

# EL POTENCIAL INTRINSECO DE LAS FUENTES DE ENERGIA

José María MARTINEZ-VAL, Manuel PERLADO y Mireia PIERA

## ENERGIA

*En el revuelto mundo de la energía del último decenio han aflorado multitud de ideas, diseños y conjeturas acerca de las más dispares fuentes de energía e, incluso, sobre panaceas que de la noche a la mañana podían acabar con la crisis energética. Estas últimas, notorio es, no pasaron de sueños tan anticientíficos como irreales.*

*Y en cuanto a lo primero, diez años después de iniciada la crisis, el panorama de fuentes de energía comercializadas no ha variado apenas. Hay que anotar, con esperanza de futuro a bastante largo plazo, una serie de programas de investigación perfectamente consolidados sobre bases teóricas y prácticas, y patrocinados por los gobiernos de mayor solvencia en el desarrollo tecnológico e industrial*

*El objetivo de este artículo no es pasar revista a estas iniciativas fundamentadas y a otras de menor calibre, ni tampoco enjuiciar su repercusión en la superación de la crisis. En el artículo, tan sólo se tratará de valorar cuantitativamente el potencial intrínseco de cada fuente de energía, por lo que habrá que comenzar definiendo cuáles son éstas, lo que requerirá cierta discusión inicial.*

José M.<sup>a</sup> MARTINEZ-VAL es Doctor Ingeniero Industrial, catedrático de Tecnología Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid y Subdirector de Investigación y Doctorado de la E.T.S.I.I.M.

José Manuel PERLADO MARTIN es Doctor Ingeniero Industrial, profesor de Física Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid y miembro en excedencia de la Junta de Energía Nuclear, donde desempeñaba funciones de Jefe de Grupo en el área de Reactores Avanzados. Es investigador principal en el contrato de colaboración con la I.A.E.A. sobre reactores híbridos fusión-fisión.

Mireia PIERA CARRETE es Ingeniero Industrial y profesora del Departamento de Tecnología Aplicada en la Universidad Nacional de Educación a Distancia.

## FUENTES DE ENERGIA

Todos los procesos físicos observados en nuestro Universo pueden explicarse por la interacción de cuatro tipos de fuerzas: la gravitatoria, a la que son sensibles todos los cuerpos que tienen masa; la electromagnética, que actúa entre cuerpos con carga eléctrica; la fuerza nuclear fuerte, que constituye el cemento que liga entre sí a los componentes de los núcleos atómicos, y la fuerza nuclear débil, importante para explicar muchos fenómenos de la evolución del Universo, pero que tiene escaso interés en los intercambios energéticos de nuestro entorno (salvo en las desintegraciones radiactivas).

En nuestro actual nivel de conocimientos –y dada las incertidumbres que aún existen en las teorías unificadas– se puede afirmar que tales fuerzas son las originarias de todos los intercambios energéticos, lo que equivaldría a considerarla como las primigenias fuentes de energía. Esta realidad, sin embargo, subyace tan en el fondo de nuestro entorno físico que resulta inadecuado tomarlas como referencia para un análisis como el que se pretende llevar a cabo. Es preferible centrarse en los modos energéticos a los que estamos acostumbrados por experiencias casi directas, o por la rutina histórica que ha ido conformando ciertos tipos de aplicaciones energéticas satisfechas con determinadas fuentes de energía.

En la tabla 1 se muestran estas formas energéticas convencionales relacionadas con las fuentes primigenias. Su mera observación permite identificar la procedencia de los conceptos y términos energéticos al uso, aclara las posibles vías de análisis, y resulta fundamento imprescindible para una exposición razonada de las propiedades físicas –entre ellas, su potencialidad intrínseca– de las fuentes de energía.

El mencionado cuadro no contiene todo lo necesario acerca de las transformaciones energéticas, sino el mero esqueleto de las mismas. Faltaría añadir el conjunto de principios físicos y constantes universales que rigen la naturaleza: conservación de la masa-energía, del impulso, del número nucleónico, de la paridad, de la carga eléctrica, más los principios de la electrodinámica, termodinámica, electroquímica, y demás ramas de la física. A ellos se recurrirá en el estudio específico de cada fuente de energía, que consideraremos según la lista convencional, y en cierto modo cronológica, que se cita a continuación:

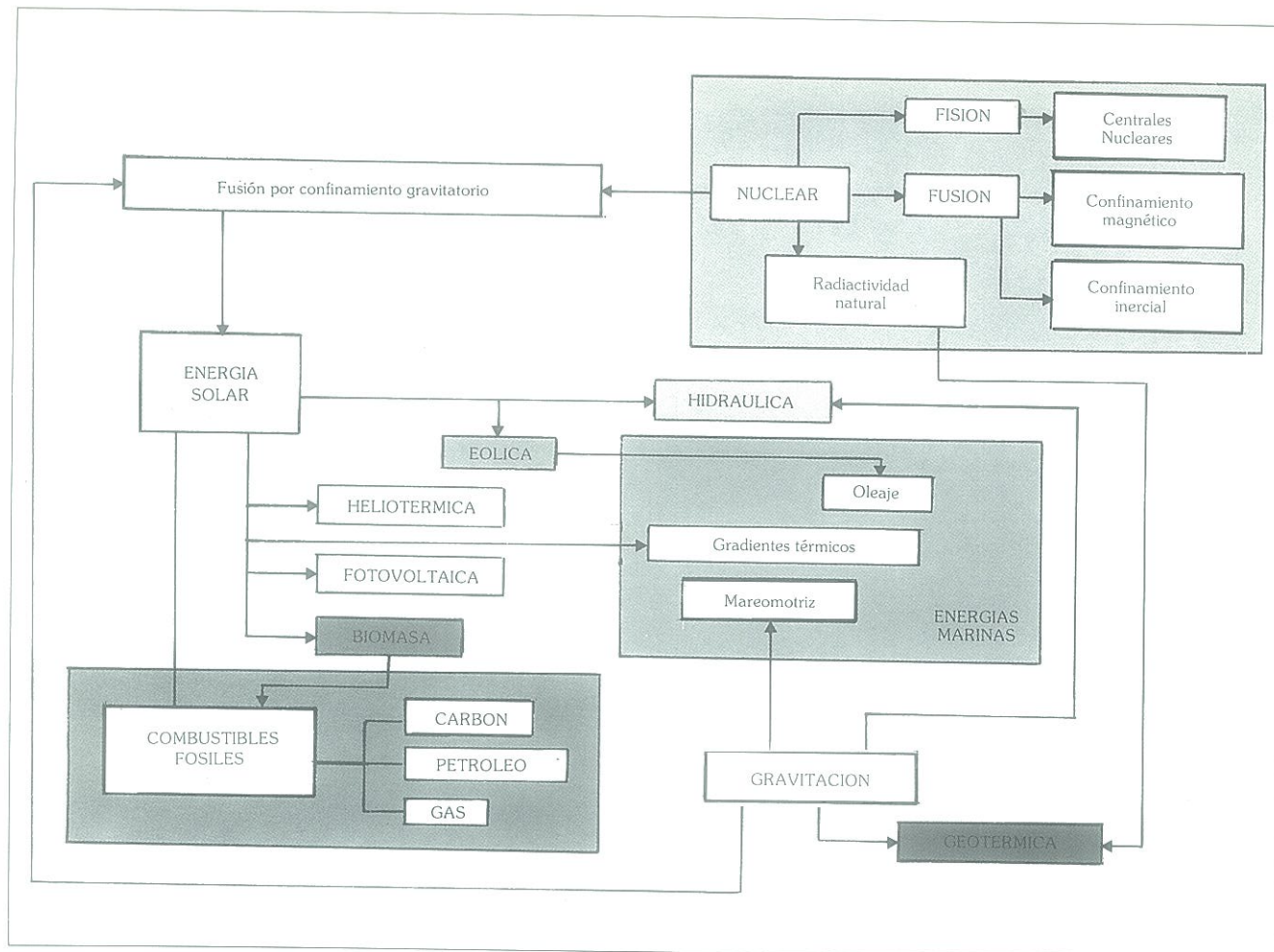
- Biomasa
- Combustibles fósiles
  - \* Carbón
  - \* Petróleo
  - \* Gas natural
- Eólica
- Hidráulica
- Geotérmica
- Energía marinas
  - \* Oleaje
  - \* Gradientes térmicos
  - \* Mareas
- Energía solar (directa)
  - \* Heliotérmica
  - \* Fotovoltaica, fotoeléctrica y fotoiónica
- Energía Nuclear
  - \* Fisión
  - \* Fusión

## FUENTES RENOVABLES Y NO RENOVABLES

Antes de comparar entre sí conceptos tan dispares como los que anteceden, conviene precisar algunos aspectos que influyen en la importancia socioeconómica que han tenido, tienen y podrán tener en cuanto a fuentes de energía con mayor o menor participación en la satisfacción de la demanda energética.

La primera distinción a hacer proviene de la naturaleza temporal de las fuentes. Unas, las no renovables, se basan en reservas terrestres cuyo inventario no sólo tiene un tope práctico o económico, sino también teórico, que es el máximo total. A otras fuentes se las denomina renovables, porque su inventario (apreciable respecto de las necesidades humanas) se genera a partir de otra u otras fuentes más primigenias, cuya acción se estima vaya a durar muchísimos años. Conviene hacer la precisión, no obstante, de que las fuentes de energía renovables no son fuentes eternas, sino fuentes cuya vida está dominada por otras causas físicas. Los ejemplos más normales son las energías alimentadas por la radiación solar, desde la hidráulica a la biomasa, en las cuales, diferentes elementos terrestres –a través de diversos mecanismos –evaporación, fotosíntesis–, convierten los fotones solares en formas energéticas más útiles aprovechables por el hombre.

Desde el punto de vista anterior, en las fuentes no renovables habrá que valorar sus *reservas* explotables y supuestas como dato inherente a su potencial intrínseco. En el caso de las *renovables*, se hablará de sus *recursos* anuales; es decir, de la energía disponible, a lo largo de un año medio, bajo aquella forma



**TI** Interrelación de las fuentes de energía.

concreta de fuente energética. Igualmente se podrán señalar un tope máximo teórico y otro práctico o tecnológico (sin entrar en valoraciones económicas).

Otras consideraciones fundamentales que califican la importancia real de cada fuente energética, en cuanto a su aprovechamiento por la humanidad, son:

- Disponibilidad y fiabilidad física de la fuente, incluyendo su distribución geográfica.
- Aplicabilidad primaria a la satisfacción de un modo concreto de demanda energética.
- Convertibilidad eficiente a otros tipos de energía.
- Seguridad.
- Incidencia en el medio ambiente.
- Coste (de instalación y de explotación).
- Tecnología.

Todos estos factores, importantísimos cada uno de ellos y en conjunto, van a ser excluidos de las próximas páginas, porque no afectan al objetivo de este artículo, que es simplemente valorar (con fórmulas tan sencillas como sea posible) cuánta energía puede proporcionar cada fuente, no sólo en su totalidad, sino en su unidad de aprovechamiento prototípico.

## BIOMASA

En el sentido más amplio de la palabra, biomasa comprende todo material constituyente de los seres vivos, como plantas, animales o microorganismos. Básicamente constituida por compuestos reducidos de carbono, de naturaleza orgánica y energética, no incluye el grupo de los materiales fósiles que en un origen suponían acumulaciones de biomasa. En un sentido más concreto y de aplicabilidad, definiríamos la biomasa como el resultado final del proceso de fotosíntesis.

Según esta última definición (fotosíntesis), la energía de origen solar es transformada en energía química dispuesta en forma de macromoléculas combustibles como carbohidratos, proteínas y lípidos, en plantas y algas verdes. A través de las dos fases básicas del fenómeno, la energía electromagnética de origen solar queda almacenada en moléculas complejas de materia orgánica con la liberación de oxígeno, los dos grandes ejes del ciclo vital en nuestro planeta.

La radiación solar que llega a la Tierra anualmente se cifra en unos  $2,6 \cdot 10^{24}$  J, que generan un contenido energético de biomasa de  $3,10 \cdot 10^{21}$  J al año.

La eficiencia global de la creación de biomasa vendrá, en general, dada por cuatro factores determinantes de su dinámica. No todo el espectro de la radiación electromagnética incidente es útil a la fotosíntesis, sino tan sólo la comprendida entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$ , lo que supone un primer factor de reducción de  $\eta_\lambda = 0,5$ . Se considerará después la eficiencia geométrica de que la radiación incidente penetre hasta los núcleos de clorifila motores del proceso; se asume que este valor es típicamente de un  $\eta_{\text{geom}} \approx 0,8$ . La eficiencia de las reacciones fotoquímicas se supone alcanza un máximo  $\eta_{\text{qui}} \approx 0,4$ . Y, por último, se puede recoger las pérdidas por la respiración propia de las plantas en su ciclo de vida, concretando en el intercambio de vapor y calor en el medio ambiente; un valor típico máximo sería de  $\eta_{\text{resp}} \approx 0,4-0,5$ .

Agrupando todos los factores tendríamos la expresión integral de eficiencia

$$\eta = \eta_\lambda \times \eta_{\text{geom}} \times \eta_{\text{qui}} \times \eta_{\text{resp}}$$

que con la pauta de valores máximos reseñados daría

$$\eta \approx 0,1$$

Este valor del 10 % ha de entenderse como el máximo teórico, debiendo resaltar que los valores más reales se encuentran en el orden del 0,1-0,5 %

Veamos ahora cuál es el potencial asumible por la humanidad para ser utilizado como combustible. De los 100 TW año ( $= 3.154 \times 10^{21}$  J) de biomasa neta producida *anualmente* en nuestro planeta, 23 TW año se fijan en pantanos, zonas verdes (céspedes) y tundra; 29 TW año en bosques; 10 TW año en tierra cultivada, y el resto en los océanos. Eliminando la posibilidad de utilización de los océanos, se dispone de 62 TW año anuales de energía de biomasa. De toda esta cantidad de energía se puede prever que, como máximo, un 40 % sea realmente cultivable por el ser humano para su beneficio, de manera que no se produzca una degradación indeseable de la biosfera, perdiendo capacidad de fotosíntesis. De esta manera, 25 TW año es la cifra recuperable, de la que debemos descartar el desvío efectuado para comida y tierras cultivadas agrícolas que podría suponer del orden de 11 TW año. Si además tuviésemos en cuenta las eficiencias reales de los fenómenos de producción de combustible a partir de biomasa, que van desde un 50 % para convertir madera en carbón de leña, hasta un 30 % en la obtención de combustible a partir de celulosa o azúcar, se llegaría a una cantidad de 6 TW año aprovechables anualmente como combustible a partir de la biomasa. Nótese que este valor de energía ha de considerarse como energía secundaria.

Dos grupos de procesos aparecen como los protagonistas de la conversión de biomasa en combustibles: bioquímicos y termoquímicos. En el primer grupo se encuentran la hidrólisis y la descomposición aerobia, y dentro del primero de ellos, la fermentación y digestión, produciendo respectivamente etanol y metano. Dentro de la vía termoquímica, cuatro procesos básicos: combustión, pirólisis, gasificación y «Hidrocracking», que dan lugar a un conjunto de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

A través de estos mecanismos, la humanidad podría situarse, en un período de cincuenta años, en un nivel de uso anual de 5 TW año de energía por biomasa. Este valor supone una reducción del porcentaje de uso de la masa forestal que pasaría de un 40 % a un 25 %, con relación a lo técnicamente asumible. Incluso este porcentaje podría resultar alto, y ciertas líneas de análisis indican que hasta un 10 % podría suponer problemas y dar un paso, quizá, hacia una ingeniería ecológica?, y no sólo una responsabilidad ecológica. El paso de los 6 TW año, a los aproximadamente 5 TW año potencialmente realizables, depende del uso de esa cantidad inicial de energía secundaria (6 TW año). Se puede diferenciar entre combustible en zonas rurales pobres (escala de subsistencia), industria rural de pequeña escala, productos forestales para industria y un cuarto grupo englobando la energía de uso en una estructura comercial más intensa.

Junto a la cifra global anterior conviene indicar la densidad superficial de energía en lo que podríamos llamar un cultivo de biomasa. En las mejores condiciones se conseguiría una potencia superficial máxima de  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  en verano y con el sol en el cenit. La media anual en España oscilaría entre 10 y  $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , promediando las 24 horas del día de las diferentes estaciones. Esto supondría, de querer disponer de una instalación de 1.000 MW, una superficie de  $100 \text{ km}^2$ .

## CARBON

El uso del carbón como fuente de energía por el ser humano se remonta a épocas pretéritas, y, sin embargo, resulta curioso observar cómo su incidencia mercantil, hacia los años 1850, no es más de un 25 % del total energético utilizado. Madera y carbón han supuesto para la humanidad la pareja casi única de fuentes de energía a gran escala, usadas durante un período largo y remoto. Las razones de su inmediatez, conocimiento primigenio de los fenómenos de combustión y su adecuación calorífica y mecánica, y el generoso ofrecimiento natural supusieron sus ventajas para el uso.

Los carbones (minerales, vegetales, animales) se definirían como materiales con proporción variable del elemento carbono, y que en contacto con el aire arderían dando lugar a luz y calor. Así, en los carbonos naturales usados convencionalmente como combustible, se puede establecer una escala de concentración de carbono que iría de menor a mayor: turba, lignito, hulla, antracita, grafito.

El interés de este artículo es el de revisar la potencialidad de la fuente, por lo que se centrará en conocer cuál es la energía por unidad de masa que se puede obtener de cada uno de los combustibles, y en media, e identificar los recursos y reservas que la naturaleza nos ofrece. La clasificación típica de los carbones se efectúa por el porcentaje de materia volátil. La antracita supone un 10 % de material volátil; semiantracita 10-13 %; el resto de los carbones entre un 14-20 %; carbones bituminosos entre un 20-30 %.

El poder energético del carbón varía según el tipo que se elija, y en consecuencia de su contenido en carbono, volátiles, azufre... Así, la antracita supone  $2,95 \times 10^{10} \text{ J/tm}$ , el lignito  $1,55 \times 10^{10} \text{ J/tm}$ , mientras que los esquistos subbituminosos ofrecen  $2,2 \times 10^{10} \text{ J/tm}$ , y los bituminosos,  $3,05 \times 10^{10} \text{ J/tm}$ . Como una valoración media de la capacidad energética de los carbones usados como combustibles se establece la unidad de medida de energía: tonelada métrica equivalente de carbón cuyo valor es  $2,93 \times 10^{10} \text{ J/tm}$ .

Para conocer la potencialidad real del carbón se precisa evaluar las cantidades

disponibles del material, clasificadas según los distintos tipos y contenidos energéticos, que mediante tecnologías convencionales o más avanzadas puedan ser rescatados de los senos terrestres u oceánicos para ser quemados en dispositivos clásicamente bien conocidos, y de cuyos rendimientos, sujetos típicamente a los ciclos termodinámicos, no se hablará en este artículo. Una diferenciación importante deberá establecerse entre los conceptos de recursos y de reservas. En el primero de ellos incluiremos aquellas cantidades de material identificadas, pero que no son producibles por motivos económicos, y aquellas que sin haber sido identificadas se supone su existencia bien por conocimientos geológicos exploratorios o por meras hipótesis teóricas de conformación de carbones. En el apartado de reservas incluiríamos la cantidad de materia que habiendo sido identificada geológica y geográficamente reúne las condiciones técnicas y económicas que posibilitan su explotación. Progresivamente, la investigación y la estructura del mercado suponen un paso de cantidades de carbón desde el apartado de recursos al de reservas.

Se pueden cifrar aproximadamente los recursos de carbón en  $10.126 \times 10^9$  tec (toneladas de carbón equivalente), mientras que el apartado de reservas supone  $637 \times 10^9$  tec. La cantidad de recursos es ciertamente impresionante: suponiendo el abastecimiento de energía de la humanidad al ritmo actual de consumo, habría para 1.200 años si todo el suministro viniese de esta fuente. Al ritmo actual, con tendencia a incrementarse, de consumo de carbón, los recursos supondrían una duración de 4.000 años.

De particular importancia es la tasa de paso de recursos a reservas. Si seguimos datos históricos, nos encontramos con que los recursos de carbón pasaron de  $8.603 \times 10^9$  tec, en 1974, a  $9.045 \times 10^9$  tec en 1975, y  $10.126 \times 10^9$  tec en 1977; es decir, una tasa aproximada de crecimiento de 5,9 % al año. Las reservas pasaron de  $473 \times 10^9$  tec, en 1974, a  $560 \times 10^9$  tec en 1975, y  $637 \times 10^9$  tec en 1977; es decir, un incremento de 11,6 % al año. Comparando ambas tasas de crecimiento vemos que la razón de trasvase recurso-reservas viene a ser del orden de un 0,5 %, lo que supone un valor adecuado para las previsiones de las últimas Conferencias Mundiales de la Energía, donde se pensaba en una duplicación de reservas en cincuenta años, lo que daba una razón de 0,14 % al año.

Finalmente, y dada la gran potencialidad intrínseca del carbón y su previsible, y en algunos casos ya real, incremento de su uso, un comentario sobre su investigación y prospección. Se ha observado desde hace mucho tiempo cómo el reparto mundial de combustibles fósiles no era un hecho aleatorio, sino que respondía a una dinámica geológica cuya respuesta no era simple. Sobre las ideas

generales de que los carbones suponían transformaciones de grandes masas vegetales muertas sometidas a particulares condiciones de presión, humedad y temperatura, y que habían acaecido en el transcurso de centenares de millones de años. Los avances de la geología y geofísica permiten esbozar propuestas más concretas de formación y localización. Así se sabe hoy en día que para que se formen los terrenos propicios al carbón es preciso que se acumulen desechos de vegetales superiores, suficiente estado de evolución, hecho que no se alcanzó hasta hace unos 400 millones de años. Y, además, un clima húmedo y suficiente permanencia subterránea que origine suficientes depósitos (40 m/10.000 años). En consecuencia, los períodos de regresión oceánica suponen momentos propicios, que pueden ser analizados mediante la relación entre nivel de mar y plataforma continental. Así se ha observado que en el período de 400 millones de años, tan sólo cinco épocas geológicas que representan menos del 30 % del tiempo transcurrido desde el comienzo de la era primaria, suponen el origen del 95 % de los recursos de carbón. Estos nuevos conocimientos deben suponer una ayuda para una identificación más óptima de los recursos carboníferos.

Aunque escape al objetivo específico de este artículo sobre la potencialidad energética, conviene recordar que el uso del carbón, como el de cualquier combustible químico, incrementa el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y, por tanto, el conocido efecto invernadero que tanta preocupación climática está suscitando últimamente, junto al de las lluvias ácidas, producidas por los contaminantes de estos combustibles.

## PETROLEO

El petróleo, ese líquido bituminoso e inflamable de naturaleza oleaginosa compuesto por una compleja mezcla de hidrocarburos con pequeñas proporciones de otras sustancias, ha supuesto en los últimos años la fuente más importante de energía para el hombre. Su densidad másica de energía (superior al carbón), su accesibilidad natural, su transporte, conversión y explotación asequibles y conocidas lo han convertido en el principal combustible. Sin embargo, comienza una época en que, sin pérdida global de su importancia, se inicia progresivamente un trasvase desde los combustibles fósiles (y entre ellos, el petróleo es el peor situado por recursos) hacia otras fuentes de energía. Su importancia, que se concluye sin más que observar que suponía en los últimos años hasta un 45 % del consumo energético de la humanidad, no fue reconocida a nivel de mercado hasta mediados del siglo pasado, aunque su uso para actividades diferentes de la meramente energética pasa por un reconocimiento bíblico, usos occidentales y

orientales en alumbrado e interesantes descripciones en los viajes de Marco Polo.

La capacidad energética en la combustión del petróleo varía dependiendo del tipo exacto de que se trate. Dando los resultados por barril de petróleo -42 galones con un galón (USA = 0,00378 m<sup>3</sup>)— se tiene que el crudo de petróleo (sin refinar, originario) posee un valor energético equivalente de  $5.908 \times 10^9$  J/bbl; el combustible residual (parte pesada de hidrocarburos obtenida de refino del crudo, usada típicamente en plantas de potencia)  $6,63 \times 10^9$  J/bbl; combustible destilado (obtenido por refino o procesamiento del crudo, y con temperatura de ebullición entre 550° y 1.200° F),  $6,15 \times 10^9$  J/bbl; la gasolina, incluyendo la usada en aviación,  $5,54 \times 10^9$  J/bbl; combustible para dispositivos a reacción, tipo keroseno,  $5,99 \times 10^9$  J/bbl; combustible para dispositivos a reacción, tipo nafta,  $5,66 \times 10^9$  J/bbl; asfaltos,  $7 \times 10^9$  J/bbl.

Conocida la valoración másica de la energía potencialmente obtenible del combustible petróleo, que en media vendría dado por el valor del barril equivalente de petróleo (=  $6.119 \times 10^9$  J), la evaluación global del mismo pasa por conocer cuáles son las cantidades disponibles para su uso. La localización e identificación de depósitos ha venido dada por los conocimientos geológicos de que se disponía y una cierta dosis de buena fortuna en muchos casos. Hoy en día, el progreso en la investigación teórico-experimental en geología y otras ramas de la ciencia permiten aventurar teorías de creación de los depósitos de crudo a lo largo de centenares de millones de años, posibilitando su descubrimiento y la no dispersión de esfuerzos en el mismo. Así se conoce que la producción del petróleo depende de la formación de rocas madres muy ricas en plancton, cuya deposición básica se produjo en un período entre 180 y 85 millones de años (jurásica, cretácica); es decir, en tan sólo un 17 % de tiempo donde el comienzo de la era primaria, dando origen a un 70 % del petróleo descubierto.

Las estimaciones sobre las cantidades existentes de petróleo (recursos) varían en ocasiones de forma dramática según los autores consultados. En consecuencia, se han llevado a cabo estadísticas explotatorias que diesen luz sobre las cifras más concordantes. Obsérvese, por ejemplo, que Duce (1946) daba una estimación de recursos de  $68 \times 10^9$  tep (tonelada equivalente de petróleo) equivalente a  $500 \times 10^9$  bbl, mientras que las estimaciones de Nehring de la Rand Co. se cifraban entre 233 y  $315 \times 10^9$  tep. Según un estudio efectuado por Desprairies (1977), la mayoría de los estudiosos cifraban los recursos en el rango comprendido entre 200 y  $300 \times 10^9$  tep, siendo hoy en día esta última cifra la más usada en las estimaciones.

En lo referente a reservas se pueden usar como cifras estimativas válidas  $90 \times 10^9$  tep, de las que aproximada-

mente  $60 \times 10^9$  tep pertenecen al área del Oriente Medio y norte de África, y  $10 \times 10^9$  tep a la zona de la Unión Soviética y Europa del Este.

La mejora técnica en los medios de perforación y extracción supone ciertamente uno de los elementos básicos en la consideración del paso de recursos a reservas.

Junto a estas evaluaciones de recursos convencionales, deben destacarse los no convencionales, tales como combustibles pesados/bituminosos o tierras alquitranosas. Se puede estimar hasta  $300 \times 10^9$  tep los recursos provenientes de esta fuente, cuyos problemas de recuperación y procesados deberán ser resueltos para un aprovechamiento económico.

## GAS

El gas natural aparece con una serie de cualidades importantes como combustible, y su uso, que empieza a tener incidencia en el mercado a comienzos de este siglo, ha seguido una tendencia creciente desde entonces, aunque, por razones de manejabilidad y economía, inferior a la que ha desarrollado el llamado oro negro. Como combustible se le considera limpio y fácil de regular, teniendo, además, aplicabilidad alternativa como materia prima petroquímica (síntesis de amoníaco y metanol). Ciertamente, es también importante señalar que el gas supone un combustible fácilmente sustitutivo de los productos petrolíferos. Dado que, por otra parte, el origen esencial del gas y del petróleo es muy parecido, las condiciones de existencia de sus yacimientos son aproximadamente las mismas, valiendo en consecuencia las consideraciones geológicas efectuadas en la investigación del petróleo. Además, las técnicas de exploración y prospección son a menudo similares.

El menor interés que se ha dado históricamente al gas natural frente al petróleo supone que, hoy en día, sólo un 8 % del total de recursos de gas estimados haya sido empleado, en muchas ocasiones, desafortunadamente, y quemado otras al acompañar a las bolsas de crudo, frente a un 15 % de los recursos totales de petróleo. En la actualidad, hay un general consenso entre los especialistas en que la producción y consumo mundial de gas natural se seguirá incrementando en las próximas décadas a un ritmo importante, quizá no tan elevado como en los últimos años.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos con un número de carbonos menor a 5, junto a otros constituyentes formando yacimientos en las arenas sedimentarias. De estos hidrocarburos, los que suponen un primordial interés económico son el metano (CH<sub>4</sub>), y los otros hidrocarburos saturados gaseosos: etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). Otros componentes son el CO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub> y nitrógeno. El reparto de estos compuestos en el yacimiento varía

mucho dependiendo de su localización. Así, el yacimiento sito en Ravenna Terra (Italia) contiene casi exclusivamente metano (99,54 % en volumen) frente a otros, como Pamco Ebano (México) o Megeovo (Siberia occidental), que carecen casi por completo de hidrocarburos. Así como se conocen yacimientos que estén prácticamente formados en su totalidad por componentes como CO<sub>2</sub> (Hannover, 95 %) o nitrógeno (zona Volga-Ural o Alemania Norte), no se conoce ninguno compuesto mayoritariamente por sulfhídrico, siendo el más rico el de Astrakán (URSS) con un 25 % en volumen.

El contenido energético del gas natural depende de su estado, oscilando entre 1.031 Btu/ft<sup>3</sup> para el caso seco, a 1.103 Btu/ft<sup>3</sup> para el gas húmedo. Como valores medios energéticos se adoptan típicamente que 1 m<sup>3</sup> (en condiciones normales) de gas natural contiene 3.726 × 10<sup>7</sup> J.

Pasemos ahora a describir los recursos y reservas (ver comentario en Carbón) generalmente acoplado de gas natural. El volumen total de recursos se cifra tentativamente en 232 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> N de los que 59 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> N se encuentran en la Unión Soviética y Europa del Este y 78 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> N en Oriente Medio y el norte de África. Norteamérica dispone también de elevados recursos con 43,5 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> N. En comparación, las reservas totales se tasan en 63,484 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> N, es decir, una cuarta parte del total de recursos.

La estimación de las fuentes no convencionales de gas varía fuertemente dependiendo del origen de la misma, y así, el gas geopresurizado se mueve en márgenes de 85 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> a 1.444 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, mientras que la gasificación de lechos de carbón supone 8,63 a 23,1 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>. La discrepancia en los márgenes de recursos en la vertiente no convencional supone una necesidad de mayor investigación, sobre todo cuando se mencionan cifras para alguno de los supuestos hasta siete veces superiores a los actuales recursos estimados convencionales.

Se acepta que la tasa de producción anual pase de 3,7 × 10<sup>12</sup> a 4 × 10<sup>12</sup> m: entre los años 2000 y 2020. Al ritmo actual de consumo, en el año 2.000 quedarían unos 160 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> de gas que mantendrían un alto ritmo de uso del gas durante varias décadas.

## ENERGIA EOLICA

El viento es una de las manifestaciones más importantes de la interacción entre la atmósfera, la radiación solar y la superficie de la Tierra, incluyendo los océanos. Los gradientes de presión y temperatura resultantes de esta interacción provocan movimientos de grandes masas de aire, con una potencia estimada de más de 1.000 TW. Por supuesto, el contenido energético de la atmósfera

es mucho mayor. Piénsese que un 25 % de la radiación solar es absorbido por los componentes del aire, retrodispersando, además, casi un 30 %, lo que da una clara idea de que, en definitiva, podemos considerar a la atmósfera como un natural y gigantesco colector de energía solar.

Pero, dentro de la actividad energética de la atmósfera, nos interesa en este momento aislar y estudiar el efecto cinético de esas masas de aire que se mueven, conocido convencionalmente con el nombre de energía eólica.

La potencia cinética de ese movimiento es:

$$\frac{1}{2} m v^2$$

siendo m el caudal másico (gasto) y v la velocidad. Si se considera una superficie unitaria (1 m<sup>2</sup>, por ejemplo) situada perpendicularmente al viento, la potencia del aire que la atraviesa es:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3$$

De ésta no toda es convertible a energía mecánica, pues para ello la velocidad de salida del aire, una vez cruzado el aparato convertidor, habría de ser nula. El rendimiento máximo teórico alcanzable es de un 60 % (realmente, 16/27) en máquinas de flujo axial de una sola etapa. En la práctica, los rendimientos son algo más bajos, y varían fuertemente con la velocidad del viento. Una fórmula empírico-teórica aceptada convencionalmente para evaluar la potencia eólica máxima es:

$$P \text{ (kW/m}^2\text{)} = \frac{0,37}{1.000} v^3 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

siendo v la velocidad del viento.

Tomando un valor característico en España de viento invernal (~ 10 ms<sup>-1</sup>), encontraríamos una potencia de 0,37 kW por metro cuadrado de colector orientado normalmente al viento. A este valor habría que afectarle de las ineficiencias de la maquinaria, especialmente cuando trabajara en regímenes muy distintos de su óptimo de funcionamiento.

Para dar una idea adicional de la potencialidad específica del viento, se puede obtener simplisimamente que, para generar 1.000 MWe, por ejemplo, harían falta 3,3 km<sup>2</sup> de colectores eólicos, si se admite una potencia específica de 0,30 kWe/m<sup>2</sup>.

El aprovechamiento de la energía eólica requiere, lógicamente, emplazamientos óptimos con altas velocidades de viento, como son las costas (Tarifa, Canarias) o la alta montaña. Aparte de estos lugares naturales, se pueden crear artificialmente zonas de altas velocidades de viento muy concentrado, generalmente de tiro vertical, provocado por una estimulación del calentamiento de las capas bajas de aire. Aun en este

caso, la baja densidad del aire obliga a la disposición de enormes superficies de colector, barridas por álabes faraónicos. (Estos grandiosos álabes no serían la solución tecnológicamente óptima. Se habría de recurrir a diseños modulares de unos cientos de kW, aunque desde el año 76 existen monopalas de 2 MW, emplazadas en costas de acuerdo a diversos proyectos de investigación. Aun así, el diámetro del colector es superior a 40 m.)

## ENERGIA HIDRAULICA

El aprovechamiento arquetípico de esta energía es una central hidroeléctrica, en la cual, el agua se turbinando aprovechando la energía potencial creada por la retención de agua en la presa. Considerando un caudal de Q m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> y un desnivel entre la superficie libre del embalse y la turbina de H metros, la potencia teóricamente obtenible sería:

$$P \text{ (kW)} = 9,8Q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} H \text{ (m)}$$

Como ejemplo, un salto de 100 metros y 20 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> de caudal supondría una potencia de 19,6 MW.

La conversión de energía hidráulica a energía mecánica es altamente eficiente (del orden del 85 %), habiéndose desarrollado turbinas de muy diferentes características para el aprovechamiento óptimo de los diversos tipos de salto. En caso de grandes desniveles, con caudales generalmente pequeños se emplean turbinas Pelton. Las turbinas Francis y Kaplan son para saltos de desnivel progresivamente menor y mayor caudal. El caso límite es el de los grupos bulbos, que requieren modestísimos desniveles de poco más de un metro y que turbinan grandes caudales. En estos casos puede ocurrir que la velocidad del agua embalsada no sea nula, en cuyo caso la energía cinética del caudal turbinado ha de añadirse a la energía potencial anteriormente evaluada.

El modo normal de aprovechamiento de la energía hidráulica es la conversión a energía eléctrica de la energía mecánica transmitida a la turbina. Rendimientos superiores al 85 % pueden obtenerse en el funcionamiento óptimo de centrales con turbinas diseñadas *ad hoc*.

Normalmente se incluye esta energía en la llamada *energía eléctrica primaria*. Aunque en el remoto pasado la energía mecánica era utilizada en diversos tipos de molinos (no eléctricos) hoy éstas prácticas son irrelevantes, y la totalidad de la energía hidráulica se aprovecha a través de la red eléctrica.

El origen de esta fuente radica en la conjunción de la energía solar —que evapora agua a la atmósfera— y la gravitatoria, cuya energía potencial es en definitiva la que se aprovecha. Es pues, una *fuentes renovable*, en la cual el agua actúa como agente energético convertidor de la irradiación solar.

El potencial anual total, voluble como todas las magnitudes climatológicas, se cifra en unos 8.000 TWh. Es pertinente señalar que, de ellos, 5.000 corresponden a países en vías de desarrollo, 1.800 al área de la URSS y de China, y unos 1.300 a la OCDE. El nivel de aprovechamiento es muy dispar. Mientras que en el ámbito de la OCDE ya en 1970 se había alcanzado el 65 %, éste sólo era del 10 % en el mundo de régimen comunista y un 3 % en el tercer mundo.

Una última característica importante que conviene añadir es la posibilidad de usar la energía hidroeléctrica para almacenar energía, por medio de *estaciones de bombeo*. De hecho, en la OCDE la mayoría de las actuales centrales hidráulicas en construcción son de este tipo, en las cuales se bombea agua a un embalse superior en las horas de energía abundante y barata (por escasa demanda) y se turbinan cuando la energía es cara (picos de demanda). Aunque por las irreversibilidades del proceso el balance energético total sea negativo, su efecto beneficioso en la regulación entre demanda y suministro de electricidad le augura un buen futuro, aunque de cuantía reducida, en el sector energético.

## ENERGIA GEOTERMICA

En el interior de nuestro planeta existen temperaturas muy elevadas que problemáticamente alcanzan los 4.000° K en el núcleo central, para decaer hacia los 300° K en la superficie. El origen de este fenómeno es básicamente doble: por un lado, la acción de la gravedad y, por otro, la desintegración de los nucleidos radiactivos naturales.

Ambas fuentes energéticas han tenido su historia cosmológica, y fueron mucho más importantes en tiempos remotos que ahora. Por lo que respecta a la compresión gravitacional, ésta fue decisiva precisamente durante la formación (condensación) de nuestro planeta, hace unos 4.500 millones de años. Desde entonces, la tierra se ha ido enfriando lentamente, aunque el trabajo gravitatorio que aún realiza se disipa casi exclusivamente mediante el calor con ligeras aportaciones mecánico-tectónicas, elásticas y eruptivas.

En cuanto a los radionucleidos, su presencia era muchísimo más abundante en tiempos pasados, dado que hoy en día solo permanecen residuos de los de vida muy larga. Está claro que la mayor parte de la radiactividad contenida en la masa terrestre en condensación se manifestó en los primeros milenios tras su creación a resultados de la explosión de una supernova.

Como consecuencia de los procesos citados, el 90 % de la superficie continental manifiesta un flujo calorífico de 50 mW/m<sup>2</sup>. A su vez, esto corresponde a un gradiente térmico menor de 3° C cada 100 metros de profundidad, lo que

significa la práctica imposibilidad de aprovechar tal energía.

Indudablemente, la cantidad total de calor almacenado en la corteza terrestre es enorme, cifrada en unos 10<sup>27</sup> J en los 10 km. superficiales, pero son inefectivos dada la baja densidad de potencia con que se manifiestan.

El atractivo auténtico de la energía geotérmica radica en la existencia de zonas anómalas en las que se dan circunstancias favorables de temperatura, gradiente térmico y flujo calorífico, relegando a ciencia ficción las ideas de penetrar hasta el manto convectivo terrestre con dos macropozos que sirvan para inyectar agua fría y extraer vapor saturado.

En 1953, el geólogo francés Goguel, basándose en los modelos geopetrolíferos, definió el concepto de yacimiento geotérmico explotable como una zona en la que se concitarán los siguientes factores: una fuente de calor profunda, refrigerada por una corriente de agua más o menos libre, que creara una zona de convección o acuífero capaz de transmitir grandes cantidades de calor hacia zonas superficiales.

Estos yacimientos geotérmicos suelen clasificarse en:

- de alta entalpía, que proporcionan vapor seco, por encima de los 100° C;
- de entalpía media, con vapor húmedo y aguas calientes por encima de los 70° C;
- de baja entalpía, con aguas termales por encima de 40° C.

El potencial energético de una zona geotérmica está limitado por su entalpía (cal · g<sup>-1</sup> y caudal o gasto (m<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup> ó gs<sup>-1</sup>). De este límite superior sólo puede aprovecharse un cierto porcentaje, normalmente no superior al 40 %, por las ineficiencias convencionales. Otros puntos negativos a tener en cuenta son la alta potencia de bombeo y la corrosión y reactividad química. Como ventajas podría citarse su versatilidad de aplicaciones, desde la calefacción urbana (Reykjavik, Casa de la Radio de París) y agrícola (Hungría) hasta la producción de electricidad (Larderello, Italia, entró en explotación en 1930. La central de Geyser, California, tiene una potencia de 500 MW, ampliables a 1.200, y existen otras instalaciones en Nueva Zelanda, México y Japón).

En España las principales zonas geotérmicas son:

- de alta entalpía: Canarias, Olot, Penibética, Caracul (Ciudad Real);
- de media: Madrid, Orense, Valencia, Pirineos y Lugo;
- de baja: Valladolid, Burgos, Huelva, Barcelona.

Para proporcionar una idea orientativa de la potencia geotérmica, podría indicarse que, para extraer 1.000 MW útiles de un yacimiento de entalpía media (para calefacción, por ejemplo) haría falta un caudal de 10 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>.

## ENERGIAS MARINAS

Se suelen considerar tres tipos de fuentes energéticas marinas: la mareomotriz, la de las olas, y la de los gradientes térmicos verticales. Junto a ella pueden citarse otras, como la de las corrientes oceánicas o la contenida fotosintéticamente en las algas, pero, o son depreciables frente a las anteriores en su significación energética, o se clasifican más adecuadamente en otros apartados. Incluso las tres que se han citado son susceptibles de incluirse bajo otros epígrafes. Por ejemplo, la mareomotriz es una manifestación del campo gravitatorio lunar (y del solar, en menor entidad); la de las olas es una reconversión de la energía cinética del viento (salvo olas de marea, tsunamis y otras anomalías), siendo ésta a su vez una conversión de la energía solar; y esta última energía, el sol, es también la causante directa de los gradientes térmicos marinos.

No obstante, y dado que en estas tres fuentes actúa el mar como agente energético protagonista, su agrupamiento bajo el título de energías marinas está generalizadamente aceptado.

### Energía del oleaje

Los mecanismos de interacción dinámica entre la atmósfera y la superficie marina no son conocidos en detalle, y revelan una complejidad típica de los problemas que conllevan varias escalas de tiempo, fuerza y distancias. No obstante, al existir buenos modelos ondulatorios para casi todos los fluidos, y al estar centrado nuestro interés en las magnitudes promediadas, los efectos energéticos de creación y disipación del oleaje pueden evaluarse con precisión.

En principio, la tensión del viento sobre la superficie oceánica se puede expresar como

$$\tau = \rho K^2 V^2 (z) \left( \log \left( \frac{z}{z_0} \right) \right)^{-2}$$

siendo la densidad del aire, K la constante de von Karman, V la velocidad del viento a la cota Z, y z<sub>0</sub> la rugosidad de la superficie marina (~ 6 mm.). Esta tensión inicia un movimiento ondulatorio en el que conviven varios armónicos, con diferentes amplitudes. A partir de ahí, la transferencia de energía viento-mar se complica, y los modelos teóricos requieren la introducción de numerosos parámetros que se han de ajustar con las observaciones experimentales.

Agrupando todo ello en una concepción simplificada del oleaje, basada en la existencia exclusiva de ondas de gravedad y en la predominancia de una frecuencia, la potencia correspondiente a un frente de olas es

$$P \text{ (kW/m.)} = 0,96 T(s) H^2 \text{ (m.)}$$

siendo H la altura total de la ola (de cresta a valle) y T el período del movimiento ondulatorio; variables, ambas,

determinables mediante análisis armónico a partir de las cotas de las olas 0, más burdamente, por mera observación de aquéllas. Hay que advertir que H y T no son absolutamente independientes entre sí, pues

$$\frac{H}{2} \leq 0,142 \lambda$$

siendo  $\lambda = UT$ , y U la velocidad de la onda.

$$U = \sqrt{g \lambda / 2}$$

La potencia arriba mencionada está referida a metro de frente de oleaje, por lo cual sus unidades son KW/m. Tomando valores habituales en las costas atlánticas,  $H = 1,4$  m. y  $T = 9$  segundos, se obtiene

$$P = 16,93 \text{ kW/m.}$$

Obviamente, esta es la energía portata por la ola, de la que sólo una fracción puede convertirse a energía útil. Con análisis puramente teóricos, y admitiendo ondas de una sola frecuencia, se ha demostrado que es posible absorber toda esa energía por medio de un cilindro de radio adecuado, que se moviera alrededor de un eje fijo paralelo al suyo propio con una cierta frecuencia y un cierto radio de giro. La absorción completa significaría que más allá del citado cilindro no existiría movimiento ondulatorio.

Al margen de esta disquisición teórica poco traducible a la práctica, se han diseñado y comprobado varios métodos de conversión de la energía del oleaje a otras formas más aprovechables (por ejemplo, electricidad). Algunos de estos métodos son hidrodinámicos puros, y otros hidroneumáticos, siendo éstos menos sensibles a los cambios en las condiciones ondulatorias del oleaje. En cualquier caso, un rendimiento medio del 40 % parece un tope difícilmente superable, al margen de los problemas que se originarían en circunstancias de mar muy fuerte, en las cuales la integridad de los aparatos correría un riesgo muy grave.

Independientemente de estas consideraciones tecnológicas y otras vinculadas al medio ambiente y a la perturbación de las costas, la potencia máxima está marcada por la ecuación citada antes. En el caso ya dicho de olas de 1,4 m. y 9 segundos de período, la longitud de frente de onda que sería necesaria para construir una central de 3.000 MW de potencia bruta de las olas ascendería a 177 km.

Si admitimos un rendimiento del 40 % para la conversión a energía eléctrica, se requerirían 148 km. para configurar una central de 1.000 MWe.

Esta cantidad puede parecer desmesuradamente grande, y poco acorde con la idea de fortaleza que intuitivamente tenemos del mar. Hay que hacer, a este respecto, la elemental aclaración de que tal fortaleza se asocia con el momento de romper la ola, con su singular estruendo, su espuma y su resaca. Pero

hay que precisar que esa gran potencia se aplica durante un tiempo brevísimo, de pocas décimas de segundo. Y las potencias anteriores son lógicamente valores medios.

### Gradientes térmicos marinos

La fuerte insolación de algunas superficies marinas y la gran inercia térmica del agua hacen muy atrayente la consideración del mar como un gigantesco receptor solar. Esta idea no es nueva, ni mucho menos, dentro de la civilización energética. Hablando en términos absolutos, la energía térmica almacenada por el mar es fantástica. Pero cuando se intenta convertir en útil esta forma degenerada de energía, se encuentran rendimientos minúsculos y enormes dificultades tecnológicas. A lo que hay que añadir que sólo sería aprovechable en localizaciones muy singulares.

Esta fuente de energía cuenta con curiosos antecedentes históricos:

A finales del siglo XIX, el ingeniero francés Jacques D'Arsonval llamó la atención sobre esta fuente de energía, y sugirió el uso de amoniaco como fluido de trabajo para el ciclo térmico. Se evaporaría por contacto con el agua caliente superficial, y se condensaría, tras su expansión a través de la consiguiente turbina, por contacto con el agua fría de las profundidades. Un discípulo suyo, Georges Claude, fue el primero en llevar a la práctica dicha idea, e instaló en la bahía de Matanzas (Cuba), en 1929, una planta no comercial de 22 KW. Su rendimiento global fue del 1 %.

Precisamente este bajo rendimiento resulta el principal inconveniente, pues merma cuantiosamente la potencialidad de este concepto. Atendiendo a los principios termodinámicos, el máximo trabajo extraíble mediante un ciclo térmico que actúe entre un foco caliente y uno frío es

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

siendo  $T_f$  y  $T_c$  las temperaturas absolutas fría y caliente. En excepcionales condiciones marinas se podrían tener los valores  $T_c = 27^\circ \text{C}$  y  $T_f = 12^\circ \text{C}$ , lo cual nos proporcionaría un rendimiento de Carnot (el máximo) de 5 %. La potencia máxima teórica que se podría alcanzar vendría dada por la siguiente expresión:

$$P = \eta C_v Q_p (T_c - T_f)$$

siendo  $C_v$  el calor específico del agua,  $\rho$  su densidad y Q el caudal. Con los datos supuestos más arriba, se tendría

$$\frac{P}{Q} = 3 \frac{\text{MW}}{\text{m}^3 \text{ s}^{-1}}$$

De esta densidad de potencia máxima sólo se podría extraer, tecnológicamente, una discreta fracción (del orden del 50 %) en forma de energía útil. Un grave problema que tienen que afrontar las

aplicaciones talaso-térmicas son las elevadas potencias de bombeo que suelen conllevar, y la necesidad de un fluido de trabajo distinto del agua para el ciclo termodinámico.

### Energía mareomotriz

El fenómeno de las mareas se produce por la interacción gravitatoria de la Luna (principalmente) y el Sol sobre las masas de los océanos. Las mareas son causa determinante de la débil deceleación del movimiento terrestre de rotación, y su manifestación en forma de variaciones del nivel del mar es singular y, en cierto modo, asistemática. El fenómeno es generalmente bidiurno, pero hay lugares con períodos de casi un día, y otros en los que prácticamente es inapreciable el efecto, como en el Mediterráneo. Las mareas espectaculares de ciertas costas se deben a una conjunción de circunstancias de tipo resonante, en la que influyen la longitud de los océanos, en los que se desarrolla la interacción gravitatoria, la morfología de las costas y la orientación de éstas. Generalmente las zonas de fuertes mareas son las bahías y estrechos limitrofes, diagonalmente, de los grandes océanos. Es conocida la oscilación de la amplitud de las mareas en función de las fases de la Luna y de las estaciones. Las mareas vivas, más grandes, coinciden con las lunas llenas equinociales.

El aprovechamiento de la energía mareomotriz es muy similar al de la energía hidráulica. El prototipo de instalación mareomotriz es una bahía o río, cerrada por un dique, en cuyo interior se alojan turbinas especialmente diseñadas para las pequeñas diferencias de nivel que se producen. El ejemplo más significativo es la Central de la Rance, sobre el río del mismo nombre en la costa francesa del Canal de la Mancha. Inicialmente constaba de 24 turbinas de 10 MW que generaban unos 550 GWh anuales; es decir, un 18 % de factor de utilización. A finales de los setenta se amplió hasta 320 MW montando grupos turbos con álabes ajustables, alcanzando así factores de utilización del 25 %. El rendimiento óptimo de tales grupos es de un 45 %.

En la actualidad hay identificados varios estuarios con notables características mareomotrices, aunque en todos ellos se requiere una obra civil considerable. Dignos de mención son la bahía de Passamaquoddy (Fundy, USA y Canadá) de la que podrían obtenerse 15.800 GWh anuales; la gran bahía, también norteamericana, de Minas-Cobequid (777 km<sup>2</sup>), con 175.00 GWh producibles en teoría; la de Mont Saint Michel, en Francia, con 85.000 GWh; y la del Mar Blanco, en la URSS, con 126.000 GWh. Hay que reseñar que en alguno de estos lugares el rango medio de marea alcanza los 10 m.

Una estimación total de la potencialidad de la energía mareomotriz podría cifrarse en unos 2.000 millones de tec.

anuales, cifra del orden de la potencialidad hidráulica mundial total. Hay que subrayar, lógicamente, que la problemática del aprovechamiento de la energía mareomotriz es extraordinariamente mayor, por las obras civiles que se requieren, y el cambio de la morfología de la costa que conllevan.

Por último, conviene anotar la inexistencia de auténticos emplazamientos mareomotrizes en España, principalmente porque los rangos medios de las mareas no exceden los tres metros en ningún lugar.

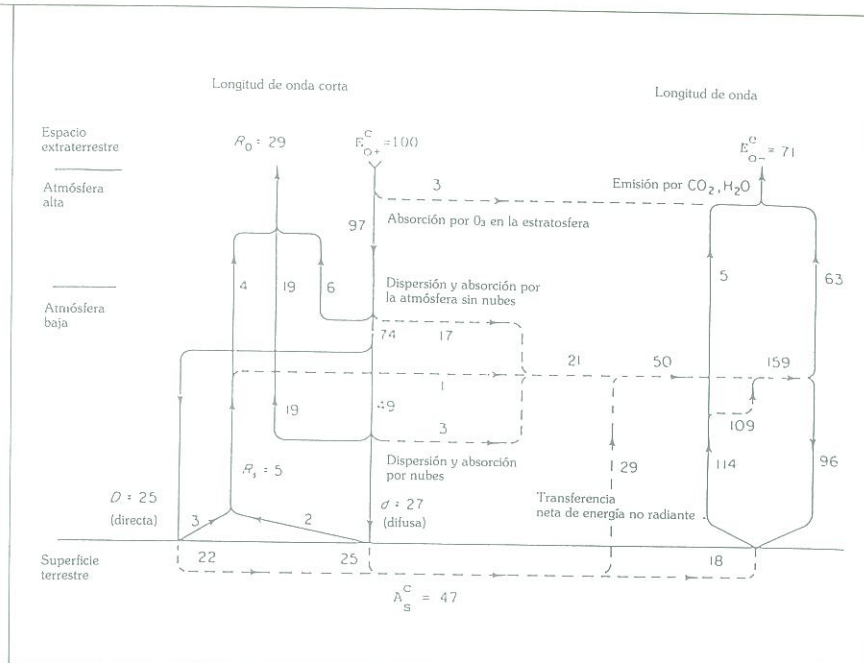
## ENERGIA SOLAR

El Sol, esa mancha endiosada, caliente, amenazadora y vivificadora, radia energía con una tasa de  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$ . La generación de energía tiene lugar vía reacciones de fusión nuclear, principalmente entre núcleos de hidrógeno, máximo componente de la estrella solar. Las elevadas temperaturas que se precisan para la fusión se logran por compresión de la masa mediante fuerzas gravitatorias. Así, la estrella progresa en una dinámica de expansión-compresión, produciendo energía, aumentando su tasa de elementos más pesados, y yendo hacia una situación final de gigante roja que atrapará a nuestro planeta con su lengua de fuego... dentro de unos 4.000 millones de años.

De las distintas partes constitutivas del Sol, la zona más interna, que supone el 40 % de la masa y el 15 % del volumen, produce el 90 % de la energía solar, con temperaturas entre 8 y 40 millones de °K. Sin embargo, la zona más exterior de la masa solar, final de la zona de convección, se encuentra a una temperatura de aproximadamente 5.000° K.

A efectos térmicos, el Sol puede ser contemplado como un cuerpo negro radiando a una temperatura efectiva de 5.762° K. Debe observarse, sin embargo, que la variación de temperaturas que aparece entre corteza y atmósfera estelar, entre 6.000 y 300° K, supone una radiación típicamente espectral cuyo conocimiento y evaluación se hace necesario para las aplicaciones de esta energía.

Se define como constante solar la energía recibida por unidad de tiempo sobre la unidad del área de una superficie perpendicular a la radiación extraterrestre, situada a una distancia media anual entre el Sol y la Tierra. El valor de esta constante es de  $1.353 \text{ W/m}^2$  en el exterior de la atmósfera terrestre. La radiación solar, en su recorrido atmosférico hacia la superficie del planeta, sufre procesos de absorción y dispersión, fundamentalmente, dando origen a otras formas de energía, o energía solar indirecta. Moléculas de aire, polvo y vapor de agua como elementos dispersantes, y  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , ozono, vapor de agua,  $\text{CO}_2$  como absorbentes, son responsables de la reducción efectiva de la cantidad de



———— Radiación

----- Otras formas de transporte de energía

$E_{O+}^C$  = Energía entrante en la atmósfera (radiación onda corta), supuesto un valor de 100 unidades arbitrarias (valor real 172500 TW).

$E_{O-}^C$  = Energía emitida al espacio (radiación onda larga).

$A_s^C$  = Absorción por la superficie terrestre de radiación de onda corta.

### FI Balance terrestre de energía a partir de la radiación solar.

energía que llega a la superficie terrestre. La figura 1 da cuenta del balance de energía entre el Sol y la capa atmosférica. Bajo condiciones atmosféricas favorables, la intensidad máxima observada a mediodía en una superficie orientada y a nivel del mar es de  $1 \text{ kW/m}^2$ . A una altura de 1.000 metros el valor se eleva a  $1,05 \text{ kW/m}^2$ , y en las más altas cotas terrestres a  $1,1 \text{ kW/m}^2$ . Bajo esta densidad de potencia, y sin pensar en la tecnología de aprovechamiento, disponer de una planta de 1.000 MWt supondría la utilización de  $1 \text{ km}^2$  de extensión de los colectores.

Dado que la situación relativa del lugar analizado con respecto al Sol hace variar la cantidad de energía que recibe, nos encontraremos con valores muy distintos entre unos puntos del globo y otros. Además deberemos de considerar las horas de insolación diarias de que disfruta la localización estudiada. En definitiva, es importante observar que la energía de origen solar recibida depende, además de los factores ya mencionados, de la posición relativa Sol-Tierra y del ángulo de incidencia de la radiación solar al considerar un punto concreto, y ambos conceptos varían en magnitud con el movimiento relativo entre ambos cuerpos. En consecuencia, las evaluaciones cuantitativas de energía solar deberán de especificarse en función del período o momento considerado exigiendo, para un cómodo manejo, la evaluación de los datos en valores pro-

medio. Centrándonos en los datos, en nuestro país pasamos de los valores más altos de potencia media diaria de Tenerife y Huelva con  $362 \text{ W/m}^2$  y  $344 \text{ W/m}^2$ , a los más bajos de San Sebastián con  $184 \text{ W/m}^2$ , todos ellos tomados en media en el mes de julio, mes éste del mayor valor de potencia. Los valores de promedio anual para estas tres ciudades son de 230, 207 y  $125 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. En cuanto a los valores diarios en promedio mensual más bajos, los encontramos en Vitoria durante diciembre con  $50 \text{ W/m}^2$ .

El aprovechamiento de esta energía ha tenido diferentes lecturas a lo largo de la historia humana, sufriendo ciclos de mayor y menor interés, junto a la interpretación humana de su constante y vivificadora existencia. Actualmente se pueden contemplar dos vertientes bien diferenciadas: aprovechamiento térmico y conversión directa en electricidad.

### Aprovechamiento térmico

Aparte de otros aprovechamientos menores, el aprovechamiento térmico tiene dos vertientes: conversión directa para calefacción, y conversión aplicando un ciclo termodinámico intermedio. En el primer grupo aparecerían la calefacción de agua, calefacción de espacios, secado de alimentos y materiales, cocina y calor industrial. En el segundo entrarían la destilación de agua, refrigeración, conversión a potencia mecánica

y producción de electricidad a partir del calor.

Los dispositivos usables, denominados genéricamente colectores, pueden ser a su vez de placa plana y de concentración. En los primeros el colector está orientado de forma permanente, de manera que en media recupere la mayor potencia posible (su superficie absorbente recibe justamente los valores de irradiación solar en el lugar, según la inclinación y orientación del aparato). En los colectores de concentración, se busca aumentar el flujo de energía solar natural mediante dispositivos de espejos provocando una alta densidad de flujo de energía en el elemento absorbente del sistema colector. Los parámetros de emitancia, reflectancia y absorptancia dependientes del material, frecuencia y ángulo, dan la medida de las posibles eficiencias por lograr. Los rendimientos de los colectores van desde un 30-40 % en el caso de placas planas negras, a un 50 % para placas planas de superficie selectiva y también aproximadamente de un 50 % para los colectores de concentración. Los colectores planos son típicamente usados en aplicaciones de baja temperatura (conversión directa para calefacción...) mientras que los de concentración se dirigen más a la obtención de altas temperaturas, siendo ésta la línea a seguir en el caso de plantear una central de potencia, donde, a través de ciclos termodinámicos, se produjera energía eléctrica.

### Conversión directa en electricidad

La energía fotónica proveniente del Sol puede ser convertida directamente en electricidad mediante tres mecanismos bien conocidos: fotoeléctrico, termoeléctrico y termoiónico. De los tres el más prometedor y eficiente es el primero, dando origen a la denominada *conversión fotovoltaica* de la energía solar.

El efecto fotoeléctrico supone la absorción de la energía  $h\nu$  de un fotón por un electrón provocando su liberación de la estructura atómica en que se encontraba y creando en consecuencia pares electrón-hueco que pueden ser dirigidos por campos eléctricos provocando el efecto de corriente deseado. Este efecto es aprovechado de forma natural y autónoma por medio de diodos semiconductores, del que el más estudiado es el que tiene su base en cristal de Sicio debidamente dopado para crear las zonas p (p. e. Boro) y zona n (p. e. Fósforo), y su unión. Así establecido, el diodo se encuentra en equilibrio sin corriente neta, pero con un campo inherente en la unión. Es este campo quien dirigirá los pares electrón-hueco creados por la energía fotónica de la radiación solar, fotocorriente que será proporcional a la intensidad de la luz. El campo creado en la unión es muy fuerte, del orden de 10 KV/cm, provocando una fotocorriente superior a la corriente de difusión en oscuridad y por tanto

una corriente neta significativa..., gracias simplemente a la combinación de un material adecuadamente fabricado (Diodo) y la luz solar. Los espesores de las capas previa y posterior a la unión son de importancia capital debido a los posibles efectos de recombinación que provocan sólo un efecto térmico (y no eléctrico), alterando la opacidad del sistema a la radiación, que se ve modificada por la temperatura del mismo y que tiene además una fuerte dependencia espectral, lo que limita el rango de validez de la luz solar. Debido al carácter cuántico del efecto fotoeléctrico, existe una fuerte dependencia del rendimiento de la célula con la banda prohibida de energía del material utilizado. Así, por ejemplo, la célula convencional de Sicio es sensible básicamente a las zonas visible e infrarrojo cercano.

Mencionados los diferentes factores que intervienen en el rendimiento de las células, nos encontramos con que la célula de Sicio (oblea) más convencional tiene rendimientos efectivos entre un 12-18 %. Estas células son monocristalinas, lo que provoca un uso grande de material, e incluye impurezas dañinas por el efecto de absorción fotoiónica separada de la unión.

Otros tipos de células se están investigando y ensayando, incluyendo estructuras policristalinas y usando materiales que permiten concebir células de película delgada como las del Ga As/Ga Al As con rendimientos entre 16-20 % ó CdS/Cu<sub>2</sub>S con valores 5-8 %, más baratas.

Un aspecto fundamental en la tecnología de células solares es la fabricación de las mismas, de alta complejidad y delicadeza buscando esencialmente la pureza electrónica requerida al material.

La comparación de rendimientos es ostensiblemente desventajosa para las células solares termoeléctricas. Así, una célula solar termoeléctrica, que genera una corriente debida a la tensión que aparece en las uniones de dos metales distintos cuando una de las uniones se mantiene a una temperatura distinta de la otra, no alcanza más de un 2,5 % de rendimiento, supuesto que el gradiente sea de 350° C, y para un valor de diferencias de temperaturas más alcanzable, 195° C, de tan sólo un 1,8 %. Sin embargo, la comparación con los rendimientos experimentales de las células solares termoiónicas arroja valores similares, pero bajo la consecución de difíciles condiciones de trabajo para estas últimas. Una célula solar termoiónica, que consiste en un tubo de alto vacío, adecuado para potenciar el efecto de creación de corriente entre dos placas metálicas, una de las cuales es calentada a elevadas temperaturas, puede alcanzar rendimientos del 4 % a 2.600° C (URSS) y 5 % a 2.400° C (USA), y con la adición de Cesio, del 10 % a 1.200° C y 15 % a 2.200° C; pero lograr estas temperaturas por insolación solar supone índices de concentración del orden de 1.000, además de los problemas constructivos

que aparecen al compaginar las pequeñas separaciones necesarias (cátodo-ánodo) con las elevadas diferencias de temperatura.

En resumen, pues, la energía solar supone una cantidad total de energía incidente en el exterior de nuestra atmósfera del orden de 20.000 veces la requerida por todas las actividades humanas. Desgraciadamente desde el punto de vista tecnológico, esta energía está muy distribuida, con densidades de potencia máximas de 1 kW · m<sup>-2</sup> en la superficie del planeta; lo cual, si bien es óptimo para el desarrollo de la vida, no lo es para las aplicaciones industriales, que requerirán grandes superficies de colectores para alcanzar los niveles de potencia característicos de estas instalaciones. Por poner un ejemplo, una planta de 1.000 MWe (modular o centralizada) requeriría una extensión de unos 8 km<sup>2</sup> y tendría un factor de utilización máximo de 0,25. Precisamente este bajo valor, debido al número de horas de insolación eficiente, hace que la energía solar se considere más una fuente para reducir el consumo de otros combustibles que para disminuir la potencia instalada total, pues cuando no haya disponibilidad solar harán falta otros centros de producción energética.

## ENERGIA NUCLEAR

Las fuerzas que ligan entre sí a los componentes del núcleo atómico podrían considerarse como el motor del universo, cuya evolución y cuya vida dependen de la energía liberada en los procesos en que intervienen dichas fuerzas.

Sinópticamente, y según el objetivo de este artículo, cabría clasificar en tres bloques estos procesos: las desintegraciones radiactivas; las reacciones nucleares de los nucleidos pesados (fisión); y las de los nucleidos ligeros (fusión). El primer grupo tiene una importancia absolutamente marginal en el contexto energético, pues sus aplicaciones se reducen a ingenios de poca potencia instalados en lugares difícilmente accesibles (por ejemplo, boyas luminosas autónomas). Los otros dos grupos, por el contrario, presentan un altísimo potencial energético, aunque por el momento sólo la fisión, en un primer estadio, haya llegado a la comercialización.

## FISION

Las materias primas de esta fuente de energía son el Uranio (0,71 % U-235; resto isótopos de número másico par) y el Torio (100 % Th-232). De estos nucleidos, solo el U-235 puede considerarse como combustible primigenio, pues el U-238 y el Th-232 han de fisionarse gracias al exceso neutrónico global producido por el U-235.

La potencialidad intrínseca de esta fuente viene definida por el defecto de masa que tiene lugar en la reacción de fisión: un 0,1 %. Esto significa, en números redondos, 1 MW. día por gramo de átomos pesados cuyos núcleos hayan sido fisionados en su totalidad.

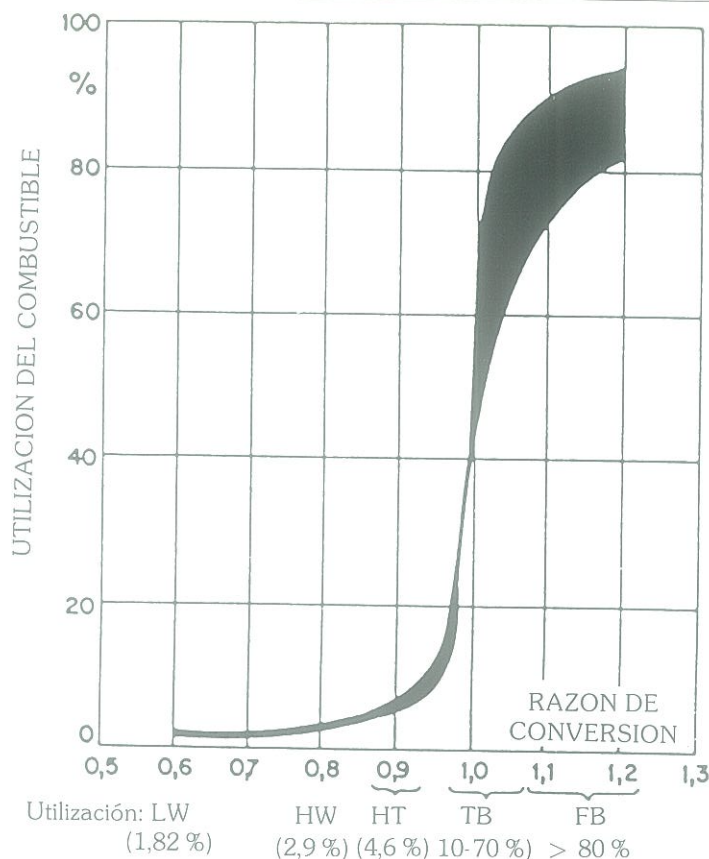
El contenido de Uranio y Torio en la Tierra no es escaso: alrededor de 3 ppm. de U y 8 ppm. de Th en el manto terrestre. Estas cifras globales son, no obstante, poco significativas, porque los yacimientos de baja mena no son económicamente explotables; sólo deben considerarse como reservas los contenidos de U y Th comercializables por debajo de determinados costes (competitivos, se entiende).

En cifras generales, las reservas de Uranio se cifran en unos 2,5 millones de toneladas explotables a costes razonables (que suben lógicamente de año en año) y en otros 2,3 millones, adicionalmente estimados aunque no seguros, que también podrían explotarse en un futuro a precio competitivo. Estos valores se refieren a países de economía no planificada centralmente (entiéndase comunistas), pues de éstos no existen datos. En realidad, el 80 % de los valores anteriores corresponden a países de la OCDE, porque sobre África, Sudamérica y Sudasia se tiene un conocimiento muy poco riguroso de los yacimientos.

Como reservas hipotéticas que puede haber en todo el mundo, se habla de unos 10 a 20 millones de toneladas. Esto equivaldría a unos 30 y 60 billones ( $10^{12}$ ) tec. Por otra, habría que anotar que el Uranio contenido en el agua del mar se estima representa del orden de 10 trillones ( $10^{18}$ ) tec.

Todo este tonelaje marca el máximo valor energético que puede extraerse de esta fuente. Hay que anotar, sin embargo, que con la tecnología actual no se aprovecha sino una pequeña fracción, de un 0,6 % aproximadamente en términos de materia natural. Esta cifra puede elevarse cuantiosamente mediante el uso de reactores reproductores y reciclado del combustible irradiado; actividades éstas perfectamente desarrolladas tecnológicamente, pero que no se han desplegado por falta de incentivo económico y por los no pequeños problemas más radiológicos y de riesgo de proliferación que conllevan. No obstante, el establecimiento de un ciclo reproductor cerrado permitirá extraer casi el 100 % de la energía contenida en los minerales de U y de Th. En la figura 2 se aprecia la fuerte dependencia que tiene el porcentaje de aprovechamiento respecto de la razón de conversión del tipo de reactor usado. Con que ésta sea ligeramente superior a la unidad (reproducción), el aprovechamiento alcanza cotas muy altas.

Aunque el objetivo de este artículo es valorar el potencial energético intrínseco —lo cual ya se ha esbozado— conviene dejar reflejo de los problemas radiológicos que esta fuente de energía presenta, magnificados por ciertas actitudes psico-



## F II

*Aprovechamiento máximo de la materia prima nuclear, en función de la razón de conversión del tipo de reactor LW: reactores de agua ligera; HW, reactores de agua pesada; HT, reactores de alta temperatura; TB, reactores térmicos reproductores, y FB, rápidos reproductores. Entre paréntesis figura el máximo aprovechamiento alcanzable con reclado.*

lógicas que no viene al caso analizar. En efecto, la irradiación en el reactor supone una amplificación extraordinaria del nivel de radiactividad natural inicialmente existente en el yacimiento minero. Pero a esto hay que añadir que transcurridos entre 4.000 y 10.000 años tras la irradiación, el contenido radiactivo de los residuos es menor que el que habría habido en el material extraído de la mina y quemado en el reactor, si esto último no se hubiese hecho. Este plazo centenario, grande para el hombre, es sin embargo pequeño en la vida geológica de los yacimientos escogidos en los que se podrían ubicar tales residuos.

## FUSION NUCLEAR

Imaginar la creación de un Sol en la Tierra hubiera constituido en tiempos aparentemente remotos materia sacrilega, carne de hoguera e ilusión esotérica. Hoy, el hombre se encuentra en el camino de reproducir algo semejante, y sus manos ya han acariciado su propia estrella.

Los principios físicos básicos del mecanismo generador de energía, la fusión nuclear, ya han sido establecidos, y una parte de los que conducirán a su futura aplicación comercial también. Numero-

sos laboratorios ya han producido las condiciones necesarias para obtener fusión nuclear, y se está andando el camino para lograr que el sistema nos de más energía de aquella que nosotros debemos suministrarle para su funcionamiento (principio económico y comercial).

Los núcleos de masas atómicas intermedias son los que tienen un mayor valor de la masa media por nucleón. De esta manera, la fusión de dos núcleos ligeros da como consecuencia elementos intermedios que tienen una menor masa por nucleón. La reacción es pues, estable, y aparecerá un exceso de masa  $M$  convertido en energía cinética de las partículas resultantes, que se intentará aprovechar de la manera más óptima. Esa energía vendrá dada por la conocida expresión einsteniana  $E = M \cdot c^2$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz.

Para lograr la desada fusión de los dos núcleos, se precisa salvar la barrera coulombiana existente entre ambos, dada su naturaleza de cargas eléctricas de idéntico signo. Esto supone comunicar al sistema, a los núcleos en particular, suficiente energía cinética para salvar las fuerzas repulsivas. En términos macroscópicos en equilibrio esto supone elevar la temperatura del material hasta decenas y centenas de millones de grados Kelvin. Debemos pues de invertir

una formidable cantidad de energía para calentar el material. Por otra parte, a estas temperaturas (KeV) los átomos han perdido parte de sus electrones corticales (para el Hidrógeno el potencial de ionización está en 13,6 eV), por lo que nos encontraremos con un sistema compuesto por iones positivos y electrones libres que denominaremos plasma si además reúne la condición de quasi-neutralidad. El fluido que supone un plasma se difundiría espontáneamente, de tal suerte que la probabilidad de que los núcleos integrantes se fusionen sería mínima, y en consecuencia no se obtendría la energía deseada. En consecuencia, se deberá *confinar* el plasma de manera que el nivel alcanzado de densidad iónica se mantenga el tiempo suficiente para dar lugar a una suficiente tasa de reacciones de fusión.

Dos líneas se han abierto para solucionar científica y tecnológicamente estos problemas. En la primera, se confina a las partículas, haciendo uso de su naturaleza de cargas eléctricas, mediante potentes campos electromagnéticos, provocando su movimiento en órbitas cerradas o explotando el efecto de rebote de las cargas eléctricas al moverse en un campo magnético creciente; todo esto constituye el área de la fusión por confinamiento magnético. A este grupo pertenecen dispositivos como los Tokamaks, Stellarators, Multipolos, Espejos Magnéticos, Espejos en Tandem..., en los que la densidad nuclear es baja, del orden de  $10^{14}$  -  $10^{16}$  iones/cm<sup>3</sup>, y se precisa un tiempo de confinamiento de segundos o decenas de segundos para hacer rentable el sistema. La solución alternativa, fusión por confinamiento inercial, pretende obtener muy altas densidades de la materia mediante la compresión isentrópica de esferas combustibles con radios de milímetros y masas de miligramos, lo que se logra mediante la cesión de alta energía por aparatos capaces de desarrollar muy elevadas potencias, como rayos láser, haces de iones pesados o ligeros, y haces relativistas de electrones. En este caso las densidades son formidables,

$10^{26}$  iones/cm<sup>3</sup>, y los tiempos útiles de producción de fusión vienen dados por la inercia del material comprimido y son del orden de nanosegundos ( $10^{-9}$  s).

Ya se ha indicado que las reacciones de fusión se dan entre elementos ligeros, y de entre éstos buscaremos, en primera aproximación, aquellas que requieran una menor energía de calentamiento para producir dichas reacciones. Así nos encontramos con que son candidatos preferentes los isótopos 2 y 3 del elemento Hidrógeno, es decir: Deuterio y Tritio. Reacciones Deuterio-Deuterio y Deuterio-Tritio suponen las alternativas más plausibles bajo este criterio. Por otra parte, de entre las dos citadas, la *Deuterio-Tritio* requiere temperaturas más bajas, constituyendo hoy en día la reacción base en la que se apoya la tecnología de los futuros reactores de fusión de primera generación.

Una idea de la impresionante densidad de energía que supone esta fuente lo da el dato de que en 1 m.<sup>3</sup> de agua se tienen  $10^{25}$  átomos de Deuterio que, via reacciones de fusión, ofrecen una energía de  $7,94 \times 10^{12}$  julios. Para obtener esta misma energía se precisaría quemar 300 toneladas de carbón o 1.500 barriles de petróleo. La energía disponible a través de sólo un 1 % del Deuterio contenido en los océanos (el volumen oceánico se puede cifrar en  $1,5 \times 10^{19}$  km<sup>3</sup>), es de aproximadamente  $1,2 \times 10^{29}$  julios ( $120 \times 10^6$  Q). Esta cifra es unas 500.000 veces la energía disponible mediante los recursos de combustibles fósiles en el mundo.

Pensemos ahora en términos de abastecimiento de los combustibles necesarios: Deuterio y Tritio. El Deuterio se encuentra en el agua del mar en una proporción de un isótopo de D por cada 6.500 de H, lo que supone aproximadamente  $10^{13}$  Mg. (toneladas) de Deuterio, cantidad más que suficiente para abastecer a la humanidad durante más tiempo del previsto de duración de nuestro planeta (ver tabla 2). El otro isótopo considerado, tritio (T), aunque ciertamente escaso en la naturaleza, permite ser generado mediante reacciones de captura neutrónica con los isótopos del Litio (7,4 % Li<sup>6</sup>; 92,6 % Li<sup>7</sup>) aprovechando la propia generación de neutrones resultantes de las reacciones de fusión. El litio es un elemento abundante en la corteza terrestre, 20 partes por millón, y en el agua del mar (0.17 ppm). En la tabla 1 se puede ver un resumen de todo lo anteriormente expuesto junto a la previsible duración de estos dos elementos utilizados en los reactores de fusión si esta fuente fuese la única abastecedora de energía según una tasa de consumo energético anual constante e igual a la previsible para el año 2000. La conclusión en este sentido es que nos encontramos frente a una fuente ciertamente inagotable.

estructuras del reactor. En consecuencia, se han propuesto otras reacciones de fusión como candidatas para una segunda generación de reactores, con la intención de disminuir (ciclos semilimpios) o anular (ciclos limpios) la presencia de neutrones como productos de fusión y que la energía emergente sea en forma cinética de partículas cargadas. Algunas de ellas son:  $D + He^3 \rightarrow He^4 + p + 18,2$  Mev,  $p + Li^6 \rightarrow He^3 + He^4 + 3,86$  Mev,  $p + 16,6$  Mev,  $Li^6 + Li^6 \rightarrow 3 He^4 + 20,5$  Mev,  $p + B^{11} \rightarrow 3 He^4 + 8,7$  Mev.

Comentario aparte merece la repercusión en el medio ambiente, y más concretamente la potencialidad de riesgo radiactivo. Es importante hacer notar que, incluso con ciclo (D,T), los reactores de fusión suponen disminuciones de dos órdenes de magnitud (100), o superiores, con relación a los reactores de fisión comerciales, y ésto se ve aumentando al compararlo con LMFBFR (R. rápidos) usando Plutonio como combustible.

Las aplicaciones de los reactores de fusión que hoy se vislumbran cubren un aplísimo espectro que va desde la generación comercial de electricidad cretos hasta la producción de combustibles sintéticos, pasando por la generación de combustible fósil a partir de material fértil (U-238, Th 232) aprovechando el elevado flujo neutrónico emergente (reactores híbridos fusión-fisión). Un resumen indicativo puede verse en la tabla 3.

Los problemas para obtener una planta comercial de generación de energía eléctrica están aún lejos de ser resueltos, pero los pasos que se están dando permiten indicar que, bajo la incertidumbre lógica, se podría disponer de este tipo de centrales alimentadas por reactores de fusión hacia los años 2020 ó 2030. Aspectos tan apasionantes desde un punto de vista científico y tecnológico como superconductividad, creación de campos magnéticos del orden de 50 kG. o superiores y corrientes

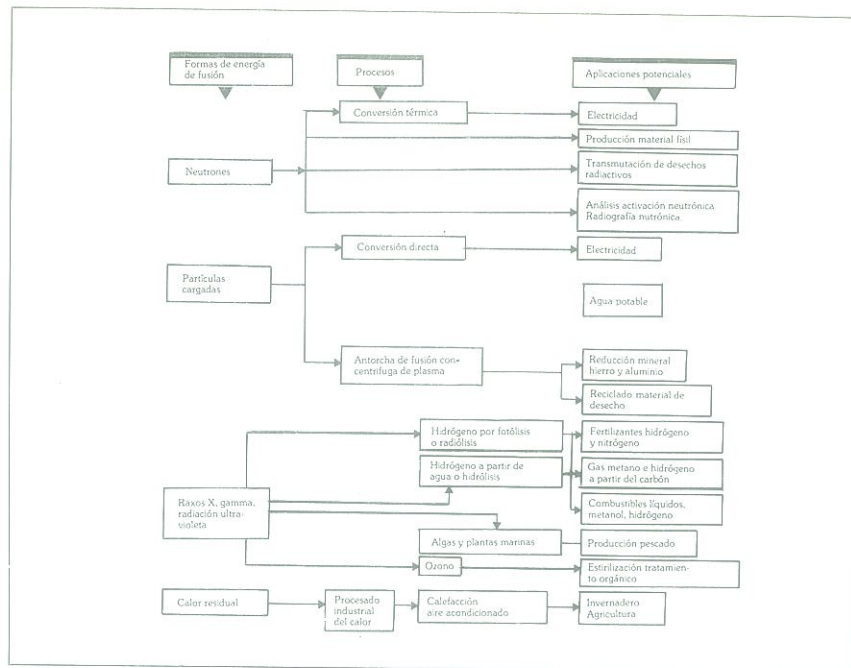
### III RESERVAS DE LOS COMBUSTIBLES OBTENIDOS DEL AGUA DEL MAR

| Combustible      | Concentración<br>g/Mg de agua<br>de mar | Densidad de energía térmica |       |                              | Duración del<br>combustible<br>con una tasa<br>de crecimiento<br>energético<br>nula a partir<br>del año 2000 |
|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|-------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                                         | kWh/g                       | MWd/g | kWh/Mg<br>de agua del<br>mar |                                                                                                              |
| Deuterio . . . . | 34                                      | $261 \times 10^3$ (a)       | 10,9  | $8,87 \times 10^6$           | $1,5 \times (a) 10^{10}$                                                                                     |
| Litio . . . . .  | 0,17                                    | $83 \times 10^3$            | 3,5   | $14,10 \times 10^3$          | $2,3 \times 10^7$                                                                                            |

(a) con recirculación del T.

La presencia de neutrones como producto de las reacciones de fusión mencionadas supone la necesidad de un sistema de contención dada su penetración potencial y su elevada capacidad de activación de materiales, aparte de las consecuencias que el daño por irradiación neutrónica supone para las es-

del plasma de las decenas de megamperios, vacío, comportamiento de materiales frente a alta irradiación, producción neta de Tritio, pureza del plasma, diseño de haces láser o iones con energía de megajulios, fabricación de pastillas multicapas con radios de milímetros o la física de altas presiones y temperaturas,



### III Aprovechamientos posibles de la fusión.

suponen un enorme reto que ha sido tomado con la ilusión de disponer de una fuente de energía de posibilidades ilimitadas.

El calendario de acontecimientos se va cumpliendo dentro de los márgenes previsibles, y el funcionamiento de los enormes dispositivos TFTR (USA) y JET (CEE), o el próximo de los JT-60 (Japón), T-20 (URSS), SHIVA-NOVA (USA), PBFA-II (USA), indica la aproximación a la demostración científica. Los proyectos, diseño y construcción de los sistemas de comprobación de elementos de ingeniería nos podrían situar en un reactor demostrador de tecnología a final de este siglo, para pasar a la optimización última que nos de su comercialización.

## ENSAYO DE CONCLUSIONES

La energía se presenta en nuestro entorno en formas muy variadas, cuyas potencialidades intrínsecas acabamos de analizar. Precisamente por la multiformidad aludida no es fácil ni absolutamente orientativo comparar los valores en que se han cuantificado dichas potencialidades. No obstante, tales valores representan una cota teórica, no superable, dado que se basan en principios físicos bien comprobados. En la práctica, los valores aprovechables serían ciertamente menores, debido a las ineficiencias de los procesos tecnológicos que tal aprovechamiento requeriría.

Como ensayo de conclusión, cabría intentar dicha comparación entre los mencionados valores máximos teóricos de las distintas fuentes consideradas, adoptando una referencia que pudiera ser común a todas ellas. Ante esto nos encontramos con la dificultad de que la

utilización de las fuentes no renovables consume un combustible, mientras que las renovables (pero no eternas) se limitan a modificar parte de un flujo energético natural a otra forma que sea útil para nuestras necesidades.

Por otra parte, las aplicaciones que pueden satisfacer las diversas fuentes son así mismo diversas y, a pesar de los equivalentes energéticos, las comparaciones pueden tergiversarse algo según el índice de aprovechamiento de cada fuente para la aplicación escogida.

Aún con las salvedades anteriores, y teniendo en cuenta que la electricidad es la forma a través de la cual fluye más de la tercera parte de la energía primaria en un país industrializado, puede tomarse como referencia una central eléctrica de 1.000 MWe, haciendo caso omiso de la mayor o menor verosimilitud tecnológica de una instalación de este tipo para cada fuente de energía. Para las renovables, habrá que especificar los datos requeridos para generar dicha potencia teóricamente (con inclusión de los rendimientos máximos alcanzables, también en teoría) y en el caso de las no renovables bastará señalar el consumo anual de combustible (señalando también la pérdida de materia prima en el aprovechamiento óptimo, si existe).

Con estos antecedentes, la comparación entre la potencialidad intrínseca de las fuentes de energía quedaría así:

- **Biomasa:** En nuestra latitud, y con valores óptimos de fotosíntesis, se requerirían unos 50 km.<sup>2</sup> de plantación (que pasarían a ser 120 km.<sup>2</sup> si se produjera realmente electricidad a través de un ciclo termodinámico).
- **Carbón:** Una central de carbón consume unos tres millones de toneladas de carbón al año.

- **Petróleo:** Con los derivados de este combustible consumiría algo menos de dos millones de toneladas.
- **Gas:** Se consumirían unos 2.000 millones de m<sup>3</sup> (N) de gas.
- **Eólica:** Harían falta unos 3 km.<sup>2</sup> de área de colectores eólicos.
- **Hidráulica:** Con un salto de 200 metros haría falta un caudal de 500 m.<sup>3</sup> por segundo.
- **Geotérmica:** Se requeriría un caudal de agua de media entalpía de 10 m.<sup>3</sup> por segundo.
- **Oleaje:** Se requerirían 60 km. de convertidores para producir dicha potencia, con valores medios del mar en costas españolas (que subirían a 150 km. de tener en cuenta el rendimiento de conversión).

En cuanto a *gradientes térmicos* y *mareomotriz*, remitimos al texto por requerir sus aplicaciones condiciones climáticas y marinas muy peculiares.

- **Energía solar:** Sin tener en cuenta rendimientos de captación, se requerirían del orden de 1 km.<sup>2</sup> de paneles orientables para captar tal potencia, lo cual podría suceder unas 2.000 horas/año en lugares muy escogidos.
- **Heliotérmica:** Se necesitarían unos 2,5 km.<sup>2</sup> de paneles (que ocuparían una extensión total de unos 8 km.<sup>2</sup> de terreno).
- **Fotovoltaica:** Con rendimientos máximos teóricos harían falta unos 4 km.<sup>2</sup> (no toda esa superficie habría de estar recubierta con fotodiodos, ya que la luz solar se podría concentrar antes de incidir en éstos).
- **Fisión:** En los ciclos actuales se requieren 30 toneladas/año de uranio enriquecido, que suponen más de 150 de Uranio natural. De esto, realmente sólo se consume una tonelada (el resto es teóricamente reciclable).
- **Fusión:** Aunque dependería del ciclo utilizado, se podría dar como referencia el consumo anual de 330 kg. de Deuterio (teniendo en cuenta un 40 % de rendimiento) lo que supondría el contenido de este isótopo en 10.000 m.<sup>3</sup> de agua de mar.

Esta sucinta comparación nos parece lo más adecuada para este ensayo de conclusiones. Obviamente, a cada fuen-

Continúa en la página 38