente porque se ha conseguido producirla. Pero la cuestión es saber si esta energía eléctrica puede o podrá competir en el terreno económico, cuando se produzca en gran escala, con la obtenida a partir de los recursos ordinarios —saltos de agua o carbón, por ejemplo—. La respuesta que por hoy cabe dar no es categórica. Sólo podemos contestar con un «depende».

De acuerdo con lo que precede, el programa que nos proponemos² es presentar primero las consideraciones técnicas en que se basará el análisis, examinar a continuación las posibles alternativas técnico-económicas y administrativas y el problema de los costos para, finalmente, apuntar algunas consecuencias, más o menos previsibles, del aprovechamiento económico de la energía nuclear. Pero todo ello, re-

² En los dos artículos; ver nota al pie de la pág. 427.

petimos, dentro del margen de vaguedad que imponen las limitaciones antes señaladas, por no hablar de posibles efectos de factores imponderables de la futura historia social y política.

MECANISMO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR.

No abordamos aquí la descripción de las características físicas del proceso de fisión ni la descripción de los aspectos físicos y técnicos de los reactores nucleares, salvo en aquellos puntos en que necesariamente habrá de apoyarse el análisis económico. Por lo demás, en otro lugar se habla con detención de estas cuestiones ³. Bastará, pues, recordar algunos hechos y nociones.

Es sabido que los núcleos de la mayor parte de especies atómicas son capaces de absorber, de capturar los neutrones. Por lo general, la captura de un neutrón por parte de un núcleo conduce simplemente a otro núcleo más pesado dotado de propiedades radiactivas. El núcleo así formado experimenta una sucesión de transiciones radioactivas, hasta convertirse en un núcleo estable o, por lo menos, estable a los efectos prácticos. En este proceso de *captura* se emite, ciertamente, energía, pero en cantidades relativamente pequeñas y, además, hemos perdido un neutrón libre. Acaso la pérdida de este neutrón quede compensada por nuestro interés en el núcleo producto. Al fin y al cabo, es esta captura lo que permite producir isótopos en cantidades apreciables mediante el bombardeo de sustancias estables con neutrones en el interior de la pila o reactor. Además, es así como partiendo de materiales fértiles, como el torio (Th-232) o el isótopo más abundante de uranio (U-238), se pueden sintetizar núcleos de dos isótopos que no existen prácticamente en la Naturaleza y de gran importancia para la obtención de energía nuclear: el uranio-233 y el plutonio (Pu-239). En ambos casos, la captura es un proceso que nos conviene que se produzca —a pesar de la consiguiente pérdida de un neutrón— e incluso representa, o puede representar, un papel de primer orden en la eco-

³ SÁNCHEZ DEL RÍO, CARLOS: *Pasado y presente de la Física Atómica y Nuclear*. ARBOR, XXVII, 1954; pág. 131.

nomía de la planta de energía nuclear, conforme se verá. Pero estos casos constituyen la excepción. La regla es otra. La captura de neutrones por la mayor parte de materiales es un fenómeno que plantea uno de los más difíciles problemas a la tecnología de los reactores de potencia, ya que de hecho no se dispone nunca del margen de neutrones libres suficientes como para poder permitirse el lujo de perder una parte apreciable de ellos sin compensación alguna.

Ahora bien, en el caso de los núcleos pesados, un nuevo proceso puede competir con el de captura: el proceso de *fisión*. En éste el núcleo formado por el núcleo pesado inicial y el neutrón, se parte en dos dando lugar a dos núcleos más ligeros, intensamente radioactivos y animados de gran energía cinética, produciéndose además un cierto número de neutrones libres, del orden de 2,5 por fisión. La energía liberada (unos $3,2 \cdot 10^{-11}$ vatios-segundo por fisión) es tal que la fisión completa de 1 gr. de U-235 proporcionaría 23.000 kilovatios-hora de energía calorífica, originada principalmente al chocar los fragmentos producto de la fisión con los átomos que los rodean. Pero, además de conseguir energía, no sólo recuperamos el neutrón inicial y con él la posibilidad de provocar una nueva fisión, sino que contamos con un margen de neutrones disponibles en exceso que, de acuerdo con lo antes dicho, es del orden de 1,5 por fisión. Ciertamente es que no todos estos neutrones se conservarán en el sistema. Algunos escapan, otros serán capturados, productivamente o no. Pero es claro que bastará que cada vez uno de los 2,5 neutrones provoque una nueva fisión para que se produzca energía de manera continuada. El proceso seguirá hasta tanto exista en el sistema material fisiónable y no cambien fundamentalmente las propiedades físicas del medio en que tiene lugar el proceso (envenenamiento), es decir, no cambie la «economía» de los neutrones y dispongamos efectivamente de un neutrón para provocar una nueva fisión en compensación del que perdimos en la fisión que lo originó. Hemos subrayado lo de *uno* porque, evidentemente, si son más de uno los que, procedentes de una fisión, provocan a su vez nuevas fisiones, lo que tendrá lugar será no una liberación continuada y controlable de energía, sino una extraordinariamente rápida reacción en cadena y la liberación prácticamente instantánea de una enorme cantidad de energía. No es este caso el que aquí nos ocupa.

Con relación a los procesos de fisión y captura conviene también

recordar que ambos pueden ocurrir en una misma especie nuclear. Es decir, cuando un neutrón choca con un núcleo pesado, el resultado puede ser la mera captura del neutrón o la fisión del núcleo compuesto. Se suele llamar sustancias *fisionables* aquellas para las cuales la probabilidad de fisión es en tal grado mayor que la de captura que el proceso de fisión puede mantenerse en ellas por sí mismo con masas de dimensiones moderadas. Además, tanto una como otra probabilidad dependen no sólo de la especie nuclear, sino de la energía del neutrón incidente. Como, por otro lado, los materiales prácticamente fisionables absorben con mayor facilidad los neutrones de baja energía cinética que los de energía cinética elevada, convendrá en ocasiones disminuir o moderar la energía de los neutrones producidos en la fisión, con el fin de sacar partido de aquella mayor fisionabilidad en el caso de neutrones lentos. Este hacer perder energía al neutrón, se consigue sin más que incorporar al sistema una sustancia de muy baja probabilidad neutrones lentos. Este hacer perder energía al neutrón se consigue sin ser capturados prácticamente. El neutrón irá perdiendo así velocidad en cada colisión hasta que su energía llega a ser del orden de la energía cinética de agitación térmica de los átomos del moderador. Cuando alcanza esta energía, el neutrón se califica de *término*.

Pues bien, siempre que en lo que sigue hablemos de un *reactor nuclear* nos referimos a un sistema constituido por material fisionable (o combustible nuclear), un dispositivo de refrigeración —destinado a separar el calor producido—, un dispositivo de control, una cierta masa de moderador eventualmente y los materiales estructurales indispensables. El sistema va rodeado de un cierto espesor de material destinado a reflejar neutrones que de otro modo escaparían (*reflector*), y, finalmente, de otro espesor de material fuertemente capturante, cuyo objeto es reducir la radiación nociva total en el exterior del sistema a un fondo tolerable (*blindaje*). Las propiedades físicas de los elementos constituyentes y las características y dimensiones geométricas de los mismos y del conjunto deben ser tales que se mantenga la reacción en cadena controlada. Si las fisiones se deben en su mayoría a la absorción de neutrones de elevada energía, próxima a aquella con que son emitidos en la fisión, el reactor es un *reactor rápido*, en cuyo caso huelga el moderador. Cuando, por el contrario, las fisiones están provocadas en su mayor parte por neutrones térmicos, el reactor se llama

reactor térmico. Existe también, claro está, la posibilidad de un reactor intermedio, pero poco tendremos que ocuparnos de ellos ⁴.

Y llegamos con esto a la cuestión del combustible nuclear. El único material fisionable que se encuentra en la Naturaleza en cantidades prácticamente apreciables es el uranio-235, y aun en este caso el uranio natural contiene tan sólo un 0,71 por 100 de dicho isótopo. El resto está constituido esencialmente por uranio-238, inerte de suyo, aunque susceptible de transformarse en plutonio conforme se indicó. Desde este punto de vista, el U-235 es el combustible nuclear primario. Cuando se dispone de él es ya posible «criar» plutonio a partir del isótopo abundante de U-238, o la otra tercera sustancia fisionable de interés práctico, el U-233, a partir del torio. Bastará, en principio, someter el U-238 o el torio a la radiación neutrónica en el interior de un reactor alimentado por U-235. Claro está que la cosa no es tan fácil. Pero, en esencia, de esto es de lo que se trata cuando se habla de crianza o *recria* de combustible nuclear a partir de materiales fértiles. El interés de los citados combustibles, U-233, U-235 y Pu-239, procede de que cuando el combustible nuclear contiene uno cualquiera de ellos en proporción relativamente elevada, es posible conseguir una reacción en cadena estable provocada por neutrones rápidos, con el consiguiente mejoramiento en la economía de neutrones y, por ejemplo, disminución de las dimensiones del sistema. Este último factor es particularmente importante cuando se trata de reactores destinados a producir energía para unidades móviles —un submarino, pongamos por caso—. Más adelante volveremos sobre estos puntos. Antes conviene considerar en esquema la estructura general de una planta para la producción de energía nuclear.

Ningún medio práctico se conoce hoy que permita convertir directamente en electricidad o en energía mecánica la energía liberada en la fisión. Es necesario, por tanto, aprovechar la energía en forma de calor y traducirla en energía eléctrica siguiendo, más o menos, el camino ya conocido de accionar un turbogenerador con el vapor producido por el calor. Todo ello entraña una considerable pérdida de energía. Rendimientos del 25 por 100 ó del 30 por 100 no son excepcionales.

⁴ Los submarinos norteamericanos *Nautilus* y *Sea Wolf* estarán dotados de un reactor térmico e intermedio, respectivamente.

Pero es difícil pasar del 34 por 100 ó del 35 por 100. Ciertamente es que en determinados casos podría interesar en sí el calor producido en el reactor nuclear, por ejemplo, para la industria química o para fundir metales. Sin embargo, salvo en uno —el de la calefacción urbana por distritos—, las temperaturas a que se requiere dicho calor son excesivamente elevadas con relación a las que admiten los materiales utilizables hoy en los reactores. Con otras palabras: aunque no se pueda excluir sin más esta posible aplicación, sí hay que relegarla por el momento a un terreno puramente especulativo frente a la que ofrece la producción de energía eléctrica basada en el calor nuclear. En este último caso, el primer problema que se presenta es el de cómo extraer el calor producido en el reactor a temperatura adecuada. El refrigerante puede ser un gas inerte, por ejemplo: helio, o un líquido, agua normal o pesada, o un metal fundido. Pero tanto el refrigerante como el sistema de refrigeración han de ser tales que no perturben la economía de neutrones y, además, han de ser capaces de soportar las duras condiciones a que se ven sometidos en el interior del reactor. Con un cierto éxito se ha empleado metal fundido como refrigerante. En particular, el sodio y el NaK son adecuados para temperaturas de hasta unos 800° C., y no hay que perder de vista que conviene trabajar a temperaturas elevadas para aumentar el rendimiento térmico. A la salida del reactor el refrigerante pasa a un intercambio de calor, donde lo cede para producir el vapor que alimenta al turbogenerador. A partir de este punto, el proceso y el equipo necesario son los mismos que en una central térmica ordinaria, y en consecuencia los costos.

Vemos, pues, que el reactor o pila ha sustituido a la caldera y, en general, al conjunto de los medios para la producción de vapor que encontramos en una central térmica. El resto de las instalaciones es común a la planta nuclear y a la planta ordinaria —en particular, la red de distribución de la energía eléctrica a los abonados—. Pero en el capítulo de diferencias entre uno y otro tipo de plantas hay que añadir otro elemento a la sustitución de la caldera por el reactor: la necesidad de asociar a éste una planta de tratamiento químico de los productos de descarga. En primer lugar, a la vez que se produce energía de modo continuo en la reacción en cadena se van acumulando en el interior del reactor fragmentos de fisión, entre los cuales se encuentran sus-

tancias que capturan fuertemente a los neutrones, tendiendo así a extinguir la reacción. Ciertamente es que, por otro lado, la captura de neutrones por el U-238 conduce a la formación de plutonio, cuya aparición determina un efecto antagónico al anterior. Pero, aparte de que quizá nos convenga más separar el plutonio que dejar que se consuma en el reactor, cuando el combustible nuclear se emplea en estado sólido (por ejemplo, uranio en barras) no puede permanecer demasiado tiempo en el interior de aquél y es preciso descargarlo. La intensa radiación a que se ven sometidos los elementos del combustible produce, en efecto, profundas alteraciones físicas en los mismos, hasta tal punto que, a la larga, ponen en peligro todo el sistema. Corrosión y cambio de forma se presentan siempre, incluso cuando dichos elementos se han sometido a un tratamiento previo a su introducción en el reactor, si bien entonces surgen considerablemente más tarde. Llegamos así a la conclusión de que por más de un motivo es menester descargar periódicamente el reactor. Los productos de descarga son, en esencia, los fragmentos de fisión, la materia fisionable pura no consumida o creada y material fértil. El conjunto es altamente radioactivo y cualquier tratamiento para la recuperación del material fértil, del material fisionable y de los isótopos radiactivos de posible valor económico, deberá efectuarse en una situación sumamente complicada por toda clase de factores, no siendo el menos enojoso la necesidad de operar a distancia. Y, a pesar de todo, no podemos desperdiciar, no digamos ya el material fisionable, sino ni tan sólo el meramente fértil. Se impone de suyo, por tanto, efectuar aquella operación. De ahí la necesidad que se señaló al principio. Sea asociándole una instalación para el tratamiento químico, sea erigiendo una planta de recuperación que sirva a varias centrales nucleares a la vez, el reactor ha de poder contar con que el combustible que se separó de él antes de ser consumido totalmente volverá a él. De lo contrario, el costo del combustible haría probablemente inútil todo intento de fundar una industria de la energía nuclear. Es posible que la economía del sistema global resulte beneficiada al adoptar la segunda solución. En efecto, la recuperación centralizada permitiría dar a la planta de tratamiento químico la capacidad óptima, mucho mayor seguramente que la necesaria para el servicio de un solo reactor. En tal caso, la disminución del costo de recuperación cuando se opera utilizando al máximo la capacidad óptima, podría muy bien

superar el costo adicional de transporte de los productos de descarga de la central a la planta de recuperación ⁵.

Resumiendo: al comparar la planta térmica ordinaria para la producción de energía eléctrica con la planta nuclear, encontramos elementos comunes y elementos específicos. Son específicos de la planta nuclear: el reactor, la planta de recuperación y el intercambio de calor. Las instalaciones y el equipo restantes son comunes a ambos tipos de central. Sin embargo, tocante a este último quizá convenga hacer una salvedad que repercute en lo económico: En una central térmica moderna de elevado rendimiento se opera a temperaturas relativamente altas y el vapor se emplea a alta presión. Tanto la turbina como el condensador están proyectados para trabajar en estas condiciones, las más favorables para conseguir alto rendimiento y un costo reducido. La cuestión que se plantea es entonces la de si podrán alcanzarse en el reactor las temperaturas requeridas. Si la respuesta fuera negativa, el tener que renunciar al empleo de los modernos turbogeneradores introduciría una diferencia más entre la planta nuclear y la central térmica ordinaria, cuyo efecto económico sería aumentar el costo de la energía eléctrica producida en la primera. Ahora bien, si para conseguir un alto rendimiento hay que hacer trabajar el reactor a temperaturas elevadas, al problema que plantea la intensa radiación a que se ven sometidos los materiales estructurales se añade el que a su vez plantea el llevarlos a altas temperaturas. Si, además, se recuerda lo que antes dijimos referente a la necesidad de emplear materiales de muy baja captura neutrónica, se llega a la conclusión de que las condiciones impuestas a los materiales estructurales son tan restrictivas que el número de los prácticamente aceptables queda extraordinariamente reducido. El hecho es que la mayor parte de los materiales empleados hasta ahora comúnmente en ingeniería por sus propiedades físicas y abundancia, o capturan con excesiva facilidad los neutrones o cuando su captura es débil carecen de la resistencia necesaria para soportar a la vez una intensa radiación y una temperatura elevada. Por ejemplo, diferentes razones obligan a proteger los elementos sólidos de combustible nuclear con una delgada cubierta. Si nos atenemos tan sólo

⁵ Este puede ser relativamente elevado, debido a la naturaleza radioactiva del material. El costo del transporte del material recuperado desde la planta de recuperación a la central es prácticamente despreciable.

a sus propiedades nucleares, podemos elegir para ello un metal tan común como el aluminio. Pero entonces la temperatura en la superficie de dichos elementos no puede pasar de 350° a 400° C. Si la temperatura ha de ser más elevada hay que acudir al empleo del zirconio o del berilio, no ya tan comunes. Con esto, el problema de encontrar materiales que reúnan todas aquellas condiciones adquiere una importancia fundamental cuando se piensa en el reactor como fuente de energía ⁶. Y es de temer que estos materiales, bien sea por poco comunes, bien sea por el grado de pureza requerido, serán caros.

ALTERNATIVAS TÉCNICO-ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS.

El objetivo último de una industria de la energía nuclear es la producción de energía eléctrica a un costo que pueda competir con los costos actuales de la electricidad obtenida en los saltos de agua o en las centrales térmicas que utilizan combustibles ordinarios. Dado que estos costos varían considerablemente de un lugar de producción a otro, se advierte, desde luego, que el problema podría estar técnicamente resuelto para una área económica determinada y, sin embargo, quedar los costos de la energía nuclear considerablemente por encima del costo de la energía eléctrica en otra área. Es claro, por ejemplo, que la energía nuclear ofrece perspectivas más prometedoras en Australia que en la mayor parte de los Estados Unidos, aunque incluso en este último caso haya sus excepciones. Pero no menos claro es que si de la estimación de los posibles costos de dicha energía resultara que éstos superan a los costos actuales más elevados de la energía eléctrica, el interés económico de la energía nuclear quedaría muy limitado. Ahora bien, no cabe emprender un análisis del costo posible de la energía nuclear sin antes considerar los aspectos técnico-económicos del proceso de producción tal como los conocimientos actuales permiten concebirlo. Qué pueda ocurrir mañana es difícil de prever. Limitándonos, pues, a lo que hoy se sabe se examinarán, en lo que sigue, aquellos aspectos apoyándonos en lo dicho en la primera parte.

⁶ El reactor MTR (Material Testing Reactor), construido en Arco, Idaho, se proyectó con la finalidad de resolver este problema. El MTR alcanzó su plena potencia (30.000 kilovatios) en mayo de 1952.

Dos son, en esencia, los tipos de planta en los que cabría producir energía nuclear: las plantas específicamente proyectadas con vistas a la producción de energía y las plantas mixtas o duales. La razón de distinguir entre estos dos tipos de planta se deduce de lo que sigue. Conforme se vió, en todo reactor nuclear se produce calor, neutrones y fragmentos de fisión. A cada uno de estos productos va asociado un valor económico, ya que el calor podría alimentar un turbogenerador, los neutrones permiten transformar el uranio-238 y el torio —relativamente baratos y abundantes— en elementos no existentes en la Naturaleza que pueden alcanzar precios extraordinariamente elevados (el plutonio y el U-233), y, finalmente, las propiedades radioactivas de los fragmentos de fisión los hacen aplicables a multitud de usos industriales y puramente científicos. Dejando de lado esos últimos, cuya importancia económica es relativamente pequeña, es posible orientar el proyecto del reactor o hacia la producción de energía o fundamentalmente a conseguir plutonio o U-233, bien sea para la puesta en marcha o mantenimiento de otros reactores nucleares, bien para su empleo en la fabricación de armamento atómico. No hay que perder de vista, sin embargo, que a la producción de nuevo material fisionable acompaña siempre la producción de energía en el reactor, mientras que la recíproca no es siempre cierta⁷. Es decir, la energía aparece siempre como subproducto —aunque quizá en forma no utilizable— del proceso de obtención de material fisionable en el reactor nuclear, mientras que a la producción de energía útil puede ir asociada la de nuevo combustible como subproducto, si bien no necesariamente. No parece probable, sin embargo, que las primeras plantas que se construyan para la producción de energía dejen de utilizarse a la vez para conseguir material fisionable. En realidad, lo que distingue un *reactor de potencia* de un *reactor dual*, no es que el primero produzca exclusivamente energía y el segundo energía y combustible nuclear, sino más bien que aquél se ha proyectado con la finalidad *primera*, pero no *única*, de producir energía y éste con la de obtener plutonio o U-233 fundamentalmente. La diferencia consiste puramente en una cuestión de énfasis, pero a la vez de considerable trascendencia. Porque es el caso que, probablemente, la producción de plutonio en condiciones óptimas y a un costo bajo será incompatible con

⁷ Por ejemplo, el reactor llamado Water Boiler (Los Alamos, Estados Unidos) produce energía, pero no combustible nuclear.

la realización del mismo objetivo para la producción de energía. Más exactamente: la cantidad de plutonio producida por unidad de combustible consumida y la energía *útil* producida por unidad de combustible consumida están ligadas entre sí de tal manera que cuando una aumenta la otra disminuye, para una potencia térmica total dada. Con todo, las condiciones que hacen óptima la producción de energía no son tan críticas como las que impone el intento de conseguir plutonio al más bajo costo. Por otra parte, una de las ventajas de la refrigeración por metal líquido es que, aun trabajando en condiciones próximas a las óptimas para la producción de plutonio, resulta todavía factible el aprovechamiento de energía útil. Existe, pues, la posibilidad de producir energía y nuevo material fisionable en condiciones favorables para ambos, si bien no sean exactamente las óptimas ni para una ni para otro.

Que las dos posibilidades que ofrecen la planta de potencia y la planta dual no son puramente técnicas, sino a la vez económicas, se advierte con sólo considerar, por ejemplo, que la venta al Gobierno del material fisionable producido en la última podría permitir el suministro de energía eléctrica al mercado a un precio no superior al que hoy alcanza. Claro está que esta solución lo es sólo en tanto el valor «efectivo» del plutonio sea muy elevado, y equivale, en el fondo, a que el interés del Gobierno en conseguir plutonio con fines militares lo lleve a estimular su producción, bien sea pagando por él mismo precios considerables o contribuyendo de modo sustancial a los costos de capital y de operación de la planta nuclear. No cabe hablar, en realidad, de *valor* del plutonio o del U-233, sino de valores. El valor de uno y otro en una economía militar es muy superior al que cabe asociarles en una economía normal, dado que en la primera su valor lo adquiere en tanto que elementos fundamentales para la fabricación de armamento nuclear, mientras que en la segunda sólo es posible vincularles el que poseen por su contenido energético potencial que, una vez actualizado, se destinaría al mercado. Ahora bien, incluso en una economía de guerra fría —no digamos ya en una economía de paz— llegará un momento en que las necesidades militares de material fisionable puro quedarán cubiertas, descendiendo rápidamente la demanda del mismo por parte del Gobierno. La operación de la central productora de energía como planta dual perderá entonces su rasgo más atractivo. De

ahí que, a fines de 1952, la actitud de la industria norteamericana frente a la cuestión de producir energía nuclear comercial fuera, en términos generales, más bien de cautela. Existía la impresión de que es misión del Gobierno prestar su apoyo en el estadio inicial del desarrollo de la nueva industria, bien sea pagando la construcción de una planta piloto o asegurando la compra del plutonio obtenido como subproducto a un precio fijado de antemano y durante un determinado número de años. Desde entonces más de un grupo industrial ha decidido llevar adelante sus propios proyectos en este campo si se les autoriza a ello y se les presta acceso a la información hasta ahora clasificada, y esto sin pedir que se les asegure un precio para el plutonio y arriesgando su propio dinero. Por otra parte, el Gobierno norteamericano no parece inclinado a comprometerse a pagar por el material fisionable un precio quizá justificable ahora, pero que puede dejar de serlo en los próximos años. Más adelante volveremos sobre estos puntos.

Indicamos ya que la primeras centrales productoras de energía nuclear se proyectarán de forma que rindan a la vez que energía eléctrica, nuevo combustible nuclear, tanto si se trata de plantas duales como si se trata de plantas específicas. En la primera parte, por otro lado, se presentó en esquema el método seguido para la obtención de material fisionable a partir del uranio-238 y del torio. Desde este punto de vista, los reactores se suelen clasificar en *reactores de conversión* (o *convertidores*) y *reactores de recría*. Los primeros, por lo general térmicos, utilizan U-235 como combustible y producen plutonio o uranio-233. A este tipo pertenecen los reactores alimentados con uranio natural. Los segundos, por lo general rápidos, producen combustible *de la misma especie* que el que consumen, es decir, o plutonio por bombardeo del U-238 con neutrones procedentes de la fisión de plutonio, o uranio-233 por bombardeo del torio con neutrones que resultan de la fisión del uranio-233 inicial. Ahora bien, es posible utilizar los neutrones liberados en la fisión con tal eficiencia que no sólo se mantenga la reacción en cadena, sino que sobren neutrones que pueden producir en el material fértil más o, por lo menos, igual cantidad de sustancia fisionable pura que se consume en dicha reacción ⁸. Sin llegar a este

⁸ Según declaraciones de G. Dean, presidente de la A.E.G., en un discurso pronunciado en Atlantic City, Nueva Jersey, en junio de 1953.

extremo existen actualmente reactores con un elevado factor de regeneración, entendiéndose por tal el número de núcleos de plutonio o U-233 producidos por núcleo de combustible perdido en la fisión y por ciclo ⁹. No es fácil, sin embargo, conseguir factores de regeneración elevados, ya que para ello es menester utilizar al máximo los neutrones de fisión en exceso del neutrón necesario para mantener la reacción en cadena. En principio, un reactor alimentado con uranio natural, que trabajara con un factor de regeneración de 0,993, consumiría *todo* el uranio, incluso el relativamente barato y abundante (pero inerte) uranio-238. Para ello sería necesario, con todo, que los elementos de combustible permanecieran durante largo tiempo en el reactor sin necesidad de descargar éste, puesto que la utilización total supone la conversión del uranio-238, presente en aquéllos en la proporción de 99,29 por 100, en plutonio. Y vimos anteriormente los obstáculos que se presentan a una prolongada permanencia de los elementos de combustible en el reactor. Por otro lado, cabe la posibilidad, que también apuntamos, de someter los productos de descarga a un tratamiento radioquímico de recuperación. Pero conviene no olvidar que un tal tratamiento resulta muy caro en la actualidad, si bien es de esperar una reducción sustancial de los costos en el futuro. Veremos en la segunda parte que los costos de la energía nuclear no podrán competir, *en general*, con los de la energía eléctrica obtenida con los medios ordinarios, a menos que el costo del combustible nuclear sea prácticamente despreciable. Luego, de acuerdo con lo que precede, esto sólo ocurrirá cuando o bien la materia prima inerte —muy barata, dado su contenido energético potencial— pueda permanecer en el reactor largo tiempo, o bien disminuyan considerablemente los costos actuales de tratamiento radioquímico. Por todas esas razones es de prever que si se construye en el próximo futuro una central para la producción de energía nuclear, el reactor será en ella del tipo convertidor, con un elevado factor de regeneración, lo que no excluye el empleo de reactores de recría en un estadio más avanzado de la nueva industria, cuando la tecnología haya alcanzado un grado de desarrollo del que hoy carece.

Repetidamente se han discutido, sobre todo en los Estados Unidos,

⁹ El reactor de agua pesada de Argonne, Estados Unidos, produce 300 kilovatios, y por cada 100 núcleos de U-235 consumidos regenera 80 núcleos de plutonio.

el pro y el contra de cada una de las dos soluciones reactor específico de potencia —reactor dual—. La polémica ha llevado a agrupar a científicos y técnicos en dos bandos correspondientes a una y otra alternativa, bandos que defienden con tesón poco corriente sus propios puntos de vista. Es claro que la finalidad que debe perseguirse en el caso de la planta específica es reducir los costos de inversión por kilovatio de capacidad y disminuir el costo del combustible, aumentando hasta el máximo el grado de utilización del mismo. Pero a esto arguyen los partidarios de la otra solución que no es fácil resolver ambos problemas, mientras que la planta dual ofrece ya en la actualidad posibilidades de vender energía eléctrica de origen nuclear a un precio que pueda competir con los precios ordinarios en el mercado, y ello precisamente gracias a la venta simultánea de material fisionable al Gobierno. No cabe dudar del peso de este argumento, y en un cierto sentido es posible que el reactor dual constituya la transición más práctica desde las plantas actuales productoras de plutonio a las futuras centrales que producirán fundamentalmente energía. Sin embargo, precisamente el hecho de que esos reactores no serían distintos en esencia de los destinados hoy a la producción de materiales fisionables constituye, a la vez que una ventaja, un inconveniente, a saber, el de que probablemente quedarán anticuados poco después de estar en funcionamiento. Esto contribuye a que el período de amortización deba ser mucho más corto que el usual en las empresas productoras de energía eléctrica. En vez de períodos de amortización del orden de unos veinte, quizá treinta años, nos encontraríamos con períodos de diez, y aun puede que sólo cinco años, lo que a su vez determina cargas fijas anuales por depreciación, incluso del orden del 18 por 100 del capital invertido. Pero no es esto todo. El reactor dual descansa en su aspecto económico en la existencia de un mercado asegurado para el plutonio, y surge la pregunta de qué hacer con éste cuando queden cubiertas en el futuro las necesidades militares. ¿Seguiría comprándolo el Gobierno para subvencionar de algún modo a las empresas productoras de energía nuclear? Es, por lo menos, dudoso. Cierto es que el desarrollo de la propia industria productora de dicha energía supondrá una creciente demanda de material fisionable, y será capaz de absorber todo el que se produzca, pero en todo caso a un precio no tan elevado como el

que alcanza en la actualidad. Todas esas consideraciones limitan notablemente la importancia de las plantas duales para la nueva industria, con excepción del estadio inicial. Es de prever que, a largo plazo, la producción de energía nuclear descansará sobre la base de centrales específicamente proyectadas para producirla en las más favorables condiciones. La producción de combustible podría entonces conseguirse en condiciones óptimas en reactores proyectados precisamente con esta última finalidad.

Sumamente interesantes han resultado dentro de ese orden de ideas las declaraciones de los representantes de ciertos grupos industriales norteamericanos ante el Comité Conjunto de Energía Atómica del Congreso ¹⁰, como también los informes que presentaron con anterioridad (1952) de acuerdo con el *programa de participación industrial*, establecido en 1951. Nos limitaremos a hacer una breve reseña de unas y otros, remitiendo al lector interesado en los pormenores a la literatura indicada al final de la segunda parte de este trabajo ¹¹.

La finalidad del citado programa fué estimular en la industria privada el estudio de la tecnología de los reactores y utilizar en nuevos proyectos el caudal de experiencia acumulado por ella a lo largo de años de explotación industrial, tanto en el aspecto técnico como incluso en el económico. Cuatro fueron los grupos industriales que participaron inicialmente (enero 1951) en el mismo, de cada uno de los cuales formaban parte dos compañías: a) El grupo St. Louis (Monsanto Chemical Co. y Union Electric Co. of Missouri). b) El grupo Michigan (Dow Chemical Co. y Detroit Edison Co.). c) El grupo Chicago (Commonwealth Edison Co. y Public Service Co. of Northern Illinois). d) El grupo Pacífico (Pacific Gas & Electric Co. y Bechtel Corporation). Un quinto grupo se incorporó en septiembre de 1952, pero los resultados de sus investigaciones no han sido presentados todavía, que sepamos. De él forman parte la Foster-Wheeler Corp. y Pioneer Service & Engineering Co. Según el resumen de los informes presentados que hizo público la Comisión de Energía Atómica norteamericana en mayo de 1953, los cuatro primeros grupos estaban de acuerdo en que es factible la construcción de reactores del tipo dual

¹⁰ 24 de junio a 31 de julio de 1953.

¹¹ Ver nota al pie de la pág. 427.

que trabajarían en condiciones tales, que el plutonio producido reduciría el costo de la energía nuclear a un nivel razonable. En la introducción se dice también que dichos grupos estaban asimismo de acuerdo en que ningún reactor se podría construir en el inmediato futuro que produjera sólo energía a un costo aceptable. A propósito de esta última afirmación, quizá merezca la pena señalar que, según declaraciones de J. W. McAfee, presidente de la Union Electric, a la revista «Nucleonics» (octubre 1953), esta compañía se ha agrupado con la Pacific Gas & Electric Co., la Bechtel Corp. y la American Gas & Electric Co. para concentrar todos sus esfuerzos en la obtención de energía en grandes reactores de potencia, puesto que los reactores duales no les parecen ya tan prometedores como antes. Aceptado que hubiera habido acuerdo, este anuncio pondría entonces de manifiesto que nuevos hechos han llevado a un cambio radical de actitud en algunas de las compañías interesadas. Y es por lo menos notable que la Monsanto Chemical Co., que con la Union Electric constituía el grupo St. Louis, se ha separado de ésta y proseguirá sola sus investigaciones en la primitiva dirección.

En cuanto a las declaraciones ante el Comité Conjunto de Energía Atómica, el sentido de las mismas fué en esencia el siguiente ¹²:

Grupo St. Louis.—La Monsanto Chemical Co. persigue la construcción de una planta dual que produciría plutonio destinado al programa militar del Gobierno y energía como subproducto. El primer paso consistiría en levantar una planta piloto, empresa a la que la compañía contribuiría con una «inversión sustancial», si la Ley sobre energía atómica se cambiara de forma que proporcionara un incentivo suficiente. La amortización prevista es para un período de cinco a diez años. Admite que *probablemente* quisieran que el precio del plutonio se mantuviera fijo durante unos años.

Grupo Michigan.—Los esfuerzos de estas compañías se encaminan al proyecto preliminar de un reactor rápido de recría, que trabajaría a elevada temperatura, y de la planta asociada para la producción de energía eléctrica a un costo que pueda competir con la obtenida por medios ordinarios. El reactor en cuestión contaría con una planta para el tratamiento radioquímico. Las primeras fases de la construcción po-

¹² De los cinco grupos industriales citados, declararon representantes de sólo cuatro.

drían emprenderse antes de fines del corriente año y el proyecto quedar terminado en diez años o quizá menos. La inversión necesaria procedería del capital privado, al margen de toda subvención oficial, y la empresa operaría sin suponer contrato alguno de compra de plutonio por el Gobierno ni garantías de ninguna clase en este aspecto. Ponen, sin embargo, como condición que se modifique la Ley sobre energía atómica en el sentido de que la parte administrativa recaiga por completo en las compañías interesadas, las patentes y la protección del secreto industrial en este campo se ajusten a las condiciones normales en otros campos, y el material fisionable producido y los subproductos radiactivos puedan ser vendidos y distribuidos por dichas empresas con un amplio margen de libertad.

Grupo Chicago.—La Commonwealth Edison Co. presentó tres proyectos de plantas para la producción de energía, aunque sólo dos de ellos ofrecen posibilidades económicas y descansan en el mantenimiento del combustible en el reactor durante largos períodos. Es decir, el plutonio producido no se separaría del reactor periódicamente para fines militares, sino que se dejaría en él su fisión y consiguiente producción de energía. Recomienda la construcción de una planta específica para la producción de energía. El 20 por 100 del capital sería privado y el resto gubernamental. El Gobierno actuaría como propietario del reactor y del combustible.

Grupo Pacífico.—No tenemos noticia de que hubieran hecho declaraciones ante el Comité. Conforme indicamos más arriba, las compañías que lo formaban se han integrado con otras de los grupos precedentes en la Nuclear Power Co.

El quinto grupo no pudo presentar todavía un informe formal. Las compañías que lo integran declararon, sin embargo, interesarse por reactores cuya finalidad específica sería la producción de energía eléctrica a un costo inferior al de la obtenida con los recursos normales.

Ante el Comité declararon también representantes de otras compañías que no habían formado parte de los citados grupos. Los puntos de vista expuestos fueron varios, incluso el de no creer probable la producción de energía eléctrica de origen nuclear en gran escala en el próximo futuro a un costo de competencia, si bien fueron muy pocos los declarantes que lo mantuvieron. Pero no cabe aquí entrar en los pormenores, ni lo creemos necesario, dado que nada nuevo añaden

den a los antes reseñados. Sin embargo, puede merecer la pena indicar que la Comisión norteamericana de Energía Atómica ha declarado de importancia nacional el objetivo de conseguir energía nuclear a un costo que pueda competir con el de otras fuentes de energía ¹³. Considera que la tecnología de los reactores ha avanzado hasta un punto desde el que cabe ya prever la realización de este objetivo en un futuro relativamente próximo. De acuerdo con esto, encargó a las empresas del quinto grupo el estudio preliminar para el proyecto de construcción y explotación de una central nuclear por parte de las mismas y estableció un contrato con otras compañías (entre ellas la Westinghouse Electric Corp., como primer contratista) para la construcción de un reactor con una capacidad de 60.000 kilovatios, que debiera entrar en funcionamiento dentro de tres o cuatro años. Por su parte, Gran Bretaña proyecta la construcción de una planta dual, en la que la sección dedicada a la producción de energía eléctrica sería de considerables dimensiones, si bien antes se recogerá toda la información posible a partir de la operación de un pequeño reactor experimental dual en construcción en Harwell. Se prevé dentro de este programa que uno de los reactores, basado en la combustión de uranio natural, podrá producir hacia 1956 unos 40.000 kilovatios a un precio doble que el de la energía ordinaria. Mejores perspectivas ofrece un reactor del tipo de recría, que producirá 50.000 kilovatios, y estará terminado dentro de tres años. Planes análogos existen en Canadá, si bien, según declaraciones del ministro canadiense de producción, el Gobierno considera que la construcción y operación de reactores para la producción de energía comercial incumbe, no al Gobierno, sino a la industria privada ¹⁴. En resumen, las perspectivas para el desarrollo de una industria de la energía nuclear son hoy mucho más prometedoras de lo que podía esperarse hace quizá ni tan sólo cuatro años. Pero aguardemos a ver qué nos dice el análisis de los costos.

No podemos dar por terminada esta parte sin señalar las posibles

¹³ Statement of Policy on Nuclear Power Development, 26 de mayo de 1953.

¹⁴ Desde hace unos años, Holanda y Noruega trabajan en colaboración en el campo de los reactores de potencia. Recientemente se ha hecho pública la existencia de un proyecto de central para la producción de energía eléctrica a partir de la energía nuclear. Se construirá en Nymegen y poseerá una capacidad de 10.000 kilovatios, pudiendo quedar terminada dentro de cinco a ocho años.

El porvenir económico de la energía nuclear

447

alternativas de carácter administrativo bajo las que podría desarrollarse la futura industria de la energía nuclear, dos de las cuales apuntan ya en las declaraciones de los grupos Michigan y Chicago, respectivamente. La situación aparece sumamente complicada en este punto por factores de política nacional e internacional y por razones de seguridad y militares. La causa es obvia: No es concebible la producción de energía nuclear en gran escala sin la producción simultánea de importantes cantidades de materia fisionable pura. Esta se dedicará, en una economía normal, a nueva producción de energía. Pero en un momento dado puede desviarse toda la producción hacia la fabricación de armamento nuclear. En estas condiciones, ¿puede dejarse el control y operación de la nueva industria libremente en manos de la industria privada? Por otra parte, ¿no cabe en lo posible que un control estatal exclusivo, con todo su aparato de seguridad, y la explotación en monopolio por el propio Gobierno amenacen seriamente el rápido progreso de la mencionada industria? Claro está que existe la posibilidad de una administración intermedia, a saber: a) control gubernamental de precios, producción y situación geográfica de las plantas; y b) operación bajo contrato por la industria privada. Pero tampoco esta solución está exenta de inconvenientes. Para citar sólo uno, obsérvese que si el Gobierno ha de decidir dónde se levantará una central de energía nuclear, muy bien puede ocurrir que el sitio elegido —por ejemplo, por razones de menor vulnerabilidad a un ataque enemigo— no coincida con aquel donde la central sería más necesaria y estaría justificada por razones económicas. No es fácil, pues, pronunciarse sin un previo pesar todos los pro y los contra de cada una de las posibles alternativas. De hecho, el propio Gobierno norteamericano tiende a apartarse de la línea política que hasta hace relativamente muy pocos años ha venido siguiendo y que hubiera llevado a la alternativa que traduce una completa intervención estatal. La experiencia ha demostrado, en efecto, que no pudo evitarse con ella todo lo que se pretendió evitar y que, en cambio, quizá precisamente debido a ella se ha retrasado en algunos años el progreso en el campo del aprovechamiento de esa nueva forma de energía. Se intenta ahora ganar el tiempo perdido estimulando la participación en gran escala de las empresas industriales, que, indudablemente, representan un potencial de conocimientos y experiencias técnico-económicos de incalculable valor.