ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

SAN MARTIN 352 — CASILLA 487 — SANTIAGO

Sucesor

De la: "SOCIEDAD DE INGENIERIA" Fundada el 31 de Mayo de 1888

Y del: "INSTITUTO DE INGENIEROS" Fundado el 28 de Octubre de 1888

Con Personalidad Jurídica desde el 28 de diciembre de 1900

Adherido a la USAI y a la CONFERENCIA MUNDIAL DE LA ENERGIA

AÑO LXVIX ● ENERO-FEBRERO-MARZO DE 1956 ● N.os 1-2-3

Comisión Editora: *Raúl Sáez (Pdte.), Rodrigo Flores.*

Ing. Raúl Sáez S.

Atomos para la paz*

1. *INTRODUCCION*

"La ciencia reclama hoy a la vez la di-
"rección material, la dirección intelectual
"y la dirección moral de las sociedades".

MARCELIN BERTHELOT

En una reciente conferencia celebrada en la India bajo los auspicios de las Naciones Unidas (1) y con participación de pensadores y educadores de diversas nacionalidades, nuevamente surgió la tradicional diferencia entre la concepción oriental del ser humano como emanación divina y la occidental, del hombre como un animal capaz de progresar. El choque de estos conceptos opuestos derivó a una discusión sobre el materialismo científico como amenaza para los valores espirituales y para la propia autonomía humana. Y si bien los pensadores de Occidente y muchos de Oriente destacaron que la Ciencia había asegurado la felicidad y la salud de millones de seres humanos y que la economía mundial necesita cada vez más del especialista científico, el profesor Ras-Vihary Das, de la Universidad de Saugar, declaró (2)

"Pero el prestigio de la Ciencia en el mundo contemporáneo parece debido,
"en buena parte, a los servicios que presta en el dominio militar e industrial.
"Y esto no puede sino hacerla sospechosa a los hombres de juicio. Además, si se

* Conferencia dictada en el Instituto de Ingenieros y Arquitectos de Concepción en la celebración del 34º Aniversario (1º-XII-1955).

" examina la cosa de cerca, se percibe que la Ciencia no persigue simplemente " el conocimiento puro sino más bien el conocimiento que confiere el poder.

"Ahora bien, no podría negarse que el poder ejerce una influencia corrup- " tora. Cuando se busca el Saber no por él mismo sino por el Poder que da sobre " la naturaleza —y sobre los hombres— se va por mal camino. No hay razón, " por tanto, para asombrarse de todo el mal que la Ciencia ha hecho y continúa " haciendo al espíritu humano como aliado de las potencias del mal, como medio " de destrucción y como instrumento de explotación y de lucro."

He querido recordar estas palabras, no por cierto porque las comparta, ya que como hombre de Occidente y como técnico, preocupado por tanto esencialmente de las aplicaciones prácticas de la Ciencia, soy un convencido de que ella ha aportado grandes beneficios a la Humanidad. Pero, nunca ha estado más cerca que en este momento de ser efectiva esta posición de crítica hacia los resultados de la Ciencia, pues los progresos alcanzados en el campo de la física nuclear mantienen al mundo en una peligrosa tensión que amenaza con el aniquilamiento de las más altas formas de civilización alcanzadas hasta ahora.

Por ello, los esfuerzos realizados en los últimos tiempos para colocar los resultados de la Investigación Nuclear al servicio pacífico de la Humanidad y, si es posible, bajo el control internacional, son decisivos para definir la orientación futura que tendrá el mundo de hoy.

En la conversación de todos los días de las gentes, es corriente oir hablar de la Era Atómica, pero es dudoso que quienes usan de este modo de expresión se hayan realmente dado cuenta de la profunda verdad que esa afirmación encierra. Porque el mundo que se inicia con el siglo XX tiene un aspecto muy distinto de aquel que conocieron las generaciones inmediatamente anteriores. "Con el comien- " zo del siglo XX y atendiendo a las concepciones y realizaciones de Einstein, " Planck, Bergson, Freud, Picasso, sólo para nombrar unos pocos, termina una " época del mundo que nació alrededor del año quinientos antes de Jesucristo en " Grecia y que alcanzó su punto culminante en el Renacimiento. En esta era el " hombre adquirió conciencia del espacio. Hoy trátase de algo distinto; trátase " de adquirir conciencia del tiempo considerado como intensidad, como cualidad " y como elemento constitutivo del universo" (3).

El filósofo de la cultura Jean Gebser ha calificado este mundo naciente como la "era de la aperspectiva", entendiendo por "aperspectiva" no la negación de la perspectiva que constituye el modo de representación del espacio tridimensional —aquel mundo en el cual Galileo pretendía "medir todo cuanto es mensurable y hacer mensurable todo lo que todavía no lo es"— sino reduciendo su esfera de aplicabilidad; tal vez podría decirse que el mundo tridimensional es una parte limitada de este mundo más amplio de la "aperspectiva". En esta nueva concepción, el tiempo ya no tiene el sentido restringido de tiempo horario o tiempo de reloj; por el contrario, se ha enriquecido en múltiples significaciones vitales, psíquicas, biológicas, pero, por sobre todo y es esto lo que nos interesa, ha adquirido un aspecto físico como cuarta dimensión. Es curioso observar que tanto la expresión latina spatium como la palabra equivalente del castellano espacio, han designado originariamente un intervalo de tiempo y, desde antiguo, los pensadores descubrieron la estrecha asociación del espacio y del tiempo.

La Relatividad y la Mecánica de los Quantas han alterado profundamente nuestra concepción del mundo dando origen a apasionadas discusiones no ya de los físicos sino de los filósofos mismos. Estas nuevas teorías han afectado no sólo la Cosmología del Universo sino también nuestras ideas sobre la constitución íntima de la materia y se encuentran en el origen mismo de nuestra moderna concepción del átomo, base de la física nuclear.

Pero estas ideas nuevas de la era de la "aperspectiva" trascienden mucho más allá de las tesis científicas y de nuestros conocimientos del mundo material de las cosas inanimadas, e influyen también los conceptos biológicos y las expresiones artísticas que muchas veces se apartan ya de los principios del espacio tridimensional y de los modos de ver de la perspectiva.

Se ha dicho (4), y con muy buenas razones, "que sólo en nuestros días irrumpe propiamente la era del hombre en esta tierra, y que la era de los mamíferos está ya próxima a su fin. En el curso de los últimos cincuenta años se han extinguido más especies de mamíferos que desde la época de los glaciares hasta entonces y aun dentro de los amplios cotos en que el hombre ha dejado que los mamíferos vivan en su medio natural se comprueba, por modo asombroso, que éstos van declinando allí donde no se les cuida y alimenta artificialmente como animales domésticos o como presas de caza. Sólo hacen excepción a esta regla unos animales mamíferos que han permanecido sin desarrollar una función especial, animales que merecen una particular consideración puesto que constituyen el tronco madre común de todos los mamíferos: me refiero a las ratas.

"Por el contrario, en los últimos años los hombres se han multiplicado en proporciones asombrosas y continúan multiplicándose de un modo creciente; diariamente el hombre extiende el espacio de su esfera vital de modos insospechados, por la higiene y por la técnica. Sólo ahora comienza a emanciparse verdaderamente de la naturaleza y, de acuerdo con su voluntad y con sus fines, transforma cada vez más la superficie de la tierra, modificando los paisajes".

El hombre, gracias a la Técnica, ha quebrado una ley de la Naturaleza que tiende a mantener un cierto equilibrio en el espacio vital * y la pérdida de este equilibrio ha creado graves problemas que sólo pueden ser resueltos por nuevos y mayores progresos de la Técnica. Este acento cada vez más marcado de la Técnica

---

* Es interesante recordar cómo ha aumentado la población del mundo según los mejores estudios conocidos. En la obra de Walter Greiling (5) se dan las siguientes estimaciones:

Fecha	*Población*
4000 A.C.	30 millones
1000 A.C.	100 "
1	200 "
1600	500
1825	1.000 "
1925	1.960 "
1950	2.411

Estas informaciones coinciden muy aproximadamente con los cálculos de Palmer Putnam (6). Obsérvese la aceleración extraordinariamente violenta del crecimiento de la población a partir del Renacimiento. La tasa anual de crecimiento sube de 0,4% anual entre los años 1600-1800 a 1,3% en la actualidad.

como signo de nuestros tiempo es, a su vez, uno de los caracteres que definen y moldean la nueva era de la "aperspectiva". "Con ello no queda dicho que el "mundo de la Técnica sea hasta ahora el único intento de acomodación y orga- "nización del hombre dentro de la naturaleza, más parece que la Técnica consti- "tuye el intento más sistemático y tal vez el de resultados más felices de todos "cuantos se han realizado hasta ahora para compensar el evidente desequilibrio "entre el hombre y la naturaleza" (7).

Todo conduce a afirmar que la denominación de "era atómica" es mucho más que una expresión literaria y corresponde a una verdad profunda del mundo de hoy que se traduce no sólo en nuevas concepciones del Universo y de los fenómenos físicos a nuestro alrededor, sino, además, trae consigo cambios fundamentales en todas las manifestaciones del ser humano sean ellas espirituales o materiales. Creo que es necesario reflexionar sobre la naturaleza del momento en que vivimos que exige nuevos planteamientos y nuevas soluciones en todo orden de cosas.

No olvidemos que esta era tiene en lo económico el sello de la industrialización que significará un aumento en el nivel de producción más rápido y mayor que el observado en cualquier otra época de la historia de la humanidad, con excepción, tal vez, del cambio experimentado cuando la transformación del pastoreo nómade en agricultura sedentaria. Pero este aumento sin precedente de la producción y de los recursos del mundo exige una modificación básica en las diferencias económicas de las clases sociales, pues como dice Toynbee (8) "en una "sociedad que ha descubierto el "cómo hacerlo" del cuerno de la abundancia, "la desigualdad, siempre desagradable, en la distribución de los bienes de este "mundo, al dejar de ser prácticamente forzosa, se ha transformado en una enor- "midad moral."

Recordemos que este pensador señala que las dos enfermedades congénitas de la civilización son la institución de la guerra y la institución de las clases y que, separadas o combinadas, estas dos enfermedades aparecen como las causas fatales de la destrucción de todas las civilizaciones anteriores al momento actual. Pero hasta ahora "van y vienen las civilizaciones, pero la CIVILIZACIÓN logra en cada "oportunidad reencarnarse en nuevos ejemplares del tipo; puesto que por inmen- "sos que hayan sido los estragos sociales de la guerra y de las clases, no han "sido hasta ahora universales." (8)

Pero nuestros recientes inventos técnicos han creado condiciones tales que o logramos dominar las dos enfermedades congénitas o corremos el riesgo de que los estragos ahora sí sean totales con la derrota definitiva y concluyente del hombre.

La Técnica es el más poderoso instrumento para resolver el dilema planteado en los comienzos de nuestra era de la "aperspectiva". El átomo, que es la más reciente adquisición de este dominio y cuyas posibilidades son aún insospechadas, debe aplicarse también a esta tarea formidable. Hablemos por tanto del Atomo como un instrumento de Paz.

2. *EL ATOMO*

"De acuerdo con las convenciones hay
" dulce y amargo, hay caliente y frío; de
" acuerdo a las convenciones hay color.
" Pero, en realidad, son átomos y el vacío.
"Los objetos de sensaciones se suponen
" reales y usualmente se consideran como
" tales; pero, en verdad, no lo son. Unica-
" mente son reales los átomos y el vacío."

DEMÓCRITO (460-370 A. C.)

Los filósofos griegos Demócrito y Empédocles presintieron la existencia del átomo y la velocidad finita de la luz. Estas ideas, no basadas por cierto en conocimientos ni observaciones, permanecieron olvidadas durante casi dos mil años. " Durante todo aquel tiempo, la mano mortal de Aristóteles cayó pesadamente " sobre la física *. Hubiera ocurrido de otra manera, entonces la libre discusión " y una mezcla de las ideas de Demócrito y de Empédocles (átomo y fuerza) " podía haber dado a la física un buen comienzo; porque es sorprendente ver el " gran número de ideas básicas de la física moderna prefiguradas en las especula- " ciones de estos dos hombres." (9)

Es necesario esperar hasta los grandes filósofos y científicos de los siglos XVI y XVII para que nuevamente se reconociera el hecho de que la materia natural no es un continuo. Pero la teoría atómica, como necesaria explicación de los fenómenos químicos y físicos, adquirió su verdadero desarrollo sólo a partir del siglo XIX. Nuestro concepto actual del átomo, sin embargo, nace prácticamente con el siglo actual; en esta oportunidad deseo recordar muy someramente algunos aspectos de su constitución que son necesarios para mejor comprender los problemas referentes a la aplicación de la energía nuclear.

El átomo es la más pequeña partícula de un elemento que puede actuar químicamente. Su diámetro se mide en uno o varios Angström ** según sea el elemento químico de que se trata. Se compone de un núcleo denso de carga eléctrica positiva que contiene casi toda la materia, de un diámetro igual a $1{,}5 \times 10^{-13} A^{1/3}$ cm. (A = peso atómico o más bien, número de masa). El núcleo más pesado conocido tiene un diámetro inferior a 10^{-12} cms., o sea, es menos de un diez milésimo del diámetro del átomo. En torno al núcleo giran un cierto número de electrones planetarios según una o varias órbitas, cuyas cargas negativas sumadas igualan la carga positiva del núcleo haciendo del átomo un cuerpo eléctricamente neutro. La carga *e* del electrón es considerada la fracción de electricidad más pequeña posible, constituyendo esta carga eléctrica uno de los límites absolutos que hoy día se consideran definitivamente establecidos. La carga *e* es de 4,802 x

* Recuérdese que Aristóteles estudió muchas cuestiones de física aplicando métodos deductivos, pero sus premisas fueron casi siempre erróneas y por tanto, también las conclusiones. Aristóteles dominó el pensamiento de los físicos hasta el Renacimiento y es necesario llegar a Leonardo da Vinci y a algunos precursores de sus ideas para presenciar la aplicación sistemática de los métodos inductivos y de la experimentación como base de la Ciencia.

** Un Angström = 10^{-8} cm.

10^{-10} unidades electrostáticas *; el diámetro del electrón es inferior a 4×10^{-13} cms. y su masa es de sólo $9{,}1 \times 10^{-28}$ gramos. El núcleo mismo está formado por un cierto número de partículas que se conocen como nucleones y que son de dos tipos: neutrones y protones. Los primeros son eléctricamente neutros; los segundos, de masa ligeramente inferior, tienen carga *e* positiva. La masa del protón es 1837 veces superior a la de un electrón. Como el número de protones en el núcleo es igual al número de electrones orbitales, se comprende que prácticamente el total de la masa del átomo está formada por el núcleo. El número de electrones en el átomo de un elemento es su *número atómico* y corresponde al número ordinal de dicho elemento en la tabla periódica. **.

Las propiedades químicas de un elemento dependen exclusivamente de sus electrones orbitales; en los procesos químicos entre varios elementos sólo hay alteraciones en las disposiciones de los electrones orbitales. Es conveniente señalar que las reacciones químicas en las cuales también se desarrollan procesos de producción o consumo de energía —en cantidades por cierto incomparablemente menores que aquellas que acompañan las alteraciones de los núcleos de los átomos— estrictamente consideradas, también son procesos atómicos. Por tanto, al hablar de la ciencia del átomo, en relación a la Física Nuclear, posiblemente es más conveniente hablar de "Energía Nuclear" en lugar de "Energía Atómica".

Es evidente que la constitución del núcleo es factor fundamental de la física nuclear. Las características de los núcleos se definen por el número de neutrones y de protones que contienen; la suma de estas partículas es el *número de masa* del átomo; el número de neutrones de un átomo es la diferencia entre el número de masa y el número atómico (este último igual al número de protones).

Obsérvese que el número de masa obligadamente está en estrecha proporcionalidad con el peso atómico del elemento, puesto que protones y neutrones constituyen la casi totalidad de la masa del átomo.

Alrededor de los años 1910-1911 las investigaciones sobre elementos radiactivos de diferente peso atómico y de iguales propiedades químicas por un lado y la aplicación de nuevos métodos para la determinación de los pesos atómicos de los elementos por otro, reveló la existencia de los *isótopos* que son átomos de un mismo elemento con iguales propiedades químicas pero diferentes pesos atómicos y por tanto diferente número de masa. Este descubrimiento echó por tierra la teoría sustentada hasta alrededor de 1913 de que las propiedades químicas de los elementos estaban relacionadas con su peso atómico, teoría derivada en parte de la clasificación de la tabla periódica que demostraba una cierta regularidad de los pesos atómicos frente a la agrupación de los elementos en la tabla. Como ya se señaló, las propiedades químicas dicen relación con el número y la disposición de los electrones orbitales y, por lo tanto, en los isótopos estas características son iguales. Ciertas propiedades físicas, tales como los espectros óptico y de rayos X de los elementos también dependen de sus electrones orbitales y por tanto son fundamentalmente iguales en los isótopos, salvo muy pequeñas diferencias producidas en algunos casos por el efecto de las diferentes masas de los núcleos.

---

* 1 coulomb = 3×10^9 unidades electrostáticas.

** La tabla periódica de los elementos es la clasificación original de Mendeleyeev con las modificaciones introducidas con posterioridad.

Incidentalmente conviene recordar que hay algunos elementos de igual número de masa y de diferentes propiedades químicas por tener distinto número atómico. Estos elementos se conocen con el nombre de *isobares*: ejemplo de ellos son el radio B, el radio C y el radio C', con el mismo número de masa 214.

Los isótopos son extraordinariamente numerosos; según el último informe publicado por la Comisión Nacional de Energía Atómica de Estados Unidos más de mil núcleos diferentes han sido identificados entre los elementos químicos conocidos (10). No todos los elementos por cierto y con mucho mayor razón no todos los núcleos existen o han sido encontrados hasta ahora en la naturaleza. Un gran número de los mil núcleos diferentes mencionados han sido sólo producidos en el laboratorio.

En la naturaleza sabemos que se encuentran algunos elementos radiactivos. Estos emiten tres tipos * diferentes de radiaciones:

Partículas α que son núcleos de helio con dos protones y dos neutrones con gran poder de ionización y pequeña penetración.

Partículas β que son electrones de muy alta velocidad.

Radiaciones γ que son radiaciones electromagnéticas de elevada energía y gran poder de penetración.

Todas estas radiaciones son peligrosas para los tejidos vivos.

La radiactividad es un proceso asociado con el núcleo y depende de la combinación de protones y de neutrones y no sencillamente de la cantidad existente de uno de ellos o de la cantidad total. Isótopos con igual número de protones o de neutrones tienen radiactividades de distintas características y los elementos isobares, con igual número de masa tienen también distinta radiactividad.

Los elementos radiactivos al emitir partículas o radiaciones experimentan una modificación de su átomo y por tanto cambian de naturaleza hasta alcanzar después de un largo proceso de desintegración, una forma final estable. La vida de cada elemento radiactivo es extremadamente variable desde fracciones infinitesimales de segundos hasta cantidades inverosímiles de años. En lugar de definir la vida de un elemento se define a veces el "tiempo medio" o "media vida" que es el período necesario para que la radiactividad de un elemento disminuya a la mitad. Para el uranio 238 ese tiempo es de $4{,}5 \times 10^{-9}$ años, para el radio 226 es de 1.620 años. Entre los elementos radiactivos artificiales, es decir aquellos cuya radiactividad es provocada por el bombardeo de sus núcleos con partículas aceleradas en alguno de los varios procesos nucleares, hay productos que tienen una "vida media" de millonésimas de segundos. Algunos de estos elementos "artificiales" emiten varias de las tres radiaciones indicadas anteriormente pero, además, algunos de ellos emiten también protones (partículas de carga positiva) y positrones (electrones de carga + e o radiaciones β positivas). **

Lo dicho sobre la constitución del átomo es lo esencial para entender los fenómenos de la energía nuclear y las ecuaciones que expresan sus reacciones.

Sin embargo, tal vez es interesante un comentario final. Nuestro conocimiento, en el estado en que se encuentra hoy día, parece haber alcanzado algunos límites fundamentales sin pretender dar a esta afirmación ningún carácter definitivo que

---

* En radiactividad hay varios otros fenómenos, pero de menor significación.

** La mayor parte de las informaciones sobre el átomo expresadas en el presente párrafo pueden encontrarse en Sourcebook on Atomic Energy (11).

la haría anticientífica (12). Así, por ejemplo, se acepta que la electricidad es de constitución corpuscular y que la carga más pequeña posible de existir en la naturaleza es el electrón. Otro concepto básico que parece definitivamente adquirido es el de que un cuerpo emite o absorbe radiaciones por cantidades finitas o quantas de energía cuya magnitud es igual al producto de la constante universal de Planck por la frecuencia de la radiación en consideración. La fórmula expresa que para la frecuencia ν el quantum de energía es $E = h \nu$.

En la rápida explicación del átomo dada más arriba no se ha hecho referencia a la teoría de los quantas, si bien es uno de los conceptos fundamentales que se utiliza hoy día para hacer el estudio de la estructura de un elemento en particular y para muchas de las leyes de la física nuclear. La constante de Planck es $h = 6{,}62 \times 10^{-27}$ erg. seg. Es decir, las dimensiones de la constante universal son el producto de Energía x Tiempo. Tal vez sería conveniente recordar algunos otros límites del conocimiento que se consideran como definitivos, entre ellos la velocidad de la luz como una constante independiente del sistema de medida y el principio de la indeterminación de Heisenberg que expresado en términos no científicos afirma que mientras se extrema la aproximación a las cosas en un sentido, se nos aleja en la misma proporción en otro *.

Entre los límites que merecen un comentario adicional está el referente a las partículas elementales de materia; el protón y el neutrón. Hoy día no podría asegurarse, sin embargo, que se trate de las partículas más pequeñas que existen en forma estable en la naturaleza. La posibilidad de que el protón y el neutrón se transformen el uno en el otro requiere para que ello sea posible de la existencia de otras partículas considerablemente menores en tamaño, existencia que hoy sólo es una hipótesis de trabajo **. Por otro lado, en el estudio de las radiaciones cósmicas figuran los mesones que parecen tener una masa intermedia entre la del electrón y la del protón.

Los conceptos corpusculares de la electricidad y de la energía radiante —que posiblemente son una sola y misma cosa— y la discontinuidad de la materia, han hecho surgir la idea de la discontinuidad del tiempo. "Por eso Poincaré, al dar "en 1912 un enunciado más preciso de la Ley de los Quantas, observaba que "un sistema físico sólo es susceptible de un número finito de estados distintos; "salta de uno de los estados al otro por una serie continua de estados intermedios. Pero en el intervalo de dichos estados *ya no habría más tiempo;* dicho de "otro modo, el tiempo saltaría de un estado a otro. Hemos de suponer átomos "de tiempo" (13).

Fácil es comprender que semejante reflexión choca demasiado profundamente con nuestro conocimiento intuitivo del tiempo. No nos extrañemos por tanto que por el momento ella sea sólo materia de especulación ***.

---

* En el caso de las partículas no se puede simultáneamente precisar la posición y la cantidad de movimiento (o velocidad o energía relacionadas con la cantidad de movimiento). Es decir, se establece un límite definido de nuestro conocimiento posible en la dualidad del concepto de materia-onda.

** Se trata de los llamados neutrinos y antineutrinos.

*** Es curioso constatar que la filosofía budista de la India rozó un problema absolutamente científico. Sir William Dampier (55) después de mencionar que cien años antes de Jesucristo y tal vez por influencia de los griegos también se desarrolló una rudimentaria teoría atómica, cita un párrafo de la Encyclopaedia of Rehgion and Ethics de Hasting

3. *LA FISICA NUCLEAR*

"La física está bastante adelantada para
" afirmar que jamás tendremos el medio
" de hacer desaparecer un protón o un
" neutrón o un núcleo cualquiera y de trans-
" formar toda su masa en energía."

HANS A. BETHE
(físico nuclear)

¿Qué son las reacciones nucleares? Son redistribuciones de los protones y neutrones del núcleo así como las reacciones químicas son redistribuciones de los electrones orbitales de los átomos. Cuando se quema hulla o se hace estallar nitroglicerina estamos redistribuyendo moléculas cuyas distancias entre sí son del orden de 10^{-7} cms.; en cambio, en una reacción nuclear los nucleones que se redistribuyen están a distancias del orden de 10^{-13} cms., vale decir, un millón de veces menor. Las fuerzas atractivas en ambos casos (química o nuclear) tienen aparentemente una naturaleza similar, si bien son de carácter diferente a las fuerzas gravitacionales o electrostáticas que nos son más familiares; en ambos casos también los esfuerzos de atracción son inversamente proporcionales a la distancia de las partículas que se atraen mutuamente. De ahí se desprende que las fuerzas de atracción para las acciones nucleares son de un orden de magnitud cientos de miles o millones de veces mayor que para las acciones químicas. Este hecho fundamental constituye la razón de ser de las enormes fuerzas puestas en juego por los fenómenos nucleares.

Las masas relativas de las partículas que entran en la constitución de un átomo expresadas en la escala nuclear que define al átomo de oxígeno O^{16} como igual a 16,000 * son:

Neutrón:	1,00897
Protón:	1,00758
Electrón:	0,00055

Si se suma las masas de las partículas constituyentes de un átomo cualquiera y se determina la masa efectiva del átomo, por ejemplo, por medio de un espectrógrafo de masa, se encontrará que siempre esta última es menor que la suma de las masas de las partículas componentes. La diferencia constituye el "defecto de masa" o cantidad de materia que ha sido convertida en energía para juntar las partículas componentes. Inversamente, esta energía representa también la cantidad que sería necesario consumir para dividir un átomo en sus elementos constituyentes y se define como "la energía de ligazón" (binding energy).

---

que dice " Las cosas, según esta teoría, no existen sino momentáneamente, y en el próximo " instante son sustituídas por facsímiles de las mismas, al igual que una proyección cine- " matográfica. La cosa no es más que una serie de tales existencias momentáneas y el tiempo " puede suponerse descompuesto en átomos".

* Esta escala es ligeramente diferente de la usada en Química para definir los pesos atómicos ya que ella usa 16,000 como valor base para el oxígeno que existe en la naturaleza que es una mezcla de varios isótopos (O^{16}, O^{17}, O^{18}).

Así, para el isótopo $_8O^{16}$ del oxígeno, la masa de las partículas componentes del átomo será: *

Neutrones	8 x 1,00897	8,07176
Protones	8 x 1,00758	8,06064
Electrones	8 x 0,00055	0,00440
		16,13680
	peso atómico	16,00000
	Defecto de masa	0,13680

Esta masa equivale a una cierta cantidad de energía que se determina por la ecuación de masa-energía de Einstein (15):

$$E = mc^2 \text{ gr } (cm/seg)^2$$

$$E = m\ (2.998 \times 10^{10})^2 \text{ ergs} = m \times 8{,}99 \times 10^{20} \text{ ergs}$$

En este caso, el "defecto de masa" *m* determinado anteriormente corresponde al número de átomos contenidos en 16 gramos de oxígeno, o sea, una cantidad de átomos expresada por el conocido número de Avogadro igual a $6{,}023 \times 10^{23}$. Por tanto, la energía de ligazón por cada átomo de oxígeno será:

$$\frac{0{,}1368 \times 8.99 \times 10^{20}}{6.023 \times 10^{23}} : = 0.204 \times 10^{-3} \text{ ergs}$$

En física nuclear la unidad habitual de energía es el electrón-volt, es decir, es la energía adquirida por la carga *e* cuando reduce su potencial en un volt. Además se emplea el kilo-electrónvolt (Kev = 10^3ev) y el megaelectrón-volt (Mev = 10^6ev.). Un ev = $1{,}6 \times 10^{-12}$ egrs. Por tanto, la energía de ligazón en un átomo de oxígeno será de **:

$$\frac{0{,}204 \times 10^{-3}}{1{,}6 \times 10^{-12}} \text{ ev} = 127{,}5 \text{ Mev}$$

En la práctica interesa la energía de ligazón por cada partícula del núcleo de un átomo ya que es evidente que será esta cifra la verdadera representación de la mayor o menor estabilidad del núcleo considerado. Los estudios nucleares han

---

* Ejemplo tomado de: Introduction to nuclear Engineering (14).
Otro ejemplo: .. .. $_{83}Bi^{209}$.

Neutrones	126 x 1,00897	127,13022
Protones	83 x 1,00758	83,62914
Electrones	83 x 0,00055	0,04565
		210,80501
	Peso atómico	209,05500
	Defecto de masa	1,75001

** Un cálculo similar hecho para el bismuto arrojaría:

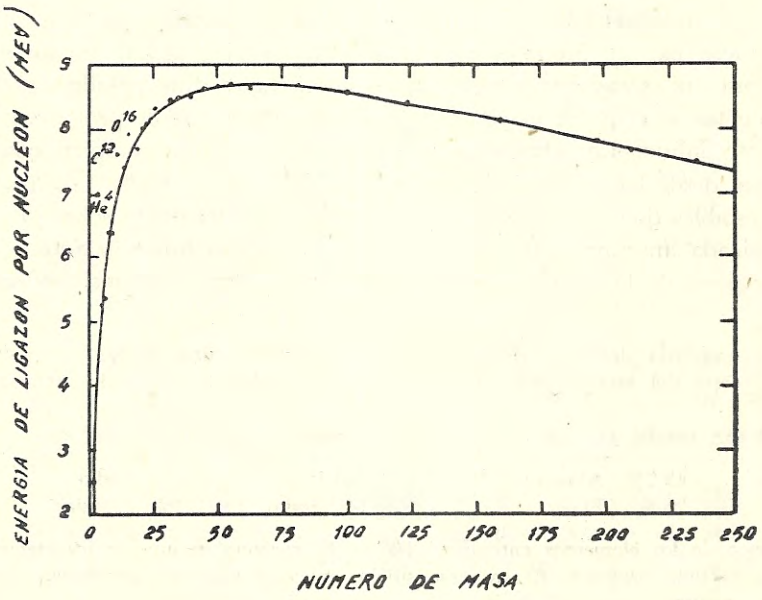
$$E = 2{,}611 \times 10^{-3} \text{ ergs} = 1632 \text{ Mev}$$

Para un defecto de masa igual a 1 expresado en pesos atómicos, la energía de ligazón por átomo es 931 Mev; cifra que se obtiene de igual modo que el cálculo recién realizado para el oxígeno y el bismuto.

permitido establecer que las fuerzas atractivas entre protones deben ser aproximadamente equivalentes a las fuerzas atractivas entre neutrones, pero las primeras deben sufrir una cierta disminución por la repulsión electrostática entre las cargas positivas de los protones; la interacción entre un protón y un neutrón es mayor que las dos anteriores; el ejemplo más representativo de este caso es el núcleo del deuterio que es relativamente estable. Un núcleo formado sólo de dos neutrones en cambio tiene una existencia relativamente transitoria y un núcleo con sólo dos protones no ha sido aún identificado en la naturaleza.

La energía de ligazón que retiene un nucleón (protón o neutrón) en el núcleo es naturalmente la suma de las interacciones de los diversos nucleones vecinos a él, y será diferente para cada nucleón considerado; la división de la "energía de ligazón" total de un núcleo por el número de nucleones componentes es por tanto un valor término medio representativo del átomo. Por ejemplo, en el caso del oxígeno este valor será la cifra encontrada anteriormente (127,5 Mev.) dividida por 16, o sea, 7,96 Mev por nucleón. Para el bismuto el valor es de 1.632 Mev : 209 = 7,8 Mev.

Si se realiza el cálculo correspondiente para todos los núcleos de los elementos estables de la naturaleza y se traza un gráfico (Fig. 1) con los valores resultantes indicando en ordenadas la energía de ligazón por nucleón expresada en Mev y en abscisas los números de masas, se encuentra que todos estos valores caen sobre una curva que indica un rapidísimo aumento de la energía de ligazón desde los elementos más livianos y que alcanza un máximo muy amplio alrededor del valor 8,4 Mev entre los elementos de números de masa 40 y 120 (el valor más alto parece ser el fierro $_{26}Fe^{56}$ con más o menos 8,7 Mev). Pasado el máximo la energía de ligazón de los elementos más pesados va decreciendo paulatinamente en forma lenta. Ya señalamos que para el bismuto, por ejemplo, esta cifra era de 7,8 Mev; para el Uranio $_{92}U^{238}$) el valor baja a 7,5 Mev. Este lento



decrecer ha sido interpretado en el sentido que una vez pasado el punto máximo de la curva, la energía de ligazón necesaria para retener un nuevo nucleón se hace cada vez menor. Como se verá más adelante, la disminución de energía de ligazón de los núcleos pesados comparado con los valores correspondientes de los elementos de peso atómico medio constituye la base de la explicación del por qué del desprendimiento de grandes cantidades de energía en el proceso nuclear de fisión de un núcleo pesado para la formación de dos núcleos más livianos.

Del examen detallado de la forma de variación de la energía de ligazón con el número de masa, los físicos nucleares han deducido varias conclusiones de importancia sobre los factores que influyen en esta ligazón. En efecto, a medida que aumenta el número de masa, la relación de neutrones a protones debe aumentar ya que las fuerzas de repulsión de las cargas eléctricas se hacen más importantes y es necesario compensarlas con un mayor número de interacciones entre neutrones solos y principalmente entre protones y neutrones que presentan la mayor fuerza de atracción. Para los átomos livianos la relación neutrones a protones es prácticamente uno; para los átomos muy pesados es casi 1,5.

Por un estudio de las características de los isótopos estables que se encuentran normalmente en la naturaleza se ha establecido que el caso más frecuente es el de los átomos con número par de neutrones y protones (162), después los que tienen un número par de protones e impar de neutrones (56), enseguida el caso inverso (52) y finalmente, el de ambos números impares es el caso raro del cual sólo hay 4 ejemplos el $_1H^2$, el $_3Li^6$, el $_5B^{10}$ y el $_7N^{14}$. Sobre el número de masa 14 se conocen algunos isótopos con números impares de neutrones y protones pero son radiactivos y por tanto inestables.

Lo anterior indica que los elementos con números pares de neutrones y protones son los más estables; esto se debería a que agrupados por parejas, los neutrones y los protones equilibrarían sus momentos angulares (efecto "spin" (16). Por otro lado, si la interacción entre un protón y un neutrón es más importante que la que se realiza entre dos nucleones de igual naturaleza, (protón-protón o neutrón-neutrón) los núcleos más estables serán aquellos que tengan igual número par de protones y neutrones. Estos están naturalmente sólo entre los elementos relativamente livianos, pues, como ya se dijo, pasado un cierto número de masa, se requiere mayor número de neutrones que de protones para mantener el equilibrio. Los elementos más importantes * que cumplen con este requisito son, desde luego, el $_2He^4$, $_6C^{12}$, $_8O^{16}$, $_{12}Mg^{24}$ $_{14}Si^{28}$, $_{20}Ca^{40}$. Los tres primeros son tan estables que su "energía de ligazón" está francamente sobre la curva general indicada anteriormente. Los cuatro últimos elementos señalados constituyen la mayor parte de la corteza terrestre **. Sobre el número de masa 40 correspon-

---

* En esta lista debería posiblemente incluírse también uno de los isótopos del Neón ($_{10}Ne^{20}$) y otro del azufre $_{16}S^{32}$ que no existen en la abundancia de los anteriomente indicados.

** Según Bendel (17) la corteza terrestre tiene la siguiente composición:

Oxígeno	47,2%	Aluminio	7,9%	Calcio	3,4%	Sodio	2,4%
Silicio	28%	Fierro	4,4%	Magnesio	2,4%	Potasio	2,3%

El resto de los elementos enteran el 100%. El carbono es uno de los elementos principales de la vida orgánica. El oxígeno, silicio, calcio y magnesio constituyen el 81% de la corteza terrestre.

diente al calcio, los elementos tienen un mayor número de neutrones que de protones. Entre los que siguen inmediatamente deben destacarse el Titanio $_{22}Ti^{48}$ y el Fierro $_{26}Fe^{56}$ ambos también, excepcionalmente abundantes en la corteza terrestre.

La física nuclear, como ya lo señalamos, no tiene todavía una respuesta final a la naturaleza de esta energía de ligazón si bien existen algunas teorías al respecto basadas en la mecánica ondulatoria. Sin embargo, lo dicho parece suficiente para comprender los fenómenos de energía nuclear.

4. *LAS REACCIONES NUCLEARES*

> "Comprendo, rey Gelón, que estas cosas
> " parecerán increíbles a la mayor parte de
> " aquellos que no se han dedicado al estu-
> " dio de las matemáticas".
>
> ARQUÍMIDES

Tres son los fenómenos básicos de la física nuclear que entran en consideración desde el punto de vista de su posible aprovechamiento pacífico en beneficio de la humanidad, si bien uno de ellos, está todavía lejos de su utilización práctica. Los tres fenómenos son:

a) *Las reacciones termonucleares o fusión* que persiguen la formación de un elemento determinado a partir de otros más livianos.

b) *La fisión* o división de un átomo pesado por el bombardeo de su núcleo con neutrones para formar dos nuevos elementos más livianos con la emisión de nuevos neutrones.

c) *La captura de partículas* por el núcleo de un átomo, formándose así un isótopo de peso atómico superior, generalmente radiactivo, que decae, en tiempos muy variables según sea el isótopo formado, hasta constituir un elemento estable o un nuevo elemento de diferente número atómico.

a) *La fusión* es hoy día sólo una posibilidad. Su principio es la base para la bomba de hidrógeno y si bien es cierto que en este dominio ya se ha logrado hacer algunas experiencias de carácter militar, las dificultades prácticas son de tal orden que en la reciente Conferencia sobre usos pacíficos de la Energía Atómica celebrada en Ginebra, nadie presentó estudios relativos a este aspecto. Sin embargo, en su discurso de apertura, el Presidente de la Conferencia y delegado de la India Dr. Homi Bhabha predijo que se encontraría un método para liberar la energía de fusión, de manera controlada, dentro de los próximos 20 años. Y agregó: "Cuando esto suceda, los problemas de energía del mundo estarán verdaderamente resueltos para siempre pues el combustible será tan abundante como el deuterio en los océanos" (18).

A este mismo respecto, el Almirante Lewis L. Strauss, Presidente de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, declaró que la Comisión ha estado trabajando en estos problemas desde hace mucho tiempo y ahora ya se puede asegurar que la idea de un reactor de fusión no es irrealizable. "Yo considero, " dijo, este programa a tan largo plazo, que él no puede afectar los esfuerzos " que se realizan actualmente, para encontrar y producir uranio o los esfuerzos que " se hacen ahora y que nosotros alentamos, para construir reactores capaces de " producir energía eléctrica a partir de la energía atómica" (18).

Teóricamente el proceso de fusión nuclear es la síntesis de elementos livianos para la producción de otros de mayor peso atómico y por consiguiente con mayor "energía de ligazón". El ejemplo típico de este proceso es el conocido ciclo de Bethe que explica la energía solar como un proceso de síntesis de hidrógeno para formar helio con un considerable desprendimiento de energía. El ciclo de Bethe supone que el proceso se realiza en presencia de carbono que actúa como catalizador. Las ecuaciones nucleares se escriben como siguen (16).

$$_6C^{12} + {}_1H^1 = {}_7N^{13} + \text{energía}$$
$$_7N^{13} = {}_6C^{13} + {}_{+1}e^0$$
$$_6C^{13} + {}_1H^1 = {}_7N^{14} + \text{energía}$$
$$_7N^{14} + {}_1H^1 = {}_8O^{15} + \text{energía}$$
$$_8O^{15} = {}_7N^{15} + {}_{+1}e^0$$
$$_7N^{15} + {}_1H^1 = {}_6C^{12} + {}_2He^4$$

La suma de todas las ecuaciones anteriores da, finalmente: *

$$4\,{}_1H^1 = {}_2He^4 + 2\,{}_{+1}e^0 + \text{energía}$$

Si se calcula la diferencia de las masas resultantes entre ambos miembros de la ecuación esta diferencia representa la energía liberada en el proceso.

$$4 \times 1{,}00813 = 4{,}0028 + 2 \times 0{,}00055 + \text{energía}$$
$$\text{Energía} = 0{,}02862$$

Recordando que un defecto de masa igual a 1 (expresada en pesos atómicos) equivale a 931 Mev por átomo, la energía producida en la síntesis de un átomo de helio es de

$$E = 0{,}02862 \times 931 \text{ Mev} = 26{,}6 \text{ Mev}$$

Sabemos que un gramo de helio tiene aproximadamente $1{,}5 \times 10^{23}$ átomos y que un Mev $= 1{,}6 \times 10^{-6}$ ergs y que un kilowatthora $= 3.600 \times 10^{10}$ ergs; se concluye que la síntesis de un gramo de helio produce la energía equivalente a:

$$E: = \frac{1{,}5 \times 10^{23} \times 26{,}6 \times 1{,}6 \times 10^{-6}}{3.6 \times 10^{13}} = 178.000 \text{ kWh}$$

En otras estrellas más jóvenes el proceso aparentemente debe ser distinto pues el ciclo de Bethe es demasiado lento para explicar las condiciones que en ellas se observan. La gran cantidad de litio que existe en dichas estrellas, permite suponer que el proceso de fusión se realiza según la siguiente ecuación nuclear (11).

$$_3Li^7 + {}_1H^1 = 2\,{}_2He^4 + 17 \text{ Mev}$$

Ambos procesos, la síntesis a partir del hidrógeno o la fusión de éste con el Litio requieren altísimas temperaturas —millones de grados (de ahí su nombre de termonucleares)— para permitir vencer la barrera que se opone a la aproxi-

* Este proceso es extraordinariamente lento (millones de años), pero considerando los volúmenes de materia que entran en la reacción, la cantidad de energía producida siempre alcanza un valor excepcional.

mación de partículas con cargas eléctricas que se repelen. Sólo en ese estado de agitación de los átomos es posible esperar la realización del proceso con una velocidad tal que signifique efectivamente una producción de energía por unidad de tiempo, de alguna significación.

Según las ideas de Bethe para que la fusión pueda iniciarse espontáneamente en una estrella en formación es menester que la temperatura sea de 400.000°. ¿Cómo se piensa resolver este problema en el caso de las reacciones termonucleares de nuestros laboratorios e instalaciones industriales? En la bomba H según se supone las condiciones iniciales se producen por un proceso de fisión atómica de carácter explosivo con gran desprendimiento de calor.

Aparentemente, la solución industrial está en el empleo de aceleradores de gran poder que produzcan muchos millones de electronvolts; los flujos de partículas serán concentrados de manera a producir altísimas temperaturas en el foco del lente concentrador. Los elementos con mayores probabilidades de ser utilizados parecen ser el deuterio $_1H^2$ y el Litio en sus dos isótopos, $_3L^6$ y $_3L^7$. El problema de los materiales de construcción, aptos para resistir las condiciones extremas del proceso y el control del proceso, para evitar su posible carácter explosivo, son dos aspectos que crean sin duda otra gran serie de dificultades que será preciso vencer antes de poder hacer de la fusión un proceso útil a la Humanidad.

Si bien en la Conferencia de Ginebra nada concreto se dijo sobre el estado de avance de los trabajos en esta materia, en contraposición a lo sucedido en materia de fisión atómica, quedó claramente establecido que todos los países adelantados en la investigación atómica están preocupados de las reacciones termonucleares.

---

b) La *fisión nuclear* y los problemas que de ella se derivan constituyó el tema central de la Conferencia de Ginebra. Diseño y operación de reactores, producción de energía, materiales y combustibles para los reactores, información básica de física nuclear, fueron los temas fundamentales discutidos en esa oportunidad. "En general, poca información nueva sorprendente fue dada a conocer. "Pero algunos detalles fueron suministrados cuando cada Nación dio una in- "formación bastante comprensible de cuál había sido su experiencia. Esto sir- "vió de base para conversaciones más detalladas fuera de las salas de sesiones "y reuniones privadas de grupos donde efectivamente se produjeron los verda- "deros beneficios" (19).

La fisión nuclear es un fenómeno reciente. Sólo en 1939 los científicos reconocieron que el bombardeo del núcleo del uranio con neutrones lentos producía la división de aquél en dos elementos más livianos responsables de la radiactividad observada por Fermi.

El proceso de la fisión de un núcleo pesado se realiza con un considerable desprendimiento de energía, del orden de 200 Mev. por átomo de uranio.

Si se parte del peso atómico del U^{235} (235,124) y este átomo es bombardeado con un neutrón (1,00897) que penetra al núcleo, la masa reaccionante es de 236,133.

Los productos finales que se obtienen pueden ser diferentes, según sea la

forma como se realiza la fisión, pero los resultados, desde el punto de vista de la energía liberada, son muy parecidos. Supongamos que los dos productos finales de la fisión son los isótopos estables del Molibdeno y del Lantano. La ecuación se escribe

$$^{92}U^{235} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_{42}Mo^{95} + {}_{57}La^{139} + 2{}_0n^1$$

En el proceso intermedio aparecen elementos radiactivos con emisión de radiaciones β negativas que explican el mayor número de protones (y consecuentemente de electrones orbitales) de los productos finales de la reacción.

Los pesos atómicos de los elementos del segundo miembro de la ecuación son 94,945 y 138,955 respectivamente, que más el peso de los neutrones dan un total de 235,918. El defecto de masa resulta de 236,133 — 235,918 = 0,215 y corresponde a la energía liberada que alcanza a 0,215 x 931 = 198 Mev.

Este desprendimiento de energía puede explicarse de otro modo. En efecto, los dos productos finales de la reacción, por su número de masa, se encuentran en el grupo medio de la escala de elementos, es decir, entre aquellos que tienen la más alta "energía de ligazón" (del orden de 8,4 Mev. por cada nucleón —ver Fig. 1). En cambio, el uranio, en el extremo pesado de la escala sólo tiene "energía de ligazón" de 7,5 Mev; en otras palabras, por nucleón hay una diferencia que aproximadamente puede estimarse en 0,9 Mev. En la reacción intervienen 236 nucleones, o sea, la diferencia total de "energía de ligazón" es del orden de 0,9 x 236, valor que se aproxima a los 200 Mev.

A primera vista este argumento es difícil de comprender pues, si la "energía de ligazón" de los productos finales de la reacción es mayor que la energía del elemento inicial ¿cómo es posible que la reacción libere energía? Para explicar este hecho recuérdese que por definición la "energía de ligazón" es la cantidad de energía liberada en la formación del núcleo de un elemento * a partir de los nucleones componentes o recíprocamente la energía necesaria para romper el núcleo de un elemento en las partículas que lo forman. Dicho en otras palabras, si al formarse un núcleo de Uranio a partir de los nucleones se libera una cantidad E_u de energía y si al formarse el Molibdeno y el Lantano a partir de las partículas componentes de sus respectivos núcleos se libera una cantidad de energía E_p, al pasar directamente del Uranio al Molibdeno y Lantano debe liberarse la cantidad de energía que corresponde a la diferencia $E_p - E_u$.

Se puede comprobar también que la repulsión electrostática de los protones de los núcleos de los dos productos finales también equivale a los 200 Mev, que forman la energía liberada (11).

La energía calculada como producto de la fisión del uranio es una aproximación ya que éste puede dividirse de gran número de maneras diferentes y los productos intermedios de la fisión, antes de llegar a los productos estables finales pueden ser muy variados; sin embargo, los resultados finales en cuanto a la energía liberada son semejantes a los encontrados en el caso examinado. Obsérvese que no toda la energía aparece en forma instantánea, parte de ella corresponde a la radiactividad de algunos de los productos intermedios formados y por lo

* En estricta teoría deberíamos hablar del átomo, pero el papel de los electrones orbitales no introduce variaciones significativas en las cifras.

tanto se desprende en forma paulatina de acuerdo con la "media vida" de estos elementos radiactivos *.

La fisión de un gramo de uranio 235 libera una cantidad de energía igual a:

$$E\ (kwh) = \frac{(N^o \text{ de Avogadro}) \times 200 \text{ Mev} \times 1{,}6 \times 10^{-6} \text{ erg}}{235 \times 3600 \times 10^{10}} = 23000 \text{ kWh.}$$

Cómo se produce la fisión dentro del átomo de uranio es un problema tal vez no resuelto enteramente (11). Un tratamiento sencillo del problema permite decir que la división de un átomo está favorecida por las fuerzas de repulsión electrostáticas de los protones; por tanto si Z es el número de protones (número atómico) las fuerzas de repulsión favorables a la fisión serán proporcionales a Z^2. Por otro lado, la "energía de ligazón" corresponde a ciertas fuerzas de atracción que son aproximadamente proporcionales al número de nucleones o número de masa A del átomo. Estas fuerzas de atracción se oponen naturalmente a la fisión y por tanto, la mayor o menor cantidad de energía que será necesario suministrar al átomo para favorecer su fisión será en cierto modo proporcional a la expresión $\frac{Z^2}{A}$ Estudios teóricos han permitido reconocer que para un valor de la expresión anterior superior a 45, la inestabilidad del núcleo es tan grande que sufre fisión natural o instantánea o sea que prácticamente no puede existir. Esta situación se alcanzaría con un número atómico Z = 120.

Para el plutonio esta expresión vale 37, para el uranio 235, 36. Estos elementos están bastante cerca del límite teórico de la fisión natural para que el bombardeo con partículas de no muy alto poder produzca una deformación suficiente capaz de romper el equilibrio en que se encuentran.

La verdad es de que muchos elementos con núcleos pesados pueden sufrir fisiones con tal de que las partículas utilizadas en su bombardeo tengan suficiente energía. Investigaciones con partículas aceleradas con alta energía tales como neutrones, protones, núcleos de agua pesada o partículas α han permitido la fisión, no sólo del uranio y del plutonio, sino también del bismuto, plomo y aún del tántalo con un número atómico Z de apenas 73. Para este último, sin embargo, se ha requerido el uso de partículas α de 400 Mev; en este caso la expresión $\frac{Z^2}{A}$ tiene un valor de sólo 29.

Se comprende por qué la fisión es un fenómeno limitado a los átomos pesados. Teóricamente sería también posible intentar la división de núcleos livianos, pero

---

* En un cálculo de Introduction to nuclear engineering (14) la energía liberada se distribuye como sigue:

Energía cinética de los fragmentos de la fisión	162 Mev
Energía cinética de los neutrones	5 Mev
Radiaciones γ producidas con la fisión	5 Mev
Radiactividad γ	6 Mev
Radiactividad β	5 Mev
Radiaciones γ de los neutrones	10 Mev
	193 Mev

la energía de los proyectiles necesarios sería tan considerable que posiblemente se obtendría la destrucción de los núcleos y no su fisión.

Desde el punto de vista de la utilización práctica de la fisión para la producción de energía, sólo tiene valor aquélla que es susceptible de producirse con neutrones lentos de bajo nivel de energía. Los neutrones lentos o neutrones termales —así llamados porque tienen un nivel de energía aproximadamente igual a la energía cinética * de los átomos con los cuales reaccionan— tienen energías del orden de fracciones de electronvolt; ello significa que su velocidad es pequeña y, por lo tanto, el tiempo que permanecen en la vecindad de un átomo es grande con lo cual aumenta la probabilidad de su interacción. Pero estos neutrones lentos no tienen la energía suficiente para producir la fisión de los núcleos a los cuales se incorporan, salvo en el caso de tres excepciones notables: el $_{92}U^{235}$, el $_{92}U^{233}$ y el $_{94}Pu^{239}$. En efecto, estos tres elementos, al incorporar a sus núcleos neutrones de energía cinética prácticamente cero forman un nuevo elemento en el cual se combinan números pares de protones con números pares de neutrones y esta combinación sabemos que tiene un mayor nivel de "energía de ligazón" que el núcleo original (con protones pares y neutrones impares). Este aumento de la energía de ligazón es superior al aumento de energía necesario para producir la fisión. Por el contrario, en el caso del $_{92}U^{238}$ la incorporación de un neutrón modifica la disposición par-par del núcleo por una par-impar. En consecuencia, la energía de ligazón que el neutrón agregado suma a la del núcleo original es muy inferior a la del caso anterior; en el hecho, es inferior a la necesaria para la fisión y por tanto el neutrón debe traer una energía cinética suficiente para suplir este déficit; el neutrón en este caso, debe ser rápido y su nivel de energía estará en el orden de un Mev.

Lo dicho para el $_{92}U^{238}$ se aplica a otros núcleos pesados similares que sólo pueden ser fisionados por partículas rápidas. Entre éstos los más notables son el torio $_{90}Th^{232}$, el Protactinio $_{91}Pa^{231}$, y el Neptunio $_{93}Np^{237}$. La probabilidad de la fisión por una partícula rápida naturalmente disminuye debido al hecho de que su alta velocidad reduce notablemente el tiempo de su proximidad al núcleo con el cual debe reaccionar **.

Como ya se ha dicho, el uso de la fisión nuclear para la producción de energía considera únicamente como materiales útiles los tres indicados más arriba.

---

c) En el fenómeno de la fisión descrito anteriormente la absorción de un neutrón produce la división del átomo pesado en dos elementos de menor masa. Sin embargo, fuera de los productos principales de la fisión algunos neutrones son absorbidos por los átomos presentes produciendo isótopos. Uno de los propósitos de las reacciones nucleares es precisamente la producción de isótopos estables o ra-

---

* La temperatura refleja el estado de agitación de los átomos o moléculas de un cuerpo químico cualquiera.

** En el hecho, las partículas tales como los neutrones tienen un largo de onda equivalente dado por la ecuación de Broglie. Para un neutrón de energía de varios Mev este largo de onda es del orden de 10^{-12} cms.; para uno con energía del orden de los electronvolts, es de 10^{-9} cms.; en otras palabras, en este último caso, el área barrida por la onda es considerablemente mayor.

diactivos de los elementos conocidos con miras a múltiples aplicaciones científicas, industriales u otras. Esta absorción de partículas —principalmente neutrones— es lo que se conoce como *captura.*

Algunas de estas reacciones de captura son de una trascendencia extraordinaria. Así, por ejemplo, el bombardeo de $_{92}U^{238}$ con neutrones lentos no produce fisión, pero se forma un isótopo del uranio 238, que sí puede experimentar fisión.

El proceso es el siguiente:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \text{radiaciones } \gamma$$

El $_{92}U^{239}$ es radiactivo con una "media vida" de sólo 23 minutos. Emite partículas β y se forma:

$$_{92}U^{239} \longrightarrow {}_{93}Np^{239} + \beta$$

El isótopo del Neptunio también es radiactivo con una media vida de 2,3 días $_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} + \beta$

El plutonio es un elementos radiactivo, pero el período de su reducción a la mitad es de 24.000 años y puede considerarse para los efectos prácticos como el producto final. Este elemento nuevo obtenido en esta reacción de captura es uno de los llamados transuránicos (por estar más allá del Uranio en la escala periódica) y tiene importancia porque es fisionable por neutrones lentos. Su decaimiento por radiactividad natural da uranio 235, isótopo del material original.

Otra reacción nuclear de captura es la del torio, también originada con neutrones lentos. El proceso se puede escribir como sigue:

$$_{90}Th^{232} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{90}Th^{233} + \gamma$$
$$_{90}Th^{233} \longrightarrow {}_{91}Pa^{233} + \beta \quad (23 \text{ min})$$
$$_{91}Pa^{233} \longrightarrow {}_{92}U^{233} + \beta \quad (27{,}4 \text{ días})$$

El uranio 233 es radiactivo con una media vida de 162.000 años y por emisión natural de partículas α decae en un isótopo del elemento original, a saber, el $_{90}Th^{229}$

También el uranio 233 fue señalado como uno de los materiales fisionables.

Pero el bombardeo de elementos con partículas aceleradas o lentas —sean neutrones, deuterones, partículas α u otras— para producir isótopos se realiza hoy día en toda escala. Los elementos cuyos isótopos se desea formar artificialmente o transmutar son sometidos a un intenso flujo de partículas —generalmente colocadas dentros de recipientes especiales de aluminio— durante períodos variables según sea el resultado que se persigue. Cuando el bombardeo no es con neutrones, el resultado puede ser un isótopo del elemento irradiado o un nuevo elemento transmutado. Por ejemplo, berilio bombardeado con partículas α da

$$_{4}Be^{9} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1}$$

El aluminio captura un átomo de hidrógeno y forma silicio:

$$_{13}Al^{27} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow {}_{14}Si^{28} + \gamma$$

La irradiación con neutrones lentos produce generalmente un isótopo del elemento irradiado con aumento del número de masa en una unidad y emisión de

radiación γ . Con neutrones rápidos puede provocarse la sustitución de un protón por un neutrón rápido produciéndose una disminución del número atómico del elemento final.

Como se comprende las variantes de estas reacciones de captura son muy numerosas y cada una de ellas cumple funciones definidas.

5. *REACTORES NUCLEARES*

" Por muy imperfecto y primitivo que nues-
" tro primer reactor nuclear parezca a las
" generaciones del futuro, podemos mirar
" confiados el porvenir, cuando la energía
" industrial del átomo constituya un factor
" principal de la economía mundial. Real-
" mente, no es demasiado decir que la ex-
" plotación de la energía nuclear será mira-
" da como el paso más importante dado por
" el hombre en el dominio de la naturaleza
" desde el descubrimiento del fuego".

WINSTON CHURCHILL
(Ante el Parlamento inglés en noviembre de 1953).

Los dos procesos nucleares descritos que hoy día tienen una significación industrial, se realizan en la práctica con el empleo de las llamadas pilas atómicas o, con mayor propiedad, *reactores nucleares*. Es cierto que la obtención de determinados isótopos puede hacerse por separación química o física o por medio de aceleradores de partículas tales como los ciclotrones, pero, la gran mayoría de los elementos producidos en escala industrial o para fines científicos se obtiene en los reactores nucleares.

Un reactor nuclear es esencialmente un sistema reaccionante en el cual la energía originada por la fisión es liberada en forma controlada. Los rectores nucleares tienen las siguientes aplicaciones *:

1) Propósitos de Investigación;
2) La producción de radioisótopos;
3) La obtención en gran escala de materiales fisionables;
4) La generación de energía eléctrica;

los principales constituyentes de un reactor nuclear son (21):

1) Combustible;
2) Moderador;
3) Reflector;
4) Refrigerante;
5) Materiales estructurales;
6) Controles;

---

* Parte de la información de este párrafo ha sido tomada de una Conferencia del ingeniero don Arturo Arias S., Profesor de Física de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile (20).

7) Protecciones.

Se comprende que para cumplir con las diversas finalidades de un reactor y dado el número de factores que influyen en su diseño, hasta la fecha se han construído muchos reactores de diversos tipos que se encuentran en plena experimentación. Para formarse un concepto de la gran variedad de proyectos basta revisar los trabajos de la Conferencia de Ginebra o la publicación conocida con el nombre de World Development of Atomic Energy (23).

Cuando el reactor está destinado a la investigación o a la producción de radioisótopos funciona principalmente como fuente de neutrones; cuando está destinado a la generación de energía se persigue una operación que produzca calor en las mejores condiciones posibles.

1. *Combustible.* En el párrafo anterior se estableció que los únicos átomos que pueden ser fisionados por neutrones lentos son el uranio 233, el uranio 235 y el plutonio 239. El primero existe en la naturaleza en cantidades despreciables, pero puede ser obtenido a partir del torio 232 que no es fisionable, pero que se transforma en el uranio 233 por captura de un neutrón lento. "El futuro del torio está en duda " pues hasta ahora no es técnicamente competitivo con el uranio. Por otro lado, " es más abundante en la corteza terrestre que el uranio y su importancia econó- " mica puede ser alterada sustancialmente con los progresos de la Tecnología o si " se encuentran nuevos depósitos de bajo costo" (24).

No hay reactores que trabajen actualmente con U^{233}. Sin embargo, en Estados Unidos se encuentra uno en construcción que usa sodio líquido como refrigerante y grafito como moderador, con una capacidad de 20.000 kW de calor capaz de generar 7.500 kW de electricidad. El reactor está diseñado para utilizar uranio ligeramente enriquecido en U^{235}, pero también está planeado para usar una aleación de torio y uranio 235 cuyos neutrones producirían el U^{233}. Este reactor estará listo en 1956 *.

El plutonio 239 no se encuentra en la naturaleza, pero puede ser obtenido a partir del uranio 238 por captura de un neutrón lento. En el hecho, en muchos de los reactores en actual servicio se obtiene plutonio que está siendo separado para su uso posterior como combustible. Tal vez los reactores más importantes en construcción para usar plutonio son sin embargo del tipo de neutrones rápidos; uno de ellos realizado en Estados Unidos por el Laboratorio de Argonne y otro por la Comisión Británica en Dounreay (Escocia) **.

Los elementos tales como el torio 232 y el uranio 238 son llamados "materiales fértiles", pues si bien no son fisionables pueden dar origen a núcleos que lo sean. Gracias a esta posibilidad, la extraordinaria escasez de uranio 235 —único elemento fisionable que se encuentra en el uranio natural en proporción de 0,7% mezclado con el isótopo 238— no tiene importancia fundamental para el futuro de estos procesos.

---

* Otro reactor diseñado para usar U^{233} y rodeado por una protección de torio donde los neutrones disponibles son capturados para regenerar el combustible está descrito en el Electrical Times de 1º de septiembre de 1955 (25).

** Los neutrones rápidos presentan la ventaja de hacer fisionable también el U^{238} y de regenerar una mayor cantidad de combustible que el consumido. La experiencia adquirida hasta ahora es sólo en reactores experimentales de muy pequeño tamaño. Ver principalmente Revista Electrical Times (22-25).

En la actualidad, la casi totalidad de los reactores en operación usan como combustible uranio, sea en su estado natural (1 parte de U^{235} por 140 partes de U^{238}) sea enriquecido en uranio 235 en distintas proporciones. El uranio se carga en el reactor en diversas formas, sea como barras metálicas, separadas por el moderador (tipo heterogéneo) sea en forma de sales disueltas en el moderador (tipo homogéneo).

Naturalmente, en todos estos casos, la reacción está basada en neutrones lentos (termales) y los únicos átomos que se fisionan expontáneamente son los del isótopo 235, pero éstos al fisionarse ponen en libertad, como promedio, 2,5 neutrones rápidos por núcleo fisionado. Esta multiplicación de los proyectiles sugirió la idea de que la fisión podía mantenerse o acelerarse en una *reacción en cadena* si uno o más de los neutrones secundarios tuviera oportunidad de provocar una nueva fisión y así sucesivamente.

2. *Moderador.* Los neutrones producidos en la fisión son rápidos, pero no lo suficiente para producir una fisión importante del U^{238}. En consecuencia, dada la enorme mayor probabilidad de captura de los neutrones lentos, es preferible frenar los neutrones producidos en la fisión hasta reducirlos al nivel termal. Esto se consigue agregando un moderador; un buen moderador debe reducir la energía de los neutrones en un número pequeño de colisiones y además debe absorber pocos neutrones puesto que ellos son necesarios para el proceso. Con el objeto de que la energía se reduzca en el mínimo de choques es preciso que la masa del átomo del moderador sea comparable a la del neutrón de modo que en el choque elástico de ambas partículas la transferencia de energía sea máxima (por ejemplo, para frenar hasta el nivel termal un neutrón de 1 Mev se necesitan 18 choques en el hidrógeno y 150 en el oxígeno). La frecuencia de los choques depende del estado físico del moderador; preferible es por tanto un moderador líquido o sólido, pues sus átomos están entonces a menor distancia. Por último debe tener un bajo poder de absorción. Buenos moderadores son el berilio y algunos de sus compuestos, el agua liviana y pesada *.

Otro moderador frecuentemente usado es el grafito que presenta la ventaja de existir en estado sólido y en relativa abundancia en oposición al berilio que, pese a sus espléndidas condiciones, es limitado en su uso por la relativa escasez y el costo elevado.

Combustible fisionable y moderador deben estar convenientemente distribuídos para dar máxima oportunidad a los neutrones que escapan de la fisión de chocar con los átomos del moderador y reducir así su energía. Las varillas de uranio están dispuestas generalmente en una rejilla de elementos paralelos entre los cuales está el moderador; en el caso de los reactores homogéneos, la unión del combustible y del moderador es aún más íntima.

3. *Reflector.*—El conjunto de combustible y moderador constituye la parte activa del reactor; los neutrones que escapan de esta zona están perdidos para los efectos de una nueva fisión; si la parte activa es demasiado reducida, su relación volumen a superficie exterior es desfavorable dejando una probabilidad grande de

---

* Ver detalles sobre moderadores en Revista Nucleonics (26).

escape; ésta es de una de las razones por las cuales para el transporte del combustible atómico sólo se le envasa en cilindros delgados de aluminio que dan una gran superficie de escape para disminuir así los riesgos de la iniciación de un proceso espontáneo de fisión en cadena *.

La parte activa debe estar rodeada de un reflector que devuelva los neutrones que tratan de escapar hacia el centro activo. Las cualidades de un buen reflector son las mismas de un buen moderador: baja absorción y rechazo elástico de los neutrones; no obstante, las exigencias para el material reflector pueden ser menores que para el moderador. A veces el reflector consiste simplemente en un aumento del volumen ocupado por el moderador en torno al combustible.

En el caso de reactores de neutrones rápidos que por tanto no tienen moderador, se coloca un reflector de material apropiado; a veces, en este último tipo de reactores, se emplea en lugar de reflector un material absorbedor, utilizando para este caso "material fértil", torio o uranio 238, que captura los neutrones produciéndo núcleos fisionables.

4. *Refrigerante.*—En un reactor nuclear cualquiera es necesario eliminar el calor producido en la fisión para evitar destrucciones del material estructural y proteger la integridad del combustible. Naturalmente, si el reactor está destinado a producir energía, debe procurarse extraer el calor con la mayor eficiencia posible.

El refrigerante puede ser el moderador que se recircula por un sistema intercambiador de calor o puede ser un refrigerante propiamente tal, que extrae el calor desde el interior del reactor y permite el uso directo de éste o por intermedio de un sistema intercambiador.

En los diseños actuales entran en consideración como refrigerantes el agua natural o pesada, los metales líquidos tales como el mercurio, el sodio y otros, o gases como el aire natural, el anhídrido carbónico y el helio. Cuando los refrigerantes son al mismo tiempo moderadores, sus propiedades nucleares son fundamentales; ellas deben combinarse con sus propiedades térmicas e hidrodinámicas con el objeto de obtener una buena transferencia del calor y una relativa fácil recirculación del refrigerante. El calor específico del refrigerante es uno de los factores que hace al agua particularmente atractiva (27).

Por otro lado, los refrigerantes, al tener que circular en el interior de la parte activa del reactor y en la parte estructural a alta temperatura, están sometidos al riesgo de absorber neutrones. Si con ello la sustancia que forma el refrigerante produce isótopos radiactivos con emisión de radiaciones γ , es necesario una protección especial del sistema de refrigeración en su parte fuera del reactor, sobre todo si la media vida de estos radioisótopos es larga.

Todos estos factores han conducido a la realización experimental de los más diversos sistemas de refrigeración, ya que ello constituye un factor básico de la eficiencia del diseño, en especial en los reactores para generar energía. En este último caso, desde el punto de vista estrictamente térmico, no puede esperarse, por el momento, la misma eficiencia de una planta térmica convencional, ya que la temperatura y presión del vapor serán más bajas "porque el refrigerante del reactor

* La falta de moderador tampoco permite la obtención de neutrones lentos con lo cual la probabilidad de captura también disminuye.

" debe estar más caliente que el vapor y el interior del reactor más caliente que el " refrigerante, pero las propiedades de los materiales disponibles no permiten hacer " funcionar el reactor a temperaturas tan elevadas como se quisiera" (28).

5. *Materiales estructurales.*—Los materiales estructurales dentro de la parte activa del reactor son necesarios para las cañerías por las cuales circulará el refrigerante, como revestimiento para proteger el material fisionable de la corrosión y en varios otros casos de menor significación. "Adicionalmente a las exigencias ordinarias, todo material estructural colocado en el reactor debe tener una baja capa- " cidad de absorción y no debe desintegrarse bajo los fuertes flujos de neutrones y " radiaciones gama presentes. Desde el punto de vista de la física nuclear, hay 8 " elementos que tienen un poder de absorción suficientemente bajo: plomo, bismuto, " berilio, aluminio, magnesio, zinc, estaño y zirconio. De estos elementos, el más " importante, con mucho, es el aluminio que es barato, disponible en cualquier " momento y suficientemente resistente a la corrosión" (14).

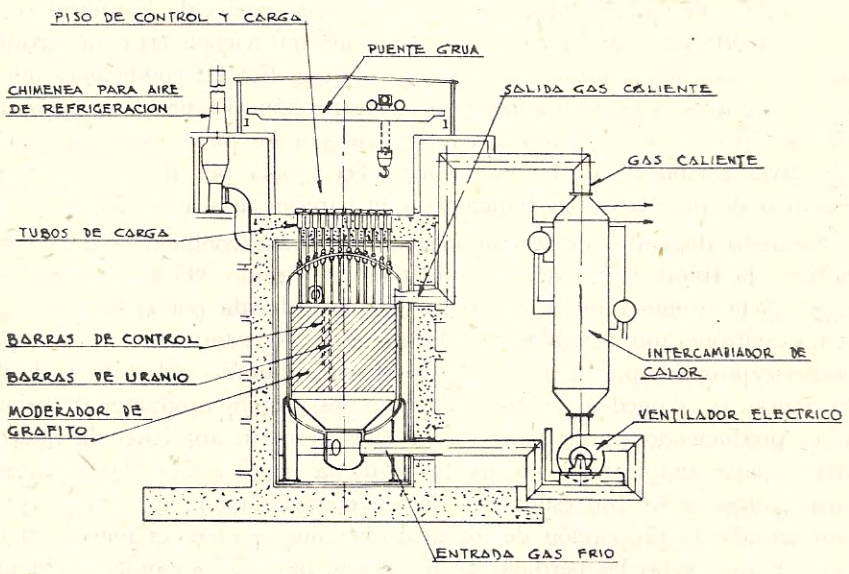
6. *Controles.*—Un reactor, para continuar en funcionamiento una vez iniciada la fisión, necesita disponer de nuevos neutrones lentos producidos por el átomo fisionado para que éstos a su vez fisionen otros átomos. Este proceso, que da origen a lo que anteriormente se designó por *reacción en cadena,* es indispensable para conservar la reacción en marcha, pero resulta evidente que el flujo de neutrones debe poderse mantener bajo control.

Con este objeto se introducen en la parte activa barras de un material con alto poder de absorción tal como el boro y el cadmio, preferiblemente el primero pues el segundo, al capturar los neutrones, adquiere una radiactividad γ de alto poder de penetración. La posición de las barras dentro del reactor, controlada desde el exterior, permite producir una absorción más o menos intensa de los neutrones en exceso y mantener la reacción en el nivel deseado. Si se quiere detener el reactor, basta con introducir las barras de control totalmente con lo cual la cantidad de neutrones disponibles se hace bajar a un nivel tal que no es suficiente para mantener el proceso.

7. *Protecciones.*—Es éste un capítulo particularmente importante del desarrollo de los reactores; se sabe que los productos de la fisión son radiactivos con emisión de intensa radiación λ ; el moderador, los refrigerantes, los materiales estructurales, las barras de control y todos los elementos que de uno u otro modo están sometidos al flujo de neutrones o de otros productos radiactivos pueden, a su vez, adquirir un nivel de radiactividad peligroso. Los elementos que se introducen especialmente al reactor para ser irradiados y producir así radioisótopos, los "materiales fértiles" y los productos obtenidos de ellos que deben ser retirados del reactor procesados para su uso posterior, todos ellos emiten radiaciones peligrosas de las cuales es necesario protegerse. Para el reactor mismo, el elemento de protección más adecuado es el concreto, por su costo y por sus buenas cualidades absorbentes de neutrones, de radiaciones y de calor. En la práctica de manipulación con los productos y sub-productos de la radiactividad se han desarrollado múltiples dispositivos de operación mecánica, instrumental de medida y alarma, protección física directa de los operadores y disposiciones reglamentarias acuciosas. Estas regla-

mentaciones exceden hoy día el límite de la industria y corresponden a un verdadero código de seguridad colectiva cuyas disposiciones y aplicación práctica están en constante perfeccionamiento y ampliación.

En la figura 2 se ha esquematizado el plano de un reactor que usa grafito como moderador. Este constituye una albañilería de ladrillos de grafito de formas extremadamente precisas que dejan un gran número de conductos verticales. En estos conductos se coloca el combustible (uranio natural con 140 parte de U^{238} y 1 parte de U^{235}); el uranio en forma de barras está sellado en vainas de aluminio. Los neutrones emitidos por la fisión inicial del U^{235} circulan en la masa de grafito donde son reducidos al nivel termal y producen la fisión del uranio de otra cualquiera de las barras. El calor producido es extraído por anhidrido carbónico; para que la cantidad de calor extraído y la temperatura sean aceptables, es preciso introducir el anhidrido carbónico a presión impulsado por ventiladores.



En consecuencia, el total de la albañilería de grafito está colocada en un cilindro de acero capaz de resistir la presión. Las barras de control que se operan desde la parte superior del reactor están hechas de tubos de acero inoxidable recubiertos de boro. El cilindro de acero está rodeado por una gruesa capa de concreto que constituye la protección general contra la radiactividad del sistema.

El anhídrido carbónico es recirculado por un intercambiador de calor —que

a su vez es refrigerado con agua y produce vapor aprovechado posteriormente en circuitos de calor o para producir energía en una turbina. En líneas generales, el reactor descrito corresponde al diseño adoptado para la instalación inglesa de Caldel Hall (22). Para formarse una idea de las dimensiones generales de una instalación de esta naturaleza, en el caso de Calder Hall la masa de albañilería de grafito pesa 1.000 toneladas y las dimensiones del cilindro metálico que la encierra son de 12,2 m. de diámetro por 18,3 m. de altura y planchas de 2" de espesor. El peso de gas carbónico que se recircula es de 20 tons.; los intercambiadores de calor son 4 columnas de 5,4 m. de diámetro y 21,5 m. de altura, de planchas de 1 5/16". Los 4 ventiladores que inyectan el gas carbónico son de 2.000 HP. cada uno. El reactor está combinado con un grupo turbo-generador de 23.000 kW. Calder Hall no está diseñado primariamente como una central de energía eléctrica y en consecuencia no es representativa en este sentido de la más alta eficiencia obtenible hoy día. Sin embargo, como ya se ha dicho, las variantes posibles son múltiples y los diseños futuros pueden ser radicalmente diferentes de los actuales.

El diseño de un reactor nuclear es una rama nueva de la Ingeniería. Exige toda una teoría de extrema complejidad en que intervienen las características nucleares de todos los elementos reaccionantes y que fija las condiciones que deben cumplir los materiales utilizados en la construcción. El problema práctico está siendo abordado con extraordinaria intensidad por los países que van a la cabeza de la investigación básica en esta nueva Tecnología por medio de un proceso sistemático de prueba de las soluciones que parecen más apropiadas.

Supuesto diseñado un reactor con determinadas condiciones de combustible e iniciada la fisión, la división de un átomo de uranio 235 produce, en término medio, 2,5 neutrones rápidos cuya velocidad es reducida por el moderador. Parte de estos neutrones son absorbidos por los materiales que forman el reactor, parte de ellos son capturados por el uranio 238 y forman plutonio con emisión de diversas radiaciones, parte pueden ser absorbidos por los propios productos de fisiones anteriores produciendo transmutaciones de ellos pero sin aparición de nuevos neutrones y parte simplemente escapa fuera de la parte activa; los neutrones que escapan como ya se dijo están en relación con el tamaño del reactor ya que a mayor tamaño la proporción de los neutrones que escapan es menor. Si después de descontadas todas las pérdidas de neutrones, hay uno disponible para producir una nueva fisión de U^{235}, se dice que el reactor tiene *su tamaño crítico;* si el tamaño es menor que el crítico, es decir, si las pérdidas por absorción y por escape dejan menos de un neutrón en promedio disponible para fisionar nuevos átomos, la reacción se detiene.

Si por el contrario el número de neutrones que quedan disponibles para continuar la reacción es superior a uno, el tamaño es supercrítico y la reacción es explosiva; así, por ejemplo, si de los 2,5 neutrones producidos en una fisión se perdiera sólo medio y quedaran disponibles para ser capturados nuevamente por átomos fisionables 2 neutrones, al cabo de n fisiones habría 2^n fisiones simultáneas; antes de la centésima generación, el número de las fisiones simultáneas sería igual

al número de átomos de un kilo de uranio 235 cuya energía de fisión es superior a la de 4.500 toneladas de TNT. Obsérvese que de acuerdo con las mejores estimaciones, el tiempo, de una generación es de 10^{-8} segs.; es decir, 100 generaciones se producen en una millonésima de segundo, o sea, en realidad se trata de una explosión.

Como un ejemplo, se indica a continuación el balance típico de un reactor moderado con grafito (28).

Neutrones que mantienen la reacción en cadena	1
Neutrones absorbidos en U^{238} para dar plutonio	0,9
Neutrones absorbidos en U^{235} para dar U^{236} no fisionable (perdidos) . .	0,2
Neutrones absorbidos en el moderador (perdidos)	0,3
Neutrones absorbidos en la estructura (perdidos)	0,05
Neutrones que escapan (perdidos)	0,09
Neutrones empleados en el sistema de control (perdidos para mantener el tamaño crítico)	0,02
	2,56

El tamaño crítico de un reactor queda caracterizado por el hecho de que el número de neutrones libres presentes en una generación es igual al de la generación anterior. Esta relación, que puede expresarse también como el cuociente entre el número de neutrones adicionales producidos en una fisión dividido por el número de neutrones perdidos por distintos conceptos, recibe el nombre de *factor de multiplicación.* *

Supongamos que n es el número de neutrones rápidos producidos en la fisión de U^{235} con neutrones termales (lentos). Algunos neutrones rápidos van a fisionar U^{238} ó U^{235}. Se define el factor ε como el cuociente entre el número total de neutrones rápidos producidos por cualquier tipo de fisión (neutrones rápidos, termales o de cualquier nivel intermedio de energía) y el número de neutrones rápidos producidos por fisión con neutrones termales. Este cuociente es por definición ligeramente superior a uno; en un reactor de Uranio-Grafito $\varepsilon = 1{,}029$.

El número $n\,\varepsilon$ de neutrones rápidos presentes es reducido al nivel termal en corto tiempo por choque con los átomos del moderador; algunos de estos neutrones pueden ser capturados por U^{238} siendo p el porcentaje que no es capturado. Por tanto, alcanzan el nivel termal $n\,\varepsilon\,p$ neutrones. De éstos, una parte es absorbida por el moderador, el refrigerante, los elementos estructurales o los productos de las fisiones anteriores; la parte que queda disponible para fisionar uranio 235 es f. Si suponemos que cada fisión de U^{235} produce η neutrones rápidos, al final de este proceso de generación habrá

$$n\,\varepsilon\,p\,f\,\eta \quad \text{neutrones}$$

Si n era el número de neutrones rápidos de la generación anterior el "factor de multiplicación" será:

$$k = \varepsilon\,p\,f\,\eta$$

* Algunos autores lo designan como "factor de reproducción".

(En lo anterior se ha supuesto que las pérdidas por escape son nulas; en otras palabras el tamaño del reactor es considerable dando una muy buena relación Volumen: Superficie exterior; para dimensiones conocidas, se puede calcular el factor de corrección).

Si $k = 1$, el tamaño del reactor es crítico; será supercrítico con $k > 1$ y subcrítico con $k < 1$. En el hecho, η y ε son propiedades del combustible que no se pueden controlar; una vez elegido éste, los factores que condicionan el resultado son p y f. Estos coeficientes dependen de las formas del reactor, de los materiales empleados y de la relación combustible-moderador.

Aquí surge una pregunta de gran importancia; si $k > 1$ el reactor supercrítico en un número relativamente corto de generaciones y en todo caso en plazos de tiempo que se miden en fracciones de segundos debería conducir a una reacción explosiva y es difícil imaginarse dispositivos tan seguros de control que pudieren actuar en 1: 100.000 de segundo o menos tiempo que como ya se vio equivale a 1.000 generaciones y que por lo tanto, aun cuando el reactor sea muy ligeramente supercrítico conducirá fatalmente a un accidente. La fracción de segundo indicada equivale a 1: 2.000 de ciclo, y las personas que se encuentran familiarizadas con la operación de los dispositivos mecánico-eléctricos más perfectos saben que ésta es una condición imposible de alcanzar hoy día. La respuesta a esta delicada cuestión se encuentra en el hecho de que un cierto número de neutrones productos de la fisión no se presentan instantáneamente, fenómeno que fue señalado al referir anteriormente que no toda la energía de una fisión aparecía en el primer momento. Estos neutrones "atrasados" representan aproximadamente un 1% del total de los neutrones rápidos producidos en la fisión y corresponden a fenómenos de radiactividad de algunos productos intermedios de muy corta "vida media"; algunos de ellos llegan a tiempos del orden de un minuto.

Los estudios realizados sobre los neutrones "atrasados" revelan que por lo menos 1% de ellos aparecen 0.01 segundos después y por lo menos un 0.07% se atrasan hasta alrededor de un minuto (53). Fácil es comprender por cierto que si el factor de multiplicación es $k = 1.01$, los neutrones "atrasados" que naturalmente han intervenido en el cálculo de k permiten un tiempo suficiente para que los mecanismos de control operen.

6. *ISOTOPOS Y RADIOISOTOPOS*

> "3. Como un aspecto subsidiario, desarro-
> " llar nuevas sustancias que son frecuente-
> " mente isótopos radiactivos de las sustancias
> " naturales; desarrollar usos especiales de
> " estas sustancias en ciencia, medicina, in-
> " dustria y agricultura y suministrar estas
> " sustancias a los usuarios."
>
> SIR PIERSON DIXON
>
> (Delegado británico ante las N. U. puntualizando los tres puntos del programa inglés de Energía Atómica, noviembre de 1954).

Cuando se habla de los usos pacíficos de la energía nuclear, la gran mayoría de las gentes piensa en el empleo del átomo como sustituto de las formas clá-

sicas de producción de energía a saber, combustible o hidroelectricidad. Es cierto que hoy este empleo parece el de más inmediata utilización, pero el uso de lo que se ha calificado como sub-productos de la reacción nuclear, es decir, los productos de la fisión y los elementos transmutados por irradiación dentro de un reactor —encuentran un tan vasto y profundo campo de aplicación que nadie puede asegurar si efectivamente su uso no constituirá en un futuro más lejano, el verdadero aporte del átomo al progreso de la Humanidad.

Alguien ha predicho que cuando se revise a la luz de la historia las realizaciones de la energía atómica, se concluirá que su mayor contribución resultará de la variedad de los isótopos, radiactivos e inactivos, que han sido puestos a disposición para usos experimentales.

Baste señalar que los biólogos, gracias al empleo de radioisótopos ya han logrado determinar 6 de los 10 complejos procesos químicos y físicos de la fotosíntesis y no hay duda de que el fenómeno completo podrá ser descubierto en algunos años más permitiendo así la producción artificial de hidratos de carbono; por este camino también podría llegar a ser posible el aprovechamiento de la energía solar en forma tal, que las fuentes actuales de energía, incluso la energía nuclear, podrían perder la importancia fundamental que hoy tienen.

Desde luego los radioisótopos han permitido determinar los procesos de síntesis de las proteínas. "Nadie puede saber hasta dónde nos conducirán las inves- " tigaciones sobre las células vivas, pero podemos estar seguros de que las reservas " de alimentos del mundo se harán cada vez más abundantes y más ricas y que " ellas permitirán vivir a una población mundial siempre creciente sin depender " de la extensión de tierras cultivables y de su fertilidad" (29).

Los isótopos, radiactivos o no, constituyen un espléndido método de investigación científica, ya que por sus propiedades intervienen en los procesos químicos, fisiológicos y biológicos en igual forma que los elementos que se encuentran en la naturaleza, que son mezclas de diferentes isótopos, en general, con gran predominio de uno de ellos. Si artificialmente se incorpora al elemento con en su estado natural una mayor cantidad de un isótopo determinado —radiacaivo o no— este isótopo incorporado irá dejando su traza a lo largo de todo el proceso que se pretende investigar. Bastará determinar la cantidad del isótopo presente en cada etapa del proceso —por un análisis espectrográfico o de radiactividad según sea el caso— para conocer el comportamiento del elemento. Un ejemplo sencillo aclarará la idea: supóngase que se desea investigar el comportamiento de un fertilizante fosfatado en un determinado suelo; se le agrega al fertilizante una proporción conocida del componente fosfatado rediactivado y enseguida, en el curso de la investigación, se examina periódicamente la proporción de fósforo radiactivo en la planta; si esta proporción es la misma del fertilizante, se puede asegurar que la planta ha tomado todo su fósforo del abono agregado al suelo, pero si es menor, será tanto menor mientras mayor sea la cantidad de fósforo que la planta toma del suelo que no contiene el isótopo radiactivo.

El uso de los trazadores en la investigación científica es uno de los mayores aportes realizados por la energía atómica, pues si bien la existencia de los isótopos y la separación de algunos de ellos es muy anterior al descubrimiento de la fisión

nuclear, sólo ahora, gracias a este proceso, ha sido posible disponer de variedades y cantidades suficientes para todas las investigaciones que se desea realizar.

Hay una preferencia marcada por el uso de radioisótopos dado el hecho de que son extremadamente fáciles de detectar. Sólo cuando la radiactividad no es tolerable dentro del proceso investigado o cuando la media vida del radioisótopo es demasiado corta para la duración del estudio, se prefiere los isótopos estables.

El empleo de trazadores en los procesos fisiológicos y biológicos sigue el mismo principio ya expresado. La activación de uno de los elementos de un compuesto suministrado a un organismo vivo permite reconocer su asimilación y localización creando las condiciones ideales para determinar el valor del compuesto.

El uso de radioisótopos en ciertas técnicas de laboratorio físico o químico también ha significado una simplificación extraordinariamente útil; actualmente es posible, por ejemplo, realizar análisis complejos de Química Orgánica por el simple conocimiento de la forma cómo se absorben determinadas radiaciones en lugar de realizar extensas determinaciones cuantitativas que duran largas horas.

Naturalmente los usos industriales de los isótopos radiactivos son un campo de alto valor económico. En una reciente publicación de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos se da una lista de más de 45 aplicaciones industriales prácticas.

Hasta ahora, se ha logrado modificar las sustancias ejerciendo sobre ellas temperaturas y presiones, lo que ha dado origen a la mayoría de nuestros materiales modernos. Ahora es posible un tercer método, a saber, la radiación, que está disponible para hacer nuevos productos. Se pueden fabricar textiles sintéticos enteramente nuevos y productos químicos.

No es de ningún modo inconcebible que el conocimiento de la estructura nuclear permita la fabricación de átomos con propiedades perfectamente preestablecidas.

Las aplicaciones de los isótopos ya en uso son tantas y tan variadas que tomaría horas el hacer una enumeración de ellas. Por ejemplo, los radioisótopos pueden usarse en instrumentos de medida y control para indicar niveles, medir espesores de láminas metálicas, penetración de colorantes en la industria textil, espesor y uniformidad de recubrimientos metálicos, ubicación de fugas en las cañerías, velocidad de desgaste de piezas o productos sometidos a uso, control de soldaduras y fundiciones, medida de humedad, etc.

Algunos casos de empleos mayores están bajo investigación o principio de aplicación. Así, la conocida compañía Swift ha gastado considerables sumas de dinero en el estudio de la conservación y esterilización de alimentos. Se ha demostrado que la carne y la leche sometidas a radiactividad pueden conservarse más de tres semanas a temperaturas hasta de 24° C sin echarse a perder. Papas sometidas a radiactividad han sido conservadas por más de dos años sin brotar ni podrirse; este proceso de "pasteurización" no está aún a punto pero ofrece perspectivas interesantísimas para nuestro país.

El mismo principio de conservación de la industria alimenticia ya es aplicado en la esterilización médica del instrumental y también para los bancos de hueso;

esto último ha comenzado a ser empleado con éxito en injertos humanos. También tejidos más delicados como piel, vasos sanguíneos y otros comienzan a ser conservados después de un tratamiento radiactivo.

En la industria química los nuevos elementos deberán dar origen a insospechadas aplicaciones. Productos plásticos que se ablandaban en agua hirviente, irradiados durante dos segundos resisten temperaturas considerablemente superiores, sin sufrir alteración.

Radioisótopos que emiten radiaciones β son empleados con gran éxito para eliminar cargas estáticas en ciertos procesos textiles o en la industria papelera. Se citan ejemplos en los cuales se han obtenido aumentos de producción de 20% a 50% por las mayores velocidades obtenidas gracias a esta eliminación. Además, los peligros de incendio disminuyen considerablemente.

El uso de radioisótopos en las industrias metalúrgicas está sólo comenzando. Procesos de desulfuración y desfosforación son investigados con su ayuda. Del mismo modo composición de escorias, desgastes de revestimientos o control del grueso de las planchas laminadas son algunas de las variadas aplicaciones en este importante grupo de industrias.

Si se cubre la superficie de rodadura de los neumáticos con una pintura plástica radiactiva y se mide enseguida la radiactividad de la goma que queda adherida al suelo se puede determinar de inmediato el desgaste que experimentan los neumáticos a diversas velocidades y durante los frenajes y aceleraciones. Estas determinaciones que con anterioridad requerían el recorrido de miles de kilómetros o eran imposibles de realizar se hacen ahora con extrema precisión y rapidez.

El uso de radioisótopos en el control de espesores de los productos de diversas industrias ha aumentado enormemente la uniformidad. En las máquinas papeleras Fourdrinier las tolerancias han bajado de 12% a 3%, en los laminadores de planchas en frío de 10% a 1,5%, en prensas o laminadores de diversos productos de caucho las tolerancias bajan del 10% al 3,2% ó 6,5% a 3,5% según sean los casos.

El empleo de productos radiactivos en el diagnóstico y la terapéutica médica son aplicaciones conocidas con anterioridad, pero hoy día se usan ampliadas y multiplicadas por la diversidad de los radioisótopos disponibles y por su considerable menor costo.

La producción de isótopos y radioisótopos es una técnica relativamente difícil. No basta simplemente someter el elemento cuyo isótopo se desea producir al flujo de partículas apropiado —generalmente los neutrones de un reactor.

Es necesario, además, someter el producto obtenido a separaciones y concentraciones que lo hagan apto para sus aplicaciones finales, procesos que requieren a veces instalaciones de bastante complejidad.

En otras palabras, hoy día la producción de isótopos para la investigación y los usos prácticos es una industria de importancia en determinados países que se han constituído en proveedores en gran escala. Por ejemplo, Gran Bretaña es una de las principales naciones productoras y exportadoras de radioisótopos. En

1947, la producción total de isótopos de ese país fue de 135 unidades y en 1954 alcanzó a 19.531. Cerca del 40% de estos productos fueron exportados. El valor de estos radioisótopos fue superior a US$ 1.000.000 (30).

Canadá es uno de los mayores productores de radioisótopos en su establecimiento de Chalk River Project. Más o menos 20% de su producción es exportada. El principal centro de producción de isótopos en Estados Unidos es el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Su producción está a un nivel del orden de 1.000 envíos mensuales. En materia de investigación agrícola, biológica, terapéutica o de diagnóstico, el consumidor norteamericano dispone de radioisótopos a precios reducidísimos, siempre que las investigaciones se hagan públicas o por lo menos se den a conocer a la Comisión de Energía Atómica.

La distribución de radioisótopos desde los centros de producción está sometida a una rigurosa reglamentación para reducir a un mínimo los riesgos inherentes a la emisión de radiaciones.

Oportunamente se ha hecho referencia a la necesidad de operar con los radioisótopos bajo disposiciones de seguridad que eliminen los riesgos de los investigadores o de los encargados de sus empleos prácticos.

7. *NECESIDADES Y RECURSOS DE ENERGIA*

"Nuestra civilización está basada sobre la
" energía. Que se trate de los países indus-
" triales como el nuestro o de los enormes
" territorios de ultramar sub-desarrollados,
" mejores condiciones de vida sólo pueden
" ser creadas por una utilización creciente
" de energía. La importancia del crecimiento
" exigido es tan considerable que sometería
" las fuentes de energía existentes a una
" contribución excesiva. Cualesquiera que
" sean las incertidumbres inmediatas, la
" energía nuclear será capaz, en el momento
" requerido, de producir energía en forma
" económica. Aun más, ella significa una
" fuente potencial de energía mayor que to-
" das las que existen en este momento. La
" llegada de la energía nuclear significa por
" tanto el comienzo de una nueva era."

Libro Blanco Británico (febrero 1955).

El epígrafe señala hasta qué punto nuestras actividades están regidas por una economía de la energía, sin que posiblemente nosotros mismos nos demos cuenta de ello. En un trabajo realizado hace algún tiempo atrás decía:

"El uso de la Energía Exterior y la transformación que ella ha producido
" en la vida del ser humano es un hecho de ayer y, sin embargo, nos parece tan
" "natural" que apenas nos detenemos hoy día a pensar en él. Y por tanto, hace
" sólo ciento cincuenta años el consumo mundial de carbón era menos del 1%
" del consumo actual, el uso del petróleo era nulo, la energía hidráulica movía
" unos cuantos molinos y batanes, el viento impulsaba los barcos y producía unas

" pocas centenas de miles de caballos de fuerza en molinos que hacían la riqueza " de ciertos países, particularmente favorecidos por una adecuada regularidad del " régimen eólico, y la leña era la base de la calefacción y de la preparación " de alimentos. Es decir, hace 150 años, el hombre dependía casi exclusivamente " para hacer trabajo de su propia energía y de la de los animales domésticos que " había aprendido a utilizar 10.000 años antes. Pero, en este último siglo y medio, " que comparado con los 300.000 años de vida de nuestros antepasados del gé- " nero homo equivalen a la última semana de vida de un hombre de 40 años " de edad, el consumo de energía inanimada ha aumentado en cerca de 30 veces " creando toda suerte de aparatos capaces de efectuar trabajo y de substituir el " esfuerzo animal o humano, de concentrar una fuerza en un punto en condi- " ciones imposibles de realizar anteriormente o de desplazar y transportar cargas " a velocidades inimaginables para el uso de la energía animal. Esta transfor- " mación, que ha puesto a disposición de cada persona activa el equivalente de " energía de 66 hombres, es un verdadero milagro que explica y justifica el cam- " bio extraordinario experimentado por las condiciones de vida" (31).

Fácil es imaginar lo que sucedería si el hombre no encontrara respuesta adecuada a sus futuras necesidades de energía que aumentan con un ritmo creciente que no presenta ningún signo de saturación ¿cuáles serán estas necesidades de energía en el año 2.000, es decir en una época en que los niños de hoy serán los dirigentes? Según mis propios estudios, las necesidades mundiales serán para esa fecha cuatro veces superiores a las de 1950, es decir, del orden de unos 14 mil millones de toneladas de carbón equivalente *. El famoso informe Paley (32) siguiendo caminos totalmente diferentes llega al mismo factor multiplicador de cuatro veces; en un estudio de las Naciones Unidas que considera que en el próximo medio siglo los países de Oriente deben progresar considerablemente, la cifra se eleva a siete veces. Por último, si la demanda de energía simplemente creciera paralela a la población, necesitaríamos el doble de lo actual.

Si se acepta como prudente un consumo de energía para el año 2.000 de 14 mil millones de toneladas de carbón equivalente ¿estará efectivamente el mundo en condiciones de producir esta cantidad? Si sólo se dispusiera de las actuales fuentes de energía, la respuesta sería negativa. En efecto, con referencia al mismo estudio ya citado (31) podría decirse que la producción mundial de carbón se mantiene desde hace cerca de 10 años, en un valor medio que no sobrepasa los 1.600 millones de toneladas (equivalente total en carbón de 7.800 calorías), o sea, parece haberse acercado a su "plafond" para los niveles de precio relativos existentes hoy día, si bien continuará subiendo sobre todo por las nuevas aplicaciones químicas. Por otro lado, se estima que el límite de producción anual de petróleo, no alcanzado por cierto todavía, es de más o menos 1.000 millones

---

* 1 kg. carbón = 0,7 kgs.; petróleo = 2,4 lt. madera; = 1 kWh hidráulico.
Se ha hecho costumbre usar una nueva unidad de energía, el Q = 10^{18} Btu.
Aceptando 4 Btu. = 1 cal. y si 1 ton. carbón tiene 7,8 x 10^6 cal. resulta Q = 3,2 x 10^{10} tons. carbón.
En otras palabras, el consumo mundial del año 2000 será de 0,44 Q.

de toneladas de este combustible, * o sea, grosso modo, un valor anual equivalente al de la producción de carbón. En cuanto al gas natural y la leña, que sumados representan actualmente alrededor de 600 millones de toneladas de carbón equivalente, difícilmente sobrepasarán en el futuro los 1.000 millones debido a la tendencia de la leña a perder importancia como combustible. En otras palabras, de los 14 mil millones de toneladas de carbón equivalente que estimo como consumo probable de energía para el año 2.000, sólo unos 5 ó 6 mil millones de toneladas provendrán de los actuales combustibles clásicos, es decir carbón, petróleo, gas natural y leña, con una cierta tendencia hacia el futuro, a medida que los precios relativos se modifican, de una recuperación del carbón en cuanto a su contribución en el conjunto. ¿Y el saldo? Si se piensa que según las mejores estimaciones actuales las posibilidades de generación hidroeléctrica no sobrepasan unos 6 billones de kWh. y que por razones de orden práctico, no todas las caídas estarán equipadas el año 2.000, se comprende que para satisfacer las necesidades de energía de comienzos del siglo XXI no debe contarse con más de unos 4 billones de kWh. de origen hidráulico.

Por tanto, no más de 2/3 de las necesidades mundiales de energía pueden lógicamente ser satisfechas con los cuatro recursos básicos actuales, a saber carbón, petróleo (y gas natural), leña y energía hidráulica. El saldo debe venir de nuevas fuentes; entre éstas están el viento, la energía del mar, el calor de la tierra y sobre todo, la energía solar y la energía nuclear **. De las cinco nuevas fuentes mencionadas, las únicas que aparentemente pueden significar una respuesta al interrogante planteado por el crecimiento exponencial de la demanda de energía son las dos últimas.

La energía del sol que llega a la superficie terrestre después de atravesar nuestra atmósfera es una cantidad fabulosa. En un año, su valor, expresado en el equivalente en carbón, se escribe con una cifra de 14 ceros, es decir, significa unas 10 mil veces más que el consumo mundial de energía en el año 2.000.

Una parte importante de esta energía produce los fenómenos climáticos generales: evaporación, lluvias, vientos, etc. En estos procesos se consume un 40%. Pero el inmenso resto es muy mal aprovechado; por ejemplo, la fotosíntesis vegetal, que es un proceso importantísimo, ya que gran parte de las tierras se destinan a bosques, cultivos y praderas, no permite recuperar más de 1/1.000 de la energía solar recibida por el terreno cubierto de vegetación.

Para el aprovechamiento práctico de la energía del sol se siguen hoy día múltiples caminos tales como:

1º Utilización directa para usos domésticos. El informe Paley (32) estima que en Estados Unidos el mercado potencial para 1975 es de unos 13 millones de instalaciones de calefacción solar. Fuera de la calefacción doméstica, el empleo de pequeños hogares solares para la cocción de alimentos ofrece grandes

---

* En la Conferencia Internacional sobre Utilización y Conservación de los Recursos Naturales del año 1949 se discutió este tema y se habló de un máximo de producción anual alcanzable entre los años 2010 y 2025 de 7 a 10 mil millones de barriles al año (37).

** La literatura publicada sobre estas diversas nuevas fuentes de energía y sus diferentes formas de utilización ha sido particularmente abundante en los últimos años. El autor ha realizado un extenso trabajo sobre estas materias expuestas en charlas inéditas en la Endesa. Un buen resumen moderno sobre estas materias se publica en Quaderni (40).

posibilidades. El Laboratorio Nacional de Física de la India ha realizado un diseño de este tipo que se usa en dicho país con gran éxito.

2º Empleo de la energía solar en el ciclo de refrigeración (análogo al ciclo de la bomba de calor). Aparentemente en Rusia (Tachskent) existe una gran instalación de este tipo.

3º Utilización de hogares solares para usos industriales para obtener altísimas temperaturas, que pueden llegar a sobrepasar la temperatura del arco eléctrico y que permiten la obtención de productos excepcionalmente puros pues en el horno solar se puede conseguir un proceso térmico independiente totalmente del factor químico (38).

4º Aprovechamiento de grandes extensiones de terrenos desérticos para la producción de energía eléctrica a través de la calefacción de un medio flúido. Los diversos procedimientos estudiados hasta la fecha arrojan muy altos costos de inversión pero debe poderse encontrar en el futuro alguna solución aceptable.

5º Generación directa de energía a través de un procedimiento como la batería de silicio recientemente inventada por ingenieros de la Bell Telephone Co., que aprovecha un fenómeno de tipo atómico que se conoce con el nombre de *reacción p — n* *. El rendimiento de esta batería es de 50 Watts/m^2. (50 mil kilowatt por kilómetro cuadrado). La solución momentáneamente es costosa y actualmente implica un proceso de bajo rendimiento desde el momento que la transformación del calor en electricidad se realiza a través de la batería. Pero basta recordar los inmensos desiertos que cubren extensas zonas de los continentes para reconocer las enormes posibilidades de este procedimiento. Aparentemente existen otros semi conductores, tales como el sulfuro de cadmio que pueden tener un mucho más alto rendimiento que el cristal de silicio y se cree posible llegar a un rendimiento de 200 watts/m^2.

6º El aprovechamiento del sol a través de un proceso de fotosíntesis de mucho más alto rendimiento que el proceso vegetal corriente. El desarrollo de algas como la Chlorella pyrenoidosa (39) que es capaz de utilizar un 2% de la energía recibida en lugar del 0,1% que es usual en los procesos de fotosíntesis de la vegetación. Por este camino podrían obtenerse unas 125 toneladas anuales de materia vegetal por hectárea, en lugar de las 7,5 toneladas que produce la vegetación corriente en las mejores condiciones. Se comprende que la obtención de tan enormes cantidades permitiría perfectamente la producción de gases (metano) y de alcoholes o combustibles líquidos sintéticos. Nuevamente, los costos son hasta ahora muy altos para las condiciones actuales pero aquí existe una posibilidad cierta de proveer cantidades considerables de energía para el futuro. Instalaciones que cubrieran una superficie del orden de 300 mil kilómetros cuadrados en el mundo podrían dar 1.000 millones de toneladas de combustibles líquidos. Y este proceso naturalmente está sólo en los comienzos de sus posibilidades.

7º Los conocimientos que se han adquirido sobre la fotosíntesis tendrán tam bién una influencia futura en la producción de alimentos sea para el hombre o

---

* En un semi-conductor con ínfimas cantidades de impurezas hay átomos que actúan como donadores de electrones y adquieren carga positiva y otros que actúan como captadores y adquieren carga negativa; la energía solar mantiene el fenómeno en marcha, pues de otro modo se estabilizaría en una cierta situación.

para los animales. Esta industrialización de la energía solar también representará en último término una ayuda al problema energético general.

8º Posibilidades de uso de la energía solar a través de células fotoeléctricas, en procesos energéticos por sistemas de oxidación y reducción, en descomposición fotoquímica del agua o fotosíntesis no biológicas no han sido suficientemente investigadas.

La energía del sol presenta tales perspectivas que una personalidad tan autorizada como James B. Conant, miembro durante años de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, ha escrito recientemente en la revista Chemical Engineering News que a fines de este siglo el sol será el factor predominante en el abastecimiento de energía para usos industriales.

El problema de la utilización de la energía solar está siendo considerado en el mundo entero con una atención preferente y hace pocas semanas atrás se ha realizado en Estados Unidos una reunión de científicos, de especialistas en actinometría y de ingenieros para discutir el estado actual del problema y los futuros avances que se espera realizar en este dominio. Por cierto, no hay que olvidar como se mencionó anteriormente que el empleo de radioisótopos en la investigación de la fotosíntesis está produciendo un rápido avance en el conocimento de este proceso, con expectativas claras de un aprovechamiento práctico ulterior.

De todos modos, pese a las posibilidades de la energía solar, la utilización inmediata de la energía nuclear es una necesidad evidente; ella es la justificación principal de las investigaciones para el uso pacífico del átomo que se realizan en el mundo entero.

En lo dicho se ha considerado el problema del abastecimiento de energía en el conjunto mundial. Pero si se le mira más de cerca, se verá que éste es un problema fundamental, también para los países más ricos en materia de recursos de energía. "Aun los países suficientemente afortunados para tener ahora abasteci-
" mientos de carbón, petróleo y gas adecuados para satisfacer sus demandas pre-
" sentes están afectados. Ellos también deben encontrar, antes del fin de este siglo,
" por lo menos una fuente de energía suplementaria" (33).

Alemania, país tradicionalmente productor de carbón, realiza importaciones de este combutible. En un informe muy reciente del gobierno británico se lee: "Desde
" la guerra, la producción de carbón en las minas subterráneas ha aumentado de
" 174 millones de toneladas en 1945 a 214 millones de toneladas en 1954. Pero
" las necesidades de la industria metropolitana en pleno desarrollo han crecido más
" rápidamente. Ha sido necesario completar la extracción de nuestras minas sub-
" terráneas con la explotación de las minas a cielo descubierto y con importacio-
" nes y aún así, el aprovisionamiento para el consumo doméstico sigue aún racio-
" nado y no queda suficiente para la exportación" (34).

Y en seguida el mismo informe se extiende en consideraciones sobre las exigencias financieras de los planes de expansión del carbón y la dificultad para encontrar la mano de obra necesaria.

El ministro de Asuntos Económicos de Bélgica señala que el problema más grave para la estructura económica de su país, es el problema del precio del car-

bón (35). Suecia que tiene un consumo de electricidad de 23,7 x 10^9 kWh, necesitará en 1975 aproximadamente 75 x 10^9 kWh; de estos el 84% provendrá de sus recursos hidráulicos que estarán totalmente explotados (36). ¿Y después de esa fecha?

Podrían multiplicarse los ejemplos. El caso de América Latina en su conjunto ha sido estudiado por la Comisión Económica para la América Latina (41). El nivel de consumo actual (año 1952) ha sido estimado en 77 millones de toneladas de petróleo equivalente (110 millones de toneladas de carbón equivalente). Para 1965 este consumo debe ser 90% superior. Con estos datos estimados por la CEPAL no es difícil esperar para 1980 un consumo cuádruple del actual, cifra que si bien en su conjunto no parece imposible de ser abastecida con las reservas de combustibles fósiles y energía hidroeléctrica exigirá, sin embargo, un esfuerzo de capital considerable. Además, es indudable que se producirán desajustes locales de importancia que obligarán a buscar en esos casos soluciones diferentes de las actuales.

En resumen, el problema de asegurar las necesidades de energía es del mundo entero y de cada uno de los países en particular. ¿Cuál es la contribución que la energía nuclear puede hacer según el estado actual de nuestros conocimientos?

8. *LA ENERGIA NUCLEAR*

> Por otra parte, si se eliminara el peligro de la guerra, la técnica científica podría por fin ser empleada para promover la felicidad humana. Ya no hay motivos técnicos para la persistencia de la pobreza, ni siquiera en países tan densamente poblados como India y China. Si la guerra no ocupase ya los pensamientos y energías de los hombres, podríamos, en el término de una generación, poner fin a todas las pobrezas graves en todo el mundo.
>
> *Ensayos Impopulares*
> BERTRAND RUSSEL

El objetivo último y preciso de la Conferencia Internacional sobre el uso pacífico de la Energía Atómica realizada hace tres meses en Ginebra fue, justamente, encontrar los medios para poner este recurso a disposición de la Humanidad. Entre estos usos, según ya se ha dicho, el empleo de las reacciones nucleares como una fuente para suplir el déficit de energía que se prevé en un futuro próximo o para satisfacer la creciente demanda de los países subdesarrollados es el de mayor significación económica inmediata.

Varios son los usos de las reacciones nucleares como fuente de energía que se consideran desde ya posibles. Su empleo para generar energía eléctrica en centrales estacionarias, para mover barcos, en usos industriales de calor, en instalaciones centralizadas de calefacción, en pequeñas plantas móviles para suministrar energía a zonas alejadas y posiblemente el uso para propulsar locomotoras y aviones.

De todos estos empleos, el más importante es el de la energía eléctrica, tanto por su significación en el desarrollo de los países como por el volumen de utilización que representa.

El mundo se electrifica a pasos rápidos; el consumo mundial dobla cada diez años y la proporción que la electricidad representa dentro del consumo total de energía —el "factor de electrificación"— crece rápidamente *.

En el caso de la energía eléctrica, como en todos los restantes empleos indicados más arriba, la energía nuclear se utiliza como fuentes de calor; el reactor nuclear, en una planta eléctrica, reemplaza las instalaciones de caldera y las de almacenamiento y preparación de los combustibles. El calor del reactor es extraído por medio del refrigerante que lo entrega al circuito de producción de energía en un intercambiador en el cual se produce el vapor de agua que irá después a las turbinas. Ya se ha señalado que por el momento este proceso introduce limitaciones en la temperatura y la presión del vapor que puede generarse con lo cual la eficiencia del ciclo térmico de estas plantas es más reducida que la obtenible en una central térmica de diseño convencional. A veces se ha pensado introducir el vapor producido en el intercambiador del reactor nuclear en una caldera normal con el objeto de elevar su temperatura y presión al grado máximo compatible con los materiales de que hoy se dispone para realizar las turbinas.

No es inconcebible la idea de utilizar la energía del reactor directamente en forma de electricidad, si bien hoy día no se tiene idea de cómo hacerlo; si este proceso fuera realizable prácticamente, las expectativas económicas de los reactores nucleares darían un paso gigantesco adelante **.

Incidentalmente, conviene agregar que las temperaturas alcanzables dentro del proceso nuclear son considerablemente superiores a las que hoy se pueden obtener de cualquier fuente de calor de uso industrial, pero la necesidad de refrigerar para conservar el reactor en buenas condiciones y para extraer este calor, no permite todavía encontrar una forma práctica de aprovechamiento de estas altas temperaturas, por ejemplo, en la fusión de metales.

Desde el punto de vista de la economía de las centrales nucleares, es muy importante reconocer la forma cómo se realiza el aprovechamiento de los combustibles nucleares. En este sentido los reactores pueden clasificarse en tres grupos: *no-regeneradores, regeneradores* y *reproductores o "breeders"*. Desde el punto de

---

* Según los estudios realizados por el autor, el "factor de electrificación" era en 1920 de 6%, en 1950 de 17% y para el año 2000 será de 35%, tomando en debida consideración la mayor eficiencia alcanzada durante los períodos señalados en la producción de electricidad. Según informaciones recientes estimo que en 1913 este factor era del orden de 3,5%.

** El general David Sarnoff, presidente del Directorio de la RCA, se ha referido al éxito obtenido con una batería experimental consistente en una fuente radiactiva puesta sobre un material semiconductor (silicon cristalino) que lleva en su otra cara un material que actúa de colector; el colector está adherido al silicon con un material rectificador que permite el paso de los electrones en un solo sentido. Como material radiactivo se usa estroncio 90 ($_{38}Sr^{90}$) producido abundantemente en la fisión del uranio; el estroncio emite radiaciones β (electrones de alta velocidad) que al atravesar el silicon sueltan un mucho mayor número (200.000 veces más) de electrones de baja velocidad. Este efecto se conoce con el nombre de electrón-voltaico. Los electrones desprendidos son recogidos por el colector y producen la corriente eléctrica. El rendimiento del sistema es de poco más de 1%, es decir, se aprovecha el 1% de la energía de las radiaciones β. Aquí hay el principio de una fuente atómica de poder en pequeñas unidades, de grandes posibilidades prácticas. Sería también un camino para la generación directa de energía eléctrica, sin pasar por la vía de calor, pero naturalmente en este aspecto el problema está demasiado lejos de una solución efectiva (42).

vista económico sólo los dos últimos pueden producir energía a un costo interesante *.

1º *Reactores no-regeneradores.*—Son reactores que usan como combustible exclusivamente uranio 235 o alguno de los otros elementos pesados que poseen la propiedad de fisionarse con neutrones lentos. Teóricamente un kilogramo de uranio 235 produce el equivalente en calor de 23 x 10^6 kWh. El rendimiento total de una muy buena central eléctrica de diseño convencional, es decir, la relación entre el equivalente térmico de los kWh obtenidos en la salida de la planta comparado con el calor contenido en el combustible usado, alcanza a 32%. En el caso de los reactores nucleares, dada la vía de extracción del calor por medio de un refrigerante y las menores temperaturas y presiones que es necesarios usar, se acepta un rendimiento de 24%. En otras palabras, suponiendo que todo el uranio 235 pudiera quemarse, se obtendrían 5,5 x 10^6 kWh. Sin embargo, se sabe que no todo el uranio 235 puede quemarse pues los productos de la fisión van "envenenando" el combustible de tal modo que al cabo de un tiempo el rendimiento del reactor disminuye y la unidad queda bajo su tamaño crítico y debe ser detenida, siendo prácticamente imposible recuperar el saldo del U^{235} a un costo razonable. Un cálculo muy optimista, permitiría suponer que es posible obtener la combustión de la mitad del U^{235}, con una generación final de 2,75 x 10^6 kWh. El uranio 235 tiene un precio estimado entre US$ 15.000 y US$ 30.000 el kg. (cifras indicadas por delegados de Estados Unidos en la Conferencia de Ginebra).

Con un precio de US$ 20.000, el costo del kWh, por el sólo concepto de combustible nuclear, sería de 7,3 milésimas de dólar, cifra comparable al costo total de la electricidad generada en una planta térmica convencional. Se comprende así que este tipo de reactores no tiene posibilidad económica alguna en las condiciones actuales.

2º *Reactores regeneradores.*—Estos reactores deben utilizar una mezcla de material fisionable y de material "fértil"; en cada fisión, parte de los neutrones producidos son capturados por el material "fértil" y por el proceso ya conocido producen nuevos átomos fisionables. Si se emplea, por ejemplo, uranio natural (0,72% de material fisionable y 99,2% de uranio 238 fértil) o uranio enriquecido en material fisionable (con un porcentaje mayor del isótopo 235) se podría esperar mantener la combustión hasta aprovechar un porcentaje sustancial del material fértil.

Sin embargo, no es ésta la situación real. Al hablar de los reactores, se citó un caso típico del consumo de neutrones en un reactor uranio-grafito; de ese ejemplo se puede ver que por cada átomo de U^{235} consumido se regenera no más de 0,9 átomos de plutonio fisionable. Por tanto, después de un número infinito de generaciones, partiendo de un átomo fisionable se habrían obtenido:

$$1 + 0{,}9 + 0{,}9^2 + 0{,}9^3 + 0{,}9^4 + \ldots\ldots + 0{,}9^n = 10$$

O sea, si en el combustible original el material fisionable era 0,72%, gracias a la fertilidad de la carga, se podría llegar a utilizar un 7,2% del total. Este es

* En parte se ha seguido el orden de la exposición del ingeniero Arturo Arias en el trabajo citado (20).

un límite teórico muy sobre los niveles prácticos; la experiencia indica que la regeneración se realiza a un ritmo inferior al 0,9 y, además, que las impurezas de la fisión nuevamente hacen impracticable el proceso hasta su etapa final. Es difícil traducir los datos en una apreciación económica ya que ello depende de hasta dónde se mantenga el proceso y de cuál es la posibilidad de recuperar el plutonio no fisionado del combustible, una vez retirada la carga. Suponiendo que la carga de uranio natural se aproveche hasta quemar el 1% de ella y que después se deseche el combustible, el costo por este concepto sería de 0,73 milésimas de dólar. El cálculo se ha realizado sobre la base de que un kilo de uranio natural metálico atómicamente puro puede ser suministrado en US$ 40. (Conferencia de Ginebra) y que la energía eléctrica producida en la combustión del 1% del kilo de uranio natural es de 55.000 kWh.

Se comprende que independiente del capital necesario en la instalación y de su costo de operación el combustible no juega papel significativo alguno. En una planta térmica convencional, sobre la base de los bajos costos del carbón de Estados Unidos (US$ 1,4 de millón de caloría) el costo del kWh generado, por este solo concepto, es de 3,5 milésimas.

Debe observarse, sin embargo, que en estos reactores la velocidad de la reacción está regulada por la presencia de uranio 235; de ahí la conveniencia de trabajar con uranio enriquecido en una cierta proporción, con el objeto de obtener una mayor potencia de un peso dado de carga.

3º *Reactores reproductores.*—El reactor reproductor persigue producir como mínimo tanto material fisionable nuevo como el que se consume. Esto no es posible dado el rendimiento 90% indicado anteriormente y menos con el valor 80% alcanzado en el Laboratorio Nacional de Argonne en Estados Unidos.

Es preciso encontrar por tanto una manera de obtener una eficiencia de reproducción por lo menos igual a 100% y esto es extraordinariamente difícil. En efecto, "cuando un núcleo de U^{235} captura un neutrón térmico, el 83% de las "veces se produce fisión, emitiéndose en tal caso como promedio 2,5 neutrones "por núcleo fisionado. Las veces restantes se produce la simple captura de un "neutrón con emisión del exceso de energía bajo la forma de un rayo γ. Resulta "así que por cada núcleo de U^{235} destruído por fisión, sólo quedan disponibles "2,14 neutrones; uno de ellos se necesita para mantener la reacción en cadena "y otro para reemplazar el átomo de U^{235} destruído; se dispondrá en consecuen-"cia sólo de 0,14 neutrones para aumentar el rendimiento de la reproducción y aten-"der al mismo tiempo a las pérdidas de neutrones por diferentes causas" (20).

Con un margen tan estrecho como el indicado, es extraordinariamente difícil alcanzar las condiciones que se han indicado como necesarias. La solución parece estar en el empleo de *reactores rápidos*. En estos la ausencia de moderador por un lado, la posibilidad de fisionar el material fértil con un neutrón rápido y la reducción del fenómeno de captura de neutrones sin producir fisión, permiten esperar la solución del problema. La Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos ha construído un reactor experimental de este tipo (estación experimental de Arco-Idaho) y ya en junio de 1953 anunció que los resultados de la reproducción eran favorables (23). Según las informaciones publicadas (25), el rendimiento de este reactor sería de 101%, es decir, ligeramente positivo. Pasada ya la etapa

experimental, Estados Unidos consulta la ejecución de un reactor industrial conectado a un grupo turbo-generador de 20.000 kW.

El costo de la energía posible de obtener en un reactor reproductor está en relación directa con el valor que se le atribuye al material fisionable que en él se obtenga. Este valor depende del costo del material fisionable disponible de otras fuentes y del costo de procesar el material obtenido en el reactor reproductor, costo este último que puede ser elevado en atención a la radiactividad intensa de los materiales de que se trata.

Las ventajas inherentes a las plantas atómicas residen en la facilidad de acumular y de transportar el combustible necesario y en la poca influencia que el costo de éste tiene en el precio de la energía obtenida. Independiente del hecho de que la escasez de otras fuentes de energía puede en último término obligar al empleo de reactores nucleares, es conveniente apreciar el nivel de costos a que espera obtener la energía comercial de estas instalaciones.

Desde luego, es preciso advertir que tanto las instalaciones gubernamentales actualmente en ejecución como las inversiones que están realizando las empresas privadas, se hacen con el criterio de que, por ahora, la energía que de ellas se obtendrá no puede ser competitiva.

Las inversiones en una planta atómica son considerables. Así, en un estudio presentado en Ginebra (43) se dan los siguientes costos por kW de capacidad instalada.

Planta	*Tamaño* MW	*Costo* US$ kW
Carbón	400 - 600	130 - 135
"	11 - 50	150 - 165
Gas natural	mediano	75 - 100
Hidráulico	100 - 200	115 - 120
"	10 - 50	125 - 170
Diesel	10 - 15	135 - 138
Nuclear	200	350

El costo de instalación de una planta nuclear naturalmente es susceptible de una reducción considerable debido a los múltiples avances de la tecnología que se realizarán en los próximos años. Se cree en Estados Unidos que para 1965 la inversión por kW se reducirá a no más de US$ 250. En el programa de plantas atómicas a realizarse en Estados Unidos y aceptado por la Atomic Energy Commission de ese país, se consulta la instalación de 5 plantas con un total de 705.000 kW y un costo estimado de US$ 205.000.000, equivalente a un promedio de US$ 390/kW.

El costo total del programa puesto en marcha por Inglaterra para los próximos 10 años, incluso la investigación de los prototipos y las instalaciones anexas de proceso de los combustibles representa una inversión de £ 300.000.000 (US$ 840.000.000). La potencia total instalada en 12 centrales diferentes será

entre 1,5 y 2 millones de kW. También en este caso se puede apreciar la importancia de las cifras de capital que intervienen (34).

Entre las plantas actualmente en construcción o en proyecto se pueden señalar algunos costos:

Nombre	*Capacidad* kW	*Costo*	*Costo por kW* US$
Calder Hal * (22,34)	50.000	£ 18.800.000	1050
Commonwealth Edison (44)..	180.000	US$ 45.000.000	250
Pacific Gas and Electric (21)..	145.000	51.000.000	350
Detroit Edison (45)	100.000	45.000.000	450

El costo final de la energía obtenida es difícil de determinar con las informaciones existentes. No se conocen los gastos y dificultades de operación, las depreciaciones que es necesario tomar en cuenta, etc. Sin embargo, algunos resultados han sido dados a conocer recientemente. Así, en un trabajo presentado en Ginebra (46) se indican para diversos tipos de reactores, con costos de instalación diferentes y con combustibles de distinto tipo, precios que fluctúan entre 5,5 y 7 milésimas por kWh. Un reactor con refrigeración por metal líquido estudiado en el Laboratorio de Brookhaven, da un costo de 7,8 milésimas. Estudios realizados para un reactor que usa torio como combustible conducen a la cifra de 6 milésimas por kWh. Costos tentativos tan bajos como 4 milésimas fueron señalados en la Conferencia de Ginebra. El costo de la energía en plantas térmicas convencionales en Estados Unidos, fluctúa entre 5 y 10 milésimas por kWh.

En un trabajo de F. K. Mc Cune ** se dan los siguientes costos comparativos, en milésimas de dólar:

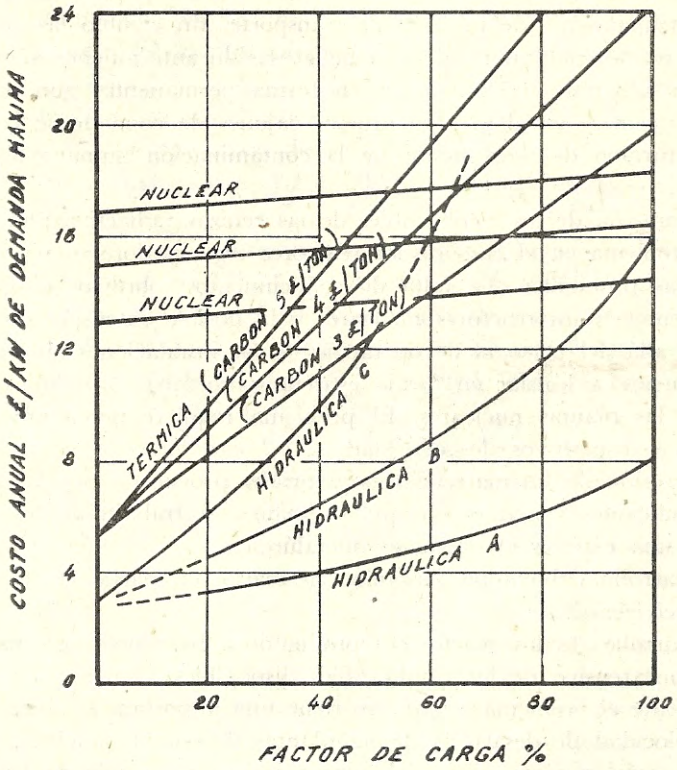
	Central térmica Convencional Costo carbón 35 c por millón de BTU	*Planta térmica nuclear Reactor del tipo agua hirviendo*	*Reactor de grafito*
Gastos fijos	3,0	4,65	5,2
Gastos de operación ..	0,5	0,70	0,6
Combustible	3,4	1,35	1,0
	6,9	6,70	6,8

Los estudios realizados en Inglaterra conducen a costos de la energía generada del orden de 0,6 d por kWh (7 milésimas). En una comparación entre plantas hi-

* Esta cifra corresponde por cierto no sólo a las instalaciones sino a los cuantiosos gastos de desarrollo.

**F. K. Mc. Cune, "The Approach of the General Electric Company". Atomic Industrial Forum, julio 1954; citado en (51).

dráulicas, a carbón y nucleares, se puede observar que las hidráulicas conducen a un costo anual inferior al de cualquier planta nuclear aun para factores de carga tan altos como el 95%. (Fig. 3). En cambio, las plantas a carbón, suponiendo el combustible a 4 £ por tonelada, comparadas con las nucleares, están en franca posición desfavorable a partir de un factor de carga de 66% hacia arriba y en zona de competencia —según sean los costos de los reactores— a partir de un factor de carga de 45%.



Según las informaciones disponibles, se puede ya asegurar que la energía nuclear podrá ser suministrada en condiciones comerciales satisfactorias, si bien todavía hay un número considerable de problemas que resolver.

Entre estos, los que limitan el uso de la energía eléctrica nuclear son de diversos órdenes, pudiendo señalarse tres tipos fundamentales de dificultades: legales, técnicas y económicas (51). Entre las primeras están las limitaciones que los Gobiernos de todos los países que van a la cabeza de estas materias han impuesto por razones de seguridad. En efecto, las naciones tienen actualmente la obligación de conservar determinados aspectos de la investigación atómica en carácter confidencial y, además, están preocupadas de constituir reservas militares apropiadas de materiales fisionables, lo que restringe en forma drástica la libertad de producir y utilizar uranio en la generación de energía en escala comercial. Por otro lado las disposiciones de orden legal para reducir los riesgos en caso de falla o explosión de un reactor nuclear no han sido suficientemente

dilucidadas, no existiendo por el momento un procedimiento uniforme para abordar estos aspectos.

Según los especialistas, las principales dificultades técnicas que es preciso resolver son las siguientes:

a) Protección contra las radiaciones y eliminaciones de las cenizas radiactivas. En particular este último aspecto no tiene paralelo con ningún otro de los problemas industriales de eliminación de desechos y de contaminación. Eliminar el cuantioso volumen de cenizas de una planta eléctrica que quema un millón de toneladas de carbón al año es un problema muy serio, pero en último término se trata principalmente de un caso de transporte. En cambio las cenizas radiactivas de un reactor nuclear pueden ser peligrosas durante muchos años y por tanto es necesario asegurar su eliminación en forma permanente; aun en el caso de sumergir las cenizas en el mar en gruesos cajones de concreto se corre el riesgo que la destrucción de estos signifique la contaminación humana a través de la vida marina.

b) Separación de los combustibles de las cenizas radiactivas; ya hemos señalado este problema en el caso de los reactores regeneradores y reproductores.

c) Areas prohibidas. La falta de conocimientos sobre los riesgos inherentes a un accidente en los reactores nucleares y la posible extensión de estos riesgos mucho más allá del personal de operación de las instalaciones obliga, por el momento al menos, a legislar en forma estricta sobre áreas prohibidas para la instalación de las plantas nucleares. El problema requiere por tanto el desarrollo de numerosos dispositivos de seguridad.

d) Corrosión de los materiales estructurales provocada por las radiaciones y por las condiciones generales en que se realiza el trabajo de los reactores ha obligado a una extensa investigación metalúrgica.

e) Desarrollo del equipo mecánico necesario, en particular el exigido para mover los refrigerantes.

f) Desarrollo de los reactores reproductores, base necesaria para un aprovechamiento extensivo de los combustibles disponibles.

Finalmente el problema económico tiene una importancia básica en la menor o mayor velocidad de desarrollo de las plantas de energía nuclear. Es indudable que la reducción a corto plazo del consumo de combustible de las plantas térmicas convencionales a menos de 2.000 calorías / kWh y los precios de los combustibles clásicos a niveles tan bajos como US$ 0.68 por millón de calorías en la parte oriental del Estado de Pennsylvania, coloca a las plantas nucleares en condiciones económicas desfavorables. Los factores que afectan actualmente el costo de las plantas nucleares en forma contraria si se las compara con las plantas térmicas convencionales son las siguientes:

a) Inversión considerablemente más alta.

b) Factor de utilización: dado el alto costo por kW instalado se requiere un alto factor de planta para compensar los mayores costos de capital con los menores gastos de combustibles. El factor de utilización que se puede asegurar en la operación normal de un reactor no se conoce todavía.

c) Costo del combustible: hoy día no existe un precio comercial para los combustibles atómicos debido al control estatal y a las medidas de reserva militar; en consecuencia es difícil establecer la influencia de estos costos en el precio final de la energía eléctrica producida.

d) Depreciación: la falta de experiencia en la operación de las plantas no permite conocer el verdadero nivel de las depreciaciones que es necesario considerar.

e) Por último la posible limitación en la ubicación de las plantas nucleares y el factor riesgo son dos aspectos que también tienen influencia en el problema económico.

¿Existe suficiente combustible nuclear para hacer de la energía por fisión un factor importante del abastecimiento mundial? La respuesta es afirmativa. Según estimaciones varias, la suma de las reservas económicamente explotables de carbón, petróleo y gas natural es del orden de 100 Q (Q = $3{,}2 \times 10^{10}$ toneladas de carbón) *. Si el total de las necesidades de energía del mundo se atendiera exclusivamente con estos recursos, para el año 2050 se habría consumido más del 60% de estas reservas.

Se estima que los recursos recuperables de uranio y torio contienen una cantidad de energía del orden de 1770 Q **. Claro que no toda esta cifra es recuperable pues ello implicaría técnicas de fertilización de los materiales más abundantes como el U^{238} y técnicas de combustión, de los materiales fisionables que hoy día no se conocen. Pero no hay duda que puede contarse con una fracción muy importante del total señalado.

Si sólo fuera aprovechable el U^{235}, obtendríamos una energía de 12 Q, cifra sin duda significativa, pero muy modesta para la magnitud del problema que se desea resolver. De ahí que el desarrollo de los reactores regeneradores y sobre todo de los reproductores, sea una necesidad imprescindible. Así también se podrá aprovechar el torio que es un elemento más abundante en la naturaleza que el uranio ***.

Naturalmente queda abierta la puerta a las posibilidades de la fusión de los elementos livianos; ello significaría que los recursos de energía nuclear serían inagotables. Pero esta solución es tan remota por ahora, que no puede alterar los planes que consideran en primer lugar el uso de los átomos pesados. Los programas se desarrollan en forma paulatina y sistemática con vista a preparar poco a poco los materiales fisionables a partir de los fértiles, en cantidad sufi-

---

* Según estimaciones del autor estas reservas son del orden 200 Q, pero no todas recuperables en las condiciones actuales. (Trabajo inédito). Según un artículo de J. L. Schanz publicado en Electric Light and Power (diciembre, 1954) se estima en 80 Q.

** Esta cifra tiene sólo un valor ilustrativo. Seguramente las posibilidades reales son considerablemente mayores, pues sólo el uranio ha sido estimado por Goodman en 25 millones de toneladas, lo que equivale a 1700 Q. Putnam (6) indica que las reservas de torio son de un millón de toneladas; sin embargo en un reciente estudio de la Schroder Rockefeller and Co. (47) se dice "el torio es un material mucho más abundante que el "uranio; debe haber por lo menos 4 veces más, posiblemente 10 veces más".

*** Desgraciadamente las informaciones sobre el torio son muy contradictorias. Según un artículo de Keenleyside (52) el contenido de torio en las 10 millas superiores de la corteza terrestre es sólo la cuarta parte del uranio. Sin embargo, en una publicación a la cual debe dársele máxima importancia (54) se establece que el torio existe en proporción de 12 ppm. en la corteza terrestre y el uranio en cambio existe sólo a razón de 0,0004% (o sea 4 ppm.).

ciente, de modo a contar en el futuro con reservas apropiadas de aquéllos que, empleados en reactores reproductores, permitan mantener un nivel de producción de energía adecuado. Es evidente que un reproductor si sólo puede reproducir la misma cantidad de combustible que la que consume, está condicionado en su capacidad de generación al nivel alcanzado por la carga inicial introducida en el proceso.

Frente a estos hechos, los grandes países del mundo han abordado decididamente el problema de la producción de energía eléctrica a partir de los reactores nucleares.

Inglaterra tiene hoy día (1954) una producción de electricidad de 69 x 10^9 kWh y para 1975 habrá más que triplicado sus necesidades que se estiman en 223 x 10^9. Para atender a esta producción, la potencia instalada deberá subir de 20.700.000 kW. a 57.000.000 kW. De la potencia hoy día instalada, 10 millones de kilowatt estarán todavía en servicio en 1975 y tomando en cuenta unos 2 millones de kilowatt adicionales de potencia hidráulica, Inglaterra necesitará instalar 45 millones de kilowatt nuevos en plantas térmicas, con un costo de 2.500 millones de libras esterlinas y con un consumo anual de carbón que sería de 2,5 veces el consumo actual si todas las plantas instaladas fueran del tipo convencional. Según los programas de hoy día, para 1956 Inglaterra tendrá 2 millones de kilowatt en plantas nucleares y para 1975 esta cifra será del orden de 15 millones de kilowatt. No parece posible una velocidad mayor en el desarrollo de la energía nuclear debido a las dificultades del abastecimiento de mayores cantidades de plutonio (34).

Actualmente Estados Unidos tiene una potencia instalada de 102 millones de kW; en 1980 tendrá 514 millones de kW. Según las mejores estimaciones disponibles, la potencia que anualmente se instalará se dividirá entre plantas térmicas y nucleares de acuerdo con los siguientes porcentajes (no se toman en cuenta las centrales hidroeléctricas) (33):

Año	*Por ciento Plantas térmicas*	*Por ciento Plantas nucleares*
1965	96%	4%
1970	86%	14%
1975	56%	44%
1980	35%	65%

De los 514 millones de kW instalados en 1980 alrededor de 90 millones serán nucleares. Los cambios en las fuentes de energía deben ser paulatinos debido a las múltiples implicaciones envueltas en el problema, pero se comprende que ya para fines de este siglo, los combustibles fósiles deberán ser desplazados de la generación de electricidad hacia otros usos donde la sustitución no será posible.

Rusia que tiene hoy (1954) una producción de electricidad de 142 x 10^9 kWh, espera alcanzar en la próxima década sobre 400 x 10^9 kWh. Esta velocidad de crecimiento implica tales compromisos sobre la producción de carbón que para

poder realizar el programa de electrificación indicado debe también apoyarse sobre un desarrollo de la energía nuclear. El programa ruso, sin embargo, que debe ser muy importante, no es conocido.

Alemania Occidental tiene un consumo de 66 x 10^9 kWh (año 1954). Para 1970 se espera un consumo de 200 x 10^9 kWh. En 1954, la energía hidroeléctrica representó el 16% del total; para 1970 el porcentaje habrá bajado a sólo un 9% pese a las nuevas instalaciones, debido al agotamiento de las posibilidades de soluciones hidráulicas económicas. De las estimaciones realizadas hasta ahora, se desprende la posibilidad de que 80 x 10^9 kWh. deban ser generados por otros medios que no sean el lignito y el carbón de piedra, y la solución considerada es naturalmente la generación nuclear (48).

Me he referido a un grupo de países altamente desarrollados; en el caso de América Latina según el estudio ya citado de la CEPAL (41) en 1954 la potencia instalada era de 9.900.000 kWh y deberá subir para 1965 a 21.660.000 kWh. Para 1980 me atrevería a pronosticar una cifra sobre 65.000.000 Kw y si bien una proporción importante de esta cifra puede ser satisfecha con los recursos hidroeléctricos y con plantas térmicas de diseño convencional, es indudable que en algunos países se justificará atender parte del crecimiento con plantas nucleares.

Una situación similar se presenta en el caso de los países de bajo desarrollo del área asiática.

Las cifras anteriores, con ser impresionantes en cuanto a lo que se espera de la energía nuclear, no son realmente extraordinarias. Ellas indican que para el año 1975, la energía nuclear tomará menos de un 25% del consumo mundial de electricidad. Referido al consumo total de energía, esto significa alrededor de un 7%. Queda en pie la afirmación que hice algún tiempo atrás, en el sentido de que "Parece indudable que pasarán todavía algunas décadas, antes de que la energía atómica haga una contribución sustancial al abastecimiento mundial" (31).

9. *CHILE Y LA ENERGIA NUCLEAR*

> " En cambio nuestros ríos, relativamente
> " caudalosos de Coquimbo al sur, encierran
> " las fuentes de una energía eléctrica que
> " puede subvenir con exceso a las exigen-
> " cias del más avanzado industrialismo".
> *Nuestra inferioridad económica (1911).*
>
> FRANCISCO A. ENCINA

No hay duda de que en nuestro país el empleo de la energía nuclear es un problema que debe ser considerado atentamente en los dos aspectos de uso pacífico destacados en este trabajo.

En materia del empleo de isótopos y radioisótopos para la investigación tecnológica o médica se han dado algunos pasos tímidos prometedores de un futuro mejor.

En cuanto a la utilización industrial de radioisótopos creo que no puede señalarse aún ningún caso interesante, pese a que es indudable que más de algunas de las aplicaciones que hoy ya se han perfeccionado en el extranjero, podrían

usarse con éxito en nuestros problemas. Pero este aspecto de la energía nuclear es más materia de oportunidad y de posibilidad práctica de disponer de elementos con los cuales realizar las aplicaciones.

El problema que requiere una consideración de orden económico cuidadosa, es el uso de los reactores nucleares como un recurso importante para atender al crecimiento futuro de nuestras necesidades de energía.

Chile tiene un consumo total de energía de unos 9.500.000 toneladas de carbón equivalente. Para 1975 este consumo habrá subido a 25.000.000 tons. Para el año 2000 esta cifra será del orden de los sesenta millones de toneladas.

Nuestro país posee los cuatro recursos hasta ahora utilizados, a saber, carbón, petróleo, leña y energía hidráulica. Sin embargo, es actualmente deficitario en su abastecimiento en una proporción bastante considerable ya que importa un tercio de la energía que consume. Para 1975, si se cumplen los programas en marcha, esta situación puede mejorar apreciablemente, ya que Chile estaría en situación de un autoabastecerse en un 7,5% (31).

La energía nuclear en la actualidad tiene su aplicación más importante e inmediata en la generación de electricidad. Es interesante examinar cuál es nuestra situación probable al respecto.

En 1954 la producción de energía eléctrica fue de aproximadamente $3,5 \times 10^9$ kWh; el déficit de abastecimiento no debe haber sido superior a unos $0,2 \times 10^9$ kWh. Para 1975 las necesidades habrán subido por lo menos 4 veces. (obsérvese que para países tan altamente industrializados como Estados Unidos e Inglaterra, el crecimiento, en el mismo período, es del orden de 3,5 veces y en cambio la población de Chile aumentará más rápidamente que la de dichos países).

La producción total de Chile será, por lo menos, de 14×10^9 kWh. Para atender estas necesidades será preciso tener instalada una potencia del orden de 3.500.000 kW lo que significa, tomando en cuenta las renovaciones de equipo necesarias, que en los próximos 20 años el país deberá instalar y renovar una capacidad de 3 millones de kW.

De los 14×10^9 kWh. que se producirán, alrededor de unos 4×10^9 kWh. deberán ser generados en la zona Norte del país, desde el paralelo 32° hasta Arica. El saldo lo será en la zona comprendida entre dicho paralelo y el extremo continental Sur de Chile.

La importancia de las instalaciones por hacer reabre la cuestión sobre cuáles son las soluciones más convenientes para atender al crecimiento de nuestro consumo eléctrico.

El ingeniero don Renato Salazar, Jefe del Departamento de Ingeniería de la ENDESA, ha realizado una comparación detallada para el caso chileno, de una solución hidroeléctrica, de una planta a vapor con combustible nacional y de una planta nuclear, de un tamaño tipo de 100.000 kW (49). Este cálculo ha sido hecho sobre las siguientes bases:

a) Equipo importado, internado sin pago de derechos de Aduana.

b) Costos determinados en dólares a razón de $ 400 chilenos por US$ como tasa de conversión de las inversiones y gastos locales.

c) Valores efectivos para la depreciación, mantención y contribuciones en el caso de las dos primeras plantas. En cuanto a las instalaciones nucleares la depreciación y la mantención se tomaron relativamente altas debido a la falta de

experiencia, a la posible obsolescencia de las instalaciones y a los peligros y riesgos inherentes a este tipo de operaciones.

Es indudable que los valores del estudio del señor Salazar deben considerarse sólo como comparativos, ya que las condiciones del cálculo no son las prevalecientes en la realidad chilena. El resultado de este estudio da los costos directos de operación y los gastos por inversión de capital; se trata por tanto estrictamente hablando sólo del costo del kWh; para tomar, además, en cuenta la renta del capital comprometido, factor que configura el precio de kWh., se ha agregado al estudio ya mencionado un término adicional.

Los resultados del estudio son los siguientes (expresados en US$ = $ 400) *.

Capacidad total 100.000 kW	*Hidroeléctrica*	*Térmica carboncillo nacional*	*Nuclear*
1º *Inversión.*	316	190	455
2º *Costo anual de la inversión en %.*			
(Depreciación, mantención, operación, contribuciones, seguros, etc.).	6,5%	7,3%	14%
Costo anual de la inversión en US$.	20,5	13,9	64
3º *Costo directo de operación.*			
3.1 Combustible.		carboncillo	uranio nat.
3.11 Consumo por kWh.		3.000 cal.	1 : 17.000
3.12 Precio unitario.		15,7/ton.	64,5/kg. (40 x 1,15 x 1,4)
3.13 Costo por kWh. en milésimas de US$.	—	7,4	3,8 **
3.2 Lubricantes y otros Materiales (milés.).	0,5	0,3	0,3

* En el cuadro que se inserta se han utilizado los raciocinios base del Sr. Salazar. El autor se ha permitido la libertad de presentar la información en forma diferente e introducir el cálculo de algunos casos diferentes.

** Según el criterio del autor, el costo por combustible nuclear es sólo de 1,3 milésimas. Sin embargo, la corrección que introduce este factor no es significativa.

	Hidroeléctrica	*Térmica nacional carboncillo*	*Nuclear*
3.3 Otros gastos directos.	0,05	1,0	1,0
	0,55	8,7	5,1
4º *Costo total de la energía* (milésimas).			
4.1 Por inversiones.			
2900 kWh/kW	7,05	4,75	22
4400 kWh/kW	4,65	3,15	14,5
5800 kWh/kW	3,55	2,4	11
7000 kWh/kW	2,95	2,0	9,15
4.2 Costo total.			
2900 kWh/kW	7,6	13,45	27,1
4400 kWh/kW	5,2	11,85	19,6
5800 kWh/kW	4,1	11,1	16,1
7000 kWh/kW	3,4	10,7	14,25

Si, como ya se sugirió, se considera también el interés del capital y se usa para este efecto una cifra ilustrativa de 6% (en realidad, aun en moneda fija este interés en Chile debería ser superior y del orden de 8%) los precios comparativos de la energía eléctrica serían:

PRECIOS COMPARATIVOS DE LA ELECTRICIDAD

Rentabilidad sobre la inversión 6%.	*Hidroeléctrica*	*Térmicas convencional*	*nuclear*
2900 kWh/kW	14,1	17,45	36,3
4400 kWh/kW	9,5	14,45	25,6
5800 kWh/kW	7,4	13,1	20,7
7000 kWh/kW	6,1	12,3	18,1

De los cuadros es posible sacar conclusiones perfectamente claras y definitivas aún cuando se pueden variar prudentemente las cifras indicadas en uno u otro sentido. Estas conclusiones son:

1º Mientras existan soluciones hidroeléctricas en el nivel de inversión actual o aun con un alza apreciable del costo por kW instalado, debe darse preferencia total a estas soluciones.

2º Cuando las soluciones hidroeléctricas deban ser complementadas con ins-

talaciones de emergencia o de punta de muy bajo factor de carga, la solución deberá ser plantas térmicas de tipo convencional.

3º En las condiciones del Norte chileno donde se carece de soluciones hidroeléctricas o éstas son muy pequeñas y costosas, la solución básica debe realizarse con plantas térmicas.

4º A los niveles actuales de precios y aun para altos factores de carga de las instalaciones, por el momento resultan más favorables las plantas térmicas convencionales.

Sin embargo, respecto a esta última conclusión es preciso tener presente los siguientes factores que en cualquier momento pueden hacer variar esta afirmación:

a) El costo total de una planta nuclear tiene fundadas expectativas de bajar. Si se cumplen los pronósticos de Estados Unidos sobre el costo para el año 1965 (US$ 250/kW) el costo en Chile sería del orden de US$ 300/kW);

b) El cargo por depreciación es un factor actualmente muy alto que en un plazo prudente puede quedar reducido a no más de 4%.

c) El costo de combustible según el criterio ya expresado no debería sobrepasar la cifra de 1,3 milésimas /kWh.

Con todos estos factores correctivos, el costo del kWh. de la planta nuclear bajaría a 19,1; 13,5; 10,9; 9,4 milésimas de dólar para los diferentes factores de planta considerados. Estos valores pueden considerarse por el momento un límite inferior difícil de alcanzar, pero hacen de la energía nuclear una solución competitiva frente a las plantas térmicas convencionales a partir de factores de utilización tan bajos como 50%.

¿Qué deberíamos hacer entonces en materia de energía eléctrica nuclear? Por el momento, mantenernos informados y preparar gente. Por eso puede resultar atractivo para Chile que una de las tres pequeñas plantas atómicas (10.000 kW) que la American Foreign Power está considerando instalar en sus subsidiarias de Latinoamérica, se instale en nuestro país. El costo de estas plantas es elevado, pero ello permitiría formar personal y adquirir experiencia valiosa para un futuro no muy alejado.

Se dice que una de las Compañías de Cobre está considerando seriamente la posibilidad de ampliar sus instalaciones de generación con una planta nuclear de 40.000 kW; también esto puede ser un paso interesante, según sean las condiciones bajo las cuales se realice esta inversión.

Es indudable que además de la obligación de estar atentos a los posibles usos industriales inmediatos de la energía nuclear, hay otras tareas urgentes que cumplir en nuestro país. Entre ellas la formación del personal científico y técnico es una de las actividades más necesarias de impulsar, ya que es una labor larga que no puede ser improvisada.

Algo se ha hecho a este respecto. El Laboratorio de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile ha iniciado la formación de científicos y técnicos. Está adquiriendo instalaciones experimentales y pronto tendrá un generador en cascada en servicio. Ha creado un Laboratorio de Alto Vacío, y los talleres auxiliares necesarios tales como mecánica

y vidrio. También la Universidad de Concepción ha demostrado su especial interés en estas materias y el curso internacional sobre Radio Química a iniciarse próximamente es una demostración clara de la importancia que atribuye a esta labor. Algunas otras Facultades de las diversas Universidades están preocupadas dentro de la limitación de sus medios en realizar trabajos con utilización de radioisótopos, en especial en el diagnóstico y la terapéutica de determinadas enfermedades.

Pero esta labor en parte dispersa, falta de medios y sin una orientación general, no cumple con las necesidades del futuro inmediato del país. Al respecto es necesario aprovechar al máximo y en forma organizada la ayuda que ofrecen los países como Estados Unidos y los organismos internacionales como las Naciones Unidas o sus agencias especializadas.

Otra etapa urgente de realizar es la referente a la prospección y explotación de nuestros minerales radiactivos. Algo se ha hecho a través de algunos servicios del Estado tales como la Corporación de Fomento, la Caja de Crédito Minero y la Fundición Nacional de Paipote. Existe la posibilidad de iniciar pronto la explotación de ciertos yacimientos y se estudia hasta dónde se justificaría la producción de uranio metálico de pureza atómica.

Pero una prospección sistemática de nuestras posibilidades y la organización de su explotación por entidades públicas o privadas, la fijación de una política sobre minerales radiactivos y su control, son todas tareas que esperan su iniciación. El reconocimiento en debida forma de los recursos de Chile y su explotación, también exige la formación del personal especializado.

Para cumplir adecuadamente estas dos tareas más urgentes y muchas otras para las cuales es preciso prepararse, parece conveniente la creación de un organismo técnico, que con el carácter de una Comisión Nacional de Energía Nuclear aborde todas las tareas inherentes a estos problemas.

En el mundo, según la encuesta realizada por el Atomic Industrial Forum (23), hay 32 países actualmente interesados en cierta forma, en la investigación y la tecnología de la energía nuclear. Todos ellos han creado un organismo centralizado destinado a realizar la coordinación total de las actividades nacionales en torno a este problema; las funciones de estos organismos son más o menos amplias según sea la acción que ellos realicen directamente o la cooperación que busquen y obtengan del resto de los organismos públicos o privados del país.

La mayoría de estos organismos tienen la forma de una Comisión Nacional de Energía Atómica de carácter esencialmente técnico, de gran autonomía de acción y responsable sólo ante los niveles más altos del poder Ejecutivo. A veces responden directamente al Presidente de la República o al Jefe del Gobierno, a veces son un servicio de gran independencia dentro de uno de los Ministerios que sirve de relacionador con las esferas ejecutivas del Gobierno, a veces tienen el carácter de una organización privada generalmente con control absoluto del Estado dentro de ellas. La independencia de estos organismos de los azares de la política y la continuidad en su dirección técnica son requisitos indispensables de su eficiencia; su autoridad sobre los programas nacionales de trabajo, sobre el aprovechamiento de los medios científicos y tecnológicos del país destinados al conocimiento de la energía nuclear, su responsabilidad en la política a seguir en cuanto a los minerales radiactivos, a su explotación y venta, la acción coordinadora con las agencias internacionales interesadas en la energía nuclear son

funciones esenciales de una Comisión Nacional de Energía Atómica. Entre otras de las atribuciones de esta Comisión debe considerarse también las reglamentaciones aplicables en el país en materia de transporte, manejo y distribución de isótopos radiactivos, dictación de normas de seguridad e higiene apropiadas al uso de estos productos y otorgamiento de patentes y licencias en todo lo referente a energía nuclear.

La creación de un organismo de esta naturaleza parece un paso necesario y urgente en Chile.

UNIVERSIDAD DE CHILE
Biblioteca Central
ESCUELA DE INGENIERIA

10. *CONCLUSION*

> La aplicación de la energía atómica controlada a la industria, a la medicina y a la agricultura "es una ocasión única de "favorecer una comprensión entre las na- "ciones, comprensión más necesaria que "nunca. Todo lo que amenaza la civiliza- "ción debe ser desechado para que los "pueblos puedan gozar de los frutos de la "Ciencia".
>
> NIELS BOHR
> (físico nuclear)

En este trabajo he procurado esbozar a grandes rasgos las enormes posibilidades de la Energía Nuclear, posibilidades para el bien o para el mal, para la paz o la guerra, para la creación y la multiplicación de los recursos necesarios a la Humanidad o para la destrucción y aniquilamiento de la vida en nuestro planeta. Bertrand Russel ha dicho: (50)

"Con medios vastamente más potentes de utilización de la energía atómica "que los que ahora se poseen, se piensa posible, por muchos serenos hombres "de ciencia, que las nubes radiactivas, flotando sin rumbo por el mundo, desinte- "gren por doquier los tejidos vivos. Aunque el último sobreviviente pueda pro- "clamarse emperador universal, su reinado será breve y sus súbditos todos ca- "dáveres. Con su muerte terminará el incómodo episodio de la vida, y las apacibles "rocas continuarán girando inmutables hasta que el sol estalle".

Si no logramos comprender que el desarrollo de la energía nuclear sólo tiene importancia en su aspecto humano se corre el riesgo de que se cumpla la profecía del pensador inglés. Sólo nos queda la alternativa expresada por el presidente Eisenhower * para que "la milagrosa inventiva del hombre no sea dedicada a la muerte y sólo consagrada a la vida".

Es posible que las tremendas potencialidades para el mal de la energía nu-

---

* Discurso ante la Asamblea de las Naciones Unidas - 8 de diciembre de 1953.

clear hagan al fin primar la ley sobre la fuerza y si ello llega a realizarse el mundo estará mejor, que en cualquier otro momento de la Humanidad.

Pertenezco a una generación que sólo alcanzará a conocer los umbrales de la Era Atómica y sólo puedo vislumbrar sus posibilidades, pero como decía el gran poeta americano Walt Whitman:

"Yo busco trazar el camino de la casa
"Pero dejo la casa a los que vendrán".

Esa es nuestra obligación, a ella debemos consagrarnos.