

ENERGIAS NATURALES

BIBLIOTECA

Por EUGENIO VALLARINO

Catedrático de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos
en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

El desarrollo de la Humanidad ha tenido siempre por base la disponibilidad energética. Mientras el hombre no podía manejar más que potencias de tipo animal, sus posibilidades eran limitadas y su desarrollo lento. La máquina de vapor abrió la puerta a la utilización de las fuerzas naturales, lo que suponía multiplicar la disponibilidad de energía por factores enormes, crecientes y aparentemente ilimitados. Gracias a esa multiplicación espectacular, el trabajo humano ha tenido un rendimiento inédito hasta hace dos siglos. Pero, al propio tiempo, esas fuerzas naturales que parecían ilimitadas, han sufrido tal utilización que en algunas facetas —combustibles, energía hidráulica, etc.— pueden llegar al límite de sus disponibilidades.

Surge por ello la preocupación del futuro; como el desarrollo no puede anularse sin catástrofe para las generaciones venideras, y ha de ir apoyado en un creciente consumo energético, hay que buscar nuevas fuentes de energía para cuando las actuales —mal llamadas convencionales— se agoten.

En este artículo vamos a ocuparnos de las posibles fuentes de energía naturales futuras (*); algunas están dando ya sus primeros pasos, tímidos, y pueden ser utilizadas de forma creciente (futuro medio); otras, sólo son concebibles para un futuro más largo, cuando la investigación permita conocerlas mejor y abaratar su uso, quizá simultáneamente a un encarecimiento de la energía por agotamiento de otras fuentes.

No se trata de ciencia-ficción, sino de una prospectiva basada en estudios e investigaciones en curso, de las que se desprende que, continuando la investigación, con programas bastante definidos, estas nuevas energías podrían ser una realidad en el tránsito de uno a otro siglo. Y anticipamos la idea de su magnitud potencial es tan amplia que permitiría la continuación del desarrollo por plazo muy largo, tranquilizador.

Las fuentes de energía naturales aún disponibles son de dos tipos: cósmico y terrestre. Más concretamente, solar y geotérmico. La energía solar, a su vez, puede ser directa —que es la que en lo sucesivo llamaremos propiamente “solar”— o indirecta: ríos (ya utilizados), vientos, corrientes, mareas (éstas incluyen también, y predominantemente, la energía lunar). Dada la importancia técnica de estos efectos indirectos, los trataremos individualmente.

El orden de exposición sigue el de las disponibilidades técnicas, de la actualidad al futuro, que en líneas generales es inverso a las magnitudes potenciales.

(*) En realidad, la utilización hidroeléctrica pertenece a una energía natural derivada del Sol. Pero la gran masa de las energías naturales está aún sin explotar.

1. ENERGIAS DEL MAR

El fenómeno de las mareas es tan rítmico e impresionante, y el de las olas tan espectacular, que han motivado la atención del hombre y la creencia popular de una reserva inmensa de energía en los mares. A estas manifestaciones visibles podemos añadir la energía de las corrientes marinas, también de esencia hidráulica, y el potencial térmico, ya de otra índole. Todas esas manifestaciones energéticas están producidas por el sol (las mareas, con gran influencia de la luna; las olas a través de los vientos; las corrientes, actuando también el giro terrestre).

1.1. *Energía de las mareas.*

Sin embargo, a pesar de su aparente grandiosidad, el potencial energético de todas las mareas del globo sólo representa el 2 por 100 del total de los ríos del mundo. La potencia total disipada por las mareas en toda la tierra es del orden de 3 TW continuos, de los cuales un tercio (1 TW, o sea, 8.760 TWh/año) corresponde a mares poco profundos. Este potencial bruto es varias veces inferior a la energía que ya utiliza actualmente la Humanidad (*), que en 1973 se estimaba de 230×10^{12} TJ = 63.889 TWh (1).

Esto empieza a situar ya el problema en sus debidos términos. Pero de esa energía sólo sería aprovechable la inmediata a las costas, y, además, las carreras de marea son muy escasas para su utilización hidroeléctrica: sólo en algunos lugares extraordinarios sobrepasan los 6 m, y en muy contados, los 10 m. Por ello, se estima aprovechable a lo sumo unos 64 GW, es decir, alrededor de un 2 por 100 de la energía total disipada.

Este potencial es el técnico posible, lo que no quiere decir que sea económico. La realidad es que la suma de los aprovechamientos punteros que se vienen considerando y estudiando desde hace tiempo no alcanza ni el 20 por 100 de la última potencia citada; y aún estos aprovechamientos, a pesar de ser extraordinarios por la carrera de marea y la potencia obtenible, no están nada claros en su aspecto económico. Se presupone cuánto menos lo serán los restantes.

Por tanto, puede decirse de manera categórica que *el potencial de las mareas no representa reserva alguna digna de tener en cuenta*, aunque quizá se llegasen a realizar algunos aprovechamientos concretos —muy pocos— de cierta importancia individual, pero de interés limitado a la región o país próximos.

Por ahora, la única central mareomotriz existente es la de La Rance, en St. Malo (Francia), en cuyo sitio las mareas alcanzan un máximo de 13,50 metros. Hay instalados 10 grupos bulbo de 24 MW, con un total de 240 MW, pensándose en una ampliación de otros 80 MW. El coste ha sido de unos 350 dólares por kilovatio, hoy aceptable, pero algo elevado cuando se construyó (está en explotación desde hace unos quince años). Pero otro gran proyecto en la misma zona, el llamado de las Islas Chausey, que podría dar unos 22 TWh al año, con unos 10 GW de potencia, no ha sido llevado a la práctica, por ahora, por razones fundamentalmente económicas.

En la Bahía de Fundy (Canadá), otro sitio excepcional donde se dan mareas de

(*) Como dato curioso diremos que la utilización mareomotriz alteraría el giro terrestre, perdiéndose un día cada dos mil años por cada TW aprovechado.

unos 15 m, hay varios proyectos en alternativa, de distinta envergadura (4). Como la gran altura de marea es debida a la concentración de la onda por la forma convergente de la costa, los más ambiciosos —que cierran más al exterior— tienen una menor altura utilizable. Y los menos potentes, que se obtienen utilizando la parte más interior del entrante, son los más económicos. Las producciones posibles oscilan entre 13 y 50 TWh. Añadiendo a este aprovechamiento el de la Bahía de Passamaquody (próxima), podrían quizá obtenerse 175 TWh, pero esto no parece pueda realizarse, al menos a medio plazo.

Hay otros proyectos en el mar Blanco (U.R.S.S.) (en donde está el 17 por 100 del potencial mundial), Australia, bahía de San José (Argentina), bahía de Cook (Alaska), Severn (Gran Bretaña), etc., todos ellos importantes, pero cuya economía no se ve todavía clara.

Aparte de su limitación a pocos lugares y su dudosa viabilidad económica, estos aprovechamientos presentan importantes impactos ambientales, pues exigen cambiar el régimen de niveles del mar en una gran extensión, dificultan la navegación y causan otros efectos en la biología, desagües urbanos, etc.

Aplicación a España.

Nuestras mareas son de tipo medio (3 a 4 m) en el Atlántico y Cantábrico, y prácticamente inexistentes en el Mediterráneo. El autor realizó en 1956 una evaluación del potencial mareomotriz español, que presentó en la reunión parcial de la Conferencia Mundial de la Energía en Madrid (junio 1960) (5). Los resultados se resumen a continuación:

- El potencial total de todas las bahías y rías españolas, aun sin restricción alguna de tipo técnico (admitiendo incluso hasta 60 m de profundidad de dique en alguna solución de la ría de Arosa) y en hipótesis optimistas de rendimiento, es sólo de 2.400 GWh/año en 18 aprovechamientos. Se desprecian los menores de 16 GWh/año, por poco interesantes y —de fijo— antieconómicos.
- Quitando aquéllos que perturbarían algún puerto importante (Cádiz, Huelva, La Coruña, El Ferrol, Marín, Vigo, Santander) el potencial queda en 1.300 gigavatios-hora/año.
- De éstos, sólo 6, con una muy modesta producción conjunta de 570 gigavatios-hora/año podrían quizá llegar a ser admisibles económicamente si las técnicas de construcción civil y de maquinaria para saltos de menos de 3 m se abarata notablemente, con una simultánea elevación de los costes de la energía térmica.

En consecuencia: el potencial mareomotriz español no constituye reserva alguna apreciable. Y aun en el caso más favorable —aunque poco probable— sólo podría permitir muy pocos y pequeños aprovechamientos, que no compensarán por su escasa potencia la investigación necesaria ni los posibles trastornos ambientales.

1.2. *Energía del oleaje y de las corrientes.*

El oleaje es un espectáculo grandioso, de gran belleza, impresionante. Pero no

tiene utilidad práctica energética. En primer lugar, es no sólo muy variable, sino esporádico y de breve duración en el año. Además, los procedimientos para utilizarlos son caros y de poco rendimiento. Y su potencia no es, a escala utilitaria, tan grande como parece a escala humana. No hay evaluaciones mundiales ni nacionales (que sepamos), pero su energía es aún mucho menor que la de las mareas, y éstas, al menos, son periódicas, fijas y predecibles.

Por tanto, hay que olvidarse de las olas como fuente de energía, y las conservaremos —afortunadamente— para nuestro goce estético y utilidad higiénica.

Respecto a las corrientes marinas, su importancia es sensible para la navegación y la vida, pero sus velocidades y forma natural de presentarse no parecen permitir una utilización técnica y económica.

1.3. Utilización de los gradientes térmicos.

En ciertas zonas tropicales el calor solar se acumula en las capas superiores, dándose como consecuencia gradientes térmicos de posible utilización por técnica convencional para producir energía eléctrica.

Por ejemplo, la Gulf Stream presenta gradientes de 20 a 27° C hasta 600 ó 1.000 m de profundidad, y a lo largo de Florida el caudal es de 2.200 Km³/día. El potencial es del orden de 180.000 TWh, o sea, 30 veces la actual demanda eléctrica mundial. En el conjunto de mares, el potencial es unas 100 veces superior a la producción eléctrica actual, pero sólo se estima utilizable a lo sumo el 1 por 100, limitando a 1.000 Km la distancia de la central a la costa (1).

Los franceses hicieron ya en 1956 una central piloto de 7 MW en la Costa de Marfil. Y se están realizando estudios en Estados Unidos para optimizar la concepción de una central flotante de 100 MW (2). Se estima que la mejor forma de utilizar la electricidad producida sería en la electrólisis del agua, obteniendo hidrógeno, fácilmente transportable a tierra para ser utilizado como combustible. Este tipo de instalación no necesitaría colector de calor ni almacenamiento de energía ni cables de transporte, que en conjunto serían los componentes más caros y técnicamente complejos.

Esta es una energía renovable, pero limitada a los trópicos y a aquellas zonas de fuertes temperaturas superficiales. Para esas zonas concretas puede llegar a ser interesante, aunque con ciertas limitaciones.

2. EOLICA

Esta utilización es de rancia antigüedad: el hombre se ha servido del viento para mover molinos y naves. Sus principales dificultades de empleo son dos: la poca densidad energética y su gran variabilidad. En cambio, no produce contaminación material, aunque sí puede deteriorar el paisaje, de ser empleada masivamente. Y no consume energía no renovable, y una vez hecha la instalación, el explotarla requiere poco personal y cortos gastos de mantenimiento.

Se estima que la potencia eólica bruta mundial es equivalente a 300×10^{11} CW continuos, es decir, 2.600×10^{12} GWh/año, equivalentes a 9.400×10^{12} TJ/año (1).

De este total, un cuarto radica en los continentes. Haciendo una estimación prudente, contando sólo con la tecnología previsible en un futuro próximo y teniendo en cuenta las velocidades mínimas útiles y las alturas prácticas alcanzables en generatrices, se consideran utilizables de 1 a 20 TW (esto es, del 1 al 24 por 100 de la continental).

Los países más interesados son los de grandes llanuras: la U.R.S.S. y Estados Unidos las tienen y también capacidad tecnológica. Holanda, llana y con tradición antigua en este uso, no deja de pensar en intensificarlo. En Estados Unidos, ya en 1941-45, funcionó una estación de 1.250 kW. Y se están estudiando grupos para su empleo en las grandes llanuras, en las que en 900.000 Km² podrían obtenerse 189 GWe con una producción de unos 500.000 GWh. Se proyectan torres de 300 m de altura (la de la torre Eiffel) con una sola turbina de 65 m de diámetro o 20 de 15 m de diámetro con dos palas cada una, con potencia conjunta de 300 MW. Espaciando las torres 1,6 Km se evitarían defectos estéticos, con un aspecto no peor que el de las líneas de transporte o torres petrolíferas o de TV, que hoy no tenemos más opción que aceptar. El rendimiento se estima del 31 por 100 con palas de 15 m y el 27 por 100 con las de 65 m, similar al de las centrales térmicas. Por supuesto, se generaría directamente electricidad (1).

Esta tecnología es ya actual, aunque todavía susceptible de mejoras, sobre todo en lo económico. La variabilidad de producción se podría paliar por compensación en la red eléctrica gracias a las centrales hidráulicas y más particularmente a las de bombeo. De los estudios realizados se deduce que sería admisible a estos efectos hasta un 10 por 100 de potencia sobre la total de la red. En pequeñas instalaciones domésticas aisladas —en las que este tipo de energía puede tener una gran utilidad— la compensación se podría hacer con acumuladores eléctricos o con una instalación complementaria usando combustible, que sólo se consumiría en los periodos de carencia de potencia eólica.

Parece que las actuales instalaciones cuestan de 200 a 650 dólares por kW(e) instalado, dando energía a un coste de 4 a 8 ptas./kWh (2).

2.1. *Aplicación a España.*

En nuestro país también es tradicional el uso de esta energía, y hasta se ha immortalizado gracias a nuestra literatura. Una intensificación con moderna tecnología puede ser interesante en un futuro medio. Sin más valor que el de una estimación de orden de magnitud, admitiendo una utilización en el 5 por 100 del territorio peninsular —que no es, por supuesto, ocupar esa superficie, sino ubicar en ella torres aisladas en la forma antes expuesta— podríamos obtener, suponiendo similitud energética con las llanuras de Estados Unidos:

$$0,05 \times 500.000 \times \frac{500}{900} = 14.000 \text{ GWh}$$

Energía no despreciable y que podría insertarse para su regulación en una red con producción diez veces mayor, que alcanzaremos ya antes de 1985. Y no parece imposible una utilización más extensa del territorio, si algún día fuera necesaria y, por supuesto, otras explotaciones aisladas de uso concreto directo doméstico, agrícola o industrial.

3. GEOTERMICA

Es sabido que la temperatura de la corteza terrestre va aumentando con la profundidad, con una media normal de 3° C cada 100 m. La profundidad necesaria para obtener vapor de agua en presión suficiente para su empleo en unas turbinas representaría llegar o superar los límites técnicos actuales de perforación —actualmente alrededor de los 10 Km— y un costo mayor que el actual de otras formas de energía.

Sin embargo, este gradiente térmico no es constante: hay varias zonas en donde es varias veces mayor, e incluso otras en las que la manifestación termal del calor profundo brota o llega hasta la misma superficie. Es casi obvio que en estos últimos casos el aprovechamiento puede ser competitivo; y en otros, puede llegar a serlo tanto más cuanto mayor es el gradiente.

Esta energía no se deriva de la acción solar, sino de la propia actividad interna terrestre. Su magnitud es enorme. El calor total terrestre acumulado en las rocas hasta 10 Km de profundidad es de 1.250×10^{12} TJ, equivalentes a 3×10^{20} gr calorías, de cuyo total, una cuarta parte corresponde a los continentes (1). Esta energía equivale a más de 5.000 veces los recursos totales de carbón, más de 6 millones de veces el actual consumo energético total y es más de 60 millones mayor que el consumo mundial de electricidad. Por ello es lógico que se piense en la posibilidad de utilizar esta gran reserva energética.

La energía utilizable es, naturalmente, mucho menor. Se estima puede alcanzar de $2,5$ a $2,9 \times 10^{11}$ TJ (del orden del 2 por 10.000 de la bruta) (2).

3.1. Tipos de yacimientos.

Los yacimientos térmicos, es decir, las zonas en las que el calor terrestre se presenta con un gradiente notable, son de los siguientes tipos (8):

a) Campos de vapor seco.

Son los que producen sólo vapor en presión, que puede ser utilizado directamente en turbinas convencionales para generación eléctrica. La tecnología es la misma que la de una central térmica, pero ahorrándose la caldera, su hogar y el combustible.

b) Campos de agua caliente.

Es el tipo predominante. El agua puede estar entre 200 y 370° C y con alta presión. Al perforar y sacar el agua, la presión se reduce y alrededor de un 20 por 100 de ella se convierte en vapor aprovechable directamente en turbinas. El resto del agua puede emplearse en usos térmicos directos: calefacción, desalinización, secado de cosechas, etc., todos ellos con mayor economía que empleando combustibles y electricidad; o bien para obtener energía eléctrica usando un intercambiador de calor que transmita éste a un fluido (normalmente, freón o isobutano), que vaporizado, mueve una turbina, lo que suele llamarse "sistema binario".

c) Sistema de geopresión.

En las perforaciones profundas para petróleo se encuentra frecuentemente agua

que ha quedado encerrada en una falla o grieta a presión muy alta, mayor que la debida a la profundidad. Estos yacimientos pueden dar un triple aprovechamiento energético: el agua en presión puede mover directamente turbinas hidráulicas de tipo clásico; el calor del agua puede utilizarse a través de un sistema binario, y, por último, el agua lleva mezclado metano, que puede separarse y utilizarse como combustible.

d) *Campos de rocas secas calientes.*

En ellos no hay agua, pero sí un importante gradiente térmico. Puede inyectarse agua, obteniendo vapor o agua caliente, y también un gas, para utilizarlo en turbinas.

e) *Campos de magma.*

Es un caso particular y extremo del de rocas calientes, pero muy limitado, pues sólo se da en las zonas volcánicas.

3.2. *Posibilidades tecnológicas y económicas.*

Hasta principios de siglo la energía térmica se usó casi exclusivamente para fines médicos: aguas medicinales y baños. En 1904 se empezó la explotación energética del campo de vapor seco de Lardarello, en Italia. Como la tecnología del vapor era conocida desde hacía más de un siglo y ese elemento se obtenía de forma inmediata natural, con ahorro de caldera, hogar y combustible, aún en esa fecha la explotación era factible y económica. Hoy día Lardarello tiene 365 MW y hasta hace poco ha sido la mayor explotación del mundo, ya sobrepasada por el Campo de los Geysers, en California, de tipo similar, y con 502 MW instalados (1975), que se convertirán en 908 MW en 1978 (8), (9), (10).

En todos los lugares en los que existe vapor natural próximo, su uso no sólo es factible, sino más económico que en las centrales térmicas clásicas.

El empleo de los campos de agua caliente depende por ahora de las circunstancias, muy variables de unos campos a otros. La utilización de la parte de vapor es clásica; en cuanto a la parte de agua, los intercambiadores binarios se usan en algunos casos, pero aún están pendientes de mejoras técnicas que permitan abaratar su empleo. Conforme vayan avanzando estas mejoras, podrán explotarse campos con temperaturas menos altas o más profundos (4).

En Islandia, por ejemplo, se obtienen ya 1.492 GWh (1972) y el potencial total se estima de 115 TWh/año. El uso más importante es en calefacción doméstica, que tiene un elevado rendimiento (90 por 100), mientras que la conversión en electricidad no llega más que al 15 por 100. En Nueva Zelanda hay también explotaciones, incluso en centrales eléctricas. Y se usa también en otros varios países para secado de cosechas, desalinización del agua, etc. (9).

Los sistemas de geopresión tienen ya posibilidades técnicas en sus tres utilidades, con los matices indicados para la fase de agua caliente. Estos sistemas son bastante frecuentes en perforaciones petrolíferas, y el agua representa un entorpecimiento para aquéllas, por lo que su utilización mejoraría el rendimiento energético y económico conjunto.

La técnica que exigirá mayores progresos tecnológicos es el de las rocas calientes secas, pero es también el de mayor universalidad, pues los campos hidrotermales (así se llaman los *a* y *b*) sólo se dan en algunas zonas, aunque extensas, en general, en los bordes de las placas continentales, que son las zonas más inestables y, por ello, las más propicias a estas manifestaciones del campo terrestre. En cambio, las variaciones favorables del gradiente térmico son frecuentes y más repartidas en el mundo (se estima que diez veces más numerosas que las de vapor húmedo), aunque no vayan acompañadas de la presencia natural del agua ni alcancen temperaturas tan elevadas.

La tecnología propiamente dicha de utilización de energía geotérmica está aún por desarrollarse y ha de dirigirse a dos temas fundamentales: las posibilidades de perforación y los intercambiadores de calor. Conforme ambas técnicas se amplíen y abaraten (la primera a profundidades crecientes y la segunda a temperaturas decrecientes) irán siendo utilizables mayor extensión y número de yacimientos.

Podríamos comparar el estado actual respecto a esta energía con los de la energía hidroeléctrica y la explotación petrolífera a principios de siglo. Los primeros saltos de agua se ceñían a las manifestaciones notorias de gradientes; cascadas, rápidos, etc.; sin embargo, hoy día se utilizan ríos con pendientes relativamente suaves. De análoga forma, el petróleo se extraía en aquellos sitios en que afloraba superficialmente o casi, y hoy se saca de varios kilómetros de profundidad. De análoga forma, a energía geotérmica se explota ya en aquellos sitios en que es tangible, porque basta aplicar una técnica conocida, pero poco a poco se irán utilizando gradientes menores y ampliando su empleo.

Actualmente, la potencia eléctrica geotérmica instalada en el mundo (Italia, Islandia, Estados Unidos, U.R.S.S., Nueva Zelanda, México, Japón) es de 1.100 MW, todos ellos de vapor seco. A esta cifra —comparable a la de una sola central nuclear— habría que añadir el agua caliente usada directamente para calefacción, climatización, agricultura y procesos industriales, lo que equivaldría a 4.000 ó 5.000 MW (9). Para 1980 se prevé tener una potencia eléctrica de vapor seco del orden de 2.000 MW, y los Estados Unidos piensan tener, en plazo medio, un 10 por 100 de su energía total procedente del calor terrestre (8).

3.3. *Problemas ambientales.*

La explotación de las rocas secas calientes tendría notorias ventajas ambientales respecto a la utilización de combustibles, pues es "limpia", sin humos ni residuos sólidos. Sólo daría lugar a una transferencia del calor interno terrestre a la atmósfera o al agua, pero no mayor que la producida por cualquier otra central térmica. Para paliarlo se piensa también en reinyectar el agua del condensador a las rocas profundas, haciendo un ciclo completo, lo que no es posible en las centrales convencionales.

En cambio, los campos de vapor seco y húmedo suelen arrastrar sales minerales, azufre y otros componentes perjudiciales, desde el punto de vista ambiental. También se puede paliar con una reinyección; y en otros casos, la recuperación de estos componentes, cuando es factible, puede hacer desaparecer este defecto y hasta convertirse en beneficio.

El día que esta energía se utilizase en gran escala y extensión, las transferen-

cias de calor podrían hacer algún efecto en el clima del entorno, pero este efecto se daría lo mismo con centrales térmicas clásicas o con las nucleares, por lo que, en conjunto, parece que la explotación geotérmica sería, en cuanto al ambiente, comparativamente ventajosa respecto a las actuales centrales térmicas y nucleares.

3.4. *Aplicación a España.*

Aunque no se ha hecho todavía una evaluación completa de los recursos disponibles, se han realizado varias interesantes investigaciones por la Empresa Nacional Adaro, Instituto Geológico y Minero, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y varias Facultades Universitarias. Y recientemente se ha celebrado un Seminario sobre el tema en Madrid. Resumimos los resultados obtenidos y conocidos.

En primer lugar, España conoce y utiliza desde antiguo manifestaciones geotérmicas en múltiples balnearios y fuentes termales, abundantes en la península. Y las islas Canarias presentan incluso fenómenos volcánicos. Todo ello son índices de gradientes geotérmicos favorables y posiblemente explotables.

De las exploraciones efectuadas (11) resultan ya una serie de zonas de interés geotérmico en las provincias peninsulares de Granada, Almería, Murcia, Albacete, Ciudad Real, Gerona y Madrid. En esta última, según se ha manifestado en el citado Seminario, la explotación geotérmica podría emplearse en calefacción de la capital, con un importante ahorro de combustible. En Canarias destaca Lanzarote, cuyo campo es de especial interés, y en el que ya se han hecho experiencias piloto.

Se estima necesario una investigación de conjunto para conocer mejor las posibles zonas y evaluar el potencial. El coste de esta investigación sería de unos 1.500 millones de pesetas. Pero por el momento, para el IV Plan de Desarrollo sólo se prevén 240 millones de pesetas. Y hasta 1985 —horizonte del plan energético— no se cuenta con realizaciones importantes.

Creemos —opinión personal— que la investigación sobre este tema sería muy remuneradora, dada la probabilidad de encontrar yacimientos de interés y la repercusión que esto tendría en nuestras disponibilidades energéticas, autóctonas, menor dependencia exterior y balanza de pagos.

4. ENERGIA SOLAR

El Sol es la fuente original de energía que recibe la Tierra y el origen mediato de las energías utilizadas por el hombre, pues la hidroeléctrica es la utilización parcial de la energía solar a través del ciclo hidrológico, los combustibles vegetales nos dan la energía solar acumulada en ellos a través de la función clorofílica, e incluso los combustibles fósiles suponen una acumulación de energía recibida del Sol. Por ello, no es de extrañar que cuando buscamos ampliar nuestra disponibilidad energética pensemos en la utilización directa de la fuente original.

Sin embargo, esto que parece a primera vista una simplificación y un ahorro de pérdidas, no es tan fácil, porque la energía solar se nos suministra con poca densidad (gracias a ello podemos vivir) y con fuertes variaciones, unas periódicas

cas astronómicas (diarias y anuales) y otras aleatorias atmosféricas (nubes). La tecnología de su utilización directa está por ello sólo iniciándose, y algunos ensayos suponen por el momento la utilización intermedia de las turbinas de vapor.

La importancia absoluta de la energía recibida del Sol es impresionante, y por ello no puede dejarse de pensar en ella (1), (2), (13). El flujo solar recibido en el exterior de la atmósfera es de $0,139 \text{ W/cm}^2$, lo que supone un total de $177 \times 10^{12} \text{ TW}$ continuos para todo el planeta. La atmósfera atravesada normalmente absorbe alrededor de un 30 por 100, resultando en la superficie del suelo poco menos de un kilovatio por metro cuadrado en el caso de cielo muy claro y en una superficie normal al Sol (lo que sólo se da en las zonas tropicales en algunos días y horas de verano) (*). La totalidad de la superficie de la Tierra recibe anualmente una energía de unos $4 \times 10^{12} \text{ TJ}$, equivalente a $1,1 \times 10^{12} \text{ GWh}$, o sea, unas 17.000 veces el consumo actual de energía de todas las fuentes, primarias y secundarias (estimado en $230 \times 10^6 \text{ TJ}$). Aunque pongamos un prudente y alto coeficiente de reducción para prever la posible utilización real, se ve que, alcanzada la tecnología necesaria, esta energía puede constituir una reserva muy importante para la Humanidad.

Esta energía, además, es renovable, pues aunque el Sol acabará agotándose, el plazo para ello es inconmensurable con el de la historia. Y es una energía absolutamente "limpia"; incluso si se utiliza con un ciclo intermedio de vapor, el calor entregado al condensador (agua o atmósfera) será menor que el recibido naturalmente del Sol por la superficie afectada. Sin embargo, es obvio que una utilización intensiva y extensiva de la energía solar tendría repercusiones ambientales (de ambos signos) al canalizar esa energía hacia empleos distintos de los naturales, pero esto ocurre siempre con cualquier tipo de energía que usemos.

Un gran inconveniente de la energía solar es su variabilidad: sólo durante el día se recibe y con notables diferencias de intensidad, debido a la variación del ángulo de incidencia, desapareciendo totalmente durante la noche; y en el año hay una variación de incidencia de $\pm 23^\circ$, lo que para latitudes extremas significa la casi nula utilización durante varios meses. A estas variaciones obligadas y periódicas se añaden las accidentales por nubosidad.

Estas variaciones podrían paliarse en una gran red, siempre que la proporción de centrales solares no sobrepasara una proporción dada, por ejemplo, el 20 por 100 del total, o combinándolas con otras de bombeo reversible. En cualquier caso, la desigualdad diaria incide sólo parcialmente, puesto que parte de la parada corresponde a las horas de "valle".

Otro gran inconveniente es la poca densidad de flujo, lo que se traduce en la ocupación de una gran superficie si se quiere alcanzar una potencia importante. Pero esto, aun siendo un factor negativo, no tiene efectividad en zonas desérticas o casi en las que, además, el Sol es más potente y constante. Y es sabido que la superficie ocupada por estas zonas improductivas es —desgraciadamente— grande en el mundo. El problema sería el transporte de la energía hasta las zonas de consumo, asunto del que trataremos más adelante.

(*) En la latitud de los EE. UU. la insolación media diaria, teniendo en cuenta la variación estacional, es de $3,7 \text{ kWh}$ (térmicos) por metro cuadrado por día.

4.1. *Aprovechamientos realizados.*

Si prescindimos de la aplicación esporádica de Arquímedes quemando las naves enemigas, el único uso *directo* de la energía solar hasta hace poco ha sido para la obtención de sal (indirectos ha habido muchos: saltos de agua, molinos de viento, combustibles vegetales, etc.).

Desde hace unas décadas se vienen haciendo ya algunas aplicaciones: primero, concretas y aisladas, y hoy ya sistemáticas de investigación y aplicación que parecen tener un esperanzador futuro:

- En varios países (U.R.S.S., Estados Unidos, Australia y otros) se viene empleando energía solar concentrada para desalar aguas salobres. (Viene a ser la mejora, por concentración, de la antigua técnica.) Esta aplicación es muy útil en sitios alejados, con escasez de agua y demandas limitadas.
- En Font Romeu, en el Pirineo francés, lleva funcionando varios años un horno de 1 MW. Un espejo parabólico fijo de 44 m de lado recoge y concentra los rayos reflejados a su vez por varios espejos planos de orientación variable, que siguen el curso del Sol. El horno consigue una temperatura de 4.000° C, y se emplea en la fusión de metales. La altitud y la limpieza de la atmósfera son factores coadyuvantes al mejor rendimiento de la instalación.

Hagamos notar que esta aplicación es muy propia, pues al concentrar la energía de una gran superficie, prácticamente no hay límites para la obtención de altísimas temperaturas, lo cual abre un amplio campo de aplicaciones, tanto ya conocidas como otras que puedan surgir en el futuro y que exijan temperaturas más altas que las obtenibles ahora industrialmente.

- Las aplicaciones domésticas han sido el campo en donde la investigación y los ensayos se han concentrado más y con mayor extensión y universalidad. Fundamentalmente, en la calefacción de agua para viviendas se han conseguido ya logros importantes, por lo que damos al tema consideración particular. Y hay ensayos para otros usos domésticos: en la U.R.S.S., para cocinas, y en la India, en donde se venden cacerolas con un espejo parabólico.

Calefacción y refrigeración de viviendas.

Es lógico que teniendo el espectro solar una fuerte proporción de rayos caloríficos haya sido la calefacción la primera aplicación en la que se ha pensado.

Desde hace varios años se vienen haciendo ensayos en EE.UU., U.R.S.S., Australia, Israel, Francia, Japón y otros países para uso directo en viviendas, habiéndose obtenido ya resultados muy satisfactorios en la obtención de agua caliente. La calefacción está aún en período experimental, pero próxima a alcanzar resultados prácticos. La climatización es el uso que va con más retraso.

Se utilizan colectores bajo el techo de las viviendas y se están ensayando también en los muros. En calefacción, lograda la debida industrialización, parece que los costes son competitivos —más baratos— que el uso de la energía eléctrica, e incluso que el directo de combustibles fósiles. En cambio, exige mayo-

res gastos de primer establecimiento, compensados después por el ahorro de mantenimiento, lo que, unido a incidir en el ritmo de construcción de la vivienda, le resta por ahora aceptación. Pero el precio creciente de la energía eléctrica y de los combustibles y el abaratamiento conseguido cuando las instalaciones se lleguen a hacer en grandes series, hará crecer rápidamente este uso solar doméstico. En Estados Unidos se espera que en diez o veinte años se generalizará e incidirá favorablemente en el consumo total.

En Florida, ya en 1972 el total de instalaciones solares para calefacción doméstica supusieron nada menos que 1.500 GWh que se ahorraron de otras fuentes tradicionales, y a un coste inferior al procedente de combustibles fósiles (3).

Los colectores suelen calentar el agua a unos 65 ó 70° C, y la instalación cuesta de unos 35 a 50 \$/m², a lo que hay que añadir de un 25 a un 50 por 100 para acumulación (4), (13). Para ésta se usan lechos de gravilla o gas comprimido, que es fácilmente almacenable.

Ya hemos dicho que la climatización lleva más retraso. Parece ser que el sistema más apto es el de absorción-refrigeración, aunque exige temperaturas más elevadas que las usadas en calefacción. Se investiga sobre ello con miras a obtener instalaciones mixtas de calefacción-climatización que darían, de lograrse, mayor utilidad y rendimiento económico.

4.2. *Ensayos e investigaciones para el futuro.*

Todas las actuales realizaciones aplican la energía solar directamente a un uso concreto y directo (horno, calefacción, etc.) en lugares aislados de la red general y con potencias reducidas. Esto sólo ya sería muy importante: piénsese en lo que significaría una generalización de este uso, dadas las grandes superficies urbanas edificadas y el ahorro de consumo de energía de otros orígenes y de transporte que significarían (*). Pero las grandes posibilidades potenciales de la energía solar aconsejan ir a grandes potencias con obtención de energía eléctrica para su inserción en la red general y uso vario a elección.

Para lograr esto, la investigación sigue actualmente tres caminos principales:

- El clásico, concentrando la energía por medio de espejos curvos para calentar el agua o aire de unas tuberías colocadas en el foco y utilizar este calor en turbinas en la forma clásica.
- Recibiendo la energía solar en paneles que la transformen directamente en electricidad.
- Convirtiendo la energía en combustibles sintéticos.

4.3. *Centrales eléctricas solares clásicas.*

En el procedimiento clásico la investigación se centra en conseguir instalaciones más eficientes y económicas, pues las actuales cuestan de 2.000 a 2.500 dólares por kilovatio, con lo que sumados los gastos de mantenimiento resultan, por lo menos, cinco veces más caras que las térmicas. Una de las dificultades prin-

(*) Sobre la base de la insolación media de EE. UU. —similar a la de España—, una casa típica (de una planta) de 150 m² recibe anualmente una energía solar seis veces mayor que la que consume en su calefacción.

cipales es la variación de la incidencia de los rayos en el día y en el año. Para ello, los espejos curvos (parabólicos, en general) se dirigen directamente hacia el Sol. Para paliar los inconvenientes de mover unos grandes espejos, se acude a otros dispositivos: en Font Romeu son varios espejos planos menores los que se orientan hacia el Sol, y envían los rayos reflejos en haz paralelo al gran espejo fijo parabólico; en otro proyecto reciente, en Estados Unidos (14), el espejo curvo es fijo, y por ello puede ser muy grande, y está proyectado de forma que el foco se mueve según un arco reducido, siendo la tubería receptora la que se ajusta al foco, lo cual es más fácil y evita espejos móviles complementarios. Con esta última disposición —según el proyectista— adoptando unos módulos de potencia para poder fabricar en serie, y siendo fáciles las obras de instalación gracias a la inmovilidad de los espejos, se podría llegar a costos competitivos con centrales nucleares.

Otros factores de dificultad y carestía son la conducción del fluido calentado y la acumulación para paliar las desigualdades de producción. Las conducciones son largas y producen pérdidas importantes. Se ensaya la utilización de nitrógeno gaseoso, metal líquido o mezclas de sales fundidas. Y resolver la acumulación con mezclas eutécticas de sales.

4.4. Paneles de conversión fotovoltaica.

En los ingenios espaciales se usan ya células que convierten directamente la energía solar en electricidad, gracias a lo cual pueden mantenerse independientes y autónomos durante años. Pero las actuales células de silicio monocristal, fabricadas en pequeñas series y montadas a mano, son muy caras y exigirían reducir su coste 100 veces para que la energía obtenida con ellas fuera competitiva.

Sin embargo, la investigación prosigue, y se esperan progresos interesantes en este campo. Se ensayan actualmene películas delgadas de materia policristalina (de silicio, sulfuro de cadmio, arseniuro de galio) para sustituir las células de silicio, de duración más breve. Se estima que si con las películas delgadas se consiguieran rendimientos incluso sólo del 4 por 100, serían de utilización económica (3). Se espera conseguir en el próximo decenio un coste de producción por kilovatio del mismo orden que el nuclear, pero aún faltaría resolver económicamente el problema del almacenamiento, o abaratar aún más la producción para poderlo pagar.

En resumen, se prevé que hacia principios de siglo será posible y económica la producción de electricidad en grandes centrales solares, bien clásicas o, más probablemente, de conversión directa.

Las necesidades de energía previstas para Estados Unidos en el año 2000 podrían ser atendidas con menos del 0,5 por 100 de su superficie dedicada a centrales solares. Y se prevé que con una adecuada actividad de investigación en este campo, la energía solar podría suministrar, respecto a las necesidades en el 2020, el 37 por 100 de la energía en edificios, el 30 por 100 del consumo de gas, el 10 por 100 del de combustibles líquidos y el 20 por 100 del consumo eléctrico (2), (3).

Todo lo anterior se refiere a la obtención de grandes potencias y producciones eléctricas en tierra. Pero también se piensa —aunque a mucho más largo

COLECCIÓN DE REVISTAS Y LIBROS
BIBLIOTECA

plazo— en la conversión de energía solar en eléctrica en grandes satélites que la transmitirían a la Tierra por medio de microondas. (Esto resulta mucho más discutible y remoto, pero lo citamos como curiosidad informativa.)

Un satélite situado a un radio de 40 Km podría recibir casi un 40 por 100 más de potencia que en la superficie terrestre. La transmisión por microondas sufriría una pérdida de sólo un 10 por 100, en lugar del 30 por 100 que pierden los rayos solares al atravesar la atmósfera. La ganancia sería aún superior, pues el satélite elimina la menor producción debida a las nubes y la ocasionada por la mayor absorción atmosférica con rayos oblicuos, y puede matener constante una incidencia normal hacia el Sol, consiguiendo, además, eliminar la noche, quedando si acaso limitado el efecto de sombra terrestre a períodos muy cortos. Con todo ello se multiplicaría mucho la continuidad y rendimiento respecto a igual superficie en la tierra (por lo menos seis veces). Y, además, las instalaciones terrestres serían de menor superficie (sólo las necesarias para una recepción más concentrada y su transformación), facilitando los emplazamientos e incidiendo menos en el uso del suelo y del paisaje. A cambio, la transmisión por microondas no está exenta de peligros, pero éstos podrían llegar a resolverse.

Un panel satélite de 8 x 8 Km daría una potencia de 10 GW. Y toda la energía consumida en Estados Unidos en 1970 (68×10^{15} BTU) podría conseguirse con un satélite de 43 Km de diámetro, continuamente orientado hacia el Sol (4), (15).

4.5. *Fotosíntesis.*

Las plantas, por medio de la función clorofilica, transforman la energía solar en materia viva fijando elementos químicos que toman del aire y del suelo. La energía acumulada ha sido utilizada por el hombre para su propia energía biológica (como alimentos) o usándolos como combustibles.

Este mismo proceso puede ser utilizado para aumentar las disponibilidades energéticas de dos formas:

- Consiguiendo un mejor rendimiento del proceso natural.
- Imitándolo para producir directamente productos combustibles de alta concentración energética.

El proceso natural de fotosíntesis puede mejorarse por varios caminos: eligiendo aquellas plantas con mayor capacidad de absorción solar y tratándolas luego para obtener de ellas combustibles ricos. En efecto, con tratamientos adecuados pueden obtenerse grasas, metano y alcohol etílico.

La absorción de rayos solares es más fuerte en ciertas plantas terrestres como la caña de azúcar y los cereales, así como en las acuáticas, en especial las algas. Estas superan a las terrestres en poder calorífico (de cinco a diez veces), pues tienen mayor contenido de proteínas y grasas, y pueden suministrar mayor cantidad de metano. Se estima que dedicando a su cultivo el 5 por 100 del territorio de Estados Unidos, podrían proporcionar por sí solas todas las necesidades de ese gas hasta 2020 (3).

La investigación se está llevando en el sentido de buscar las especies de mayor rendimiento y los procedimientos de elevarlo. Si el rendimiento de conversión

solar, que es del 1 por 100 como medio, se consiguiese sobreelevar al 3 por 100, el 3 por 100 del territorio de los Estados Unidos sería suficiente para suministrar la totalidad del consumo eléctrico previsto para 1985.

Como se ve, esta utilización puede ser de alto interés energético futuro.

Por otra parte, hay también investigaciones para la obtención industrial de combustibles por síntesis artificial. Por ejemplo, se espera que hacia fin de siglo sea posible la hidrogenación del CO_2 del aire para obtener combustibles, goma, etcétera. Lo que se pretende con estas síntesis artificiales es una mejor utilización de la superficie destinada a captar los rayos solares, al propio tiempo que la obtención de combustibles de alta concentración energética para permitir su transporte lejano. Piénsese lo que podría significar en la economía energética mundial el dedicar parte de la superficie de los desiertos a la obtención de combustibles que se transportarían a las zonas habitadas.

4.6. *Aplicación a España.*

Nuestro país es uno de los más soleados de Europa. Y, además —desgraciadamente—, tenemos varias zonas con suelo no productivo o de baja producción. Todo ello favorece la utilización de la energía solar. Como, además, las distancias máximas son del orden de 1.000 Km, incluso con la actual tecnología del transporte eléctrico puede concentrarse la producción en aquellas zonas de peor suelo y menos habitadas. Y, por supuesto, utilizar la superficie edificada para usos directos, planificando debidamente la construcción.

La variabilidad de la producción puede compensarse con los métodos antes citados y, en nuestro caso concreto, con las posibilidades de bombeo reversible que da nuestra orografía.

Dado que nuestra latitud es similar (en líneas generales) a la media de los Estados Unidos, pueden aplicarse las consecuencias prospectivas citadas en el resto del texto, tanto respecto a las posibilidades de aplicación inmediata o próxima (viviendas) como para el tránsito del siglo. Con mayor margen en nuestro caso, pues si el Sol es prácticamente el mismo, nuestro consumo energético en relación con la extensión del territorio es mucho menor. A cambio, nuestras realizaciones solares irán forzosamente retrasadas respecto a los Estados Unidos debido al *gap* tecnológico.

Respecto a la independencia técnica y económica, la utilización con instalaciones clásicas llevaría menos cargas exteriores que las de maquinaria que tienen las actuales centrales térmicas y muchísimo menores que las nucleares. Y a partir de su instalación, el funcionamiento es libre de cargas, salvo las de personal y conservación, muy reducidas y casi totalmente nacionales.

Otro aspecto muy distinto presentaría la utilización de satélites, que no se conciben —al menos en un plazo amplio— sin una fuerte dependencia extranjera. Pero como esta utilización es también muy problemática y remota, no hace al caso.

Por todo ello, estimamos de alto interés que cuanto antes se comience la investigación y ensayos piloto al menos de la utilización doméstica, para aplicarla en cuanto sea posible. Y, en general, para disminuir nuestra dependencia del exterior en tema que parece prometedor y tan apto para nuestra geografía física.

4.7. *Recapitulación.*

La energía solar, por su inmensa amplitud constituye la más importante reserva para la Humanidad, es renovable, limpia y con un horizonte de saturación muy lejano.

Hoy día ya es una realidad en algunos usos directos en viviendas, y en diez a veinte años este uso, en algunos países, puede repercutir en un alivio notorio en la economía energética (*).

La producción de energía eléctrica en grandes centrales terrestres, clásicas o de conversión directa no será realidad hasta el tránsito del siglo. El adjetivo "terrestre" se puede extender al mar, pues cabe hacer centrales flotantes alejadas de la costa que evitan la ocupación del suelo y la incidencia en el paisaje.

La cultura intensiva de algas para obtención de metano y otros combustibles puede ser más próxima. También se espera para principios de siglo la síntesis por hidrogenación del CO₂ del aire.

La utilización de grandes centrales satélites que enviarían energía eléctrica a la Tierra por medio de microondas es mucho más lejana y problemática.

Los resultados de las investigaciones y ensayos en curso son, pues, muy prometedores a plazo no muy lejano. Hay quien opina (4) que el hombre no ha utilizado antes la energía solar porque ha dispuesto de combustibles baratos, pero que si éstos no hubieran existido —o hubieran sido muy difíciles de obtener— hace tiempo que habría sido realidad una civilización basada en la energía solar, pues se habrían dedicado a ella todos los esfuerzos de investigación y prospección que se han volcado en esas otras fuentes energéticas.

5. RESUMEN FINAL

Las energías naturales están prácticamente sin explotar, pues sólo la hidroeléctrica —muy pequeña en proporción de la totalidad— ha sido utilizada. Las posibilidades potenciales y de explotación de las restantes se resumen a continuación:

- La energía de las olas es más espectacular que efectiva, discontinua y difícil de beneficiar. Probablemente no será objeto de utilización, ni siquiera aislada.
- La de las mareas es mucho menor de lo que parece y sólo utilizable en muy contados lugares, y aun en éstos su utilización no está clara. No ha de contarse como reserva real mundial.
- Las corrientes marinas, aunque con potencial importante, no son susceptibles de explotación dados los pequeños gradientes que presentan.
- En cambio, los gradientes térmicos de los mares pueden ser interesantes, una vez perfeccionada la técnica actual. Para las zonas tropicales, podría representar un buen aporte energético, pues su potencial es elevado.

(*) El 25 por 100 del consumo energético es de este tipo.

- La energía eólica puede ir cobrando importancia y desarrollo creciente en ciertas regiones llanas. Se están ensayando grandes unidades para producción eléctrica, que no tendrían mayor impacto en el paisaje que los actuales postes eléctricos o petrolíferos.
- En los lugares con yacimientos de vapor seco, su energía se está empezando a usar con precios competitivos. Pero la investigación se dirige a la utilización de los campos de agua caliente y rocas secas calientes, mucho más difundidas y con potencial muy elevado. De conseguir avances de las técnicas de perforación y utilización en lo que queda de siglo (como se espera) esta energía podrá dar una parte importante del consumo total, bien en forma directa (calefacción) o eléctrica.
- La energía solar supone la mayor reserva potencial energética. Su principal inconveniente es la poca densidad de flujo, al que se añade la variabilidad periódica y accidental. Su uso directo en viviendas es prometedor y parece relativamente próximo, lo que representaría un considerable ahorro. La producción de electricidad es todavía bastante cara, pero se espera hacerla competitiva hacia principios de siglo. En ese plazo también se espera obtener resultados satisfactorios de la fotosíntesis. Si todo esto se confirmase, la Humanidad dispondría de una reserva energética para un plazo comparable con el de su futuro como especie terrestre.
- El uso y extensión de estas energías naturales —principalmente de la solar y geotérmica— dependerá directamente de los avances de sus tecnologías, e indirectamente de los de las técnicas nucleares, sobre todo de la fusión del átomo y de la confirmación o fracaso de la seguridad de las centrales nucleares. Y, por supuesto, cabe esperar un uso combinado de todas las fuentes energéticas.

SELECCION BIBLIOGRAFICA CONSULTADA

1. World Energy Conference: "Survey of Energy Resources, 1974".
2. O.C.D.E.: "Science et technologie pour l'énergie: Problèmes et perspectives, 1975".
3. O.C.D.E.: "Perspectives énergétiques jusqu'en 1985". París, 1974.
4. National Petroleum Council-U.S. Energy Outlook: "New Energy Forms", 1973.
5. EUGENIO VALLARINC: "Evaluación del potencial mareomotriz de las costas españolas y análisis del valor económico de los posibles aprovechamientos". Conferencia Mundial de la Energía. Madrid, junio 1960.
6. E. M. WILSON: "Energy from the sea--tidal power". Underwater Journal, agosto 1973.
7. ERIC JEFFS: "Is tidal power showing signs of revival?". Energy International, diciembre 1974.
8. JOHN P. FINNEY: "Geothermal resources", presentado al Atomic Industrial Forum Conference on Energy Alternatives, Technologies, Economies and Priorities, febrero 1975, Wáshington D.C.
9. W. E. SCOTT, MICHAEL SWISS y ERIC JEFFS: "Rising fuel costs give boost to geothermal energy". Energy International, enero 1975.
10. JOSEPH BARNEA: "New resources of power: Geothermal Resources World Energy Supplies Conference". Financial Times y BOAC, septiembre 1973.

11. I. DIAZ DE BERRICANO y F. PENDAS FERNANDEZ: "Los recursos geotérmicos". Empresa Nacional Adaro, marzo 1974.
12. TSVI MEIDAY: "Costs of geothermal steam capacity". The Oil and Gas Journal, 10 marzo 19 5
13. E. Y. LAM y G. L. SMITH (Bechtel Corporation): "Commercial utilization of solar energy or spare conditioning and power generation".
14. JOHN RUSSELL, Jr.: "Investigation of a central station solar power plant". Comunicación presentada a la Solar Thermal Conversion Workshop, 11-12 enero 1973, Washington, D.C., y producida por General Atomic Company, agosto 1973.
15. PETER E. GLASER: "Solar energy: Future power source". EM 6, enero 1972.