

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

---

# La Crisis Energética y la Respuesta Nuclear

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. CARLOS SANCHEZ DEL RIO Y SIERRA

Y

CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. JOSE GARCIA SANTESMASES

EL DIA 26 DE FEBRERO DE 1975



M A D R I D

DOMICILIO DE LA ACADEMIA:

VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29

1 9 7 5

Depósito Legal: M. 8.908 - 1976

---

TALLERES GRAFICOS VDA. DE C. BERMEJO.—J. GARCIA MORATO, 122.—MADRID

# DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. CARLOS SANCHEZ DEL RIO Y SIERRA.

TEMA

LA CRISIS ENERGETICA Y LA RESPUESTA NUCLEAR.

Excelentísimo señor Presidente,  
Excelentísimos señores Académicos,  
Señoras, señores:

En este solemne acto de mi toma de posesión como académico-  
numerario de esta Corporación, me invaden muchos de los sentimien-  
tos tan elocuentemente expresados muchas veces por quienes me pre-  
cedieron en ocasiones análogas. Ante todo, un sentimiento de agra-  
decimiento a la Academia por haberme otorgado tan señalada  
distinción. En segundo lugar, un sentimiento de alegría porque desde  
hace largo tiempo tuve la ilusión de llegar algún día a ser llamado  
a esta Casa. En tercer lugar, por qué no decirlo, un cierto senti-  
miento de melancolía porque el haberme elegido significa que me  
consideráis llegado a una madurez a partir de la cual, inevitablemente,  
comienza una tercera etapa de la vida, que lleva consigo un cambio  
en el ritmo y clase de actividades si se quiere que sea más fructífera  
que las etapas anteriores. Paradójicamente me falta, sin embargo,  
la impresión de que éste sea mi ingreso en la Academia; desde que  
en 1969 me nombrasteis académico corresponsal he procurado asistir  
puntualmente a todos los actos públicos de la Corporación (apertu-  
ras de curso, nuevos ingresos, conferencias, etc.) y desde que más  
recientemente me llamasteis a participar en vuestros trabajos sobre  
terminología científica, he frecuentado tanto este lugar que para mí  
el acto de hoy representa más bien la culminación de un proceso de  
ingreso paulatino. Este contacto que ya he tenido con vosotros me  
lleva a apreciar aún más la importancia de los trabajos que se llevan  
a cabo en esta Casa; vengo, por ello, con ilusión a contribuir a  
vuestros estudios y no escatimaré esfuerzo para ayudaros en vuestra  
tarea, aprendiendo primero para poder enseñar después a los que  
me sigan, si Dios me concediere larga vida.

Antes de entrar en el tema sobre el que pretendo atraer vuestra  
atención hoy, quisiera dedicar un recuerdo a mi predecesor D. José

García Sñeriz. No lo traté tan familiarmente como para poder relataros recuerdos personales. Cuando él ingresó en esta Academia yo era todavía un niño y cuando yo empecé mi vida profesional él era ya figura principal en la vida científica española a quienes los más jóvenes nos acercábamos con respeto. Tuve ocasiones, sin embargo, para apreciar su carácter bondadoso y tuve cumplida noticia de su muy notable obra científica, especialmente en el campo de la geofísica aplicada. Tuvo D. José García Sñeriz el mérito de que tanto su carácter como su obra fueran debidamente apreciados y reconocidos, por lo que fue encargado de tareas de gran responsabilidad y distinguido con señalados honores. Ingeniero de Minas de formación, fue Presidente del Consejo de Minería, Director del Instituto Geológico y Minero de España, Ingeniero Jefe del Cuerpo de Geógrafos, Presidente del Comité Internacional de Geofísica, Académico numerario de esta Academia y de la Pontificia de Ciencias, Vicepresidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, etc., etc. Todos estos cargos y honores demuestran su mucha valía y singular personalidad. Sirvan estas breves palabras mías como homenaje de respeto y veneración a la memoria de su vida ejemplar.

Según el reglamento de esta Academia, el objeto del discurso de ingreso queda a la libre elección del recipiendario. Esto no facilita la tarea, porque antes de comenzar el trabajo asaltan dudas sobre la elección del tema. Después de meditarlo bastante pensé que tal vez fuera acertado elegir un tema sobre el que pudiese hablar con alguna autoridad y fuese, al mismo tiempo, de un interés suficientemente amplio. Llevado de estas consideraciones decidí disertar sobre la crisis energética y la respuesta nuclear.

\* \* \*

#### LA CRISIS ENERGÉTICA

Están apareciendo los primeros síntomas de una crisis energética que, si de momento presenta sólo caracteres económicos, en el futuro aparecerá cada vez más como una escasez de energía. Casi simultáneamente ya se nos anuncia una crisis de materias primas para la industria y otra crisis de alimentos. Al mismo tiempo no parece que pueda conseguirse una estabilización demográfica antes de que pasen bastantes generaciones. Además, la elevación del nivel de vida de las grandes masas de población que todavía hoy viven al nivel de mera

subsistencia requiere más energía, más materias primas y más alimentos. Los problemas que esta situación va a plantear a la humanidad a medio y largo plazo pueden resolverse si se consiguen producir cantidades ingentes de energía. En efecto, la crisis de materias primas puede resolverse con el adecuado reciclado de las mismas, lo cual requiere el consumo de mucha energía. También la crisis de los alimentos puede resolverse si se dispone de energía, primero para aumentar el rendimiento de la agricultura mediante fertilizantes, nueva maquinaria agrícola, industria alimenticia eficiente, etc., y después para llegar a la síntesis de proteínas primarias.

Actualmente en los países industrializados se alcanzará pronto un consumo energético equivalente a diez toneladas de carbón por persona y año. En más del 90 por 100, la energía que utilizamos hoy en día proviene de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). En última instancia, es energía solar acumulada durante millones de años y que estamos consumiendo aceleradamente desde que comenzó la revolución industrial. El carbón empezó a utilizarse hacia el año 1800 y se estima que las reservas se habrán agotado alrededor del año 2400 con un máximo de producción a finales del siglo próximo. El petróleo, más fácil de extraer, no se empezó a utilizar en cantidades importantes hasta principios de este siglo y se estima que quedará agotado hacia el año 2050 con un máximo de extracción hacia el año 1990. Esto significa que nuestra civilización industrial habrá acabado con el carbón en 600 años y con el petróleo en 150. Estas cifras invitan a meditación por lo que suponen de despilfarro, pero me abstendré de crítica puesto que tal vez la revolución industrial, posible gracias a este consumo de los combustibles fósiles, haya sido la única vía para que la humanidad saliese de la miseria milenaria.

Por lo que respecta a la estructura del consumo energético en un país industrializado, me limitaré a dar unas pocas cifras que son muy ilustrativas. Por de pronto, sólo se utiliza un 37 por 100 de la energía primaria contenida en los combustibles fósiles; el resto, que es la mayor parte, pasa a la biosfera directamente y sin beneficio alguno en forma de calor degradado. De la energía útil menos del 10 por 100 se emplea en forma de energía eléctrica, aunque este uso crece más deprisa que los demás. Del total de energía utilizada, puede decirse que alrededor del 50 por 100 se destina a la gran industria, el 10 por 100 al transporte y el 40 por 100 para usos domésticos, urbanos, comerciales, etc.

A la vista de las consideraciones que anteceden, es evidente que la crisis energética está sólo en sus comienzos pero que de no ponersele remedio acabará a largo plazo con nuestra civilización industrial basada en la ciencia y la tecnología. Paradójicamente, la solución a una crisis provocada por la ciencia y la tecnología está en conseguir más ciencia y más tecnología. Mis reflexiones en este discurso se dirigen a apuntar qué clase de ciencia y de tecnología necesitará la humanidad para resolver el problema de la energía del cual depende su supervivencia. Está claro que mis consideraciones no se refieren a un futuro inmediato, que esto es cosa de políticos y economistas, sino a un plazo largo comparado con la vida humana pero corto si se leen los libros de historia. Son meditaciones sobre un porvenir lejano que pueden afectar decisivamente la vida de nuestros descendientes.

Ante la perspectiva de la desaparición de los combustibles fósiles se presentan claramente dos alternativas. La primera es la utilización más eficaz posible de la energía que proviene del Sol y la segunda el desarrollo intensivo de la energía nuclear. Como la energía del Sol es también de origen nuclear, la alternativa puede también expresarse como una elección entre la utilización exclusiva de la energía que incide sobre la Tierra y que proviene de un reactor nuclear extraterrestre que es el Sol o la producción de la energía nuclear directamente en nuestro planeta.

En razón a los riesgos que entraña convertir nuestro planeta, hasta ahora receptor pasivo de energía, en un generador activo como el Sol y las estrellas, hay muchos que consideran viable la primera alternativa; piensan que, a pesar de que la energía solar nos llega en forma muy diluida, es posible que la humanidad subsista sin recurrir a otras fuentes energéticas. No se puede negar tal posibilidad pero para ello haría falta un cambio radical en la estructura social, política y económica y una reducción drástica de la población para limitarla a la que puede vivir desahogadamente sobre la Tierra en dichas condiciones. Personalmente esta posibilidad me parece utópica, pero no es mi propósito entrar aquí en polémica con quienes mantienen tal postura. Me limitaré a señalar que he tomado como hipótesis de trabajo la segunda alternativa, es decir, que la producción de energía nuclear aumentará en el futuro de forma masiva y querría llamar vuestra atención sobre la enorme cantidad de problemas científicos, técnicos, económicos, legales, políticos y hasta morales que plantea su utilización. Todos estos problemas requieren investigación en todas

las ciencias que cultiva esta Academia y en algunas más que caen fuera de ella. A lo largo del breve análisis que voy a exponeros sobre la problemática nuclear indicaré, de cuando en cuando, los diversos temas que requieren investigación y que en algunos casos son tan profundos que su solución puede requerir el trabajo de varias generaciones.

No voy a entrar en aquellos problemas no directamente relacionados con la energía nuclear, pero que son importantes en cualquiera de las dos alternativas antedichas como son la más racional utilización de la energía, su transformación de una forma en otra, su transmisión y acumulación, así como la posible síntesis de alimentos a partir de la misma.

### REACTORES NUCLEARES

Actualmente hay en todo el mundo más de un centenar de reactores nucleares para producir energía eléctrica con una potencia total instalada del orden de 60 GWe. La mayor parte de ellos son los bien conocidos reactores de agua ligera que funcionan consumiendo uranio ligeramente enriquecido mediante una reacción nuclear, la fisión, mantenida con neutrones lentos y en los que el agua ordinaria actúa como moderador de los neutrones y como refrigerante. Son reactores de tecnología probada y que han demostrado funcionar satisfactoriamente, construyéndose en la actualidad unidades de una potencia del orden de 1.000 MWe. El rendimiento termodinámico no es impresionante porque producen calor a sólo unos 300° C; en cambio, el rendimiento económico para la producción de electricidad es altamente satisfactorio. En estos reactores el reparto del costo de la energía producida es aproximadamente el siguiente: alrededor del 55 por 100 corresponde a gastos de capital, el 15 por 100 a gastos de funcionamiento y el 30 por 100 al ciclo de combustible (minería y extracción de uranio, enriquecimiento en U-235, fabricación de los elementos combustibles y reelaboración de los mismos). A pesar de que se trata de reactores que en el futuro se considerarán de tecnología muy primitiva, puesto que consumen menos del 2 por 100 del contenido energético total del uranio, la utilización en ellos de 1.000 toneladas de combustible nuclear equivale a 30 millones de toneladas de petróleo.

Un grave inconveniente de estos reactores de agua ligera es la baja temperatura del calor producido, lo que lleva consigo a que en la

práctica sólo sean utilizables para la producción de electricidad y la electricidad es una fracción pequeña, aunque creciente, de la energía que necesita un país industrializado. Actualmente tres cuartas partes de la energía primaria se consume en forma distinta a la energía eléctrica. Y esto no sólo por razones históricas, sino porque la energía eléctrica, aunque insustituible en muchos casos, tiene también sus inconvenientes. Los principales son que su transmisión es muy costosa y su almacenamiento como tal energía eléctrica es muy difícil. Además, si se vuelve a transformar en energía calorífica la ineficiencia del proceso total es notoria. Después de todo, no hay que olvidar que un reactor nuclear es simplemente un gran generador de calor. El calor, sin embargo, es muy difícil de transportar como tal; con la tecnología actual y a temperaturas relativamente bajas es posible transmitirlo hasta unos 100 kilómetros de distancia. Por eso lo más razonable es acumular la energía calorífica que generan los reactores nucleares en forma de energía química (combustibles artificiales), que puede almacenarse fácilmente y utilizarse para diversos fines en sustitución del carbón, del petróleo o del gas natural. Pero este programa de actuación es muy difícil con los actuales reactores de agua ligera funcionando a temperaturas bajas.

Existen ya comercialmente reactores térmicos refrigerados por gas helio y que generan calor o pueden potencialmente generarlo a temperaturas próximas a los 800° C. Su uso aún no está muy extendido porque, dado que se tiene menos experiencia sobre ellos, las compañías productoras de electricidad todavía prefieren los reactores de agua ligera ya muy bien probados aunque tengan que pagar el precio de un peor rendimiento termodinámico. Esta situación irá cambiando paulatinamente, sobre todo cuando se empiecen a emplear los reactores nucleares para fines distintos de la producción de energía eléctrica en particular para la producción de combustibles artificiales que sustituyan a los actualmente derivados del petróleo y del gas natural.

Entre los combustibles químicos que pueden producirse a partir de la energía nuclear, uno de los más atractivos es el hidrógeno. Tiene muchas ventajas. Por de pronto puede producirse a partir del agua, que es una materia prima barata y abundante. En segundo lugar, es fácilmente transportable por gaseoductos adecuados y el costo del transporte en esta forma es muy bajo. Puede también enviarse a través de los mares en forma líquida y su almacenamiento, sea en este estado, sea en forma gaseosa, utilizando pozos de gas natural

agotados, es sencillo y barato. Es, por otra parte, un excelente combustible que puede utilizarse para propulsión de vehículos, reducción de minerales y procesos químicos que requieren alta temperatura. Actualmente se estudia activamente la manera de producir hidrógeno en grandes cantidades a partir de la energía que producen los reactores nucleares. El proceso más obvio es la electrolisis del agua, pero esto lleva consigo el convertir primero el calor en energía eléctrica y después ésta en forma química (hidrógeno); con tantas transformaciones los gastos del capital se suman y las ineficiencias se multiplican, por lo que este método no parece aconsejable. El ideal es aprovechar el hecho de que un reactor nuclear es una gran fuente de calor para utilizar éste lo más directamente posible en la fabricación de hidrógeno. Por desgracia (o por fortuna, según como se mire), el agua es una molécula muy estable y su descomposición por termolisis no tiene lugar por debajo de los 2.500° C, temperatura ésta muy superior a la del calor que pueden producir los reactores nucleares en un futuro próximo. Se han descubierto, sin embargo, ciclos indirectos a través de reacciones químicas que pueden producirse a temperaturas no superior a 800° C y en las cuales los otros elementos químicos que intervienen se recuperan íntegramente de tal manera que el efecto neto puede representarse por una caja negra donde entran agua y calor a 800° C y salen hidrógeno, oxígeno y calor a 25° C; parece posible obtener rendimientos del orden del 55 por 100. En todo caso, pueden encontrarse nuevos procesos que aumenten este rendimiento y puede decirse que este problema constituye uno de los desafíos más importantes a la ingeniería química de nuestro tiempo.

Tal vez cause cierta sorpresa el que se piense seriamente en el uso masivo del hidrógeno debido a su carácter explosivo cuando está mezclado con oxígeno en determinadas proporciones. Hay que hacer notar, sin embargo, que los gases naturales y muchos productos petrolíferos son también explosivos y que sólo es cuestión de disponer de una tecnología adecuada para que podamos manejar el hidrógeno con las mismas garantías de seguridad con que se manejan los combustibles actuales.

Dentro todavía del campo del aprovechamiento de la fisión del uranio para la generación de energía, el paso siguiente son los reactores reproductores rápidos. En éstos la reacción en cadena se mantiene con neutrones rápidos y la extracción del calor desprendido puede realizarse mediante metales líquidos, helio y, tal vez, vapor de

agua. Estos reactores todavía no son comerciales, aunque ya existen prototipos y presentan singulares ventajas que señalan que su desarrollo acelerado es muy importante. Una ventaja es que, al igual que los reactores térmicos refrigerados por gas, pueden producir calor de alta calidad, es decir, a elevada temperatura. Una segunda ventaja, más importante que la primera, es que, funcionando en el ciclo plutonio-uranio, pueden producir plutonio fisionable a partir de la fracción de uranio inerte (U-238) en cantidad superior a la que consumen. Esto implica un aprovechamiento casi exhaustivo de la energía contenida en el uranio, por lo que, en principio, y a partir de la misma cantidad de uranio, en un reactor rápido puede obtenerse 50 veces más energía que en nuestros actuales reactores térmicos de agua ligera.

El empleo del uranio como combustible nuclear presenta ciertos inconvenientes que discutiré en más detalle después y constituye, además, una anomalía en el Universo. Si la era nuclear ha comenzado su carrera basándose en la fisión del uranio mediante neutrones, es porque es la única reacción nuclear que puede provocarse masivamente a temperaturas bajas y con tecnologías que dentro de mil años aparecerán como extremadamente primitivas. Los historiadores del futuro considerarán como gran prueba del ingenio humano el que en nuestro siglo, carentes todavía de tecnologías realmente avanzadas, hayamos sabido aprovechar la única reacción nuclear que puede prescindir de ellas.

En un futuro más o menos lejano, cabe prever que dejará de utilizarse el uranio como combustible nuclear y que se empleará con este objeto la termosíntesis de núcleos ligeros siguiendo el ejemplar que nos da la naturaleza, ya que así es como se produce la energía de las estrellas y en particular la del Sol. Esto nos lleva a los reactores de fusión de núcleos ligeros, que son los verdaderos reactores del futuro. El problema está en que para conseguir la fusión en gran escala de núcleos ligeros son necesarias temperaturas comparables a las que existen en el interior de las estrellas. En el caso más favorable —reacción deuterio-tritio— se precisan temperaturas del orden de 100 millones de grados. Evidentemente, no se puede pensar en un recipiente material que confine la materia a tales temperaturas, no sólo porque el recipiente se volatilizaría, sino porque resulta imposible conseguir tal elevación de temperatura si el material a calentar (digamos una mezcla de deuterio-tritio) está en contacto con las paredes de un reci-

piente que lo enfrían continuamente. La naturaleza ha resuelto este problema admirablemente utilizando la gravitación como campo de fuerzas que confina a una estrella dentro de un espacio limitado ; pero la gravitación sólo es eficaz para realizar esta función en cuerpos celestes de gran masa y, por lo tanto, no cabe reproducir una situación análoga en la Tierra. Para poder llegar a un reactor de fusión es necesario calentar una mezcla de sustancias (por ejemplo, deuterio-tritio) hasta temperaturas como las arriba mencionadas que convierten a la mezcla en un plasma en el cual los átomos están totalmente ionizados. Este plasma debe ser confinado de algún modo durante un tiempo suficiente para que la reacción nuclear deseada se produzca en cantidad que dé lugar a un desprendimiento grande de energía. Este tiempo de confinamiento depende de la densidad del plasma y es tanto mayor cuanto menor sea aquélla ; más precisamente, el producto de la densidad del plasma por el tiempo durante el cual esté confinado debe ser, para el caso de la reacción deuterio-tritio, superior a  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup>s. Esta condición no ha sido alcanzada todavía en la Tierra, excepto en las llamadas bombas de hidrógeno, pero veinte años de investigación intensa parecen haber demostrado que es alcanzable por alguno o ambos de los dos métodos de confinamiento siguiente: confinamiento magnético o confinamiento inercial.

El confinamiento magnético ha sido objeto de estudio durante muchos años y se basa en que las partículas de una plasma (núcleos y electrones), por estar eléctricamente cargadas, hacen que éste sea un buen conductor eléctrico, que puede ser mantenido en una región del espacio si está rodeado de un campo magnético adecuado. Este es el principio de construcción de la llamada botella magnética, que más bien debería llamarse cesta magnética por cuanto no parece posible mantener un plasma confinado por tiempo indefinido mediante campos magnéticos. La interacción de un plasma con un campo magnético es un fenómeno de gran complejidad y la idea de la botella magnética conceptualmente sencilla ha resultado en la práctica mucho más difícil de lo que se pensaba. Ya en los primeros experimentos aparecieron grandes inestabilidades que se fueron contrarrestando con sistemas de campos magnéticos cada vez más elaborados. Después surgieron problemas de microinestabilidades de carácter acumulativo, que también dificultaban notablemente conseguir el tiempo de contención necesario para construir un reactor de fusión. Actualmente se cree conocer la física del plasma de modo suficiente como para que la cons-

trucción de un reactor de fusión que demuestre la posibilidad del método sea una cuestión de cambio de escala. Efectivamente, un reactor de fusión basado en la reacción deuterio-tritio es una máquina de grandes dimensiones donde hay que producir intensos campos magnéticos con imanes superconductores y que plantea problemas muy severos de materiales, lo que lleva consigo que cualquier experimento sea sumamente costoso. Entre las diferentes máquinas propuestas parece que la del tipo Tokamak es una de las más prometedoras y se espera dentro de pocos años tener en funcionamiento alguna de las que están en construcción o en proyecto y demostrar, a nivel científico, la posibilidad de construir un reactor de fusión mediante confinamiento por campos magnéticos. Con este objeto, en numerosos países los efectivos, tanto en personal como financieros, están creciendo de manera notable mientras que en otros campos de la investigación nuclear permanecen estacionarios o disminuyen.

Recientemente se tienen también grandes esperanzas en el método de contención inercial. Básicamente, la idea consiste en comprimir energicamente una pequeña pastilla de hidrógeno sólido (mezcla de deuterio y tritio) para conseguir temperaturas elevadas por compresión y densidades altas, con lo cual se cumpliría el requisito antes expuesto a base de altísimas densidades de plasma y tiempos brevísimos durante los cuales el plasma quedaría contenido por la inercia de la superficie de la pastilla, que le impediría moverse hacia el exterior con suficiente rapidez. En el fondo se trata de conseguir microexplosiones repitiendo en cada momento, a escala reducidísima, lo que ocurre en una bomba de hidrógeno. La forma de conseguir la compresión de las pastillas consiste en iluminarlas por todas partes con luz muy intensa procedente de láseres potentísimos sobre los cuales se sigue trabajando intensamente. Con este método se han conseguido ya aumentos de densidad de las pastillas del orden de un factor mil y aun cuando todavía no se ha demostrado experimentalmente la posibilidad de un reactor de fusión por este procedimiento, en algunos círculos científicos se tienen más esperanzas incluso que las muy fundadas que existen respecto del método de confinamiento por campo magnético.

Sin embargo, ya antes de haberse probado experimentalmente la posibilidad de un reactor de fusión, se han iniciado estudios tecnológicos referentes a los materiales a emplear, al ciclo de combustible (el tritio se obtendrá bombardeando litio con neutrones), así como a es-

tudios económicos que parecen indicar que un reactor de fusión deberá ser de potencia bastante superior a la de los reactores de fisión. Tal vez un mínimo de 5.000 MWe.

También se piensa ya en los reactores de fusión de segunda generación basados en la reacción deuterio-deuterio, que necesita temperaturas más elevadas pero que permite eliminar el tritio y por ende el litio como material fértil. Incluso se ha pensado que inyectando aluminio en el plasma de un reactor de segunda generación se podría producir luz ultravioleta que permitiese la fotólisis directa del agua para producción de hidrógeno. Cabe también imaginar, para un futuro mucho más lejano, la síntesis de cuatro protones para formar helio mediante el ciclo de Bethe (que emplea carbono-12 como catalizador nuclear que no se consume) tal como ocurre en el Sol. En todo caso, y a pesar de que estamos todavía dando los primeros pasos, los reactores de fusión se acabarán imponiendo en un futuro lejano por las grandes ventajas que representan tanto desde el punto de vista de disponibilidad de combustible como bajo el aspecto de la seguridad a que me referiré después.

Para continuar el magno programa esbozado en las páginas anteriores, es necesario intensificar la investigación en muchos campos de la ciencia y el desarrollo tecnológico. Es interesante hacer notar que también es necesaria la contribución de la investigación fundamental. Por vía de ejemplo diré que una de las dificultades que se encuentran en el estudio de la física del plasma reside en el escaso conocimiento que tenemos de la teoría de ecuaciones diferenciales no lineales. Nuevas investigaciones en física atómica y molecular son necesarias para el desarrollo de los grandes láseres. Necesitaremos en el futuro materiales que se comporten adecuadamente en ambientes exóticos (altas temperaturas, altas intensidades de radiación) y es muy improbable que tales materiales se encuentren por vía empírica; hará falta intensificar la investigación en física del estado sólido para llegar a un conocimiento de los mecanismos básicos que dan lugar al deterioro de los materiales por la radiación. Si se sigue la vía del hidrógeno como vector secundario de transmisión de energía, habrá que buscar las reacciones químicas óptimas para producirlo y tal vez desarrollar nuevos plásticos con propiedades mecánicas nuevas que permitan transportar el hidrógeno en bombonas ligeras. También en biología hay una gran tarea que realizar en la biosíntesis de las proteínas, a partir de energía que no sea la del Sol captada por la clorofila; se

conocen microorganismos que utilizan hidrógeno como reductor y viven sobre una base inorgánica sintetizando biomoléculas a partir del  $\text{CO}_2$  como fuente de carbono; son seres monocelulares que tienden a ser demasiado ricos en nucleótidos para una dieta humana equilibrada pero que podrían segregar proteínas extracelulares útiles para la alimentación animal. Se pueden dar muchos más ejemplos sobre temas de investigación que deben ser atacados vigorosamente, pero aunque sí es éste el lugar, no es ésta la ocasión.

#### SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

Frente a un ambicioso programa nuclear, cabe preguntarse si no llegará un momento en que se agote el combustible y la humanidad se vea de nuevo en una crisis energética, esta vez sin salida. La respuesta categórica es no.

Empecemos por considerar los reactores de fisión. En ellos se utiliza uranio si se trata de los reactores de agua ligera y una mezcla de uranio y torio en reactores térmicos refrigerados por gas. Durante años, y a efecto de estudios económicos, se ha considerado como precio tipo del concentrado de uranio el de ocho dólares por libra de uranio contenido, aunque recientemente era posible obtenerlo en el mercado a cinco dólares por libra. Evidentemente, los yacimientos que permiten extraer el uranio a estos precios son limitados, pero si se admiten precios más altos la cantidad disponible es mucho mayor. Existe mucho uranio en cierto tipo de esquistos, en los fosfatos y en algunos lignitos y su extracción es factible a precios razonables aunque la necesidad de mover grandes cantidades de mineral planteará problemas ecológicos y estéticos. En último término, en el agua del mar hay 5.000 millones de toneladas de uranio en una concentración de tres a cuatro microgramos por litro; está en forma de tricarbonato de uranio aniónico y según estudios realizados en varios países puede extraerse por adsorción en óxido de titanio a un precio del orden de los cien dólares por libra. Curiosamente, en un reactor actual cuyo circuito secundario esté refrigerado por agua del mar circula por éste más uranio disuelto en el agua que el que se está consumiendo. En principio, por tanto, podría construirse un complejo industrial nuclear junto al mar que usase el agua como refrigerante y como mina de uranio al mismo tiempo.

Vemos, por tanto, que el uranio disponible es más que suficiente para cubrir cualquier necesidad previsible, sobre todo si se tiene en

cuenta que los reactores de fusión ya no necesitarán este combustible. Evidentemente, el precio del uranio aumentará en el futuro lejano y son previsibles oscilaciones bruscas en un futuro próximo. Contra lo que podría suponerse, el aumento del precio del uranio no es grave. La producción de energía nuclear es una industria que requiere grandes inversiones de capital, sobre todo si se mira desde un punto de vista global, ya que incluye la minería, la extracción de concentrados, el enriquecimiento, la fabricación de combustible, los reactores con sus generadores de electricidad o hidrógeno, la reelaboración del combustible y el tratamiento y almacenamiento de los residuos radiactivos. Frente a tales inversiones, el precio del uranio afecta relativamente poco al precio final de la energía producida por un reactor nuclear. Se estima que en nuestros reactores actuales de agua ligera (reactores de primera generación) un aumento de veinte dólares por libra en el coste del uranio sólo contribuye en diez céntimos de peseta por cada kWh de energía eléctrica producida; en los reactores reproductores rápidos, para tener el mismo aumento en el precio de la energía eléctrica producida, se podría llegar a pagar quinientos dólares por libra de uranio.

Como se ve, aunque hubiera que pagar el uranio a precios muy altos, ello no supondría obstáculo para conseguir energía abundante y barata, especialmente si se considera que las estimaciones anteriores se refieren a reactores del tamaño de los actuales y que en el futuro, verosíblemente, se construyan unidades mucho mayores para aumentar el beneficio de la economía de escala. En este tipo de industrias que requieren alto capital puede admitirse como regla grosera que, al multiplicar el tamaño de la unidad productiva por un factor 16, se reduce a la mitad el precio del producto final. Por eso, en el caso previsible de que se construyan reactores exclusivamente para la producción de hidrógeno y dado que este combustible se transporta con facilidad, cabe pensar en reactores de 100.000 MW o incluso mayores.

Por lo que respecta a los reactores de fusión en una primera etapa se basarán, como ya he dicho, en la reacción deuterio-tritio. El deuterio se encuentra en el agua en una proporción de una parte en 3.000 y como su diferencia de masa con el hidrógeno ordinario es grande, la separación isotópica es muy barata si se considera su contenido energético potencial. Por lo que se refiere al tritio, éste habrá de producirse a partir del litio que, aunque no es de los elementos más abun-

dantes, existe en la corteza terrestre en cantidad suficiente. Si pensamos en los reactores de fusión de segunda generación que se basen en la reacción deuterio-deuterio, el problema se simplifica, ya que puede prescindirse del tritio y, por tanto, del litio y la cantidad de deuterio que existe en los océanos es prácticamente inagotable. Finalmente, si se llegase a la síntesis de protones para producir helio, es razonable pensar que el fin del Universo llegará antes de que se agoten nuestras reservas de hidrógeno.

En conclusión, no existe problema alguno por lo que se refiere al suministro de combustible nuclear. Puede decirse que la tecnología nuclear a medida que avanza permitirá que nuestros descendientes quemem primero las rocas y después el agua.

Para conseguir esto, sin embargo, también hace falta incrementar el esfuerzo en investigación. Los geólogos tienen que buscar yacimientos de minerales de uranio pobres. Los químicos deben estudiar la mejor forma de extraer el uranio de estos minerales pobres y del agua del mar. Los físicos y los ingenieros, por último, pueden desarrollar nuevos métodos de enriquecimiento de uranio, alguno de los cuales, como la utilización de láseres o la centrifugación de plasmas ya se vislumbran.

#### RIESGOS TÉCNICOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

En el proceso de fisión del uranio se producen residuos radiactivos muy variados; algunos de vida corta y otros con un período de desintegración de muchos años. De aquí que en una civilización basada en la energía nuclear, la que sería la más poderosa industria habría de manejar cantidades ingentes de sustancias radiactivas emisoras de radiaciones ionizantes. Esto es preocupante porque el hombre —y, en general, todos los seres vivos— es el resultado de una evolución biológica que ha ocurrido en un ambiente casi exento de radiaciones ionizantes, por lo que éstas le son lesivas; además no disponemos de ningún sentido para detectarlas. Por eso la presencia de sustancias radiactivas es un peligro particularmente insidioso. Por otra parte, pensando en el futuro y por muchas precauciones que se tomen, es razonable pensar que, inevitablemente, se producirán algunos accidentes que den lugar a la aparición de fuentes radiactivas en lugares donde pudieran causar daño. Por eso el riesgo de una civilización basada en la energía nuclear existe y es real. Ahora bien, a quienes basados en este riesgo hacen campañas en contra de la ener-

gía nuclear habría que preguntarles ¿hay alternativas? Como he dicho al principio, creo que no existen alternativas realistas y hay que aceptar la energía nuclear como un hecho al que nos ha llevado inexorablemente la revolución industrial. Pero hay que aceptarla con realismo y prudencia, conscientes de que es preciso tomar las mayores precauciones para minimizar el riesgo todo lo que sea técnicamente posible, aun a costa de mayores gastos. En todo caso, cuando se llegue a disponer de reactores de fusión los riesgos nucleares habrán disminuido drásticamente; el período de los reactores de fisión será transitorio, pero creo que es inevitable pesar por él.

La reacción psicológica de los cada vez más numerosos objetores a la energía nuclear es sumamente curiosa y miope; no se dan cuenta de que si no se resuelve el problema de la energía la humanidad volverá a la miseria en que estuvo sumida durante milenios. El miedo a las radiaciones ionizantes tiene mucho de irracional por falta de cultura suficiente y no deja de ser interesante señalar que mientras se discuten en detalle, y frecuentemente por personas no preparadas, los riesgos de la industria nuclear, la permanente matanza en las carreteras no parece afectar en absoluto a la industria del automóvil.

Para analizar los riesgos de la industria nuclear y las técnicas precisas para minimizarlos conviene considerar separadamente cuatro aspectos:

*Primero.*—Seguridad de los reactores nucleares.

*Segundo.*—Seguridad en la industria del ciclo de combustible.

*Tercero.*—Problema de los residuos radiactivos.

*Cuarto.*—Contaminación térmica del planeta.

Por lo que se refiere a la seguridad de los reactores nucleares, hay que distinguir entre los riesgos en condiciones normales de operación y las posibles consecuencias de un accidente grave. En condiciones normales de operación, la técnica actual y la reglamentación existente permiten que la radiación externa que reciba la población por emisión de sustancias radiactivas esté muy por debajo de los 150-200 mrem por año que recibe en promedio un habitante de un país industrializado por efecto de la radiación natural o debido a nuestra cultura (rayos cósmicos y radiactividad de los materiales de construcción, diagnóstico mediante rayos X, utilización de televisores, etc.).

En caso de accidente, las consecuencias previsibles, suponiendo la peor situación imaginable, podrían ser catastróficas si se contaminase

una región extensa con todos los productos radiactivos que contiene un reactor nuclear en funcionamiento. Ahora bien, la probabilidad de que ocurra un accidente de esa naturaleza es prácticamente despreciable y si se consideran tales hipotéticos accidentes es justamente para proyectar, construir y operar los reactores nucleares de manera que se tenga certeza moral de que un accidente catastrófico no pueda ocurrir nunca debido a defectos técnicos.

De hecho, ya los reactores actuales se proyectan y construyen incorporándoles tres niveles de seguridad. El primer nivel consiste en un proyecto cuidadoso precedido de un análisis de todas las eventualidades y seguido de un control de la calidad de los materiales que se emplean y de una inspección severa durante la construcción; se incorporan, además, a este nivel controles redundantes y toda clase de sistemas eléctricos y mecánicos que impidan error humano en la operación del reactor. El segundo nivel se basa en suponer que, a pesar de todas las precauciones tomadas, pueden ocurrir incidentes y para que éstos no tengan efectos nocivos se añaden a los reactores múltiples instrumentos que detecten todos los incidentes imaginables y automatismos que detengan sus consecuencias; a esto se añaden sistemas de contención aparentemente superfluos y severas inspecciones en servicio. Para mayor seguridad, todavía se añade un tercer nivel concebido en la hipótesis más pesimista posible de que hubieran fallado todas las medidas ya tomadas en los dos niveles anteriores. Es aquí donde, con vistas a una mayor protección, se trabaja sobre la hipótesis claramente improbable del accidente máximo previsible. En el caso de los reactores de agua ligera, por ejemplo, se imagina que pueda ocurrir súbitamente una pérdida total de refrigerante, lo que daría lugar a fusión del núcleo y para evitarlo se añade a estos reactores un sistema de refrigeración de emergencia, con la convicción de que no habrá de usarse nunca. Un error del público que se deja asustar por la existencia de los reactores nucleares es creer que este tercer nivel de seguridad es el único que existe, cuando en realidad son los dos niveles anteriores los que han sido cuidadosamente estudiados para evitar accidentes. Por eso el accidente catastrófico que se imagina con fines de proyecto es prácticamente imposible que ocurra. A pesar de esto, y para mayor tranquilidad, sería prudente que los reactores nucleares del futuro se construyesen bajo tierra.

Todo lo anterior se refiere a los reactores que actualmente son ya comerciales. Los reactores reproductores rápidos refrigerados por

sodio plantean nuevos problemas de seguridad que todavía no han sido totalmente resueltos, pero sobre los que se trabaja intensamente. Estos nuevos problemas surgen básicamente de la mayor densidad de potencia de estos reactores, del manejo de grandes cantidades de plutonio y del hecho de que la tecnología del sodio es menos conocida que la tecnología del agua.

Por lo que se refiere a los reactores de fusión, todavía no existentes, los problemas de seguridad son mucho menos graves. Por una parte, estos reactores no presentan problemas de reactividad, porque hay que hacer un esfuerzo positivo para provocar la reacción nuclear masiva, contrariamente a los reactores de fisión, en los que la nube neutrónica mantiene la reacción en cadena, lo que requiere un control cuidadoso para evitar aumentos de potencia no deseados. Respecto de sustancias radiactivas, sólo los reactores de fusión de primera generación, basados en el ciclo deuterio-tritio, requerirán un cierto cuidado a causa de este último. Pero, en todo caso, el tritio es mucho menos peligroso que el plutonio, por lo que no son de prever problemas serios, teniendo en cuenta, además, que los productos finales de la reacción nuclear no son radiactivos. El único problema será la activación por neutrones de los componentes de la propia máquina, pero éste es un asunto que puede manejarse adecuadamente sin mayores riesgos.

Comentaré ahora brevemente algunos aspectos de la seguridad en la industria del ciclo de combustible. Las minas de uranio presentan peligros muy poco mayores que los de cualquier otra actividad de extracción de minerales. Las fábricas de concentrado de uranio no ofrecen problemas especiales. La industria de la construcción de combustibles nucleares no es particularmente peligrosa ni se trata de combustibles de uranio, pero sí lo es cuando se utiliza el plutonio; con medidas adecuadas de vigilancia permanente del contenido de plutonio en el aire y con filtros apropiados es posible garantizar un funcionamiento sin peligro de las fábricas de combustibles nucleares. Las fábricas de tratamiento de combustibles irradiados, cuyo objeto es recuperar el uranio no gastado y el plutonio producido, constituyen el eslabón más peligroso de toda la industria del ciclo de combustible, debido a que es necesario tratar químicamente grandes cantidades de sustancias altamente radiactivas y cualquier escape de las mismas a la biosfera podría tener consecuencias serias. En todo caso, estas fábricas presentan menos riesgos que los reactores nuclea-

res, si se toman las mismas precauciones que en éstos. Queda un problema de riesgos durante el transporte de elementos combustibles irradiados y productos de fisión residuales; estos peligros pueden minimizarse dividiendo el transporte en muchas expediciones, en cada una de las cuales se manipulen cantidades pequeñas de sustancias radiactivas y tomando una serie de medidas de precaución, en cuyo detalle no voy a entrar aquí.

Voy a considerar ahora el tema de los residuos radiactivos, que es tal vez el más grave de todos los problemas relacionados con la energía nuclear mientras esté basada en la fisión del uranio o del plutonio. El problema es serio porque muchos productos de fisión son de vida muy larga y persistirán emitiendo radiaciones ionizantes durante muchas generaciones. El almacenamiento final de estos residuos es, por lo tanto, algo que hay que examinar con extraordinario cuidado para asegurar que no pasarán a la biosfera en centenares de años. Para discutir, aunque sea brevemente, la forma de resolver el problema de los residuos radiactivos y siempre con referencia a los de vida larga, conviene distinguir entre los residuos de bajo nivel (actividad débil) y los de alto nivel (actividad intensa).

Los residuos de bajo nivel están constituidos esencialmente por aparatos o componentes activados por neutrones, por resinas de cambio de ión utilizadas en la purificación del agua en los reactores o por líquidos residuales de baja actividad de las fábricas donde se tratan combustibles irradiados o en aquellas donde se maneja el plutonio. Estos residuos no constituyen un problema serio actualmente porque existen métodos adecuados de concentración e incorporación en cemento o vermiculita y cemento y pueden ser almacenados en este estado, ya que la radiación externa es pequeña y el desprendimiento de calor despreciable. En cualquier momento pueden ser transportados a otro lugar y, por lo tanto, su almacenamiento es simplemente un problema de vigilancia y contabilidad.

Los residuos radiactivos de alto nivel, por el contrario, suponen un problema muy serio y todavía no resuelto de forma definitiva. Basta pensar que con una potencia instalada de 100.000 MWe al cabo de cinco años se tiene productos de fisión de vida larga con una actividad total de  $15 \times 10^8$  Ci que, en forma líquida, requieren un volumen de almacenamiento de 2.500 m<sup>3</sup> y en forma sólida 250 m<sup>3</sup>; estos residuos de alta actividad desprenden más de 50 MWt. Para hacer frente al importante problema de la eliminación de estos

residuos, se prevé la siguiente secuencia de procesos. En primer lugar, su almacenamiento en forma líquida, durante un cierto tiempo, en recipientes de acero inoxidable, blindados y con sistemas de detección de fugas e instalaciones de bombeo que permitan transferir los líquidos de unos recipientes a otros cuando sea necesario. El segundo proceso tiene por objeto la solidificación de los residuos, para lo cual existen varios métodos; puede procederse por calcinación, transformación en fosfatos o vitrificación. Este último parece ser el método más conveniente, ya que los vidrios son los materiales más resistentes a la lixiviación. En una tercera fase se procedería al almacenamiento vigilado de los residuos sólidos durante un período largo pero limitado. La cuarta y última operación es la eliminación final de los residuos. Hoy parece lo más probable que esta eliminación consistirá en su enterramiento en formaciones geológicas adecuadas, tales como minas de sal abandonadas o grutas donde se tenga garantía de que no vaya nunca a circular agua por ellas. Hay quienes dudan de la eficacia de este método de eliminación final y han propuesto otras soluciones exóticas que, de momento, no parecen viables. Una de estas propuestas pretende que se envíen los productos radiactivos de alta actividad al Sol, mediante cohetes. Otra sugerencia es que los emisores alfa de vida larga se destruyan con neutrones en un reactor nuclear. Ambas soluciones me parecen por el momento un tanto utópicas.

Queda un último riesgo que mencionar si nuestras fuentes de energía futuras van a ser esencialmente reactores nucleares: es la contaminación térmica. Toda la energía que se produce por cualquier método termina, inevitablemente, en calor más o menos degradado. Si se emplease exclusivamente la energía solar, sea directamente mediante centrales solares luminosas, hidráulicas o eólicas o indirectamente por combustión de madera, todo el ciclo energético es una pura transformación y no hay riesgo de que el planeta se caliente a menos de que por torpeza nuestra alteremos la atmósfera de tal modo que se disminuya la irradiación de energía al espacio exterior. La producción masiva en la Tierra de energía cuyo origen no sea el Sol, y éste va a ser el caso de la energía nuclear, podría llegar a alterar climáticamente el planeta debido a un aumento de temperatura. Es muy difícil predecir la cantidad total de calor que puede descargarse sobre la Tierra y hacerla inhabitable, pero indudablemente existe un límite. Es muy posible que ese límite sea el que condicione

la población total que puede vivir sobre nuestro planeta en una civilización altamente industrializada. Evidentemente, puede pensarse que dentro de siglos nuestros descendientes posean los medios técnicos necesarios para lanzar al espacio el calor sobrante o que sean incluso capaces de alterar la órbita de la Tierra para alejarla ligeramente del Sol y compensar con una menor irradiación solar el exceso de calor producido. Todo esto, sin embargo, durante muchas generaciones, y tal vez para siempre, no pasará de ser un sueño.

En resumen, los riesgos que entraña la utilización de la energía nuclear parecen perfectamente controlables si se procede con prudencia y se aplican técnicas adecuadas. No quiere esto decir que todos los problemas que lleva consigo la seguridad nuclear estén ya resueltos, ni mucho menos, pero no parece existir ningún obstáculo que no pueda resolverse con programas de investigación adecuados.

Vemos, pues, que también este capítulo del gran libro de la energía nuclear requiere un esfuerzo en investigación. No puedo ser exhaustivo pero sí querría mencionar algunos de los campos de investigación en los que debe incrementarse la actividad desde ahora mismo.

En el campo de la ingeniería es necesario estudiar con más detalle la seguridad de los reactores nucleares. Se requieren mejores conocimientos metalúrgicos para asegurar la integridad de las vasijas de los reactores actuales y futuros. Hacen falta experimentos a escala real para determinar cuál es de hecho el máximo accidente posible y sus consecuencias. Los sistemas de refrigeración de emergencia también deben ser analizados más a fondo. Es preciso desarrollar nuevos y más eficaces métodos de detección, tanto de radiaciones como de cualquier otra magnitud física cuyo conocimiento instantáneo y exacto permita la previsión anticipada de situaciones anómalas; para esta previsión es necesario contar con nuevos modelos matemáticos bien contrastados experimentalmente.

Por lo que se refiere al problema de los residuos radiactivos, hacen falta estudios geológicos profundos en busca de las formaciones más convenientes para enterrar los productos radiactivos de larga vida. Es también necesario el conocimiento preciso de los efectos a largo plazo de las radiaciones sobre los residuos vitrificados. Hace falta con urgencia poder prever los efectos de alteración climática debidos a la contaminación térmica, efectos que pueden ser locales inicialmente y, a la larga, globales.

Aceptando que en el futuro hemos de vivir en un mundo donde

se manejen industrialmente grandes cantidades de fuentes de radiación ionizante, es mucha la tarea que corresponde a los médicos y a los biólogos. Conviene conocer cuanto antes, de manera exacta, la radiotoxicidad de los diversos nucleidos. Hay que estudiar el ciclo biológico de cada nucleido que pueda accidentalmente escapar a la biosfera para poder establecer científicamente redes nacionales de toma de muestras para medir en ellas las más pequeñas trazas de radiactividad y vigilar así constantemente su evolución. Queda mucho por hacer en la investigación de los efectos, tanto somáticos como genéticos, de las radiaciones sobre los seres vivos, así como los mecanismos de reparación de las lesiones radiológicas y la posibilidad de encontrar técnicas que favorezcan estos mecanismos. Esto supone realizar difíciles investigaciones a nivel molecular, celular y de los seres vivos superiores.

#### RIESGOS NO TÉCNICOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Querría ahora comentar otros peligros de un mundo basado en la energía nuclear y que tienen su origen no en problemas técnicos sino en la mentalidad de los hombres y en los defectos de las estructuras sociales y políticas actuales. Supuesto que una tecnología adecuada puede permitir que los riesgos técnicos de la energía nuclear sean aceptables, quedan dos problemas que pueden tener graves consecuencias:

*Primero.*—Lanzamiento incontrolado a la biosfera de residuos radiactivos por operadores de instalaciones nucleares, si tales operadores estuviesen más motivados por el lucro que por una plena conciencia de su responsabilidad.

*Segundo.*—Proliferación de armas nucleares que pueden caer en manos de gobiernos irresponsables u organizaciones terroristas. Análogo a este riesgo son las acciones de guerra o terroristas sobre instalaciones nucleares que contengan grandes cantidades de productos radiactivos.

Ambos peligros requerirán en el futuro una fuerte intervención gubernamental y una serie de acuerdos internacionales basados en una cooperación real y sincera. Son necesarias, por tanto, severas medidas a escala nacional e internacional.

A escala nacional se precisa una reglamentación e inspección severa e inteligente. No basta con disposiciones legales que por su rigidez no puedan ser cumplidas, ni es suficiente que la comprobación de su cumplimiento se lleve a cabo por una torpe burocracia que se conforme con comprobar la existencia de determinados certificados. Es necesario encontrar nuevas fórmulas de colaboración activa entre la Administración y los explotadores privados de instalaciones nucleares. Estos últimos deben habituarse a considerar como gastos normales de explotación los que se deriven del perfeccionamiento continuo y permanente de las medidas de seguridad. Posiblemente algunas instalaciones, tales como las fábricas de enriquecimiento de uranio y los depósitos permanentes de residuos radiactivos, deban quedar permanentemente en manos de los gobiernos. Se ha realizado ya una gran tarea en relación con la reglamentación e inspección, pero la legislación actual y su puesta en práctica es notoriamente imperfecta. Por otra parte, de nada serviría la diligencia de la Administración o el escrúpulo de los administrados de una nación si en los países vecinos no se dan condiciones similares. La contaminación radiactiva de países extranjeros o de los océanos es un problema que no puede resolver aisladamente ningún gobierno.

Por estos motivos la cooperación internacional se hace ineludible si hemos de explotar sin riesgos indebidos la energía nuclear. Durante un gran número de años se han realizado notables esfuerzos en este sentido, aunque hay que reconocer que unas veces eran genuinos y otras eran simplemente la expresión insincera de puras conveniencias políticas circunstanciales; la causa de esta situación es que se ha considerado como peligro más inmediato el armamento atómico y el armamento es poder de dominio.

La primera propuesta de control internacional de armas atómicas fue el llamado plan Baruch, presentado por los Estados Unidos a las Naciones Unidas en 1946; se proponía la creación de una utópica organización supranacional con autoridad suficiente para controlar todas las armas atómicas del mundo. La Unión Soviética bloqueó fácilmente el proyecto condicionándolo a la destrucción previa de todo el armamento nuclear existente en el momento. De todas formas, la propuesta resultaba irrealizable por cuanto ningún gobierno estaba ni está todavía dispuesto a ceder una parte importante de la soberanía nacional. Años después, en 1953, el Presidente Eisenhower propuso su plan llamado Atomos para la Paz, que incluía la creación de

un organismo internacional más realista. En efecto, en 1957 fue creado el Organismo Internacional de Energía Atómica, que habría de funcionar dentro de las Naciones Unidas, dependiendo directamente de la Asamblea General y no del Consejo Económico y Social, que es el órgano del cual dependen los organismos especializados de las Naciones Unidas tales como la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), la FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura), la OMS (Organización Mundial de la Salud), etc. Con esta distinción se quería dar al Organismo Internacional de Energía Atómica un rango superior a los organismos especializados de las Naciones Unidas para que pudiera así cumplir mejor su función más trascendente de salvaguardar los materiales nucleares y evitar que se usen en la fabricación de armas. Hay otros organismos regionales de cooperación en el campo nuclear, tales como el EURATOM para los países del Mercado Común y la Agencia de Energía Nuclear que depende de la OECD (Organización Económica de Cooperación y Desarrollo), a la que pertenecen los países de Europa occidental, los Estados Unidos, Canadá, Japón y Australia. Estos organismos regionales han resultado particularmente fructíferos en la unificación de los reglamentos que rigen en los diversos países.

Así, se ha llegado ya a un cierto número de acuerdos internacionales de considerable importancia. En 1960 se aprobó el Convenio de París sobre responsabilidad civil de explotadores de instalaciones nucleares; el convenio está en vigor desde 1968. Hay otro Convenio de Bruselas, complementario del anterior, que se acordó en 1963 pero que no está en vigor. Lo mismo ocurre con otro Convenio análogo de Viena, que se aprobó en el marco más amplio del Organismo Internacional de Energía Atómica pero que tampoco está en vigor, lo que también sucede con el llamado Protocolo de París de 1964, que tenía por objeto adaptar el primitivo Convenio de París al de Viena. Como se ve, a pesar de los esfuerzos realizados, todavía no existe un acuerdo universalmente válido sobre responsabilidad civil de explotadores de instalaciones nucleares. Esto indica la dificultad de conseguir acuerdos internacionales, ya que el ejemplo puesto supone uno de los casos que en principio parecen más sencillos de resolver.

En 1962 se redactó el Convenio de Bruselas sobre responsabilidad civil de navíos nucleares pero, como el proyecto incluía los buques

militares, tanto los Estados Unidos como la Unión Soviética se opusieron al mismo. En 1971 se acordó otro Convenio de Bruselas sobre responsabilidad civil en el transporte marítimo de productos radiactivos pero, por desgracia, el convenio tampoco está en vigor. Por lo que se refiere al transporte terrestre, en Europa, los convenios generales de transporte por superficie de materiales peligrosos incluyen a los radiactivos.

Respecto a las armas nucleares, se ha establecido un cierto número de tratados para disminuir el riesgo de una guerra nuclear. En 1963 se aprobó el Tratado de Moscú, por el que se prohíben las pruebas de armamento nuclear en la atmósfera, que se complementó posteriormente con otros dos prohibiendo la explosión de bombas nucleares en el mar y en el espacio extraterrestre. Todos ellos fueron firmados por España y están en vigor desde 1967.

También en 1967 se firmó el Tratado de Tlatelolco sobre desnuclearización de la América Latina, que tiene por objeto el impedir la presencia de armas nucleares en los países de la región, habiéndose comprometido las grandes potencias a no depositar tales armas en la zona y los países firmantes a no fabricarlas.

En 1968 se estableció el Tratado de no proliferación de armas nucleares, que está en vigor aunque España y otros países no lo han suscrito. En virtud de este acuerdo, los países firmantes no poseedores de armas nucleares se comprometen a no fabricarlas ni recibirlas de las naciones militarmente nucleares y estas potencias se comprometen a no entregarlas a los estados no nucleares. Corresponde al Organismo Internacional de Energía Atómica el control de dicho tratado, para lo cual se estableció en 1971 el correspondiente sistema de salvaguardias. El Tratado de no proliferación de armas nucleares es claramente discriminatorio, puesto que tiende a perpetuar la situación actual en la que unos pocos países disponen de armamento nuclear y los demás no. Ahora bien, si se tiene en cuenta el egoísmo nacionalista que rige actualmente las relaciones internacionales, tal vez el tratado constituye un mal menor ya que un tratado más justo y efectivo es actualmente inviable. Recientemente, los Estados Unidos y la Unión Soviética han llegado a un acuerdo de prohibición de explosiones nucleares subterráneas de más de 150 kilotonnes de potencia a partir del 31 de marzo de 1976.

No existe ningún acuerdo internacional para controlar las acciones de guerra o de terrorismo sobre instalaciones nucleares.

Como vemos, es lento el progreso en el control internacional de armamento atómico, lo que viene agravado por el hecho de que nuevos países tratan de ingresar en el grupo de las naciones poseedoras de armas nucleares. Mirando a muy largo plazo, parece inevitable que la posesión de explosivos nucleares se extienda, lo que representa un peligro ciertamente mayor que la operación de los reactores nucleares.

En conclusión, puede afirmarse que el mayor riesgo de la energía nuclear no es debido a razones técnicas, sino a la posible falta de madurez de la humanidad. Se trata de un problema moral, cuya solución requiere un gran sentido de responsabilidad por parte de los gobiernos, los explotadores de instalaciones nucleares y la población en general. La civilización basada en la energía nuclear requiere una mayor disciplina individual y colectiva, que debe conseguirse por un perfeccionamiento ético si no queremos que se imponga externamente por regímenes políticos totalitarios o por un neocolonialismo. A nivel individual, debe desaparecer el lucro como principal motor de la actividad económica. A nivel colectivo, son necesarias nuevas formas políticas más responsables y una nueva estructura solidaria y no egoísta de las relaciones internacionales.

Es necesario trabajar y reflexionar mucho sobre estos problemas que condicionan el porvenir del hombre y de la sociedad. Son problemas que escapan del cometido estrictamente científico de esta Academia, pero que deben ser considerados como tarea de permanente vigilancia del Instituto de España en su totalidad. En resumen, creo poder llegar, al final de este discurso, a las siguientes conclusiones:

*Primera.*—Es posible mantener un nivel de vida adecuado para la humanidad de la civilización técnica mediante el empleo extenso de la energía nuclear.

*Segunda.*—Es posible técnicamente la utilización de la energía nuclear sin riesgos y peligros indebidos.

*Tercera.*—Para el uso más extendido y más seguro de la energía nuclear, es necesario intensificar la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

*Cuarta.*—Para la utilización sin riesgos de la energía nuclear hace falta una renovación ética a nivel individual y colectivo.

A estas conclusiones nos lleva el haber considerado el problema de la crisis energética a muy largo plazo para tratar de prever el efecto de nuestras decisiones en la vida de las generaciones futuras. Tal vez estos problemas no preocupen a quienes sólo miran a su propia y corta vida. Creo, sin embargo, que puesto que la vida es breve la forma más noble de vivirla es servir de estabón útil entre el pasado que nos condiciona y el futuro que debemos condicionar. Y un modo modesto de cumplir esta función es meditar y cavilar sobre el futuro tal como habéis tenido la amabilidad de escucharme.

# DISCURSO DE CONTESTACION

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. JOSE GARCIA SANTESMASES

Excmo. señor Presidente,  
Excmos. señores Académicos,  
Señoras, señores:

Deseo ante todo expresar mi agradecimiento a esta docta corporación por honrarme con su representación en este solemne acto. También quiero señalar mi satisfacción por ser el beneficiario el profesor Carlos Sánchez del Río, antiguo y querido amigo, que por sus propios méritos y valía científica se incorpora hoy a esta Real Academia.

Mi relación con Sánchez del Río data de la época en que éste, acabada brillantemente la licenciatura en Ciencias, en 1946, ingresaba en la Sección de Óptica del Instituto Alonso de Santa Cruz del C. S. I. C., en el antiguo edificio Rockefeller. Por aquel entonces yo estaba de catedrático recién estrenado de la Universidad de Madrid y además trabajaba en la Sección de Electricidad del citado Instituto, pasando más tarde a Jefe de la Sección de Óptica Electrónica del nuevo Instituto de Óptica «Daza de Valdés». La proximidad de los lugares de trabajo estrechó nuestras relaciones.

Durante este tiempo pude darme cuenta de las cualidades de inteligencia, capacidad de trabajo y aptitudes investigadoras del joven licenciado, al propio tiempo que de sus condiciones humanas y de tacto en la vida social. Más tarde, el denominador común del Instituto de Óptica desapareció, pues Sánchez del Río desvió su directriz investigadora hacia la Física Nuclear en el Organismo que después se denominaría Junta de Energía Nuclear, mientras que yo, cumplida mi misión de instalar el Microscopio Electrónico en aquel Instituto, pasaba a ocupar el cargo de Director del Departamento de Electricidad recién creado en el C. S. I. C.

Pronto obtuvo el título de doctor, en 1948, con una memoria titulada «Nuevo método de medida de aberraciones». Fue para mí

un honor y una satisfacción participar en su tribunal de tesis. En este mismo año de 1948 amplió estudios en la Universidad de Roma y en el 49 en el «Centro d'Informazioni, Studi ed Esperienze» de Milán. En 1950 regresa a España donde obtiene por oposición la cátedra de Óptica (para explicar Física General) en la Universidad de La Laguna. Pero su sed de conocimientos y afán investigador no se han saciado. Así, pide la excedencia de la cátedra y le vemos trabajando inmediatamente en la Universidad de Ginebra; posteriormente en la Escuela Politécnica Federal (Zurich, 1951) y, en fin, en la Universidad de Chicago (1952). Hace un descanso en esta labor investigadora y regresa a España para opositar y obtener la Cátedra de Física Atómica y Nuclear de la Universidad de Madrid, en 1953. Tenía entonces 29 años. Probablemente el catedrático más joven de aquella Universidad.

La trayectoria investigadora sobre Física Nuclear que siguió Sánchez del Río a partir de 1949 le llevó a escalar sucesivos cargos en la J. E. N. Así, en 1954, fue nombrado Jefe de la División de Física Nuclear y a partir de 1959 comenzó a supervisar actividades más amplias, con el título de Director.

Sus actividades en los sucesivos cargos que ha desempeñado le llevaron a formar una escuela española en el campo de la Física y Tecnología Nucleares, en la que se halla incluido el personal más veterano en nuestro país en esta especialidad científica.

Asimismo, de la escuela de Sánchez del Río proceden directa o indirectamente todos los catedráticos y profesores agregados de Física Teórica y Física Atómica y Nuclear (con excepción de dos) de todas las universidades de la nación.

Por otro lado, dirigió el diseño y construcción de los cuatro reactores nucleares experimentales de construcción nacional que funcionan en el país y la modernización del quinto, de procedencia extranjera.

Pero aparte de esta labor ingente que acabamos de señalar, el nuevo Académico extiende sus actividades a zonas ajenas aunque limítrofes de su especialidad adonde es llamado debido a su personalidad humana y científica. Así podemos destacar que es miembro del Consejo Editorial del Instituto de Cultura Hispánica, del Consejo de Dirección del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y del Patronato del Instituto de Estudios Nucleares. Ha sido Presidente de la Asociación Nacional de Físicos de España; Vicepresidente de la Real Sociedad Española de Física y Química, Secre-

tario del Comité Español de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada, Consejero Adjunto del Consejo Nacional de Educación y Presidente de la Comisión Interministerial de Desalación del Agua del Mar.

También ha formado parte de la Comisión de Investigación de todos los planes de Desarrollo y de la Energía de dos de ellos, así como de los jurados de la Fundación Juan March. Actualmente es Secretario del Departamento de Física de dicha Fundación.

Vamos a tratar ahora de las actividades internacionales de Sánchez del Río, en las que ha destacado como estrella de primera magnitud. Como complemento a su labor nacional, su labor internacional en relación con la energía atómica ha sido particularmente intensa. Dada su cualidad de pionero español en este campo, sus sólidos conocimientos científicos y su dominio de idiomas (inglés, francés, alemán e italiano) era lógico pensar que sería escogido para representar a España en congresos y reuniones internacionales. Y así fue; son muchos a los que ha asistido, bien como miembro de la delegación española, bien como representante exclusivo de España. Cabe destacar las cuatro conferencias sobre usos pacíficos de la energía atómica. En la de 1958 fue Secretario Científico, contratado durante siete meses por las Naciones Unidas, y en la de 1971 presidió una de las Sesiones Científicas.

Por otro lado, participó en todas las asambleas generales, desde 1958 hasta 1971, del Organismo Internacional de Energía Atómica y en la Conferencia sobre el tratado de no proliferación de armas atómicas (Nueva York, 1968). Asimismo en la de los países no poseedores de dichas armas (Ginebra, 1968).

Es representante de España en el Grupo de Trabajo de la Sociedad Europea de Energía Atómica y ha sido representante adjunto en el Consejo del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) mientras España participó en el mismo. Ha sido Presidente de numerosas comisiones, como el Comité de Dirección del Centro de Compilación de Datos Nucleares, del Grupo de Trabajo sobre Información en el campo nuclear, ambos dentro de la Organización Económica de Cooperación y Desarrollo (OECD), etc.

Durante dos años (1960-62), ocupó el importante cargo de Director de la División de Reactores del Organismo Internacional de Energía Atómica.

No es de extrañar que, dada esta actividad internacional, haya

tenido ocasión de visitar la mayor parte de los Centros de investigación nuclear de Europa (Occidental y Oriental), ambas Américas y Asia y que su nombre sea bien conocido fuera de nuestras fronteras y aparezca con una sucinta descripción de su personalidad y de los puestos que ocupa en los siguientes diccionarios generales: «Dictionary of International Biography», «Who is Who in Europe» y especializados: «Who is Who in Nuclear Energy» y «Atomic Handbook. Vol. I (Europe)».

Esta gigantesca labor internacional ha ido disminuyendo en los últimos años para dedicarse más intensamente a su primera y gran vocación, nunca traicionada: la docencia y la investigación.

Su labor científica ha quedado plasmada en gran número de publicaciones aparecidas en revistas españolas y extranjeras; algunos de estos trabajos han sido citados en obras posteriores sobre temas análogos.

Pero la personalidad completa y polifacética de Sánchez del Río no podía quedar constreñida a su quehacer científico y profesional por importante que éste fuese. Así, ha dado más de 100 conferencias sobre temas diversos (energía nuclear, investigación, impacto de la ciencia en la sociedad, etc.); ha publicado también numerosos artículos en revistas tales como «Arbor» (de la que fue vicedirector), «Atlántida», «Crítica», «Energía Nuclear» y en el diario «YA». Este afán de divulgación le ha llevado a intervenir en los programas culturales de TVE, de cuya Comisión Asesora fue miembro. Ha intervenido en buen número de programas de este medio de comunicación y ha participado en muchas entrevistas de radio y prensa, sobre cuestiones científicas.

Hay que destacar que su contacto con la Academia no empieza en este solemne acto. Como señala muy bien el propio beneficiario, hace varios años que, con motivo de haber sido nombrado Académico correspondiente, comenzó su colaboración con esta Corporación, que últimamente se hizo más estrecha al participar activamente en la Comisión de Terminología, Comisión que realiza una labor, aparentemente oscura y sin relieve, pero que a la larga esperamos sea una de las que den más prestigio a la Academia.

\* \* \*

Hemos escuchado el admirable y documentado discurso del profesor Sánchez del Río, cuyo tema ofrece extraordinario interés en el

momento actual. Es tradición en esta solemnidad hacer una réplica del contenido de la disertación del recipiendario. Intentaré, pues, hacer algunos comentarios sobre la crisis energética, marcando el acento en aquellas formas de energía, distintas de la nuclear, que hasta ahora han sido poco estudiadas y desarrolladas, como, por ejemplo, la energía geotérmica y la solar, y que pueden jugar un papel importante en el futuro.

La crisis energética producida por el encarecimiento y penuria del petróleo pone en evidencia lo que algunos especialistas habían anunciado hacía tiempo: que, si se sigue al ritmo actual el crecimiento en el consumo de energía, la humanidad no podrá explotar indefinidamente la energía procedente de los combustibles fósiles. Las reservas de estos combustibles se irán agotando lentamente. Así, el carbón, según señala Sánchez del Río, se habrá agotado hacia el año 2400 y el petróleo hacia el 2050. Estas fechas nos parecen muy lejanas, pues nuestra generación no podrá alcanzarlas, pero son muy próximas si consideramos la historia de la humanidad.

El recipiendario nos señala que ante la futura desaparición de los combustibles fósiles existen dos alternativas: una, la utilización eficaz de la energía que nos suministra el Sol; otra, el desarrollo intensivo de la energía nuclear. Probablemente, la humanidad tratará de aprovechar todas las formas posibles de energía necesarias en un mundo cada vez más desarrollado tecnológicamente.

### *Energía geotérmica*

Es sabido que la temperatura de la Tierra es superior en el interior que en la superficie. Además, en las regiones volcánicas, llegan a la superficie, desde regiones profundas, materiales incandescentes a temperaturas que pueden ser superiores a 1.000° C.

En el interior de la Tierra, la temperatura aumenta con la profundidad; en las capas superiores de la corteza terrestre se puede considerar que este aumento es del orden de 30° C. cada 1.000 metros. A este aumento de temperatura hacia el interior le corresponde un flujo de calor vertical dirigido desde el interior a su superficie, del orden de 1,3 cal./cm<sup>2</sup> seg. Existen, sin embargo, regiones en las que el flujo calorífico es muy superior a este valor medio, hasta llegar a seis veces este valor.

La energía geotérmica se puede explotar mediante fluidos calien-

tes naturales, o bien mediante vapor natural. En el primer caso se usa para la calefacción de las casas, en regiones de flujo calorífico normal, normal, mientras que en el segundo caso, se utiliza para la producción de energía eléctrica, en regiones en las que el flujo calorífico es grande.

La construcción de centrales eléctricas, partiendo del vapor natural, es fácil. El vapor llega a la superficie de la Tierra con velocidades muy grandes, del orden de 1.000 Km/h. Si el vapor está seco, se envía directamente, mediante tuberías adecuadas, a los turbogeneradores. Por ejemplo, en Larderello (Italia), el vapor procedente de un solo pozo puede suministrar la energía necesaria para hacer funcionar un turboalternador de 10.000 Kw. El vapor que penetra en la turbina debe ser seco, ya que en caso contrario, una simple gotita de agua a la velocidad a la que llega poseería energía cinética suficiente para romper las paletas de la turbina. Por ello, si el vapor es húmedo, se procede, ante todo, a separar el agua antes de penetrar en el turboalternador. La presión del vapor que se utiliza en estas centrales es muy inferior al de las centrales térmicas normales, pues no supera las 7 atmósferas.

La primera central geotérmica instalada trabajó en la ya citada región de Larderello, que debe su nombre al del ingeniero Larderel, que fue el primero en utilizar la energía del vapor natural. En realidad, en dicha región existía ya, desde el siglo pasado, una explotación de ácido bórico natural que llegaba a la superficie arrastrado por una corriente de vapor. Al aumentar la producción de ácido bórico, mediante la apertura de nuevos pozos por los que se escapaba el vapor violentamente, surgió la idea de utilizar la energía de este vapor. El primer intento de producción de electricidad se realizó en 1904 y después de muchas mejoras en la producción, gracias a sondeos más profundos y progresos en las técnicas utilizadas, la potencia instalada en 1950 era del orden de unos 260.000 Kws. Es curioso observar que hasta esta época no existían en el mundo más que las instalaciones de Larderello para producir electricidad por vapor natural. Como única excepción estaba Islandia, que en 1920 había iniciado un programa de producción de vapor natural para calentar los edificios.

¿Por qué no se intentó en otras regiones de la Tierra explotar la energía geotérmica? Acaso porque se supuso equivocadamente que Larderello era un caso excepcional debido a la producción de ácido bórico juntamente con el vapor natural. El hecho es que solamente

a partir de 1958 se empezó seriamente una investigación en diferentes partes del mundo. Así, en Nueva Zelanda y en California, que actualmente han alcanzado las cifras de unos 200.000 Kws. y 400.000 Kws. instalados, respectivamente; también se extendieron las investigaciones a otros países, como Japón, Méjico, Unión Soviética, Turquía, Filipinas, etc. No en todos estos países las instalaciones están en funcionamiento ya, pero lo estarán en los próximos años. En conjunto, actualmente, se puede decir que la potencia instalada es de 1.200.000 Kws. y se prevé para 1980 una potencia del orden de 1.900.000 Kws. Ya se comprende, dadas estas cifras, que la energía geotérmica no representará en el futuro un papel importante en los países industrializados con grandes manantiales de energía de otro tipo, pero puede ser de gran interés en los países poco desarrollados en los que faltan fuentes de energía convencionales. En estos casos, la energía geotérmica puede solucionar parte de sus problemas energéticos. De todas maneras, estas previsiones pueden pecar por defecto, si se utilizan otros procedimientos para extraer la energía geotérmica, como el indicado en el proyecto Plowshare realizado en EE. UU. por la Comisión de Energía Atómica y la Oil Shale Corporation, en el que se prevé la utilización de explosiones atómicas subterráneas para fragmentar grandes volúmenes de rocas profundas y calientes (350° C). Con esto se logra permeabilizar este grupo de rocas; entonces se inyecta agua en esta zona permeabilizada y se recupera en forma de vapor sobrecalentado en la parte superior, que se utilizará para transformarlo en energía eléctrica. Todo ello se realiza en un sistema en circuito cerrado para evitar la posible contaminación debida a los productos radiactivos de las explosiones atómicas.

Este procedimiento ha sido empleado con éxito en el Colorado (EE.UU.) para aumentar la permeabilidad de un yacimiento de gas natural que no se podía explotar.

Se supone que si se llega a explotar el procedimiento que acabamos de describir se llegaría a obtener en EE. UU. una producción de energía igual al 10 por 100 del consumo total de energía eléctrica de dicho país, lo cual es muy superior a lo que se puede obtener por los métodos normales de producción de energía geotérmica.

También se investiga en Rusia, con una directriz diferente, cuál es la explotación de la energía de los volcanes activos.

Las investigaciones en curso, tanto en EE. UU. como en la Unión Soviética y en otros países, señalan un particular interés en este tipo

de energía y todo hace suponer que, en el futuro, la energía geotérmica puede representar una aportación apreciable dentro del conjunto energético mundial.

### *Energía solar*

El estudio de la conversión de la energía solar en otro tipo de energía de utilización práctica tuvo gran predicamento en los años 50. Se consideraba, entonces, que era la solución ideal para los problemas energéticos del mundo. Sin embargo, los resultados obtenidos en aquella época no colmaron las esperanzas que se habían puesto en estas transformaciones energéticas, por lo menos en lo que se refería a gran escala. Este aparente fracaso fue debido, principalmente, a dificultades económicas, pero ello motivó que muchos de los primeros adeptos a este tipo de conversión energética se sintieran defraudados y se apartaran de su futuro desarrollo. Solamente se mantuvieron fieles los que dedicaron su atención a pequeñas instalaciones en los países en vías de desarrollo. Pero este clima científico y tecnológico cambió hace unos pocos años, creciendo el interés por la energía solar, pero sobre todo recientemente con motivo de la crisis energética actual.

En la conversión de la energía solar hay que señalar dos inconvenientes que saltan a la vista. Por un lado, la energía solar sólo está a nuestra disposición un determinado número de horas al día. Por ello, es preciso acumular esta energía con objeto de poderla utilizar por la noche o en las horas en que falta el sol. Por otro lado, la energía solar disponible en un punto dado no es suficiente para ser aprovechada, es decir, la energía es difusa: necesita el empleo de superficies grandes para ser eficazmente captada.

La radiación solar que llega al límite de la atmósfera terrestre e incide perpendicularmente sobre  $1 \text{ cm}^2$  es igual a  $1,97 \text{ cal/min}$ . Parte de esta radiación es absorbida por la atmósfera y parte es reflejada por ella, llegando a la superficie terrestre, aproximadamente, la mitad de la energía incidente.

Una pequeña parte de esta enorme cantidad de energía que recibe la Tierra sería suficiente para las necesidades mundiales. Así se ha calculado que si en  $600 \text{ Km}^2$  de desierto se instalaran aparatos adecuados para la transformación de energía solar en energía eléctrica, se obtendría toda la que necesita un país tan grande como EE. UU.

¿Cómo se puede obtener la conversión de la energía solar en eléc-

trica? Mediante una superficie negra que permite la absorción del 95 por 100 de la energía incidente convirtiéndola en calor. Esta energía calorífica se puede transferir al aire o al agua, poniendo en contacto estos elementos con la superficie caliente. La energía almacenada en el fluido puede utilizarse con fines utilitarios.

Estos colectores son de construcción sencilla y económica, si bien no alcanzan temperaturas muy elevadas; son del orden de 40 a 90° C. Se utilizan para la calefacción de casas. Existen actualmente millones de calentadores distribuidos en diferentes países. En general están constituidos por una plancha metálica negra que se coloca en una caja de cristal que ocupa una superficie de unos 2 a 4 m<sup>2</sup> y que se sitúan en el techo de la casa. Existen unos tubos que están en contacto con la superficie metálica, por los que circula agua, que cuando está caliente pasa a unas cisternas aisladas; también puede utilizarse aire como medio de transmisión del calor; el aire circula en contacto con la superficie metálica y una vez caliente se envía a las distintas habitaciones por medio de un sistema de tuberías.

Es interesante hacer observar que en la utilización de la energía solar no existe ninguno de los problemas ecológicos que tanto preocupan en el aprovechamiento de otras fuentes de energía, como la nuclear y los combustibles fósiles.

Se supone que para 1985, la energía consumida en calentar y refrigerar edificios constituirá el 21 por 100 de la energía total utilizada en EE. UU. La cantidad de energía solar recibida por un edificio medio es 6 a 10 veces mayor que la cantidad necesaria para calentar este edificio. Los especialistas opinan que para 1985, el 10 por 100 de todos los edificios de EE. UU. utilizarán energía solar para calefacción y refrigeración.

Calentadores solares se usan ya en varios países, como Estados Unidos, Australia, Japón, Israel y Unión Soviética. En general, estos calentadores se usan en combinación con equipos eléctricos auxiliares que producen agua caliente en los días sin sol. Se ha calculado que esta combinación de calefacción solar y eléctrica es más económica que los sistemas de calefacción convencional, eléctricos o de fuel.

Un sistema de calefacción y refrigeración solar, además de las unidades fundamentales ya señaladas (colector, fluido circulante y acumulador de calor) consta de controles de humedad y temperatura, bombas, ventiladores y motores. Para que pueda utilizarse para calefacción o para refrigeración se utiliza una unidad de refrigeración acti-

vada por calor. El enfriamiento por energía solar es más eficiente allí donde más se necesita: en los países de clima cálido.

La aplicación eficaz de la energía solar a la calefacción y refrigeración de los edificios exige los esfuerzos coordinados del arquitecto y constructor; en el proyecto del edificio hay que tener presentes todas las componentes del mismo que puedan jugar un papel en la conversión de la energía, como por ejemplo, ventanas, forma de tejado, orientación del edificio, etc.

Se está investigando en obtener energía eléctrica partiendo de la energía solar. Se están ensayando diferentes procedimientos, diferentes técnicas que se pondrán en práctica en los próximos años y que, caso de tener éxito, constituirán caminos a seguir para responder a las grandes demandas de energía que surgirán hacia el año 2000.

Un método consiste en transformar, primero, la energía solar en vapor y después enviar éste a un turbogenerador. Este procedimiento no es nuevo; en la Exposición Internacional de París de 1878, una de las atracciones más importantes fue una máquina de vapor accionada por energía solar. Para ello, un espejo concentraba los rayos solares sobre una caldera y el vapor producido actuaba sobre la máquina. Después se han utilizado instalaciones análogas en diferentes lugares del mundo. Ultimamente se ha proyectado una gran central de energía solar en el desierto de Arizona, que utilizará un conjunto de espejos reflectores que concentren los rayos solares en colectores adecuados.

Se considera actualmente que en el futuro se construirán grandes centrales de energía solar, funcionando conjuntamente con centrales hidroeléctricas o térmicas.

Otro procedimiento de convertir energía solar en electricidad es el uso de fotocélulas, como se ha realizado en las estaciones espaciales (Skylab). Teóricamente este sistema de conversión es el más sencillo; sin embargo, el costo de las células de silicio utilizadas es tan elevado (20 dólares/vatio) que, actualmente, no parece aconsejable la producción de grandes cantidades de energía eléctrica por este sistema. Se considera que esto puede variar en unos años con el uso de técnicas más modernas para la obtención del silicio monocristalino y la fabricación en serie de las células. También hay la alternativa de lograr otro tipo de fotocélulas que, en lugar de utilizar el silicio, usen sustancias orgánicas que permitan una fabricación más barata. A título de curiosidad, señalaremos que también se ha propuesto el uso de la clorofila pura, que podría conseguirse de los vegetales, para construir células solares.

El rendimiento de estas células es muy bajo: del orden de 10 por 100. A pesar de este poco rendimiento, con una superficie de 6,8 Km<sup>2</sup> cubierta de estas células, se podría lograr una potencia equivalente a 180.000 Kws., suponiendo que brillara el sol.

Para evitar el inconveniente de todos estos sistemas terrestres de conversión de energía solar, se ha ideado poner en órbita un satélite que sería una estación convertidora de energía solar en electricidad. El satélite estaría situado en una órbita a unos 36.000 Kms. de distancia, donde el sol brilla cerca de las veinticuatro horas del día. Las células solares estarían agrupadas en dos enormes paneles, cada uno de 25 Km<sup>2</sup>; la electricidad producida por los convertidores solares alimentaría dos generadores de microondas que transmitirían la energía en esta forma a una antena receptora situada en la Tierra, la cual convertiría nuevamente la energía recibida en electricidad. De esta manera se podría generar electricidad del orden de 15.000 a 20.000 megavatios, o sea una energía equivalente a la de 15 ó 20 reactores nucleares.

Otra forma de convertir la energía solar en electricidad consiste en utilizar la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua del mar y el agua fría del mismo a grandes profundidades. El principio de utilización de la energía solar del mar no es nuevo. Ya en 1881, D'Arsonval señaló la posibilidad de extraer energía de los océanos tropicales construyendo un motor térmico que operara con la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y las capas profundas de la misma. En 1930, el ingeniero francés George Claude intentó la construcción de una central de energía en las costas de Cuba, que no tuvo éxito debido a un conjunto de dificultades técnicas. Más recientemente, en 1966, Anderson y Anderson hicieron un detallado estudio de una central de energía térmica del mar y estimaron que una central de 100 Mw. podría construirse con un coste por kilovatio no superior al que corresponde a una central utilizando combustibles fósiles convencionales.

Si bien, a nadie se le ocurre objetar la base científica de las centrales de energía térmica del mar, bajo el punto de vista tecnológico aparecen algunas dificultades. Los ingenieros están acostumbrados a pensar en diferencias de temperaturas de algunos centenares de grados, mientras que en el océano se logran como máximo diferencias de 20° C entre las aguas calientes de la superficie y las frías de las profundidades. De estos 20° C, solamente 10 se utilizan en el propio motor térmico. Por otro lado, debido a la conductividad eléctrica del

agua del mar, las estructuras metálicas sumergidas en el océano sufren corrosión electrolítica. El uso de aluminio puro evita estos efectos, ya que se forma una capa de óxido que protege el metal del contacto con el agua.

La energía producida en las centrales solares del mar presenta problemas para ser utilizada en regiones de Europa, EE. UU. o Japón, distantes de los lugares favorables para la instalación de dichas centrales, como son los mares tropicales. Para obviar este inconveniente y además porque ofrece muchas ventajas, se ha propuesto que mediante la energía solar se produzca hidrógeno, combustible que se puede utilizar para la generación de energía eléctrica, calefacción comercial y residencial, en la industria, etc., y que, además, se puede transportar en forma líquida. A la misma conclusión se ha llegado con la energía nuclear, según nos ha señalado Sánchez del Río enumerando las ventajas del hidrógeno como combustible.

En EE. UU., la «National Science Foundation» está subvencionando investigaciones en este campo de la conversión de la energía solar en el mar, en un plan quinquenal. Se ha recomendado la realización de un prototipo de central, de 1 a 10 Mw, bien en la isla de Hawai o en el mar Caribe. Dentro del plan quinquenal citado se subvencionan investigaciones en energía solar para edificios, conversión fotovoltaica, producción fotosintética, etc.

Muchas de estas aplicaciones de energía solar están aún en una primera fase de desarrollo y es difícil pronosticar cuál de ellas será más útil en el futuro. Sin embargo, sí podemos aventurarnos a señalar que la aplicación de la energía solar a la calefacción y refrigeración de edificios se halla en una fase bastante adelantada y que, posiblemente, en un futuro próximo pasará a ser explotada industrialmente. Creemos que el desarrollo de la energía solar, en sus diferentes facetas y con la ayuda económica gubernamental, abrirá nuevas vías que contribuyan a cubrir las necesidades energéticas del futuro.

Hemos tratado sucintamente de algunos manantiales de energía no tradicionales, como complemento al discurso sobre energía nuclear del recipiendario. Es para mí una gran satisfacción dar la bienvenida al profesor Sánchez del Río en nombre de la Real Academia de Ciencias. Estoy seguro que su incorporación a nuestras tareas representará una aportación de positivo valor, dadas sus cualidades científicas, su dinamismo y capacidad de trabajo, que contribuirán, sin duda, al mayor prestigio de la Academia y de la Ciencia española.