

FUSION NUCLEAR CONTROLADA

Por VICENTE ROGLA ALTET

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

1. MIRADA A LAS ESTRELLAS

En las ciudades, la luz artificial y también la polución atmosférica nos privan de contemplar una de las más grandes maravillas que nos rodean: el cielo estrellado de una noche serena. Cientos de miles de millones de estrellas se agrupan en nuestra Vía Láctea. Millones de galaxias, como la nuestra, se extienden por el espacio. Aunque sólo una muy mínima parte descubren nuestros ojos desnudos, basta el espectáculo que nos ofrecen, para quedar absortos ante su magnificencia.

La ciencia, con su escalpelo inquisitivo, quita poesía a la Naturaleza, al mostrarnos su verdadero ser; pero, al tiempo que destruye las fantasías sin fundamento, nutre la imaginación con mayor abundancia de sueños posibles, al mostrarnos el misterio, inalcanzable a los sentidos, del cosmos y del microcosmos.

Esas estrellas, que en su lejanía parecen puntos luminosos, son enormes astros con luz propia que brota de ellos sin cesar, durante miles de millones de años, en forma de energía radiante. Y ese derroche de energía cósmica se genera en las entrañas de las estrellas por el proceso microscópico de las reacciones termonucleares.

Tenemos un ejemplo familiar en nuestro Sol, que es una estrella amarilla de mediana masa y diámetro décimo de la media estelar, situada en las proximidades del borde externo de nuestra galaxia espiral.

Nuestro Sol, que siendo insignificante frente al cosmos, es fuente de la vida en la Tierra y de energía acumulada que el hombre ha ido derrochando a lo largo de su historia. La radiación solar sobre la superficie terrestre, que nos ha enviado y enviará sin alteración sensible durante millones de años, es de 2,2 calorías por minuto y por cm^2 normal a su dirección, equivalente a una potencia total recibida por nuestro planeta, de $1,9 \times 10^{13}$ MW. Esa constante energía provocó la aparición de los seres vivientes; es causa de la acción clorofílica de las plantas y, al tiempo que nos proporciona el oxígeno que respiramos, nos da, directa o indirectamente, el alimento que ingerimos; mantiene una temperatura habitable en la superficie terrestre; origina los vientos, la evaporación y la lluvia, y nos regala el agua de los ríos y lagos. El hombre ha aprovechado el agua para el abastecimiento, riegos y energía hidroeléctrica. Pero también ha talado bosques innecesariamente y está utilizando con despilfarro la energía acumulada por el Sol, en forma de carbón mineral y, especialmente, de petróleo y gas natural, cuyas reservas no son, por desgracia, inagotables.

Esta circunstancia, unida a la crisis económica de la elevación de sus precios, lanza al científico a la investigación de nuevas fuentes de energía y de un mayor rendimiento en el uso de las que son habituales, como la obtenida por fisión del uranio.

Entre las nuevas fuentes de energía destaca la fusión nuclear, que está siempre presente a nuestro alrededor y constituye la fuente energética primordial, ya que de ella proviene la radiación del Sol y de las estrellas.

Cabe preguntarse en qué consiste esta energía de fusión de los núcleos, por qué se ha retrasado su desarrollo, qué investigaciones se han realizado y se realizan para utilizarla, qué dificultades hay que vencer para su logro práctico y qué promesas y amenazas encierran para nuestro futuro.

2. LAS FUENTES ENERGETICAS

En un reciente estudio de R. J. Bickerton y B. E. Keen, de la U.K.A.E.A., se estiman las reservas mundiales en las siguientes cifras aproximadas, que se expresan en la unidad anglosajona Q ($1 Q = 10^{18}$ BTU = 3×10^7 MW \times año):

| | | |
|----------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Convenionales | { | Carbón: 150 Q. Hidrocarburos: 7 Q. |
| Fisión nuclear | { | Uranio natural: a) En depósitos terrestres: 200 Q. b) En el mar: 4×10^5 Q. |
| Fusión nuclear | { | Elementos ligeros: Deuterio (D): 10^{10} Q. Litio: a) En depósitos terrestres: 700 Q. b) En el mar: 21×10^6 Q. |

Este cuadro energético de reservas acumuladas, habría que completarlo con la energía total anual que recibe la Tierra por radiación solar: 6×10^5 Q.

El consumo actual del mundo es de 0,2 Q por año, doblando cada veinte años, lo que supone un gasto total de 8 Q hasta el año 2000.

La observación de los datos expuestos es muy alentadora en lo que respecta al total de las reservas energéticas mundiales, y de la energía anual que radia el Sol a la Tierra, frente al consumo previsible, pero se echa de ver la pequeñez de los depósitos de hidrocarburos (petróleo y gas natural), en relación con las restantes reservas y con el aporte anual de energía solar.

La relativa escasez de tales depósitos, el uso desaforado de los mismos y su elevado precio actual, hacen necesario acudir a otras fuentes energéticas.

Las reservas de carbón son considerables, pero la baja calidad de grandes depósitos, la dificultad y escaso rendimiento de la extracción de muchos de ellos, y los problemas en la extensión de su uso, obligan a pensar en otras soluciones, sin desechar la investigación de un empleo más amplio y eficaz del carbón.

Por otra parte, la radiación solar ya es utilizada por la Naturaleza en la superficie terrestre, como ha sido indicado, y su transformación en la forma industrial, más versátil, en energía eléctrica se logra con gran rendimiento en los aprovechamientos hidroeléctricos que se están construyendo por todo el mundo, pero cuyos límites están próximos y previstos. Aplicaciones indirectas de esta radiación como son: la energía del viento, del oleaje, de las mareas y del gradiente térmico.

de los mares, han sido utilizados en pequeña escala y los estudios que se realizan para ampliarlas no parecen conducir a resultados importantes.

La conversión directa en energía eléctrica de la radiación solar que se recibe, es más prometedora y está en plena investigación, habiéndose logrado células de gran rendimiento para viajes astronáuticos, si bien parece reducida, en la superficie terrestre, a utilizaciones de pequeña entidad por la escasa densidad energética de la radiación, y su carácter aleatorio (se precisan grandes superficies normales a la dirección cambiante del Sol, mínima absorción atmosférica y cielos despejados).

Puede citarse la energía geotérmica, cuya proveniencia solar es dudosa, pero su utilización eficaz parece localizada en pequeñas zonas volcánicas.

Quedan, pues, como grandes fuentes energéticas, que son hoy una realidad y una mayor promesa de futuro, las reacciones nucleares.

3. BREVE HISTORIA DE LAS REACCIONES NUCLEARES. INVERSIONES EN FUSION

Es curioso seguir la historia de su conocimiento, que es muy breve.

La radiactividad del uranio fue descubierta por Becquerel (Francia), en 1896. En el año siguiente, Thomson (Inglaterra) probó que el electrón era elemento constitutivo de todos los átomos. Su carga fue medida por Wilson (Inglaterra), en 1903, año en el que Rutherford (Inglaterra) identificó la partícula α con el núcleo del helio. En 1905 estableció Einstein (Suiza) la equivalencia entre masa y energía, en la que hoy día se funda el cálculo del resultado energético de toda reacción nuclear. Las características del modelo atómico fueron expuestas por Bohr (Dinamarca), en 1913. La dualidad onda-corpúsculo, por L. Broglie (Francia), en 1924.

La primera transmutación nuclear inducida y el descubrimiento del protón, se deben al mismo Rutherford, en 1919. En 1932 obtuvo Urey (U.S.A.) el deuterio (D), Chadwick (Inglaterra) el neutrón (n). Anderson (U.S.A.) el positrón (e^+) y Cockcroft y Walton (Inglaterra) lograron, con aceleradores de partículas, gran número de transmutaciones artificiales.

En 1933, Fermi (Italia) descubrió el neutrino y, un año después, la transformación de un núcleo, por la captura de un neutrón.

La fisión nuclear teórica del uranio en cadena, fue establecida por Hahn y Strasmann (Alemania), en 1939. Y tres años después, en 1942, hizo funcionar Fermi, en la Universidad de Chicago, la primera pila atómica autosustentada por fisión del uranio.

Desde entonces, la aplicación práctica de la fisión nuclear a la producción de energía eléctrica ha experimentado un auge extraordinario en todo el mundo, incluida España, y en los próximos años cobrará aún mayor impulso por la elevación de precios y carestía de los hidrocarburos.

En lo que respecta a la fusión nuclear, sus primeros estudios son anteriores a los de la fisión. La primera explicación de la energía de las estrellas, mediante

la fusión de elementos ligeros fue dada por Atkinson y Houtermans, en 1919, y veinte años después se conocían perfectamente las posibles reacciones estelares, y se aplicaban al Sol (Gamow).

Los experimentos en la Tierra se iniciaron inmediatamente después de la guerra mundial, sin lograr, hasta la fecha, establecer una reacción controlada y continua de la fusión. La fusión no controlada, como arma explosiva o bomba H fue, por vez primera, experimentada por U.S.A., en 1950.

La experimentación de la fusión nuclear controlada está en pleno auge, yendo Rusia a la cabeza. Un informe de la A.E.C. norteamericana, de julio de 1973, expresa los esfuerzos de investigación de los distintos países en tantos por ciento:

| | % |
|-----------------------|-------|
| U.R.S.S. | 37,5 |
| Alemania Federal | 16,6 |
| U.S.A. | 15,6 |
| Inglaterra | 7,0 |
| Japón | 6,1 |
| Restantes países | 17,2 |
| | 100,0 |

De estos restantes países destacan: Francia, Italia y Holanda, seguidos, a gran distancia por: Australia, Suecia, Suiza, Dinamarca, Polonia y Checoslovaquia. En España se han realizado algunos estudios teóricos y también investigaciones en campos afines (Magnetohidrodinámica), pero no existen instalaciones experimentales para ensayos de la fusión nuclear.

Estas instalaciones son muy onerosas. Sólo en Estados Unidos de América, el presupuesto estatal para investigar la fusión alcanzaba, en 1970, la cantidad anual de 3,7 millones de dólares, al que hay que agregar un millón más, proveniente de la industria privada. En 1974 se invirtieron $\$ 135 \times 10^6$, y se han solicitado $\$ 1,34 \times 10^9$ para el quinquenio 1975-1979.

Las actuales circunstancias han acrecentado el interés y el esfuerzo de todas las naciones en la fusión controlada; y prueba de ello es el gran número de comunicaciones (más de un centenar) y la expectación producida por la conferencia internacional sobre el tema, que ha tenido lugar del 14 al 16 del presente mes de mayo de 1975, en la Universidad de Ann Arbor (Michigan, U.S.A.).

4. NOCIONES SOBRE LAS REACCIONES NUCLEARES

Es bien sabido que nos representamos el átomo de un elemento químico en estado neutro, por una nube de Z electrones (Z es el número atómico que caracteriza el elemento y suele unirse a su símbolo como subíndice), que giran en torno de un núcleo constituido por A nucleones, de los cuales Z son protones y $A-Z$ neutrones, siendo A el número de masa (que se une al símbolo del elemento como un superíndice). Un mismo elemento Z puede tener diversos isótopos, teniendo cada isótopo un número distinto de neutrones ($A-Z$).

Las masas respectivas son (para velocidades pequeñas frente a la de la luz):

Neutrón ${}_0n^1$: $m_n = 1,6747 \times 10^{-24}$ gramos.

Protón ${}_1p^1$: $m_p = 1,6724 \times 10^{-24}$ gramos.

Electrón $e^- = {}_{-1}e^0$ ó positrón $e^+ = {}_1e^0$: $m_e = 0,9108 \times 10^{-27}$ gramos.

Resulta pequeñísima $\sim 1/1.800$ la masa del electrón frente a la de un nucleón, y, por otra parte, prescindiremos de los electrones corticales al exponer las reacciones entre núcleos.

Obsérvese que la masa del neutrón es parecida a la del protón, pero ligeramente superior.

El neutrón no posee carga eléctrica, pero la carga de los protones y positrones (positiva) y la del electrón (negativa), tienen el mismo valor absoluto:

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ coulombios}$$

Las energías suelen medirse en eV = carga $e \times 1$ voltio, que es el incremento de energía cinética, que adquiere en el vacío un electrón entre dos puntos, cuya diferencia de potencial es de un voltio,

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ julios} = 1,6 \times 10^{-12} \text{ ergios}$$

empleándose los múltiplos:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \cdot \text{eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \cdot \text{eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \cdot \text{eV}$$

Las partículas cargadas se atraen (signos contrarios) o repelen (signos iguales) entre sí, de acuerdo con la Ley de Coulomb, pero a distancias del orden de su radio (electromagnético) aparece una atracción que prepondera enormemente y se ejerce sin distinción entre nucleones, estén o no estén cargados.

Estos radios son, aproximadamente:

$$\text{Para el electrón: } 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

$$\text{Para un nucleón: } 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = R_0$$

lo que da al nucleón una densidad aproximada de 10^{14} gramos/cm³.

Los nucleones (protones y neutrones) que forman el núcleo de un elemento están fuertemente empaquetados, ocupando el menor espacio posible, por lo que el conjunto se aproxima a una esfera. Puede aceptarse que el volumen de esta esfera es proporcional al número A de nucleones y su radio R :

$$R = R_0 \cdot A^{1/3}$$

Las distancias entre núcleos de átomos próximos, de sólidos y líquidos, es relativamente muy elevada, del orden de $10^5 R_0$, lo que trae tres consecuencias:

a) No existen fuerzas "nucleares" que los liguen. Sólo actúa entre ellos la repulsión coulombiana. Los átomos se combinan en moléculas por acciones

electromagnéticas y de intercambio, especialmente de la nube electrónica que rodea los núcleos, cuya última corteza es responsable de las reacciones químicas.

b) Los cuerpos que nos rodean, y nosotros mismos, están constituidos por puntos en los que se concentra la masa (los núcleos), separados por enormes distancias relativas. Somos como "vacíos". Es ilusión nuestra continuidad. Es pura apariencia el contacto físico, la caricia de la mujer amada. Cuando intentamos tocar un cuerpo, sólo logramos repulsiones entre distintos átomos que se aproximan, pero que aún se hallan a grandes distancias frente al tamaño de sus núcleos.

c) La pequeñez nuclear y sus enormes separaciones dificultan el logro de acertar plenamente, de hacer "blanco" en un núcleo, por bombardeos con otros núcleos. A este efecto se une (entre otros) el de las repulsiones electrostáticas, por lo que un neutrón, que carece de carga, penetra en los núcleos más fácilmente que un protón. Pero conviene hablar, brevemente, de las fuerzas de enlace entre nucleones.

Las fuerzas que mantienen la cohesión de los nucleones que constituyen un núcleo son muy grandes y no pueden explicarse "clásicamente" (como tampoco las órbitas electrónicas). Es preciso acudir a la Mecánica Cuántica, que está fuera del marco divulgatorio que nos hemos trazado para el fin concreto de la fusión nuclear controlada.

Por ello, hemos omitido los nombres ilustres de sus fundadores, Schrödinger y Heisenberg, Pauli y otros. Por la misma razón, no hemos mencionado las restantes partículas elementales, especialmente los muones y piones, ni a sus descubridores.

Estas fuerzas atractivas entre los nucleones de un núcleo no son proporcionales a A^2 , como pudiera parecer, sino simplemente a A . La energía de unión es muy elevada, de 8 a 10 MeV por nucleón, con independencia de su carga eléctrica, resultando unas 10^{36} veces mayores que las debidas a la atracción gravitatoria. La fuerza electrostática entre p y n , o entre n y n , resultaría nula; y sería repulsiva entre p y p . La energía de las fuerzas magnéticas (hay que tener en cuenta que el *spin* o giro de los nucleones —y de los electrones— convierte a todas ellas en dipolas magnéticos) es de mayor cuantía, unos 30 KeV, pero despreciable frente a las energías de enlace observadas.

Aunque las fuerzas nucleónicas de enlace son muy elevadas, existe siempre una probabilidad, en Mecánica Cuántica, de que un nucleón salte la barrera de potencial y escape del núcleo. Cuando esta probabilidad es considerable y, por tanto, medible, nos encontramos con núcleos radiactivos que espontáneamente rompen su estabilidad. Como la probabilidad es constante, el número de átomos que se desintegran es proporcional al número de núcleos que no se han desintegrado.

Por esta razón, los núcleos radiactivos se caracterizan por la llamada vida media de los mismos, que es: el tiempo que requieren para que se desintegre la mitad de los que restan sin desintegrar.

Pero veamos el cálculo práctico de la energía de enlace.

La energía de enlace entre nucleones se calcula a partir de la famosa ecuación de Einstein, que nos dice que la desaparición de una masa m , medida en gramos, equivale a la aparición de una energía, medida en ergios, igual al produc-

to mc^2 , siendo c la velocidad de la luz en el vacío, que es aproximadamente:

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/seg}$$

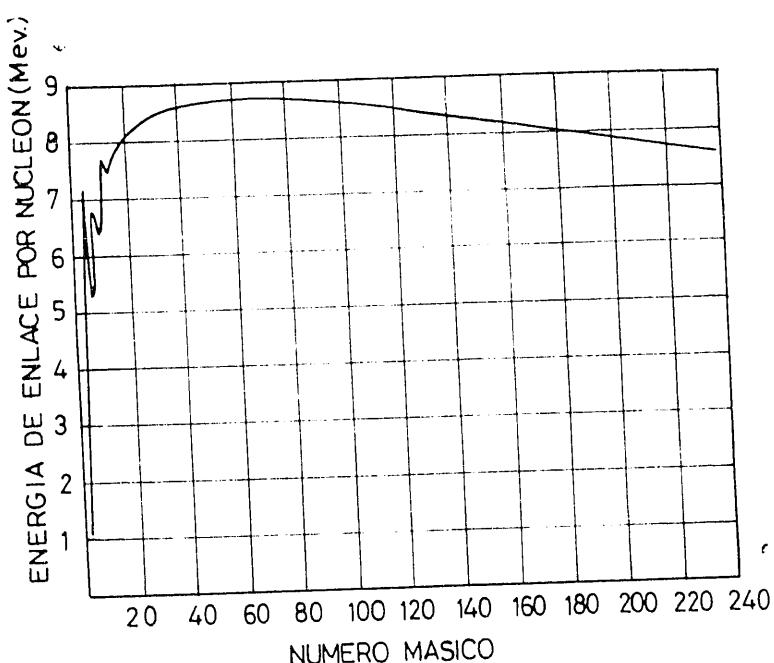
Lo que significa que cada gramo de materia equivale a:

$$9 \times 10^{20} \text{ ergios} = 9 \times 10^{13} \text{ julios}$$

Así, pues, si M representa la masa observada de un núcleo atómico, compuesto de Z protones y $A-Z$ neutrones, cuyas masas, m_p y m_n , se establecieron anteriormente, la energía de enlace, por nucleón, será (en ergios):

$$E_v = \frac{c^2}{A} [Z m_p + (A - Z) m_n - M]$$

La adjunta figura 1, que aparece en todos los libros de Física Nuclear, nos da esta energía E_v , expresada en MeV, en función de la masa atómica A de los elementos reales.



Obsérvese que la curva es fuertemente creciente para los elementos ligeros, y decreciente para los pesados (con un máximo para $A = 60$).

Consiguientemente, podrá haber una desaparición de masa, convertida en energía: bien uniendo dos elementos ligeros para formar uno de mayor masa atómica (fusión), bien rompiendo un elemento pesado para formar otros, cuyos fragmentos superen la energía $A E_v$ inicial de enlace (fisión).

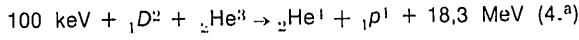
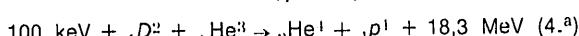
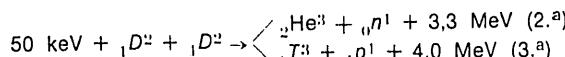
Es decir, será obtenida energía de fusión en la unión de los núcleos de masas atómicas A_1 y A_2 , formando A_3 , siempre que:

$$E = A_3 E(A_3) - [A_1 E(A_1) + A_2 E(A_2)] > 0$$

Sin embargo, para que A_1 y A_2 se unan, formando A_3 , será preciso dotar a los núcleos primeros, que colisionan, de una cierta energía que venza su repulsión

inicial coulombiana y, más tarde, la barrera de potencial de las fuerzas nucleónicas que puedan oponerse.

Así, por ejemplo, colocando en el primer miembro esta energía que requiere obtener su unión y, en el segundo, la energía E liberada, se exponen a continuación las cuatro reacciones más importantes a nuestro objeto:



Las ecuaciones segunda y tercera tienen igual probabilidad. El símbolo ${}_1T$ que aparece en la primera y tercera es el del tritio, que es el isótopo 3 del hidrógeno (el 2 es el deuterio D , y el núcleo del hidrógeno 1 es el protón p). El tritio es radiactivo, con vida media de doce años. A causa de esta corta vida, y aunque se genera en la atmósfera por el choque de los rayos cósmicos y cae a la superficie terrestre con la lluvia, sólo se le encuentra, en escasa cantidad, en aguas superficiales o en depósitos de agua subterránea fluyente o de muy reciente formación.

La energía que hay que comunicar a los núcleos para que se fundan entre sí, que aparece en el primer miembro, es bastante elevada. Puede conseguirse, previa ionización de los átomos neutros, con los aceleradores de partículas, pero no son estas máquinas eficientes en el sentido de aprovechar el saldo energético positivo, ni permiten el autosostenimiento de las reacciones (no es ese su objeto).

Pero si calentamos suficientemente los núcleos, provocando su estado gaseoso, podemos producir colisiones de suficiente energía. A este fin, comenzemos por expresar su energía en función de la temperatura del gas. Sabido es que, con un reparto maxwelliano de las velocidades, la energía cinética que corresponde a la velocidad más probable es simplemente:

$$E_p = kT$$

siendo k la constante de Boltzmann:

$$k = 1,38 \times 10^{-16} \text{ ergios/grado Kelvin}$$

y siendo T la temperatura absoluta en grados Kelvin. Recordando la equivalencia, en ergios, de un eV, resulta:

$$T(^{\circ}\text{K}) = \frac{1,6 \times 10^{-12} \text{ (erg./eV)}}{1,38 \times 10^{-16} \text{ (erg./}^{\circ}\text{K)}} \cdot X \text{ (eV)} = 1,16 \times 10^4 \times X$$

Así resulta que para una temperatura ambiente normal de 20º C (que corresponde a los llamados neutrones térmicos):

$$X = \frac{293}{1,16 \times 10^4} = 0,0253 \text{ eV}$$

mientras que las temperaturas absolutas de las reacciones de fusión indicadas son:

$$T(1.^a \text{ ec.}) = 1,16 \times 10^4 \times 10^4 \approx 100 \text{ millones de grados.}$$

$$T(2.^a \text{ y } 3.^a \text{ ec.}) \approx 500 \text{ millones de grados.}$$

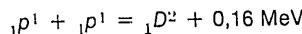
$$T(4.^a \text{ ec.}) \approx 1.000 \text{ millones de grados.}$$

A estas elevadísimas temperaturas los núcleos están totalmente ionizados, sin sus electrones orbitales que les acompañan con independencia, y constituyen en su conjunto el llamado "plasma". Resulta así, el plasma, un excelente conductor, cuyas propiedades se estudian en Magnetohidrodinámica.

Comoquiera que dichas reacciones nucleares son enormemente energéticas (compárese la energía de los primeros miembros, con la liberada en los segundos) resulta posible que, una vez iniciadas, se mantenga dicha elevadísima temperatura y la reacción prosiga mientras se la alimente con los núcleos a fusionar, tal como ocurre con un carburante que se quema en el aire. De ahí el nombre de "termonucleares", con el que se designan las reacciones de fusión.

Estas condiciones se dan en las estrellas, teniendo bien en cuenta que las temperaturas calculadas lo son a base de la velocidad más probable, existiendo velocidades superiores a la necesaria, con menor probabilidad, a temperaturas muy inferiores, lo que significa: reacciones térmicas a menores temperaturas, con una mayor lentitud.

Aunque en el espacio interestelar de nuestra galaxia sólo existan, en general, unos pocos nucleones por centímetro cúbico, hay también en ella acumulaciones que forman nebulosas. Es en su seno donde se indican las estrellas (protoestrellas) por la atracción gravitatoria; y hoy en día puede asistirse al proceso de su nacimiento. En este proceso se va incrementando la masa de la protoestrella y la temperatura interior, provocándose la primera reacción de fusión:

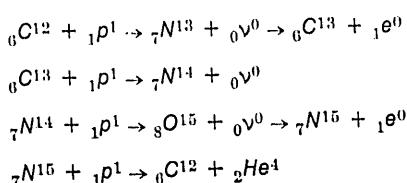


ya que el hidrógeno es el elemento más abundante en nuestro Universo.

La presión de radiación de esta reacción nuclear, y de las subsiguientes, se opone al crecimiento de la estrella y limita su masa, que oscila entre 10^{29} y 10^{32} kilogramos, dando lugar a una estrella gigante roja, que va cambiando de color al aumentar su temperatura y las reacciones de fusión posibles, mientras que disminuye su volumen y se incrementa su densidad permaneciendo gaseosa. Las estrellas son muy sensibles a las, relativamente, pequeñas diferencias de sus masas iniciales, dependiendo de tales masas el transcurso evolutivo de su vida y también su duración, que es breve (10^6 años) para las pesadas, y muy extensa (10^{13} años) para las livianas.

Nuestro Sol tiene una masa de 2×10^{30} Kg, con vida total de 10^{10} años, de la que ha transcurrido aproximadamente la mitad, siendo lo más probable que al fin se transforme en *nova*. La densidad media del Sol es de $1,45 \text{ gr/cm}^3$, con densidad máxima en el centro de 150 y temperatura en el mismo de 20 millones de grados.

Parece que, en la actualidad, las reacciones nucleares más abundantes en su seno siguen el llamado ciclo del carbono:



El carbono, que actúa de catalizador, se regenera al fin del ciclo. Este tiene un balance energético de 20 MeV, y da como resultado un núcleo de helio y dos positrones, partiendo de 4 protones, con la pérdida adicional de unos 4 MeV en forma de neutrinos ν .

El Sol radia energía electromagnética como un cuerpo negro que alcanza una temperatura de 5.750° K (superficie solar). Además, emite un plasma que en parte es atrapado magnéticamente por la Tierra, formando los anillos de Van Allen y en parte escapa y llega a la alta atmósfera, dando lugar a las auroras en las regiones polares. Estas emisiones no son constantes ni uniformes en la superficie donde se forman enormes tempestades con protuberancias y las conocidas "manchas solares" de ciclo undecenal.

Por lo expuesto, las estrellas son máquinas cuya energía proviene de reacciones de fusión, autosustentadas: por el aporte de elementos fusionables, y por la continuidad de la elevada temperatura, a causa del confinamiento gravitatorio del plasma.

Muy distintas a las condiciones estelares son las que requiere la fisión de algunos elementos pesados. El más importante elemento natural fisionable es el uranio, cuyo estado natural actual, en los yacimientos del planeta, es el de la siguiente mezcla de isótopos radiactivos:

| | Porcentaje | Vida media en años |
|-----------------------------|------------|--------------------|
| $^{92}\text{U}^{234}$ | 0,006 | $2,25 \times 10^5$ |
| $^{92}\text{U}^{235}$ | 0,712 | $8,8 \times 10^8$ |
| $^{92}\text{U}^{238}$ | 99,282 | $4,5 \times 10^9$ |

Como es lógico, su abundancia relativa es tanto menor cuanto más pequeña resulta su vida media. El producto final del uranio 238 es el plomo, siempre presente en los yacimientos rocosos y cuya proporción indica la antigüedad en la roca; de donde se deduce que las rocas más viejas de la corteza terrestre tienen cerca de 5×10^9 años.

Puede observarse la muy escasa radiactividad del uranio natural. Así, el isótopo más abundante, el 238, sufre la fusión espontánea de 24 núcleos por gramo y por hora, pero estos pocos neutrones liberados son de gran importancia para la iniciación de la cadena.

El interés práctico de la fisión nuclear estriba en la considerable energía que se produce y en que la reacción nuclear, que está iniciada por neutrones, es capaz de producir mayor número de neutrones de los que consume, llegándose a la reacción en cadena autosustentada.

Los neutrones que producen la fisión pueden clasificarse según su energía cinética en:

- Térmicos, en equilibrio cinético con el medio, cuya energía oscila entre 0,025 eV para unos 22° C a un 0,1 eV para 900° C.
- Lentos, de 0,1 a 1 eV.
- Intermedios, de 1 eV a 0,1 MeV.
- Rápidos, de 0,1 MeV en adelante.

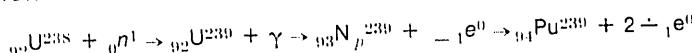
Los neutrones que nacen de la fisión del uranio son rápidos: de 1 a 10 MeV

pero la tecnología que se ha industrializado en primer lugar corresponde a los neutrones térmicos, y esto ha exigido la presencia de un moderador que amortigüe la velocidad neutrónica. El moderador no debe reaccionar con los neutrones, pero sí absorber por choque, en forma de calor, una parte considerable de su energía cinética, lo que requiere núcleos ligeros. Se emplean compuestos de hidrógeno, deuterio y carbono, principalmente. El primer moderador de la historia (pila Fermi, de Chicago, en 1942) fue de grafito.

La citada preferencia por los reactores con neutrones lentes es debida: a que la probabilidad de captura (sección eficaz) de estos neutrones por el combustible, uranio 235, es muy elevada e inversamente proporcional a su velocidad (raíz cuadrada de su energía); a que dicho isótopo 235 del uranio produce más neutrones de los que absorbe provocando la reacción en cadena; y a que el manejo de estos reactores es muy simple y relativamente seguro, bastando introducir más o menos en el núcleo, para disminuir o aumentar el número de neutrones existentes, las llamadas barras de control (de cadmio o de acero al boro) que tienen la propiedad de absorber los neutrones lentes sin producir nuevos neutrones, y quedando, tras breve emisión radiactiva, en el estado inicial.

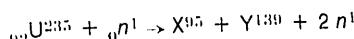
En cambio, el uranio 238 necesita neutrones de 1 MeV de energía para capturarlo (salvo estrechos picos de resonancia con neutrones térmicos).

La absorción de un neutrón, en este caso:



quedando plutonio, que aunque radiactivo (emisión de partículas α o núcleos de helio y conversión en $_{92}^{235}\text{U}$), tiene una larga vida media de $2,4 \times 10^4$ años. El plutonio es extraordinariamente venenoso para el hombre.

Mientras que la captura de un neutrón por el citado isótopo 235 produce fisión en cadena:



COLLECCIÓN DE LIBROS DE FÍSICA

BIBLIOTECA

Se ha puesto, como ejemplo, una reacción típica, en que sólo se dan las masas de los productos de fisión. En la realidad se originan más de 80 productos primarios de fisión (con masas de 72 a 160), que son altamente radiactivos y forman en muy poco tiempo unos 200 isótopos, también radiactivos, de más de 30 diferentes elementos.

El número medio de los nuevos neutrones a que da lugar la fisión del $_{92}^{235}\text{U}$, es de 2,5.

Por su parte, el plutonio, que no se encuentra en estado natural, se comporta ante los neutrones exactamente como el uranio 235, si bien, el número medio de nuevos neutrones producidos por su fisión es 3.

Ambos, $_{92}^{235}\text{U}$ y $_{94}^{239}\text{Pu}$, se comportan semejantemente y son apropiados para fabricar con ellos bombas de fisión. La energía que producen es del orden de los 200 MeV, de los cuales 185 se obtienen instantáneamente y el resto al cabo de unos minutos.

Teniendo en cuenta el número de fisiones y sus altas densidades, puede de-

cirse, aproximadamente, que el consumo de 1 gramo diario de estos elementos equivale a una potencia calorífica de 1 MW.

En el uranio natural vimos que sólo existe un 7 por 1.000 del isótopo 235. El aumento de esta proporción natural se denomina enriquecimiento, lo que se logra prácticamente por dos procesos: difusión gaseosa (el más empleado hasta la fecha) y por centrifugación (ya ensayada con éxito). Un ligero enriquecimiento que alcance el 3 por 100 es muy empleado en los reactores de potencia, pero no hay límite para este enriquecimiento que puede llegar al 100 por 100 (bomba de uranio).

A cada valor del enriquecimiento (incluido el 7 por 1.000 del uranio natural) corresponde un tamaño crítico, para el cual se autosostiene la reacción en cadena, cuyo tamaño depende en gran medida de las absorciones y pérdidas y de la geometría de los elementos del reactor, disminuyendo si se usa un reflector de neutrones alrededor del núcleo. Para una esfera maciza y desnuda, el radio pasa: de unos 700 cm para el uranio natural a unos 15 cm para enriquecimiento 100 por 100.

Un actual reactor de potencia exige, pues, en general: uranio enriquecido, moderador, reflector, barras de control, un fluido refrigerante que lleve el calor producido, bien directamente o por intercambiadores de calor, a una turbina convencional (con su condensador refrigerado) que mueve un alternador productor de energía eléctrica.

Cuando los elementos combustibles pierden eficacia (se envenenan) hay que regenerarlos para volverlos a utilizar, convirtiéndose finalmente en desechos radiactivos, cuya eliminación ofrece problemas.

El uranio natural, con grafito como moderador, no se usó solamente en la pila Fermi, sino en centrales nucleares de potencia, singularmente en Inglaterra, Francia y España (Vandellós), siendo refrigerante el gas anhídrido carbónico, con intercambiador.

Pero el tipo de centrales nucleares que más se emplea hoy, es el de uranio enriquecido, moderado y refrigerado con agua, bien a presión, bien en ebullición; utilizando en el primer caso intercambiadores de calor.

Para aumentar el bajo rendimiento termodinámico es preciso incrementar la temperatura del refrigerante a su salida del núcleo, y en esa dirección se camina (reactores de alta temperatura), a menos que se utilice como calefacción de ciudades (Suecia) la parte de calor no invertida en energía eléctrica.

También se está poniendo a punto la tecnología de los reactores rápidos reproductores, que permiten disminuir el volumen del núcleo y aumentar el rendimiento de la reacción. Consisten en un núcleo combustible altamente enriquecido con U^{235} o Pu^{239} , donde nacen los neutrones rápidos que alcanzan, sin moderador, la envoltura fértil de U^{238} que va transformándose en plutonio, fabricando más combustible del que consumen (reproductores). Para controlar la población de neutrones, evitando que se convierta el reactor en una bomba, ya no sirven las barras de cadmio o boro. Hay que utilizarlas de uranio 238 y poder separar una parte del núcleo.

Se cree que en 1985, la mitad de los reactores de potencia serán reproductores rápidos.

5. TECNOLOGIA DE LAS REACCIONES DE FUSION CONTROLADAS

Hoy día se concibe un reactor nuclear de fusión (de primera generación), como el conjunto de un plasma constituido por núcleos de deuterio ${}_1^2D$ y tritio ${}_1^3T$ y de electrones libres, conteniendo n núcleos por centímetro cúbico a temperatura de 100 millones de grados mantenida durante un tiempo de τ segundos, tales que se cumpla la condición de Lawson, expresada en 1957:

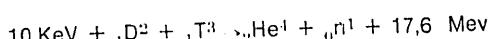
$$n \tau > 10^{14} \text{ (núcleos} \times \text{seg/cm}^3\text{)}$$

Es decir: que la temperatura de 100 millones de grados hay que mantenerla un mínimo de τ segundos en un plasma que contenga n nucleones por centímetro cúbico.

Esto supone que el reactor funciona a embolados, como un motor de explosión, durando cada pulsación τ segundos.

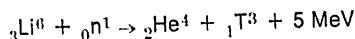
El criterio de Lawson supone: un rendimiento de 1/3 entre la diferencia de la energía obtenida en bruto menos la energía empleada en el mantenimiento, partida por aquélla.

Se ha decidido la reacción, antes expresada en ecuación 1.^a, del deuterio y el tritio:



por varias razones:

- La reacción tiene lugar a temperaturas inferiores a las demás y es muy energética.
- El deuterio es muy abundante en la naturaleza, pues constituye el $1,5 \times 10^{-4}$ del agua del mar (15 litros de D_2O por cada 10 m³ de agua natural), y es muy fácil la separación entre d y H , porque el deuterio pesa el doble que el hidrógeno, en contraste con la dificultad tecnológica de separar el U^{235} del U^{238} , cuyas masas son muy aproximadas.
- El tritio radiactivo no existe apenas en nuestro planeta, pero puede generarse, incluso en el propio reactor, si se envuelve su núcleo en un recinto de paredes de litio; ya que el neutrón resultante de la reacción expuesta reacciona energéticamente con el litio del siguiente modo, con neutrones lentos:



y también el isótopo Li^7 es abundante, porque constituye el 7 por 100 del litio natural, cuyos recursos son prácticamente inagotables. El litio 7 también puede producir tritio al reaccionar con neutrones rápidos.

Para que pueda alcanzarse y mantenerse durante el tiempo τ , la temperatura de 10^6 °K (producida por potentes campos eléctricos alternativos u otros medios),

es preciso que el plasma no toque las paredes del recinto que lo cobija, tanto porque no existe sólido que pueda resistirla, como porque el contacto físico con una pared material enfriaría el plasma.

Hay, pues, que "confinar" el plasma en el vacío. Este confinamiento se logra en la actualidad de dos maneras:

- Magnéticamente.
- Inercialmente.

El confinamiento magnético se consigue mediante campos de inducción, provenientes del propio plasma y de potentísimos solenoides mantenidos en estado de superconducción. En el propio plasma, cuando una corriente intensa lo recorre (efecto Pinch) y debido a la atracción bien conocida entre corrientes paralelas, se produce una resultante de compresión que alcanza una atmósfera en la superficie de un plasma cilíndrico de 1 cm de radio recorrido por 100.000 amperios (provenientes de la descarga de un condensador de unos 50 μ F). Y hay que recordar que esta presión es proporcional al cuadrado de la corriente. Los campos externos producidos por un bobinado mantenido en superconducción (para evitar el efecto Joule y limitaciones de corriente), alcanzan inducciones hasta de 125 kilo-gauss.

Teniendo en cuenta la ecuación elemental:

$$\vec{F} = \frac{q}{c} \vec{V} \wedge \vec{B}$$

correspondiente a la fuerza (en dinas) con la que actúa un campo estático de inducción \vec{B} (gauss), sobre un nucleón de carga q (u.e.s. o fraklin) y de velocidad \vec{V} (cm/seg), siendo c (3×10^{10} cm/seg) la velocidad de la luz en el vacío, se demuestra fácilmente que tal nucleón tiende a enrollarse en torno a las líneas del campo magnético, girando en torno de ellas con velocidad angular:

$$\vec{\omega} = \frac{q \vec{B}}{m \cdot c}$$

siendo su masa m (gramos) y conservando: tanto el módulo de \vec{V} como la proyección de su velocidad sobre las líneas del campo.

Cuando existe un gradiente de campo y éste aumenta, los nucleones (y electrones) son rechazados hacia campos magnéticos más débiles (efecto "espejo", que causa los anillos de Van Allen).

Los confinamientos magnéticos pueden ser abiertos o cerrados. Entre éstos, el más prometedor en la actualidad es el llamado "tokamak" (que estudian en Rusia y en U.S.A.), en el cual el plasma tiene forma toroidal, y está contenido por efecto Pinch sumado al de dos bobinados: uno distribuido en la envolvente tórica, y otro exterior y discontinuo que produce un intenso campo según el eje de revolución del toro.

Comoquiera que los choques entre núcleos cambian bruscamente la dirección

de sus velocidades y tienden entonces a escapar del confinamiento (como ocurre en la colisión de un núcleo con un electrón que produzca un átomo o núcleo neutrino), hay interés en mantener el menor número posible de núcleos por centímetro cúbico, llegándose a la solución de compromiso:

$$n = 10^{14} \text{ núcleos/cm}^3$$

$$\tau = 1 \text{ segundo}$$

Se han alcanzado ya, separadamente, los valores deseados de T , n , τ , pero todavía no se han conseguido los tres valores simultáneos. Se espera alcanzarlos entre los años 1980 y 1982, con tokamaks de mayores dimensiones, en los que habrá una disminución de pérdidas de energía (inestabilidad macroscópica y microscópica del plasma, radiaciones de aceleración o frenado —bremsstrahlung— y escape de partículas del confinamiento). El único escape, imposible de evitar, magnéticamente, y además deseable, es el de los neutrones, que al reaccionar con la pared envolvente del litio, producen el tritio deseado.

Se espera que estos reactores puedan industrializarse hacia 1990.

En cuanto al confinamiento inercial, se emplea en la bomba de hidrógeno, y hoy día está adquiriendo gran auge para su uso en reactores. Se trata de comprimir externamente (implosión), del orden de mil veces una pastilla sólida esférica de $D+T$. La pastilla cede y colapsa hacia dentro, con velocidad de unos 350 Km/seg, bajo una presión de 10^{12} atmósferas, alcanzándose la temperatura deseada en el interior de la pastilla y una densidad correspondiente a:

$$n = 10^{24} \text{ núcleos/cm}^3$$

al que corresponde según Lawson:

$$\tau = 10^{-12} \text{ segundos} = 1 \text{ picosegundo}$$

Esto piensa lograrse con impulsos de láser de una docena de haces convergentes en la pastilla, provenientes probablemente de un cristal de neodimio. Parece que va a conseguirse en este mismo año impulsos láser de 10^6 julios y de la duración requerida del picosegundo.

Por último, se están ensayando con éxito las esferas huecas de $D+T$ sólido, con incremento en la eficiencia.

Se piensa que los reactores de fusión de la segunda generación, emplearán como combustible el deuterio puro, de acuerdo con las cuatro ecuaciones antes expuestas y que actuarían simultáneamente, sin producción ni consumo de elementos radiactivos, como el tritio. También se especula sobre una tercera generación que utilizaría el ciclo solar del carbono.

6. COMPARACION ENTRE REACTORES DE FUSION Y DE FISION

a) Dificultades tecnológicas.

En principio y en sí misma, la tecnología de la fisión nuclear es mucho más simple que la de fusión, y buena prueba de ello es que sólo transcurrieron tres

años desde el descubrimiento de la reacción de fisión en cadena del uranio, hasta su aplicación práctica en la Pila Fermi, mientras que la fusión, cuya previsión teórica es anterior, aún no ha sido plenamente lograda.

Sin embargo, la separación del isótopo U^{235} del U^{238} , cuya diferencia en peso es muy pequeña, presentó grandes dificultades, lo que no sucede con la fusión.

Una causa obvia de graves problemas tecnológicos de la industrialización de la fisión, ha sido la necesidad de dispositivos complejos de seguridad para prevenir escapes radiactivos y accidentes, lo que no ha lugar con la fusión prevista.

b) *Peligro de explosión.*

Con los actuales reactores de fisión con neutrones térmicos, el peligro de explosión es prácticamente nulo, y lo mismo ocurre con la fusión.

No así con los reactores rápidos regeneradores de próximo futuro en la fisión, cuya tecnología se complica, y se está poniendo a punto, para evitar en lo posible tal riesgo.

c) *Contaminación ambiental.*

La posibilidad de escapes contaminantes del ambiente atmosférico y del agua de refrigeración existe con los actuales reactores, pero es muy pequeña la probabilidad de que ocurran por los tres niveles de seguridad adoptados, y es, además, un riesgo que es preciso correr, por la escasez de otras fuentes energéticas.

El riesgo disminuye extraordinariamente en las centrales de fusión. El único elemento radiactivo (y ello en los reactores de primera generación) es el tritio que se consume en su proceso reactivo, y su posible escape daría lugar a riesgos incomparablemente menores.

d) *Almacenamiento de desechos radiactivos.*

Es éste un problema tecnológico de los actuales reactores que aún no está totalmente resuelto. Entre estos desechos que, hasta ahora, no han podido ser, ni suprimidos, ni utilizados, están: el estroncio 90 (vida media, veinticinco años), el cesio 137 (treinta y siete años) y el iodo 129 (3×10^7 años), que son sólidos peligrosos, que hoy se envuelven en cemento y cajas metálicas atenuantes e impermeables, que se echan en fosas marinas o se entierran en minas abandonadas, carentes de probables corrientes de agua. Se habla incluso, como solución definitiva, en enviarlos al Sol mediante cohetes propulsores.

En cambio, la fusión no da desechos radiactivos. Únicamente la propia estructura, bombardeada por neutrones de escape, pudiera ser origen de radiactividad posterior.

e) *Energía obtenida.*

La fisión de 1 gramo de U^{235} da lugar, según vimos, a 2×10^{10} calorías, mientras que la fusión de 1 gramo de la mezcla D + T (primera generación) produce 11×10^{10} calorías. O sea, del orden de 5,5 veces más que la fisión.

A igualdad de peso de combustible, se obtiene mayor energía de la fusión.

f) *Abundancia y costo de obtención del combustible.*

Ya vimos la relativa abundancia del uranio en depósitos terrestres. La extracción del mineral se hará más costosa a medida que haya que recurrir a yacimientos menos ricos en uranio y especialmente cuando se emplee el agua del mar para extraer de ella el uranio disuelto. Este uranio disuelto está muy diluido (unos $3,5 \times 10^{-3}$ gramos/cm³), pero existe en proporción apreciable. Es curioso que un reactor refrigerado por agua del mar consuma menos combustible que el que pasa por su condensador.

El precio actual del uranio es de unos 5 dólares por libra, pero aunque la citada extracción multiplicara por 20 su precio, aún sería pequeña su influencia en el costo total de la energía eléctrica producida en una central nuclear.

De todos modos frente a la abundancia de elementos ligeros fusionables y la pequeñez de su costo, el uranio aparece como relativamente escaso y caro.

El costo del combustible de fusión sería, prácticamente gratuito. Su precio no puede ser nulo al principio, por la necesidad de amortizar los costosísimos ensayos, pero tendería hacia cero.

g) *Transformación en energía eléctrica.*

La transformación actual se basa en la utilización de la fuente calorífica de la energía nuclear, transformada en eléctrica, mediante un ciclo termodinámico normal que contiene el intercambiador de calor como fuente, condensador y turbina acoplada a un alternador. Es decir: como si se tratase de una central térmica convencional, en la cual el intercambiador es la caldera.

El rendimiento del ciclo en las actuales centrales nucleares es pequeño porque el salto de temperatura entre refrigerador y caldera es inferior al de una térmica normal.

Se piensa aumentar este rendimiento en los reactores calientes en estudio y especialmente lo será en los reactores rápidos refrigerados por metal líquido. En varios países, España entre ellos, se estudia la transformación directa en energía eléctrica del metal fluente, mediante máquinas lineales de inducción, y la conversión, en energía cinética del propio metal, del calor que contiene. Estos estudios podrían dar lugar a conversiones muy eficientes y seguras (ninguna pieza móvil).

Pero en este aspecto de la conversión directa en energía eléctrica, resulta mucho más simple la obtención a partir de un plasma que contiene, separadamente, electrones negativos y núcleos positivos. Es decir: que la fusión simplificará dicha conversión directa.

7. APLICACIONES DE LA FUSIÓN

a) *Reactores híbridos.*

Una de las primeras aplicaciones de la fusión nuclear podría ser la obtención de reactores híbridos. Podría provocarse un exceso neutrónico en la reacción D + T, que fuese origen de la generación de plutonio a partir de uranio 238, como ocurri-

rá en los rápidos generadores. Podría, pues, pensarse en una utilización híbrida de la fusión y la fisión. Aquella ocuparía, por ejemplo, la región central, y los neutrones incidirían sobre una envoltura de uranio 238 (o de torio 232) originando plutonio 239 (o uranio 233, que es asimismo fisionable).

b) *Producción de combustibles químicos sintéticos.*

La fusión permite la descomposición del agua en sus elementos constitutivos, hidrógeno y oxígeno. Este podría ser devuelto a la atmósfera para purificarla, y aquél empleado en estado gaseoso o líquido, como el mejor combustible químico del porvenir.

También pueden aprovecharse las altas temperaturas de la fusión para producir síntesis orgánicas (como la ya estudiada del metanol) que hoy se obtienen por destilación de hidrocarburos y gasificación del carbón.

c) *Potabilización del agua del mar.*

Otro uso inmediato, dado el escaso costo de la fusión, sería la obtención del agua dulce por evaporación del agua del mar y consecuente condensación.

d) *Obtención de minerales marinos.*

Consecuencia de esta evaporación sería la recuperación del enorme número de minerales disueltos en el mar, especialmente los combustibles nucleares: litio (ligero) y uranio (pesado).

e) *Transmutación de desechos radiactivos.*

También, a las mencionadas altas temperaturas se provocan transmutaciones que pueden convertir, en productos inofensivos, los desechos radiactivos, que constituyen el mayor de los problemas de la actual tecnología nuclear.

f) *Aplicación a la Obras Públicas.*

Como consecuencia de la fusión controlada, podría obtenerse una eyeción de plasma a temperaturas tales que fundan cualquier material que se interponga.

Esos "lápices de plasma caliente" podrían cortar cualquier materia; y dispositivos especiales permitirían vitrificar las tierras convirtiéndolas en rocas metamórficas.

Esta capacidad de corte y de vitrificación tendría innúmeras aplicaciones, singularmente a las Obras Públicas. No harían falta explosivos para cortar las rocas ni cubrir de hormigón para obtener consistencia. La aplicación sería inmediata en la construcción de túneles, contención de tierras, canales, carreteras, etc.

Y aún podría pensarse en la sustitución de piezas de hormigón prefabricadas por piezas de roca prefabricada, en construcciones ordinarias.

¡Quiera Dios que estas esperanzadas ilusiones se realicen algún día! ¡Que la técnica logre dominar la Naturaleza y puedan repartirse con equidad entre los hombres los bienes que nos brinde! ¡Que cesen nuestros odios y egoísmos y que sintiéndonos hermanos nos dirijamos juntos a la verdadera fuente de Energía y de Vida!