

ENERGIAS SOLAR Y EOLICA. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Por Carlos SANCHEZ TARIFA
Director del Departamento de Energía
y Propulsión, INTA
Catedrático de la ETSIA

1. LAS NUEVAS FUENTES DE ENERGIA Y LA CRISIS ENERGETICA

El tema de las nuevas fuentes energéticas, concretamente el de las energías solar y eólica, que es en el que se va a centrar esta exposición, recibe hoy día una considerable atención, pero no siempre en sus justos términos, ya que el tema se ha mitificado hasta cierto punto, y el enfoque de sus programas tiene con frecuencia matices de tipo político.

La crisis de la energía existe, y de su acertada resolución depende en gran manera el futuro de la Humanidad, pero su virulencia actual tiene también un importante trasfondo político.

Los combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón cubren actualmente el 97 por 100 de la demanda mundial de energía, correspondiendo al petróleo y gas natural el 70 por 100 de la misma.

La relación actual de producción anual/reservas totales para el petró-

leo (1) tiene un valor medio mundial del orden del 2,7 por 100, siendo semejante para el gas natural y habiendo cambiado poco estas relaciones en los últimos años (cuadro núm. 1). Aunque son muy variables las hipótesis que pueden hacerse en cuanto a posibles hallazgos futuros de petróleo y gas natural y sobre índices de consumo, puede afirmarse que hay petróleo y gas natural para unos treinta años como mínimo.

Las reservas de carbón son considerablemente más abundantes y la relación producción anual/reservas tiene un valor medio mundial de 0,28 por 1.000. A los niveles actuales de consumo habría carbón para unos doscientos años, pero no duraría el carbón más de unos sesenta-ocho años si tuviera que sustituir al petróleo y gas natural.

El uso masivo de carbón lleva con-

(1) No se incluyen los hidrocarburos que podrían obtenerse de las arenas bituminosas y pizarras, cuyas reservas son del orden de 250×10^9 tec y 750×10^9 tec, respectivamente, es decir, superiores a las reservas combinadas de petróleo y gas natural, pero de difícil extracción.

sigo importantes problemas de extracción y de tipo ecológico. Gran parte de estos últimos problemas se resuelven con la gasificación del carbón o la obtención a partir de él de combustibles líquidos a precios que ya no son muy superiores a los del petróleo natural (2).

En todo caso puede afirmarse que en conjunto hay combustibles fósiles como mínimo para cerca de un siglo, por lo que ese clima de prisa frenética y de subidas espectaculares de los combustibles se debe en gran parte a presiones de tipo político-económico a nivel mundial.

Esta conclusión no obsta para que sean por completo necesarios y urgentes los programas de investigación y desarrollo de nuevas formas de energía, nuclear y solar principalmente, ya que la Humanidad tendrá forzosamente que vivir de ellas en un próximo futuro; y también puede añadirse que ninguna solución se presenta fácil.

En otra parte de este artículo se trata la energía nuclear. Solamente señalaremos que la energía de fisión con reactores de uranio natural o enriquecido tiene una vida muy limitada, a causa de la escasez de reservas de uranio, por lo que es vital para esta forma de energía el desarrollo de los reactores rápidos auto-regeneradores o «breeders». Si se llegan a desarrollar en gran escala estos reactores, desarrollo que representa espinosos problemas de reducción del «tiempo de doblado» y de seguridad, se dispondrá de energía nuclear para muchos años, posiblemente varios siglos.

En los Estados Unidos se ha llevado a cabo un estudio sobre la situación consumo/reservas para toda

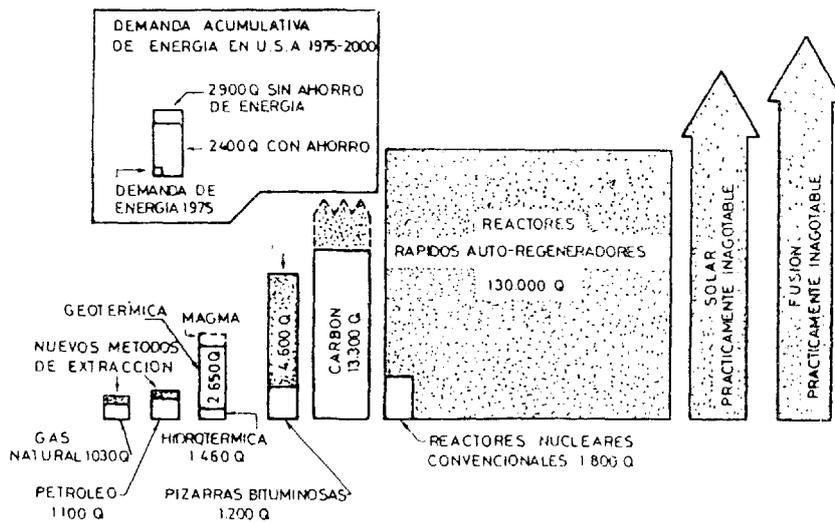
(2) Se cita también el aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera, que aumenta un 0,2 por 100 acumulativo anual, lo que podría alterar el clima aumentando la temperatura media mundial. No obstante, no puede olvidarse que este CO_2 se está simplemente devolviendo a la atmósfera, ya que fue anteriormente extraído de ella y acumulado en forma de combustibles fósiles.

CUADRO NUM. 1

SITUACION RESERVAS-CONSUMO DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES (*)

Z o n a	Relación reservas totales/ Producción anual (años)		
	Petróleo	Gas natural	Carbón
Africa	47	147	259
América del Sur	35	23	255
Asia (excepto China)	43	81	100
Canadá	15	35	315
China	—	—	192
Estados Unidos	13	12	356
Oceanía	15	186	287
U.R.S.S.	21	81	197
Total mundial	37	38	192

(*) Según Survey of Energy Resources, IX Conferencia Mundial de la Energía 1974. La situación media mundial actual es aproximadamente la misma.



RESERVAS DE ENERGIA EN USA Y DEMANDA DE ENERGIA EN QUADS (Q=10¹⁵ BTU=0.2510¹⁵ KCAL) (SEGUN DOCUMENTO ERDA 76-1) LA SITUACION MUNDIAL ES ANALOGA EN CUANTO A CARBON Y ENERGIA NUCLEAR (IGUAL PROPORCION RESERVAS Y CONSUMO.) EN PETROLEO USA CONSUME UN 25% DEL TOTAL MUNDIAL Y SUS RESERVAS SON EL 7% DE LAS MUNDIALES

Figura 1

clase de fuentes de energía primaria, cuyos resultados se resumen en la figura 1. En la figura se indica que la situación mundial en cuanto al uranio y carbón es semejante, y puede observarse que aunque ambas reservas energéticas son importantes en relación con la demanda, en un plazo no muy largo de tiempo, de unas pocas generaciones a lo sumo, no existirán más que dos alternativas energéticas para la Humanidad: la energía de fusión y la energía solar.

La energía solar hay que considerarla, pues, en dos aspectos: como fuente energética actual, obediendo a las leyes del mercado de oferta y demanda, y como fuente posible alternativa de energía primaria para el futuro, cuyas perspectivas dependerán de lo que acontezca con los reactores auto-regeneradores, en primer lugar, y con la energía de fusión, en último término.

Con frecuencia se citan y programan planes energéticos en los que

coexisten la energía nuclear junto con la solar. Estimamos que esta situación solamente será posible si las soluciones energéticas que coexistan (solares, eólicas u otras) con la nuclear son más económicas que ésta, ya que muy parecidos problemas de tipo ecológico o de seguridad presentaría una solución 100 por 100 nuclear, que un 80 por 100 nuclear y 20 por 100 solar, por ejemplo.

2. ENERGIA SOLAR

2.1. Aspectos fundamentales

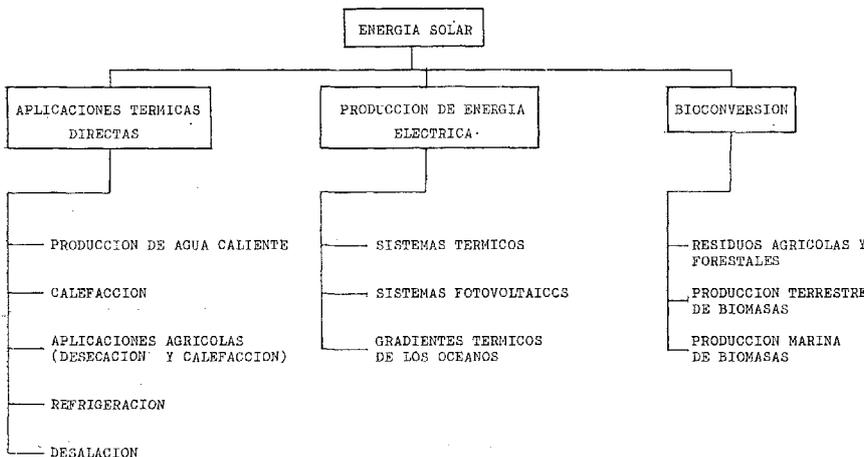
La energía solar tiene tres propiedades características, que constituyen el origen de sus ventajas e inconvenientes. La primera es su gran abundancia, ya que la energía radiante que llega a la superficie terrestre es unas diecisiete mil veces superior a la demanda mundial de energía. La segunda propiedad es su escasa concentración, ya que solamente llegan a la superficie terrestre de 800 a 1.000 wátios por metro cuadrado, y eso en regiones de elevada insolación y en horas punta, con lo que resulta que se necesita una superficie de 5 a 10 hectáreas para producir un megavatio de potencia eléctrica media anual. La tercera importante propiedad es su carácter intermitente, lo que implica la necesidad de acumular energía en casi todas sus aplicaciones, y muy especialmente si se quisiese utilizar la energía solar para producir energía eléctrica de base, en cuyo caso la acumulación de energía representaría una enorme inversión, como se comentará más adelante.

La energía solar puede aprovecharse de muy diversas maneras (cuadro núm. 2). De hecho, la energía solar viene utilizándose desde la más remota antigüedad en forma de biomasa (leña) y en formas energéticas derivadas de ella (energías eólica e hidroeléctrica).

A consecuencia de la crisis de la energía y de la subida del petróleo, los programas de desarrollo de la energía solar se encuentran en plena expansión (fig. 2), existiendo importantes programas de investigación y desarrollo en diversos países, Mercado Común y Agencia Internacional de la Energía.

Estos programas se centran principalmente en cuatro áreas: aplicaciones térmicas directas, generación de energía eléctrica mediante sistemas térmicos, generación de energía eléctrica mediante células fotovoltaicas, biomasa y energía eólica, esta última con frecuencia incluida como capítulo de la energía solar.

Cuadro núm. 2



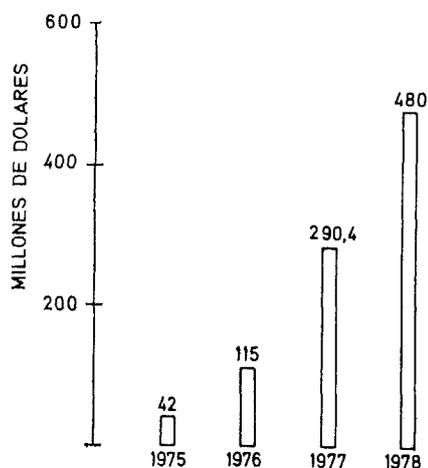
CUADRO NUM. 3
APLICACIONES TERMICAS DIRECTAS DE LA ENERGIA SOLAR

Tecnología	Estado de desarrollo	Relación coste/coste sistema convencional	Problemas de aplicación	Perspectivas futuras y observaciones
Agua caliente (sector doméstico) (colectores planos).	Comercial.	1 ~ 1	Pequeños. Dificultades de instalación en casas de varios pisos ya construidas. Falta legislación que promueva.	Bueno. Pequeño impacto en el balance energética del país.
Calefacción (colectores planos de vacío y colectores con concentración).	Semi-comercial	1-1,5	Difícil en edificios ya construidos y en casas de varias plantas. Falta legislación.	Buenas en algunos países. Dificultades para uso en gran escala.
Refrigeración (colectores con concentración).	Experimental.	1,5-2,5	Elevado coste.	Buenas si se reducen costes (sol y calor suelen ir juntos). Pequeño impacto energético en nuestro país.
Aplicaciones agrícolas (baja temperatura).	Semi-comercial.	1 ~ 1	Falta información Falta legislación.	Se estima que el 50 por 100 de la demanda puede cubrirla la energía solar.
Aplicaciones industriales (baja y media temperatura) (vapor).	Experimental.		Falta legislación.	El 50 por 100 de la energía consumida en la industria es a baja y media temperatura (vapor). Es potencialmente un campo importante para la energía solar.

2.2. Aplicaciones térmicas directas

En el cuadro número 3 se resume el estado actual de las aplicaciones

Figura 2



'PRESUPUESTO DEL MINISTERIO DE ENERGIA EN USA PARA ENERGIA SOLAR

térmicas directas de utilización de la energía solar.

En este sector es en donde la energía solar puede llegar a cubrir una gran parte de la demanda energética.

El sector comprende aplicaciones de baja temperatura (menos de 100° C), tales como agua caliente en viviendas, industria y agricultura, calefacción, secadores, piscinas y otros, y de media temperatura (100-200° C) principalmente refrigeración, desalación, producción de vapor y bombas de calor.

Estas aplicaciones térmicas directas constituyen un sector energético de gran importancia. Solamente el sector doméstico puede llegar a alcanzar en algunos países el 25 por 100 de la demanda total de energía (en España solamente sobrepasa algo del 70 por 100) y en la industria es todavía más importante, ya que la producción de agua caliente y vapor puede alcanzar cifras del orden del 50 por 100 del consumo energético total del sector, que, a su vez, puede ser del orden del 50 por 100 del consumo de energía del país. Por último, en la agricultura las aplicaciones térmicas directas implican una importante proporción de su consumo energético, sobre todo en países no muy desarrollados, aplicaciones que en gran parte podrían ser cubiertas por la energía solar.

No obstante, la introducción de estas tecnologías solares, como se verá a continuación, encuentran muchos obstáculos, por lo que esta introducción es muy lenta en la práctica.

Las aplicaciones de baja temperatura se solucionan mediante colectores planos, cuyas tecnologías se encuentran bien desarrolladas, aunque continúan llevándose a cabo programas de investigación en todo el mundo orientados fundamentalmente a mejorar los índices coste/eficacia y a prolongar la vida de los mismos.

La producción de agua caliente, tanto en el sector doméstico como en el industrial, se encuentra ya en estado semi-comercial, existiendo numerosos fabricantes de colectores planos (en España hay más de cincuenta). No obstante, para que estos sistemas solares sean realmente competitivos se necesita el soporte de una legislación adecuada que ayude económicamente en forma directa e indirecta a su introducción.

En el sector doméstico su introducción tropieza con la dificultad de adaptar la instalación solar a la instalación convencional ya existente de agua caliente, especialmente en edificios de varias plantas. No obstante, el sistema es sencillo y factible, pero su influencia en el balance energéti-

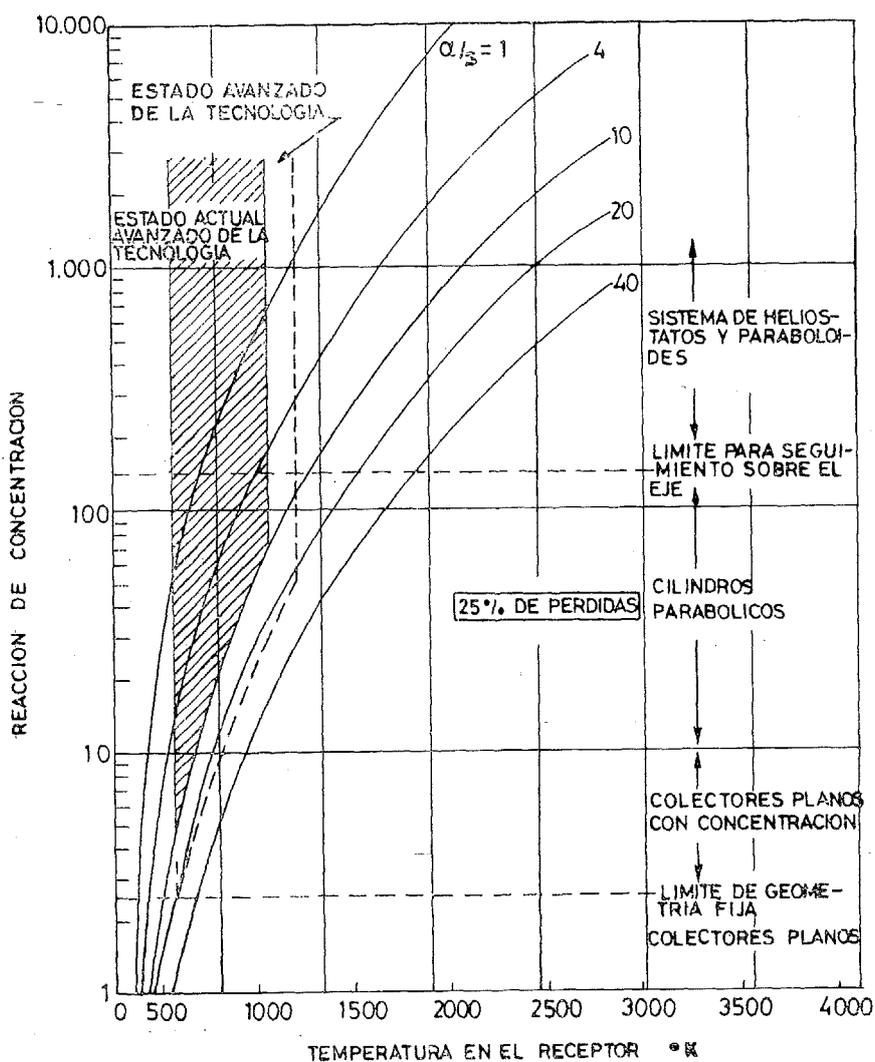


Figura 3

co global del país será siempre muy pequeña. En la industria el sistema encuentra menores inconvenientes para su introducción y su potencial de ahorro energético es más elevado.

La introducción de la calefacción solar encuentra mayores problemas. Por una parte, no existe área suficiente en el tejado de un edificio de varios pisos para situar los colectores que se requirieren (3), por lo que habría que disponer, cuando fuese posible, colectores verticales en los muros, que son de menor rendimiento. Por otra parte, sería muy costoso acoplar las

(3) En una casa aislada se necesita un área de colectores aproximadamente igual a la superficie horizontal de la vivienda, y en una de varios pisos el área de colectores por vivienda se reduce a una cifra del orden de la mitad.

instalaciones solares a instalaciones ya existentes y los colectores planos sencillos son muy poco eficientes para las temperaturas para las que están diseñados los sistemas de calefacción convencionales, por lo que habría que utilizar colectores planos de vacío o colectores con concentración, ambos más costosos.

No habría mayores dificultades para proyectar las viviendas de nueva edificación, de una o pocas plantas, para que fueran provistas de sistemas solares de producción de agua caliente y calefacción, esta última con el agua (o aire) a menores temperaturas que los sistemas actuales y con mayor superficie de radiación. Aún en edificios de varias plantas podría utilizarse la energía solar para la producción de agua caliente y parte de la calefacción. Estos sistemas

no son todavía competitivos (4), y además necesitan un sistema convencional de reserva para los períodos nublados de larga duración, ya que la acumulación de energía para varios días de calefacción aún sería más costosa. Por todo ello, para fomentar su introducción es totalmente necesario una legislación adecuada, tanto en el sector doméstico como en el industrial, sin la cual la introducción de los sistemas solares será tan lenta que no tendrá repercusión práctica alguna durante muchos años en el balance energético del país. Esta legislación está en preparación, según tenemos entendido, por el Centro de Estudios de la Energía del Ministerio de Industria y Energía.

Los sistemas de media temperatura, refrigeración y producción de vapor no son competitivos económicamente con los sistemas convencionales; pero no están muy lejos de ello. Todavía se encuentran en fase de desarrollo.

La refrigeración presenta la ventaja de que el calor y el sol casi siempre coexisten. Por otra parte, el impacto energético de la refrigeración en España es francamente pequeño. Mucho mayor potencial de ahorro energético presenta la producción de vapor, siempre que aún se encuentran en fase experimental y son de difícil introducción.

Interesa también destacar que carece de sentido fomentar en el sector doméstico los sistemas solares sin utilizar al máximo los sistemas pasivos, especialmente el aislamiento térmico, con el que puede reducirse la demanda energética de calefacción y refrigeración a cifras del orden de la mitad.

Por último, puede señalarse que la Ingeniería Aeronáutica ha jugado un importante papel en el desarrollo de este sector, especialmente en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, en donde se han llevado a cabo importantes programas de investigación, nacionales e internacionales; se ha desarrollado una norma nacional para el ensayo de colectores, y se homologan los colectores de fabricación nacional (figs. 4-a y b).

2.3. Energía eléctrica

Aunque la energía eléctrica solamente alcanza a cifras del 25 por 100 de la demanda total de energía primaria en la mayoría de los países en el sector más importante por razones

(4) El precio de una instalación de agua caliente para una casa unifamiliar (chalet) es del orden de las 150.000-200.000 pesetas, y se amortiza en ocho-diez años según las hipótesis que se hagan sobre la inflación y los intereses del capital. Una instalación de calefacción para una vivienda de esta clase cuesta de 1,5 a 2 millones de pesetas, y es de difícil amortización.

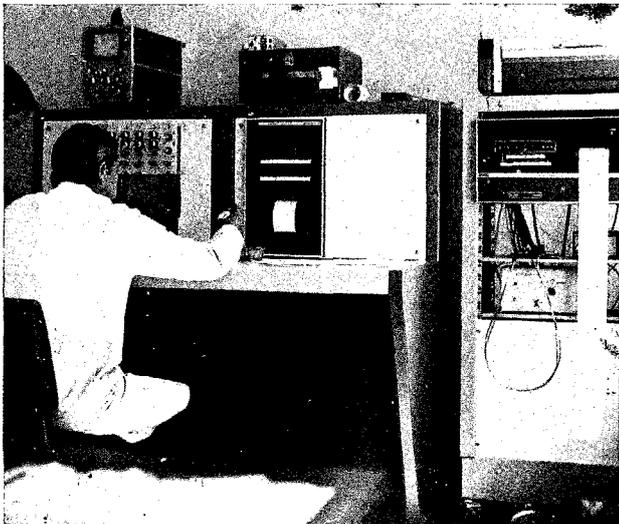
CUADRO NUM. 4

PRODUCCION DE ELECTRICIDAD MEDIANTE ENERGIA SOLAR

Tecnología	Estado actual	Coste energía/Coste sistema convencional (Futuro)		Aplicaciones	Perspectivas y Observaciones
		Punta	Base		
Plantas termoeléctricas (colectores distribuidos).	Plantas piloto.	2-5?	—	Plantas 10-500 KW.	Escasas si las fotovoltaicas reducen costes.
Plantas termoeléctricas (torre central).	Plantas piloto.	2-5?	10-25?	Plantas 1-100 MW	Depende del desarrollo de energía nuclear y células fotovoltaicas. Posible sistema de reserva a falta de otras opciones.
Células fotovoltaicas (sin y con concentración).	Comercial en sistemas especiales y plantas pequeñas en sitios remotos.	1-3?	10-15?	Plantas de cualquier potencia, incluso en grandes plantas espaciales.	Depende de lo que se reduzcan sus costes y del desarrollo de la energía nuclear. Buenas en sitios remotos.
Biomásas (energía eléctrica).	Plantas piloto.		~ 1	Quema de residuos agrícolas y urbanos. Cultivos especiales.	Buenas pero limitadas.
Biomásas (combustibles sintéticos).	Plantas piloto.		~ 1	Utilización de residuos agrícolas y urbanos. Cultivos especiales.	Buenas pero limitadas.
Gradientes térmicos de los océanos.	En estudio y pequeñas plantas piloto.		~ 1	Grandes plantas flotantes en zonas tropicales o subtropicales.	Están por determinar.

Figura 4b.—Ensayo de colectores en el INTA.

Figura 4a.—Banco de colectores del INTA. Equipo de registro y tratamiento de datos.



CUADRO NUM. 5

PLANTAS ELECTRICAS DE ENERGIA SOLAR. GRANDES PROGRAMAS

País u Organización	Tecnología	Potencia	Objetivos	Estado de Desarrollo
U.S.A.	Torre central (vapor).	10MWe	Operación y mantenimiento.	En construcción.
U.S.A.	Torre central (vapor).	5 MW (térmicos)	Ensayo de componentes.	Terminado.
Japón.	Torre central (vapor).	5 MW	Operación y mantenimiento.	En construcción.
Mercado Común.	Planta termoeléctrica. Torre central (vapor) (Italia).	1 MW	Operación y mantenimiento.	En construcción.
Agencia Internacional de la Energía.	Colectores distribuidos (Almería)	0,5 MWe	Operación y mantenimiento.	En construcción.
Agencia Internacional de la Energía.	Torre central (sodio) (Almería).	0,5 MWe	Operación y mantenimiento.	En proyecto.
Proyecto CESA-1. Centro de Estudios de la Energía.	Torre central (sodio) (Almería).	1 MWe	Operación y mantenimiento.	En proyecto y construcción.

bien conocidas, siendo posiblemente la más significativa el que la energía eléctrica puede satisfacer prácticamente cualquier otra forma de demanda energética.

Mediante la energía solar puede generarse energía eléctrica mediante diversos sistemas, como se muestra en el cuadro número 4, en el que también se resumen el estado actual y perspectivas de los mismos. A continuación se discuten los sistemas térmicos y fotovoltaicos, que son los que potencialmente al menos podrían

proporcionar energía eléctrica suficiente para satisfacer la demanda global de la misma.

2.3.1. SISTEMAS HELIO-TERMICOS

En los sistemas helio-térmicos la energía solar se utiliza como una simple fuente térmica, pudiendo utilizarse sin conectar (colectores planos), concentrada linealmente (colectores cilindro-parabólicos con seguimiento según un eje) y puntualmente (para-

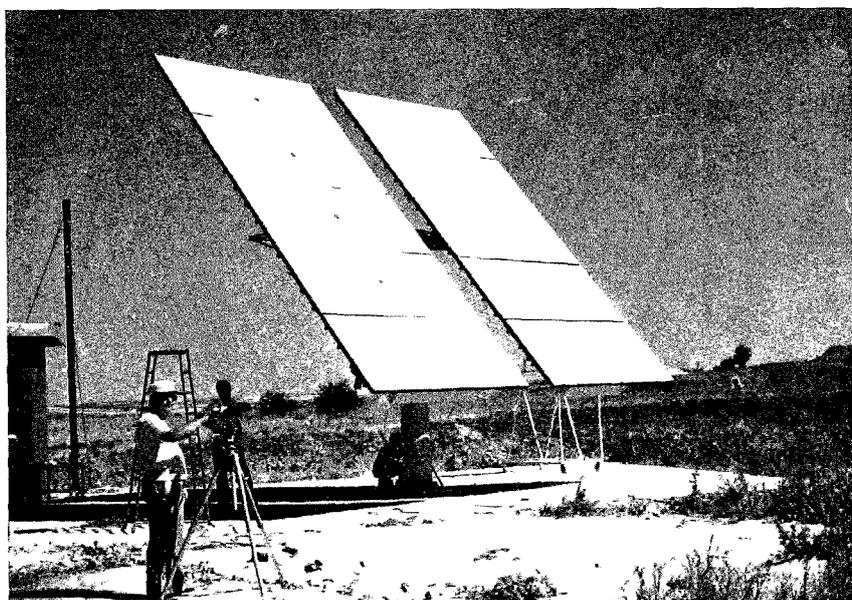
boloide o campo de heliostatos con seguimiento solar en dos ejes). Cuanto mayor es la concentración mayores son las temperaturas que pueden conseguirse (fig. 3) y mayor, por tanto, el rendimiento termodinámico del ciclo productor de potencia. Por ello los colectores planos son de escaso uso en esta aplicación, excepto en plantas de muy pequeña potencia.

Los sistemas de concentración lineal ofrecen ventajas en la zona de potencia de 50 a 500 kilowatios; pero al aumentar la potencia por encima de la última cifra la sencillez de su sistema de colectores no compensa la gran longitud de sus conducciones («piping») y su menor rendimiento termodinámico en comparación con los sistemas de torre central y campo de heliostatos. Precisamente, las dos plantas de la Agencia Internacional de la Energía (cuadro núm. 5) que van a instalarse en Almería, ambas de igual potencia y de los dos tipos citados, incluyen entre sus objetivos el obtener datos comparativos de esta importante cuestión.

En el mencionado cuadro se exponen los principales programas piloto de plantas helio-térmicas que se están llevando a cabo en el mundo.

Estos programas de torre central tropiezan con dificultades mayores de las previstas para el desarrollo de heliostatos de bajo coste, con rigidez estructural suficiente para evitar deformaciones térmicas y aerodinámicas que puedan deformar la imagen recibida en el colector central, situado a gran distancia (centenares de metros) de los mismos. Estas dificultades con los heliostatos están produciendo un cierto renacimiento de los sistemas

Figura 5a.—Heliostato SENER.



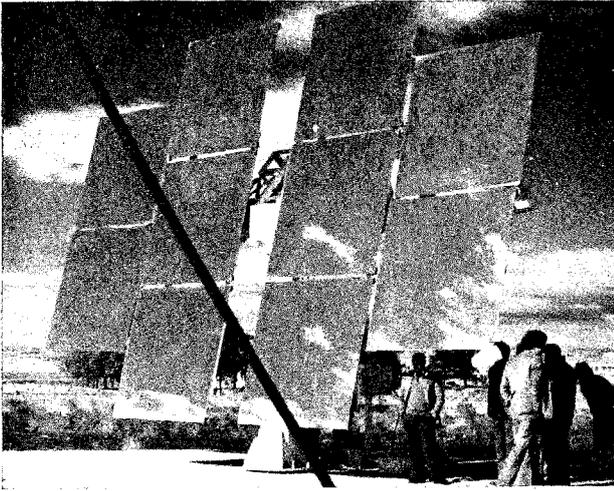


Figura 5 b.—Heliostatos CASA.

de concentración a base de un paraboloide único, que fueron abandonados por considerarse demasiado costosos.

La estimación de los costos totales de estas plantas helio-térmicas de torre central han sufrido revisión, citándose actualmente como cifras alcanzables los 1.500 dólares por kilowatio punta.

No está claro el porvenir de estas plantas de potencia, excepto si los «breeders» no llegan a desarrollarse ni la energía de fusión, y aun entonces habría que contar con la posible competencia de los sistemas fotovoltaicos.

Como plantas punta existe el inconveniente de que las horas de sol y el verano no coinciden con las horas ni estación de mayor demanda energética, respectivamente. Además, aun admitiendo la cifra de 1.500 dólares por kilowatio punta, que se traduce en una cifra del orden del doble al considerar la potencia media diurna la utilización como planta punta proporciona coeficientes de utilización muy bajos, y con ello costes muy elevados de la energía producida, ya que se trata de plantas, como las nucleares, en las que los costes de inversión predominan fuertemente sobre los costes de explotación (5).

Para la generación de potencia en sitios aislados las plantas helio-térmicas han de contar con la competencia de los sistemas fotovoltaicos, eólicos y aun con una combinación de ellos. En estos casos hay que considerar que las plantas helio-térmicas presentan la desventaja de que el coste por kilowatio de su motor (turbina) crece fuertemente al disminuir la potencia, cosa que no acontece con

los sistemas fotovoltaicos y sólo parcialmente en los eólicos.

Para la producción de energía eléctrica de base sólo es posible concebir que se utilicen en el futuro estas plantas si no se desarrollan los reactores «breeders» y la fusión no resulta factible. La potencia instalada sería de tres a cinco veces, la que se requeriría con sistemas de acumulación de energía para compensar los efectos de la falta de sol en invierno-verano, posiblemente basados en el hidrógeno.

A pesar de todo lo expuesto, estas plantas helio-térmicas son los sistemas que en el momento actual ofrecen a menor coste o con menores incertidumbres tecnológicos la posibilidad de potencial de producir energía eléctrica en gran escala a partir de la energía solar, por lo que su investigación está justificada. Es más, esta solución helio-térmica sería técnica y económicamente factible a gran escala solamente con pequeños sa-

crificios de la sociedad de consumo. La construcción de 10 GWe anuales de plantas helio-térmicas, suficientes para satisfacer el incremento anual de la demanda de energía eléctrica en Europa, requeriría una cantidad de acero que no llegaría al 30 por 100 del que se destina anualmente a la producción europea de automóviles (6), y en cuanto al cristal necesario no llegaría más que al 6 por 100 de la producción anual europea.

Finalmente, también se señala que la industria aeronáutica participa activamente en los programas nacionales de energía helio-térmica. Las sociedades CASA y SENER participan en el programa CESA-1, y en el INTA se ensayan y estudian los heliostatos diseñados y contruidos por diversas sociedades (figs. 5 y 6). CASA participa también en el programa de torre central de la Agencia Internacional de la Energía.

2.3.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos, aunque conocidos desde antiguo en los laboratorios, fueron desarrollados como sistemas de producción de energía eléctrica en los programas espaciales. Los paneles fotovoltaicos de células de silicio de baja relación peso/potencia y elevada confiabilidad han proporcionado durante años sin interrupción y sin problema alguno de mantenimiento la energía necesaria para centenares de satélites y laboratorios especiales, aunque eso sí, a un costo muy elevado (150.000-200.000 dólares por kilowatio punta) (7).

(6) Según datos de la McDonnell Douglas.

(7) Existe en estudio la generación de energía eléctrica en satélites geostacionarios de muy grandes dimensiones y su envío a la Tierra mediante haces de micro-ondas.

CUADRO NUM. 6

EVOLUCION ESTIMADA DEL COSTE EN \$/KW DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (A PRECIO CONSTANTE, DOLARES DE 1975)

País o Agencia	Año 1975	Año 1980	Año 1985	Año 1990-2000
U.S.A. (Jet Propulsión Laboratory)	20.000	12.000	500-1000	200-500
Alemania (AEG, Telefunken).	Reducción de costes a 1/50-1/100 precios actuales.			
Japón (Proyecto Shunsine) .	Reducción de costes a 1/50-1/100 precios actuales.			
Mercado Común	Competir con motores Diesel a corto plazo. Competir con energía convencional (punta) a largo plazo.			
India	1985 - Programa rural de electrificación y de bombeo de agua a 500 \$/KW.			

(5) Las plantas helio-térmicas de torre central pueden tener costes de mantenimiento importantes de su campo de heliostatos.

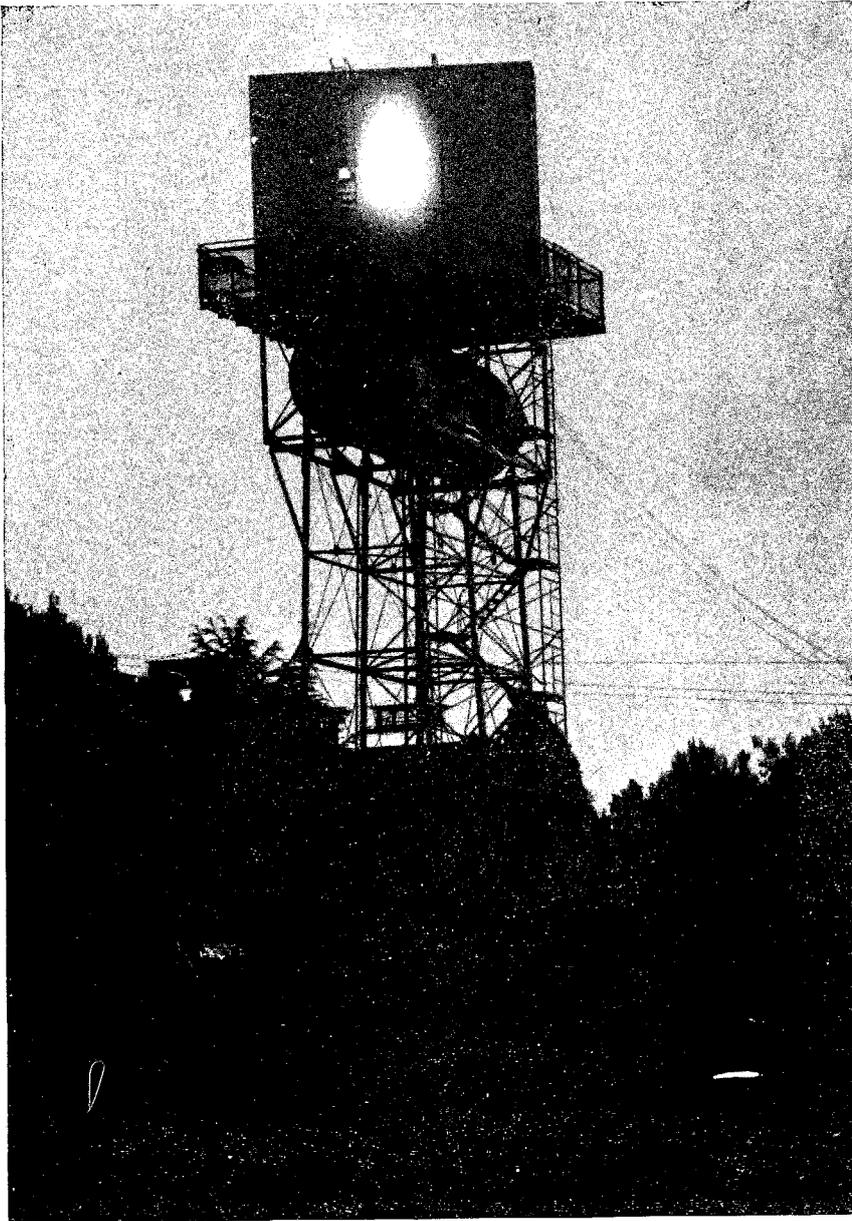


Figura 6.—Ensayo de heliostatos en el INTA. Imagen del heliostato sobre pantalla instrumentada.

Los sistemas fotovoltaicos se utilizaron posteriormente en aplicaciones terrestres, reduciéndose los precios en un orden de magnitud al requerirse menor calidad. No obstante, el coste seguía siendo excesivo, utilizándose estos sistemas fotovoltaicos en aplicaciones muy específicas en sitios remotos.

Los sistemas fotovoltaicos presentan características muy atractivas: sencillez, confiabilidad, escaso mantenimiento y naturaleza totalmente modular. Esta última característica es muy deseable en energía solar, ya que al ser esta energía distribuida

es deseable que se recoja también en forma distribuida, utilizando trozos de superficie terrestre de escaso uso (tejados, terrenos de desecho e incluso autopistas).

En los sistemas fotovoltaicos la cuestión precio continúa constituyendo el tema central.

Están en pleno desarrollo numerosos programas de investigación sobre células fotovoltaicas, orientados fundamentalmente en dos direcciones: fabricación de células de bajo costo del tipo de película delgada y desarrollo de sistemas fotovoltaicos diseñados para trabajar con concentra-

ción solar (desde unos pocos hasta mil soles). Los programas de investigación comprenden el desarrollo de células utilizando otros materiales (GaAs, CdS y otros), desarrollo de células de alto rendimiento (hasta 24 por 100) a elevada concentración y abaratamiento mediante desarrollo de nuevos procesos de fabricación en continuo de células de silicio (monocristalinas y policristalinas), y automatización de la construcción de paneles.

Todos estos numerosos programas (hay quien opina que demasiados) están fundamentalmente dirigidos a reducir costos, bien directamente o indirectamente utilizando concentración, pero en este caso a costa de una mayor complicación, o bien aumentando el rendimiento (8).

Diversos países han establecido programas nacionales para reducir el costo de estos sistemas (cuadro número 6) con ambiciosos objetivos. Estos objetivos han tenido que revisarse, estimándose en el momento actual, que posiblemente pueda alcanzarse un coste de 1.500 dólares por kilowatio punta en 1986.

Un problema importante en relación con los costes es el que al disminuir el precio de los paneles se hace más importante el costo del equipo eléctrico asociado a los mismos, destinado a transformar la energía eléctrica en forma de corriente continua de baja tensión que generan las células.

La reducción de costes está mostrando que constituye un problema de no fácil solución. Si se consiguen los 1.500 dólares por kilowatio punta, el pequeño mercado actual de las células fotovoltaicas se ampliaría considerablemente, pero el verdadero «break» se produciría si se consiguieran reducir los costes a unos 500 dólares por kilowatio punta (9), en cuyo caso el mercado mundial de células alcanzaría ingentes cifras (10), y se podría competir con la energía eléctrica convencional en muchas aplicaciones. No obstante, aún está por ver si estas cifras son realmente alcanzables.

3. ENERGIA EOLICA

3.1. Introducción

Aproximadamente un 2 por 100 de la energía solar que llega a la Tierra se transforma en la energía cinética del viento, con un total, en potencia, superior a 10^{11} GW.

(8) Actualmente las células de silicio tienen un rendimiento punta del orden de 0,12. Rendimientos por debajo de 0,10 no son comerciales.

(9) Actualmente el precio es del orden de 20 veces esta cifra.

(10) Unos $0,25 \times 10^6$ dólares, según ref. 6.

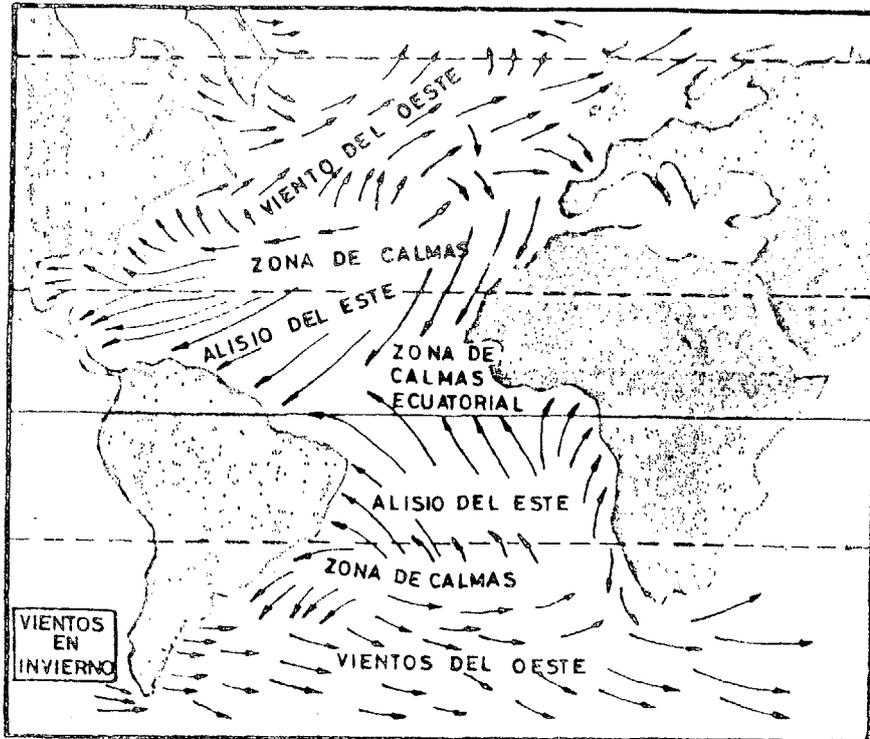
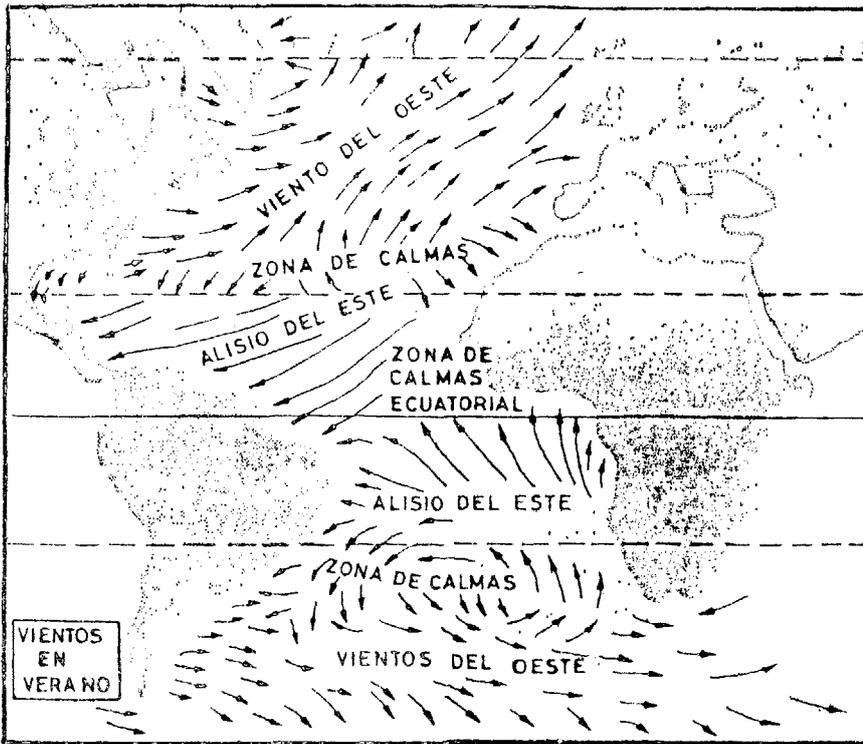


Figura 7.—Circulación de los vientos.

Las grandes circulaciones de tipo planetario son ocasionadas por el desigual calentamiento de la Tierra en las zonas ecuatoriales y polares, que

elevan el aire caliente en las primeras zonas y lo mueven a través de la atmósfera superior hacia los Polos, mientras que el aire frío tiende a

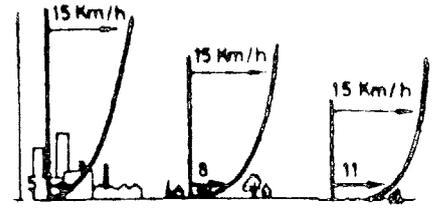


Figura 8

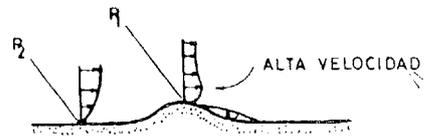


Figura 9

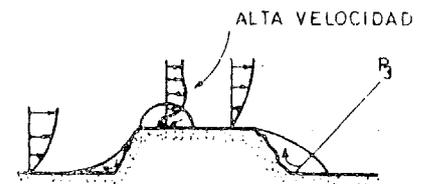


Figura 10

circular junto al suelo de los Polos hacia el Ecuador.

La rotación de la Tierra modifica estas corrientes, dando origen en conjunto a las grandes circulaciones de vientos: los alisios del WE y SE, los vientos del Poniente, típicos de las latitudes de unos 40 a 55° N y S, los vientos polares del Este y las grandes zonas de calmas (Ecuador o «Doldrums», trópicos de Cáncer y Capricornio y altas latitudes) (fig. 7).

Estas grandes corrientes de viento son modificadas por efectos térmicos a menor escala, originados por el desigual calentamiento de tierras y océanos, y en la superficie terrestre por los accidentes orográficos.

Como es sabido, la potencia del viento es proporcional a la tercera potencia de su velocidad, siendo, por tanto, muy sensible a variaciones de la misma.

En primer lugar, el rozamiento del viento sobre el suelo o sobre la superficie de los mares origina una capa límite, creciendo el viento considerablemente con la altura (fig. 8). Por otra parte, los accidentes del terreno pueden modificar en forma muy importante la velocidad del viento, y en mucho mayor proporción la potencia. Una colina o montaña redondeada (fig. 9) puede dar lugar a que una aeroturbina situada en P_1 puede tener una potencia muy superior a la de una aeroturbina situada en P_2 . Por el contrario, una montaña de bordes agudos (fig. 10) origina zonas de remanso a sotavento, como P_3 , de escaso potencial eólico.

Los valles y zonas entre dos montañas también aumentan considerablemente la velocidad del viento cuando su dirección coincide aproximadamente con la del valle.

A estos efectos orográficos hay que añadir los efectos térmicos locales de ciclo diurno-nocturno típicos de tiempo cálido (brisas y terrales en las costas y vientos de ladera en los valles del interior).

Por todo ello determinar el potencial energético eólico de una región con orografía complicada es labor costosa y difícil, pudiendo existir en ellas con frecuencias auténticas «cuencas eólicas» (11).

Como es sabido, la energía eólica se utilizó en gran escala por la Humanidad, siendo desterrada por la electricidad y los combustibles baratos. La crisis de la energía ha impulsado fuertemente el aprovechamiento de aprovechamiento de esta fuente de energía, que, como las fotovoltaicas, han sido las únicas capaces de atraer capital privado entre las nuevas fuentes energéticas de producción de energía eléctrica. En la actualidad están en pleno desarrollo en diversos países un importante número de proyectos de grandes plantas (cuadro número 7) y existen más de setenta fabricantes privados de aeroturbinas.

Como se verá más adelante, la energía eléctrica que se obtiene a partir de la energía del viento es, con mucho, la más barata entre las nuevas fuentes de energía, e incluso competitiva a los costes actuales de la energía eólica en regiones de elevado potencial eólico.

No obstante, no es probable que la energía eólica pase de ser una fuente auxiliar de energía, aunque eso sí, pudiendo llegar a proporcionar una importante proporción de la demanda de energía primaria. Las razones de ello es su carácter intermitente, y su desigual distribución, siendo, en general, escasa en el interior de los continentes (fig. 11).

3.2. Aeroturbinas. Aplicaciones

Existen numerosos tipos de máquinas capaces de transformar la energía cinética del viento. Las más importantes, con mucho, son aquellas que se basan en las fuerzas de sustentación ejercidas por el viento sobre palas diseñadas con perfiles aerodinámicos, y entre ellas las de eje horizontal, bipalas o tripalas, y las de eje vertical tipo Darrieus. Estas aeroturbinas son las que tienen mayor coeficientes de potencia (fig. 12), y son las más económicas.

(11) Un caso típico es el paso de San Gorgonio en California, en donde existe un potencial eólico de 2.400 MW.

CUADRO NUM. 7
GRANDES PLANTAS EOLICAS

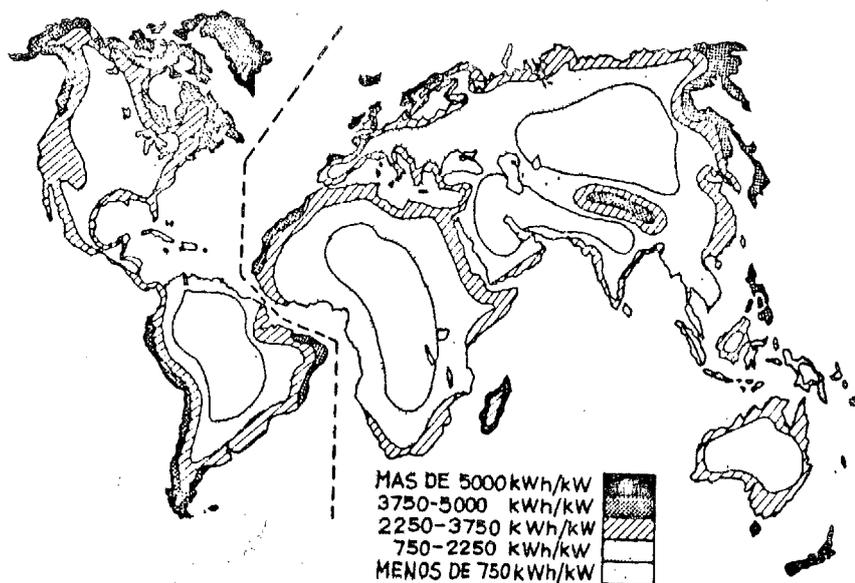
Planta	País	Potencia (kW)	Tipo	Estado
Mod. 0	USA	100	Horizontal	En operación
Mod. 0A	USA	200	Horizontal	En operación
Mod. 1 (General Electric)	USA	2000	Horizontal	En operación
Mod. 2 (Boeing)	USA	2500	Horizontal	En construcción
Westinghouse	USA	200	Horizontal	Comercial
WTG Energy Systems	USA	200	Horizontal	Comercial
Sandia-Alcoa	USA	300	Darrieus	En construcción
ID-ER	CANADA	224	Darrieus	En operación
MBB	ALEMANIA	5000	Horizontal	En proyecto
Danish EU	DINAMARCA	630	Horizontal	En operación
CEE-INTA	ESPAÑA	100	Horizontal	En proyecto

CUADRO NUM. 8
ENERGIA PRODUCIDA POR AEROTURBINAS DE EJE HORIZONTAL Y PASO VARIABLE

Velocidad media del lugar (m/seg.)	Energía anual producida por unidad de potencia nominal instalada (KW.h/kW)
6	2.800
8	4.600
10	5.650

En la actualidad todos los grandes proyectos de aeroturbinas son de eje horizontal con palas de paso variable; pero las de eje vertical presentan excelentes perspectivas, ya que son más sencillas al no necesitar mecanismos de cambios de paso ni de orientación al viento; son estructuralmente más fuertes, y habiendo alcanzado últimamente coeficientes de potencia semejantes a los que se obtienen en aeroturbinas de eje horizontal.

Las aeroturbinas de pequeña potencia ya se encuentran bastante desarrolladas, utilizándose para la producción de energía eléctrica en sitios alejados de redes eléctricas y para usos agrícolas, principalmente riegos. Ya que estas aeroturbinas son de muy reciente desarrollo (dos o tres años), el mercado para ellas no ha hecho más que iniciarse. El principal problema de la producción de energía en un sitio remoto es la ne-

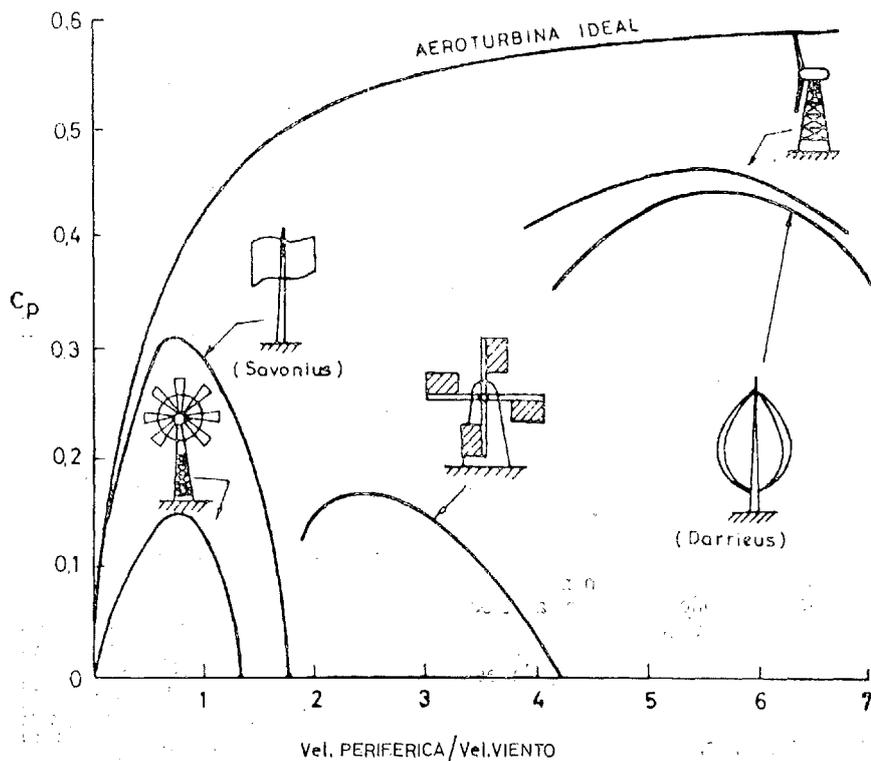


ENERGIA EOLICA MUNDIAL DISPONIBLE ANUALMENTE

kWh EN UN AÑO PRODUCIDOS POR UNA MAQUINA DISEÑADA PARA PRODUCIR UN kW EN UN VIENTO DE 40 Km/h.

Figura 11 ▲

▼ Figura 12



cesidad de almacenarla, lo que es muy costoso (12), excepto acumulando agua, por lo que solamente resulta factible para pequeñas potencias (alumbrado, televisión, etc.) o para riegos.

Para la producción de energía eléctrica con plantas eólicas accionadas un generador conectado directamente a la red se han desarrollado y están operando como plantas piloto aeroturbinas en potencia de 1 a 3 MW (cuadro núm. 7). Al aumentar la potencia disminuye el costo por kilowatio (fig. 15), pero estas grandes potencias se consiguen a base de diseñar palas de gran longitud (13), en las que los problemas aeroelásticos se vuelven extraordinariamente difíciles. Por ello en el momento actual la potencia óptima de las aeroturbinas de eje horizontal para la generación de energía eléctrica en plantas unidas a ésta comprendía entre 1 a 5 MW.

3.3. La energía del viento en España. Programas

De acuerdo con lo expuesto en el párrafo 3.1, el conocer con precisión el potencial eólico en un país tan accidentado como España y con tal abundancia de islas y costas es un trabajo difícil y laborioso.

La Comisión Nacional de Energías Especiales (CEE) llevó a cabo un importante programa de medición de vientos en España en las décadas del 50 y del 60. Sus datos, tomados en cincuenta y nueve estaciones y promediados durante varios años, son muy importantes, ya que los puntos de medición fueron seleccionados precisamente buscando puntos de alto potencial eólico; pero estos programas de medición se limitaron a las regiones del Centro, Nordeste, Noroeste, Sur (zona del Estrecho) e islas Canarias.

El Instituto Nacional de Meteorología (INM) mide regularmente el viento en más de cien estaciones meteorológicas distribuidas por toda España. El emplazamiento de estas estaciones no fue seleccionado buscando sitios de elevado potencial eólico, y en gran número de casos sus emplazamientos se encuentran en aeropuertos y ciudades. En el caso de las islas Canarias, por ejemplo, en el que hay abundancia de datos de las dos procedencias, los datos de potencias

(12) Las baterías actuales cuestan unas 6.000 a 8.000 ptas. kWh/h. acumulado y tienen de vida unos 1.500 ciclos. Existen otros sistemas (aire comprimido, producción de hidrógeno, volantes de inercia, etc.) que se encuentran en desarrollo.

(13) La aeroturbina Mod. 1 (USA) de 2 MW tiene 91,5 metros de diámetro, y la Mod. 2 de 2,5 MW, 100 metros.

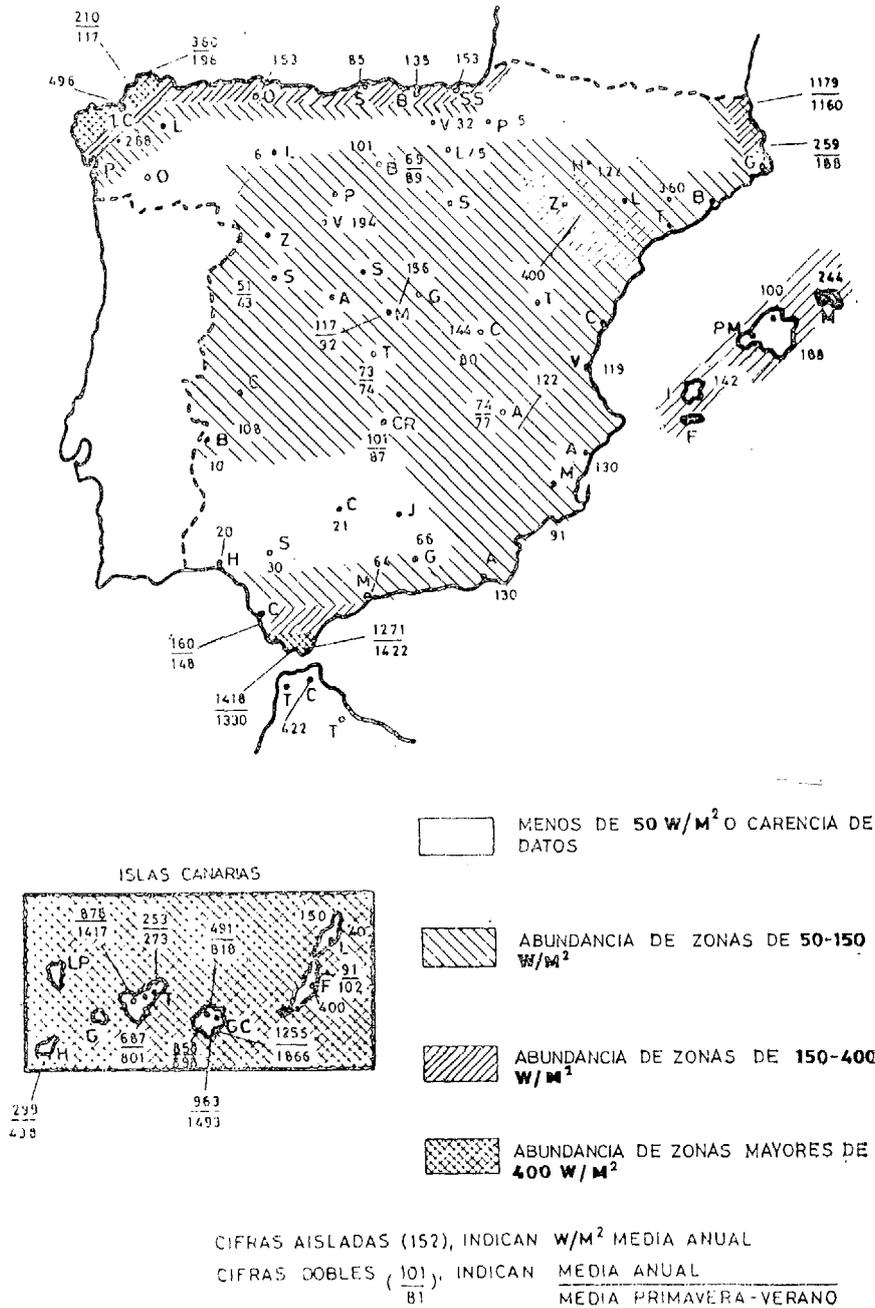


Figura 13.—Energía eólica en España.

medias obtenidas por la CEE son siempre muy superiores a las medidas por el INM.

Además, gran número de datos de la CEE fueron obtenidos con energímetros, que proporcionan directamente la potencia obtenible del viento. Por el contrario, el INM mide velocidades del viento, y de sus valores medios hay que obtener medias cúbicas para obtener la potencia del viento, resultando valores más pequeños.

Por todo ello los valores del INM,

únicos de que se dispone en muchas regiones españolas, hay que considerarlos únicamente como valores indicativos.

Con todos los datos anteriormente citados se ha preparado un mapa con las energías eólicas medias anuales en España (14) (fig. 13). Teniendo en cuenta las limitaciones ya mencionadas en los datos de partida y la es-

(14) Ref. núm. 10.

casez o ausencia de los mismos en muchas regiones españolas, dicho mapa sólo puede considerarse como una primera aproximación.

Puede apreciarse que en España hay dos zonas de energía eólica muy elevada (Canarias y la región del Estrecho) y cuatro zonas de energía elevada (Noroeste, Nordeste, Baleares y valle del Ebro). En el Centro la energía eólica no parece elevada, aunque probablemente habrá numerosas zonas con energías superiores a 150 vatios por metro cuadrado.

Así, pues, en España existen abundancias de regiones en las que la energía eólica es aprovechable para la producción de energía eléctrica (media superior a 200 vatios por metro cuadrado), y en la mayor parte del país es utilizable para usos agrícolas (más de 50 vatios por metro cuadrado).

La actividad más importante en energía eólica que se lleva actualmente a cabo en España es el desarrollo de una planta de 100 kilovatios de potencia para ser instalada en la provincia de Cádiz, en las proximidades de Tarifa. Este proyecto fue promovido por el INTA (15), y actualmente lo patrocina el Centro de Estudios de la Energía.

La planta piloto consiste en una aeroturbina de eje horizontal, bipala de paso variable, cuyos datos se insertan en la figura 14. El proyecto se encuentra ya casi terminado, colaborando en el mismo las empresas SENER y Construcciones Aeronáuticas.

Por otra parte, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos se han llevado a cabo y se continúan realizando trabajos sobre la utilización de la energía eólica en España (ref. 12).

3.4. Coste de la energía. Perspectivas

Los costes de la energía eléctrica producida mediante aeroturbinas dependen fundamentalmente de los costes de inversión, energía producida y vida de la aeroturbina, ya que los costes de explotación son muy reducidos (se estima que son del orden del 1 por 100 anual del coste de inversión).

Partiendo de los datos energéticos del cuadro número 8, de los costes de las aeroturbinas mostrados en la figura 15, y fijando quince años para

(15) El proyecto fue iniciado por el autor de este trabajo como programa competitivo con el Departamento de Energía USA. No obstante, el INTA trabajó en el proyecto con sus propios medios durante algo más de dos años. El proyecto es totalmente nacional, ya que la ayuda USA se ha limitado a la entrega de equipos de medición de vibraciones.

CUADRO NUM. 9
PRECIO DE LA ENERGIA (PTS. KW. H.)

Viento medio anual (m/seg) en el sitio de emplazamiento			10	8	6
Turbina de 8 KW	Producción artesana (10 unidades)	SI	1 85	2 30	3 80
		CI	3 45	4 25	6 95
	Producción limitada (1 000 unidades)	SI	0 95	1 15	1 90
		CI	1 75	2 15	3 50
	Producción serie (10 000 unidades)	SI	0 80	1 00	1 60
		CI	1 45	1 90	2 90
Turbina de 15 KW	Producción artesana	SI	1 50	1 85	3 05
		CI	2 75	3 40	5 55
	Producción limitada	SI	0 75	0 95	1 50
		CI	1 40	1 70	2 80
	Producción serie	SI	0 65	0 80	1 30
		CI	1 15	1 45	2 35
Turbina de 40 KW	Producción artesana	SI	1 30	1 60	2 70
		CI	2 45	3 00	4 90
	Producción limitada	SI	0 65	0 80	1 35
		CI	1 25	1 50	2 45
	Producción serie	SI	0 55	0 70	1 15
		CI	1 05	1 25	2 10

la vida de las aeroturbinas, valor más bien conservatorio, se ha realizado el cálculo de los costes de la energía producida que figuran en el cuadro número 9 para tres lugares de velocidad media de viento de 6, 8 y 10 metros por segundo y para tres tipos de aeroturbinas con potencias de 8, 15 y 40 kilowatios, con producciones de 10, 1.000 y 10.000 unidades, calculadas con el interés normalmente utilizado por el Banco Mundial, o sea del 10 por 100 (C.I.) y sin interés de financiación (S.I.). El caso límite en el que no se cargue interés alguno podría acontecer en el caso de que el Estado concediera préstamos sin interés para impulsar este tipo de energía. También sirve este caso para poder apreciar comparativamente la influencia de los intereses del capital.

Como puede apreciarse en el citado cuadro, en cuanto el potencial eólico es elevado los costes de la energía producida por las aeroturbinas son francamente atractivos, y para una producción en series limitadas resultan competitivos a los precios actuales de la energía eléctrica.

El problema técnico-económico más importante con que se encuentran las aeroturbinas es el de conseguir una vida operacional larga (al menos quince años), con gastos de mantenimiento reducidos, y el estudio de este problema es precisamente el objetivo principal de los programas piloto actualmente en desarrollo. Esta larga vida es perfectamente factible, ya que, a pesar de las difíciles condiciones de trabajo de las palas de las aeroturbinas, sometidas a fatiga por vibraciones ocasionadas por gran número de factores (16), actualmente se

(16) Estela de la torre, capa límite, ráfagas y fenómenos aeroelásticos.

dispone de información suficiente para diseñar dichas palas para que so-

porten números prefijados (en millones) de ciclos.

Existen también problemas de tipo ecológico (ruido y posible deterioro del paisaje), pero se consideran de menor cuantía (17).

Un problema de gran envergadura que dificultaría el desarrollo en gran escala de la energía eólica es su variabilidad. Cuando en un país o región su consumo energético fuese en gran parte de origen eólico, se presentarían problemas de difícil solución al acoplar el sistema eólico con un sistema de reserva de producción de energía, por la rápida respuesta que habría que exigir a este sistema. Por ello, la energía eólica se acopla mal con las centrales nucleares y con las centrales térmicas convencionales, con la excepción de las turbinas de gas. Precisamente, por las características de rápida puesta en marcha y

(17) Existe actualmente un importante problema de ruido de muy baja frecuencia en la aeroturbina Mod 1, situada en Carolina del Norte

Figura 14

CARACTERISTICAS PRINCIPALES

EMPLAZAMIENTO

TARIFA (CERRO DEL CABRITO)

POTENCIA

100 KW

VIENTO NOMINAL :

12 m/s

VELOCIDAD DE GIRO :

139 r p m

ENERGIA ANUAL *

685 000 KWH (CERRO DEL CABRITO)

ROTOR

17 m , BIPALA, PASO VARIABLE

PALAS

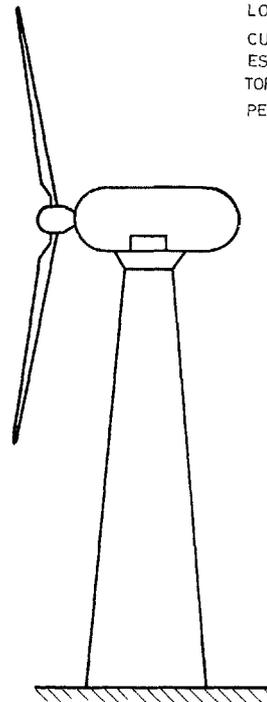
LONGITUD 7 8 m.

CUERDA 100 cm (BASE), 17 cm (EXTREMO)

ESPESOR 40 cm ("), 2 cm (")

TORSION 12° ("), -1° (")

PERFIL NACA 23040 ("), 23012 (")



ESQUEMA DE AEROTURBINA

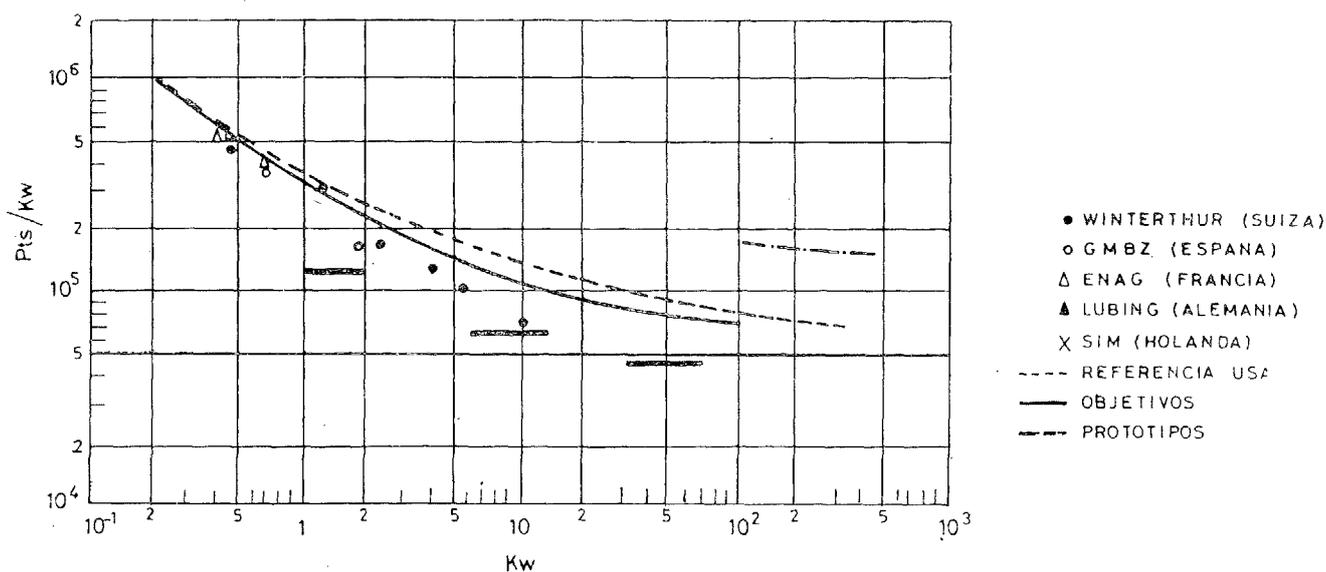


Figura 15

buen funcionamiento a régimen variable de estos grupos de potencia, ha sido estudiado detenidamente bajo los puntos de vista técnicos y económicos el funcionamiento combinado de aeroturbinas y turbinas de gas, sistemas que pudieran llegar a ser competitivos en regiones de elevado potencial eólico (18).

No obstante, el acoplamiento ideal de un sistema eólico de producción de energía eléctrica es con un sistema hidroeléctrico. Este acoplamiento ha sido estudiado en detalle, ofreciendo excelentes perspectivas técnico-económicas (19), ya que la energía hidráulica es el único sistema económico de almacenar energía mecánica,

siendo además de respuesta rápida y flexible a las necesidades de la demanda (20).

Por ello los países que dispongan de energía hidroeléctrica y de energía eólica podrán multiplicar por un factor elevado su producción de energía eléctrica en forma sencilla y a costo reducido.

(18) Según un informe de la Space Division de la General Electric.

(19) Ha sido estudiado, por ejemplo, el funcionamiento combinado del sistema hidroeléctrico de Noruega con un posible futuro sistema eólico en Dinamarca.

(20) El tema ha sido estudiado en detalle en la Ref. 10.

REFERENCIAS

1. National Solar Energy Research. Development and Demonstration Program. ERDA-49, 1975.
2. Federal Wind Energy Program. ERDA-49, 1975.
3. Gervais C. L. y Bos P. B.: Solar Thermal Electric Power. Aeronautics and Astronautics. Nov. 1975.
4. Häfele, W.: Energy Options Open to Mankind Beyond the Turn of the Century, Atomic Energy Commission. IN-36/358, 1977.
5. Proceedings of 3rd Annual Solar Heating and Cooling Research and Development Brand Contractors' Meeting. US Dept. of Energy, 1979.
6. Kaplow, R.: Solid Photovoltaics y Recent Progress in Solid State Solar Cells Comple, Proceedings. Milan 1979.
7. Rizzini, S.: Current Studies of Growth Processes for Solar Grade Silicon. Comple, Proceedings. Milan 1979.
8. Gretz J.: Thermomechanical Solar Power Electricity Generation Comple, Proceedings. Milán 1979.
9. Sánchez Tarifa C.; Fraga E.; Crespo A. y Güemes Gordo A.: Programa para la Utilización de la Energía del Viento en España. Programa Cooperativo. Project III-P-3051. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 1980.
10. AIAA/SERI Wind Energy Conference. Boulder Co. USA 1980. Proceedings.
11. Third International Symposium on Wind Energy Systems. Proceedings Copenhagen, 1980.
12. Sánchez Tarifa C.; Fraga E.; Salvá Monfort J.: Estudio del Aprovechamiento de la Energía Eólica para la Agricultura en España, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, 1980.