

ENERGIA NUCLEAR Y SU REPERCUSION EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS

Conferencias pronunciadas en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, los días 9 y 10 de noviembre de 1955, por
D. VICTORIANO MUÑOZ OMS, Ingeniero de Caminos.

Palabras de presentación del Sr. Lucia.

Excelentísimos señores y queridos compañeros:

El Sr. Director de esta Escuela, temiendo estar ausente en el día de hoy, me había rogado que hiciera yo la presentación, por lo demás innecesaria, pero obligada por elementales razones de cortesía, del señor Muñoz Oms. Aunque por fin, como ustedes ven, nos honra con su presencia, ha insistido el Sr. Martín de Vidales en que sea yo el que en estos momentos les dirija la palabra. Quizá, por pensar que también en mí existen ciertas afinidades nucleares. Porque es curiosa y habrá sido observada por ustedes, la atracción que en estos momentos ejerce sobre todos nosotros lo nuclear. Fascinación que, a mi juicio, es de dos clases: una, sensacionalista, casi me atrevería a calificar de insana, influenciada todavía por el eco de las explosiones de las bombas atómicas; o que espera, bastante ingenuamente por cierto, que la explotación científica del núcleo del átomo va a traerle a la Humanidad el ansiado milenio. Frente a esta atracción existe otra, sana y ponderada, la que siente el científico o el técnico, convencido de que se halla frente a una nueva fuente de energía que va a desempeñar un papel cada vez más importante en la economía energética del planeta. El Ingeniero o el hombre de ciencia que va a entrar en ese mundo extraño de las reacciones nucleares, sabe muy bien, como el neófito en los misterios de Eleusis, que ha de someterse previamente a una larga y penosa iniciación.

El Sr. Muñoz Oms, brillante Ingeniero y al que no arredran las dificultades, ha sucumbido a esta sana atracción del misterio nuclear. Hombre de grandes dotes, dotes técnicas, dotes de organización, de Empresa, que ha patentizado bien a las claras con su labor al frente de la Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana. El Sr. Muñoz Oms ha realizado el milagro de simultanear estas tareas con la de seguir, y muy de cerca, el desarrollo de los reactores nucleares de potencia, tanto en su fase experimental como en su nueva fase comercial, en la que ahora están entrando; con la mira puesta siempre

en la posible utilización de estas centrales nucleares de potencia en nuestro sistema eléctrico español, el día en que comiencen a agotarse nuestras posibilidades hidráulicas.

Haciendo una pequeña pausa en su vida agitada, nos brinda el Sr. Muñoz Oms, muy amablemente, dos lecciones, la de hoy y la de mañana, sobre este tema apasionante. No quiero privaros por más tiempo de su palabra.

Introducción.

En primer lugar permítanme que dé las gracias a mi querido compañero, Sr. Lucia, por las palabras muy amables que me ha dirigido y que yo, personalmente, en lo que a mí conciernen, considero desorbitadas, si bien debo interpretarlas como fruto del afecto que nos une desde hace tantos años y, además, porque creo que él, con su elocuencia clara y su erudición extraordinaria, ha querido ambientar las conferencias que ahora voy a pronunciar.

Con estas conferencias temo defraudarles a todos ustedes. Me encuentro en una situación verdaderamente peculiar; por una parte, la calidad del auditorio indudablemente cohibe y coarta la libre expresión de las ideas que yo pueda tener; en segundo lugar, esta Casa, en la cual tantos años he vivido, todavía me recuerda las "mechas" que tuve que pasar sentado en los bancos de aquí y, naturalmente, esto hace que me encuentre en una situación de un poco de inferioridad. De todas formas, como en definitiva estoy entre compañeros y amigos, me confío a ellos, y por adelantado les doy las gracias, primero, por la atención y la benevolencia de venir, y después, por escucharme.

La atención a los temas que vamos a desarrollar en estas conferencias deriva, tal vez, de la preocupación que sentimos todos los que, en mayor o menor grado, tenemos la obligación de pensar en un porvenir en cuanto se refiere al suministro de energía del país para huir del drama, que todos conocemos, de las restricciones eléctricas. Esta preocupación nace, además, porque dados los incrementos de

consumo extraordinarios que, por fortuna, tenemos en España, los recursos naturales de agua, carbón, fuel..., tienen un límite, como nos encargaremos de demostrar aquí cuando hablemos de la repercusión de la nueva técnica en los sistemas eléctricos españoles en general.

Al sentir esta inquietud debemos, con tiempo, estudiar las nuevas fuentes que pueden remediar estos conflictos, entre las cuales, ostensiblemente, destaca la energía nuclear. De ahí que, primeramente, a título de curiosidad, después acrecentada ésta por el deber y, finalmente, porque, como muy bien decía el Sr. Lucía, al tratarse de temas fascinantes, de una manera apasionada vayamos detrás del aprovechamiento de esta nueva clase de energía.

Por estas razones, desde hace tiempo venimos siguiendo las teorías nucleares, leyendo todo lo que podemos de lo mucho que se publica, y hemos asistido a la última conferencia de Ginebra; asimismo visitamos, hace seis o siete meses, algunas de las instalaciones nucleares y algunos importantes yacimientos mineros de Norteamérica y del Canadá, en un momento en que, si no era fácil, porque todo estaba clasificado, nos sirvió de preciosa orientación y nos proporcionó importantes contactos con los técnicos especializados.

Sin embargo, si hemos estudiado algo, no lo hemos hecho profundamente; ni mi insuficiencia técnica lo permitía ni, como bien apuntaba el Sr. Lucía, es fácil encontrar el hueco necesario cuando las ocupaciones son muchas. Consecuentemente, no voy a tratar de darles unas lecciones, sino, más bien, sostener una charla, acaso vulgarizar unos conocimientos y, sobre todo, enfocar los temas bajo un punto de vista ingenieril.

La palabra "ingeniero" para mí tiene un alto significado, y éste no puede ser otro que el de sacar el máximo provecho de lo que los sabios, los teóricos, los experimentadores nos ofrezcan, en lo que hace ya referencia a realizaciones de orden práctico; creo que, en esta nueva materia del aprovechamiento de la energía nuclear, los ingenieros debemos hacer mucho; no podemos renunciar a este campo, tenemos una obligación moral. Debemos agradecer las ayudas concretas que nos pueda dispensar la Junta Oficial de Energía Atómica y recoger sus experiencias, sus guías y sus consejos; pero, en el momento de la aplicación, en el momento de la actuación, creo que nos corresponde un papel del cual no podemos desertar.

I. Síntesis de las ideas fundamentales y compendio sobre reactores y sus tipos.

Como les dije antes, no voy a tratar en estas conferencias de profundizar en las teorías que sustentan la nueva técnica; no obstante, me van a permitir que exponga unas ideas, las más simples, las más sintéticas, las fundamentales, para que, después de

ellas, lo que vayamos a decir respecto al orden práctico: reactores, combustibles, materiales, precios, costos unitarios, posibilidades, suministros de esta clase de energía, etc., etc., es decir, al referirnos a todo lo que es ingenieril, se sepa de dónde proviene y a qué concepciones generales obedece.

Por lo que afecta a lo que es el átomo y cuáles son sus componentes, podemos remitirnos a la erudita conferencia que no hace mucho pronunció en esta Escuela nuestro compañero Godel, al igual que a la película pasada en aquel momento, en la que se divulgaba vistosamente lo que es el átomo y sus componentes; además, la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS reprodujo, en el mes de mayo, un artículo mío sobre el particular que, a su vez, se había publicado en nuestra Revista *Ribagorzana*, hace un año aproximadamente.

ORIGEN Y VALOR DE LA ENERGÍA NUCLEAR.

Parece que al tratar, en estas conferencias, de una manera concreta, del aprovechamiento de la energía nuclear para usos industriales, debemos fijar especialmente nuestra atención y detenernos un poco en el examen de dónde surge, qué vale esta energía y cómo se aprovecha.

El concepto de esta clase de energía se hace difícil de asimilar. Por lo menos para mí, en los primeros momentos en que trataba de comprender qué era eso, no lo cogía, me era difícil; pero, como decía en el artículo antes aludido, es, en cierto modo, como en el caso de la presión atmosférica que gravita sobre nosotros; no la sentimos, pero si llegara a desaparecer bruscamente, nuestros órganos estallarían y moriríamos.

Trataremos de explicarlo.

Las masas reales de los átomos, físicamente comprobadas con el espectrómetro, tienen un valor inferior al de la suma de las masas de los componentes de aquéllos — protones, neutrones, etc. — considerados aisladamente, lo cual denota que en la asociación de los aludidos componentes, para la formación de los átomos, hubo una pérdida de masa, la que lo fué en forma de energía desprendida y por una cuantía, según la célebre ley de Einstein, igual al producto de dicha masa desaparecida por el cuadrado de la velocidad de la luz. Para aclarar el concepto, pongámonos en un caso cualquiera, por ejemplo, el del Helio (${}^4\text{H}^4$), compuesto, como se sabe, por dos protones y dos neutrones, cuyas masas, consideradas aisladamente, sumarían 4,033 unidades y, sin embargo, asociadas en el átomo, la masa resultante es sólo de 4,0028, lo que quiere decir que hubo una pérdida, un "defecto de masa", igual a 0,0302 unidades, convertidas en energía sobrante o desprendida.

Naturalmente, si de lo que se tratare fuera del fenómeno inverso, es decir, de desintegrar los átomos y soltar sus componentes, entonces lo que haría

falta es aplicar en la operación la misma cantidad de energía que la de antes, o sea, que habría que vencer una resistencia para la desintegración de los átomos, cuyo concepto implica el reconocimiento de una energía de cohesión, de igual valor al expuesto, en el interior de los átomos.

En rigor, los conceptos de defecto o aumento de masa, de cohesión y de energía producida o necesitada son los mismos, dado que se hallan íntimamente relacionados por la fórmula de Einstein y vienen a constituir la base y esencia de lo que hemos convenido en llamar *energía nuclear*. Y claro está, siendo medida ésta por el producto de la masa considerada, por el cuadrado de la velocidad de la luz, igual esta última a 300 000 000 metros por segundo, y siendo innumerables los átomos contenidos en cualquier materia, ya se comprende que esta clase de energía, a base de dos factores como éstos, tiene que ser cuantiosísima. ¡El problema está en saber cómo se puede aprovechar!

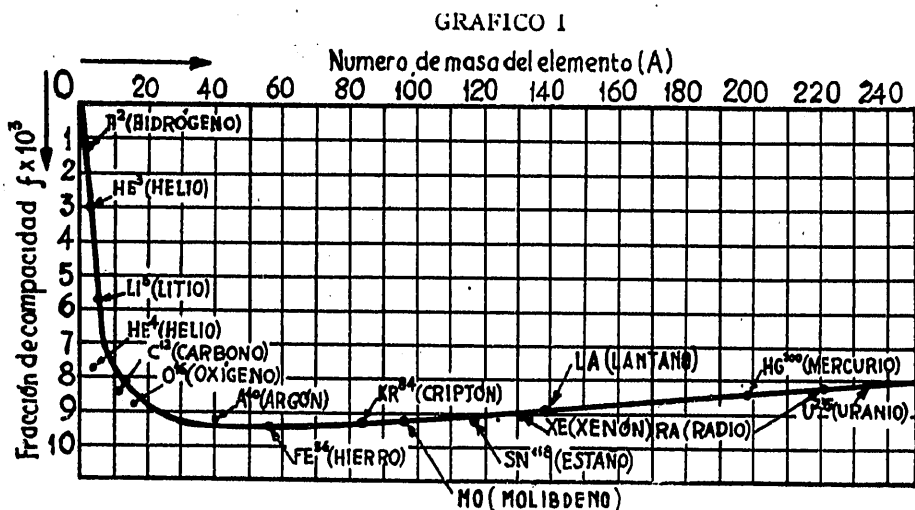
Refiriéndonos singularmente a los átomos, no todos tienen proporcionalmente la misma cantidad de energía cohesiva; unos tienen más y otros menos, y por lo tanto, unos son más propicios que los otros para las transmutaciones entre ellos y para la liberación de la energía nuclear. Veamos, a este respecto, cómo se comportan los distintos átomos en la naturaleza.

En el gráfico se observa que los valores más altos se hallan en la parte baja de la curva, alcanzándose el máximo de estabilidad en el caso del hierro; en cambio, los cuerpos de menor ordenada cohesiva, es decir, los menos estables, son los que figuran en las dos ramas extremas, y así, en la de la izquierda están el hidrógeno, el litio, el berilio, etc., etc., así como el radio, el uranio, etc., en la de la derecha; queda entendido que los cuerpos más propicios para operar sobre ellos, a los efectos de transmutación de unos a otros, son los segundos y no los primeros, es decir, los menos estables y no los figurados en la zona intermedia de la curva.

FENÓMENOS DE "FUSIÓN" Y "FISIÓN".

Por lo que hemos dicho, se observa que si se opera con los elementos de los núcleos, o sea con los protones y neutrones, para formar los átomos, e igualmente si se tratara de su desintegración, no es posible obtener energía, ya que, si se está en lo primero, hoy por hoy, no hay forma de actuar sólo con los protones y neutrones para integrarlos, y si se está en lo segundo, lo que resulta es tener que poner energía, cuando lo que se quiere es lo contrario.

En cambio, lo que sí resulta factible y práctico es operar con los átomos ya constituidos transmutándolos entre sí. En estas operaciones, para conse-



En este gráfico las abscisas representan a los distintos cuerpos según su número de elementos, y las ordenadas exponen los "defectos de masa" antes aludidos, a que ha dado lugar la formación de los átomos, divididos por el respectivo número de elementos, o, lo que es lo mismo, las ordenadas representan la energía cohesiva por unidad de las integradas en los núcleos de los correspondientes cuerpos y, naturalmente, cuanto mayor sea esta cohesión, los cuerpos más estables han de resultar.

guir el desprendimiento de energía, sin embargo, será preciso partir de los cuerpos de inferior "defecto de masa" para ir a otros de mayor "defecto de masa", con el fin de lograr, en la transmutación, unas pérdidas de masa que den lugar a la liberación de la energía pretendida, lo cual, salvo algún caso especial, obliga a que se actúe de arriba abajo en la expresión del gráfico que comentamos.

Obsérvese, asimismo, en el diagrama, que en los cuerpos de la rama izquierda, para ir de arriba aba-

jo, será preciso partir de cuerpos ligeros para ir a otros más pesados, o sea que habrá que operar asociando átomos, llamándose al fenómeno "fusión"; por el contrario, en los cuerpos de la derecha, para ir de arriba a abajo, hay que partir de cuerpos pesados para ir a otros ligeros, y, por consiguiente, habrá que operar escindiendo átomos, llamándose al fenómeno "fisión".

Por esta razón la "fusión" es propia de los cuerpos livianos y la "fisión" de los cuerpos pesados. Fi-

jense ustedes que los fenómenos son muy parecidos, pero son al revés: en un caso se parte de varios cuerpos ligeros para llegar a uno más pesado y falta algo; en el otro, por contra, se parte de uno pesado para llegar a otros más livianos, y también falta algo; en uno y otro caso lo que falta es la energía que buscamos. Para que se den mejor cuenta de lo que son estos importantes fenómenos, base del aprovechamiento de la energía nuclear, vamos a citar unos ejemplos:

CUADRO PRIMERO.

FISIÓN DEL URANIO		FUSIÓN DEL HIDRÓGENO Y LITIO	
<i>Masas antes de la fisión.</i>		<i>Masas antes de la fusión.</i>	
Atomo U 235	235,124 amus.	Atomo de hidrógeno.	1,00813 amus.
Un neutrón	1,009 "	Atomo de litio.	7,01811 "
TOTAL	236,133 amus.	TOTAL	8,02624 amus.
<i>Masas después de la fisión.</i>		<i>Masas después de la fusión.</i>	
Atomo de molibdeno.	94,945 amus.	Dos átomos de helio.	$2 \times 4,00384$ amus.
Atomo de lantano.	138,955 "	TOTAL	8,00768 amus.
Dos neutrones desprendidos	2,018 "	Diferencia	0,01856 "
TOTAL	235,918 amus.		
Diferencia	0,215 "		
<i>Número de átomos de uranio por kilo.</i>		<i>Número de átomos de helio por kilo.</i>	
$\frac{6,023 \times 10^{23} \times 1\,000}{235} = 2,55 \times 10^{24}$ átomos.		$\frac{6,023 \times 10^{23} \times 1\,000}{4} = 1,506 \times 10^{26}$ átomos.	
<i>Masa convertida en energía por kilo de uranio.</i>		<i>Masa convertida en energía por kilo de helio.</i>	
$2,55 \times 10^{24} \times 0,215 = 5,5 \times 10^{23}$ amus.		$\frac{0,01856}{2} \times 1,506 \times 10^{26} = 1,39 \times 10^{24}$ amus.	
<i>Equivalencia entre unidad de masa y Kw.-h.</i>		<i>Equivalencia entre unidad de masa y Kw.-h.</i>	
$E = mc^2 \rightarrow 1 \text{ amus} = 4,15 \times 10^{-17} \text{ Kw.-h.}$		$1 \text{ amus} = 4,15 \times 10^{-17} \text{ Kw.-h.}$	
<i>Energía desprendida por kilo de uranio en Kw.-h.</i>		<i>Energía desprendida en la fusión de un kilo de helio.</i>	
$5,5 \times 10^{23} \times 4,15 \times 10^{-17} = 22,8 \times 10^6 \text{ Kw.-h.}$		$1,39 \times 10^{24} \times 4,15 \times 10^{-17} = 57,5 \times 10^6 \text{ Kw.-h.}$	

Aquí están dos casos concretos. Caso de "fisión" del uranio y caso de "fusión" del hidrógeno y litio. En el caso de fisión, a un átomo de uranio 235 se le añade un neutrón y se consigue una masa de 236,133 amus. Después, como consecuencia de esta operación, se divide el cuerpo original y se consiguen un átomo de molibdeno y otro de lantano, más dos neutrones, que se desprenden dispuestos a operar en otros casos. Total, la suma de estas últimas masas es de 235,918 amus, o sea más liviana que la original; la diferencia es de 0,215 amus, y aplicando a ella la ecuación de Einstein, con las transformaciones co-

rrespondientes, viene a significar que la energía lanzada, liberada, digámoslo así, es de 22,8 millones de Kw.-h. por kilogramo de uranio 235.

En el caso del ejemplo de "fusión", se parte de dos cuerpos en lugar de uno: átomo de hidrógeno y átomo de litio; con la suma de ellos se consigue el helio. La masa de helio es inferior a la suma de las dos masas originales en 0,01856 amus. Estos amus equivalen a 57,5 millones de Kw.-h. por kilogramo de helio.

Claro está que toda la energía citada no se puede aprovechar en el momento actual. Se trata, em-

pero, de ir mejorando los sistemas. Hoy día, en los reactores a base del fenómeno de "fisión", como explicaremos después, el máximo de la energía que se recupera viene a equivaler a la de 10.000 Tn. de carbón por tonelada de uranio natural; se aspira — en la Conferencia de Ginebra se ha puesto de relieve — y se cree que muy en breve se podrá lograr el objetivo de alcanzar un equivalente a 100.000 Tn. de carbón, y se confía en que, a no tardar, se logrará el de un millón de toneladas de carbón. De manera que, sin llegar al total aprovechamiento de esa energía extraordinaria que acabamos de explicar, vemos que las posibilidades son enormes: una tonelada de uranio contra un millón de toneladas de carbón. Esto es una consecuencia de carácter práctico.

De los dos fenómenos de que hemos hablado, fusión y fisión, no nos vamos a ocupar ahora más que del que nos es asequible, o sea del de la fisión del uranio.

Sin embargo, permítasenos hacer resaltar brevemente el enorme poder de la fusión, utilizando como elementos de la reacción el hidrógeno, el deuterio (${}^2\text{H}^2$) y el triterio (${}^3\text{H}^3$), en razón a hallarse estos elementos en la parte más alta del diagrama antes exhibido; además, la cantidad de energía obtenible puede ser enorme como consecuencia de ser la primera materia inagotable, porque se halla en la inmensidad de los océanos.

No obstante, las condiciones en que se produce la fusión, hoy por hoy son de inútil, o por lo menos de difícilísimo aprovechamiento industrial en razón a que las temperaturas que se desarrollan son tan grandes que sobrepasan el millón de grados centígrados y esto es imposible controlarlo; no existen en la actualidad materiales que puedan resistir estas temperaturas; es más, no creo que exista material que pueda resistir más allá de 50.000°, y claro está, en estas condiciones, si las temperaturas que se desarrollan son de un millón de grados y además se desarrollan en una fracción pequeñísima de segundo, en una millonésima de segundo, resulta difícil pensar en la aplicación de ese enorme poder para usos industriales y si solamente en las explosiones súbitas, como son las de la bomba llamada de hidrógeno. Sea dicho, sin embargo, que en la Conferencia de Ginebra, en el momento de la inauguración, su Presidente el Dr. Bhabha produjo un cierto estremecimiento general al decir: "¡Cuidado, señores. que además de los problemas de fisión para el aprovechamiento industrial de la energía, hay los problemas de fusión!", a cuya cuestión los congresistas de las naciones adelantadas, sin que antes hubieran dicho nada, pusieron de manifiesto que "estaban estudiando este problema", de lo que se deduce que constituye una preocupación técnica, aun cuando por lo que hemos expuesto, al menos que nosotros sepamos, no se vislumbren probabilidades de éxito en un próximo futuro.

PROVOCACIÓN Y MODERACIÓN DE LAS REACCIONES NUCLEARES.

Visto ya donde radica la energía nuclear, cual es su valor, y examinados, asimismo, los fenómenos generales que ocasionan su desprendimiento, el problema siguiente está en conocer cómo se provocan las transmutaciones de los átomos. Es a base de los neutrones. En los componentes del átomo hay los protones, que tienen carga positiva; los electrones, que, actuando en la órbita exterior, tienen carga negativa, y los neutrones que no tienen carga ni positiva ni negativa, los cuales, por no tenerla, son de fácil penetración en los otros cuerpos, siendo por lo mismo los elementos que se encargan de atacar a los otros átomos y producir, en condiciones determinadas, los fenómenos de que acabamos de hablar.

La consideración del neutrón es esencial en todo lo que sea energía nuclear.

Los neutrones, además de iniciar las reacciones y de liberar energía, como ustedes vieron en el caso del uranio, hacen que se desprendan nuevos neutrones, y esos, a su vez, en condiciones determinadas, pueden atacar a otros núcleos, viniendo la acumulación geoméricamente creciente y produciéndose lo que se ha dado en llamar la "reacción en cadena", que es la multiplicación indefinida de las fisiones. Claro, si éstas no las controlamos se ocasiona la explosión súbita, es la explosión de las bombas atómicas; si las controlamos, y estos son los esfuerzos que les corresponde hacer a los físicos y a nosotros los Ingenieros, entonces es cuando se obtiene el aprovechamiento industrial de esa energía.

El problema, por consiguiente, está en cómo se puede conseguir que actúen los neutrones y en cómo se puede conseguir ese control.

Los neutrones, una vez emitidos, tienen dos posibilidades, o escaparse o ser captados para la continuación de la reacción; lo que interesa es lo último y depende de las condiciones del ambiente, de los elementos que los rodean, pero, en gran parte, del peso de la masa activa y de su forma.

Una masa de uranio se deja suelta, y mientras no llegue a un determinado peso no resulta operante; en cambio, cuando dicha masa pasa de determinado límite es cuando viene la reacción en cadena, y, por consiguiente, la explosión... o el aprovechamiento de la energía contenida. Aclaremos el concepto: Si la masa tiene la forma, por ejemplo, de una esfera, como la superficie crece con el cuadrado del radio, pero el volumen va con el cubo del mismo, llega un momento en que, al aumentar dicha esfera, prevalece el volumen sobre la superficie con lo que los neutrones tienen poco sitio para escapar en relación con el volumen en que se hallan contenidos, dando lugar, entonces, a que se queden dentro de la masa y produzcan la reacción en cadena de que antes hablábamos. Al límite en que se dan las reaccio-

nes, se le llama el de la "masa crítica", concepto éste muy fundamental en materia de energía atómica.

El fundamento de la bomba atómica se basa en ese principio, y así, tratase de juntar dos masas, ninguna de ellas suficiente para sobrepasar la masa crítica, pero que, una vez ensambladas, la superan, viniendo la explosión.

Todos los reactores contienen un peso de materia activa superior a la masa crítica; por esto reaccionan en seguida. ¿Cómo se puede regular y controlar esa reacción? Podría hacerse operando en función de la misma masa; si la masa, decíamos, es pequeña, no hay reacción. Pero el actuar así sería sumamente expuesto, porque la diferencia de masas, para pasar o quedarse por debajo del límite de la masa crítica, es pequeñísima y nos expondríamos a tener consecuencias graves. Lo que se hace es buscar la presencia de elementos que absorban los neutrones, y por esto, los reactores, teniendo una masa activa superior a la crítica, según la forma y el ambiente en que se encuentra, no se producen explosiones y, por el contrario, según sea el grado de penetración de los elementos absorbentes de neutrones — barras de cadmio, boro, etc., como luego explicaremos — dentro de las masas activas, o bien se inicia la reacción, o se regula o se extingue.

Como antes dijimos, la posibilidad de captura de los neutrones depende, también, de las condiciones de los elementos que los rodean, así como de la velocidad de que estén dotados. Si los neutrones, por su energía cinética o por la naturaleza de los cuerpos en que circulan, pasan rápidamente, no operan; en cambio, si se retardan, cuanto mayor tiempo permanezcan dentro del reactor, más fácil ha de resultar captarlos y, por consiguiente, que operen y activen la reacción. Los cuerpos que así actúan son unos elementos auxiliares, aunque fundamentales en la cuestión práctica de los reactores, y esos elementos, llamados "moderadores", no solamente retardan, sino que reflejan y vuelven los neutrones a su sitio para que se efectúe la reacción.

Los elementos ligeros son los mejores moderadores, por ser los que, en el choque, hacen perder más energía a los neutrones, según se desprende de la igualación de energía cinética y cantidad de movimiento del conjunto neutrón y átomo de moderador, antes y después del choque.

Entre los cuerpos livianos, el hidrógeno y el helio resultarían ideales, pero no sirven, porque al tratarse de gases son difíciles de usar; el litio y el boro adolecen del inconveniente de absorción excesiva; el berilio, que sería muy bueno, resulta imposible por ser carísimo. De ahí que, prácticamente, sólo quepa utilizar el agua pesada y el grafito cuando se trata de neutrones relativamente escasos, como son los del uranio natural.

El agua, natural, por desgracia, tiene una gran

sección transversal de absorción, por lo que debe ser desechada, a menos que se emplee combustible enriquecido, en el que la economía de neutrones no es tan rígida.

Por otra parte, en el caso de utilizar como materia reactiva solamente el uranio natural, como quiera que la captación de los neutrones se hace difícil, es preciso que estos últimos necesiten largo tiempo de recorrido y de permanencia, por lo que se hace indispensable contar con importantes masas de agua pesada o aún mayores de grafito. Como ejemplo, citaremos el caso de la central de Calder Hall, en la que, para 90 000 Kw. de potencia eléctrica, se halla prevista la utilización de nada menos que dos mil toneladas de grafito, si no recuerdo mal. Por parecidas razones, las cargas de materia activa, en el caso de uso de uranio natural, deben ser muy fuertes.

En cambio, cuando se emplea el uranio enriquecido, como la emisión de neutrones es mayor, su captura se halla más facilitada y por lo mismo no se precisan grandes recorridos en los elementos moderadores y tampoco se requieren las importantes cargas iniciales de combustibles nucleares que se precisan en los casos primeramente apuntados.

Con eso creo que hemos explicado, a grandes rasgos, los conceptos fundamentales de carácter teórico que nos interesa conocer para sacar provecho de las circunstancias que se dan en esta materia. Hemos definido la clase de átomos propicios a la transmutación; hemos explicado los fenómenos de fusión y fisión; hemos hablado de la cantidad de energía obtenible; hemos sintetizado los conceptos de la masa crítica, captura y absorción de neutrones; hemos tratado de los elementos y función de los moderadores y, en fin, de las circunstancias y condiciones requeridas para el uso del uranio natural y del enriquecido. Con eso, como decimos, hemos pretendido explicarles las ideas fundamentales en que se cimenta el aprovechamiento de la energía nuclear, para derivar de ahí las concreciones de carácter práctico que nos interesan en el ejercicio de nuestra misión de ingenieros.

ESENCIA DE LO QUE SON LOS REACTORES

Ahora vamos a ver cómo se puede utilizar esta energía. Desafortunadamente, hoy por hoy, tal como está la técnica, la única forma en que se consigue es mediante el calor que se produce en los fenómenos a que nos hemos referido. Prácticamente, tratase de unas reacciones exotérmicas, y el calor producido es el que hay que aprovechar, por el momento, generando vapor, con envío del mismo a las turbinas de vapor.

Los artefactos en los que se producen y controlan esta clase de fenómenos nucleares se ha convenido en llamarles "reactores", los cuales, en defini-

tiva, no son más que unos sustitutivos de las calderas antiguas, sin más diferencia fundamental que en estos hogares modernos no hay fuego y los combustibles, en lugar de ser carbón o fuel, son a base de uranio o plutonio.

En esencia, en los reactores juegan los siguientes elementos básicos: los elementos que amparan la reacción, tales como los que antes hemos llamado "moderadores"; los combustibles; los elementos extractores del calor producido, y, finalmente, los que controlan y extinguen las reacciones.

Por lo que concierne al primer grupo, o sea a los elementos moderadores, nos hemos referido ya, al hacer la síntesis de las ideas fundamentales en esta clase de materia de que nos ocupamos; en resumen, se utilizan el grafito o el agua pesada siempre que el combustible sea el uranio natural, pudiendo añadir a esta lista el agua natural cuando se trata de emplear otros productos más activos, como el uranio enriquecido.

En lo que corresponde a los combustibles nucleares, existen solamente el uranio y el plutonio. El primero, en sus isótopos 235 y 233, por sus condiciones extremadamente favorables para el fenómeno de "fisión", y en cuanto al otro isótopo 238, que es el más abundante, por ser el que da lugar a la transmutación en plutonio; en cuanto a este último, su valor radica también en su aptitud para la fisión. Los isótopos del uranio 235 y 238 se hallan en la naturaleza íntimamente mezclados en la proporción de 0,712 % y 99,282 %, respectivamente, formando el conjunto que hemos dado en llamar "uranio natural". Al ser el uranio 235 el elemento activo, interesa aumentar la proporción de este último, lo cual se hace artificialmente, como comentaremos después, dando lugar a lo que llamamos "uranio enriquecido", y en el que el contenido del uranio 235 pasa a ser del orden de 1,25 % y mucho más, según el tipo, volumen y aplicación de los reactores. Finalmente, el uranio 233 y el plutonio no se dan en la naturaleza, obteniéndose a base de la transmutación, para el primero, del torio, y para el segundo, como se ha dicho, del uranio 238.

Así que, en definitiva, como combustibles nucleares hasta ahora conocidos, tenemos como de uso corriente el "uranio natural" y el "uranio enriquecido", y como de óptima aplicación, pero muy raros, el uranio 233, el uranio 235 y el plutonio.

Dichos combustibles, de una manera general, se pueden utilizar en estado sólido, líquido y en suspensión pulverulenta. Lo más normal, hasta el presente, es la primera, a base de barras de metal muy puro, envainadas en unos cartuchos, antes de aluminio y ahora con tendencia a ser sustituido por otros metales más apropiados, como el circonio; el estado líquido se presenta a base de disoluciones del uranio en forma de sulfato de uranio o con bismuto, y, finalmente; en lo que hace referencia a la tercera mo-

dalidad, aunque creo que no existe todavía un reactor de carácter práctico que lo pueda utilizar, merece ser citado un informe presentado en la Conferencia de Ginebra, respecto a ese particular, dando a conocer unos modelos en los que se usaba el polvo de óxido de uranio, obtenido simplemente con la purificación del mineral, mezclado o no con óxido de berilio; de todas formas, esta última aplicación queda en el terreno más propiamente especulativo que real.

Por lo que afecta a los medios extractores del calor producido por la energía liberada, los hay a base de agentes gaseosos y otros en estado líquido. Los ingleses primeramente utilizaron la impulsión de aire natural, sustituyéndolo más tarde, en los reactores que están a punto de poner en marcha, por el anhídrido carbónico. Los americanos se inclinan, en cambio, por el agua — con preferencia, la natural —, sometiéndola a presión dentro de los reactores para evitar su ebullición. Dentro de los agentes líquidos se están haciendo intensos esfuerzos para utilizar el sodio metal fundido, con el fin de conseguir, en esta forma, elevar la temperatura del medio y obtener después un vapor de mayor calor, comparable con el que se produce en las calderas de tipo clásico. Hay que añadir que el agente extractor circula generalmente alrededor del combustible nuclear, saliendo de los reactores para ir a unos intercambiadores de calor, los cuales no son otra cosa que unos serpentines en los que circulan dichos agentes, sumergidos en amplios calderines, que es donde se genera el vapor destinado a las turbinas y el cual, por no existir contacto con aquéllos, se halla exento de toda clase de radiactividad; empero, otra modalidad es la de suprimir dichos intercambiadores, cuando se utiliza el agua natural o la pesada, a base de que el propio agente extractor genere el vapor en el mismo reactor y de allí pase directamente a las turbinas.

Finalmente, por lo que hace a los últimos elementos básicos constituyentes de un reactor, o sea, a los medios para regular y extinguir la reacción, no hay modalidad especial digna de distinción, pues trátase, simplemente, de unas barras absorbentes de neutrones, generalmente de cadmio o aleaciones de boro o hafnio que, automáticamente o manualmente, según el grado de sumergimiento dentro de los núcleos de los reactores, acentúan, retardan o cortan la reacción.

TIPOS DE REACTORES.

Como el ingenio humano es indefinido y las posibilidades de combinación de los elementos citados, como componentes básicos de los reactores, son también muchísimas, no es de extrañar que surjan una infinidad de reactores de todas clases. En unos, a igualdad de combustible y moderadores, se ingenian la extracción del calor de una manera o de otra de las explicadas; en otros, lo que varían son los moderadores, etc., etc., pero, en esencia, el fundamento

no varía, siempre es el mismo e igual al conjunto de las funciones explicadas para cada elemento.

Sin embargo, a pesar de que las posibilidades son enormes, la atención se concreta, por lo que hemos podido ver en Ginebra, en cuatro o cinco tipos.

Uno de ellos es el tipo que podríamos llamar inglés, el tipo de Calder Hall, a base de utilizar como elemento moderador el grafito; después, como elemento enfriador, el anhídrido carbónico, con intercambiadores de calor, y, como combustible, el uranio natural.

Otro tipo de reactor clásico es el Pressurized, de los americanos, que es el de Shippingport, con la diferencia respecto al anterior de que el elemento extractor de calor es el agua natural, que al mismo tiempo actúa como moderador, lo que obliga a utilizar el uranio enriquecido; este tipo es el usado en el caso del submarino *Nautilus*, que todos ustedes conocen por referencias, y en el que el enriquecimiento del uranio debe ser extraordinariamente alto.

Otro tipo que también polariza la atención y que realmente es curiosísimo, es el "Boiling". Es sumamente sencillo y sumamente elemental: se trata, en definitiva, de una vasija normal en la cual hay agua natural y dentro de ella están las barras de uranio — forzosamente enriquecido, por lo que decíamos antes del agua natural —, generándose el vapor sin más, y de ahí, sin pasarlo por intercambiadores de calor, va directamente a las turbinas. Es de una sencillez verdaderamente extraordinaria.

Otro tipo que también se está experimentando con mucha atención es el tipo que le llaman "homogéneo", que es a base de utilizar el uranio en estado líquido. Comprenderán ustedes que esos reactores que acabo de citar con uso de uranio metal, requieren unos procesos químicos complicados para la recuperación del uranio no desgastado y del plutonio generado una vez se haya terminado el primer ciclo de fisión, y se comprende, asimismo, que todo ello ha de resultar más fácil y más flexiblemente hecho si el combustible se halla en estado líquido y en constante renovación, aparte de la posibilidad de regular la reacción, acentuándola o debilitándola con extraordinaria sencillez, simplemente añadiéndole o quitándole una parte de uranio en el líquido circulante.

Otro tipo muy interesante, posiblemente el de mayor porvenir con el tiempo, es el "Breeder" o "engendrador", llamado así porque al propio tiempo de generar calor ocasiona la transformación del uranio 238 o del torio, en plutonio o uranio 233, en proporción mayor, incluso, de la cantidad de combustible activo que se consume en la reacción; en este tipo, el núcleo debe ser sumamente rico en uranio 235, 233 o plutonio, hallándose dotado exteriormente de unas envolturas de uranio natural o de torio, que son las que se transmutan. Y claro está, se puede dar el caso, y es lo que se busca, que la relación de transformación de lo que se gasta a lo que se produce, sea

grande — hoy se espera la de 1 a 1,6 —, es decir, poder obtener más elementos nuevos que los propios que se gastan. Esto es la meta, es el porvenir, es la economía de la energía nuclear. Hoy se está trabajando enormemente en estos tipos, pero todavía no han tenido una realización industrial; experimental, sí, pero práctica, que yo sepa, no.

Todos estos tipos tienen sus ventajas y sus inconvenientes.

El primero, el tipo inglés, tiene la ventaja de poder utilizar el uranio natural, ha sido muy experimentado, es muy seguro, se puede obtener plutonio y está ya en la práctica, pero tiene el inconveniente de que necesita una masa enorme de grafito y de combustible, por las razones que les he explicado, y por lo mismo, son caros de primer establecimiento. El tipo Pressurized reúne ventajas análogas, pero en los inconvenientes hay que citar el uso del uranio enriquecido.

En el "Boiling", como se utiliza el vapor directamente del reactor a las turbinas, existe la preocupación de si se pueden contaminar las turbinas, de si puede haber radiactividad, de si podía haber peligro, y, en efecto, los que han operado sobre esos tipos dicen que mientras funciona la turbina es imposible acercarse a un determinado límite, pero cuando interesa aproximarse a ella, que es cuando hay que hacer alguna reparación, al estar parada y al estar vacía, entonces ya no hay vestigios de radiactividad ni es posible el peligro para los operarios. Esto habría que acabar de comprobarlo. Hablan de que el mismo vapor, la misma presión que hay dentro del reactor, controla y regula la reacción, lo que también sería interesante verificar, porque, por otra parte, parece que se pueden formar unas depresiones pegadas a las barras de uranio, con el consiguiente aumento de temperatura, que puede llegar a ocasionar la fusión de las propias barras o de sus estuches, dando lugar a ciertas irregularidades. Son problemas estos que hay que ver cómo se presentan y resuelven a lo largo del tiempo. Sin embargo, de la misma manera que los ingleses tienen el modelo de Calder Hall próximo a entrar en servicio, en el caso del "Boiling" existe la garantía de que la casa General Electric y el grupo Edison, que son firmas que por sus conocimientos técnicos han de tener su responsabilidad, han comenzado ya un reactor de ese tipo, y nada menos que de una potencia de 180 000 kilovatios.

El "Homogéneo", como inconveniente principal tiene el de una excesiva corrosividad, pero como garantía de su eficacia, o, por lo menos, de las esperanzas puestas en él, podemos decir que la Westinghouse ha aceptado el pedido de uno del orden de los 200 000 Kw.

Del tipo "Breeder", que sepamos nosotros, todavía no hay ningún encargo concreto de importan-

cia, aunque sabemos que los ingleses se hallan muy optimistas respecto a su pronto desarrollo industrial.

INSTALACIONES COMPLEMENTARIAS.

Además de las partes substantivas de que hemos hablado, en el conjunto del nuevo sistema, como complemento, hay que considerar otras instalaciones importantísimas, como son, por ejemplo, las plantas químicas. Los productos contenidos en los reactores se gastan, digámoslo así, rápidamente, aunque sea en pequeña proporción, por lo que, en los productos fisionados hay una gran cantidad de contenido de uranio que se puede volver a utilizar, hay el plutonio obtenido en la reacción, que es rico y que hay que aprovechar, y luego existen unos productos residuales que hay que eliminar, todo lo cual requiere un proceso químico de indudable importancia.

Estoy hablando de la recuperación del plutonio y, realmente, creo que este punto merece una atención especialísima por el extraordinario interés que puede representar para nosotros el conseguirlo en cantidad apreciable. Una de las dificultades más fuertes que tenemos nosotros y, en general, todos los países que no son los más poderosos, como Inglaterra, Estados Unidos y Rusia, es que, si debemos utilizar reactores de los últimos tipos, es decir, de los que requieren el uranio enriquecido, es preciso producirlo, es preciso fabricarlo, y ésta es una de las dificultades más extraordinarias que tiene la técnica nuclear, sobre todo para las naciones pequeñas. Aquí radica uno de los principales problemas. En la Conferencia de Ginebra se habló mucho de todo, se presentaron mil ciento y pico de informes magníficos, pero uno de los silencios más absolutos ha sido en todo lo que hace referencia al procedimiento para enriquecer el uranio.

En lo que concierne al enriquecimiento del uranio, en su acepción propia, es decir, a base de aumentar el contenido de uranio 235 con más uranio de esta clase, por ahora sólo hay un procedimiento práctico de lograrlo, cual es el de la difusión gaseosa: antes se había intentado por separadores electromagnéticos, pero no resultaron prácticos. La difusión gaseosa es una cosa que por sí, por el fundamento que tiene, han de comprender que ha de ser sumamente difícil; trátase de separar dos cuerpos, el uranio 238 y el uranio 235, que son de un peso sumamente similar, como indican sus exponentes, por medio de una operación física fundamentada precisamente en la escasa diferencia de sus densidades; el único procedimiento es pasar el uranio difundido en un gas fluorhídrico, miles de veces, a través de membranas, para que se vaya quedando a un lado el elemento más liviano, el 235, y al otro quede el más pesado, el uranio 238. Pero esto requiere una cantidad de operaciones, una cantidad de bombas extraordinaria y siempre con productos dotados de gran corrosividad y, por añadidura, radiactivos.

He tenido interés en preguntar y en saber cuánto podía significar el coste de una instalación de difusión gaseosa, y las cifras que he encontrado son del orden de los treinta millones de libras, si no mayores; de manera que el problema del enriquecimiento del uranio por el uranio, se escapa de los países relativamente normales, tanto en orden a sus dificultades técnicas como en lo que afecta al dinero, con cifras que se salen del papel. Y si nosotros hemos de pensar en utilizar un producto que nos haga tributarios de los poderosos que lo tengan, tampoco ha de ser agradable.

De ahí viene el valor extraordinario que puede tener el plutonio, dado que, al ser tan radiactivo y tan primera materia como el propio uranio 235, es concebible que se pueda sustituir una cosa por la otra. En mis conversaciones, primeramente en los Estados Unidos, después en el Canadá y luego en Ginebra, siempre he preguntado: ¿Es que hay posibilidad de enriquecer el uranio natural con mezcla de plutonio en lugar de recurrir al sistema del uranio por el uranio mediante la difusión gaseosa? La conclusión ha sido indubitable y positiva. De manera que, realmente, podemos resolver ese magno problema por nosotros mismos, sin dependencia extranjera, siempre que nos sea posible obtener el plutonio necesario, para lo cual, seguramente, ha de resultar aconsejable recurrir al uso mixto de reactores del primer tipo y otros de la clase de combustible enriquecido, en la proporción de uno por uno, según se desprende del estado detallado en el cuadro y gráfico de la página siguiente.

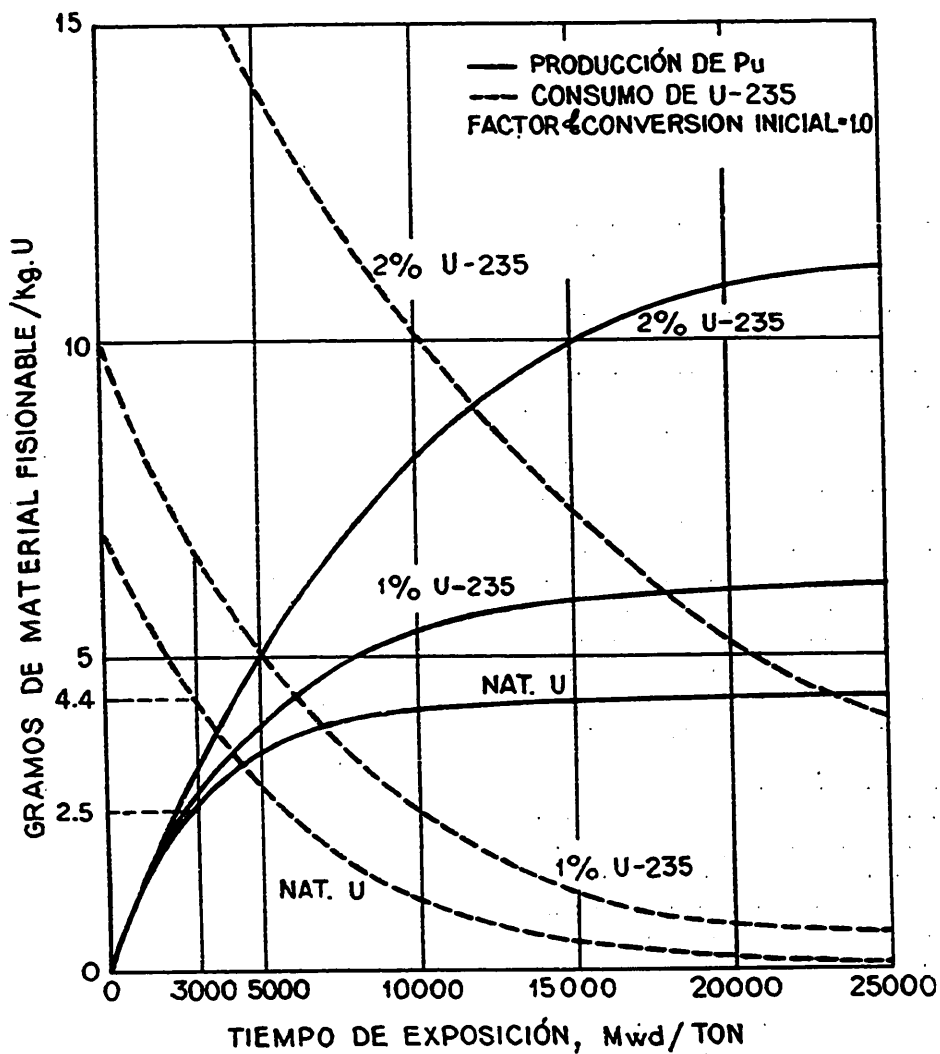
No acaban aquí las dificultades que ofrece la nueva técnica en orden a materiales, dadas las nuevas y duras condiciones de trabajo. Por ejemplo, un suministro que parece elemental, cual es el enfundado del uranio metal, antes se hacía con aluminio muy puro, pero como éste exige pequeña temperatura, cuando lo que se necesita es lo contrario, se ha visto que mejor es servirse del circonio, el cual, si antes apenas era conocido industrialmente, ahora ha dado lugar a la creación de importantes nuevas fábricas; los suministros importantes de grafito puro, de agua pesada, etc., etc., son también de preocupar, creándose con todo ello problemas gigantescos, por lo demás, como corresponde a la magnitud del nuevo sistema para la producción de energía. De todo eso les hago gracia, porque se va pasando el tiempo y temo abusar de ustedes en demasía.

RESIDUOS.

Lo que sí interesa es hablar un poco de los residuos, pues al ser muy tóxicos, pueden dar lugar a serios peligros para los operarios y para la Humanidad en general. Existe el problema y, si es difícil, sin embargo no es insuperable.

Para apreciar la importancia real que ofrecen los

GRAFICO II



	Central 50 Mw. Uranio natural.	Central Boiling 50 Mw. U enriquecido 1,25 %.
	Irradiación.	
	3 000 Mwd. / T.	10 000 Mwd. / T.
Ton. de U precisos por día.	$\frac{50 \times 4}{3 000} = 0,066 \text{ T.}$	$\frac{50 \times 4}{10 000} = 0,020 \text{ T.}$
Plutonio producido o necesario por día	$66 \times 2,5 = 165 \text{ g.}$	$\frac{20 \times 1 000 \times (1,25 - 0,7)}{100} = 110 \text{ g.}$

residuos, en relación a su toxicidad y destino no perjudicial, en primer lugar hay que considerar que de los productos fisionados, por lo menos un 95 % es materia aprovechable, que hay que recuperar. como es el uranio natural y el plutonio. El resto se halla constituido por una serie de treinta y tantos cuerpos distintos, de los que se mencionan los más importantes o perjudiciales en el cuadro siguiente:

CUADRO SEGUNDO. — *Productos de fisión obtenidos de T de U 235, después de una irradiación de 150 días y 30 días de "enfriamiento".*

Grupo	ELEMENTO		Kg.	%	Vida-media
0	(Krypton - Xenon)	Kr-Xe	128		
1	Rubidio	Rb	15		
	Cesio	Cs	118	16	33,0 años
2	Estroncio	Sr	42		19,9 años
	Bario	Ba	43		12,8 días
3	Tierras raras	Y	317		61 días
4	Circonio	Zr	125		65 días
5	Niobio	Nb	5		35 días
6	Molibdeno	Mo	92		
	Telurio	Te	16		
7	Tecnecio	Tc	29		
	Iodo	I	7		8,1 días
8	Rutenio, Rodio y Paladio	Ru, Rh, Pd	61		
	TOTAL		998		

Fijense ustedes que algunos de ellos pierden la radiactividad relativamente pronto; de manera que esos productos, dejándolos solos, por el fenómeno de la autotransformación, de la propiedad que se ha dado en llamar "vida media", pasan a ser no peligrosos; en cambio, los que sí quedan como de extraordinario peligro son el cesio y el estroncio, que constituyen, más o menos, el 16 % de todos los productos residuales. Estos son muy temibles porque la "vida media" es larga; pero si ustedes hacen la cuenta de eliminar primero un noventa y tantos por ciento de las materias fisionadas y después, del resto, una vez dejado en reposo unos meses, retiran el 16 por 100 para acondicionarlo en debida forma, verán cómo el residuo perjudicial, por muy tóxico que sea, no puede representar un serio peligro, dado su relativo escaso volumen. Para darles una idea de lo que pueden significar esos residuos nocivos, les diré a ustedes que para obtener mil millones de Kw.-h. al año, según sea la exposición del uranio en los reactores, los residuos de todas clases pueden ser del orden de 1 a 3 Tn., y los productos muy tóxicos serán únicamente de unos 150 a 500 Kg. Estas cifras son para mil millones de Kw.-h., y si las multiplican ustedes por cuarenta o cincuenta, para referirnos a las producciones de 40 000 a 50 000 millones

de Kw.-h. alcanzables en una serie prudente de años en todo el territorio nacional, verán ustedes que el volumen representativo no puede significar ningún problema insoluble. La manera de tratar estos residuos, los tóxicos, caso de que no se puedan aprovechar a efectos lucrativos, como ahora explicaré, es mezclarlos con arcillas especiales, que se cuecen después para fijar aquéllos, y luego, como se trata de pequeños volúmenes, se encierran en cofres metálicos y se entierran en cualquier zona desértica, a ser posible entre lechos impermeables, para que no haya el peligro de que con el transcurso de los años quepa la corrosión de los cofres, y de ahí la disolución, el arrastre exterior y la contaminación ulterior.

Como contrapartida del expuesto problema, lo que si parece interesante es el valor que puedan tener estos productos, pues si por una parte son un peligro, por otra son una fuente de riqueza. Todos sabemos que hasta ahora el radium tenía un valor extraordinario para el tratamiento de ciertas enfermedades; pues bien, estos productos son muy radiactivos y precisamente, los esfuerzos que se están haciendo hoy día son para sacar y arrancar provecho de dicha cualidad, y a estos fines, a veces se llega a añadirles otros productos, como el cobalto, al objeto de obtener unas propiedades radiactivas superiores. Y, en efecto, acabo de leer una noticia, no sé si es cierta o no, según la cual es tanto el valor de los subproductos que es posible que incluso puedan compensar el valor del combustible. No creo que eso se consiga inmediatamente, pero lo que sí es posible es que en una serie de años tengan un valor que dé lugar a tal compensación y, por consiguiente, que la energía nuclear, en lo que se refiere a combustible, sea completamente gratis. Habrá el valor de la amortización, de las atenciones financieras y de maniobra, etc., etc., pero el de los combustibles no, gracias a estos subproductos.

Una de las ramas de aplicación conocida de los subproductos está en la agricultura y conservación de alimentos; por ejemplo, en las patatas, para que no germinen rápidamente; se está tratando de que sirvan para actuar contra las plagas del campo; en Medicina se trabaja con ellos extraordinariamente. Por cierto, que en este terreno hay que confesar que los rusos, en Ginebra, nos dieron a todos la impresión de que iban en un estado sumamente adelantado.

En conclusión, si bien estos subproductos pueden perjudicar y ahora son un motivo de preocupación, el día de mañana pueden ser realmente extraordinarios para la economía general del procedimiento.

II. Inversiones y costos resultantes de la nueva técnica en la obtención de energía eléctrica.

Cuando esta tarde entraba aquí, un buen amigo, de los que están presentes, me decía: "En eso de los precios yo no creo, todo está en el aire". Estimo que

tiene razón; es evidente. Si estamos en un momento de experimentación, en un momento en que se habla de varios tipos de reactores, de distintas combinaciones, que falta todavía una experiencia, que falta saber cómo se comportarán estos combustibles dentro de los reactores, si realmente obedecerán a la vida y al tiempo que todos imaginamos o no, es incierto, muy incierto, dar precios. Por otra parte, en estos momentos iniciales, todo tiene que ser muchísimo más caro que después, porque hay que improvisarlo todo: materiales, metales, técnica. Y es natural que resulte caro.

Sin embargo, como es preciso tener algunas orientaciones respecto a este particular para ir fijando ideas, para centrar las soluciones diversas en relación con nuestras necesidades y, en fin, para orientar planes y futuras determinaciones, trataremos de hacerlo con los medios a nuestro alcance.

Examinaremos los precios de primer establecimiento y luego los precios de coste por Kw.-h.

Los costos de primer establecimiento aparecen muy variables, según sean los tipos de reactores y la procedencia de los datos. Los americanos dan precios del tipo Pressurized, que van a terminar el año 1957, con una potencia de 100 000 Kw., y les sale por 240 dólares el kilovatio. El tipo Boiling, el que ampara el Grupo Edison y la General Eléctrica, a 250 dólares, y lo van a terminar el año 1960. La combinación sodio y grafito, a 320. El Breeder, a 450 dólares. De manera que las inversiones por Kw. instalado oscilan entre 240 y 230, según los americanos, si dejamos al margen los reactores Breeder, todavía no preparados para la escala industrial.

Los ingleses, para Calder Hall, señalan un costo equivalente a 400 dólares, todo incluido.

Aproximadamente, dentro de estos precios, el reactor significa 100 dólares; los turboalternadores y equipos eléctricos, 120, y carga inicial y componentes auxiliares, unos 80 dólares. Yo calculo que si a estos 300 dólares que yo vengo dando aquí, se les añade la parte química, se puede contar hoy, como término medio y primera idea de carácter general, con 350 dólares por Kw., carga inicial de combustible incluida. Son precios un poco altos, pero no son tampoco desorbitados, si se tienen en cuenta todas las consideraciones de que antes les hablaba a ustedes, de falta de experiencia, de improvisaciones, de laboratorios, de técnica, etc., etc. Es de suponer que, con el tiempo, estos precios bajen rapidísimamente.

Crockroft, jefe de la energía atómica de Inglaterra, en su conferencia de Ginebra, decía con razón: "Dentro de quince o veinte años, un reactor de la presente época podrá producir el mismo efecto que el que ahora nos produce un automóvil Ford, del modelo T; éstos andan todavía, pero las diferencias con los actuales son considerables". Pues exactamente igual; a medida que adelante la técnica, se han de abaratar los materiales, se han de abaratar los

combustibles, se ha de abaratar todo el procedimiento y, por consiguiente, es de esperar que las inversiones por kilovatio vengan a ser una cosa razonable. Se habla ya de que serán posibles, no muy lejos, unos costos del orden de 200 dólares, unas 8 ó 9 000 pesetas el kilovatio. No creo que dentro de cinco, seis, ocho años, sea éste un precio absolutamente imposible.

Por lo que hace referencia a los precios de costo por kilovatio-hora producido, naturalmente, los precios de primer establecimiento tienen su repercusión, pero tan sólo relativa, porque estos generadores es conveniente que trabajen el mayor número de horas posible y, claro está, siendo así, la carga financiera imputable al gasto de primer establecimiento queda muy repartida y sale a poco por unidad.

Los costos por Kw.-h. que se encuentran en las informaciones técnicas también varían mucho, llegando a citar hasta, y tan sólo, de unos costos del orden de 4 milésimas de dólar, equivalente nada más que a 16 céntimos de peseta, pero esto son cosas que deben ser sometidas a cuarentena: no creo que las veamos alcanzadas por ahora, pero 7 u 8 milésimas de dólar estimo que sí, muy en breve. Los ingleses, con su experimentación de carácter industrial y para el caso de Calder Hall, hablan de 0.6 peniques, que vienen a ser aproximadamente 30 céntimos de peseta.

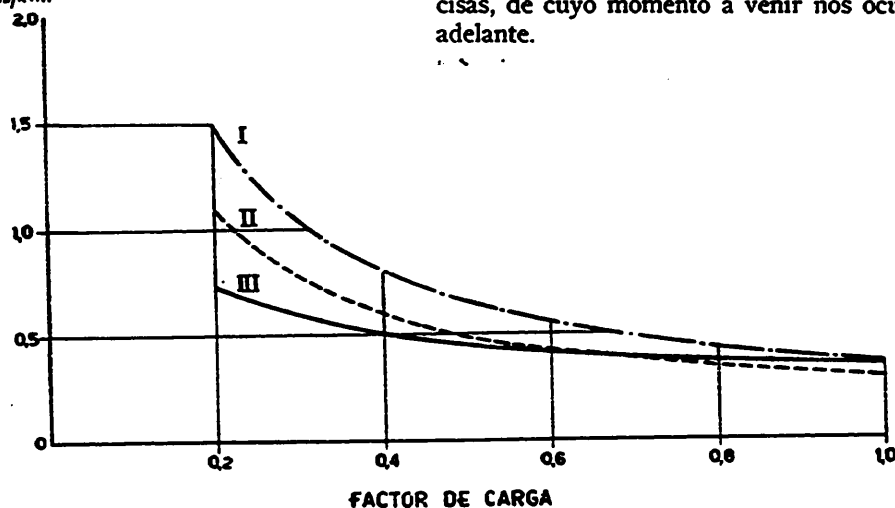
Los costos que acabamos de citar, sin embargo, no son comparables por no resultar homogéneos, toda vez que los americanos e ingleses parten de bases financieras distintas, pues los primeros admiten unas cargas del 15 % de los capitales invertidos y los segundos un 8 %.

Para lograr la debida uniformidad y para apreciar los costos en lo que nos es propio, con todas las reservas que impone la incertidumbre actual, he formulado mi cálculo del costo del Kw.-h. producido. He supuesto unas inversiones por Kw. instalado, carga inicial de combustible incluida, de 16.000 y 12.000 pesetas correspondientes a dos tipos de reactores; después he aceptado una carga financiera del 15 % distribuida en un 7.00 % para interés del capital, un 4 % para impuestos — sin perjuicio de que por conveniencias de tipo general o político consideremos que deben ser reducidos — y una amortización media del 4 %. Con esto obtenemos los gastos fijos anuales, se produzca o no energía, sobre cuyo costo, repartido ya por unidad, según sean las hipótesis del factor de carga, hay que añadir los gastos de maniobra y combustible. Por lo que se refiere a los gastos de maniobra por Kw.-h., aún es relativamente fácil establecerlos si consideramos que el trabajo en un reactor es más sencillo que el de una térmica, y por comparación, más o menos, se puede saber lo que puede costar la maniobra nuclear, a base de no contar en ella el proceso químico para la separación del combustible una vez fisionado. Queda,

por último, determinar el costo del combustible, y eso sí que ya es muy difícil de calibrar: pero consultando distintos *rappports* de los ingleses y de los americanos y deduciendo del valor del combustible, calculado a razón de 40 dólares el kilogramo, el valor del plutonio y el de los subproductos de que antes les hablaba, podemos llegar a establecer unos resultados lo suficientemente aproximados para que los errores no alteren el orden de la cifra total del Kw.-h.

Pues bien, operando de esta forma y supuesta la inversión de 16.000 ptas. por Kw. tipo Calder Hall, y 12.000 ptas. para los tipos Boiling y Homogéneo,

GRAFICO III. Pros/kWh



Costes aproximados del Kw.-h.: I. Nuclear: Reactor tipo Calder Hall. II. Nuclear: Reactor tipo Boiling y Homogéneo. III. Térmica.

así como 6.000 ptas. para el Kw. de una térmica normal, más gastos de 5 cts. para maniobra y 4 cts. de combustible nuclear, y 20 cts. de carbón para el caso de térmicas normales, llegamos a los costos que se indican en el gráfico que les presentamos, expresado en función de los factores de carga o trabajo cuyos resultados, interesa insistir, son hechos públicos con toda clase de reservas y sólo a título de orientación.

Se comprende que, si los factores de carga son pequeños, los costos unitarios, al tener que absorber fuertemente las atenciones financieras, han de resultar elevadísimos. De un examen crítico de este gráfico se infiere que el tipo Calder Hall, siendo el más caro de todos, como consecuencia de las mayores cargas iniciales de combustible y de grafito, que reportan, a su vez, mayores tamaños de instalación en general, llega casi a igualarse en los costos resultantes para el Kw.-h. producido, con los de los otros tipos cuando se llega a trabajar todo o casi todo el año. Con factores de carga de 0,8, los precios por Kw.-h. serían de 0,44 pesetas para el tipo Calder Hall; de 0,35 para los tipos Boiling u Homogéneo, y de 0,38 pesetas para las térmicas ordinarias en las condicio-

nes españolas, en las cuales el carbón es caro y más aún lo sería si se hiciera uso del fuel.

Fijense ustedes en esta comparación y creo que concluirán conmigo en que, a medida que venga la evolución anteriormente señalada, los costos nucleares no sólo se han de afianzar en relación con los térmicos ordinarios, sino que los han de aventajar notablemente, tanto más cuanto que los precios de las producciones térmicas ordinarias tienden a subir con los aumentos graduales del precio del carbón.

Dadas las condiciones españolas, de lo que no puede haber duda es que las producciones nucleares han de resultar más económicas que las de las térmicas cuando las primeras se harán realmente precisas, de cuyo momento a venir nos ocuparemos más adelante.

III. Crítica en el momento actual de la aplicación industrial de la energía nuclear.

Finalmente, pasamos a hacer una crítica del nuevo sistema referido al momento presente, tal como yo lo veo.

PROS Y VENTAJAS INCONFUNDIBLES.

a) Proporciona ingentes posibilidades de energía y ofrece una solución evidente ante el agotamiento de los recursos clásicos para la obtención de energía eléctrica.

b) Aplicación en países que no se hallen dotados de recursos clásicos — carbón, fuel, etc. —, y para los que los tengan, que los mismos se hallen lejanos. El transporte deja de ser un problema y un gasto.

c) Posible economía ya actual en los costes, principalmente para ciertos países.

Los americanos comparan los posibles costos de energía nuclear con los de las térmicas más modernas, pero ellos tienen unas condiciones de carbón y de rendimientos sumamente distintas a las de los otros países.

d) Posible aceleración de la economía de los costos a medida que pase el tiempo en lo que mejore la técnica y se amplíen las instalaciones que primeramente se habilitaron (procesos químicos, mayores rendimientos, materiales más baratos, fabricación de los elementos en serie, etc., etc.).

e) Obtención de subproductos radiactivos de alto valor.

f) Posibilidad de poder dedicar los recursos clásicos: agua, carbón y fuel a otras necesidades, como la agricultura, química, etc., con contención o abaratamiento de las materias dejadas de utilizar.

g) No existe el temor de que fallen los combustibles nucleares. Este tema es uno de los que debo recortar por falta de tiempo: hubiera querido desarrollarlo pero, en fin, en todo caso eso podría ser objeto de otra conferencia. De todas maneras, para que comprendan el alcance reducido de esta clase de suministros, a título de orientación, lo que sí puedo decirles es que, por ejemplo, en el año 75, con un ritmo de crecimiento de consumo de energía eléctrica igual al lógicamente previsible y del cual habiáremos mañana, nos interesará contar con una aportación del orden de los 25.000 millones de Kw.-h. de energía nuclear, a más de otra igual hidráulica y térmica, lo cual, en el estado previsible de la técnica, precisaría un consumo — prescindiendo de las cargas iniciales — de unas 400 Tn. de uranio al año. Estas son cantidades relativamente bajas y no ha de ser difícil proporcionárselas.

Por lo que respecta a las necesidades mundiales, se hallan aseguradas largos años con los yacimientos actuales — los del 1 ‰ se consideran aceptables y los del 3 al 5 ‰ como buenos —, pero si en el transcurso de los años llegaran a escasear, hay procedimientos para obtener el uranio de los fosfatos y de las pizarras, llegándose, incluso, a hablar de que los costos aguantarían explotaciones de minerales o de pizarras con nada más que cuarenta gramos de uranio por tonelada, con lo cual las posibilidades serían inagotables.

Finalmente, como una de las ventajas fundamentales, está:

h) Aceleración de un mejor y más alto nivel de vida de las naciones con toda su inmensa significación social y política.

El bien vivir, realmente, es el objetivo material de la Humanidad y el facilitar energía barata y en cantidad sin límites, puede transformar completamente las orientaciones políticas y sociales de las naciones.

PROBLEMAS, DUDAS E INCONVENIENTES.

a) Obtención eficiente y económica de los nuevos combustibles, materiales y aleaciones.

b) Dificultades en un próximo futuro de aprovisionamiento directo por nuestra propia nación de ta-

les primeras materias: grafito (ejemplo: en Calder Hall precisan 2 000 Tn.), agua pesada — es carísima, 61.8 dólares por Kg. —, materiales metálicos, como las aleaciones de circonio y del propio combustible mientras no se pongan en explotación práctica los yacimientos españoles y se obtengan instalaciones industriales eficientes para la concentración y purificación de los minerales al igual que para la provisión de uranio metal. En la Conferencia de Ginebra reinó un silencio profundo respecto al mercado de estas primeras materias.

c) Provisión de uranio enriquecido, y en caso de su sustitución por aleaciones de plutonio, dificultades técnicas para su aleación, debido a la toxicidad de los elementos. También, respecto a estos particulares, en la Conferencia de Ginebra hubieron unos vacíos, unos silencios absolutos; de todo lo demás se habló mucho, pero de estos problemas angulares, que son los que pueden ser las llaves para que las naciones poderosas mantengan el control, de esos no se habló una palabra.

d) Escaso aprovechamiento en los primeros ciclos de los combustibles, y, por tanto, fuerte inmovilización de las cargas iniciales y gastos de los procesos químicos para su recuperación.

e) Comportamiento en el tiempo de los materiales y sistemas en experimentación, lo que impide la elección acertada de los tipos industriales.

f) Tratamiento de los residuos y recuperación del uranio y plutonio en los productos fisionados. Como les dije, está resuelto, pero tratase, indudablemente, de una dificultad.

g) Peligros de la radiactividad para el género humano; por esta causa no se ve fácil la utilización de esta clase de energía en los vehículos, tanto por la dificultad de aislamiento como por las contaminaciones en caso de accidente.

h) Mejora de los aprovechamientos de los combustibles, rendimientos, etc., así como el alcance eficiente y económico de mayores presiones y temperaturas del vapor para la utilización de las turbinas y generadores clásicos, a ser posible, por sustitución de las calderas por reactores y acoplamiento directo a los grupos actuales.

Esos reactores, sobre todo los que son a base de extracción del calor por agua natural, gas carbónico, etcétera, etc., las presiones y las temperaturas son bajas en relación con los fuertes índices de las calderas y turbinas normales. Claro que se intenta y se busca, por ejemplo, con el sodio alcanzar temperaturas mayores pero, hoy por hoy, no se ha logrado una solución práctica en esa dirección y, naturalmente, todo lo que sea no aprovechar los turboalternadores actuales no deja de ser un inconveniente: no pesa extraordinariamente en el conjunto, pero es un inconveniente.

i) Fuertes inmovilizaciones dinerarias y obtención de las divisas de aquellos materiales de difícil o im-

posible obtención en nuestro país. Al ser más alta la inversión por Kw. instalado que en el caso de las centrales hidráulicas y térmicas, las diferencias han de pesar en el cómputo de las ya por sí importantes inversiones en materia de producción de energía eléctrica.

f) Posibilidad de que con el tiempo se vaya a la "fusión" con abandono de todo lo que se haga a base de fisión.

Antes ha quedado explicado por qué no creemos en la fusión pero, claro, la broma sería más que pesada si después de lanzarse la Humanidad detrás del uranio y de la fisión, con las ingentes inversiones correspondientes, resultara que alguien lograra dar con el procedimiento para superar los problemas que se oponen a la obtención de la energía por el fenómeno de fusión; no es fácil ni lo creemos, pero debemos apuntar esa duda.

k) Dificultades en la elección del lugar de ubicación de las centrales. Si bien interesa que se hallen cerca de los centros de consumo para el ahorro de los gastos de transporte de la energía, con ventaja en relación a las térmicas, deben situarse cerca de grandes volúmenes de agua y al parecer preferentemente en zonas desérticas.

l) Con todo, el principal inconveniente para mí está en que falta un tiempo de experimentación industrial, en que no somos suficientemente adultos en esta materia, y, por lo mismo, en que no podemos saber ciertamente cómo nos comportaremos cuando lleguemos a serlo y si las esperanzas, tan justificadas como se quiera, pero al fin y al cabo nada más que previsiones, se convertirán en realidad tal como han sido concebidas.

POSICIÓN EN CASO DE NECESIDAD INMEDIATA.

Si preciso fuera pronunciarse en los actuales momentos por algún reactor, dudaríamos entre el tipo inglés y los tipos "Boiling" y Homogéneo. El primero es más caro de primer establecimiento, pero se halla más experimentado, no necesita uranio enriquecido y, por tanto, desaparece la dependencia extranjera por el combustible, aparte de la ventaja que ofrece el producir plutonio a utilizar en otros reactores; el segundo y tercero son muy sugestivos, quizás más el "Boiling" por no tener complicaciones, al parecer.

Quizás la solución acertada estaría en comenzar con los reactores de tipo inglés para almacenar plutonio y luego ir a la combinación conjunta de ellos con otros de tipo "Boiling", en la proporción de uno por uno.

Sin embargo, España tiene alguna espera, por ser nuestro caso muy distinto al de las naciones que se han lanzado tras la implantación industrial de este nuevo y revolucionario sistema, como son Inglaterra y los Estados Unidos.

Los ingleses están en una situación desesperada, pues como no tienen saltos de agua o son de pequeña monta, todas las posibilidades eran a base de térmicas, y aun cuando tienen una cantidad de carbón enorme, les falta la mano de obra para extraerlo de las minas. El problema es gravísimo: el año pasado tuvieron una importación de carbón cuantiosísima, y este año se calcula que la compra exterior rebasará los ochenta millones de libras. Y, claro, en dicha situación esa gente conjuga el clásico refrán de "lo mejor es enemigo de lo bueno", y homologando lo que antes les decía del Ford modelo T, se agarran a él, porque anda, aunque saben que han de venir otros mejores, y así van a un plan de centrales nucleares verdaderamente importante, del cual todos ustedes habrán tenido conocimiento por la Prensa. En cambio, los americanos están en la posición opuesta; tienen carbón, tienen agua, tienen unas posibilidades enormes y dicen: "Vamos a construir alguna central, en Shippingport, por ejemplo, para avanzar y saber qué es lo que pasa en el terreno ya industrial, pero, en definitiva, vamos a dedicarnos primeramente a experimentar muy en serio los cuatro o cinco tipos de reactores que nos parecen buenos para que cuando transcurran tres, cuatro, cinco años, podamos escoger el mejor", y lo hacen porque pueden hacerlo. Son dos posiciones completamente distintas.

De éstas, ¿cuál debe ser la nuestra? Afortunadamente, es favorable y es la de esperar. Como verán ustedes, cuando entremos en el desarrollo de la segunda conferencia, mi idea es que si nos aplicamos todos a la construcción de los saltos hidroeléctricos, aún disponibles, las posibilidades españolas nos permiten todavía esperar y no necesitamos que la primera central atómica funcione hasta por allá el año 65. Empero, como no es cosa de dejar expirar el plazo, deberíamos tomar las decisiones oportunas tres o cuatro años antes, aunque como es probable que nos retrasemos en la construcción de los saltos hidráulicos, pues son muchos los que hay por hacer, y no sé, tengo mis dudas de que todos consigamos corresponder al interés que tienen las altas esferas para que así se haga, es posible que de la misma manera que ahora se han debido precipitar las térmicas sea menester o conveniente pensar en adelantar tal resolución, aunque no creo fuese interesante antes del año 1958 ó 1960.

Entretanto, entiendo que deberíamos tener los ojos sumamente abiertos y educar a la juventud para que se dedique a estos asuntos y domine la técnica. Además, deberíamos buscar los minerales de una manera eficiente, no como cosa retórica, sino real; ir a la concentración y purificación de las primeras materias, y, en definitiva, aprovechar esos años que nos faltan para tomar la decisión apropiada en forma que, cuando llegue el momento, nos encuentre en una situación preparada y ventajosa.

(Continuará.)