

UNIVERSIDAD AMBIENTAL DE LA PALMA

CURSOS DE VERANO 2007 EN LOS LLANOS DE ARIDANE

17 al 21 de septiembre

Museo Arqueológico Benahorita, Calle Las Adelfas, s.n.

Oferta oficial de Créditos de Libre Elección de la Universidad de La Laguna

Dirección académica

Dr. José-León García Rodríguez, profesor titular de Geografía Humana de la Universidad de La Laguna.

PROGRAMA DE LOS CURSOS

Las energías renovables: una apuesta de futuro en las islas

Director: Dr. Francisco Jarabo Friedrich, profesor titular de Ingeniería Química de la Universidad de La Laguna.

Fecha: del 17 al 21 de septiembre.

Duración: 20 horas lectivas, equivalentes a 2 créditos de libre elección de la ULL.

Horario: de las 9,30 horas a las 13,30 horas.

Lugar: Salón de Actos Museo Arqueológico Benaoharita, Los Llanos de Aridane.

Objetivos

El aprovechamiento de las energías renovables en Canarias se encuentra muy alejado de su potencial. Esto es debido a una serie de razones, entre las que destacan la insuficiente implicación de recursos públicos para su fomento y la falta de una cultura social que demande de forma efectiva este tipo de infraestructuras energéticas. La reciente entrada en vigor del Protocolo de Kyoto y el consiguiente compromiso del gobierno del Estado en la revisión del Plan Energético Nacional y el impulso de las energías renovables, son aspectos que indican que se va a producir un incremento del interés en este sector, por lo que los estudios que aquí se proponen pueden tener gran importancia en el momento actual y futuro. Se pretende, pues, desarrollar unos contenidos que de forma rigurosa y científica, a la vez que divulgativa, sirvan para potenciar socialmente el uso de las nuevas fuentes de las que las Islas Canarias están bien dotadas. Por ello en el mismo se sentarán las bases de la utilización de la energía, haciendo especial hincapié en las fuentes solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidráulica y marina. Asimismo trazarán los diversos aspectos económicos y ambientales que su uso conlleva.

LA ENERGÍA DE LA BIOMASA

Índice

LA FORMACIÓN DE LA BIOMASA	2
FUENTES DE BIOMASA PARA FINES ENERGÉTICOS	3
LOS RESIDUOS COMO FUENTE DE BIOMASA	5
Residuos agrarios	6
Residuos industriales	7
Residuos urbanos	8
LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS COMO FUENTE DE BIOMASA	9
Cultivos tradicionales	11
Cultivos poco frecuentes	12
Cultivos acuáticos	12
Cultivo de plantas productoras de combustibles líquidos	13
PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA	14
Extracción de hidrocarburos	16
Combustión	16
Gasificación	18
Pirólisis	20
Fermentación alcohólica	22
Digestión anaerobia	26

LA FORMACIÓN DE LA BIOMASA

La mayoría de los sistemas desarrollados por el ser humano para captar la energía solar, si bien han representado un considerable esfuerzo investigador, adolecen de la falta de unas perspectivas económicamente rentables para aprovechar la energía solar de forma masiva. Ello ha hecho volver la vista al modelo básico de captación y acumulación de energía solar por las especies vegetales verdes, seleccionado por la Naturaleza a lo largo de un proceso evolutivo de más de 3.000 millones de años, y que ha mantenido la vida en la Tierra hasta nuestros días.

Esta forma de captación de energía es la única fuente renovable que conlleva asimismo un almacenamiento, lo que la distingue de la energía solar directa, la eólica o otras que han de concentrarse y almacenarse artificialmente, a menudo con dificultad. Así pues, la materia orgánica constituye energía solar almacenada y es la denominada **energía de la biomasa**.

La formación de materia viva o biomasa a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado **fotosíntesis**, gracias al cual se producen grandes moléculas de alto contenido energético, cuyo coste de almacenamiento es nulo y, en principio, sin pérdidas.

Mediante la fotosíntesis, los vegetales transforman productos minerales sin valor energético, dióxido de carbono y agua, en materias orgánicas de alta energía, proceso que sólo tiene lugar en las plantas verdes, que contienen clorofila, ya que este compuesto es el que posibilita toda la serie de reacciones químicas que tienen lugar. Los productos que fabrican para sí las plantas (azúcares, proteínas, grasas, etc.) y el oxígeno que simultáneamente eliminan, sirven, a su vez, directa e indirectamente, de alimentos constituyentes o energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta.

Ahora bien, en todo proceso de conversión energética un importante factor a considerar es el rendimiento con que éste tiene lugar, es decir, la fracción del total de energía incidente (energía solar) que queda convertida en la forma de energía de interés (energía de la biomasa). Teniendo en cuenta las reacciones que gobiernan la fotosíntesis, se puede obtener el valor teórico del rendimiento fotosintético, que resulta ser, aproximadamente, de un 30%. Sin embargo, del total de la radiación solar que llega a la Tierra, sólo algo más del 40% es fotosintéticamente activa; además, sólo el 70% de ésta es absorbida por las hojas, ya que el resto suele ser reflejada, con lo cual,

la eficacia máxima teórica del proceso será de alrededor del 8% ($0,3 \times 0,4 \times 0,7$). Por otra parte, las pérdidas de energía debidas a la respiración de las plantas (estimadas en cerca de un 40%) lleva a un rendimiento máximo teórico de transformación de la energía solar en biomasa que no llega al 5%.

La realidad es que los valores más altos que se encuentran en condiciones óptimas de campo son del 3%, mientras que la media para el caso de plantas de cosecha anual no sobrepasa el 1%.

Aunque el rendimiento del proceso de conversión biológica de la energía solar pueda parecer bajo, se ha de considerar que los sistemas vivos que captan y convierten la energía solar se encuentran ampliamente distribuidos sobre tierras y aguas del planeta, cubriendo una enorme superficie, lo que determina que la cantidad de energía almacenada por fotosíntesis sea inmensa, alrededor de 8,5 millones de TW.h/año. Sin embargo, esta cifra, aunque obedece a estimaciones realistas, no debe conducir a un exagerado optimismo, puesto que para el uso de esta cantidad ingente de biomasa como fuente energética existen varias limitaciones.

En efecto, cerca del 40% de la biomasa que se produce en el mundo es de tipo acuático, localizada en los océanos y, por tanto, de difícil recolección. Por otro lado, de la biomasa terrestre, gran parte se encuentra muy dispersa, lo que hace que los costes energéticos de recolección y transporte restrinjan el posible aprovechamiento de la biomasa producida en lugares relativamente alejados de los centros de utilización. Finalmente, la existencia de vastos eriales, la extensión limitada de las zonas cultivables y el tipo de materias primas energéticas en que la civilización actual basa su funcionamiento, impone ciertos condicionantes tanto a la producción de biomasa aprovechable como al estado en que ésta puede utilizarse.

A pesar de todo, mediante el desarrollo de una adecuada tecnología parece evidente que podría utilizarse el potencial energético de la biomasa para cubrir un considerable porcentaje de la demanda energética actual.

FUENTES DE BIOMASA PARA FINES ENERGÉTICOS

Como ya se ha indicado, la actividad fotosintética de los vegetales produce una masa viviente que se ha denominado *biomasa*. Sin embargo, ésta es transformada posteriormente en los distintos niveles de seres vivos que se conocen. Se puede hablar

de **biomasa vegetal** cuando ésta se produce directamente como consecuencia de la fotosíntesis, mientras que aquella biomasa que producen los seres que utilizan en su alimentación la biomasa vegetal, se puede denominar **biomasa animal**. Así pues, en un sentido amplio del término, se puede definir como *biomasa* al conjunto de materiales orgánicos generados a partir de la fotosíntesis o bien producidos en la cadena biológica.

Ahora bien, los seres humanos y los animales utilizan sólo una parte de la biomasa a su disposición, constituyendo el resto un residuo en gran medida no utilizado. Incluso un gran porcentaje de la parte utilizada es devuelto a la Naturaleza como residuo. Tanto el primer caso, residuos de producción, como en el segundo, residuos de consumo o de transformación, son fundamentalmente orgánicos, lo que permite definir el término **biomasa residual** como la originada de la forma expuesta.

Finalmente, es evidente que lo que hoy se conoce como combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) no es otra cosa que biomasa (**biomasa fósil**), que se produjo en determinados períodos geológicos y, una vez enterrada, bien a través de mecanismos bioquímicos o bien por condiciones físico-químicas o por la conjunción de ambos tipos de acciones, generaron aquéllos. Evidentemente, aquí no se estudiará la biomasa fósil, por tratarse de una fuente de energía no renovable.

La obtención de energía a partir de la biomasa puede conseguirse indirectamente mediante su transformación en productos industriales que sustituyan a otros, costosos en energía fósil, o directamente, utilizándola como combustible. En este último caso se presentan dos soluciones posibles

- Utilizar como fuente de biomasa los **residuos**, lo que ofrece unas perspectivas universales e inmediatas de aprovechamiento.
- Utilizar como fuente de biomasa los llamados **cultivos energéticos**, es decir, plantaciones destinadas exclusivamente a producir energía, solución que, por diversos motivos, sólo podrá alcanzar una importancia significativa a medio o largo plazo.

Estas dos alternativas se consideran individualmente a continuación, intentando resaltar los aspectos más importantes de cada una de ellas en el contexto global de la biomasa como fuente de energía.

LOS RESIDUOS COMO FUENTE DE BIOMASA

El desarrollo de la civilización actual lleva consigo una generación continua de grandes cantidades de residuos, que están creando un problema por su magnitud y sus consecuencias. Teniendo en cuenta que la mayor parte de estos residuos son de carácter orgánico, constituyendo la denominada *biomasa residual*, se puede suponer que éstos presentan un enorme potencial para la producción de energía.

El potencial energético de los residuos puede ser intuido teniendo en cuenta que se producen unas 2 Tm de residuos de todo tipo por habitante y año, con un poder energético de unos 9.000 kW.h/año. Este poder energético permite prever un aprovechamiento amplio de esta biomasa que, bajo el punto de vista de constituir una materia prima, presenta la ventaja de producirse de forma continua y creciente como consecuencia de la actividad humana.

El tratamiento de los residuos es, en general, una actividad costosa, que hasta hace poco no se ha llevado a cabo con eficacia, bien por falta de una legislación adecuada o por carencia de medios económicos. No obstante, un estudio detenido del posible aprovechamiento de los residuos con fines energéticos en los lugares en que se producen muestra que éste tiene bastantes ventajas, algunas de las cuales se enumeran a continuación:

- Los residuos ya existen como tales, con un valor económico incluso negativo como materia prima.
- La biomasa residual suele estar concentrada en lugares determinados, lo que puede permitir un ahorro en costes de transporte.
- La utilización de residuos con fines energéticos es un sistema de eliminación con ventajas ambientales.
- Algunos métodos de aprovechamiento de la biomasa residual generan coproductos valiosos.

Todo ello hace que el tratamiento de la biomasa residual no sólo sea necesario, sino que podría convertirse en una actividad de interés económico y, fundamentalmente, social, debido a los beneficios que generaría su aprovechamiento.

En general, se pueden definir los residuos como aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado en el contexto en que son generados, ningún valor económico.

Se siguen varios criterios para clasificar los distintos tipos de residuos, entre los que cabe destacar la naturaleza de su origen (agrarios, industriales, urbanos) o los tipos de materiales que los constituyen (orgánicos, plásticos, metálicos, etc.). Teniendo en cuenta que el interés de este estudio se centra en la biomasa, se consideran tres grandes sectores de actividades que la producen.

Residuos agrarios

Los residuos agrarios, consecuencia del sector primario de la actividad humana se pueden subdividir, a su vez, en tres grandes grupos: agrícolas, forestales y ganaderos.

Se puede denominar **residuo agrícola** a la planta cultivada o porción de ella que es preciso separar para obtener el fruto o para facilitar el cultivo propio o posterior.

Una gran cantidad de los residuos agrícolas quedan en el suelo en forma de raíces, hojas o frutos no aprovechables, y no son utilizables como fuente energética, ya que se incorporan al terreno y contribuyen a mejorar considerablemente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Otra fracción de estos residuos la integran las partes aéreas que es preciso separar para facilitar la recolección o las labores agrícolas. Una cantidad importante de ellos son consumidos por la ganadería, como es el caso de las pajas de leguminosas o algunos residuos verdes, como los de la remolacha azucarera.

Por último, existe una gran cantidad de residuos con potencial interés industrial y energético, que localmente pueden tener alguna utilidad, pero cuya eliminación constituye un problema en las labores de explotación agrícola. Esta última categoría de residuos, que son los que interesan en este estudio energético, se producen principalmente en los siguientes cultivos:

- Cereales, originando pajas.
- Frutales y viñedo, cuya poda anual es una fuente considerable de material combustible.
- Algunos cultivos industriales como los textiles y oleaginosas, que dejan como residuos los tallos.

Los **residuos forestales** están constituidos por ramas, cortezas, virutas, serrín, hojas, tocones y raíces, habiendo constituido durante siglos la fuente energética más

importante de la Humanidad. Para facilitar su estudio, los residuos que se producen en el bosque se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Residuos de corte y elaboración de madera.
- Residuos de tratamientos selvícolas.

Respecto al primer grupo, hay que destacar la producción de ramas, teniendo en cuenta que aquéllas de diámetro inferior a 7,5 cm no reportan ninguna utilidad industrial en la actualidad y representan un residuo que hay que eliminar del bosque para evitar la propagación de incendios y plagas. Es considerable también la producción de corteza, serrín y viruta, originados en la elaboración de tableros, tanto a partir de troncos como de ramas. Las hojas, tocones y raíces también representan una cantidad apreciable de biomasa residual, susceptible de aprovechamiento.

Respecto al segundo grupo, son considerables los residuos que se producen en los tratamientos selvícolas: limpieas de los bosques naturales que se realizan para aumentar el rendimiento del bosque y evitar la propagación de incendios, y clareos que se efectúan en los montes repoblados. La eliminación de estos residuos supone en la actualidad un problema que, en la mayoría de los casos, sólo se puede resolver con la destrucción sobre el terreno, con la consiguiente pérdida energética. Se distinguen dentro de estos residuos los de madera de sierra, madera de industria y leña para astillas.

Tradicionalmente, los **residuos ganaderos** constituían la única fuente de nutrientes para los suelos agrícolas. Con la aparición de los fertilizantes sintéticos, lamentablemente han dejado de utilizarse los estiércoles en gran número de explotaciones, comenzando a haber una separación entre agricultura y ganadería. Por ello, en las explotaciones intensivas que no disponen de terrenos suficientes, se tiende a recoger las deyecciones en diferentes tipos de depósitos y, mediante tratamientos diversos, eliminarlas o llevarlas a lugares en que puedan tener alguna utilidad. Aquí es donde podría contemplarse la inclusión de la tecnología energética para atender a las necesidades locales de la explotación ganadera.

Residuos industriales

Es muy amplio el número de sectores industriales que generan residuos orgánicos; sin embargo, en muchos de aquéllos, la producción real es muy escasa ya

que, por lo general, dichos residuos se utilizan como subproductos o aporte energético y, cuando no tienen utilidad y proceden de pequeñas industrias, frecuentemente se incorporan a los residuos sólidos urbanos.

Por estos motivos sólo se consideran de interés los residuos de sectores industriales que puedan generar grandes cantidades de residuos de naturaleza orgánica, suponiendo su eliminación un coste adicional para la empresa. Las industrias que se pueden considerar, bajo este punto de vista, son las de conservas vegetales, producción de aceites y vinos, y frutos secos, aunque localmente pudieran ser importantes industrias de otro tipo, generadoras de biomasa residual.

Residuos urbanos

Los núcleos de población producen diariamente grandes cantidades de residuos, que se pueden considerar incluidos dentro de dos grandes grupos: los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales urbanas.

El tratamiento y eliminación de estos residuos constituye un problema cada vez mayor, debido a su incesante crecimiento, a medida que aumenta la población y el nivel de vida de la misma. Por ello se ha estado estudiando una amplia gama de soluciones posibles a este problema, destacando aquellos métodos de tratamiento que permitan la obtención de energía y el reciclaje de productos útiles.

En este aspecto es de mencionar que, en contraposición con los residuos agrarios, que se producen de forma dispersa, los residuos urbanos se caracterizan por su localización, por lo que parece evidente que sean los más aptos para un tratamiento a gran escala, debido a la menor incidencia del factor transporte en el coste de los procesos de transformación.

Se denominan **residuos sólidos urbanos** a aquellos materiales generados en los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza llevados a cabo en los núcleos urbanos, que son finalmente destinados al abandono. Su composición es muy variable, pero se puede promediar su contenido en materia orgánica en alrededor del 50%, y su producción media no suele alcanzar 1 kg/hab.día, variando la distribución de ambos valores en función del tamaño de los núcleos urbanos y del nivel de vida de la población.

El correcto tratamiento de los residuos sólidos urbanos implica dos fases:

recogida y transporte, y aprovechamiento o eliminación. Una vez que se ha efectuado la recogida y se ha transportado a los lugares adecuados, que es la fase más costosa de la gestión de las basuras, es necesario dar un destino final a las mismas.

En definitiva, los residuos sólidos urbanos representan la fuente de biomasa residual más directamente aprovechable por las siguientes razones:

- Es la única fuente de biomasa residual que cuenta con un servicio de recogida organizado.
- Su recogida y eliminación son totalmente imprescindibles, por lo que sería mucho más interesante su aprovechamiento.
- Se estima que el crecimiento de su producción es de alrededor del 5% anual.
- Permiten la recuperación de otros productos reciclables, como los metales y el vidrio.

Por su parte, se denominan **aguas residuales** a los líquidos procedentes de la actividad humana que llevan en su composición gran parte de agua y que, generalmente, son vertidos a los ríos o al mar. Su composición es tanto inorgánica (sales, arenas, etc.) como orgánica (materiales biodegradables), y su fracción sólida contiene una apreciable cantidad de biomasa residual.

En los últimos años se ha visto la necesidad de depurar estas aguas residuales, proceso que consiste, esencialmente, en un tratamiento primario de separación de la materia en suspensión seguido, generalmente, de un tratamiento biológico con oxígeno, obteniéndose al final del mismo un agua depurada.

Sin embargo, estos procedimientos generan unos fangos (primarios y biológicos) que contienen la mayor parte de la materia orgánica que estaba presente en el agua residual, por lo que poseen una alta carga contaminante. Su concentración media en materia orgánica oscila alrededor del 5% y se producen a razón de unos 2 l/hab.día, lo que supone una generación de biomasa residual de 36,5 kg/hab.año.

LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS COMO FUENTE DE BIOMASA

El cultivo de cosechas atendiendo al valor que poseen como combustible, es decir, con la directriz de su potencial energético, es lo que se conoce como *cultivos*

energéticos. Recientemente, y como consecuencia de la crisis energética, se ha empezado a considerar seriamente la posibilidad de producir biomasa vegetal transformable en energía, conociéndose esta nueva faceta agrícola como *Agroenergética* sobre la cual, por falta de datos experimentales, existen todavía interrogantes acerca de su rentabilidad e impacto social y ecológico.

Actualmente sólo se obtienen pequeñas cantidades de energía procedentes de esta fuente; el conocer su rentabilidad económica y energética debe ser objetivo de investigación para que se pueda llevar a cabo esta actividad de forma masiva en un futuro no muy lejano.

Actualmente se han iniciado algunos intentos de plantaciones energéticas en diferentes países. A título orientativo, baste reseñar que un cultivo que tenga una producción de 10 Tm/Ha.año de biomasa seca, daría una energía anual equivalente a la suministrada por una potencia instalada de 5 kW. Si se desarrollasen cultivos energéticos de alta eficacia en la producción de biomasa, se podría duplicar o triplicar esta cifra, llegando a producciones comparables a las que tienen los cultivos más productivos. Esto significa que los cultivos susceptibles de ser utilizados como productores de energía deben ser seleccionados de acuerdo a la premisa general de obtener la máxima cantidad posible de energía neta compatible con las condiciones climáticas y del suelo de cada zona. Además, antes de abordar masivamente los cultivos energéticos en una zona, sería necesario evaluar el impacto ambiental que produciría su establecimiento y tomar las medidas oportunas para que dicho impacto fuese lo menos perjudicial posible.

A continuación se citará una serie de cultivos que se pueden aprovechar con fines energéticos, dividiéndose el estudio en los siguientes apartados:

- Cultivos tradicionales.
- Cultivos poco frecuentes.
- Cultivos acuáticos.
- Cultivos de plantas productoras de combustibles líquidos.

No son las plantas que se van a citar los únicos candidatos como productores de energía. No cabe duda de que la íntima adaptación de la especie a unas circunstancias ecológicas concretas, es uno de los factores más importantes a la hora de maximizar la productividad. Por eso, en cada circunstancia se deberán ensayar las

especies autóctonas o introducidas de las que se sospeche una mayor acomodación al medio. Posteriormente se puede iniciar una selección genética de variedades encaminadas a obtener la mayor cantidad posible de biomasa recolectable.

Los detalles de cada una de las especies que se citan, tanto bajo el punto de vista de su producción de biomasa, como respecto a la forma óptima de transformación de ésta en energía, reproducción, rendimientos, etc., se pueden encontrar en la bibliografía correspondiente.

Cultivos tradicionales

Los cultivos tradicionales son aquéllos que el ser humano ha venido utilizando desde hace mucho tiempo, no sólo para la producción de alimentos indispensables para su subsistencia, sino también para la obtención de productos de interés industrial.

Tratándose de utilizar algunos de estos cultivos con fines energéticos, es necesario distinguir aquéllos que puedan destinarse exclusivamente a la producción de energía, por haber decaído su interés en su ámbito tradicional, de los que puedan ser competitivos con la producción de alimentos. La viabilidad de estos últimos podría ser discutible, ya que esta competitividad tendería a ofrecer más dificultades que ventajas cara al futuro, salvo que se usasen como fuente energética los excedentes de cosechas.

Todas las especies de cultivo tradicional tienen determinadas exigencias climáticas, así como la necesidad de terrenos fértiles y agua por lo que, inevitablemente, su cultivo supone un elevado grado de competencia con los cultivos alimentarios. En un plano ideal, los cultivos energéticos se deberían localizar sobre terrenos marginales; sin embargo, el concepto de marginalidad es relativo y, exceptuando las zonas desérticas donde ningún vegetal puede ser cultivado, los límites para el aprovechamiento vienen marcados por imperativos económicos.

Dentro de estos cultivos cabe destacar:

- Cereales.
- Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).
- Sorgo dulce (*Sorghum bicolor*).
- Maíz de tallo azucarado (*Zea mays*).
- Remolacha (*Beta vulgaris*).

- Mandioca (*Manihot esculenta*).
- Girasol (*Heliantus annuus*).
- Plantaciones forestales.

Cultivos poco frecuentes

Desde que se ha empezado a considerar la posibilidad de utilizar cultivos con fines energéticos, se han iniciado diversos proyectos de prospección de especies silvestres. Algunas de ellas ya se cultivaban en sitios aislados, pero nunca con la intención de obtener energía.

La principal ventaja de estos cultivos sería su posible adaptación a zonas marginales o áreas no aprovechables para fines alimentarios o industriales, con lo que se evitaría la competencia energía-alimentación. En principio, se ha centrado la atención en especies de gran producción de biomasa en condiciones de suelo y clima desfavorables (suelos salinos, pobres, áridos) y con vistas a un aprovechamiento total de la biomasa producida (azúcares fermentables y residuos leñosos o celulósicos utilizables como combustibles sólidos).

Dentro de este tipo de cultivos se encuentran, entre otros:

- Cardos (*Onopordum* sp.).
- Patata (*Heliantus tuberosus*).
- Chumberas (*Opuntia ficus-índica*).
- Agaves (*Agave americana*).
- Caña de Provenza (*Arundo donax*).
- Pasto elefante (*Pennisetum purpureum*).
- Helechos (*Pteridium aquilinum*).

Cultivos acuáticos

Los océanos cubren aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra; desde el punto de vista de la captación de la energía solar poseen entre 5 y 10 veces más superficie potencialmente productiva que la tierra. Hasta el momento no se ha abordado con suficiente extensión y profundidad la creación de cultivos en explotaciones marinas; sin embargo, el incremento de la población y la demanda creciente de alimentos y productos energéticos, han vuelto en gran medida la atención científica

hacia esta posible forma de producción de biomasa. En cualquier caso, la experiencia actual en la siembra, cuidado y recolección en el mar es mucho más reducida que en tierra, por lo que la explotación de estos cultivos se contempla a un plazo mayor que la de los terrestres.

Dentro de los cultivos energéticos marinos cabe destacar:

- Algas (Macrocystis, Nerocystis, Alaria).
- Algas unicelulares (Chlorella, Scenedesmus, Spirulina).

Por otro lado, la planta acuática de agua dulce que quizás haya recibido más atención en los últimos tiempos es el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*).

Además de las especies citadas, existen otras muchas plantas acuáticas, tanto de agua salada como de agua dulce, que podrían ser utilizadas, bien para la obtención de energía o, de forma alternativa, para la alimentación (producción de proteínas). El estudio de cada especie en su hábitat natural puede ofrecer grandes posibilidades en un futuro de cara al aprovechamiento de muchas plantas acuáticas para la obtención de biomasa.

Cultivo de plantas productoras de combustibles líquidos

La mayor parte de los vegetales almacenan su energía básicamente en forma de hidratos de carbono (azúcares, almidón, celulosa). Existen otros, en cambio, que, presentando una gran fracción de residuo leñoso, producen sustancias que, con un tratamiento sencillo, pueden ser usadas como combustibles, por sus propiedades parecidas a los derivados del petróleo, en los motores de combustión interna o diesel: son las plantas productoras de combustibles líquidos.

El cultivo de estas especies constituye un panorama actualmente muy interesante, por lo que a continuación se hace una relación de algunas de las especies que se podrían utilizar para la producción de energía:

- Palma africana (*Elaeis guineensis*).
- Palma babasu (*Orbignya martiana*).
- Tabaiba (*Euphorbia lathyris*).
- Jojoba (*Simmondsia chinensis*).
- Alga elástica (*Botryococcus braurii*).
- Membrillo negro (*Croton sonderianus*).

- Tártago (*Ricinus communis*).
- Copaiba (*Copaiba* sp.).
- Arbol del caucho (*Hevea brasiliensis*).
- Guayule (*Parthenium argentatum*).
- Tocuyo (*Cucurbita foetidissima*).

Es importante tener en cuenta que las plantas de las que actualmente se extraen estos combustibles líquidos son muchas de ellas especies espontáneas, que no han sido cultivadas y, por lo tanto, no han sido sometidas a ningún tipo de selección. Cabe pensar, pues, en un incremento notable de rendimiento si se someten las especies a mejoras genéticas y se estudian las necesidades nutritivas y de cultivo. En el futuro, un adecuado programa de mejora indudablemente podrá elevar de forma sustancial los valores actuales de producción de combustibles líquidos de estas especies.

PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

La baja densidad física y energética de gran parte de la biomasa tal como se recupera de los residuos o se recolecta directamente del terreno, así como su contenido en humedad, muchas veces alto, determinan que en la mayoría de los casos no sea adecuada como tal para reemplazar a los combustibles fósiles sólidos (carbón), líquidos (petróleo) o gaseosos (gas natural). Se hace necesaria, pues, la transformación previa de la biomasa en combustibles de mayor densidad energética y física, contándose para ello con diversos procedimientos, que generan una gran variedad de productos.

Los combustibles originados a partir de la biomasa presentan la mayor parte de las características favorables de los combustibles fósiles, contando además con las siguientes ventajas adicionales:

- Presentan escaso contenido en azufre.
- No forman escorias en su combustión.
- Tienen bajo contenido en cenizas.
- Contribuyen a mejorar la calidad del ambiente.

Así, proceda de residuos o de cultivos energéticos, la biomasa generalmente se transforma en vectores de energía (calor, combustibles, electricidad) que conducen a la forma de energía útil requerida por un proceso determinado (energía mecánica, electricidad).

Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa directamente por extracción (plantas productoras de hidrocarburos), pero es más frecuente someter la biomasa a distintas manipulaciones, según su naturaleza y contenido en humedad, para su transformación en combustible. Estas transformaciones pueden dividirse en dos grupos, de acuerdo con la naturaleza de los procesos implicados.

Los **procesos termoquímicos** se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, en condiciones variables de oxidación, encontrándose implicadas reacciones químicas irreversibles. Pueden subdividirse en tres amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo con exceso de oxígeno (**combustión**), en presencia de cantidades limitadas de oxígeno (**gasificación**) o en ausencia del mismo (**pirólisis**).

Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. Desgraciadamente, estos métodos de conversión no generan un producto único, sino que dan mezclas de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, con diversos valores energéticos.

Los **procesos bioquímicos** son aquéllos que se llevan a cabo mediante diversos tipos de microorganismos, ya sean contenidos en la biomasa original, ya sean añadidos durante el proceso. Estos microorganismos producen la degradación de las moléculas complejas constituyentes de la biomasa a compuestos más simples, de alta densidad energética. Se utilizan estos procesos, fundamentalmente, para tratar biomasa natural o residual de alto contenido en humedad y los más corrientes son la **fermentación alcohólica** para producir etanol y la **digestión anaerobia**, para la producción de metano.

A continuación se estudiarán con cierto detenimiento cada uno de los procesos de transformación de biomasa en combustibles para intentar determinar, tanto su aplicabilidad como sus posibles rendimientos técnicos y económicos.

Extracción de hidrocarburos

Como se ha indicado anteriormente, existen numerosas especies vegetales que producen en su metabolismo hidrocarburos o compuestos afines, de elevado poder calorífico, que se pueden utilizar directamente como combustibles. Estos compuestos se pueden obtener mediante un proceso de extracción directa, aunque en la actualidad no está completamente definido el esquema de operación, debido a que está muy condicionado a cada tipo de especie vegetal.

En general, las plantas cortadas se secan y se muelen a tamaños pequeños, que se someten a extracción con acetona u otro disolvente similar. Extracciones posteriores con hexano y benceno permiten obtener varios tipos de aceites, formados por hidrocarburos, y un residuo rico en proteínas e hidratos de carbono, que puede ser utilizado como materia prima para la producción de etanol por fermentación.

Según la especie vegetal que se vaya a procesar, varía el tratamiento previo, los disolventes utilizados y las diferentes fracciones obtenidas al final de cada operación. De ahí que las investigaciones que se llevan a cabo para intentar optimizar el proceso en cuanto a rendimiento y economía estén encaminadas, principalmente, a determinar los disolventes adecuados en cada caso y su máxima recuperación, con vistas a su reciclado.

Combustión

La combustión directa es el sistema más elemental y, por supuesto, el más antiguo, de recuperación energética de la biomasa. Se entiende por combustión la oxidación completa de la materia para dar dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y, principalmente, calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso. Las variables que afectan principalmente al buen funcionamiento de este proceso son:

- Proporción de oxígeno en el gas de entrada.
- Temperatura de combustión.
- Características del combustible.

Respecto a la **proporción de oxígeno**, un defecto del mismo impide que la reacción sea completa, dando lugar a la producción de carbón, que perjudica al equipo, y de monóxido de carbono, gas altamente contaminante y venenoso, que obligaría a

instalaciones adicionales de descontaminación. Así, generalmente se trabaja con un exceso de oxígeno comprendido entre el 20 y el 40% por encima del teórico necesario.

La **temperatura de combustión** es aquella que alcanzan los productos de combustión debido al calor generado en la reacción, que es fuertemente exotérmica, descontando las pérdidas debidas a la radiación y al combustible no quemado o quemado de forma incompleta. Los valores normales se encuentran en el rango de 600 a 1.300 °C; niveles térmicos inferiores producen un efecto similar en el proceso que el defecto de oxígeno.

Las **características del combustible** se pueden clasificar en tres grupos: físicas, química y térmicas.

Dentro de las propiedades físicas destacan la densidad (determinante del tamaño de la unidad de combustión), la granulometría (que afecta a una mejor combustión) y, principalmente, el contenido en humedad, ya que la vaporización del agua consume gran parte de la energía producida. Este hecho aconseja utilizar para este proceso sólo biomasa con un bajo contenido en agua ya que, en caso contrario, el rendimiento de conversión sería desfavorable.

En cuanto a las características químicas del combustible, éste debe tener bajos contenidos en azufre, cloro y flúor (aspecto que cumple satisfactoriamente la biomasa vegetal), ya que en caso contrario, se producirían problemas de corrosión en el equipo y gases altamente contaminantes.

Las propiedades energéticas de la biomasa dependen ostensiblemente de sus características físicas y químicas, principalmente de su contenido en carbono.

La combustión se realiza normalmente en sistemas que constan de las siguientes unidades:

- Horno.
- Equipo de recuperación de calor (generalmente una caldera).
- Sistema de utilización de la energía recuperada (red de conducción de vapor, turbogenerador, etc.).

La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial, y a la producción de electricidad.

Existen muchos tipos de equipos de combustión disponibles comercialmente,

que sólo difieren en el diseño de los hornos, temperatura de operación y mecanismos de transmisión de calor. Por la sencillez del proceso, las innovaciones en el campo de la combustión tienen su mayor énfasis, no en el proceso en sí, sino en los equipos y nuevas tecnologías que permitan la obtención directa de electricidad o de vapor, adecuando los equipos a los objetivos concretos y a las materias primas disponibles.

La combustión presenta una elevada eficacia térmica. Cuando se utiliza biomasa seca (< 20% de humedad), el rendimiento oscila entre el 80 y el 85%, mientras que en el caso más general de utilizar biomasa húmeda (> 50% de humedad), el rendimiento se encuentra entre el 65 y el 70%. No obstante, la eficacia global del proceso, considerada en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%. Este método se utiliza profusamente en la actualidad en las industrias azucarera, papelera y de derivados de la madera, siendo cada vez más importante su aplicación a las basuras urbanas.

Finalmente, al hablar de combustión no se debe olvidar el interés de este proceso en el ámbito doméstico. Aunque la combustión de la madera se ha venido utilizando desde hace muchísimos años en los hogares, ha experimentado nuevamente un gran auge, debido a los nuevos diseños de estufas, calderas y cocinas lo suficientemente perfeccionadas como para lograr rendimientos del orden del 75%.

Gasificación

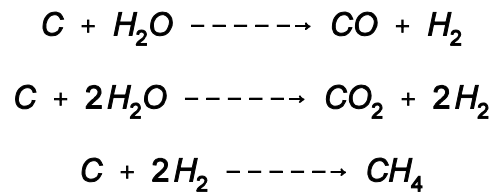
Bajo la denominación de *gasificación* se recogen todos aquellos procesos que llevan implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

La mayor parte de las gasificaciones convencionales requieren un material de tamaño de partícula homogéneo, a fin de que pueda garantizarse la constancia de la reacción, y que no presenten un espectro de densidad muy amplio para evitar segregaciones que puedan ser motivo de acumulación de sólidos (alquitranes) o de arrastres excesivos (cenizas en el gas).

La temperatura de operación es un factor importante en estos procesos. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800

°C. Con objeto de evitar problemas técnicos debidos a la fusión y a la aglomeración de cenizas, se impone una temperatura máxima de 1500 °C, limitándose la cantidad de comburente de un 10 a un 50% del teóricamente necesario para una combustión completa.

Obsérvese que en este proceso es de gran importancia la presencia de humedad en la biomasa que se vaya a tratar. En las condiciones de operación citadas se producen, entre otras, las siguientes reacciones químicas:



Así pues, la presencia de vapor de agua favorece la formación de hidrógeno y de metano, con el consiguiente aumento del poder calorífico del gas obtenido. Hay que tener en cuenta, no obstante, que en el caso de que el contenido en agua de la biomasa sea excesivo (> 20%), se producirá el mismo efecto negativo citado en el proceso de combustión. Esta aparente contradicción se suele solucionar en grandes sistemas industriales trabajando con biomasa seca e inyectando al gasificador una corriente de vapor de agua (alrededor de un 20% del peso de la biomasa).

La utilización como comburente de aire u oxígeno da lugar a dos procesos de gasificación sustancialmente distintos, en cuanto a la posible utilización de los productos obtenidos. En efecto, la presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas, no sólo en cuanto a su composición y capacidad calorífica, sino bajo el punto de vista de su posible uso. Se trata del *gas pobre* o *gas de gasógeno*, obtenido por la gasificación de biomasa con aire, y el *gas de síntesis*, producto de la gasificación con oxígeno.

El **gas de gasógeno** se obtiene mediante una gasificación de biomasa seca (humedad inferior al 20%), haciendo pasar a gran velocidad una pequeña cantidad de aire a través de una gran masa en combustión. Su poder calorífico es muy bajo (3,4 a 5,4 MJ/m³), por lo que se denomina asimismo *gas pobre*. Este hecho obliga a utilizarlo directamente en unidades de combustión para obtener electricidad y vapor, debido a que la presencia de nitrógeno impide su transformación en productos más nobles y desaconseja su almacenamiento y transporte por su baja densidad energética.

La experiencia que existe en el campo de la gasificación con aire es muy amplia. Independientemente de los gasógenos para automóviles desarrollados en los años veinte, funcionan en el mundo numerosos gasógenos industriales, intentándose actualmente mejorar su rendimiento, facilitar su operación y adaptar los diseños a las diferentes fuentes de biomasa.

El **gas de síntesis**, cuyo nombre deriva de su importancia en la síntesis química, es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, con un contenido más o menos elevado de dióxido de carbono e hidrocarburos, que se produce cuando se opera en un gasificador con oxígeno y vapor de agua. Su poder calorífico oscila entre los 5,0 y las 10,9 MJ/m³, pero ésta no es su principal característica, ya que el valor de esta propiedad no es excesivamente alto en comparación con el de otros combustibles gaseosos convencionales (gas natural, propano, butano, etc.).

Lo realmente interesante de este gas es su posibilidad de transformarlo en combustibles líquidos (metanol y gasolinas), cuya demanda actual es muy superior a la de los combustibles gaseosos. Por este motivo se están haciendo grandes esfuerzos, tendentes a mejorar el proceso de gasificación con oxígeno, lo que ha llevado al diseño de poderosos gasificadores a presión de lecho fluidizado, de alto rendimiento y gran capacidad de tratamiento de cualquier tipo de biomasa, cuyo contenido en humedad no sea excesivamente elevado (< 50%).

Los procesos de obtención de metanol y gasolinas a partir del gas de síntesis pueden ser consultados en la bibliografía, ya que su consideración en este lugar excede de los objetivos del presente estudio general.

Pirólisis

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno. La propia concepción de la pirólisis implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, es lógico suponer que se lleve a cabo con el mismo material que se está tratando.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja y se suelen distinguir varias etapas a lo largo del proceso en función de la temperatura, se puede decir, de forma general, que la pirólisis comienza a los 275 °C y es prácticamente completa a los 450 °C, aunque pueda producirse la ruptura de algunas

moléculas de los productos formados (craqueo) a temperaturas superiores. La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor. Así, los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Gases compuestos por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos.
- Líquidos que contienen compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado.
- Residuos sólidos carbonosos que contienen carbones y alquitranes, así como cenizas.

Las materias primas que se investigan actualmente para desarrollar la pirólisis son, esencialmente, los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos. Precisamente, las mejores perspectivas de tratamiento de los residuos sólidos urbanos se encuentran en el campo de la pirólisis, de tal manera que la mayor parte de las investigaciones realizadas sobre este proceso se han hecho sobre la base de utilizar como material de alimentación estos residuos. Las directrices de tratamiento más generalizadas respecto a la obtención de productos se orientan en este caso hacia los líquidos y sólidos.

En el caso de la producción de combustibles líquidos y carbón se requiere una alimentación con humedad baja y constante, para lo cual se realiza una desecación previa, utilizando los gases de la propia pirólisis. en cuanto a rendimientos, se puede llegar a obtener por cada tonelada de biomasa seca, unos 225 kg de líquidos (con una capacidad calorífica de unos 25 MJ/kg) y unos 75 kg de coque (con un poder calorífico de unos 21 MJ/kg).

No obstante, con objeto de mejorar los rendimientos en combustibles líquidos en la actualidad están suscitando gran interés los procesos denominados de *licuefacción*, que son variantes de la pirólisis en el aspecto de que no utilizan comburente, pero son llevados a cabo con un gas reductor, que puede ser monóxido de carbono, hidrógeno o gas de síntesis, en presencia de catalizadores, a alta presión (de 100 a 300 atm) y temperaturas entre 300 y 500 °C. El combustible obtenido tiene un poder calorífico de unos 33,5 MJ/kg y equivale a una recuperación energética del 50 al 55%.

En definitiva, la pirólisis parece ser un buen método para la obtención de energía a partir de biomasa seca y, quizás, el mejor para convertir los residuos sólidos urbanos en compuestos de interés económico. Aunque aún queda un largo camino por recorrer en el esclarecimiento de los mecanismos físico-químicos del proceso, los aspectos puramente ingenieriles están muy avanzados y las investigaciones en marcha permiten contemplar la pirólisis como un procedimiento muy interesante para convertir la biomasa en energía útil.

Fermentación alcohólica

Las plantas almacenan la mayor parte de la energía solar que captan en forma de hidratos de carbono, compuestos que pueden presentarse de manera simple, en forma de azúcares, o en forma de polímeros: almidón o celulosa.

Cualquier producto que contenga azúcares fermentables o hidratos de carbono transformables en aquéllos (almidón o celulosa) puede servir para obtener alcohol. Ahora bien, dependiendo del tipo de biomasa de partida, es necesario analizar con detalle el rendimiento de este proceso para poder evaluar su viabilidad técnica y económica ya que, cuando la materia prima es rica en almidón o celulosa, es necesario someterla previamente a ciertos procesos para transformarla en compuestos fermentables.

El proceso global de obtención de etanol a partir de la biomasa se puede dividir en las siguientes etapas:

- Pretratamiento de la biomasa.
- Hidrólisis.
- Fermentación alcohólica.
- Separación y purificación del etanol.

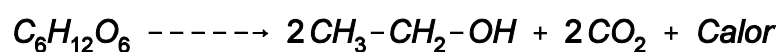
El **pretratamiento** tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta es poco asequible a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas es el mecánico, ya que su objetivo fundamental es reducir la biomasa a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores. En esta fase se emplea la trituración, molienda o pulverización.

La **hidrólisis**, o ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa, bien mediante fermentos o enzimas (hidrólisis enzimática), bien mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidas de microorganismos, dependiendo las condiciones óptimas del proceso de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos del pretratamiento efectuado y del sustrato empleado. La hidrólisis química no es específica y exige condiciones de proceso muy cuidadas, todo lo cual condiciona la economía del proceso.

Una vez que la biomasa conteniendo hidratos de carbono se ha transformado en una disolución azucarada, se puede someter ésta a un proceso de fermentación, con objeto de convertir los azúcares en etanol.

La **fermentación alcohólica** es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos, que se produce a través de una compleja secuencia de reacciones expresables, desde el punto de vista técnico, por la siguiente ecuación:



Según esta reacción, el rendimiento en etanol es del 51,1% en peso, pero en la práctica este valor es algo inferior, ya que alrededor de un 5% de la glucosa es utilizada por el microorganismo (la levadura *Saccharomyces cerevisiae*) para producir nuevas células y otros compuestos de su metabolismo. En la acción de las levaduras influye una gran cantidad de factores, entre los que destacan:

- Temperatura: la velocidad óptima de fermentación se obtiene operando a temperaturas entre 27 y 32 °C.
- Acidez: el pH de la disolución debe controlarse entre 4 y 5, ya que durante el proceso se forman ácidos.
- Concentración de azúcares: valores superiores al 22% en peso pueden inhibir el crecimiento celular en las fases iniciales.
- Concentración de etanol: valores superiores al 14% en peso destruyen las levaduras antes de que se complete la fermentación.

Tradicionalmente, la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de

duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación; actualmente se ha logrado disminuir este tiempo utilizando diversos procedimientos.

Ahora bien, en la masa de fermentación, el etanol sólo se encuentra en una concentración máxima comprendida entre el 8 y el 12% en peso, lo que obliga a una **separación y purificación del etanol**, si se quiere obtener éste libre de agua. Industrialmente se emplea para ello la rectificación (destilación con enriquecimiento del vapor), operación que se lleva a cabo normalmente en dos etapas, al final de las cuales se obtiene un alcohol del 96% en volumen de pureza, imposible de superar por destilación, ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este tipo de etanol es el que se comercializa normalmente.

Sin embargo, si se desea obtener etanol absoluto es necesario llevar a cabo una destilación adicional utilizando un tercer componente (benceno, éter, hexano, etc.) que forme a su vez un azeótropo con el agua y libere el etanol seco (con una pureza mínima del 99,5%). Obsérvese que, cualquiera que sea el agente empleado en esta destilación azeotrópica, ha de reciclarse posteriormente por razones económicas.

Hay que destacar que los procesos de destilación resultan ser los de mayor coste dentro del proceso global de obtención de alcohol, debido a su gran consumo de energía, por lo que la fase de separación y purificación del etanol es el punto débil de los balances económicos de la producción de etanol a partir de la biomasa

Por su parte, el **etanol** tiene numerosas aplicaciones industriales como disolvente y **como combustible**. Para analizar las propiedades del etanol como sustitutivo total o parcial de la gasolina es necesario conocer las propiedades de ambos productos y sus posibles interrelaciones en caso de mezcla:

- El **poder calorífico** del etanol es menor que el de la gasolina, por lo que la potencia desarrollada por aquél es menor para la misma relación de compresión. Asimismo, el bajo poder calorífico implica un mayor consumo, casi del 50%, de etanol.
- La **calidad antidetonante** (número de octano) del etanol es superior a la de la gasolina, lo que permite utilizarlo en motores con una relación de compresión mayor, con el consiguiente aumento de la capacidad de aceleración y de la velocidad punta.

- El **calor de vaporización** del etanol es muy superior al de la gasolina; ello supone dificultades en el arranque, pero a la vez favorece el rendimiento del motor.
- El etanol presenta un único **punto de ebullición**, mientras que la gasolina tiene un rango bastante amplio, lo que origina problemas en el arranque de un motor operando con etanol.
- La **miscibilidad** del etanol con el agua y la gasolina es total; sin embargo, si se emplea mezclado con gasolina, de rebasar la proporción de agua los límites de solubilidad en la gasolina, se puede producir la separación de dos fases, lo que causa problemas.

Los diversos estudios realizados hasta el momento respecto al uso del etanol como combustible teniendo en cuenta las propiedades expuestas muestran, en primer lugar, que el etanol y la gasolina no son combustibles intercambiables para un mismo vehículo. Las modificaciones fundamentales que hay que hacer en un motor de gasolina que ha de trabajar con etanol se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aumento de la relación de compresión.
- Recalibrado del carburador.
- Calentamiento del aire de entrada al carburador.
- Modificación del sistema de encendido.
- Uso de bujías especiales.

Realizados estos cambios se ha logrado un incremento de la potencia del 15%, una mayor eficacia térmica (30%), menos emisiones de monóxido de carbono, pero a costa de un mayor consumo (alrededor de un 20%).

Sin embargo, la adición de etanol anhidro (alrededor de un 10% en volumen) a la gasolina (mezcla conocida como *gasohol*), aumenta su capacidad antidetonante, lo que permite bien reducir la adición de compuestos de plomo (altamente contaminantes) a la gasolina, o bien evitar costosos tratamientos adicionales para mejorar la calidad de la gasolina y ahorrar asimismo el petróleo correspondiente al volumen de gasolina sustituido. Esta mezcla es utilizable en un motor convencional.

El hecho de que aún no exista una suficiente producción de etanol para sustituir a la gasolina, unido a la necesidad de un parque automovilístico preparado para funcionar con etanol, aconsejaría, de momento, el uso de gasohol con objeto de

ahorrar energía convencional mediante el uso de energía de la biomasa. Sin embargo, es evidente que el futuro en este campo es alentador, principalmente si se consigue mejorar los balances económicos de la producción de etanol a partir de la biomasa.

Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en rigurosas condiciones de ausencia de oxígeno (medio anaerobio), que da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como **biogás** y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (**lodo** o *fango*), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, fósforo y los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa.

En principio, puede servir como materia prima para la digestión anaerobia todo tipo de biomasa, especialmente la de alto contenido en humedad. Sin embargo, la viabilidad del tratamiento de cada tipo de materia orgánica depende de una serie de factores relacionados con su composición y su contenido en nutrientes, dado que se trata de un proceso microbiológico. Por ello, la biomasa más utilizada para someterla a digestión anaerobia es la de tipo residual, destacando, por su importancia en este campo, los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.

Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad, no es conveniente para su tratamiento utilizar procesos térmicos, por su bajísimo rendimiento en este caso. Sin embargo, la tecnología de la digestión anaerobia presenta grandes ventajas para su aplicación a este tipo de biomasa por varios motivos:

- Se trata de residuos localizados.
- Los residuos tienen gran cantidad de agua.
- Aportan un alto contenido en nutrientes para el crecimiento bacteriano.
- El efluente del proceso mejora notablemente la concentración de nutrientes respecto al residuo original, lo que supone una gran ventaja para su utilización posterior en la agricultura.

Este último punto permite recalcar que la obtención de energía por medio de la digestión anaerobia no supone la eliminación de los residuos ganaderos y la privación de emplearlos en el medio agrícola sino que, por el contrario, el residuo ganadero, una

vez digerido, se encuentra enriquecido en elementos fertilizantes. Por su parte, partir de la crisis energética son cada día más numerosas las plantas depuradoras que recuperan el biogás y lo utilizan como aporte energético (térmico y eléctrico) de la misma planta.

Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Esto es debido a que, por una parte, bajo el punto de vista químico, se desarrollan cientos de posibles reacciones, cada una de ellas catalizada por enzimas específicas para dar compuestos intermedios distintos. Por otro lado, en el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las relaciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales, se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas, se descompone en moléculas más pequeñas en tres etapas, para dar como productos finales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2):

- Durante la primera etapa, la **hidrólisis**, ciertos tipos de bacterias (aerobias, anaerobias o facultativas) producen la degradación de los polímeros orgánicos complejos constituyentes de la biomasa, dando lugar a moléculas más simples.
- Durante la segunda etapa, la **acidogénesis**, otro grupo de bacterias producen varios compuestos simples, entre los que destacan ácidos volátiles como el acético, así como hidrógeno y dióxido de carbono, que serán utilizados como alimento por las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa.
- La tercera etapa, la **metanogénesis**, implica la degradación de las sustancias producidas en etapas anteriores a metano y dióxido de carbono por parte de un grupo de bacterias estrictamente anaerobias, denominadas *metanogénicas*. La magnitud de su población condiciona fuertemente la producción de metano, ya que su velocidad de reproducción es muy baja y necesitan unas condiciones del medio muy propicias.

Las condiciones óptimas y los rangos de oscilación de las variables que afectan a la digestión anaerobia han sido estudiadas por muchos investigadores que, desgraciadamente, no se ponen de acuerdo en todos los puntos. Una razón para ello puede ser que sus estudios se han desarrollado utilizando diferentes materias primas

así como diversas metodologías y puntos de vista.

La naturaleza y composición del sustrato de partida dicta el régimen del proceso pero, aún así, existe un grupo de variables que influye ostensiblemente sobre el sistema, por lo que es necesaria su medida y control, con objeto de intentar que se produzca la digestión en las mejores condiciones posibles. Estas variables son las siguientes:

- Temperatura.
- Acidez.
- Contenido en sólidos.
- Nutrientes.
- Tóxicos.

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en un amplio rango de **temperaturas**, dentro del cual aparecen dos zonas claramente definidas y correspondientes a dos grupos diferentes de bacterias: las bacterias *mesofílicas*, que se desarrollan entre los 5 y los 40 °C, y las bacterias *termofílicas*, que lo hacen en un rango de 40 a 65 °C.

A pesar de que la producción de gas es máxima en el rango termofílico, estas condiciones generalmente no se aplican en la práctica, debido a que el mantenimiento del sistema a esas temperaturas consume más energía que la que puede proporcionar el gas producido. Además, las bacterias termofílicas son mucho más sensibles a las variaciones térmicas que las mesofílicas, lo que implicaría la necesidad de un mayor control del sistema, actividad bastante costosa.

En general, pues, se opera en el rango mesofílico, encontrándose un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C. Esta temperatura combina las mejores condiciones de crecimiento de las bacterias con la mayor velocidad de producción de metano.

El mantenimiento de una **acidez** adecuada en el transcurso de la digestión es uno de los principales problemas que tiene el proceso, ya que el valor del pH no sólo determina la producción total de biogás sino, lo que es más importante, su composición en metano. Se ha encontrado que el rango óptimo de pH es de 6,6 a 7,6; por debajo de 6,2 la actividad de las bacterias metanogénicas se ve inhibida y por debajo de 4,5 la inhibición afecta también a las acidogénicas. Efectos similares se detectan a valores del pH por encima de 8,5.

El **contenido en sólidos** es un factor que influye de manera considerable en el proceso anaerobio. Si la alimentación está muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir. Por el contrario, una alimentación muy concentrada, reduce la movilidad de las bacterias y, por tanto, la efectividad del proceso al dificultar el acceso de aquéllas a su fuente de alimentación.

Normalmente se efectúa la digestión anaerobia con contenidos en sólidos inferiores al 10%, lo que explica que la biomasa más adecuada para ser sometida a digestión anaerobia sea la de alto contenido en agua. En caso necesario se puede diluir la alimentación con agua hasta alcanzar los valores óptimos de concentración citados.

Para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, las células necesitan **nutrientes**. Los elementos que han de estar disponibles en el medio son carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales, ya que su ausencia o escasez pueden reducir la velocidad del proceso de digestión anaerobia.

Respecto a los **tóxicos**, dado que la digestión anaerobia tiene etapas desarrolladas por microorganismos estrictamente anaerobios, la primera sustancia a citar es el oxígeno. Concentraciones elevadas de amoníaco, producidas por un exceso de nitrógeno en la biomasa también inhiben la digestión. Por su parte, tanto el exceso de sales minerales como el de diversas sustancias orgánicas (pesticidas y detergentes) pueden inhibir el proceso.

El proceso de digestión se lleva a cabo en los llamados **digestores**, que son recipientes estancos que deben permitir la carga y descarga de materiales y poseer un dispositivo para recoger el gas producido.

Potencialmente, los sistemas de digestión anaerobia tienen varias misiones; por ejemplo, pueden ser necesarios para producir o ahorrar energía, reducir la carga orgánica de un residuo, eliminar microorganismos patógenos o aumentar el valor de un residuo como fertilizante. Para una aplicación determinada, puede ser de mayor importancia una de estas funciones, o varias a la vez.

Los factores principales a tener en cuenta en todo diseño de un digestor anaerobio son los siguientes:

- Respecto al tipo de materia a digerir:
 - Cantidad.

- Contenido en sólidos.
- Digestibilidad.
- Respecto al sistema de digestión:
 - Frecuencia de alimentación.
 - Sistemas auxiliares.
 - Medida y control.

Estos factores determinan las dos características principales del digester: su tamaño y su tipo.

El **tamaño** del digester viene determinado por tres variables interdependientes:

- Concentración de sólidos volátiles, es decir, contenido de material biodegradable en la alimentación.
- Velocidad de alimentación, es decir, cantidad de sólidos volátiles por unidad de volumen que se introduce en el digester en la unidad de tiempo.
- Tiempo de retención hidráulico, o tiempo medio que los sólidos alimentados permanecen en el digester.

Existen varios **tipos** básicos de diseño entre los que se puede elegir, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

El producto principal de la digestión anaerobia es el **biogás**, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (50 a 30%), con pequeñas proporciones de otros componentes (N_2 , O_2 , H_2 , SH_2), cuya composición depende tanto del sustrato como del proceso en sí. El rendimiento en biogás, es decir, el volumen producido por unidad de material potencialmente digerible, también es muy variable. En efecto, depende no sólo de la composición de la materia prima, sino de las condiciones del proceso: temperatura, velocidad de alimentación, tiempo de retención y tipo de digester. Generalmente la biomasa vegetal produce más gas que la animal; sin embargo, el contenido en metano del gas procedente de vegetales es menor, lo que reduce su poder energético. Los valores normales oscilan entre 250 y 300 l CH_4 /kg SV, siendo el poder calorífico medio del gas, conteniendo un 70% de metano, unos 25 MJ/m³.

Si bien es cierto que el biogás no destaca como un combustible de gran potencia, puede sustituir al gas ciudad con ventaja y después de su purificación puede utilizarse en calidad de gas natural o metano.

Las formas de utilización más normales para el biogás de digestión anaerobia son:

- Aplicación directa como fuente de calor (cocina, alumbrado).
- Combustión en calderas de vapor convencionales, aprovechando el calor para calentar el digestor y para calefacción en general.
- Utilización como combustible en motores de combustión interna acoplados a generadores de electricidad.

Por su parte, el **efluente** de la digestión es una suspensión negruzca, exenta de olores ofensivos, que sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro. Está compuesto por una serie de productos inorgánicos solubles e insolubles (principalmente sales), por diferentes materiales orgánicos no digeridos (proteínas, grasas, celulosa, lignina, etc.) y por las bacterias responsables del proceso.

La utilización del efluente puede hacerse de forma integral o después de una separación de las fases sólida y líquida. Por lo que respecta a la finalidad buscada, los campos de aplicación de este efluente son fundamentalmente dos: la fertilización de suelos y la alimentación animal. Sin embargo, en contraste con la tecnología ya madura del biogás, la utilización del efluente del proceso todavía parece encontrarse en fase de tanteo.

LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Índice

LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	1
EL FENÓMENO GEOTÉRMICO	2
Manifestaciones superficiales	3
DESARROLLO GEOTÉRMICO MUNDIAL	5
EL SISTEMA GEOTÉRMICO	7
Sistemas hidrotérmicos	7
Sistemas geopresurizados	10
Sistemas de roca seca caliente	10
EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS	11
Utilización de yacimientos de alta entalpía	12
Utilización de yacimientos de baja entalpía	16
FACTORES AMBIENTALES	17

EL FENÓMENO GEOTÉRMICO

En un sentido amplio, se entiende como *geotermia* todo fenómeno que se refiera al calor almacenado en el interior de la Tierra, llamándose *energía geotérmica* a la energía derivada de este calor, el cual se produce, principalmente, por la desintegración espontánea, natural y continua de los isótopos radiactivos que existen en muy pequeña proporción en todas las rocas naturales (principalmente uranio, potasio y torio). Normalmente, el calor se transmite por conducción a través de los materiales que forman el subsuelo, llegando hasta la superficie, donde se libera, pero la baja conductividad térmica de estos materiales hace que gran parte de esta energía se almacene en el interior de la Tierra durante largo tiempo.

Estos dos factores, generación constante de calor y baja conductividad, hacen que las temperaturas del interior del planeta sean progresivamente más elevadas, es decir, existe un *gradiente geotérmico* o variación de la temperatura, T , con la profundidad, z . En la corteza terrestre, normalmente la temperatura aumenta de forma regular 1 °C cada 33 m, a medida que se profundiza desde la superficie. Este valor representa el llamado **gradiente geotérmico normal**:

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = -\frac{1}{33} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \right)$$

De lo dicho hasta ahora se deduce que, al existir un gradiente de temperaturas, necesariamente se producirá un flujo de calor, lo que da lugar a un **flujo geotérmico**, Φ , definido por la ley de Fourier de la conducción:

$$\phi = -k \frac{\Delta T}{\Delta z}$$

siendo k la conductividad térmica del material (W/m.°C).

Para un gradiente geotérmico normal (30 °C/km) y un valor medio de la conductividad de 2 W/m.°C (valor normal para las rocas que componen la corteza terrestre) se obtiene un flujo geotérmico de unos 60 mW/m², correspondiente a la media mundial de las tierras emergidas.

Obsérvese que si se compara este valor con el del máximo flujo de energía solar

(1 kW/m²), se comprueba que la densidad del flujo geotérmico es muy baja, lo que condicionará fuertemente la utilización de esta fuente de energía. No obstante, existen en el interior de la Tierra zonas en las que el flujo geotérmico es más elevado de lo normal, dado que al producirse la fusión parcial de los materiales profundos, éstos, en determinadas condiciones dinámicas, pueden ascender hasta cerca de la superficie como rocas total o parcialmente fundidas. Pueden así situarse masas a veces de gran volumen y a muy altas temperaturas (entre 700 y 1.000 °C) en sectores de la corteza que, en condiciones normales, estarían a temperaturas inferiores en varios centenares de grados, obteniéndose gradientes geotérmicos más de diez veces superiores al normal, lo que significa unos 100 ó 200 °C/km.

En estos lugares, lógicamente será más fácil extraer el calor de la Tierra, por lo que los recursos geotérmicos mundiales (estimados en unos 30 millones de TW) sólo son aprovechables en una pequeña parte, pero lo suficientemente grande como para poder hablar de una fuente energética renovable de gran magnitud, ya que si los volúmenes de masas ígneas son suficientemente grandes, su calor puede tardar millones de años en disiparse, debido a la baja conductividad de las rocas.

Manifestaciones superficiales

Las alteraciones geotérmicas más interesantes están localizadas en sectores de actividad ígnea (volcánica) actual o reciente, considerando *recientes* aquellos sectores donde hay datos para suponer que la actividad ha tenido lugar hace pocos millones de años. Existen varios tipos de manifestaciones superficiales que indican la posible existencia de una anomalía geotérmica en la zona donde se presenta. Estas manifestaciones pueden agruparse de la siguiente manera:

- Volcanismo reciente.
- Zonas de alteración hidrotermal.
- Emanaciones gaseosas.
- Fuentes termales y minerales.
- Anomalías térmicas.

Ahora bien, las manifestaciones superficiales no representan un signo definitivo de la existencia de un gradiente geotérmico aprovechable; del mismo modo, la ausencia de las mismas tampoco permite desechar unas zonas determinadas como

posibles campos geotérmicos. La falta de métodos y técnicas precisas para la exploración geotérmica hace que la identificación de las anomalías superficiales sea el punto de partida de una prospección.

Son muy numerosas las zonas de alto gradiente geotérmico asociadas a un **volcanismo reciente**, por lo que es de gran interés realizar un estudio geológico y volcanológico detallado de la región, que incluya datos técnicos, hidrogeológicos, petrográficos y geoquímicos que, una vez interpretados, serán muy útiles para la localización del foco calorífico.

En las áreas geotérmicas suelen encontrarse casi siempre **alteraciones hidrotermales** de las rocas, originadas por líquidos o gases que han circulado a través de los poros y fracturas de mayor o menor importancia. Esta alteración se manifiesta al producirse un cambio químico y mineralógico en las rocas por las que han circulado estos fluidos. La identificación y delimitación de las distintas zonas de la alteración pueden ayudar a establecer las condiciones físicas y químicas de formación de las rocas, lo que proporciona una valiosa ayuda en la investigación de un campo geotérmico.

Las **emanaciones de gases y de vapor** pueden tener un significado muy limitado. Se pueden originar sustancias volátiles simplemente por calentamiento de las rocas. Otras veces las emanaciones son volcánicas, ya sea relacionadas con un volcanismo activo o con uno residual.

Las **fuentes termales y minerales** están muy extendidas en las áreas geotérmicas. En general, las áreas hidrotermales son muy características de las regiones volcánicas recientes, pero no sólo se encuentran relacionadas a ellas, ya que también existen en regiones ocupadas por otro tipo de rocas.

Hay que destacar las sales que precipitan en las fuentes termales, que pueden ser muy distintas desde el punto de vista químico, y el que precipiten una u otra supone un mecanismo de formación y sedimentación diferente. Por consiguiente, la composición de las aguas termales juega un papel muy importante en la exploración geotérmica, ya que puede servir para calcular la temperatura en profundidad. Asimismo pueden producirse depósitos de sales lo suficientemente grandes, incluso, como para proceder a su explotación.

Lo más frecuente es que, en presencia de un foco calorífico en profundidad, se

produzca una **anomalía térmica** en superficie, que se pondrá de manifiesto por la existencia de un gradiente geotérmico anómalo, superior al normal, en la zona. Es, por tanto, de gran interés, proceder a la localización y delimitación precisa de estas anomalías, para lo cual se emplea una prospección termométrica detallada.

En definitiva, la falta de otros medios más precisos para las investigaciones previas de localización de zonas geotérmicas aprovechables ha hecho que, hasta ahora, las exploraciones se hayan centrado principalmente en áreas con manifestaciones superficiales, entendiéndose que la mayor o menor importancia de éstas no puede servir para evaluar la de un futuro campo y que cualquier manifestación, hasta la más pequeña, puede ser motivo para comenzar una exploración.

DESARROLLO GEOTÉRMICO MUNDIAL

Desde tiempos inmemoriales, las aguas termales han sido utilizadas en diversas tareas domésticas (baño, limpieza, cocina, etc.), pero sólo desde comienzos del siglo XX el vapor natural y el agua caliente geotérmicos han sido destinados a otros usos, más sofisticados.

Durante el siglo XIX ya se extraían productos químicos (en especial, ácido bórico) a partir de las emanaciones gaseosas en Larderello (Italia), hasta que en 1904 se realizó el primer intento para utilizar el vapor geotérmico en la generación de electricidad.

La corrosión que los gases ácidos ejercían sobre las partes metálicas de las turbinas obligó a utilizar circuitos secundarios, lo que producía grandes pérdidas de calor, pero el desarrollo posterior de aleaciones metálicas resistentes a la corrosión, permitió el uso directo del vapor geotérmico.

Las instalaciones actuales de Larderello son capaces de producir 3.000 TW.h/año de electricidad y al mismo tiempo, los gases son la base de una importante industria química de extracción de ácido bórico, dióxido de carbono, amoníaco y helio.

En Islandia se utilizó por primera vez agua caliente de origen geotérmico en 1925 para calentar viviendas e invernaderos, y tres años después comenzaron las perforaciones de pozos de agua caliente. La utilización de vapor geotérmico de alta presión en la generación de electricidad comenzó en 1964, con la instalación en Hvergerdi de una central geotérmica de 15 MW.

En la actualidad, Islandia es el país con mayor aprovechamiento de calefacción geotérmica del mundo, extendiéndose su uso tanto en el ámbito doméstico como en el agrícola e industrial, al 80% de la población.

En California, EE.UU., se perforaron pozos para la obtención de vapor geotérmico desde 1921, pero el proyecto fue temporalmente abandonado. Se recuperó en 1955 y tan sólo cinco años después estaba en operación una planta generadora de electricidad de 12,5 MW. En la actualidad existe una capacidad instalada en esta zona de más de 1.200 MW.

En muchos otros países se han desarrollado explotaciones geotérmicas, ya sea de uso exclusivamente térmico, o bien para la generación de electricidad. Así, en Nueva Zelanda se producen más de 300 MWe, en México, alrededor de 200 y en El Salvador, más de 300, con la característica especial de que este país resulta ser el mayor productor relativo, ya que cerca del 40% de su consumo eléctrico total es de origen geotérmico.

Puede afirmarse que el interés mundial por la energía geotérmica partió de las recomendaciones de la *Conferencia de Nuevas Fuentes de Energía*, patrocinada por la O.N.U. en 1961 y celebrada en Roma. En la actualidad existen en funcionamiento diversas plantas de producción de electricidad geotérmica, con una potencia total instalada de unos 6.000 MW, estimándose que los usos térmicos de esta fuente de energía son unas 5 veces superiores.

Obsérvese que, en general, los aprovechamientos geotérmicos suelen localizarse en los cinturones sísmicos y áreas de volcanismo reciente. Se comprende así que los países con mayor producción actual de energía geotérmica sean Italia, Nueva Zelanda, EE.UU., URSS y Japón, y que se hagan estudios de explotación en Centro y Sudamérica, Sureste de Africa y Extremo Oriente, afrontándose bajo diferentes puntos de vista, partiendo de las realidades y previsiones energéticas de cada país. Esto se debe a que, según sean las circunstancias, este recurso puede ser desde prohibitivo hasta cubrir totalmente las necesidades energéticas, pasando por el caso más general de que sea un componente más en el abastecimiento energético, sujeto a las vicisitudes de oferta y demanda.

EL SISTEMA GEOTÉRMICO

La presencia de extensas zonas a elevada temperatura localizadas a profundidades asequibles es la primera condición para poder utilizar la energía geotérmica, pero no es la única. Debido a la baja conductividad térmica de las rocas naturales, éstas se enfrían con la misma lentitud con la que fueron calentadas y, por tanto, la extracción directa del calor contenido en ellas sólo es posible si se dan ciertas condiciones adicionales. La extracción del calor de forma natural sólo es posible cuando cerca de la zona de anomalía geotérmica existen formaciones geológicas porosas o fisurales capaces de retener agua que, en general, procede de una infiltración superficial.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se puede definir un **yacimiento geotérmico** como un volumen de roca con temperatura anormalmente elevada para la profundidad a la que se encuentra, susceptible de ser recorrida por una corriente de agua, que pueda absorber calor y transportarlo a la superficie. Obsérvese, no obstante, que esta definición no implica, necesariamente, que el agua se encuentre en el yacimiento a priori.

Así pues, según las condiciones en que el calor se transporta hacia la superficie y según las características geológicas de los yacimientos, éstos se suelen dividir en tres categorías básicas:

- Sistemas hidrotérmicos.
- Sistemas geopresurizados.
- Sistemas de roca seca caliente.

La más importante de ellas es la primera, que constituye la única forma de la energía geotérmica que ha sido comercialmente desarrollada hasta la fecha. Ni los sistemas geopresurizados ni los de roca seca caliente parecen tener posibilidades de explotación comercial a una escala significativa por el momento. Sin embargo, a continuación se revisarán las características fundamentales de cada uno de estos tipos básicos de yacimientos geotérmicos.

Sistemas hidrotérmicos

Un sistema hidrotérmico está formado por una fuente de calor situada a una profundidad relativamente pequeña (de 1 a 10 km), que garantiza un elevado flujo

térmico por un largo período de tiempo. Por encima de esta fuente de calor se halla situado un estrato profundo de roca permeable conteniendo agua (acuífero), que permita la circulación de la misma cerca de la roca basal a alta temperatura. Por encima del acuífero se encuentra una capa de roca impermeable que impide las pérdidas de fluido por la parte superior y generalmente se encuentra presente una falla que restringe las pérdidas laterales del fluido geotérmico.

El fluido normalmente se origina en la superficie a partir de precipitaciones de lluvia o nieve (origen meteórico), se filtra a través del suelo poroso y llega a los estratos permeables a través de diferentes fallas.

Si la formación permeable está aislada de la superficie por otras formaciones impermeables, el agua adquirirá la temperatura del sistema y se encontrará en estado líquido, en forma de vapor o como mezcla de líquido y vapor en equilibrio, según las condiciones de presión y temperatura del yacimiento.

Se distinguen así dos grandes grupos de sistemas hidrotérmicos, según se clasifiquen por las fases presentes en el yacimiento o por la temperatura de las mismas:

- Según las fases presentes:
 - Sistemas con predominio de vapor.
 - Sistemas con predominio de agua.
- Según la temperatura del yacimiento:
 - Sistemas de alta entalpía (o alta temperatura).
 - Sistemas de baja entalpía (o baja temperatura).

Evidentemente, los sistemas hidrotérmicos en los que predomina la fase vapor han de ser necesariamente de alta entalpía, mientras que los yacimientos en los que predomina el agua pueden ser tanto de alta como de baja entalpía.

En un sistema hidrotérmico con **predominio de vapor**, la ebullición del agua subterránea produce vapor, que a veces está sobrecalentado, con un contenido entálpico de unas 600 kcal/kg. Se cree que al desplazarse el vapor hacia la superficie, los niveles de rocas más superficiales y, por tanto, más frías, inducen a una condensación, fenómeno que, junto con las infiltraciones meteóricas recarga el yacimiento. Como en el seno del fluido se produce un fenómeno constante de convección, la temperatura del yacimiento es relativamente uniforme, por lo que un

pozo perforado en una zona de este tipo permitirá obtener un vapor sobrecalentado seco de alta calidad.

Los yacimientos hidrotérmicos con **predominio de agua** (agua caliente o vapor húmedo) son mucho más frecuentes que los de vapor seco. Los sistemas de agua caliente generalmente están asociados a una fuente termal que descarga en la superficie. Cuando se forman yacimientos de vapor húmedo a grandes profundidades, su temperatura es generalmente muy superior al punto de ebullición normal del agua a presión atmosférica. Estas temperaturas oscilan entre los 40 y los 400 °C a presiones comprendidas entre 3 y 10 kg/cm² y con entalpías entre 200 y 400 kcal/kg. Cuando el fluido llega a la superficie, bien de forma natural (anomalías geológicas) o bien de forma artificial (perforación de pozos), frecuentemente el agua se expande súbitamente a vapor.

Los sistemas con predominio de agua contienen muy frecuentemente una gran cantidad de impurezas, ya que el agua caliente es un excelente disolvente de muchas sales. Así, las sales que se presentan con mayor asiduidad en el fluido geotérmico procedente de estos sistemas son los cloruros, sulfatos, bicarbonatos y silicatos de sodio, potasio y litio. Su concentración puede variar desde uno hasta varios cientos de gramos por litro.

Ahora bien, además de los yacimientos de agua de alta entalpía, situados a lo largo de las fallas corticales, se pueden encontrar asimismo yacimientos de baja entalpía, situados generalmente en cuencas sedimentarias, en las que el gradiente geotérmico es de alrededor de 30 °C/km, de manera que la temperatura del yacimiento oscila entre 60 y 150 °C. Evidentemente, el agua saldrá a la superficie por debajo del punto de ebullición, con lo que sólo será aprovechable como agua caliente.

Obsérvese que los yacimientos de vapor seco son fácilmente explotables, y su principal aplicación es la producción de electricidad en turbinas de vapor, obteniéndose en estos casos agua caliente como subproducto. Los sistemas de agua caliente, tanto de alta como de baja entalpía, pueden presentar serias dificultades de uso, si el contenido en sales es elevado o sus propiedades resultan corrosivas. Aunque a partir de ellos se pueden obtener también las sales como subproductos, el equipo instalado para el aprovechamiento de la fuente geotérmica puede ser muy caro debido a que es necesario prevenir la corrosión, por lo que este tipo de yacimientos puede no ser

rentable en ciertas condiciones.

Sistemas geopresurizados

Existen cuencas sedimentarias, geológicamente jóvenes, en donde el fluido localizado en la formación rocosa subterránea soporta una parte de la carga de las rocas superiores, por lo cual la presión en el yacimiento es considerablemente alta. Los sistemas de este tipo se denominan geopresurizados y se piensa que pueden ser fuentes de energía muy prometedoras en las próximas décadas.

En numerosas ocasiones el agua de estas formaciones está contenida en lechos aislantes de arcilla, por lo que el flujo geotérmico normal puede aumentar su temperatura hasta casi 300 °C. El agua de estos sistemas es generalmente de una salinidad inferior que la de las formaciones normales y, en muchos casos, está saturada con grandes cantidades de gas natural. Por ello, en la formaciones geopresurizadas hay energía acumulada en tres formas:

- Presión hidráulica.
- Agua caliente.
- Metano.

Parece, pues, que el motivo inicial para el desarrollo de los yacimientos geopresurizados será la recuperación del metano. por ello, un parámetro crítico que puede afectar el potencial comercial de estos sistemas es la solubilidad del metano, que depende de la presión del yacimiento, de la temperatura y de la salinidad del agua.

A pesar de ello, de momento estos sistemas están aún lejos de poder ser sometidos a una explotación comercial rentable.

Sistemas de roca seca caliente

En algunas zonas, las anomalías geológicas tales como el movimiento de placas tectónicas y algún tipo de actividad volcánica han creado bolsas de rocas impermeables que recubren una cámara magmática. La temperatura en estas bolsas aumenta con la profundidad y con la proximidad a la cámara magmática, pero debido a su naturaleza impermeable, estas bolsas carecen de acuífero, por lo que se conocen generalmente como sistemas geotérmicos de roca seca caliente.

Las técnicas para la extracción del calor de estos sistemas están actualmente

en estado de investigación. El concepto básico es muy simple: se perfora un pozo lo suficientemente profundo como para alcanzar una zona de temperatura suficientemente alta, se crean grandes superficies de transmisión de calor fracturando la roca (hidráulicamente, con explosiones o por tensión térmica) y se intercepta la zona fracturada con otro pozo. Haciendo circular agua de un pozo a otro a través de la región fracturada, se puede extraer el calor de la roca.

Aunque el concepto sea muy simple, todavía se han de resolver muchas cuestiones antes de considerar un proyecto de este tipo como económicamente rentable. Sin embargo, se han hecho progresos importantes en el conocimiento de las características de los yacimientos, fundamentalmente desde el punto de vista de la iniciación y propagación de las fracturas, velocidad de pérdida de agua y fenómenos de mezcla. Sin embargo, hasta que la tecnología de la extracción del calor de estos sistemas esté convenientemente desarrollada y su aplicabilidad económica esté demostrada a gran escala, los primeros usos de sistemas de roca seca caliente han de restringirse a regiones con gradientes geotérmicos superiores a los 50 °C/km.

EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

Antes de proceder a la explotación de un yacimiento geotérmico es preciso conocer una serie de variables y condiciones, las cuales permitirán asegurar si dicha explotación es técnica y económicamente posible. Así, es necesario conocer:

- Profundidad y espesor del acuífero.
- Calidad, caudal y temperatura del fluido.
- Permeabilidad y porosidad de las rocas.
- Conductividad térmica y capacidad calorífica, tanto del acuífero como de las rocas circundantes.

Conocidas estas premisas, la explotación se realiza mediante sondeos, de manera análoga a como se hace en la industria del petróleo. Para la utilización racional del yacimiento, es necesario que el fluido suministre una potencia constante, lo que implica un caudal constante a temperatura constante.

Sin embargo, el caudal no puede ser mantenido constante durante mucho tiempo, debido a la descompresión que se produce en el yacimiento; ésto hace que no se pueda recuperar más del 2% del calor contenido en el mismo. Como en geotermia

se busca el aprovechamiento del calor y no del agua, es práctica habitual el reinyectar el fluido extraído después de enfriado (realimentación), con lo que se consigue mantener la presión del yacimiento. Ello hace necesario prever la evolución de las temperaturas a fin de optimizar la tasa de recuperación de energía en el yacimiento.

Asimismo, la calidad del fluido geotérmico suele plantear problemas de corrosión en las instalaciones, debido principalmente a la agresividad de las aguas y a la presencia de gases disueltos. Normalmente se suele evitar la corrosión de varias formas: utilizando intercambiadores de calor especiales, inyectando en el fluido geotérmico un inhibidor de corrosión o usando materiales no atacables.

También hay que tener en cuenta los factores económicos, puesto que en este tipo de explotación es precisa una inversión inicial muy elevada.

La energía geotérmica puede ser utilizada en dos campos, definidos por la temperatura que alcanza el fluido geotérmico: aprovechamiento de yacimientos de baja entalpía (aplicaciones de baja temperatura) y aprovechamiento de yacimientos de alta entalpía (aplicaciones de alta temperatura). El límite práctico entre ambos no está claramente fijado, pero se puede situar entre 130 y 150 °C.

Actualmente, la localización de yacimientos de alta entalpía y su explotación, constituiría una ayuda apreciable para el autoabastecimiento energético de una zona. Sin embargo, los recursos geotérmicos de alta entalpía son muy escasos comparados con los de baja entalpía, e incluso estos últimos son claramente insuficientes para pensar que la participación geotérmica en el contexto energético permita la sustitución de las fuentes energéticas tradicionales, pero sí puede ser importante para paliar las necesidades de energía de una región determinada.

Utilización de yacimientos de alta entalpía

Los campos geotérmicos de alta entalpía, ya sean de predominio de vapor o de predominio de agua se utilizan en la producción de electricidad de forma muy competitiva, con niveles mínimos de potencia de 1 a 2 MW, ya que el coste de la electricidad producida por fuentes geotérmicas oscila entre el 50 y el 65% del coste de la electricidad producida en una central térmica convencional.

Ahora bien, al poseer la fuente geotérmica un nivel entálpico mucho menor que el de los combustibles convencionales, el rendimiento de conversión es muy pobre.

Así, independientemente del sistema de conversión, el trabajo disponible y la eficacia del proceso aumentan con la temperatura del fluido geotérmico; sin embargo, los máximos alcanzables son muy limitados, no llegando a sobrepasar nunca el 50% de rendimiento termodinámico, en las condiciones más favorables (temperatura del fluido, 300 °C, enfriado hasta una temperatura ambiente de 20 °C), encontrándose los rendimientos reales del proceso alrededor del 30%.

El diseño de las centrales geotérmicas de producción de electricidad depende, pues, de las siguientes variables:

- Caudal del pozo.
- Temperatura del yacimiento.
- Composición del fluido (líquido - vapor).
- Temperatura del agua de refrigeración.
- Contenido en materias extrañas (gases incondensables, sales en disolución).

Las tres primeras variables determinan de forma fundamental la potencia eléctrica obtenible de un pozo; la temperatura de refrigeración generalmente no plantea problemas.

El contenido en materias extrañas afectará al diseño mecánico, pudiendo exigir un amplio sistema de extracción de gases y el uso de materiales resistentes a la corrosión.

En función de las características del fluido geotérmico se han desarrollado varias opciones básicas referentes a la conversión de la energía geotérmica en electricidad, opciones que se desarrollan de forma simplificada a continuación.

Cuando la fuente geotérmica está formada por vapor seco (sobrecalentado), se utiliza el proceso de **conversión directa** para generar electricidad. El vapor a presión procedente del pozo geotérmico se conduce a la planta generadora, donde se expande a través de una turbina acoplada a un generador, que produce corriente eléctrica. Esta conducción se hace de forma directa, salvo el paso de separación de sólidos y el de separación de posibles gases incondensables (CO_2 , SH_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , H_2 y NH_3). Los vapores de escape de la turbina se llevan a un condensador, donde pasan a fase líquida, reinyectándose ésta generalmente en el mismo acuífero. La torre de enfriamiento disipa el calor residual a la atmósfera para poder reutilizar el fluido de refrigeración.

Este proceso es el más eficiente de todos los que convierten la energía geotérmica en electricidad, pero sólo es utilizable en campos geotérmicos de vapor seco, hasta ahora sólo encontrados en Larderello (Italia), The Geysers (EE.UU.) y Matsukawa (Japón).

Ahora bien, la mayoría de las fuentes geotérmicas no producen vapor seco, sino una mezcla líquido-vapor, con predominio de la fase líquida. La mayoría de las plantas que actualmente operan en estos yacimientos utilizan el proceso de **expansión súbita** (evaporación *flash*). Sistemas de este tipo están actualmente en operación en Nueva Zelanda, Japón, Islandia y México.

Además de la turbina, el condensador y la torre de refrigeración, también utilizados en el proceso directo, una planta de este tipo utiliza un evaporador *flash* o recipiente de expansión, donde se deja expandir bruscamente el fluido geotérmico, con lo que una parte del mismo se vaporiza de forma instantánea. El vapor se lleva a la turbina, mientras que el líquido no evaporado se reinyecta en el acuífero. El resto del proceso es similar al de conversión directa.

Este sistema es interesante a pesar de las considerables pérdidas de calor a través de la fase líquida desechada, porque emplea turbinas de vapor simples y de costes relativamente bajos. Sin embargo, a menudo se utiliza el sistema en dos etapas para mejorar el rendimiento térmico del proceso, recuperando el calor residual a través de la segunda etapa. Aunque el diseño multietapa aumenta significativamente la complejidad de la planta y, por tanto, la inversión inicial, se prefiere frente al de una sola etapa, debido al ahorro que produce en ciertos costes de explotación.

En este proceso, el líquido que abandona el primer recipiente de expansión entra en una segunda unidad de este tipo, que opera a una presión inferior, provocando una nueva evaporación súbita. El vapor de baja presión producido se lleva a la sección de baja presión de la turbina, donde se recupera la energía que se habría perdido si se hubiese utilizado un sistema de una sola etapa.

Aunque el sistema de dos etapas aumenta el rendimiento del de etapa única en más de un 35%, la utilización de tres etapas sólo incrementa el rendimiento del proceso de dos etapas en algo más de un 5%, por lo que no ha resultado rentable su utilización.

Un sistema alternativo al de evaporación súbita para yacimientos geotérmicos

donde predomina la fase líquida es el proceso de **ciclo binario**. Este proceso utiliza un fluido secundario (generalmente un hidrocarburo o un hidrocarburo fluorado) como fluido de trabajo en un ciclo de Rankine (compresión-expansión), usándose el fluido geotérmico para calentarlo. Las plantas de ciclo binario no están tan bien desarrolladas y probadas comercialmente como las de evaporación súbita, pero se tiene cierta experiencia de funcionamiento en plantas piloto.

El fluido geotérmico se conduce desde el pozo hasta un cambiador de calor, donde transmite su calor sensible al fluido secundario; el líquido geotérmico enfriado se reinyecta al acuífero. El fluido secundario se vaporiza en dicho cambiador y se expande a través de una turbina acoplada al generador eléctrico. Los gases de escape de la turbina son condensados, comprimidos y devueltos al primer cambiador de calor para completar el ciclo. Un sistema de refrigeración de agua elimina el calor residual a la atmósfera a través de una torre de enfriamiento.

El proceso de ciclo binario puede ser una alternativa atractiva al proceso de expansión súbita para yacimientos geotérmicos que suministran agua conteniendo gran cantidad de sales. Como el fluido geotérmico no pasa a través de la turbina, se reducen extensamente los problemas de precipitación de sales, incrustaciones, corrosión y desgaste. Los ciclos binarios ofrecen la ventaja adicional de que el fluido de trabajo puede ser elegido de tal forma, que sus características termodinámicas sean superiores a las del propio vapor de agua, proporcionando un proceso global más efectivo.

Sin embargo, el proceso de ciclo binario no carece de desventajas, ya que los fluidos secundarios son muy caros, y pueden ser inflamables o tóxicos. Debido a la existencia de dos circuitos independientes de circulación, también aumenta la complejidad y el coste de la planta.

Aunque su tecnología está aún en desarrollo y no se está utilizando a nivel comercial, los procesos de **flujo total** emplean ambas fases (líquida y vapor) del fluido geotérmico para producir electricidad mediante válvulas de expansión y turbinas especialmente diseñadas para este fin. Aunque los problemas de incrustaciones y de gases incondensables aparecen también en este tipo de proceso, su rendimiento teórico es bastante superior a los de los dos sistemas anteriormente descritos.

Utilización de yacimientos de baja entalpía

Aunque en un principio las investigaciones geotérmicas estaban dirigidas preferentemente a la localización de yacimientos de alta entalpía, la mayor abundancia de yacimientos de baja entalpía, así como su distribución superficial más regular, han obligado a reconsiderar esta postura y a desarrollar nuevos procesos que permitan el aprovechamiento de estos yacimientos (de agua caliente), cuya temperatura no suele ser superior a los 100 °C.

De forma general, son tres los campos en que la geotermia de baja entalpía puede encontrar aplicación:

- Calefacción urbana.
- Calefacción industrial.
- Calefacción agrícola.

En cada uno de ellos se ha desarrollado gran número de procesos, de manera que la lista de sus posibles aplicaciones es muy extensa. Sin embargo, la utilización de la energía geotérmica en estos campos debería ir precedida de un estudio de viabilidad económica, que compare la solución geotérmica con el empleo de la solución convencional más barata.

Una instalación geotérmica de baja entalpía consta básicamente de los siguientes componentes:

- Dos pozos, uno de producción y otro de inyección.
- Dos bombas, una de extracción del fluido caliente y otra de reinyección de los efluentes fríos.
- Un intercambiador de calor al pie del pozo de producción.
- Una conducción conectada al intercambiador para la transmisión del agua calentada por el fluido geotérmico hasta el consumidor.

Los principales obstáculos que se oponen a la geotermia de baja entalpía son básicamente tres:

- Grandes inversiones iniciales.
- Bajo rendimiento.
- Imposibilidad de transporte.

El tercero de ellos, quizá el más importante, obliga a que, tanto los núcleos urbanos como las zonas industriales o agrícolas que puedan ser suministradas por esta

forma de energía deban estar ubicadas en las inmediaciones del campo geotérmico en explotación, lo cual en la mayoría de los casos no es posible y, por tanto, esta energía no puede ser siempre aprovechada.

FACTORES AMBIENTALES

La creencia generalizada de que los yacimientos geotérmicos representan una fuente energética no contaminante ha jugado un papel importante respecto al interés por el desarrollo de esta fuente de energía. En efecto, aunque el conocimiento del impacto ambiental que estas explotaciones pueden ocasionar todavía es incompleto, parece ser que las fuentes geotérmicas ofrecen ventajas ambientales significativas sobre otras fuentes de energía. Sin embargo, se han planteado algunas dudas con relación al equilibrio del medio ambiente, que hasta el momento actual no tienen respuesta, dada la falta de experiencia a alto nivel al respecto. Entre los posibles factores adversos más significativos cabe enumerar:

- Utilización del terreno.
- Influencia sobre el suelo.
- Niveles de ruido.
- Contaminación del aire.
- Uso y contaminación de las aguas.
- Contaminación térmica y efectos climáticos.
- Alteración de ecosistemas.

La explotación de un campo geotérmico tiene un impacto significativo sobre la **utilización del terreno**, ya que requiere la instalación de una considerable infraestructura. La superficie total necesaria para el aprovechamiento de un yacimiento es función, básicamente, de la producción eléctrica de las plantas generadoras, del número y la densidad de los pozos de suministro y de la topografía del lugar.

El impacto ambiental resultante de estas necesidades será, pues, inherente al proceso de explotación, por lo que una buena planificación y administración de la explotación puede contribuir de forma significativa a prevenir los efectos adversos.

Las actividades relacionadas con la explotación de las fuentes geotérmicas pueden tener **influencia sobre el suelo**, tanto respecto a su estabilidad como a la influencia que se pueda ejercer sobre las formaciones geológicas profundas. Entre los

efectos adversos potenciales más significativos se encuentran la erosión, el hundimiento del terreno y la inducción de actividad sísmica. Aunque su incidencia no ha sido determinada de forma adecuada, se están realizando las investigaciones pertinentes en los tres aspectos citados para establecer las prevenciones adecuadas a estos posibles peligros.

Probablemente, el efecto más generalizado que puede producir una explotación geotérmica son los altos **niveles de ruido**, que se ocasionan tanto durante la perforación como en la operación de la planta. No obstante, el ruido no representa un problema mayor que otros de los mencionados, porque sus efectos están limitados a la zona más inmediata de la explotación. Además, cada vez son más utilizadas diversas técnicas de reducción de ruido, aplicadas a la industria convencional, que también serían utilizables en la explotación geotérmica.

En la producción de energía a partir de una fuente geotérmica se puede producir **contaminación del aire** de dos formas: por salida directa de vapor geotérmico a lo largo de todas las etapas de la explotación y por salida de gases incondensables durante la operación de la planta generadora de electricidad. Ello hace necesario el desarrollo no sólo de técnicas de control, sino de sistemas de eliminación. En este aspecto sería ideal el desarrollo de una tecnología económicamente factible para recuperar productos de desecho que puedan ser útiles. Para impulsar esta solución se debería conceder prioridad al desarrollo de proyectos geotérmicos híbridos, que combinen el aprovechamiento energético con la producción química.

La explotación geotérmica suscita tres cuestiones principales relacionadas con las **fuentes de agua**: contaminación del agua, efectos sobre la hidrología e impacto sobre las disponibilidades locales de agua.

La contaminación del agua puede producirse por la eliminación de los fluidos geotérmicos conteniendo sustancias nocivas. Por su parte, una extracción y eliminación a gran escala de los fluidos geotérmicos puede asimismo alterar tanto la hidrología superficial como la freática de la zona de explotación. Ambos inconvenientes se pueden paliar reinyectando el fluido geotérmico utilizado en el mismo acuífero, cuidando, sin embargo, evitar la fuga de aguas residuales hacia los posibles acuíferos circundantes, presentando este método la ventaja adicional de regenerar el yacimiento primitivo.

Por su parte, el consumo de agua de refrigeración de una instalación geotérmica hace que sea necesario un estudio preliminar del impacto que pueda tener la explotación energética sobre las disponibilidades locales de agua, para evitar cualquier tipo de perjuicio al respecto.

Asimismo, la explotación geotérmica puede provocar varios tipos de **efectos térmicos y climáticos**. Los más importantes son los causados por la emisión a la atmósfera de calor residual, vapor de agua y dióxido de carbono, procedentes de los pozos, conducciones de vapor y plantas de proceso, aunque por la experiencia de que se dispone, se ha considerado que estos efectos son relativamente insignificantes si se comparan con otros tipos de impacto ambiental.

Por otro lado, la utilización de fuentes geotérmicas puede causar inevitablemente alguna **alteración de los ecosistemas** biológicos naturales en las inmediaciones del lugar de emplazamiento. Un examen minucioso del medio ambiente antes de la explotación ha de ser completado con una observación adecuada para detectar posibles cambios durante el desarrollo de la instalación. La rápida identificación del impacto ambiental puede prevenir un daño ecológico, y la información reunida puede ser de gran valor para su uso en áreas de explotación posteriores, con objeto de proteger convenientemente los sistemas biológicos naturales.

En definitiva, resulta evidente que un abuso indiscriminado de esta energía (igual que todas las demás) podría afectar negativamente el actual equilibrio ecológico, lo cual, en las condiciones actuales y con horizontes a largo plazo no debe suponer un freno a la utilización de las fuentes energéticas de origen geotérmico como complementarias a las de masiva utilización actual.

LAS ENERGÍAS MARINAS

Índice

LAS ENERGÍAS MARINAS	1
FUENTES ENERGÉTICAS DE ORIGEN MARINO	2
LA ENERGÍA MAREMOTRIZ	3
Antecedentes históricos	4
Potencial energético de las mareas: centrales maremotrices	5
Sistemas generadores de energía: turbinas	7
Proyectos maremotrices	8
Posibilidades de la energía maremotriz	11
LA ENERGÍA MAREMOTÉRMICA	12
Emplazamiento de aprovechamientos maremotérmicos	13
Centrales maremotérmicas	14
Proyectos maremotérmicos	17
Futuro de la energía maremotérmica	19
LA ENERGÍA DE LAS OLAS	19
Antecedentes del aprovechamiento energético de las olas	21
Convertidores	22
Aspectos futuros de los convertidores de olas	26

FUENTES ENERGÉTICAS DE ORIGEN MARINO

Anualmente inciden sobre la superficie del planeta alrededor de 600 millones de TW.h en forma de energía solar. A pesar de que esta energía es intermitente y de baja densidad, comparada con los sistemas energéticos convencionales, las cifras involucradas respecto a los océanos (superficie: 361 millones de km²; volumen: 1.370 millones de km³) llevan a una acumulación energética en el mar bastante superior a las necesidades energéticas mundiales actuales.

Dado que los océanos actúan tanto como sistemas captadores como de acumuladores de energía, muestran, a su vez, varias facetas respecto al aprovechamiento de ésta, que van desde los gradientes térmicos y salinos hasta el movimiento del agua, a las cuales hay que añadir el fenómeno de las mareas, resultante de la combinación de la rotación de la Tierra y la atracción gravitacional que sobre ella ejercen el Sol y la Luna.

Tanto las interacciones entre el mar y la atmósfera como la circulación general del aire en ella, inducen vientos costeros y vientos en alta mar, que transportan enormes cantidades de energía, pudiendo ésta ser captada más fácil y eficazmente que en tierra firme, ya que las pérdidas por rozamiento sobre el mar son apreciablemente menores.

Algunas zonas marítimas parecen ser también privilegiadas para la producción de varias especies de biomasa por medio de la fotosíntesis, biomasa transformable en energía a través de los procesos ya ampliamente estudiados.

En resumen, los procesos naturales que permiten la conversión de la energía del mar en energía útil son los siguientes:

- Mareas: 3 millones de MW.
- Gradientes térmicos: 40.000 millones de MW.
- Olas: 2,5 millones de MW.
- Vientos oceánicos: 20 millones de MW.
- Bioconversión: 10 millones de MW.
- Corrientes marinas: 5 millones de MW.
- Gradientes salinos: 1.400 millones de MW.

Los valores indicados de disipación de potencia son los encontrados normalmente en la bibliografía, obtenidos de datos generalmente incompletos, por lo que es

necesario considerarlos con cautela. Asimismo, las fechas de viabilidad técnica de las tecnologías asociadas al aprovechamiento de las fuentes de energía citadas se extienden desde 1977 para la energía de las mareas, hasta el año 2000 para los gradientes salinos. Sin embargo, las fechas de viabilidad social, es decir, de aceptación política e industrial del concepto así como de un nivel de contribución significativo a las necesidades energéticas, se estiman comprendidas entre el año 1990 para la energía de las mareas y el 2050 para los gradientes salinos.

Se estudiarán a continuación las tres primeras fuentes indicadas en la relación anterior (mareas, gradientes térmicos y olas), por ser las que, hasta ahora, han recibido más consideración; la energía de los vientos y la de la biomasa ya se han tratado en los capítulos correspondientes. Por su parte, el futuro de las corrientes y los gradientes salinos como fuentes de energía parece incluso hoy día bastante lejano.

Como estos recursos energéticos no tienen aún una aplicación comercial digna de mención (salvo casos muy específicos), se analizará cada uno de ellos estableciendo su cuantificación y posibilidades de aprovechamiento. Igualmente se estudiarán los diversos sistemas de conversión, valorando las diferentes opciones en cuanto a investigación y desarrollo, así como sus perspectivas de futuro.

LA ENERGÍA MAREMOTRIZ

Se entiende por marea el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar, producido por las acciones del Sol y de la Luna.

La marea es un fenómeno puramente astronómico y ninguna otra causa interviene en su formación; sin embargo, no cabe duda de que hay otros factores terrestres que la alteran, a veces profundamente, por lo que no pueden dejar de ser tenidos en cuenta. Así, la desigual superficie de mares y tierras (en proporción 3:1), su reparto geográfico, los accidentes del fondo y la costa, los fenómenos meteorológicos y otros factores, contribuyen en gran medida a que la intensidad real de las mareas sea, en muchos sitios, bastante mayor que la máxima teórica.

Así, aunque la diferencia entre los niveles más alto y más bajo (*amplitud de la marea*) en mitad del océano es de apenas 1 m, en algunos puntos del globo llega a alcanzar hasta los 15 m. Por otro lado, también existe una gran diferencia entre la variación periódica de las pleamares y bajamares, cuya separación temporal entre dos

momentos en que se produce el mismo fenómeno se denomina *margen de la marea*. En la mayoría de los lugares del mundo, la marea varía aproximadamente con un ciclo de 12 h 50 min, cambiando de forma sinusoidal en un ciclo de 14 días. Sin embargo, hay lugares donde la pleamar y la bajamar se producen cada día a la misma hora, mientras que hay otros donde se produce una sola pleamar cada 24 horas.

Queda patente así, la complejidad del fenómeno de las mareas que, aunque en apariencia sea una de las manifestaciones más potentes de la Naturaleza, en realidad está provocada por fuerzas de muy pequeña intensidad.

Antecedentes históricos

La utilización de la energía de las mareas, o energía maremotriz, consiste simplemente en separar un estuario del mar libre mediante un dique y aprovechar la diferencia de nivel mar-estuario. Desde la antigüedad es conocida esta técnica, que ya fue aplicada para mover los primitivos molinos de marea egipcios.

El desarrollo histórico de estos molinos fue semejante al de los molinos hidráulicos, pero las limitaciones geográficas y sus dificultades inherentes impidieron su uso generalizado. En el siglo XIII ya funcionaban algunas ruedas maremotrices en Inglaterra, habiendo operado con un cierto éxito a lo largo de los siglos; una de las últimas fue retirada del servicio activo en 1956.

En el siglo XVIII tanto en Europa (Francia) como en la costa oriental de los EE.UU. aparecen varias instalaciones destinadas a moler grano o especias. Incluso entre los años 1835 y 1939 se registraron en EE.UU. unas 280 patentes referidas a la utilización de la energía de las mareas, pero al igual que sucedió con otras fuentes energéticas renovables aprovechadas desde la antigüedad, el interés decreció ostensiblemente al producirse la electricidad a bajo coste en las centrales térmicas.

Sin embargo, la energía obtenible de las mareas se ha seguido estudiando, evaluando y discutiendo, realizándose los primeros estudios en profundidad en Francia, URSS, Canadá y EE.UU. a partir del año 1920.

Por fin, en la década de los años sesenta, es cuando se alcanzan los primeros resultados prácticos en la construcción de las centrales maremotrices, con la del estuario del Rance (Francia, 1966) y la de la bahía de Kislaya (URSS, 1968). Existe asimismo cierto número de pequeñas centrales en la República Popular China, todas

ellas de poca entidad.

A raíz de las crisis energéticas se ha vuelto a prestar una gran atención a esta fuente de energía, polarizándose el interés de los investigadores en las posibilidades del río Severn (Gran Bretaña) y en la bahía de Fundy (EE.UU. - Canadá), entre otros proyectos de menor envergadura.

Potencial energético de las mareas: centrales maremotrices

Aunque se ha calculado la potencia total disipada por las mareas a nivel mundial en unos 3 millones de MW, el límite máximo de aprovechamiento disponible viene impuesto por la disipación de la energía en mares poco profundos y en los estuarios alrededor de las costas. Así, este límite se ha estimado en 1 millón de MW, pero probablemente el potencial real sea menor, ya que no es fácil encontrar un estuario o accidente geográfico adecuado, no sólo por su extensión, sino por la amplitud de la marea en dicha zona, que debe ser como mínimo de 4 a 5 m.

En efecto, una central maremotriz requiere, fundamentalmente, contener el agua en un depósito artificial durante la pleamar y soltarla durante la bajamar. Al igual que en las centrales hidroeléctricas, el agua pasa a través de unas turbinas para generar electricidad.

La forma más simple de construir este depósito artificial es levantando un dique de contención en la parte estrecha del estuario. Si S es la superficie del depósito y h la amplitud de la marea, la cantidad teórica de energía extraíble por ciclo de marea (unas 12 horas) se ha deducido teóricamente, llegándose a la expresión:

$$W = \frac{\rho g S h^2}{2} \quad (\text{Julios})$$

donde ρ es la densidad del agua (aproximadamente 1.000 kg/m^3) y g la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). Así, se puede calcular la producción energética teórica diaria (dos ciclos de marea) de un estuario determinado como:

$$W = 2,73 \cdot 10^{-3} S h^2 \quad (\text{kW}\cdot\text{h})$$

Por razones técnicas, el rendimiento probable de las centrales maremotrices no superará el 25%, por lo que el potencial aprovechable es considerablemente menor

que el disponible, habiéndose cifrado aquél del orden de los 15.000 MW (un 1,5% del total disponible en las costas). Ello se debe, como ya se ha indicado, a que sólo hay un número limitado de lugares en todo el mundo, donde las condiciones de la marea son adecuadas para su explotación, ya que se requieren circunstancias muy especiales de acumulación en bahías en las que la fricción del agua crea un desnivel suficiente para permitir el paso de aquélla a través de unas turbinas por gravedad.

El funcionamiento de una central maremotriz es posible de varias maneras: ciclos elementales o múltiples (embalse único o múltiple con presas intermedias) de simple o doble efecto (llenado y/o vaciado), pudiéndose combinar las instalaciones anteriores con sistemas de almacenamiento por bombeo de agua del mar.

La forma más sencilla de operar una central maremotriz es mediante un **ciclo elemental de efecto simple**, que se realiza con un solo estuario, donde está situado el dique y las turbinas, fluyendo el agua en un solo sentido: del estuario al mar. En la pleamar, se cierra el estuario de forma que, al bajar la marea, se establece una diferencia de niveles de agua, entrando en funcionamiento la turbina hasta que, debido a la siguiente marea, los niveles se igualan.

Las fases de funcionamiento de esta disposición serían:

- Llenado durante la marea ascendente, pasando el agua al embalse a través de compuertas.
- Espera mientras baja la marea; el nivel del embalse no varía al estar las compuertas cerradas.
- Producción de energía mediante las turbinas, como consecuencia de la altura de caída del agua.

Como una disposición de este tipo proporciona energía sólo durante 3 horas, dos veces al día, se han propuesto diversas variaciones de este esquema como medio de generar potencia de forma más continua.

Una posibilidad para mejorar el esquema anterior es el **ciclo elemental de doble efecto**, con un estuario y las turbinas trabajando en los dos sentidos.

En este caso, la producción de energía se realiza durante el llenado y el vaciado. Si las turbinas no son reversibles, se puede hacer una distribución de canales de entrada y de salida, a fin de conservar el mismo sentido de paso del agua a través de las turbinas; sin embargo, la inversión económica en este caso es muy superior al

coste de las turbinas reversibles.

El uso de un ciclo elemental implica que siempre se produzca un valle en la producción energética en un punto de la marea alta y baja. Este fenómeno se podría paliar con la utilización de un ciclo múltiple (varios embalses).

Como se puede observar, el principal obstáculo para la utilización de la energía maremotriz es la discrepancia entre el ciclo natural del período lunar y la variación diaria de la demanda de potencia. Por ello han sido imaginadas otras muchas disposiciones de ciclo múltiple, con los embalses convenientemente distribuidos, de forma que aseguren la continuidad de la producción, pero estos proyectos resultan muy costosos y, por tanto, no rentables.

Sin embargo, sí puede ser interesante hacer funcionar las turbinas como bombas cuando hay exceso de energía (**almacenamiento por bombeo**), sistema actualmente de amplia utilización en las centrales hidroeléctricas convencionales. En este caso, además de generar energía durante las fases de llenado y vaciado de los embalses, la planta puede utilizar los excedentes de energía para aumentar la diferencia de nivel, bombeando agua al interior del embalse.

Evidentemente, aunque este sistema reduce la cantidad global de energía generada, permite afrontar mejor la demanda energética de horas punta, que no siempre coincide con las de máxima producción de energía maremotriz, permitiendo un aprovechamiento más utilitario y rentable de la misma.

Sistemas generadores de energía: turbinas

Como los saltos hidráulicos en las posibles centrales maremotrices siempre serán inferiores a los 15 m, las turbinas a utilizar para la generación de electricidad han de tener una velocidad específica de giro que sea la más alta posible dentro de un rendimiento satisfactorio y poseer unas características aceptables en cuanto a cavitación. Las turbinas que mejor se adaptan a estas características son las de hélice de flujo axial y de alta velocidad.

La turbina más aceptada para aprovechamientos maremotrices, y que precisamente fue diseñada para esta misión es la de **bulbo axial**. Consiste en una turbina de flujo horizontal conectada a un generador, estando ambos encerrados en un recinto con forma de bulbo, sumergido en el agua.

La tecnología de esta turbina ha sido ampliamente perfeccionada en las últimas dos décadas, habiéndose conseguido un dispositivo muy eficiente y fiable que tiene la ventaja de que se puede utilizar para generar corriente eléctrica en los dos sentidos del flujo, y también como bomba. El tamaño de las turbinas de bulbo está aumentando constantemente, encontrándose en el mercado unidades de hasta 7,5 m de diámetro de rotor con potencias de 60 MW.

Otro tipo de turbina aplicable a las centrales maremotrices es la turbina de **tipo tubo**. Se trata de una turbina Kaplan de flujo axial conectada a un generador situado fuera del paso del agua. Por medio de un sistema multiplicador se aumenta la velocidad de giro del generador, pudiéndose utilizar tanto para producir electricidad como en el bombeo.

Un tercer tipo de turbina generadora para centrales de este tipo es la de **rotor anular**. Es una turbina de flujo horizontal en que la hélice va unida al rotor del generador, siendo éste de tipo anular. La característica especial de esta turbina es que el alternador va dispuesto directamente alrededor del rodete, formando turbina y alternador una unidad compacta, lo que se traduce en una considerable economía correspondiente al equipo eléctrico e ingeniería civil.

Proyectos maremotrices

Se sabe hoy día que los grandes esquemas maremotrices son técnicamente factibles pero, en cambio, es muy difícil valorar sus ventajas económicas. Quizás la característica más notable de las dos centrales que actualmente están operativas es su propia existencia. En efecto, con la construcción y puesta en servicio de estas dos centrales se ha adquirido una enorme experiencia, que ha servido de base para proyectos mucho más ambiciosos y realizables en un futuro más o menos próximo. Si bien las dificultades técnicas se van superando día a día, la actual coyuntura política y económica ha dejado reducidos todos los intentos de instalación de nuevas plantas en meras especulaciones irrealizables a corto plazo.

A continuación se presenta una breve descripción de las dos centrales operativas y de algunas de las propuestas más actuales realizadas en diferentes países.

- **La central del estuario del Rance**

La central del estuario del Rance, situada en la Bretaña francesa ha sido la primera central maremotriz instalada en el mundo con fines industriales y de investigación. Comenzada a construir en 1961, fue puesta en servicio en 1967. Es del tipo de ciclo elemental de doble efecto, con un grado limitado de almacenamiento por bombeo.

El dique, que está situado cerca de la entrada del estuario, tiene 700 m de longitud, 24 de anchura y 15 de altura (superior a la máxima altura de 13,5 m que acusan las pleamares vivas). La superficie del estuario limitada por el dique es de 22 km² y su capacidad de almacenamiento de agua es de 184 millones de m³.

La propia central está situada en el interior de una estructura hueca de hormigón armado, que aloja 24 turbinas de bulbo reversibles de 10 MW de potencia cada una. La instalación se completa con 6 pasos de compuerta para el relleno y vaciado del estuario.

- **La central de la bahía de Kislaya**

La segunda central maremotriz instalada en el mundo es un prototipo situado en la bahía de Kislaya, en el mar de Barents (URSS). Puesta en servicio en 1968, es de pequeña potencia (2 grupos de 4 MW) y su interés reside en que fue construida en dique seco, para ser situada en su emplazamiento definitivo previa preparación del fondo.

- **El proyecto del estuario del Severn**

El estuario del Severn, cerca de la ciudad de Bristol (Gran Bretaña) reúne unas condiciones muy favorables para instalar una central maremotriz: la amplitud de la marea supera los 16 m, el caudal de agua es muy considerable, siendo además alimentado por el río y, por otra parte, la forma del estuario limita considerablemente la longitud del dique que sería necesario construir.

En 1977 se comenzó el estudio de la posible instalación en esta zona de 2 ó 4 centrales maremotrices; sin embargo, a los problemas económicos que han impedido la realización de este proyecto, se suma la existencia en la zona circundante de más de 6.000 MW térmicos, cantidad superior a la demanda energética de la región.

- **El proyecto de la bahía de Fundy**

La bahía de Fundy, en la costa oriental de Norteamérica, fronteriza entre Canadá y EE.UU. presenta amplitudes de marea de hasta 20 m. La situación y la forma del entrante son muy apropiados para instalar una central maremotriz.

Aunque los estudios preliminares, elaborados entre 1966 y 1969, demostraron que el proyecto era técnicamente factible pero económicamente inviable, investigaciones posteriores a la crisis del petróleo indicaron su posible viabilidad económica, con el esquema de ciclo elemental de efecto simple como más aconsejable, utilizando turbinas de tipo rotor anular.

- **El proyecto de las islas Chausey**

Las enseñanzas de la central del Rance han servido en Francia como punto de partida para el desarrollo de un proyecto más ambicioso, en la cercana bahía de Saint-Michel, que uniría las islas Chausey. Requeriría 40 km de diques, aprovechando mareas vivas de hasta 12,5 m de altura en un embalse de 650 km². Se instalarían 300 grupos de 40 MW que llegarían a producir 27 millones de MW.h/año.

El estudio preliminar fue abandonado en 1965 por razones económicas y vuelto a actualizar en 1975 a raíz de los progresos más recientes en el campo de las turbinas de baja presión. Sin embargo, el proyecto está actualmente sin decidir, ya que la elevadísima inversión y el largo período de construcción (de 10 a 12 años) produciría un coste por kW instalado muy superior al del Rance.

- **Los proyectos rusos**

Una evidencia de la importancia de esta nueva forma de generación de energía es el numeroso paquete de proyectos que algún día podrían convertirse en realidad en las costas de Rusia. Los estudios realizados en los últimos veinte años demuestran que las condiciones naturales existentes hacen posible que, mediante la construcción de centrales maremotrices, pueda alcanzarse una capacidad instalada de 157.000 MW.

La central de la *bahía de Lumbovsky* estaría localizada en la costa de la península de Kola en el límite del Mar Blanco y el Mar de Barents, donde la amplitud de la marea es de 7 m. El proyecto consiste en construir dos diques de unos 7 km de

longitud total, equipados con 32 compuertas y 60 turbinas de bulbo con una capacidad total de 360 MW.

Para la central de la *bahía de Mezen* se pretende construir un embalse de unos 2.200 km² con un dique de 17 km para aprovechar mareas de hasta 9 m. La planta tendría unos 10.000 MW con una producción anual de 32 millones de MW.h.

La potencia a instalar en la *bahía de Tugur* sería de 9.000 MW, aprovechando amplitudes de marea de 8 m. Esta central, situada en el Mar de Ochotsk, quedaría formada por un embalse de 1.800 km², erigido mediante un dique de 36 km de longitud.

La *bahía de Penzhinsk* presenta alturas de marea muy elevadas (13,5 m), por lo que ofrece bastantes posibilidades para el aprovechamiento maremotriz, para el cual se han sugerido dos opciones: la primera, con un dique de 31,5 km de longitud, permitiría instalar 35.000 MW; la segunda, con un dique de 72 km, propone instalar una planta de 100.000 MW.

- **Otros proyectos maremotrices**

Existen otros proyectos maremotrices en perspectiva en diversos países (Canadá, Corea, Australia, Argentina y República Popular China); sin embargo, el estudio de cada uno de los mismos sería demasiado prolijo, por lo que su descripción se puede encontrar de una forma más o menos detallada en la bibliografía.

Posibilidades de la energía maremotriz

La cantidad global de energía de las mareas es suficientemente elevada como para incitar a amplios programas para el desarrollo de las técnicas necesarias para la puesta a punto de grandes esquemas maremotrices.

Si bien la economía de estas centrales no es completamente competitiva en la actualidad con otros métodos de producción energética, las coyunturas socioeconómicas futuras podrían llevar a muchos gobiernos a reconsiderar la explotación de sus respectivos potenciales maremotrices. Incluso hoy día, algunos países están investigando ya sus posibilidades en este campo.

El hecho de que el período de vida de las centrales maremotrices pueda ser de hasta 75 años o más, y que el coste de combustible es nulo, hace que no se deba tomar ninguna postura previa en contra de esta fuente de energía, intentando superar

los obstáculos actualmente existentes para la total explotación del potencial maremotriz mundial.

LA ENERGÍA MAREMOTÉRMICA

El mar cubre el 70% de la superficie del globo terrestre y es particularmente extenso en las zonas tropicales. Por ello, una gran parte de la energía solar que incide sobre la Tierra es almacenada en forma de calor en la superficie del océano. Así, un examen de la variación de la temperatura del mar en función de la profundidad, en la zona situada entre los Trópicos permite distinguir, a grandes rasgos, tres capas:

- Una capa superficial de 100 a 200 m de espesor, con temperaturas comprendidas entre los 25 y los 30 °C, que hace las veces de un inmenso colector de calor, asegurando al mismo tiempo un excelente almacenamiento térmico.
- Una zona de variación muy rápida de temperatura, entre 200 y 400 m de profundidad, que funciona como una barrera térmica entre dos masas de agua de distintas densidades.
- Una capa de aguas profundas en la que la temperatura decrece progresivamente hasta alcanzar 4 °C a 1.000 m.

En la zona intertropical, que representa casi un tercio de la extensión oceánica, la superficie del mar presenta una diferencia de temperatura respecto al fondo (1.000 m) superior a los 18 °C, gradiente que constituye, sin duda alguna, una enorme fuente potencial de energía, calculada en unos 40.000 TW, de los cuáles se podrían explotar un 10%. Sin embargo, el rendimiento del proceso de aprovechamiento, basado en un ciclo termodinámico, es muy bajo. El rendimiento teórico máximo ($\mu_{m\acute{a}x}$) de este ciclo viene dado por la expresión:

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

donde T_1 y T_2 son las temperaturas (en grados Kelvin) del foco frío y caliente, respectivamente.

Si se aplican las condiciones más favorables de $T_1 = 277$ K (4 °C) y $T_2 = 303$ K

(30 °C), se obtiene un valor para el rendimiento máximo sólo de 0,086 (8,6%). Obsérvese, no obstante, que los rendimientos reales serán apreciablemente más bajos (entre el 2 y el 3%), debido a que, por un lado, no es nada fácil conseguir un gradiente de 26 °C y por otro, a que las eficacias de los distintos elementos del sistema (cambiadores de calor, turbinas, generadores) están comprendidos entre el 80 y el 95%.

A pesar de todo ello, el generar energía aprovechando los gradientes térmicos oceánicos, **energía maremotérmica**, no es nuevo, y en la actualidad se están llevando a cabo numerosos proyectos al respecto, ya que los bajos rendimientos del ciclo termodinámico no constituyen un problema demasiado serio, en tanto que el yacimiento energético (el agua marina superficial) es de un volumen considerable y está siendo continuamente renovado por la radiación solar.

Aunque existen algunos problemas técnicos asociados al gran volumen de agua que ha de ser manipulado (para producir 1 MW de potencia con un gradiente térmico oceánico de 20 °C se necesita aproximadamente un caudal de agua de 45 m³/s) y a las dimensiones de ciertos componentes del equipo, el concepto de la energía maremotérmica parece muy prometedor, porque su influencia sobre el medio ambiente es relativamente pequeña y sus posibilidades de integración en una amplia gama de operaciones industriales son bastante grandes.

Emplazamiento de aprovechamientos maremotérmicos

Para determinar una localización razonablemente buena para la instalación de una planta de aprovechamiento maremotérmico es necesario conocer, en un principio, los criterios de operación en condiciones aceptables de rendimiento y combinar esta información con los datos oceanográficos. Así, se considera posible la explotación de un gradiente térmico oceánico de unos 18 °C (aproximadamente constante a lo largo de todo el año) a profundidades máximas de 1.000 m. De acuerdo con esta premisa, las zonas térmicamente favorables se encuentran en las regiones ecuatoriales y subtropicales.

Ahora bien, el gradiente térmico no es el único parámetro a considerar cuando se intenta buscar un emplazamiento maremotérmico. Es posible que variables tales como las condiciones marinas (corrientes, olas, vientos), las meteorológicas y las

batimétricas puedan llegar a descalificar un lugar con un gradiente térmico prometedor.

Considerando todo ésto, el propósito no será producir la mayor cantidad de energía posible, sino encontrar emplazamientos donde las centrales maremotérmicas puedan contribuir favorablemente a un abastecimiento energético local o ser utilizadas directamente para diversas operaciones industriales.

La política energética general y los factores relacionados con la misma, así como la posible restricción en la importación de combustibles fósiles en algunos países, puede influenciar la elección del emplazamiento y tener un efecto positivo sobre la estructura futura del mercado de centrales maremotérmicas.

Un estudio de hace unos años estableció los lugares más apropiados para el emplazamiento de centrales maremotérmicas. En principio, estos lugares eran los siguientes:

- Islas Polinesias.
- Indias Occidentales.
- Mar del Coral.
- Golfo de Guinea.
- Islas Canarias.

Las características de dichos emplazamientos se pueden encontrar en la bibliografía, habiéndose tenido en cuenta, tanto los datos oceanográficos como los políticos y económicos de cada zona, pero aún son necesarios estudios más detallados para la evaluación real de las posibilidades maremotérmicas de cada una de las zonas indicadas.

Centrales maremotérmicas

Una central maremotérmica es un sistema capaz de aprovechar los gradientes térmicos oceánicos para producir electricidad. Se trata de una máquina térmica en la que el agua superficial actúa como fuente de calor, mientras que el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante, siguiéndose un ciclo termodinámico.

Obsérvese que no existe ninguna diferencia cualitativa entre una central maremotérmica y una térmica convencional. Sin embargo, aquélla opera con energía de baja calidad, al funcionar con un gradiente térmico no superior a los 22 °C frente a los cientos de grados de diferencia a que operan las centrales térmicas. A esto se debe

el bajo rendimiento teórico apuntado anteriormente.

La transformación de la energía térmica en eléctrica se lleva a cabo mediante un ciclo termodinámico de Rankine, caracterizado porque el medio de trabajo está en estado líquido y el calor hace que el fluido sufra un cambio de fase antes o en el momento en que entra en la etapa de expansión de una turbina. Por otra parte, el ciclo de Rankine se puede llevar a cabo de dos formas: en ciclo abierto o en ciclo cerrado.

En el **ciclo abierto**, el fluido de operación es la misma agua cálida de la superficie del mar, que entra en una cámara de vacío o evaporador *flash* y se convierte en vapor según baja la presión. Este vapor forma una corriente central por efecto de cavitación, mientras que el líquido no evaporado se deposita en las paredes de la cámara.

El vapor separado del agua líquida pasa a través de la turbina de expansión donde genera energía, y luego a un condensador con agua de mar, procedente de las profundidades, como refrigerante. Si se sustituye el condensador de película líquida por uno de contacto a través de una superficie separadora, este ciclo permite asimismo obtener agua potable.

Una instalación real incluye varias cámaras de vaporización en paralelo y necesita dispositivos para eliminar los gases disueltos en el agua (que no son condensables), teniéndose además que reducir al mínimo los problemas de corrosión, pérdidas de calor entre el agua del mar y el vapor, y arrastre de salmuera.

El **ciclo cerrado**, utiliza un fluido de trabajo distinto del agua, con buenas características para la transmisión de calor y presión de vapor elevada a la temperatura ambiente (bajo punto de ebullición), tal como el amoníaco, propano, freón, óxido de etileno, etc.

El fluido de trabajo se vaporiza con ayuda del agua cálida del mar y se hace pasar a través de una turbina, donde su expansión genera energía mecánica, que mueve el alternador. Tras abandonar la turbina, el vapor a baja presión se condensa en un cambiador de calor refrigerado por el agua de mar fría, bombeándose al evaporador para iniciar de nuevo el ciclo.

Así pues, los componentes principales de una planta maremotérmica, tanto de ciclo abierto como de ciclo cerrado serían los siguientes:

- Un evaporador, donde se vaporiza el fluido de trabajo.

- Una turbina que convierte la energía térmica adquirida por el fluido en el evaporador, en energía mecánica, para impulsar un generador eléctrico.
- Un condensador en el que el vapor de escape de la turbina es convertido en líquido, al ceder su calor al agua de refrigeración procedente de las profundidades.
- Un sistema de tuberías y bombeo para llevar el agua de las profundidades hasta el condensador.
- Una estructura flotante si la planta es oceánica o una estructura convencional fija si es terrestre.
- Un sistema de posicionamiento o anclaje.
- Un cable submarino, si la electricidad ha de transportarse hasta la costa.

Obsérvese sin embargo que, a pesar de que la función de los componentes principales es la misma, tanto para el ciclo abierto como para el ciclo cerrado, las características técnicas de la planta y de la estructura portante serán bastante diferentes en cada caso.

No es fácil decidir sobre la bondad de un tipo de ciclo sobre el otro. En efecto, el ciclo cerrado tiene la ventaja de poder utilizar turbinas más pequeñas, debido a las mayores presiones de operación; tampoco es necesario desgasificar el agua del mar, como ha de hacerse en el ciclo abierto. Sin embargo, algunas desventajas del ciclo cerrado son: grandes pérdidas de calor, problemas de manipulación y de incompatibilidad con algunos materiales de los fluidos de trabajo, y el requerimiento de grandes superficies de intercambio de calor de los mismos.

Por su parte, los elementos que componen una central maremotérmica se utilizan ampliamente en la industria actual, pero las características específicas que deben cumplir para su uso en estas plantas obligan a poner a punto toda una tecnología, cuyo estado de desarrollo actual es diferente para los distintos componentes del sistema.

Finalmente es necesario destacar que las plantas maremotérmicas, además de producir electricidad, podrían integrarse en otras actividades, tales como:

- Producción de agua potable en los sistemas de ciclo abierto.
- Generación de hidrógeno aplicando la energía electricidad producida, mediante

electrólisis del agua desalinizada, para facilitar el transporte a tierra de la energía.

- Acuicultura, utilizando el agua de las profundidades, más rica en nutrientes, para desarrollar un fitoplancton que serviría de alimento a diversas especies marinas (moluscos, peces).

Todos estos usos, así como cualquier utilización de la electricidad generada por el sistema en procesos químicos, pueden integrarse de forma realista en plantas de aprovechamiento del gradiente térmico oceánico.

Proyectos maremotérmicos

La primera vez que se pensó en recuperar la energía existente entre dos focos que presentasen una pequeña diferencia de temperaturas fue en 1881: D'Arsonval propuso utilizar un ciclo cerrado de dióxido de azufre que era evaporado y condensado por una máquina que tomaba y cedía calor a dos corrientes de agua de temperaturas no muy diferentes, sugiriendo además que esta idea se podía aplicar en numerosos lugares, entre ellos, en las zonas tropicales de los océanos. Pero fue en 1926 cuando Claude y Boucherot sugirieron utilizar el agua del mar como fluido de trabajo, con lo que se había inventado el ciclo abierto.

En 1930, Claude consiguió sumergir un tubo de 1,6 m de diámetro y casi 2 km de largo en la bahía de Matanzas (Cuba) para operar la primera central maremotérmica, de 22 kW, con un gradiente de temperatura de 14 °C, en ciclo abierto. Funcionó durante once días, hasta que la conducción de agua fría fue destruida por una tempestad.

Debido a su bajo rendimiento (inferior al 1%), no resultaba económicamente competitiva, pero proporcionó gran cantidad de información, demostrando asimismo la factibilidad de obtener energía a partir de los gradientes térmicos oceánicos.

Posteriormente, en 1933, el mismo Claude intentó experimentar con otra planta, montada sobre un barco mercante y provista de 8 turbinas de 257 kW unidas por sus extremos, que alimentaban un alternador de 800 kW y un compresor rotativo de amoníaco, cuya misión era fabricar hielo. De nuevo los problemas con el tubo de agua fría obligaron a abandonar la empresa.

En base a la idea del ciclo abierto de Claude, la empresa francesa Societé

Energie des Mers, después de más de quince años de estudios, completó un proyecto de central maremotérmica de 7 MW netos, a instalar en Abidjan (Costa de Marfil), en tierra firme. Constaba de dos módulos de 5 MW brutos cada uno que aprovecharían un gradiente térmico de 20 °C, para lo cual se necesitaría un tubo para el agua fría de más de 4 km de longitud.

El estudio económico realizado en 1954 demostró que este proyecto era económicamente viable, pero razones de tipo político condujeron al cierre del proyecto.

Fue necesario esperar hasta finales de los años sesenta para que aparecieran proyectos maremotérmicos totalmente nuevos: tres equipos norteamericanos presentaron proyectos de centrales flotantes de gran potencia que utilizaban el ciclo cerrado. Se trataba de las empresas Lockheed (160 MWe), T.R.W. (100 MWe) y la Universidad John Hopkins (100 MWe). Se optó por el ciclo cerrado, utilizando como fluido de trabajo amoníaco, dado que para conseguir un módulo de 100 MW en ciclo abierto era necesaria una turbina de 80 m de diámetro.

Estos proyectos prefiguran las futuras centrales maremotérmicas que dentro de un plazo de 10 a 30 años pueden funcionar en los océanos tropicales. Si bien los problemas técnicos que hay que resolver son numerosos, los especialistas están de acuerdo en reconocer que no son insuperables.

Uno de los problemas más graves es el de mantener en funcionamiento la conducción de agua fría en cualquier condición meteorológica, preservándola de la rotura. En este problema se ha avanzado considerablemente, gracias a las técnicas desarrolladas para plataformas petrolíferas flotantes, que necesitan también largas conducciones bajo la superficie del mar.

Como consecuencia de estos trabajos, que redescubrieron las posibilidades de la energía térmica marina, se empezaron a establecer verdaderos programas de desarrollo en este campo, a nivel de colaboración conjunta internacional, encabezada por los EE.UU., para financiar el programa OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion = Conversión de la Energía Térmica Oceánica).

Así, en 1979 culminaron los estudios que llevaron a montar una pequeña planta maremotérmica (Mini-OTEC) en la costa occidental de Hawai, con una potencia nominal de 50 kW. Esta central produce 15 kW eléctricos (a 20 °C de gradiente), ya que el resto lo consumen las bombas, instrumentos y la maquinaria auxiliar de la

planta.

Con esta experiencia de diseño se construyó la central OTEC-1, también de ciclo cerrado, transformando un buque propiedad del gobierno de los EE.UU. Esta planta proporciona una potencia eléctrica de 1 MW. Se previó también la puesta en marcha de la OTEC-2, de características similares, pero de 40 MW de potencia.

Pero los programas de desarrollo de las centrales maremotérmicas se llevan a cabo en todo el mundo. Tanto en Francia (CNEXO), Italia (Pirelli), Alemania (Dornier) como el grupo EUROCEAN están inmersos en este tipo de investigaciones, si bien la coyuntura energética actual resta viabilidad a la aplicación práctica de estos proyectos.

Futuro de la energía maremotérmica

En el momento actual, la conversión maremotérmica en ciclo cerrado es técnicamente factible a pequeña escala, necesitándose aún cierto desarrollo en el escalado de las turbinas y de las conducciones de agua fría para poner en marcha unidades mayores (por encima de los 25 MW). No obstante, el ciclo abierto es posible comercialmente en el rango de los 10 MW, con lo cual existe un amplio campo de posibilidades entre las distintas técnicas.

Sin embargo, se hace necesaria una cuidadosa planificación del programa de desarrollo para conseguir aplicaciones comerciales a media y gran escala, quedando claro que cualquier intento serio de puesta a punto de la tecnología maremotérmica a largo plazo debe encauzarse a niveles internacionales, fomentando la transferencia mutua de tecnología entre los países implicados, con objeto de permitir una mayor profundización en las distintas áreas de conocimiento involucradas.

LA ENERGÍA DE LAS OLAS

Las olas que se producen en la superficie del mar son provocadas por los vientos, de los que recogen y almacenan energía. Si la velocidad y la dirección del viento son constantes, las olas resultantes son *regulares*, y las partículas de agua que las componen siguen trayectorias circulares, que difieren según sea la profundidad de las aguas.

En las olas regulares, al seguir las partículas de agua trayectorias circulares, cada partícula está dotada en cada instante de una energía cinética y una energía

potencial. La disipación de energía que se puede obtener de un volumen determinado de agua vendrá establecida por la frecuencia con que ese volumen de agua se renueva. Así, la energía total de una ola se puede calcular como:

$$W = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{8}$$

siendo ρ la densidad del agua, H la altura de la ola (distancia entre cresta y valle), λ su longitud de onda (distancia entre dos crestas sucesivas) y b la anchura de la cresta.

Por su parte, la potencia por unidad de longitud de frente de ola viene dada por:

$$P_L = \frac{\rho g^2}{32 \pi} H^2 T$$

siendo T el período de las olas (tiempo transcurrido entre la llegada de dos crestas sucesivas), que se relaciona con la longitud de onda por medio de la ecuación:

$$\lambda = \frac{g T^2}{2 \pi}$$

Considerando los valores de ρ (aproximadamente 1.000 kg/m^3) y de g ($9,81 \text{ m/s}^2$), la ecuación de la potencia se puede simplificar de la forma:

$$P_L \approx H^2 T$$

Ahora bien, en la práctica, las olas recogen la energía de los vientos, que no son constantes ni en velocidad ni en dirección, por lo que las olas producidas no son regulares y, por tanto, la determinación de su energía no es fácil de forma teórica. Además, la velocidad de transporte y disipación de energía es la de la transmisión de un movimiento ondulatorio, por lo que depende de la velocidad de un grupo de olas. Es decir, aunque la ola se mueve con la velocidad que le corresponde a su longitud (o a su período), el grupo de olas avanza a velocidad distinta.

Por este motivo es necesario modificar la ecuación de la potencia para ponerla en función de los parámetros medibles, con el fin de obtener valores energéticos por medidas experimentales de altura y período.

Se define así como *altura significativa de una ola*, H_s , a la tercera parte del valor de la mayor altura de un grupo de olas y el *período de nivel cero*, T_z , como el período de tiempo que transcurre entre el paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de distancia entre una cresta y un valle. Se determina de esta manera la potencia disipada por unidad de longitud de frente de ola en función de estos parámetros, que resulta ser:

$$P_L = 0,545 H_s^2 T_z^2 \quad \left(\frac{kW}{m} \right)$$

Aunque se han realizado muchas evaluaciones de la potencia media o de la energía total disipada por las olas, raramente se encuentran indicaciones sobre los valores máximos. No obstante, algunos autores suponen que el potencial total mundial de las olas oscila alrededor de los 100 millones de GW, mientras que otros dan valores 25 veces mayores. Como se puede ver, la discrepancia es total.

Estudios más detallados, aunque basados en observaciones visuales de alturas y períodos, han sido realizadas para varias zonas del mundo de situación bastante favorable, habiéndose obtenido valores medios de disipación de potencia del orden de los 45 kW/m. Aunque estos datos no se pueden considerar como definitivos, sí son muy útiles para realizar cierto tipo de comparaciones.

En líneas generales, la densidad energética de esta fuente de energía es pequeña, por lo que su explotación es un problema difícil. No obstante, se están desarrollando los correspondientes sistemas de captación y transformación de la energía de las olas en energía útil, quedando patente las dificultades surgidas si se analiza la amplia gama de ideas que se han desarrollado para abordar el problema.

Antecedentes del aprovechamiento energético de las olas

Un primer intento de aprovechar la energía de las olas fue debido a Henning en 1874, quién diseñó una embarcación provista de unas aletas flexibles que, con el movimiento de las olas, proporcionaban un movimiento de traslación. Posteriormente, en 1898, Linden mejoró este dispositivo, aplicándolo a su *Autonaut*, que llegaba a alcanzar una velocidad de avance de 2 m/s.

En 1903, Graham patentó una embarcación con múltiples cascos articulados

transversal y longitudinalmente. El movimiento de las olas accionaba unos motores hidráulicos que movían las 7 hélices que poseía. Dentro de este tipo de embarcaciones cabe también citar la de Kalfas (1930), que recogía la energía de las olas por medio de una pala y la transmitía mediante engranajes a una hélice.

Ahora bien, dentro de la historia de los dispositivos generadores de energía, ésta parece comenzar en 1799, cuando el francés Girand propuso un sistema consistente en un flotador en la superficie del mar conectado a la costa mediante una palanca, cuyo movimiento alternativo se convertía en rotativo por medio de un trinquete.

Hay que constatar asimismo el papel precursor de los científicos españoles del siglo pasado en este campo. En 1869, Ruiz propuso un sistema pasivo basado en el paso de las olas a través de un dique hacia un depósito interior, mientras que en 1881, el también español Benot mejoró el sistema de Ruiz, sustituyendo su complicado sistema de válvulas por unas compuertas.

Posteriormente han sido abundantes las propuestas de dispositivos similares a los citados y situados en la línea litoral, teniéndose constancia de los experimentos realizados en 1926 por Coyne en la Bretaña francesa, con los que obtuvo rendimientos cercanos al 5%.

Pero para empezar a considerar la utilización a gran escala de la energía de las olas hay que abandonar la historia e introducirse en el pasado próximo. Como consecuencia de la variación de la situación energética y debido al gran empuje que los países más avanzados (Gran Bretaña, EE.UU., Japón, etc.) le han dado a las investigaciones sobre la energía de las olas mediante la asignación de gran cantidad de fondos, aparecen estudios y ensayos preliminares de diversos sistemas, basados en distintos conceptos teóricos para captar la energía que disipa un frente de olas.

Convertidores

La gran variación que se produce continuamente en la amplitud y el período de las olas, revela claramente los principales problemas que plantea el diseño de convertidores para la energía de las olas. Estos sistemas deben captar energía mecánica de forma completamente aleatoria y convertirla eficientemente en otra forma de energía útil, generalmente electricidad. Para ello han de responder tanto a una

amplia gama de frecuencias como de amplitudes de entrada, es decir, deben ser capaces de transformar desplazamientos de olas desde las escalas más reducidas en altura y frecuencia, hasta las más elevadas.

Los sistemas que se están desarrollando, considerados bajo el punto de vista de su comportamiento dinámico, se pueden agrupar en dos categorías: activos y pasivos.

En un **sistema activo**, los elementos de la estructura se mueven como respuesta a la ola y se extrae la energía utilizando el movimiento relativo que se origina entre las partes fijas y móviles. En los **sistemas pasivos** o inmóviles, se fija una estructura al fondo del mar o en la costa, y se extrae la energía directamente del movimiento de las partículas de agua.

Por otro lado, se pueden aprovechar fundamentalmente tres fenómenos básicos que se producen en las olas:

- *Empuje de la ola*, aprovechando que en aguas poco profundas la velocidad horizontal de las partículas de agua no varía con la profundidad. La cantidad de movimiento de la masa de agua es absorbida por un obstáculo, que transmite la energía a un sistema rotativo. El resultado es un sistema pasivo, que se utiliza muy poco.
- *Variación de la altura de la superficie de la ola*, situando estructuras que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar su energía. Los dispositivos que aprovechan este fenómeno se basan en el principio de que cualquier procedimiento que sea capaz de crear olas puede también usarse para extraer su energía.
- *Variación de presión bajo la superficie de la ola*, o principio de la cavidad resonante. Los dispositivos que aprovechan este fenómeno utilizan una columna de aire, atrapada en una estructura, que oscila con dichas variaciones de presión.

La explicación del mecanismo por el cual cualquier dispositivo capta la energía de la ola es muy simple. Al llegar las olas a la estructura, sufren una modificación, mientras que a su vez, la estructura al moverse crea olas que se superponen a las anteriores. La resultante de esta composición de movimientos contiene la energía que

no se ha podido captar, por lo que se ha de pretender que las olas radiadas por la estructura anulen en amplitud y fase a las olas incidentes.

Una vez vistos los fundamentos en que se basan los diversos dispositivos convertidores de la energía de las olas, se hará una breve relación de aquéllos que han sido considerados como posibles y, por tanto, se les está dedicando una profunda atención. Estos absorbedores se clasifican en tres grandes grupos: totalizadores, atenuadores y absorbedores puntuales.

Los **totalizadores** se caracterizan por estar situados perpendicularmente a la dirección de la ola incidente, es decir, paralelos al frente de la ola, siendo su pretensión el captar la energía de una sola vez. Son los mejor estudiados, ya que el trabajo experimental se ha realizado en canales de experimentación, lo que presenta grandes ventajas sobre un estudio en mar abierto.

El **rectificador Russel** es un totalizador pasivo, consistente básicamente en un tanque de dos niveles, con un generador movido por turbinas, instaladas entre el compartimiento superior e inferior. Las olas empujan agua hacia el interior del tanque superior, desde el cual fluye por gravedad hasta el nivel inferior, haciendo girar la turbina. Una serie de válvulas unidireccionales permiten la entrada de agua por arriba y su salida por abajo.

El **pato Salter** es un dispositivo totalizador activo asimétrico, proyectado de forma que la presión dinámica de la ola actuando sobre su parte baja le obliga a levantarse, originando un movimiento de semirrotación. A este movimiento ayuda también la variación de la presión hidrostática, que empuja hacia arriba el borde de entrada. La parte posterior del dispositivo es cilíndrica, para que en su movimiento no produzca olas y, por tanto, no se radie energía.

Como los dos movimientos que actúan sobre el dispositivo están en fase, aquél convierte tanto la energía potencial como la energía cinética de la ola en un movimiento rotativo o alternativo, que se pueden transformar en electricidad o usar para comprimir un fluido, respectivamente.

La **balsa Cockerell** está compuesta de varios flotadores, cuyo número más conveniente, según estudios recientes, es de tres. La energía es extraída a través del movimiento relativo entre dos balsas adyacentes, y se utiliza para accionar unas bombas de pistón que, por medio de un fluido, pueden accionar un generador eléctrico.

El **convertidor N.E.L.** (National Energy Laboratory, Glasgow - Escocia), consiste en situar una barreras, paralelas al frente de la ola. El concepto de este dispositivo es un casco de hormigón con una cubierta de acero, dividido transversalmente en secciones, cada una de las cuales contiene una columna de agua oscilante, que debe hacer funcionar un turbogenerador mediante válvulas unidireccionales.

Otro grupo de convertidores de energía de las olas son los **atenuadores**, formados por largas estructuras colocadas con su eje mayor paralelo a la dirección de propagación de las olas, pretendiéndose así absorber la energía de la ola de un modo progresivo. Tienen la ventaja de poder captar la energía por dos lados, siendo los esfuerzos ejercidos sobre la estructura menores, lo que implica un anclaje más sencillo.

Un primer dispositivo de este tipo lo constituye el **buque Kaimei**, de fondo plano, 80 m de eslora y 12 m de manga. Está equipado con dos filas paralelas de 11 tubos de 25 m² de sección, que sirven como conductos a las correspondientes columnas de agua oscilantes. Cada par de cámaras está conectada a una turbina, una columna de agua funcionando en carrera ascendente y la otra en carrera descendente.

La capacidad generadora máxima del Kaimei es de 2 MW, por lo que representa el mayor convertidor de energía de las olas hasta ahora construido. Sin embargo, no se han obtenido los rendimientos esperados, en parte debido a que se ha estado experimentando simultáneamente con varios diseños de turbogeneradores, con lo que no ha preocupado demasiado la optimización del sistema.

La **bolsa de Lancaster**, ideada por French, está basada en una estructura sólida de cemento, a la que van unidas bolsas flexibles llenas de aire en toda su longitud. Al recorrer la ola el dispositivo, la presión sobre las bolsas fuerza el aire a través de un juego de válvulas unidireccionales haciéndolo mover una turbina.

Una versión modificada de este sistema lo constituye la **almeja de Lancaster**, en la que las bolsas están protegidas por planchas metálicas con muelles, asemejando un conjunto de fuelles. El aparato está anclado en un ángulo de 45 ° respecto al frente de ola, por lo que constituye una combinación de sistema totalizador y de sistema atenuador.

La última categoría de convertidores de energía de las olas son los **absorbedores puntuales**, dispositivos capaces de captar no sólo la energía de la porción de la ola directamente incidente, sino también la de un entorno más o menos amplio. Suelen

ser cuerpos de revolución, por lo que son indiferentes a la dirección de propagación de la ola.

La **boya Masuda** fue el primer uso práctico de la energía producida por las olas. Una cámara flotante semisumergida que permite el movimiento de las olas en su interior, produce desplazamientos de aire en la parte superior de la cámara, que se pueden utilizar para impulsar una turbina unidireccional. La turbina está acoplada directamente a un pequeño alternador y, mediante el uso de un sencillo regulador, se mantiene cargada una batería. Esto permite su uso como boya de navegación, para lo que se está utilizando actualmente a pequeña escala.

El **convertidor de Belfast** constituye un modelo más avanzado en fase de investigación y desarrollo en la Universidad de Queen (Irlanda del Norte). Utiliza también el principio de la columna oscilante de aire.

El paso de las olas a través del dispositivo induce un movimiento vertical en las columnas de agua del interior de la estructura. Estos movimientos impulsan aire a través de una turbina autorrectificadora (turbina Wells), que gira siempre en el mismo sentido, independientemente del de la corriente de aire, acoplada a un generador convencional, que produce corriente eléctrica.

Una central de este tipo consistiría en una serie de dos o más hileras de estos absorbedores puntuales, anclados en el lado del mar a una profundidad de unos 30 m. Se encuentra en proyecto una de estas centrales, de 2 GW de potencia (1.500 absorbedores) a situar en la Hébridas Exteriores (Gran Bretaña), con un desplazamiento bruto de 10.000 toneladas.

Por motivos de extensión no se pueden detallar aquí todos los sistemas convertidores de energía de las olas experimentales o en proyecto en la actualidad. No obstante, los que se han citado se consideran como los ejemplos más representativos, pudiéndose encontrar la descripción de otros dispositivos en la bibliografía correspondiente.

Aspectos futuros de los convertidores de olas

El valor comercial de la energía obtenida de las olas es fuertemente dependiente del coste de las fuentes energéticas a las que pueda sustituir y de la flexibilidad o capacidad de almacenamiento del sistema. Muchos de los dispositivos propuestos han

sido desarrollados para obtener el máximo rendimiento, sin tener en cuenta los costes y la simplicidad. Como la energía de las olas siempre es de muy baja densidad, el tamaño de cualquier convertidor tiende a ser muy grande y, en consecuencia, muy caro en relación a la potencia que puede extraer.

Por otra parte, un importante factor económico es la vida del sistema, y ésta viene fuertemente determinada por la resistencia de unos materiales sometidos a unas condiciones de trabajo extremadamente duras, ya sea en mares tropicales, con condiciones de intensa acción biológica, como en mares agitados, con condiciones de desgaste mecánico y, en general, con una fuerte acción química por parte del agua de mar.

Independientemente de todo ello, se han invertido elevadas cantidades de capital en la investigación y ensayos de muchos de los dispositivos mencionados. Así, Gran Bretaña, EE.UU., Japón, Finlandia, Suecia y Holanda han experimentado con esta forma de energía, a pesar de que, actualmente, el concepto de conversión de la energía de las olas no está aun suficientemente maduro como para proceder a su evaluación industrial.

Mientras tanto, los expertos siguen recomendando a todos los países costeros que desarrollan proyectos navales, que estudien la posibilidad de incluir en ellos algunos sistemas de conversión de energía de las olas, capaces de paliar de alguna forma sus necesidades energéticas locales.