

**ENERGÍAS :**

**ENERGÍAS MARINAS**

**BIOMASA**

**RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**ENERGÍA GEOTÉRMICA**

**TOMO V**

# **FÍSICA NUCLEAR Y TECNOLOGÍA NUCLEAR**

**Profesor:** D. Lorenzo Doreste

Trabajo elaborado en el curso **1.995-96** por los alumnos:

Reinaldo Quirós Gómez  
Manuel Serrano Caballero  
Luis Cárdenes Guerra  
José Ramón Medina Cruz  
Francisco Fortuny Rodríguez

## ÍNDICE

### CAPÍTULO VII: Energías marinas

|  |   |
|--|---|
| Qué es una central maremotriz .....                  | 1 |
| Posibilidades que ofrece la energía maremotriz ..... | 1 |
| Qué se puede esperar de la energía de las olas ..... | 3 |
| Investigación del aprovechamiento en España .....    | 4 |
| Bibliografía .....                                   | 5 |

### CAPÍTULO VIII: Energía por biomasa.

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 1  |
| Tipos de biomasa .....                                    | 2  |
| Aprovechamiento de la biomasa .....                       | 3  |
| 2 - Situación actual .....                                | 4  |
| Tecnologías en fase comercial .....                       | 4  |
| Tecnologías en fase de desarrollo .....                   | 6  |
| Recursos y situación en España .....                      | 6  |
| Recursos potenciales .....                                | 7  |
| Recursos utilizables .....                                | 7  |
| Consumo energético .....                                  | 9  |
| Situación en la comunidad europea .....                   | 11 |
| Situación de aplicación de biocombustibles .....          | 12 |
| 3 - Aspecto técnicos .....                                | 13 |
| Caracterización de los recursos .....                     | 13 |
| Residuos forestales y agrícolas .....                     | 15 |
| Residuos de industrias forestales .....                   | 18 |
| Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias ..... | 19 |
| Residuos biodegradables .....                             | 21 |
| Cultivos energéticos y excedentes agrícolas .....         | 21 |
| Gestión de residuos ceñosos .....                         | 22 |

|   |    |
|---|----|
| Otros sistemas de tratamiento .....                   | 31 |
| Tratamiento relativos a residuos biodegradables ..... | 34 |
| Tratamiento relativos a biocombustibles .....         | 37 |
| 4 - Aspecto medioambientales .....                    | 38 |
| Residuos ceñosos .....                                | 39 |
| Residuos biodegradables .....                         | 41 |
| biocombustibles .....                                 | 42 |
| Estudio de impacto ambiental .....                    | 42 |
| 5 - Bibliografía .....                                | 44 |
| 6 - Comentario Bibliográfico .....                    | 44 |

### CAPÍTULO IX: Residuos Sólidos Urbanos

|  |   |
|--|---|
| Posibilidades de desarrollo .....                    | 1 |
| Aspectos técnicos .....                              | 2 |
| Aspectos económicos .....                            | 3 |
| Diagrama de bloques simplificado de una planta ..... | 5 |
| Bibliografía .....                                   | 6 |

### CAPÍTULO X: Energía geotérmica y térmica marina

|  |    |
|--|----|
| 1.- La energía geotérmica .....                          | 1  |
| 1.1.- El calor del interior de la tierra .....           | 1  |
| 1.1.1.- Manifestaciones superficiales .....              | 2  |
| 1.2.- La energía geotérmica en el mundo .....            | 4  |
| 1.3.- Yacimientos geotérmicos .....                      | 7  |
| 1.3.1.- Sistemas hidrotérmicos .....                     | 8  |
| 1.3.2.- Sistemas geotérmicos de roca seca caliente ..... | 10 |
| 1.4.- Utilización de las fuentes geotérmica .....        | 11 |
| 1.5.- Procesos de conversión .....                       | 12 |

---

|   |    |
|---|----|
| 1.6.- Características de la energía geotérmica. perspectivas futuras..... | 14 |
| 1.7.- España y las fuentes geotérmicas.....                               | 15 |
| 1.8.- El caso geotérmico canario.....                                     | 18 |
| 2.- La energía térmica marina .....                                       | 20 |
| 2.1.- Introducción .....  | 20 |
| 2.2.- Una enorme estación de bombeo.....                                  | 22 |
| 2.3.- Los sinsabores de Georges Claude.....                               | 24 |
| 2.4.- El proyecto Abidjan, económicamente viable.....                     | 28 |
| 2.5.- Los intercambiadores: la mitad del precio de la central.....        | 30 |
| 2.6.- ¿Electricidad, para qué?.....                                       | 32 |
| 2.7.- Investigaciones activas y diversificadas en Estados Unidos.....     | 35 |
| Cuatro tipos de intercambiadores en estudio.....                          | 37 |
| 2.8.- Una energía para el futuro.....                                     | 38 |
| Un ciclo tiene que ser o abierto o cerrado.....                           | 41 |
| Pequeño rendimiento de Carnot, grandes caudales de agua.....              | 42 |
| Bibliografía.....   | 43 |

*ENERGÍAS  
'MARINAS'*

por Luis Cárdenes Guerra

## LA ENERGÍAS “MARINAS”

### QUÉ ES UNA CENTRAL MAREMOTRIZ

Las centrales maremotrices son las que aprovechan la energía de las mareas para producir energía eléctrica. Para ello, en la bahía o estuario donde se asienta la central, deben tener lugar grandes mareas, con diez metros como mínimo de diferencia de nivel entre pleamar y bajamar. En dicho estuario, se construye un dique que permite retener grandes cantidades de agua y en él se practican esclusas para que, con la subida de la marea, se llene de agua el embalse. Al alcanzar la marea su nivel más alto, se cierran las esclusas. Cuando baja el mar y se alcanza cierta diferencia de altura entre el agua del embalse y la del mar, se abren las esclusas de nuevo, dando lugar a la formación de saltos de agua que hacen girar los álabes de una turbina que acciona un alternador.

El tiempo durante el cual la central está en condiciones de producir electricidad puede duplicarse aprovechando el efecto contrario, es decir, manteniendo cerradas las esclusas cuando el embalse está casi vacío y va a comenzar la pleamar. Cuando ésta llega a su punto máximo, se abren de nuevo las esclusas, formándose así los saltos de agua que accionan la turbina. Esta operación requiere que tanto la turbina como el alternador puedan girar indistintamente en uno u otro sentido.

### POSIBILIDADES QUE OFRECE LA ENERGÍA MAREMOTRIZ

Aún cuando la energía potencial contenida en las mareas es considerable -se estima en 22000 Twh (1 Twh=1000 millones de Kwh) la energía disipada por la mareas oceánicas anualmente-, los requisitos naturales necesarios para su aprovechamiento hacen que sólo en determinados lugares del mundo pueda realmente plantearse la instalación de centrales maremotrices.

Por otro lado, la construcción de estas centrales exige unas fuertes inversiones, muy elevadas tanto en comparación con las que son precisas para el aprovechamiento de otras fuentes energéticas como, sobre todo, en comparación con el rendimiento que hoy por hoy alcanzan estas instalaciones, que se caracterizan por su bajo nivel de disponibilidad. Se calcula que sólo unos 200 Twh anuales de energía total de las mareas podrían ser teóricamente recuperables desde el punto de vista técnico y económico.

En definitiva, por razones técnicas y económicas, el desarrollo de este tipo de centrales será forzosamente lento, y tenderá a concentrarse en zonas muy determinadas. En efecto, se estima que más de la mitad de la energía potencial con posibilidades de explotación se halla en sólo cinco áreas: la Bahía de Fundi (Canadá), el estuario del Severn (Gran Bretaña), la costa noroccidental de Francia, la costa al sudeste de China y el Mar de Okhotsk.

En la actualidad, sólo hay cuatro centrales maremotrices funcionando en el mundo. La más importante es la de La Rance (Francia), situada en un estuario con una amplitud media de marea de 8 metros. El primer proyecto para la construcción de esta central data de 1897 y el que condujo a la realización de la instalación actual se llevó a cabo en 1943. La central fue inaugurada en 1966. Posee una presa de 750 metros de longitud y 27 metros de altura, y su potencia es de 240 MW. Su producción media anual está estimada en 540 millones de KWh.

Por su parte, en agosto de 1984 entró en servicio el primer grupo de la central maremotriz de Annapolis, en la bahía de Fundy (Canadá), de 17,8MW de potencia y una producción anual estimada de 50 millones de Kwh. Las otras dos centrales son las de Jiangxia, en China, con 3,2 MW y la de Kislaya-Guba, en la CEI, con 0,4 MW.

El emplazamiento potencial maremotriz más importante se encuentra en Europa, concretamente en el estuario del río Severn (Gran Bretaña). Podría alcanzar una potencia total de 8000 MW. Sin embargo, los análisis que se están desarrollando para evaluar su viabilidad están detectando graves problemas, especialmente por lo que se refiere al coste

de su instalación y a la energía generada. Se trata, pues, de un proyecto que sigue en estudio.

### QUÉ SE PUEDE ESPERAR DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS

El mar proporciona una fuente natural de energía por medio de olas -la potencia media de las olas del Atlántico que llegan a las costas de Europa Occidental se sitúa en unos 250000 MW-. Sin embargo, su conversión en forma de energía realmente utilizable es técnica y económicamente difícil e implica una gran pérdida de potencia.

Se han diseñado varios dispositivos diferentes para convertir la energía de las olas en electricidad y hacerla llegar a la tierra. Unos están concebidos para ser instalados en tierra firme; otros, para su localización en aguas poco profundas y otros, en fin, para aguas profundas (flotadores, boyas de ondulación, alerones, bolsas elásticas, cilindros sumergidos...). En estos dos últimos tipos de diseño, la idea consiste, básicamente en exponer a las olas dispositivos flotantes, en una amplia gama de frecuencias y direcciones, que están sometidos a complejos movimientos tridimensionales.

Para aprovechar este tipo de energía, se necesitan en general estructuras bastante sólidas, complejas y costosas, que puedan proporcionar la estabilidad hidrodinámica precisa para obtener un rendimiento razonablemente alto. Por otro lado, el movimiento oscilatorio de las olas oceánicas se encuentra en un rango de frecuencias de entre 3 y 30 ciclos por minuto, muy inferior a los centenares de revoluciones por minuto que exige la generación de energía eléctrica. La maquinaria necesaria para convertir el lento movimiento de las olas en electricidad es asimismo costosa e implicaría pérdidas adicionales. Por añadidura, para reducir los costes de mantenimiento y de transporte de energía a la tierra, sería aconsejable instalar los dispositivos cerca de la costa o en tierra firme, pero ahí es donde la energía de las olas es mucho menor. En contrapartida, el diseño de un dispositivo eficaz capaz de soportar, con un mantenimiento mínimo, las condiciones climatológicas del mar abierto constituye en sí mismo un gran problema. Por

último, no se pueden olvidar los problemas ecológicos que se derivarían de instalaciones semejantes.

Por todo ello, la energía de las olas realmente aprovechable en la actualidad no es considerable. Y el coste de la electricidad generada en estos sistemas es por el momento muy superior al de la producida con fuentes energéticas convencionales.

Todas estas circunstancias explican que sólo un pequeño número de instalaciones de este tipo se encuentren actualmente en funcionamiento. Otras instalaciones experimentales funcionaron en Suecia, Dinamarca, Japón, etc. durante cortos periodos de tiempo. Existen, sin embargo, proyectos de este tipo en proyecto o desarrollo en un número relativamente amplio de países.

#### INVESTIGACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS EN ESPAÑA

A pesar de ser un país con una extensa costa marítima, España no cuenta con grandes posibilidades de aprovechar la energía de las olas que recibe. Dada la suavidad, en general, del oleaje de la costa mediterránea, tan sólo el Atlántico y el Cantábrico ofrecen potenciales razonables desde el punto de vista teórico.

Así, a comienzos de los años 80 se desarrolló un proyecto de investigación de la costa santanderina que puso de manifiesto la importancia de los costes que se derivarían de la realización de ingente obra civil que sería necesaria para implantar una instalación de aprovechamiento de la energía del oleaje cantábrico.

En la actualidad se está llevando a cabo otro proyecto de investigación, llamado OLAS-1000, cuyo objetivo es el desarrollo, construcción y experimentación de un prototipo de central de 1000 KW para aprovechamiento de la energía de las olas de la costa atlántica.

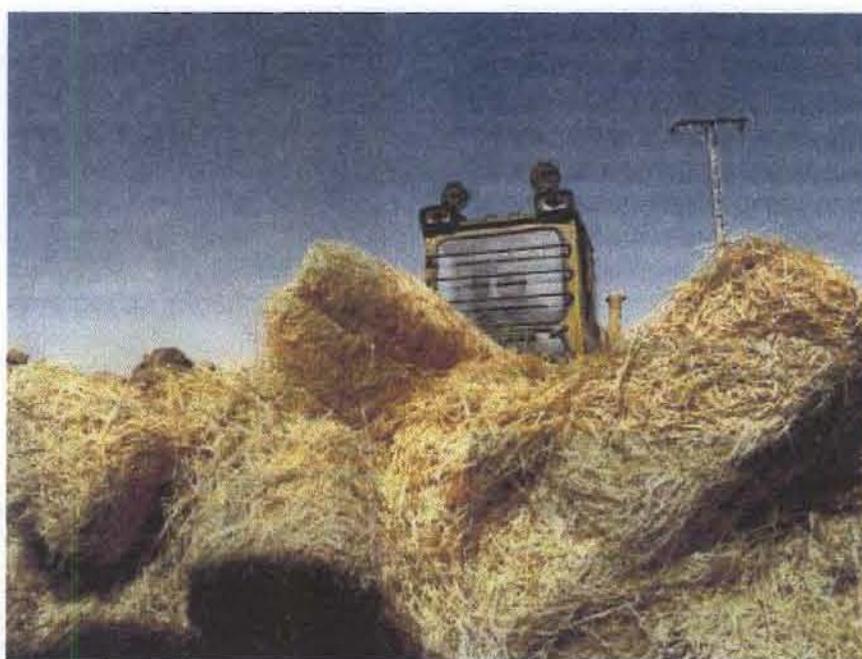
## BIBLIOGRAFÍA

- LA ELECTRICIDAD EN ESPAÑA

Se trata de un trabajo realizado por un equipo de expertos de sociedades eléctricas que integran UNESA. En él se tratan 151 preguntas y respuestas acerca de la producción y consumo de energía eléctrica, fuentes de energía, la nuevas energías, planificación y desarrollo eléctrico, aspectos económicos, la electricidad y el medio ambiente, organización institucional del sector eléctrico y la investigación en el sector eléctrico. Las cuestiones que se tratan son de forma muy escueta.

---

# “ENERGÍA POR BIOMASA”.



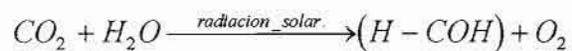
JOSÉ RAMÓN MEDINA CRUZ.

## INTRODUCCIÓN.

De una forma genérica, por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma.

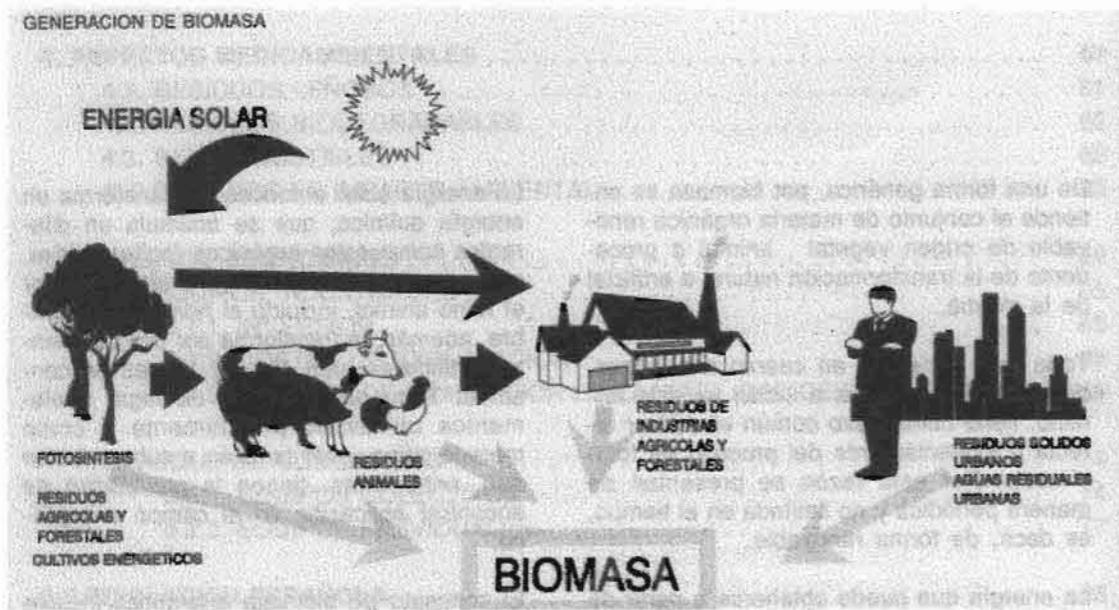
Toda esta variedad, en cuanto a orígenes, de posibles materiales a incluir en este término, tiene como nexo común el derivar directa o indirectamente del proceso de fotosíntesis. Por esta razón se presentan de manera periódica y no limitada en el tiempo, es decir, de forma renovable.

La energía que puede obtenerse a partir de la biomasa proviene de la luz solar, que gracias al proceso de la fotosíntesis es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células vivas, para tomar dióxido de carbono del aire y transformarlo en sustancias orgánicas, según una reacción del tipo:



La energía solar entonces se transforma en energía química, que se acumula en diferentes compuestos orgánicos (polisacáridos, grasas) y es incorporada y transformada por el reino animal, incluido el hombre. El hombre, además, la transforma por procedimientos artificiales para obtener bienes de consumo. Todo este proceso da lugar a elementos utilizables directamente o como materia prima, pero también a subproductos que, entre otras, tienen la posibilidad de encontrar aplicación en el campo energético.

El concepto de biomasa energética incluye los materiales de origen biológico que no pueden ser empleados con fines alimenticios o industriales. De acuerdo con esto, todos los productos agrarios empleados para la alimentación humana y animal, así como los combustibles fósiles (que han sufrido un profundo cambio estructural en su primitiva estructura biológica), están excluidos del término "Biomasa".



### TIPOS DE BIOMASA.

Teniendo en cuenta la definición de biomasa, ésta se puede clasificar, atendiendo a su origen, en:

a) Biomasa Natural, que es la que se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente, aunque sea una de las principales fuentes energéticas de los países subdesarrollados.

b) Biomasa Residual, que incluye:

- Residuos Forestales y Agrícolas.
- Residuos de Industrias Forestales y Agrícolas.
- Residuos Sólidos Urbanos.
- Residuos Biodegradables (Efluentes ganaderos, lodos de depuradores, aguas residuales urbanas....)

c) Cultivos Energéticos, que son los realizados con el único objeto de su aprovechamiento energético y se caracterizan por una gran producción de materia viva por unidad de tiempo y con el condicionante de minimizar los cuidados al cultivo.

d) Excedentes Agrícolas. Los excedentes agrícolas que no sean empleados en la alimentación humana pueden ser considerados como biomasa y pueden aprovecharse, por ejemplo, para la elaboración de biocombustibles líquidos.

#### APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA.

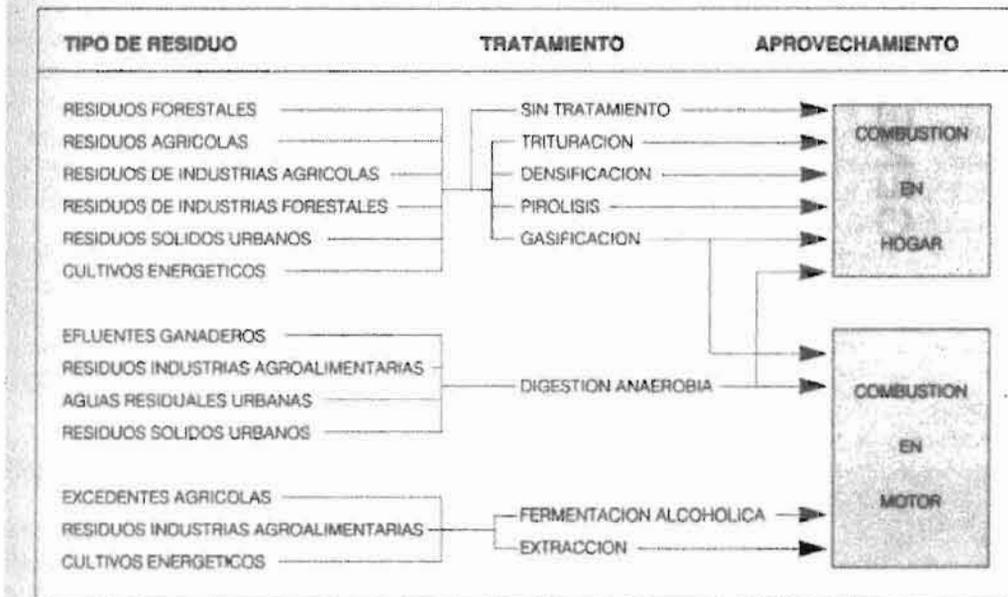
La biomasa puede ser transformada en una amplia variedad de productos líquidos, sólidos o gaseosos interesantes desde el punto de vista energético, industrial y agrícola. Los procesos de valorización se pueden dividir en físicos, termoquímicos y bioquímicos.

Procesos físicos: consistentes en la alteración de las características físicas del material.

Procesos bioquímicos: se desarrollan por el crecimiento de microorganismos que degradan la materia orgánica dando lugar a unos productos con interés energético.

En la figura, aparecen asociados, a los diversos tipos de recursos comprendidos en la biomasa, las fórmulas de valorización más apropiadas, correspondientes a cada tipo de proceso. Igualmente se indican, asociados a cada proceso, los procedimientos de aprovechamiento energético.

DISTINTOS TRATAMIENTOS DE LA BIOMASA



## 2. SITUACIÓN ACTUAL.

Con el fin de obtener una panorámica general del estado del aprovechamiento de la biomasa, en este apartado se enuncian aquellas tecnologías que se encuentran generalizadas a nivel comercial, así como aquellas que están en fase de desarrollo. Se incluyen además las consideraciones relativas a los recursos existentes.

### TECNOLOGÍAS EN FASE COMERCIAL.

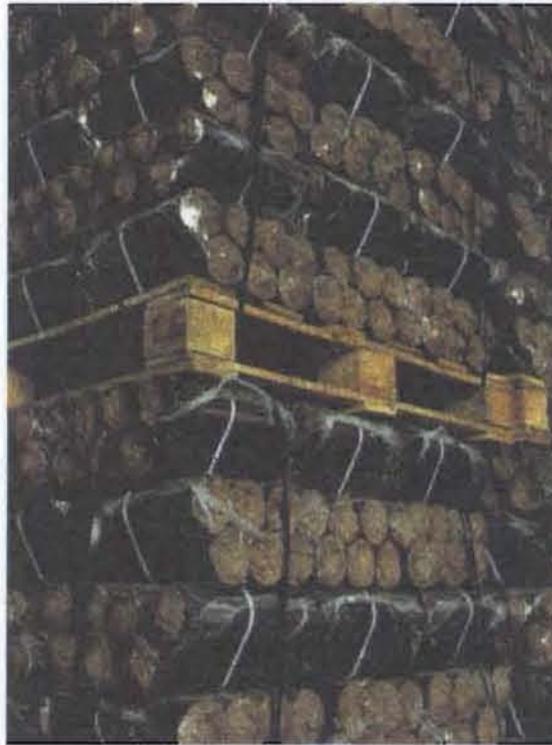
Con una gran diferencia la principal aplicación de la biomasa es la combustión directa es con transformaciones físicas de materiales de origen forestal o agrícola, o bien generados en las industrias de transformación de los mismos.

Una de las principales utilidades de la biomasa corresponde a su uso como combustible en establecimientos industriales. Los equipos disponibles hoy día en el mercado cubren una amplia gama de necesidades, con un rendimiento satisfactorio. Estos equipos pueden funcionar con distintos tipos de combustibles (líquidos, granulares, sólidos...) y generar todos los fluidos térmicos que las industrias requieran

(aire y gases calientes, vapor, aceite térmico, agua sobrecalentada...), sin que el empleo de biomasa como combustible genere problemas en los sistemas de producción.

Otra de las aplicaciones de la biomasa como fuente energética se encuentra en la calefacción dentro del sector doméstico. En la actualidad, para satisfacer esta demanda existen en el mercado diferentes equipos (estufas, calderas, cocinas) de nuevo diseño con alto rendimiento, que coexisten con las chimeneas y hogares tradicionales.

Como tratamiento en fase comercial es de gran interés, la elaboración de productos densificados (briquetas, pellets) a partir de biomasa residual de origen agrícola o forestal. Estos productos son aplicables en la industria y en el sector doméstico y destacan por su fácil manipulación y sus propiedades beneficiosas para la conservación del medio ambiente.



Briquetas.

Dentro de las tecnologías en fase comercial, también son importantes, las relativas a la extracción del residuo del monte o campo, con equipos móviles de trituración o astillado.

El otro gran apartado de tecnologías en fase comercial son las referidas a la valorización de los Residuos Sólidos Urbanos, que por sus características diferenciales en cuanto a la naturaleza de recursos y tecnologías de aprovechamiento, deben tratarse de forma independiente.

#### TECNOLOGÍAS EN FASE DE DESARROLLO.

Los procesos de tratamiento más importantes, que no han alcanzado un grado de desarrollo tecnológico suficiente o que no se encuentran generalizados comercialmente, son:

- Gasificación (Elaboración de gasógeno o gas pobre).
- Pirólisis (elaboración de carbón vegetal a nivel industrial).
- Biometanización (generación de biogás).
- Fermentación alcohólica (elaboración de combustibles líquidos de origen vegetal).
- Transesterificación de aceites de semillas (para obtención de bio-diesel).

#### RECURSOS Y SITUACIÓN EN ESPAÑA.

Los datos que figuran a continuación referidos a la valoración de las disponibilidades de recursos agrícolas y forestales, proceden de un inventario realizado por ENADIMSA en el año 83. Aunque con posterioridad se han realizado trabajos similares estos se refieren a zonas geográficas parciales o topes de residuos mas particulares, por lo que se ha utilizado la fuente indicada con el fin de mantener la homogeneidad.

En el cuadro puede observarse una valoración de los recursos disponibles.

EVALUACION DEL POTENCIAL UTILIZABLE Y  
CONSUMO ENERGETICO

| Tipo de residuo                         | Recursos potenciales<br>10 <sup>6</sup> TEP/A | Recursos utilizables<br>10 <sup>6</sup> TEP/A | Consumo energet. real<br>10 <sup>6</sup> TEP/A |
|---|---|---|--|
| Cultivos forestales y agrícolas .....   | 13,8  | 7,2   | 0,71   |
| Industrias forestales y agrícolas ..... | 2,2   | 1,6   | 1,62   |
| Biodegradables (*) .....                | 1,2   | 0,7   | 0,01   |
| Residuos sólidos urbanos .....          | 1,2   | 0,5   | 0,03   |
| <b>Totales .....</b>                    | <b>18,4</b>                                   | <b>10,0</b>                                   | <b>2,4</b>                                     |

De cada apartado del cuadro pueden hacerse las siguientes acotaciones:

## RECURSOS POTENCIALES.

Los recursos potenciales han sido evaluados en 18,4 millones de tep/año, incluyendo en cada caso:

- Todos los recursos forestales y agrícolas, sin atender, entre otras circunstancias a su posibilidad real de explotación, los usos que se le dan distintos del energético, etc....

- Todos los recursos procedentes de industrias forestales y agrícolas, incluyendo subproductos que por su valor o características tienen aprovechamientos distintos del energético.

- Los residuos biodegradables incluyen residuos de animal vivo, residuos de animal muerto y lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas, tratables mediante digestión anaerobia.

- Los residuos sólidos urbanos generados por toda la población nacional.

## RECURSOS UTILIZABLES.

Los recursos utilizables han sido estimados en 10 millones de tep/año, atendiendo a los siguientes factores:

- Los recursos forestales y agrícolas utilizables lo son en función de las tecnologías existentes. La distribución de residuos forestales y agrícolas por Comunidad Autónomas se presentan en siguiente cuadro.

CUANTIFICACION DE RECURSOS AGRICOLAS  
Y FORESTALES UTILIZABLES

| Comunidad Autónoma       | Total residuos forestales (TEP/año) | Total residuos agrícolas (TEP/año) | Total residuos utilizables (TEP/año) |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Andalucía .....          | 220.851                             | 610.654                            | 831.505                              |
| Aragón .....             | 88.937                              | 561.185                            | 650.122                              |
| Asturias .....           | 81.220                              | 17.001                             | 98.221                               |
| Baleares .....           | 8.472                               | 18.336                             | 26.808                               |
| Canarias .....           | 19.139                              | 1.467                              | 20.606                               |
| Cantabria .....          | 76.212                              | 11.467                             | 87.680                               |
| Castilla y León .....    | 272.197                             | 1.025.359                          | 1.297.556                            |
| Castilla-La Mancha ..... | 135.344                             | 716.709                            | 852.052                              |
| Cataluña .....           | 66.231                              | 384.551                            | 450.782                              |
| Extremadura .....        | 172.044                             | 247.984                            | 420.028                              |
| Galicia .....            | 287.288                             | 214.749                            | 502.038                              |
| La Rioja .....           | 38.792                              | 57.583                             | 96.375                               |
| Madrid .....             | 10.495                              | 64.550                             | 75.045                               |
| Murcia .....             | 37.797                              | 65.098                             | 102.896                              |
| Navarra .....            | 70.004                              | 45.538                             | 115.542                              |
| Valencia .....           | 70.382                              | 150.638                            | 221.020                              |
| País Vasco .....         | 95.591                              | 477.125                            | 572.716                              |
| <b>Totales .....</b>     | <b>1.750.998</b>                    | <b>4.669.993</b>                   | <b>6.420.991</b>                     |

- Los recursos de industrias forestales y agrícolas utilizables no tienen ningún valor distinto del puramente energético.

- Los residuos biodegradables utilizables provienen de su aprovechamiento con las técnicas actualmente disponibles.

- Los residuos sólidos urbanos utilizables, por las características del proceso de aprovechamiento, provienen de núcleos de población de más de 10.000 habitantes.

En siguiente cuadro aparece la distribución por Comunidades Autónomas de los diversos tipos de residuos utilizables.

RECURSOS DE BIOMASA UTILIZABLES POR  
COMUNIDADES AUTÓNOMAS

| Comunidad Autónoma         | Recursos forestales y agrícolas (*) | Recursos industrias F. Y A. | Residuos biodegradables | R.S.U.         | Total utilizable |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|------------------|
| Andalucía .....            | 945.483                             | 433.583                     | —                       | 78.751         | 1.457.817        |
| Aragón .....               | 672.602                             | 41.466                      | —                       | 17.471         | 731.539          |
| Asturias .....             | 152.122                             | 82.024                      | —                       | 13.565         | 247.711          |
| Baleares .....             | 51.787                              | 6.020                       | —                       | 9.551          | 67.358           |
| Canarias.....              | 20.606                              | 75                          | —                       | 21.002         | 41.683           |
| Cantabria.....             | 102.182                             | 13.321                      | —                       | 5.733          | 121.236          |
| Castilla-La Mancha .....   | 881.002                             | 95.177                      | —                       | 3.772          | 979.951          |
| Castilla y León .....      | 1.391.926                           | 46.785                      | —                       | 23.605         | 1.462.316        |
| Cataluña.....              | 527.361                             | 199.333                     | —                       | 90.144         | 816.838          |
| Comunidad Valenciana ..... | 244.137                             | 74.329                      | —                       | 39.624         | 358.090          |
| Extremadura .....          | 453.993                             | 16.366                      | —                       | 3.712          | 474.071          |
| Galicia .....              | 617.047                             | 142.021                     | —                       | 18.914         | 777.982          |
| Madrid .....               | 95.199                              | 9.748                       | —                       | 120.093        | 225.040          |
| Murcia .....               | 116.559                             | 18.948                      | —                       | 14.668         | 150.175          |
| Navarra .....              | 170.840                             | 68.316                      | —                       | 5.432          | 244.588          |
| País Vasco .....           | 587.371                             | 306.662                     | —                       | 26.364         | 920.397          |
| La Rioja .....             | 109.093                             | 14.176                      | —                       | 3.598          | 126.867          |
| <b>Totales .....</b>       | <b>7.139.309</b>                    | <b>1.568.350</b>            | <b>740.191</b>          | <b>495.998</b> | <b>9.943.848</b> |

## CONSUMO ENERGÉTICO.

El consumo de biomasa en España de situó en 1990 en 2,42 millones de Tep/año, pudiendo destacarse los siguientes hechos:

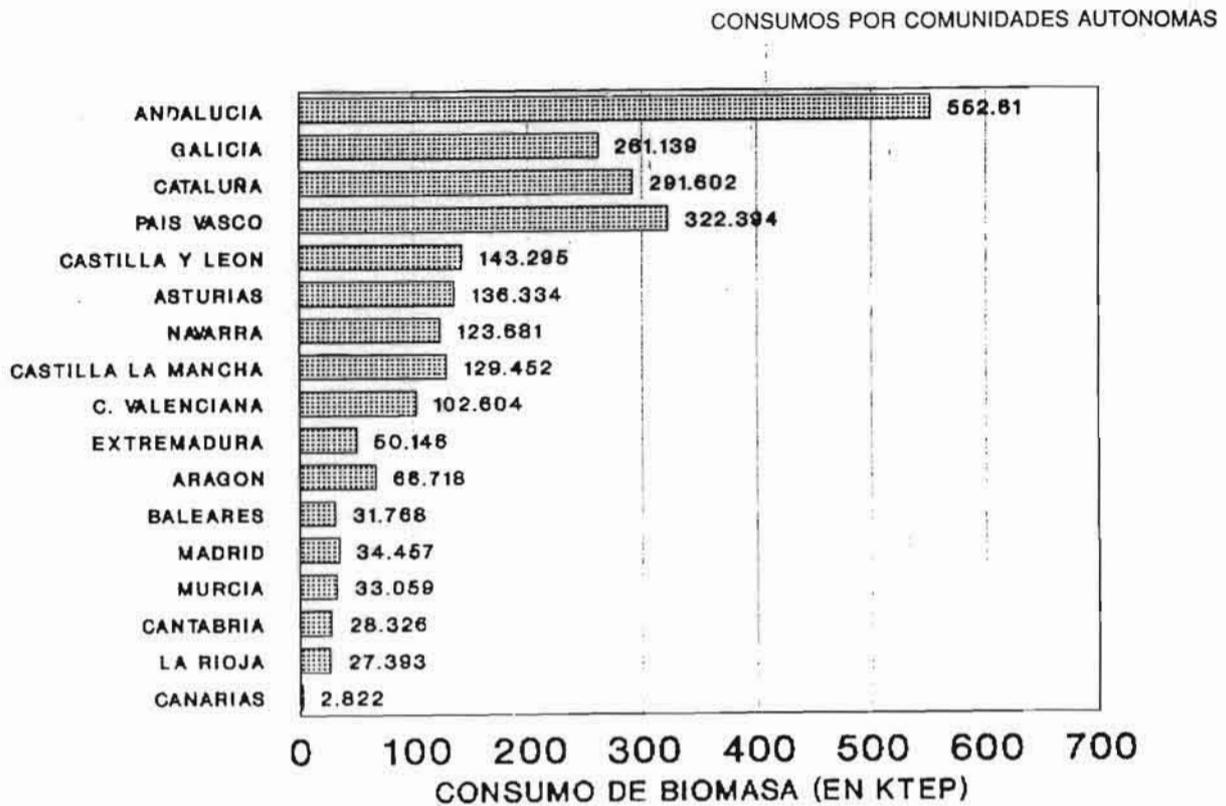
- El aprovechamiento energético de los recursos forestales y agrícolas se realiza casi en su totalidad en el sector doméstico, que los emplea en forma de leñas o de materiales con bajo nivel de tratamiento, y provienen en su mayor parte de biomásas no residuales.

- Los recursos de industrias forestales y agrícolas se emplean como combustibles dentro del propio sector industrial, aunque en ocasiones se destinan al consumo doméstico directamente o mediante la elaboración de briquetas o pellets.

- El aprovechamiento cuantificado de los residuos biodegradables se realiza en establecimientos ganaderos y de industrias forestales o agrícolas.

- El consumo energético procedente de los R. S. U. proviene de las instalaciones de incineración con aprovechamiento energético que funcionan en la actualidad.

En tabla a continuación se muestra la distribución por Comunidades Autónomas del consumo actual de biomasa, incluyendo tanto aquella que se utiliza en el sector industrial como el doméstico.

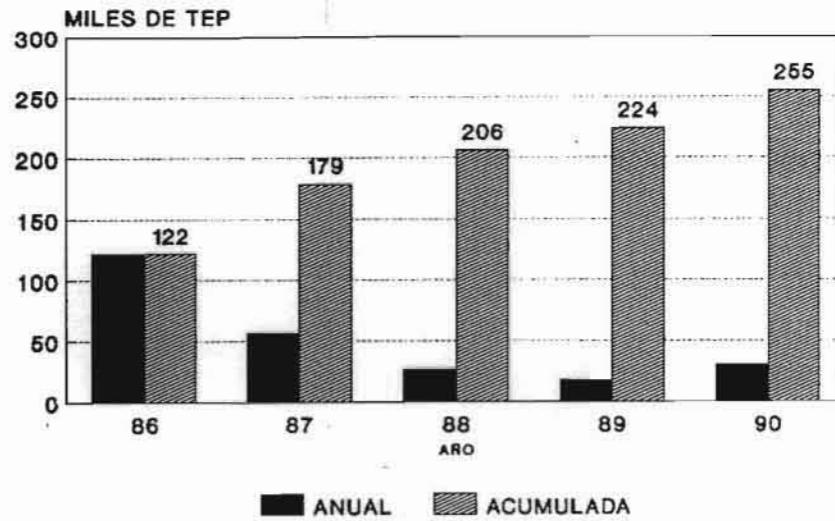


El incremento del consumo actual de la biomasa en España ha sido significativo en los últimos años. poniéndose en marcha, en el período 86-90, instalaciones que consumen 225.000 Tep/año. Precisamente en 1986 nació el Plan de Energías Renovables (PER-86), surgido de la necesidad de poner en practica una serie de medidas concretas para propiciar la introducción de las energías renovables allí donde pudieran ser una solución económica y segura. Una vez terminado el periodo 1986-1988, debido fundamentalmente al cambio drástico del escenario de precios se hizo necesaria la formulación de un nuevo conjunto de objetivos y acciones que se plasmaron en el II Plan de Energías Renovables (PER-89).

En la siguiente tabla aparecen la evolución del incremento en el consumo de biomasa vegetal experimentada en España en los últimos años. Como se puede observar

tras un elevado nivel de sustitución experimentado en el año 86 las bajadas de los precios de los combustibles derivados del petróleo producidas en ese año condujeron a menores niveles de incremento en años posteriores.

EVOLUCION DE LA SUSTITUCION POR BIOMASA  
EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

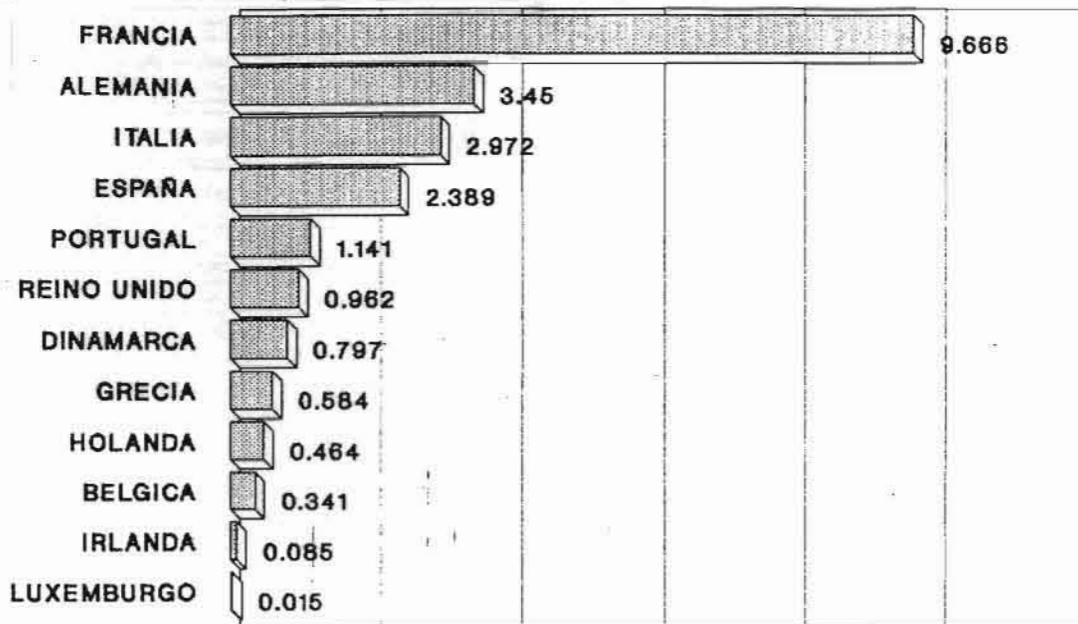


TOTAL SUSTITUCION: 255.000 TEP

#### SITUACIÓN EN LA COMUNIDAD EUROPEA.

En la tabla aparece el consumo de biomasa en los distintos países miembros de la Comunidad Europea referido al año 89.

## CONSUMOS DE BIOMASA EN LA CE



CONSUMO DE BIOMASA EN Mtep

El conjunto supone un consumo de más de 22 millones de tep/año lo cual representa más de 2,4 % de la demanda energética comunitaria.

## SITUACIÓN DE APLICACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.

respecto a la última de las tecnologías señaladas como en fase de desarrollo, es decir la producción y consumo de biocombustibles, orientados a su aplicación en el sector transporte, existe un grado muy avanzado de utilización en determinados países. Esto es debido a que se ha desarrollado una política intensa para su aplicación.

En Brasil, por ejemplo, se consumen anualmente del orden de 12.000 millones de litros de alcohol, lo cual representa un 20 % del consumo de combustibles líquidos que se demanda en el país. Aproximadamente 4,2 millones de coches (el 40 % del total) utilizan etanol puro, en motores especiales, y el resto consume mezclas con un contenido entre el 12 % y el 22 % de alcohol.

En Estados Unidos, así mismo, se consumen anualmente 3.500 millones de litros de alcohol, procedentes de la transformación de 10 millones de Tm. de cereales. Aproximadamente 10 millones de vehículos queman una mezcla que contiene un 10 % de alcohol.

Hay que destacar que las políticas que han conducido a la situación mencionada en ambos países son diferentes. En el caso de Brasil se ha tratado de mejorar substancialmente la balanza energética; mientras que en USA, la motivación principal ha sido resolver el problema de los excedentes agrícolas.

### **3. ASPECTOS TÉCNICOS.**

En este apartado se muestran diferentes aspectos técnicos relacionados con el aprovechamiento de la biomasa, presentándose por una parte los distintos tipos de residuos utilizables, y por otra, algunos conceptos relacionados con la gestión de los mismos. Se ha prestado especial atención a los mismos. Se ha prestado especial atención a los residuos de tipo leñoso por su importancia cuantitativa, así como por la competitividad y grado de desarrollo de las distintas tecnologías relacionadas con ellos.

- **CARACTERIZACION DE LOS RECURSOS.**

A continuación se realiza un revisión de los diferentes recursos de la biomasa utilizables para energía poniendo especial énfasis en su generación. En las tablas siguientes se muestran resúmenes de los residuos generados en distintos procesos, atendiendo al origen de los mismos.

## ORIGEN, PROCESOS Y TIPOS DE RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS (FORESTALES Y AGRICOLAS)

| Recurso             | Proceso generador                                    | Residuos                                       | Destino                                 |  |
|---------------------|--|--|---|--|
| Residuos forestales | Tratamientos selvícolas (entresacas, clareos, podas) | Pies no maderables, ramas, matorrales...       | Combustibles                            |  |
|                     | Cortas de pies maderables                            | Copas, ramas, rabeón...                        | Combustibles<br>Industrias de la madera |  |
| Residuos agrícolas  | Podas de cultivos leñosos                            | Restos de podas, ramas, ramones                | Combustibles<br>Alimentación animal     |  |
|                     | Restos de cultivos herbáceos                         | Industriales (algodón, tabaco, oleaginosas...) | Plantas verdes, Tallos, otros restos    | Alimentación animal<br>Combustibles<br>Fertilizantes   |
|                     |  | Cereales de invierno (Trigo, cebada...)        | Pajas                                   | Alimentación animal<br>Camas de ganado<br>Combustibles |
|                     |  | Cereales de primavera (maíz, sorgo...)         | Tallos, zuros, cascarillas              | Alimentación animal<br>Combustibles                    |

## ORIGEN, PROCESOS Y TIPOS DE RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS (INDUSTRIAS FORESTALES, AGRICOLAS Y AGROALIMENTARIAS)

| Recurso   | Proceso generador                              | Residuos  | Destino  |
|---|--|---|--|
| Residuos de industrias forestales                   | Aserraderos                                    | Serrines, virutas, costeros, cortezas                   | Industrias de la madera, combustibles  |
|   | Productos semielaborados de madera             | Serrines, astillas, virutas, curros, recortes, cortezas | Indust. de la madera, camas de ganado, combustibles                                  |
|   | Productos de corcho                            | Panas de baja calidad, polvo de corcho, corcho negro    | Otras industrias del corcho, combustibles  |
|   | Fabricación de muebles de madera               | Serrines, virutas, recortes                             | Industrias de la madera, combustibles  |
|   | Fabric. de piezas de torneía, molduras y otros | Serrines, virutas                                       | Indust. de la madera, camas de ganado, combustibles                                  |
|   | Fabricación de pasta y papel                   | Cortezas, serrines, licor negro, lodos de depurad.      | Combustibles, generación de biogás   |
| Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias | Fabricación de aceite de oliva                 | Orujo graso, alpechines                                 | Extracción de aceites  |
|   | Extracción de aceite de orujo                  | Orujillo, oleinas                                       | Combustibles, alimentación animal  |
|   | Extracción de aceites de semillas              | Cáscaras, tortas agotadas                               | Alimentación animal, combustibles  |
|   | Sacrificio de ganado                           | Sebos, recortes de piel                                 | M. primas, Otras industrias  |
|   | Preparación de arroz                           | Cascarilla, cilindro                                    | Combustibles, alimentación animal  |
|   | Fabricación de azúcar                          | Melazas, bagazos, lodos de dep. pulpa agot.             | Aliment. animal, generación de biogás, comb.   |
|   | Elaboración de frutos secos                    | Cáscaras, pieles  | Comb., extracción aceites y esencias   |
|   | Industria vinícola                             | Raspones, orujos, lías, vinazas                         | Destilación de alcohol, combustibles   |
|   | Fabricación de alcoholes etílicos              | Granilla, hollejo, orujillo, vinazas                    | Alimentación animal, generación de biogás  |
|   | Fabricación de conservas animales              | Residuos frescos  | M. primas, otras indust., generación de biogás                                       |
|   | Fabricación de conservas vegetales             | Residuos frescos, huesos, semillas, pieles              | M. primas, otras indust., aliment. animal, extracc. aceites y esencias, combustibles |
|   | Elaboración de cerveza y malta                 | Bagazo, lodos de depuración                             | Alimentación animal, generación de biogás  |
|   | Industrias del tabaco                          | Polvos de tabaco, yagüas                                | Sin aprovechamiento actual   |
|   | Industrias del café                            | Marros, cascarilla                                      | Combustibles   |
|   | Preparación de algodón                         | Semillas, restos de desmolado                           | Alimentación animal, combustibles  |

ORIGEN, PROCESOS Y TIPOS DE RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS  
(BIODEGRADABLES, CULTIVOS ENERGETICOS Y EXCEDENTES AGRICOLAS)

| Recurso                                       | Proceso generador  | Residuos  | Destino  |
|---|--|---|--|
| <b>Residuos biodegradables</b>                | Residuos de animal vivo  | Yacijas, purines, estiércoles...  | Abonos<br>Generación de biogás   |
|   | Residuos de animal muerto  | Sangres, huesos, sebos, pellejos  | Otras industrias alimentarias<br>Alimentación animal<br>Generación de biogás |
|   | Depuración de efluentes urbanos y de industrias agrícolas y forestales | Lodos de depuradora   | Generación de biogás   |
| <b>Cult. energéticos<br/>Exced. agrícolas</b> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>— Cultivos</li> <li>— Excedentes</li> <li>— Residuos industriales</li> <li>— Residuos de cultivos</li> </ul> | Biocombustibles  |

• RESIDUOS FORESTALES Y AGRÍCOLAS.

Entre estos recursos se incluyen todos los que generan directamente en el campo o monte, de forma dispersa.

- RESIDUOS FORESTALES.

Los residuos de origen forestal pueden dividirse en:

- Residuos de tratamientos selvícolas.
- Residuos de corta de pies maderables.

Los primeros provienen de la necesidad de realizar tratamientos selvícolas para el mantenimiento y mejora de los montes y masas forestales mediante entresacas, podas, limpieza de matorrales, etc... Estos trabajos generan unos residuos (leñas, ramas y matorrales) que deben ser retirados del monte pues son un factor de riesgo importantísimo para la propagación de plagas y de incendios forestales.

En segundo grupo, los residuos procedentes de la corta de pies maderables, y constituyen cerca de la tercera parte del árbol. Como en el caso anterior, si no se retiran se convierten en factor de alto riesgo. Los dos grupos de residuos se generan por necesidades forestales, no energéticas, y son materiales que no tienen calidad suficiente para otras aplicaciones que no sean las energéticas.

No se catalogan como residuos forestales los combustibles provenientes del aprovechamiento tradicional de masas forestales, que suministran leñas para consumo doméstico o de pequeñas industrias, y que son una buena parte de la biomasa hoy utilizada.

#### - RESIDUOS AGRÍCOLAS.

Los residuos agrícolas más importantes pueden agruparse según dos tipologías:

- Residuos de cultivos leñosos.
- Residuos de cultivos herbáceos.

Estos residuos en todos los casos presentan una marcada estacionalidad, tanto por el momento de su producción, como por la necesidad de retirarlos del campo en el menor tiempo posible para no interferir otras tareas agrícolas, y evitar la propagación de plagas o incendios. También, estos residuos (preferentemente los herbáceos), se ven afectados por la posibilidad de ser empleados en su totalidad o en parte para la alimentación animal.

De los residuos agrícolas leñosos podremos destacar los generados en las podas realizadas en olivos, videos y frutales, como almendros, naranjos, manzanos, etc.....

Los olivos precisan de podas bianuales, que generan leñas (diámetro mayor de 7 cm.) aprovechadas como combustible en el sector doméstico y ramas o ramones, que ocasionalmente se emplean en alimentación animal y más frecuentemente son amontonados e incinerados en el campo sin ningún aprovechamiento.

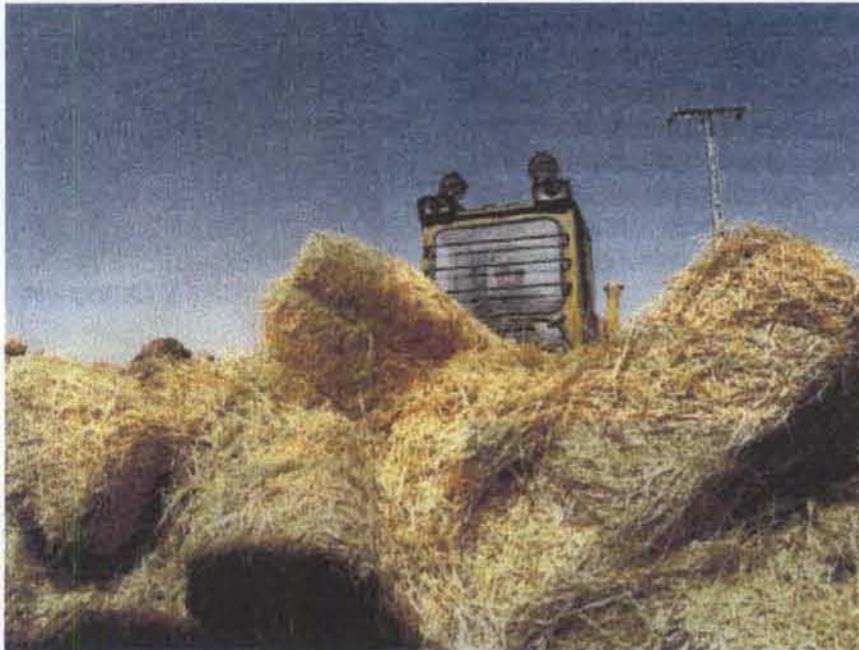
Los viñedos se podan anualmente, y los sarmientos, en ocasiones, se emplean en el sector doméstico como combustible casi exclusivamente.

Las podas de frutales son empleadas ocasionalmente como combustibles domésticos, cuando el tamaño es suficiente o bien incinerados en el campo. Merece destacarse la posibilidad de ser usados para alimentación animal de una parte de los residuos procedentes de cítricos, olivo, etc....

El otro gran grupo de residuos agrícolas lo constituyen los residuos herbáceos, siempre en gran competencia con los otros usos agropecuarios (piensos y camas). Para su tratamiento pueden separarse en:

- Cereales de invierno.
- Cereales de primavera.
- Cultivos de finalidad industrial.

Los cereales de invierno (trigo, cebada, centeno, etc...) generan como residuos las "pajas", que en ocasiones quedan en el campo y no son empleadas.



De los cereales de primavera (maíz, sorgo, arroz, etc...) tiene importancia el maíz, que genera el “zuro” (resultado de desgranar la mazorca), empleado alternativamente como combustible o para alimento animal; y el “cañote” (tallo).

Los cultivos herbáceos industriales incluirían plantas muy diversas (tabaco, algodón, remolacha, girasol...). De todos ellos, pueden tener interés energético las oleaginosas, parte de cuyos residuos quedan en el campo tras la recolección.

- RESIDUOS DE INDUSTRIAS FORESTALES.

Todas las actividades industriales del sector de la madera generan residuos susceptibles de ser empleados como combustible.

Un factor muy importante relacionado con el destino último del residuo (combustible, vertido o materia prima) es la cantidad de residuos generados por cada establecimiento o bien la distribución geográfica de las factorías. Cuando un establecimiento generan un gran volumen de restos de madera, o diversos establecimientos se concentran en un área determinada, los residuos son recogidos y aprovechados como materias primas en otras industrias de la madera. En el caso contrario suelen ser empleados como combustibles para uso doméstico o industrial en zonas circundantes.

De todos los establecimientos del sector de la madera los más importantes por la cantidad de residuos o subproductos generados son:

A) Aserraderos o industrias de primera transformación de la madera. En estos establecimientos de la madera. En estos establecimientos se generan:

- Serrines, que pueden suponer hasta el 15 % de la madera procesada y según su calidad y características pueden ser empleados como materia prima o combustible. Ocasionalmente se emplea para limpieza y como cama de ganado.
- Costeros y recortes, que también son aproximadamente un 15 % de la madera procesada, y que previa molienda son usados como materias primas en otras

industrias forestales (papel, fábricas de tableros, etc....) o bien como combustible.

- Cortezas, que suelen ser un 10 % del volumen, aunque esta proporción varíe enormemente en función de la clase de madera procesada. Su destino más usual es como combustible, aunque puede emplearse como substrato para hongos comestibles e incluso en pistas de equitación.

B) Fabricación de productos elaborados de madera. Estos establecimientos pueden generar diversos tipos de residuos, derivados de los procesos de fabricación, que se emplean nuevamente como materias primas, o bien como combustibles en la propia industria, ya que en estos establecimientos pueden existir importantes necesidades energéticas térmicas en prensas, secaderos y calefacción . Los residuos más usuales son serrines, recortes , polvo de lijado, centros de desenrollo, chapas de mala calidad, etc....

C) Fabricación de productos de corcho. Dentro de la industria del corcho, el proceso que mayor cantidad de residuos genera es la fabricación de tapones. Los residuos son empleados en otras industrias del corcho (aglomerados, forros, aislantes), siendo por lo general el único desecho importante el polvo de corcho, que se vierte o se emplea como combustible. Los procesos de elaboración de productos de corcho tienen un consumo térmico que es suplido mediante los propios residuos y en muchos casos con otras biomásas de origen vegetal.

D) Fabricación de pasta de papel. Las industrias de este sector presentan importantes consumos térmicos, que son cubiertos en gran parte a partir de residuos generados en los propios establecimientos. Los combustibles más empleados son cortezas, serrines y lejías negras. Las lejías negras o licores negros representan en este sector una parte muy importante de su consumo y en su combustión se combinan la necesidad de recuperación de las materias primas minerales contenidas en el licor negro y el aprovechamiento energético del proceso para la generación de vapor y agua caliente para la fabricación.

- RESIDUOS DE INDUSTRIAS AGRÍCOLAS Y AGROALIMENTARIAS.

La mayor parte de los residuos generados por las industrias agrícolas y agroalimentarias no pueden ser considerados estrictamente como tales, ya que en muchas ocasiones son realmente subproductos que se emplean como materia prima en otras industrias. De todas las que aparecen en la tabla B merecen destacarse por su importancia cuantitativa:

- A) Fabricación de aceite de oliva.
- B) Extracción de aceite de orujo de aceituna.



Materia prima para extracción de aceite de orujo de aceituna.

- C) Extracción de aceite de semillas.
- D) Elaboración de frutos secos.
- E) Industrias vinícolas.
- F) Elaboración de alcoholes etílicos.
- G) Industria conservera.
- F) Fabricación de cerveza y malta.

- RESIDUOS BIODEGRADABLES.

Los residuos biodegradables engloban una serie de subproductos susceptibles de ser transformados mediante el mecanismo de degradación anaerobia descomponiéndose y dando lugar a un fracción en estado gaseoso.

Los residuos para los cuales se puede aplicar el proceso de digestión anaerobia, se caracterizan por su alto contenido en humedad, Aunque en principio puede servir como materia prima para el proceso todo tipo de biomasa, con solo cumplir la condición anterior. La viabilidad del tratamiento depende de una serie de factores, relacionados con su composición y contenido en nutrientes, dado que se trata de un proceso biológico. Por ello, los residuos que usualmente se asocian a este proceso son:

- Residuos ganaderos de animal vivo.
- Residuos ganaderos de animal muerto.
- Residuos de industrias agroalimentarias.
- Lodos de depuradoras de aguas urbanas.

- CULTIVOS ENERGÉTICOS Y EXCEDENTES AGRÍCOLAS.

Existen determinados cultivos que se realizan exclusivamente de cara a su aprovechamiento energético. También pueden tener un aprovechamiento energético distintos tipos de productos agrícolas (cereales, remolacha, etc...).

Se pueden diferenciar dos tipos de cultivos energéticos:

1) Los orientados a la producción de materiales leñosos, mediante especies de crecimiento rápido y con turnos de aprovechamiento de ciclo corto (Monte bajo). Estos materiales pueden ser orientados a un aprovechamiento vía termoquímica o a la obtención de biocombustibles.

2) Los orientados a la producción de otros tipos de materiales vegetales mediante especies de ciclo anual, destinada a la obtención de biocombustibles.

A partir de los productos derivados de los cultivos energéticos y los excedentes agrarios pueden obtenerse, mediante diversos tipos de procesos industriales combustibles líquidos capaces de sustituir total o parcialmente a los combustibles fósiles convencionales que se emplean en motores de vehículos (biocombustibles).

Es posible utilizar como combustible el etanol obtenido a partir de materiales vegetales. Cualquier producto que contenga azúcares o hidratos de carbono fermentables, almidón o celulosa puede servir como materia prima para la obtención de alcoholes, aunque en muchos casos el rendimiento de los distintos hace desaconsejable su uso. Las materias primas se clasifican en tres grupos que son:

- Azucaradas.
- Amiláceas.
- Celulósicas.

También es posible utilizar como combustible el resultante del proceso de esterificación de diferentes aceites vegetales. Para la obtención de ciertos aceites se pueden emplear productos oleaginosos tales como la colza, girasol, etc...

- **GESTIÓN DE RESIDUOS LEÑOSOS.**

Con el objetivo de promocionar la utilización de estos recursos, el IDAE inicio el año 84 un programa de actuaciones para la transformación del residuo y su comercialización, intentando ganar la confianza del usuario sobre la base de un suministro estable en precio, cantidad y calidad. Esta actividad se caracteriza por la baja densidad energética de los materiales y estar, sin embargo, sometida a importantes restricciones geográficas.

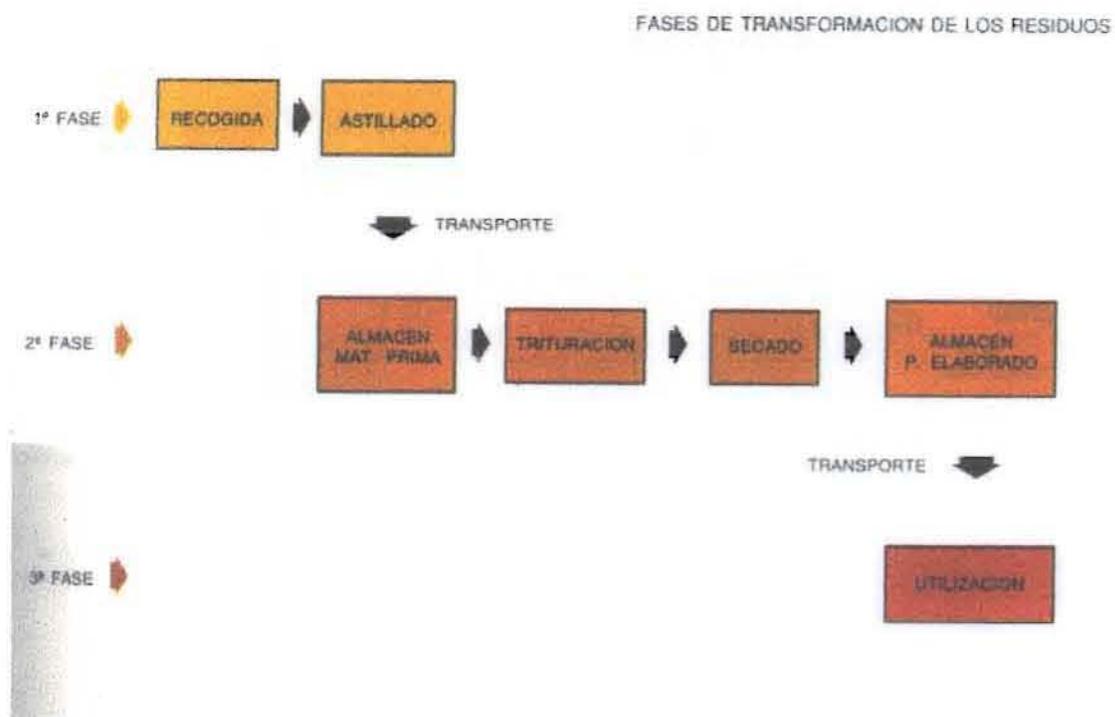
Según este planteamiento se pueden considerar 3 fases que completan el proceso generación, transformación y utilización.

1º Fase: desarrollada en el campo, comprende la realización de los trabajos que generan los residuos (poda, desbroce, ...), la recogida y astillado mediante equipos móviles.

2º Fase: tiene lugar en planta fija localizada en las proximidades de la zona de generación y de consumo. Su finalidad es servir como almacén regulador y adaptar el producto hasta conseguir las características finales.

3º Fase: consiste en el aprovechamiento energético del producto de la fase activa.

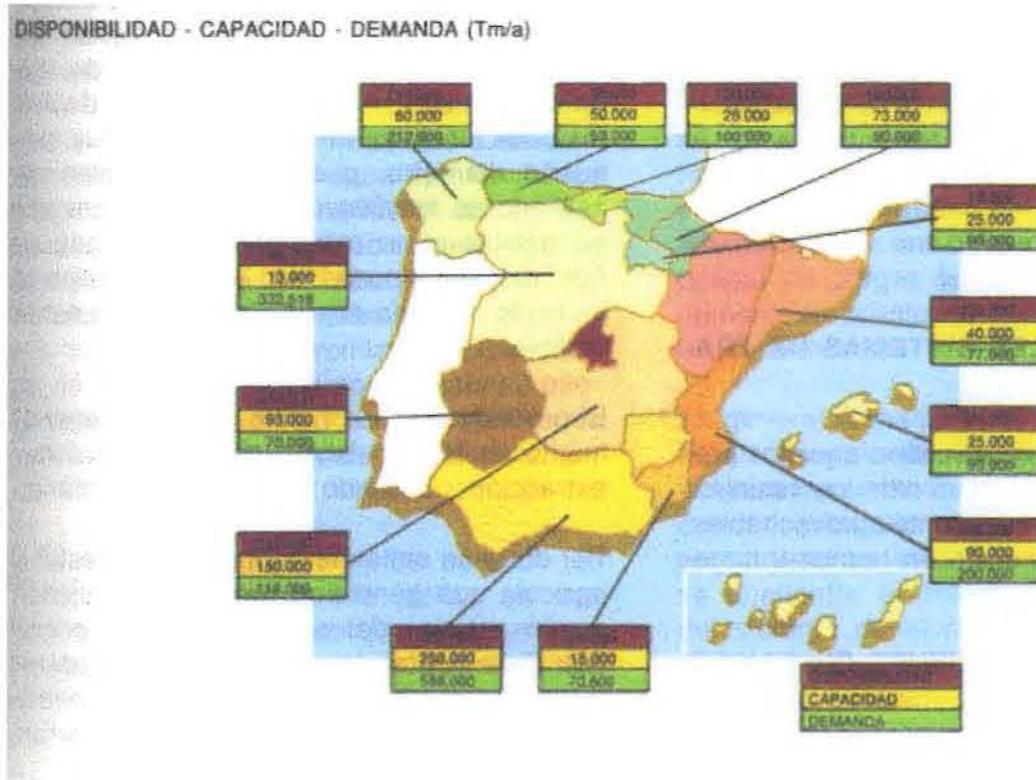
En la siguiente figura se muestra sintetizadas las operaciones del proceso completo.



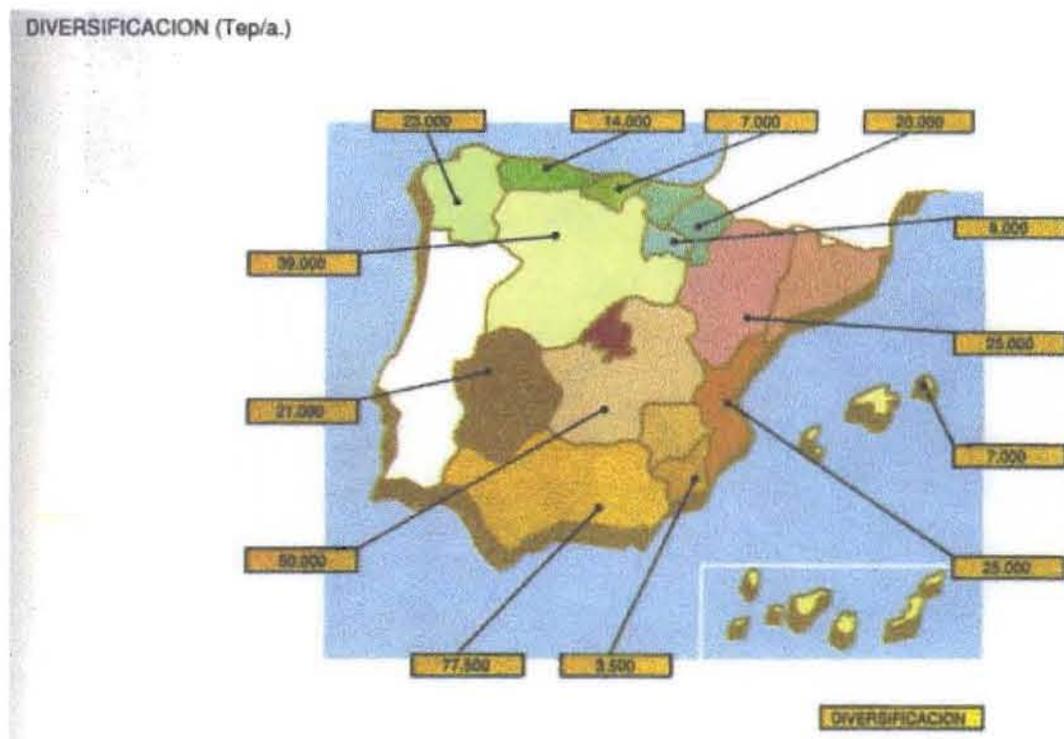
El dimensionamiento de las plantas debe realizarse de forma que exista una abundante disponibilidad de recursos como para cubrir con amplitud su capacidad de tratamiento y simultáneamente se disponga de un mercado potencial cercano, que permita asegurar la colocación del producto.

Considerando exclusivamente los residuos forestales anuales realmente generados por operaciones selvícolas se llevaron a cabo estudios de viabilidad cuyos

resultados, agrupados por Comunidades Autónomas, se presentan en la figura. En dicha figura aparece la disponibilidad de recursos, capacidad de producción de residuos y demanda potencial industrial, expresados en Toneladas anuales de producto.



Las posibilidades de diversificación energética, identificadas a través de los proyectos son de aproximadamente 320.000 Tep/año, según se refleja en la figura.



Sin embargo, la situación energético actual y, más concretamente, los precios de los productos derivados del petróleo, referencia directa en la fijación del precio de la biomasa, han sufrido un cambio importante ala baja. Consecuentemente, los costes de las labores selvícolas (trabajos necesarios para el monte ampliamente justificados), que en la situación anterior de competencia eran, al menos parcialmente, soportados por el aprovechamiento energético de la biomasa, deben recibir actualmente una retribución de la administración forestal.

#### - PRINCIPALES SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

En este apartado se describen aquellos procesos que permiten convertir los residuos en combustibles directamente aprovechables, mediante su incineración en hornos u hogares.

#### RECOGIDA Y TRATAMIENTO EN CAMPO.

Esta actividad se puede considerar como una primera etapa, que permite acceder a los residuos agrícolas o forestales.

Dejando al margen los procedimientos tradicionalmente usados para la extracción de leñas, un método que puede permitir de un forma racional el aprovechamiento de los residuos, incluso de aquellos de muy pequeño diámetro, puede ser el empleo de astillados móviles. Su objeto es convertir en astillas unas maderas (árboles pequeños, restos de podas, etc...) cuyo transporte en bruto no sería económica o técnicamente factible.

El proceso en su conjunto consiste generalmente en las siguientes operaciones: corta, extracción, astillado y transporte primario.

Por corta se entiende la operación forestal o agrícola que genera el residuo y justificada según criterios del aprovechamiento principal. Esta operación es de difícil mecanización y para su ejecución se utilizan herramientas manuales tales como motosierras, hachas, desbrozadores, etc....

Tras la corta se realiza la extracción o saca del material a lugares accesibles a los equipos que realizan el triturado o astillado posterior. Para la extracción se utiliza maquinaria móvil que debe estar adaptada a las condiciones específicas de cada tipo de cultivo o aprovechamiento concreto y suelen ser tractores con el complemento correspondiente de autocargadores, etc.... La elección de los medios mecánicos de extracción debe ser una solución de compromiso, acudiendo a los de mayor capacidad posible que se puedan mover con facilidad en las condiciones que se presentan en cada aprovechamiento.

#### PLANTAS DE TRATAMIENTO.

Estas instalaciones están orientadas al tratamiento final del producto resultante de la etapa anterior, de subproductos captados de pequeñas o medianas industrias y también de madera en rollo de mala calidad o recortes.

Las características de la materia prima empleada, así como las que se deseen para el producto final, condicionarán el proceso y el equipamiento. Además la planta de

tratamiento tiene por finalidad regular el suministro, adaptando en el tiempo la producción y la demanda.

Las operaciones principales que se pueden llevar a cabo, expuestas de manera general, son:

- Almacenamiento de materias primas.
- Triturado.
- Molienda.
- Secado natural o forzado.
- Compactado.
- Almacenamiento de productos terminados.

Este esquema puede simplificarse de diversas formas según los requerimientos concretos, llegando incluso a convertirse simplemente en un punto de almacenamiento intermedio.

Como criterio general se puede indicar que es conveniente que el material sufra el proceso de elaboración mas sencillo posible, evitando secado forzado, molienda..., siempre y cuando el resultado final sea admisible por los equipos del usuario final, y todo ello condicionado por razones económicas.

Como tratamiento de mayor grado de elaboración y que por tanto supone un interesante incremento del valor añadido, admisible por el mercado al cual van dirigidos, merece la pena detenerse a considerar los productos compactados, en su última fase de elaboración.

Los productos compactados son de dos tipos:

*Pellets*: Este combustible está constituido por pequeños cilindros entre 7 y 20 mm. de diámetro y de 25 a 60 mm. de longitud.

Para su fabricación se precisan prensas de granulación similares a las utilizadas para preparar algunos tipos de piensos, aunque con modificaciones. El material se forma por extrusión hacia el exterior, a través de una matriz cilíndrica, con orificios donde el material se alimenta desde dentro y es aprisionado por un sistema de rodillos. La compactación se puede hacer de forma natural o mediante el empleo de aditivos que no contengan elementos químicos contaminantes. En cualquier caso la materia prima debe tener unas condiciones determinadas de granulometría y humedad reducida. Para una misma máquina peletizadora y el mismo tipo de materia prima, el rendimiento varía en función principalmente del diámetro del producto final y de la utilización o no de aditivos.



Es un producto muy manejable y limpio, que se puede servir a granel o envasado. Resulta muy apropiado para pequeñas instalaciones domésticas individuales o colectivas de madera o carbón y además es muy fácilmente automatizable.

*Briquetas:* Este productos es similar al pellet en su forma cilíndrica, pero de mayor tamaño, ya que el diámetro puede variar entre 50 y 130 mm. y la longitud entre 50 y 300 mm. Al igual que los pellets, su densidad es alta, pudiendo oscilar entre 1000 y 1300 Kg/m<sup>3</sup>.

Para su fabricación se utilizan prensas de pistón que actúan mediante compresión, empleando volantes de inercia para conseguir elevadas presiones.

La compactación se realiza de forma natural, ya que la compresión produce una elevación de la temperatura y la baquelización del producto en la superficie.

Al igual que el uso de pellets, el material antes de su compacto debe tener una granulometría fina y humedad baja.

El producto final obtenido se presenta en el mercado embalado en cajas de cartón o bolsas de plástico haciendo fácil y limpio su manejo. Va destinado a su utilización en chimeneas, cocinas de leña, etc..., en sustitución de la madera o del carbón, y principalmente a viviendas unifamiliares. Sus características le permiten la comercialización a través de los mismos canales que los habituales para cualquier otro producto de consumo doméstico diario, siendo esta una importante ventaja competitiva frente a las otras alternativas.

La fabricación de briquetas se está desarrollando con relativa intensidad en España. En muchos casos constituye una salida favorable para las industrias de la madera que valorizan de esta forma los residuos y comercializan un producto más.

#### APLICACIONES DOMESTICAS.

La principal aplicación de materiales leñosos en el sector domestico viene representada, fundamentalmente en invierno, por su uso combinado para cocina y calefacción. Esta aplicación de la biomasa presenta ciertas peculiaridades que se comentan a continuación.

En primer lugar cabe diferenciar dos tipos básicos de instalaciones, además de las calderas de sólidos. Las tradicionales construidas exclusivamente con ladrillo de obra, comúnmente conocidas por chimeneas y los equipos construidos de hierro. Este

segundo tipo presenta ciertas ventajas, entre las que brevemente se pueden destacar las siguientes:

- Facilidad de encendido, al existir canales de conducción del aire en la parte inferior.
- Mejor control de la combustión, permitiendo variar la cantidad de aire, lo que mejora substancialmente el rendimiento de la misma.
- Mayor variedad de aplicaciones (agua caliente sanitaria, calefacción).

A su vez dentro de este segundo grupo se pueden distinguir dos tipos: compactos de chimenea y cocinas-estufas. Las chimeneas pueden incorporar sistemas para calentar aire o agua que permitan distribuir en la vivienda el calor generado.

Las cocinas-estufas, a partir de determinado tamaño, además de utilizarse para la preparación de alimentos y calentar por radiación las inmediaciones del espacio en el que están colocadas, permiten calentar agua para uso sanitario y trabajar como central de calefacción en conexión con un sistema convencional de radiadores de agua.



Su instalación suele ser muy sencilla y solamente se precisa la conexión a la salida de humos. Se construyen cocinas-estufas cerradas de hasta 20.000 Kcal/h., y se pueden esperar rendimientos en la combustión entre el 70 % y 80 %.

### APLICACIONES INDUSTRIALES.

Se ha experimentado profundas mejoras, sobre todo encaminadas hacia el desarrollo de nuevos sistemas de combustión o a la adaptación al tipo de combustible existente; es decir hacia un mayor grado de especialización.

### APLICACIONES EN HORNOS.

Una aplicación generalizada es la utilización de materiales leñosos en hornos cerámicos para la fabricación de ladrillos y bovedillas. En este sector, los costes energéticos tienen una fuerte repercusión sobre el producto final por lo que se analiza con especial atención el costo del combustible. Actualmente se encuentra muy introducido el coque de petróleo, con ventajas económicas y operativas; pero debe tenerse en cuenta que contiene un elevado porcentaje de azufre, de incidencia medioambiental negativa.

Otra aplicación importante de la biomasa en este sector se da en los secaderos, ya sea de tipo indirecto o de tipo directo. En este último caso el material está en contacto con los humos de combustión una vez atemperados y para ello se realiza la combustión con gran exceso de aire, introduciéndose además aire del exterior.

### APLICACIONES EN CALDERAS.

Lo que es propiamente la caldera, independientemente del hogar, no presenta ninguna particularidad específica si el combustible utilizado es biomasa, ya que consiste básicamente en un intercambiador gas-liquido. Donde sí se presentan variaciones substanciales es en el recinto donde se produce la combustión, es decir en el hogar.

### OTROS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

Dentro de los sistemas de tratamiento intermedio de residuos leñosos que se encuentran en fase de desarrollo o con una implantación limitada destacan:

### GASIFICACIÓN.

La transformación a gas de un combustible sólido presenta ventajas de manejo y de aplicación. Entre estas últimas se pueden señalar:

- En hornos o calderas existe una mayor flexibilidad para seguir las variaciones de la demanda. Si se trata de una caldera existente de combustible líquido o gaseoso la transformación es muy sencilla.

- En determinados procesos del sector cerámico (fabricación de pavimentos, cerámica artesana, etc..) actualmente se viene utilizando gas, por las características del proceso.

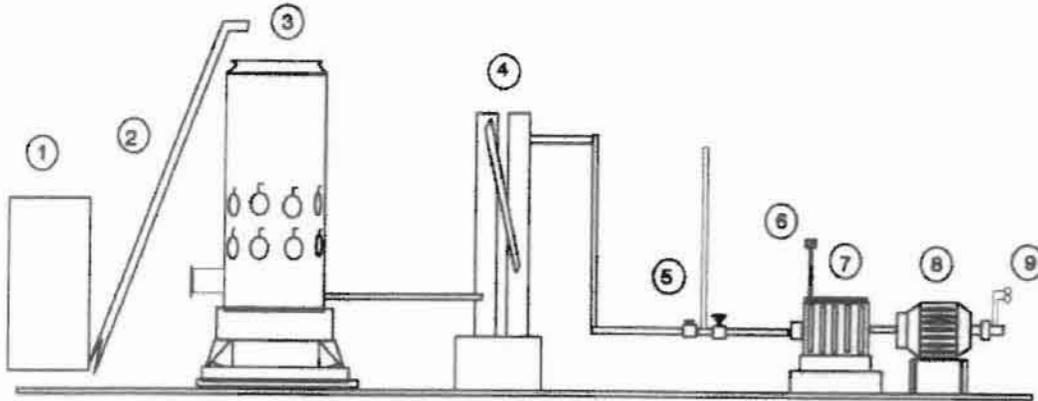
- Permite utilizarse en motores para producir simultáneamente calor y energía mecánica o mediante un alternador producir energía eléctrica.

La gasificación consiste en un complicado proceso de reacciones químicas que tienen lugar en el interior del lecho y que dan lugar a una oxidación incompleta.

Mediante el proceso de gasificación se obtiene el gas pobre que contiene como elementos combustibles  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , y  $\text{CH}_4$ , y con un poder calorífico aproximado de 1.000 - 1.500 Kcal/m<sup>3</sup> de gas.

## INSTALACION DE GASIFICACION

- 1 SILO DE ALMACENAMIENTO
- 2 SISTEMA DE TRANSPORTE
- 3 REACTOR-GASIFICADOR
- 4 SEPARADOR DE ALQUITRANES
- 5 VALVULAS DE SEGURIDAD Y CONTROL
- 6 TUBO DE ESCAPE
- 7 MOTOR DE EXPLOSION
- 8 GENERADOR-ALTERNADOR
- 9 SALIDA DE CORRIENTE

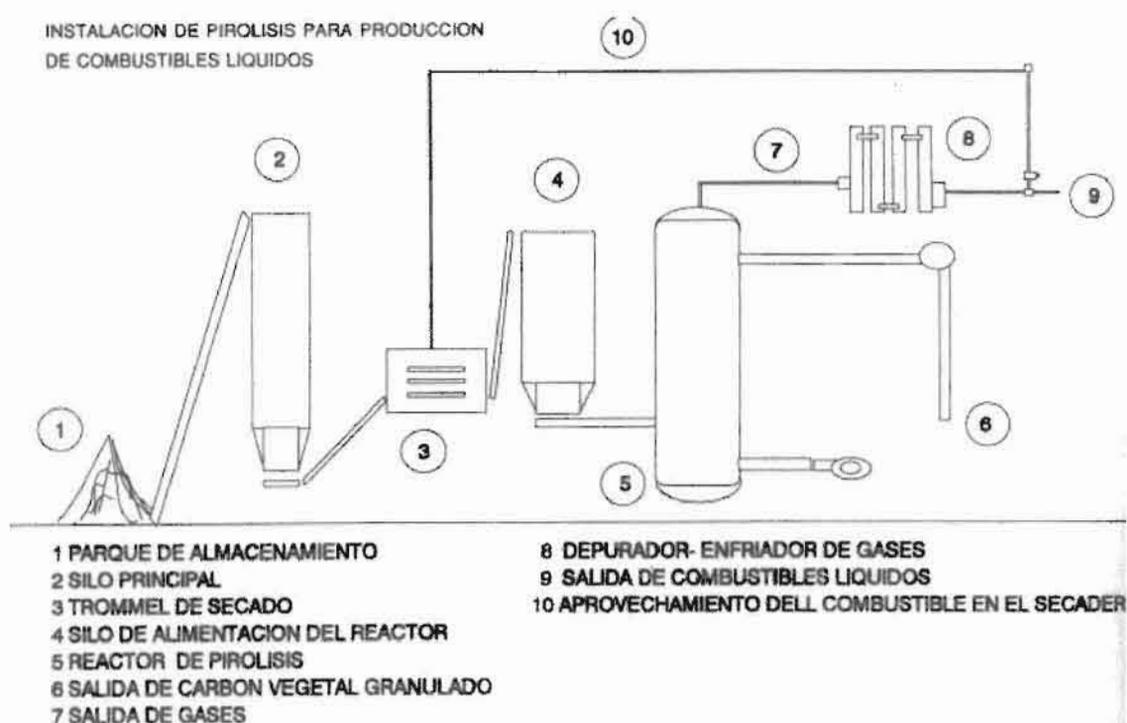


En la figura se representa de forma esquemática una instalación de gasificación para la producción de electricidad mediante la instalación de un motor de combustión interna.

## PIRÓLISIS.

Si los materiales leñosos se someten a temperaturas de 500/600 °C en ausencia de oxígeno, los elementos constituyentes de la madera se transforman en una fracción sólida, compuesta principalmente de carbono, una fracción líquida y una fracción gaseosa también combustible llamada vapor pireleñoso. A este proceso se le denomina carbonización o pirólisis.

El carbón vegetal se utiliza como combustible en el sector doméstico, como reductor en metalurgia, y además es posible su transformación en carbón activo con otras aplicaciones industriales (filtros, etc...).



La figura se muestra de forma esquemática una instalación de pirólisis para trabajar con materia prima de origen forestal y diseñada para la obtención combinada de combustible sólido y líquido.

- TRATAMIENTOS RELATIVOS A RESIDUOS BIODEGRADABLES.

Todos los residuos orgánicos en general son susceptibles de ser sometidos a procesos de degradación anaerobia. No obstante, la viabilidad del tratamiento depende de una serie de factores relacionados con la composición, por la cual a este proceso se suelen asociar una serie de residuos concretos. Es un proceso que, para determinados tipos de aguas residuales y sobre todo para las de origen urbano, se viene utilizando desde principios de siglo, aunque con balances energéticos muy bajos e incluso negativos.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico, que se realiza en diferentes fases, por la acción de distintos tipos de bacterias. Aunque estrictamente se pueden diferenciar varios grupos de microorganismos, de una forma muy resumida y genérica distinguiremos dos grupos principales: formadores de ácidos y metanogénicos.

La actuación de estos microorganismos da lugar a 3 etapas principales:

- Hidrólisis: Degradación de los polímeros dando lugar a compuestos intermedios y ácidos grasos.

- Acetogenesis: A partir de los compuestos anteriores, dan lugar principalmente a acetatos,  $H_2$  y  $CO_2$ .

- Metanogenesis: Obtención del metano como producto final a partir de la descomposición del ácido acético y a partir de la absorción de  $H_2$  liberado en los procesos de oxidación.

En los procesos naturales la producción del gas resultante, denominado biogas, suele oscilar entre el 54-70 % de  $CH_4$  y 27-45 % de  $CO_2$ . En el cuadro siguiente aparece la composición media del biogás resultante de ciertos tipos de residuos.

Para cada tipo de sustrato y para su degradación total es posible calcular la composición final teórica de acuerdo con la estequiometría de la reacción. Sin embargo, la producción real depende del nivel de degradación conseguido y a su vez en función de las condiciones del proceso. Los parámetros mas importantes son:

- Temperatura.
- pH.
- Relación C/N.
- Tiempo de retención.
- Sustancias tóxicas.

El proceso puede tener lugar a dos niveles de temperatura. En el caso de tratarse de un proceso mesófilico (aproximadamente 35 °C), el tipo de fermentación es diferente que para un proceso termofílico (aproximadamente 50 °C).

El valor del pH debe estar comprendido entre 6,2 y 8, ya que fuera de este intervalo se paraliza la acción bacteriana. La relación C/N debe estar en el entorno de 30/1.

El tiempo de retención será variable dependiendo fundamentalmente del tipo de sustrato y del tipo de digestión. Puede oscilar entre 10 y 25 días. Por otra parte es necesario que no existan sustancias tóxicas tales como metales pesados, pero es interesante que en el sustrato existan otros elementos nutritivos tales como N, P, K, etc.

En el cuadro a continuación aparecen los valores indicativos de las producciones esperables para diferentes tipos de residuos ganaderos.

| Animal                  | Peso medio por cabeza (Kg) | Defecaciones producidas (Kg/cab. y día) | Producción de biogas (Lit./cab. y día) | Producción de energía prevista (KJ/cab. y día) |
|-------------------------|----------------------------|---|--|--|
| Bovinos .....           | 400                        | 27,5                                    | 720                                    | 18.700   |
| Porcinos .....          | 60                         | 4,5                                     | 120                                    | 3.120  |
| Aves .....              | 1,5                        | 0,1                                     | 6,4                                    | 166  |
| Ovinos y caprinos ..... | 30                         | 1,6                                     | 47                                     | 1.222  |

En la figura se recogen los principales tipos de digestores. Estos pueden ser:

a) *Discontinuo convencional*: Es el más sencillo ya que la alimentación es intermitente y no existen mecanismos de agitación o calefacción. No permite controlar correctamente los factores del proceso y para obtener resultados aceptables precisa tiempos de retención altos.

b) *De mezcla completa*: Con alimentación continua o discontinua, incorpora mecanismos de mezcla y calefacción facilitando el control. Permite mayores cargas y tiempos de retención menores.

c) *De contacto*: Respecto al anterior, incorpora un sistema para realimentar los lodos producidos por decantación y por tanto mejora el desarrollo de la flora de microorganismos, siendo apropiado para residuos poco concentrados. También aumenta la riqueza energética del biogás.

d) *De filtro anaerobio*: El residuo pasa a través de un lecho inerte que retiene los microorganismos.

Además del propio digester, una instalación de este tipo debe llevar un sistema de recogida y preparación del residuo antes de su tratamiento, sistema de calefacción, sistemas para almacenamiento y manejo del gas, sistemas auxiliares, tuberías, válvulas, condensadores, etc....

El efluente resultante del proceso es una suspensión exenta de olores que sedimenta fácilmente y cuya utilización puede realizarse de forma integral tras la separación de la fase sólida y líquida. Su campos de aplicación son fundamentalmente dos: la fertilización de suelos y la alimentación animal.

- TRATAMIENTOS RELATIVOS A BIOCOMBUSTIBLES.

Aunque los tratamientos aplicables a los cultivos energéticos y los excedentes agrícolas son variados, nosotros nos centraremos en la producción de alcohol a partir de sustancias naturales renovables.

El proceso para la generación del alcohol, pasa por una primera etapa de preparación del mosto, que incluye todos los tratamientos previos habituales necesarios para la extracción de los azúcares, tales como lavado, prensado, filtrado, etc.

Una vez obtenido el mosto y tras un proceso de hidrólisis, es necesario que ocurra el proceso que va a dar lugar propiamente a la generación del alcohol, es decir la fermentación. Esta se desarrolla debido a la intervención de levaduras cuya acción debe ser controlada en relación a unas condiciones determinadas de pH, temperatura, etc.

A continuación es necesario realizar la separación del líquido alcohólico mediante la destilación del vino en la que, partiendo de una concentración entre el 5 y el 15 %, se consigue un 96 % de pureza. Posteriormente es necesario efectuar la deshidratación del alcohol.

En el cuadro siguiente puede observarse el rendimiento aproximado de obtención de etanol (96 %) para distintas materias primas, según el método de destilación convencional.

Como ya se ha indicado, el etanol es un excedente combustible que puede encontrar las siguientes aplicaciones importantes:

- Sustitución de fuel-oil y gasóleo en quemadores.
- Sustitución de gasolina en motores de explosión, en proporción de hasta aproximadamente el 10 %. En el caso de utilizar este tipo de mezclas, no se precisan modificaciones en los motores y demás sistemas.
- Sustitución de gasolinas en motores de explosión de forma total o porcentajes elevados. En este caso es necesario realizar importantes modificaciones, siendo las de principal alcance las que afectan a la cámara de combustión.

Debido al mayor valor añadido, las aplicaciones que presentan mayor interés son las dos últimas. La utilización de mezclas en los motores habituales resulta también muy ventajosa.

#### **4. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES.**

Empezaremos destacando una importantísima cualidad común a todos ellos, que se refiere a la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Dado que la biomasa (residual o no) proviene del resultado de la fotosíntesis, el CO<sub>2</sub> emitido por su combustión vuelve a la atmósfera, al contrario que la combustión de combustibles fósiles (derivados del petróleo, carbón), que liberan a la atmósfera cantidades de dióxido de carbono que ya no pertenecían al ciclo atmosférico, sino al geológico, provocando un aumento de la proporción de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Por tanto, la sustitución de combustibles fósiles por biomasa beneficia al medio ambiente, ya que reduce el efecto invernadero.

Otro importante aspecto que se vería favorecido por una generalización en el aprovechamiento de la biomasa sería el derivado de la reforestación de grandes áreas, con los consiguientes beneficios en cuanto a retención de agua por el terreno, disminución de la degradación y la erosión del suelo y la posibilidad de darle a los bosques así creados un uso general para esparcimiento y recreo.

- RESIDUOS LEÑOSOS.

En el caso de los residuos agrícolas, la operación generadora de los mismos y su eliminación posterior es un imperativo del propio cultivo, como cualquier otra labor.

Igualmente ocurre con los residuos industriales, en los que por las características del propio proceso de elaboración, hay una fracción de la materia prima que no se llega a incorporar al producto elaborado y debe eliminarse.

Una de las ventajas de la incineración para aprovechamiento energético y de forma controlada de ambos tipos de residuos es evitar el tener que quemarlos “in-situ”, eliminando riesgos de incendios, disminuyendo la contaminación atmosférica, etc...

Sin embargo, en el caso de los residuos forestales, la necesidad de realizar las labores de limpieza, desbroces, etc..., se encuentra enmascarada por la propia naturaleza del monte. No obstante, la ejecución de los trabajos de limpieza, haciendo desaparecer los residuos originados, presenta las siguientes ventajas:

- Favorece la regeneración natural de la masa principal.
- Facilita la reforestación artificial o natural.
- Posibilita el crecimiento del arbolado.
- Mejora la calidad del arbolado.
- Disminuye enormemente el peligro de las plagas.
- Facilita el resto de las operaciones selvícolas.
- Incrementa la capacidad de aprovechamiento.
- Facilita los movimientos por el monte.

- Incrementa el hábitat de cierta fauna silvestre.
- Mejora estéticamente el monte.
- Aumenta la capacidad de acogida recreativa.

Pero sobre todo, la no realización de estos trabajos selvícolas de forma completa favorece enormemente la propagación de incendios forestales, circunstancia éste que pone en peligro la propia existencia del monte.

De cara a la conservación del medio ambiente es importante destacar el hecho de que la ejecución de los trabajos selvícolas debe realizarse de forma selectiva, analizando en cada actuación la conveniencia en intensidad de los mismos. Debe procederse de forma racional y en todo momento bajo el control de expertos, de forma que en cualquier circunstancia, la mejora y el buen estado del monte sean prioritarios con respecto a cualquier interés económico o energético. De no ser así, pudiera ocurrir que algunas de las ventajas anteriormente señaladas, se conviertan en serios inconvenientes y se pongan en peligro la riqueza que representa el monte.

En relación con esta última idea y de forma particular para explotaciones concretas, una aplicación no adecuada de las operaciones selvícolas, valorando previamente su incidencia puede tener algunas de las siguientes repercusiones negativas:

- Compactación del terreno, con disminución de las filtraciones de agua y aumento de la escorrentía, y por tanto, de la erosión.
- Disminución de la captación de nutrientes y empobrecimiento del suelo.
- Desplazamiento o desaparición de determinado tipo de fauna.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la utilización del material leñoso como combustible presenta ventajas medioambientales en comparación con otras fuentes energéticas.

La contaminación por elementos sólidos residuales es menor que por otras fuentes de energía, ya que las cenizas son inertes y se generan en menor proporción. Respecto a los humos, su composición es básicamente CO<sub>2</sub> y agua, con muy baja presencia de compuestos de nitrógeno azufre o cloro, que constituyen el gran problema de otros combustibles. La presencia significativa de partículas en suspensión de los gases no tiene porqué producirse si se cuenta con los elementos adecuados, tales como simples ciclones, y se regula adecuadamente la combustión.

Las emisiones variarán según el proceso de conversión siendo en este sentido más favorable la combustión directa frente a la pirólisis, y la gasificación, donde se puede producir emisiones de hidrocarburos, fenoles, etc..

- RESIDUOS BIODEGRADABLES.

La digestión anaerobia es, en primer lugar y de forma fundamental, un proceso de depuración de residuos orgánicos; es decir, la componente medioambiental es más importante que la energética.

Su impacto puede contribuir a resolver el problema ambiental producido por muchos residuos, algunos de ellos como los industriales, de muy alta carga contaminante y que empiezan a ser un importante gravamen económico y de todo tipo para los establecimientos en los que se generan.

Por tanto, la recuperación de los residuos biodegradables de cara al medio ambiente es totalmente positiva, transformando sustancias muy contaminantes en productos libres de microorganismos patógenos, aptos para otros usos. Además la utilización del biogás como fuente energética evita el impacto ambiental que supone obtener esta energía por otros métodos convencionales contaminantes.

El único impacto que se puede producir, aunque en gran medida inferior al generado por otros combustibles, son las emisiones gaseosas que tienen lugar por su aplicación energética.

- BIOCOMBUSTIBLES.

La implantación de los cultivos energéticos para la obtención de biocombustibles, en determinadas áreas afectadas por problemas de mercado de cultivos alimentarios tradicionales, aparece como una alternativa beneficiosa, ya que:

- Evita la erosión y degradación del suelo derivada del abandono de las tierras de labor.
- Mantiene los niveles de trabajo y de renta en el ámbito rural.
- Evita los movimientos de población relacionados con el abandono de los cultivos.

Por otro lado, el empleo de combustibles procedentes de la biomasa en motores de vehículos presenta importantes ventajas medioambientales, en aquellos lugares con intensa presencia de automóviles, como in grandes núcleos de población. Puede considerarse como altamente beneficiosa la posibilidad de sustituir las mezclas antidetonantes (plomo e hidrocarburos aromáticos) por bioalcoholes. También, el empleo de biocombustibles redunda en la reducción de emisiones de SO<sub>2</sub> en el caso de combustibles para Diesel.

- ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.

Los estudios de impacto ambiental (E. I. A.) pretenden analizar y comprender la relación de incidencia entre un proyecto determinado y el entorno afectado.

Cuando el empleo de la biomasa se realiza dentro de un conjunto de actividades más amplio, como pueden ser los horros y calderas en la diferentes fábricas, así como los sistemas de calefacción en edificios, etc..., no se requiere un estudio específico para definir el impacto ambiental, sino que irá incluido dentro del estudio del proyecto global.

En el caso de que la actividad principal del establecimiento sea el aprovechamiento energético o la manipulación y la transformación de la biomasa, será necesario realizar un Estudio de Impacto Ambiental, que tal y como se muestra en la figura final constara de las siguientes fases:

- Definición del estado preoperatorial del entorno. Se pretenden identificar del entorno. Se pretenden identificar las características del entorno afectado antes de la operación del proyecto.

- Análisis del proyecto. Su finalidad radica en definir los parámetros básicos del proyecto desde un punto de vista medioambiental.

- Previsión de las alteraciones, resultado de la conjunción de las fases anteriores, y en las que se intenta prevenir en lo posible, y cuantificar las principales alteraciones derivadas de la ejecución del proyecto.

- Medidas correctoras, impactos residuales y plan de vigilancia. Se trata primeramente de identificar la posible gama de medidas correctoras viables y seleccionadas que se consideran más idóneas. Posteriormente se especifican aquellas alteraciones, resultantes que persisten a pesar de haber aplicado las medidas correctoras. Asimismo, es necesario plantear un Plan de Vigilancia Ambiental que debe seguirse durante la explotación de las instalaciones.

## **5. BIBLIOGRÁFICO.**

- \* “TECNOLOGÍA Y APLICACIONES DE LA BIOMASA”.

J. Richard Williams.

Edit: INDEX.

- \* “MANUAL DE BIOMASA”.

Ramón Pérez Simarro.

Edit: IDAE.

- \* “LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LAS ISLAS CANARIAS”.

Conjuntos de Expertos y director de la División (Cayetano Hernández González).

Edit: Gobierno de Canarias (Consejería de Industria y Comercio).

## **6. COMENTARIO BIBLIOGRÁFICO.**

- \* J. Richard Williams. “TECNOLOGÍA Y APLICACIONES DE LA BIOMASA”.

Es un libro interesante en muchos de los campos que toca dentro de la biomasa. Además podemos ver que tiene una fácil lectura y no es difícil entenderlo. Pero para mi opinión le falta contrastar esto con un mayor número de datos.

Con lo expuesto no quiero dejar la sensación de que sea un libro malo, es un libro normalito que sirve como comienzo del trabajo a realizar.

- \* Ramón Pérez Simarro. “MANUAL DE BIOMASA”.

Este libro es indispensable para realizar este trabajo ya que solo nos explica las diferentes formas y tipos de biomasa sino que además nos da detalles de los diferentes métodos de obtención de energía por medio de la biomasa.

## **5. BIBLIOGRAFÍA.**

- \* “TECNOLOGÍA Y APLICACIONES DE LA BIOMASA”.

J. Richard Williams.

Edit: INDEX.

- \* “MANUAL DE BIOMASA”.

Ramón Pérez Simarro.

Edit: IDAE.

- \* “LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LAS ISLAS CANARIAS”.

Conjuntos de Expertos y director de la División (Cayetano Hernández González).

Edit: Gobierno de Canarias (Consejería de Industria y Comercio).

## **6. COMENTARIO BIBLIOGRÁFICO.**

- \* J. Richard Williams. “TECNOLOGÍA Y APLICACIONES DE LA BIOMASA”.

Es un libro interesante en muchos de los campos que toca dentro de la biomasa. Además podemos ver que tiene una fácil lectura y no es difícil entenderlo. Pero para mi opinión le falta contrastar esto con un mayor número de datos.

Con lo expuesto no quiero dejar la sensación de que sea un libro malo, es un libro normalito que sirve como comienzo del trabajo a realizar.

- \* Ramón Pérez Simarro. “MANUAL DE BIOMASA”.

Este libro es indispensable para realizar este trabajo ya que solo nos explica las diferentes formas y tipos de biomasa sino que además nos da detalles de los diferentes métodos de obtención de energía por medio de la biomasa.

El libro esta muy bien en todos los aspectos pero sobre todo hay que agradecer el gran número de tablas, gráficas, fotos, etc..... Con ello dejo claro que es libro fundamental.

\* “Las energías renovables en las Islas Canarias”.

Este libro es de gran utilidad debido a que en el encontramos ejemplos directos de esta energía en Canarias, que es en suma lo que buscamos. Hablar de este libro es hablar de manual de las energías en Canarias. El libro en sí esta bien si nuestro objetivo es ver solo las aplicaciones de esta energía (la biomasa) en el archipiélago.

# **RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

*POR REINALDO QUIRÓS GÓMEZ.*



## ÍNDICE.-

|   |   |
|---|---|
| Posibilidades de desarrollo.....                    | 1 |
| Aspectos técnicos.....                              | 2 |
| Aspectos económicos.....                            | 3 |
| Diagrama de bloques simplificado de una planta..... | 5 |
| Bibliografía.....                                   | 6 |

---

## **RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.**

### POSIBILIDADES DE DESARROLLO.

La evaluación del recurso parte de la información más reciente publicada, el Estudio de Caracterización y Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en España y Comunidad Autónoma de Canarias, realizado por el M. O. P. T. - Dirección General de Política ambiental en Noviembre de 1992. Según esta fuente para una población total de 1 637 641 habitantes el nivel de generación de R. S.U. era de 778 083 Tn/a.

Las dos islas principales (Gran Canaria y Tenerife) concentran más del 80% de las basuras totales generadas y en ambas existen muy buenas posibilidades de aplicar el procedimiento de incinerar con recuperación de energía debida al importante volumen de basuras que generan.

La incineración es un procedimiento de valorización de los R. S. U. que se caracteriza por eliminarlos de forma fiable y rápida, con un nivel de impacto sobre el medio ambiente prácticamente nulo y que resulta apropiado para zonas densamente pobladas y con dificultades para encontrar superficies amplias de terreno aptas para el vertido.

Las tecnologías de incineración han evolucionado hasta un estado como el actual, en el que existe una abundante oferta de equipos que garantizan una correcta incineración de los residuos; equipos que se complementan con otros de tratamiento de gases que garantizan que las emisiones cumplan con las normativas más estrictas.

Un punto débil de esta opción es que sus requerimientos de inversión son grandes. Pero, frente a este hecho está la posibilidad de realizar importantes economías de escala, posibilitando y motivando la creación de entes formados por asociación o mancomunación de municipios que se agrupan para aprovechar dicho factor de escala.

El punto fuerte de esta alternativa está en la posibilidad de recuperar la energía térmica de la combustión, bien directamente utilizando como vector energético el agua o el vapor, o bien mediante su transformación en energía eléctrica.

#### Aspectos técnicos.

En todos los casos, encabezando el tratamiento por incineración debe existir un foso de almacenamiento. Ha de contar con la suficiente capacidad de almacenamiento para adaptarse a las variaciones de tiempos y flujos que puedan existir entre la recogida, o la planta de reciclado, y el ritmo de incineración de los hornos. Debe mantenerse en depresión, siendo suficiente que el aire de combustión se aspire de él, asegurando de esta forma que ninguna clase de malos olores o polvo se escape a la atmósfera.

La capacidad mecánica de incineración del horno, por limitaciones de su capacidad térmica, estará condicionada al Poder Calorífico Inferior (PCI) del combustible para un cierto rango de operación.

El calor generado en el horno se transporta a la caldera por medio de los gases de combustión. La caldera, si está diseñada para la producción de vapor sobrecalentado, estará formada por cámara radiante, pantalla, sobrecalentador, banco de convección y economizador.

El aprovechamiento energético se puede traducir en uno o en varios de los siguientes vectores: agua caliente, vapor y energía eléctrica. Para posibilitar una aplicación térmica, es imprescindible que en las proximidades exista un usuario para la misma y tener en cuenta los factores económicos.

En el caso de producción de electricidad el vapor generado en las calderas será recuperado mediante la instalación de un turboalternador.

Por otro lado es posible combinar el proceso de reciclado y compostaje con el de incineración, eliminando por este último procedimiento los elementos de la basura que no se pueden aprovechar dándole otra utilización.

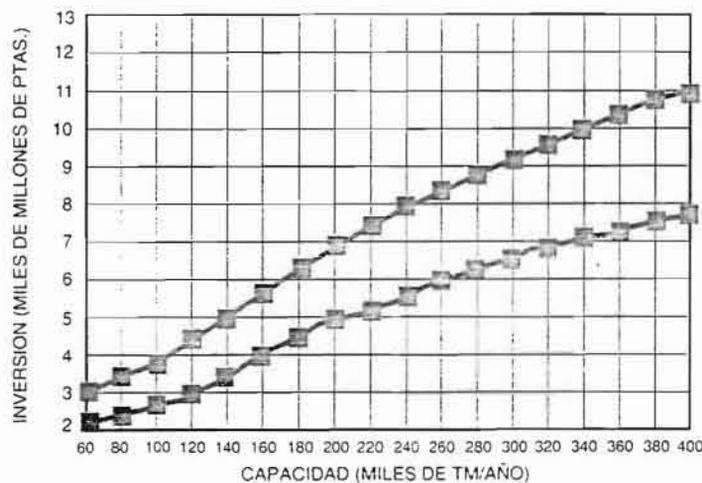
#### Aspectos económicos.

Como se ha indicado anteriormente, quizá el punto débil más importante de la incineración de los R. S. U., cuando se compara con otros procesos, es el nivel de inversiones asociadas que requieren las plantas.

En el gráfico se representa una primera aproximación de lo que puede representar la inversión de una planta incineradora, según la capacidad de tratamiento de la misma, y bajo las siguientes hipótesis:

- El combustible utilizado es R. S.U.
- Se dispone de tratamiento de gases consistente en depuración de humos y filtrado de partículas en suspensión mediante electrofiltros.
- La planta consta de dos líneas, con horno de parrilla, idénticas en capacidad y régimen previsto de 7 500 h/año.

#### Curva de inversiones aproximadas.



Como se puede observar, únicamente se hace referencia a plantas de gran capacidad (más de 8 Tm/h equivalente a 150.000-200.000 habitantes) ya que para tamaños inferiores la dispersión de precios es proporcionalmente elevada y está condicionada fuertemente por las particularidades locales.

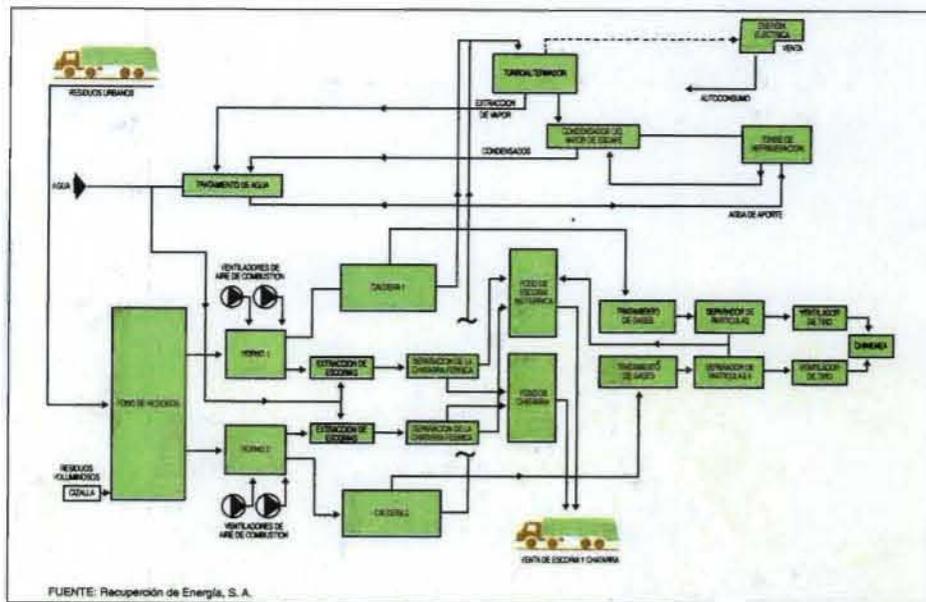
La inversión está representada por los diferentes elementos o sistemas de la planta. La participación de cada uno de ellos sobre el total, dependiendo entre otras circunstancias de la capacidad, aparece reflejada en el cuadro siguiente.

#### INTERVALOS DE PARTICIPACIÓN DE LOS DISTINTOS ELEMENTOS EN LA INVERSIÓN TOTAL.

| INVERSIONES                | %         |
|----------------------------|-----------|
| TERRENOS                   | 0,5-1,5   |
| PUENTES GRÚA-BÁSCULA       | 1,0-2,5   |
| HORNO-CALDERA-ESCORIAS     | 30,0-45,0 |
| DEPURACIÓN DE GASES        | 15,0-25,0 |
| ELECTRICIDAD-CONTROL       | 4,0-8,0   |
| TURBOALTERNADOR            | 6,0-10,0  |
| SISTEMA CONDENSACIÓN       | 4,0-6,0   |
| TUBERÍAS-TRATAMIENTO AGUAS | 2,0-5,0   |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| OBRA CIVIL                 | 12,0-18,0 |
| INGENIERÍA, DIRECCIÓN OBRA | 5,0-12,0  |
| GASTOS DEL PROYECTO        | 3,0-5,0   |

Diagrama de bloques simplificado de una planta incineradora de R.S.U.



**BIBLIOGRAFÍA.-**

1) Las Energías renovables en España, balance y perspectiva 2000. Ministerio de industria y energía. Edición 95. Madrid.

En esta edición se trata el programa de energías renovables del plan de ahorro y eficiencia energética(P.A.E.E. 1991-2000) y la situación actual de las energías renovables en España. En él se redacta un listado de todas las instalaciones de R.S.U. en España con sus respectivas características técnicas, que han entrado en funcionamiento entre 1991 y 1994.

2) Renewable energy yearbook '93. Varios autores. Edición 93. Madrid.

Aunque el libro fue escrito por españoles está editado en inglés, en él se describen los proyectos de instalaciones de R.S.U. más importantes de la C.E.E.

3) Plan energético de Canarias(P.E.C.A.N.). Consejería de industria y energía. Junio 1986. Las Palmas de Gran Canaria.

En este trabajo se puede encontrar una referencia de los R.S.U. en el punto 3.4.

4) La electricidad en España. UNESA. 1993. Madrid.

Consta de 151 preguntas y respuestas de las fuentes de producción de electricidad en España. Destaca su aspecto didáctico.

CAPÍTULO X

# Energía Geotérmica y Térmica marina

Por **Manuel Serrano Caballero**

## **1.- LA ENERGÍA GEOTÉRMICA**

### **1.1.- EL CALOR DEL INTERIOR DE LA TIERRA**

Como su nombre indica, la energía geotérmica es debida al calor natural de la Tierra. La fuente de este calor es el núcleo central fundido, donde se alcanzan temperaturas que sobrepasan los 1.000°C como resultado de la desintegración espontánea de núcleos radiactivos (principalmente, isótopos del potasio, uranio y torio) y de las fuerzas de fricción debidas, tanto al rozamiento por la influencia solar y lunar, como al movimiento relativo de las diversas masas de rocas que forman las bases de los continentes.

El volumen de 1 billón de km<sup>3</sup> de rocas próximas a la fusión o fundidas en el interior de la Tierra, es una fuente potencial de energía. Son conocidas las manifestaciones típicas de la energía geotérmica en forma de arroyos calientes, géisers, fumarolas, volcanes activos, gradientes térmicos, etc... La inaccesibilidad en la mayoría de los casos ha limitado la adecuada explotación de esta fuente energética, cuyo aprovechamiento es básicamente un problema de ingeniería, en el que juega un papel importante la economía comparativa con las fuentes convencionales.

El calor interno emigra hacia el exterior de la corteza terrestre a una velocidad de unas 54 kilocalorías/m<sup>2</sup>h. Medido en el sentido opuesto, esto significa que el calor interno de la Tierra aumenta unos 30°C/km a medida que se avanza desde la superficie de la tierra hacia su centro.

Así, se puede encontrar una temperatura de 80°C normalmente a una profundidad de 2,7 km y de 180°C a 6 km, profundidades que hoy son alcanzadas corrientemente en las prospecciones de gas o petróleo, usando equipos y procesos de sondeo normales. Hemos de reseñar que el vapor geotérmico raramente alcanza temperaturas superiores a los 300°C en el receptáculo geotérmico natural de agua caliente en ebullición.

Existen sin embargo, sectores, en los que los valores del flujo térmico son más elevados de lo normal, llegando hasta los 80°C/km, debido al ascenso lento de materiales más calientes del manto. Cuando en estos sectores llega a producirse la fusión parcial de los materiales profundos, éstos, en determinadas condiciones, pueden ascender hasta cerca de la superficie como rocas total o parcialmente fundidas. Pueden así situarse masas, a veces de gran volumen y temperaturas comprendidas entre los 700 y los 1.000°C en sectores de la corteza que, en condiciones normales, estarían a temperaturas inferiores en varios centenares de grados.

De esto se deduce que las alteraciones térmicas más interesantes están localizadas en los sectores de actividad ígnea actual o reciente, considerando «recientes» aquellos sectores donde hay datos para suponer que la actividad ha tenido lugar hace pocos millones de años. Efectivamente, la mayoría de los campos geotérmicos hoy explotados están en zonas donde existe o ha existido en los últimos millones de años actividad volcánica, pero no por ello hay que suponer que cualquier zona volcánica es susceptible de explotación directa. Por otro lado, también existen otros tipos de manifestaciones superficiales, que sin ser volcánicas, indican la posible existencia de una anomalía térmica en la zona donde se presentan.

#### **1.1.1.- Manifestaciones superficiales**

Aunque la mayoría de los campos geotérmicos de importancia llevan asociados manifestaciones superficiales de actividad térmica, éstas no representan un signo definitivo de existencia de aquéllos. Del mismo modo, la ausencia de las manifestaciones o anomalías superficiales no nos permite desechar tales áreas como posibles campos geotérmicos. Sin embargo, la falta de métodos y técnicas precisas para la exploración de estos campos, hace que la identificación de las anomalías superficiales sea el punto de partida de una prospección geotérmica. Veamos cuáles son estas manifestaciones.

Como ya se ha dicho, son muy numerosos los campos geotérmicos conocidos asociados a un volcanismo reciente. por lo que es de gran interés realizar un estudio geológico y vulcanológico 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 siempre encontrarse alteraciones hidrotermales de las rocas, originadas por líquidos o gases circulantes 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 esos 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 cual proporciona una ayuda valiosa en la investigación de un campo geotérmico.

Las emanaciones de gases y de vapor pueden tener un significado muy limitado. Se pueden originar volátiles, simplemente por calentamiento de las rocas a distintas temperaturas. Otras veces, las emanaciones son volcánicas, ya sea relacionadas con un volcanismo activo o 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 los depósitos que precipitan en las fuentes termales y que, en general, se conocen como depósitos de "sinter". Pueden ser muy distintos bajo el punto de vista químico, y el que precipiten uno u otro supone un mecanismo de formación y sedimentación diferente. Así, en la explotación geotérmica, la composición de las aguas termales juega un papel muy importante.

Asociados a los campos geotérmicos pueden producirse *mineralizaciones y depósitos de sales*, lo suficientemente grandes, incluso, como para procederse a su explotación.

Finalmente, es lo más frecuente 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 una variación térmica (gradiente) mayor a la normal en la zona. En el transporte de calor desde el foco hasta la superficie intervienen procesos de conducción y convección, cuya mayor o menor importancia estará determinada por las características geológicas de la zona. Es, por tanto, de gran interés, el proceder a la localización y delimitación de estas anomalías térmicas para acotar un campo geotérmico.

En definitiva, la falta de otros métodos más precisos para las investigaciones previas de localización de campos geotérmicos ha hecho que, hasta ahora, las exploraciones se hayan centrado principalmente en áreas con este tipo de manifestaciones, entendiéndose que la importancia mayor o menor 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 la exploración.

## **1.2.- LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO**

Desde tiempos inmemoriales, las aguas termales han sido utilizadas para baños, fines terapéuticos, limpieza y cocina, pero sólo en las últimas décadas, el vapor natural y el agua caliente

geotérmicos han sido destinados a usos más sofisticados. Durante el siglo XX se extraían productos químicos (especialmente ácido bórico) a partir de las emanaciones gaseosas en Larderello (Italia), y en 1904, Ginori Conti realizó el primer intento para usar el vapor en la generación de electricidad. Al principio, la empresa estuvo plagada de dificultades, las más serias de las cuales eran los gases ácidos que atacaban y destruían las partes metálicas de las máquinas de vapor, por lo que el vapor natural no se podía utilizar directamente en las máquinas. Así, se tuvo que utilizar el vapor para calentar agua pura y transformarla a su vez en vapor, que se utilizaba para operar los generadores. Por supuesto, esta operación implicaba unas pérdidas enormes de calor.

Durante los últimos 30 años se desarrollaron nuevas aleaciones que soportaban la corrosión de los gases ácidos, con lo que éstos ya se pudieron utilizar directamente en las turbinas. Las instalaciones actuales de Larderello son capaces de producir alrededor de unos tres billones de kW.h de electricidad al año y, al mismo tiempo, los gases son la base de una importante industria química de extracción de ácido bórico, gas carbónico, amoníaco y helio.

El uso en gran escala de aguas geotérmicas para calefacción y fines industriales no se inició hasta después de la Segunda Guerra Mundial, encabezando esta actividad Hungría, Islandia y Nueva Zelanda.

Islandia carece de reservas de petróleo, gas o carbón, y satisface una tercera parte de sus necesidades energéticas empleando fuentes geotérmicas. Así, se utilizaron éstas por primera vez en 1925, en forma de agua caliente natural para calentar viviendas e invernaderos cerca de Reikiavik, y en 1928, comenzaron las perforaciones de pozos de agua caliente. En el presente, alrededor de la cuarta parte de la población islandesa vive en casas calentadas por agua caliente geotérmica, por lo que el índice de contaminación es muy bajo en este país. La utilización de vapor proveniente de pozos de alta presión para generar electricidad comenzó en 1964, con la instalación en Hvergerdi de una central geotérmica de 15.000 kW. Otro uso a gran escala en este país de esta energía es a nivel agrícola, en las plantas de desecación industrial para tierras de diatomeas, algas y pescado, así como en menor escala para varios fines, tales como el lavado de lana, incubación de huevas de pescado y secado de heno.

En California se perforaron pozos para la obtención de vapor para la generación de electricidad ya desde 1921, pero el proyecto fue temporalmente abandonado. Se recuperó en 1955 y en 1960 existía en operación una planta de 12.500 kW. En Nueva Zelanda, el vapor obtenido de pozos perforados

producía en 1963 alrededor de 200 MW de electricidad y las instalaciones se siguen ampliando actualmente.

En Kenya se ha utilizado la energía geotérmica para hacer funcionar secadores que deshidratan legumbres, zanahorias, puerros, pimientos, coles, cebollas, etc...

Además, las cercanías de los campos geotérmicos son áreas de condiciones excelentes para el cultivo de legumbres y se han conseguido hasta tres cosechas al año en lugar de la única cosecha habitual.

China es relativamente rica en potencial geotérmico. Se han encontrado manantiales calientes en todas las regiones del país, y se han determinado más de 2.000 localidades geotérmicas. La mayoría de ellas poseen temperaturas inferiores a la de ebullición del agua, por lo que, con la tecnología actual, se usan para calefacción y desecación. La zona geotérmica de elevadas temperaturas se encuentra en la región del Tíbet.

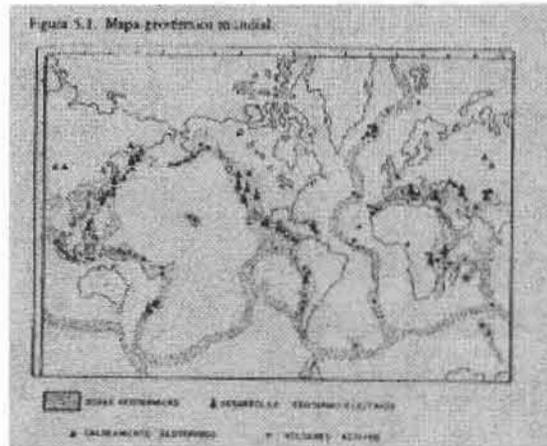
El Salvador es proporcionalmente el mayor productor de electricidad geotérmica, que llega a ser de un 37% de su consumo eléctrico total.

Puede decirse que el interés mundial por la energía geotérmica partió de las recomendaciones efectuadas por las Naciones Unidas después de la «Conferencia sobre Nuevas Fuentes de Energía» de Roma, en 1961. En la actualidad existen en el mundo en funcionamiento diversas plantas de producción de energía eléctrica geotérmica con una producción global de 1.700 MW en 1980, mientras que los usos térmicos se estimaban en el mismo año en unos 9.500 MW.

El desarrollo de los recursos geotérmicos es particularmente importante en los países que dependen exclusivamente del petróleo importado. Así, El Salvador ha construido dos instalaciones de 30 MW y proyecta tres nuevas; en Nicaragua, el terremoto interrumpió los estudios para la primera instalación de 45 MW, pero en la actualidad ya se está terminando y se proyectan otras dos; Guatemala finalizó la construcción de una central de 80 MW en 1983. La capacidad mundial de producción de energía geotérmica era en 1974 un 0,03% del total energético, pero para 1984 se estima una cifra que alcanzará el 0,1%.

Los costes de una explotación encaminada a buscar «pozos de vapor» útiles en una explotación geotérmica son elevados, pero sus alicientes son notables en cuanto a escasez de contaminación, abundancia y economía del «combustible», etc., alicientes que son del máximo interés frente a la reciente crisis energética.

Los distintos puntos de desarrollo geotérmico se muestran en el mapa de la figura de abajo, donde también se representan las zonas de calentamiento geotérmico y los volcanes activos.



Mapa geotérmico mundial

Así, se comprende 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 al respecto en El Salvador, Chile, Venezuela, México, Turquía, Etiopía, Kenya, Zaire, Indonesia, Filipinas y Formosa.

En España se han iniciado sondeos y exploraciones para tratar de estudiar a fondo estos problemas, primeramente en las Islas Canarias, continuándose seguidamente en el Sudeste de la Península, pero volveremos más adelante sobre nuestro particular caso canario.

Se explica pues, que las previsiones apunten hacia una capacidad geotérmica instalada en 1985 de unos 60.000 MW, y de unos 180.000 MW, en el año 2000.

Por tanto, y para comprender mejor lo que pueden significar estas cifras, lo mejor será comenzar estudiando las características de un yacimiento geotérmico y los posibles procesos para lograr convertir esta energía en trabajo útil.

### **1.3.- YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS**

La localización de zonas extensas de rocas a elevada temperatura y a profundidades asequibles es la primera condición que se requiere para poder utilizar la energía geotérmica, pero, por desgracia, no es la única. Por su débil conductividad térmica, las rocas naturales se enfrían con la misma lentitud

con que se calentaron y, por tanto, la extracción directa de su calor sólo es posible si existen condiciones adicionales.

En la naturaleza, esta extracción del calor sólo es posible cuando a profundidades asequibles de la zona anómala existen formaciones geológicas porosas o fisurales empapadas de agua que, en general, proceden de una infiltración natural superficial. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, podemos pues definir un yacimiento geotérmico como «un volumen de roca con temperatura anormalmente elevada para la profundidad a que se encuentra, susceptible de ser recorrida por una circulación de agua que pueda absorber el calor y transportarlo a los puntos de explotación».

Obsérvese, no obstante, que esta definición no implica necesariamente, que el agua se encuentre en el yacimiento «a priori». Esto hace que existan básicamente dos tipos de sistemas geotérmicos: los que espontáneamente producen un fluido caliente (agua o vapor), previamente almacenado, y los que no lo producen. Los primeros se denominan «sistemas hidrotérmicos», y los segundos, «sistemas de roca seca caliente». A continuación se estudiarán las características de cada uno de ellos.

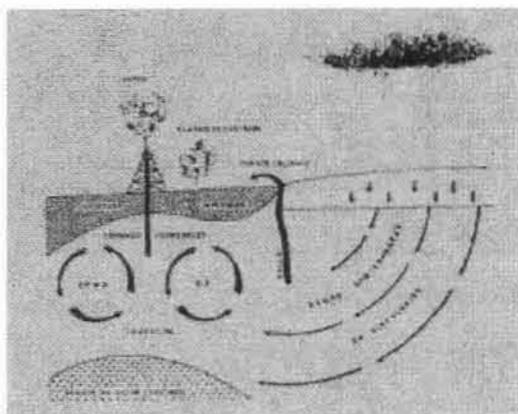
### **1.3.1.- Sistemas hidrotérmicos**

Los sistemas hidrotérmicos explotables están formados por una fuente de calor a relativamente escasa profundidad (de 1 a 10 km), que garantice un elevado flujo térmico por un largo periodo de tiempo, y un acuífero apropiado, asequible por sondeos mecánicos y sometido a las altas temperaturas de la fuente de calor. Esto exige, además, la presencia de unas formaciones geológicas con suficiente permeabilidad como para permitir la movilidad del fluido «indígena», suficiente superficie de contacto, un complejo de materiales impermeables que rodeen el acuífero y una zona de recarga del mismo. Estas condiciones quedan esquemáticamente representadas en la figura de abajo.

El agua caliente, si la formación permeable está aislada de la superficie por otras formaciones impermeables, adquirirá la temperatura del sistema y se encontrará en estado líquido o en forma de vapor, si su temperatura es inferior o superior, respectivamente, al punto de ebullición, que crece en función de la profundidad (presión).

Es difícil imaginar que un sistema hidrotérmico esté totalmente aislado de la superficie por rocas rigurosamente impermeables. Rocas no totalmente impermeables, o más frecuentemente zonas de fractura, conectan este sistema con la superficie y, en estas condiciones, parte del agua

caliente ascenderá hacia ella, y eventualmente llegará allí en forma de agua caliente o de vapor.



Esquema de un sistema geotérmico

Así pues, las condiciones naturales que permiten la existencia de un sistema hidrotérmico son análogas a las que se requieren para encontrar acumulaciones de gases y de petróleo: formaciones porosas o fisuradas (rocas almacén) aisladas o casi aisladas del exterior por formaciones poco permeables y en estructuras favorables que permitan el aislamiento y la acumulación de los fluidos.

El agua de estos sistemas no sólo actúa como un medio eficaz de extraer calor transportándolo fácilmente a la superficie, sino que es también, cuando se transforma en vapor, el factor dinámico que puede utilizarse directamente para mover mediante turbinas los generadores eléctricos, una vez que el vapor pueda ser extraído mediante sondeos.

La extracción de agua caliente o vapor a partir de los yacimientos hidrotérmicos depende, fundamentalmente, del gradiente de temperatura que posea el yacimiento.

Los yacimientos de *baja entalpía* están situados generalmente en cuencas sedimentarias que poseen un gradiente geotérmico de unos  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , de manera que a profundidades ya importantes para el sondeo (más de 2 km), la temperatura del agua contenida en el yacimiento oscila entre  $60$  y  $150^{\circ}\text{C}$ . Evidentemente, este agua saldrá a la superficie por debajo de su punto de ebullición, con lo que sólo será aprovechable como agua caliente. Sus aplicaciones posibles estarán, pues, limitadas a las de calefacción, ya sea doméstica, industrial o agrícola.

Por otro lado, los yacimientos de *alta entalpía*, situados en zonas de actividad volcánica o tectónica reciente, poseen un gradiente geotérmico cinco o seis veces superior a los de baja entalpía, de

forma que a poca profundidad (de 1 a 2 km) es posible encontrar agua entre los 200 y 300°C. Esta agua se puede hallar, dependiendo de la presión a la que esté sometida, en forma de vapor seco (domina la fase vapor), o de salmuera caliente (agua dominante), siendo frecuente este último caso, debido al gran poder de disolución del agua a éstas temperaturas.

Los yacimientos de vapor seco son fácilmente explotables, y su principal aplicación es la producción de energía eléctrica en turbinas de vapor, obteniéndose en estos casos agua caliente como subproducto. Los sistemas de agua caliente en forma de salmuera pueden presentar serias dificultades, debido a su gran poder de corrosión. Aunque a partir de ellos se pueden obtener también las sales como subproductos, debido a su alta corrosividad, el equipo instalado para la extracción es muy caro, con lo que este tipo de yacimientos Puede no ser rentable.

### **1.3.2.- Sistemas geotérmicos de roca seca caliente**

Las técnicas para la extracción del calor de la roca seca caliente de baja permeabilidad están actualmente en estado de investigación. El concepto básico es muy simple: se perfora un orificio lo suficientemente profundo para alcanzar una temperatura utilizable, se crean grandes superficies de transmisión de calor fracturando la roca (hidráulicamente, con explosivos o por tensión térmica) y se interceptan las fracturas con otro orificio. Circulando agua de un orificio a otro a través de la región fracturada, se puede extraer el calor de la roca.

Aunque el concepto sea muy simple, todavía han de resolverse muchas cuestiones antes de considerar un proyecto de este tipo económicamente rentable. Sin embargo, se han hecho progresos importantes en el conocimiento de las características de los yacimientos fundamentalmente bajo el aspecto de la iniciación y propagación de las fracturas, velocidad de pérdida de agua, fenómenos de mezcla, etc. Respecto a la fracturación de las rocas con explosivos, se están realizando intensos estudios en Inglaterra y en la URSS.

Por otro lado, si ya existen formaciones rocosas de permeabilidad natural suficiente, se pueden usar técnicas ya conocidas, como las empleadas para las prospecciones petrolíferas.

Se trata de la inundación de un sedimento permeable localizado entre capas impermeables. Se inyecta agua en distintos puntos y se recoge el vapor o el agua caliente formada en el lugar más caliente.

Hasta que la tecnología de la extracción del calor esté convenientemente desarrollada y su aplicabilidad económica esté demostrada a gran escala, los primeros sistemas de roca seca caliente han

de restringirse a regiones de yacimientos geotérmicos de alta entalpía, con gradientes térmicos mayores de los 50-C/km.

#### **1.4.- UTILIZACIÓN DE LAS FUENTES GEOTÉRMICA.**

Alrededor del 29% de la energía geotérmica que hoy día se utiliza sigue empleándose, como tradicionalmente, para balnearios. Sin embargo, en los últimos años ha ido aumentando cada vez más el número de aplicaciones. Un 33% se emplea en la generación de electricidad; un 22% en la agricultura; un 12% en calefacción, y un 4% en la industria.

Los fluidos geotérmicos se explotan también para la extracción de distintos productos como azufre, ácido bórico, sulfatos, cloruros e incluso gases como el sulfuro de hidrógeno, gas carbónico, metano, amoníaco, etc.

Las aplicaciones de los fluidos geotérmicos de baja entalpía (agua caliente) son esencialmente: calefacción, agricultura y ganadería e industria.

El empleo de calor geotérmico para usos domésticos (agua caliente y calefacción) es bastante antiguo, como ya se ha comentado anteriormente. Complementando los sistemas de calefacción se han desarrollado los de aire acondicionado.

En el caso de la agricultura y ganadería, los fluidos calientes se han utilizado en países fríos para crear invernaderos para hortalizas, flores y plantas o para acondicionar granjas de animales.

Las aplicaciones en el campo industrial son variadísimas; en general, el calor geotérmico puede ser útil a cualquier proceso industrial que requiera agua caliente: industrias papeleras, plásticos, alimentarias (lío-filización, secado, deshidratación), etc. Además, puede ayudar en otros aspectos como climatización de instalaciones mineras en áreas de subsuelos helados permanentes, deshelado de carreteras, potabilización de agua, etc...

#### **1.5.- PROCESOS DE CONVERSIÓN**

Como ya se ha mencionado, deben concurrir ciertas condiciones para que la energía geotérmica pueda ser utilizada. Primero, su accesibilidad, es decir, que los depósitos de calor se encuentren lo

suficientemente cerca de la superficie, lo que se puede conocer por estudios locales de la geología e hidrología del suelo. Una vez hecho este estudio, y localizado y evaluado el yacimiento, se puede ya producir la materia prima deseada (agua caliente o vapor). El proceso se completa con la tecnología necesaria para convertir esta materia prima en un producto comercial (electricidad calor) y para eliminar convenientemente los residuos de la operación. Existen límites, tanto económicos como técnicos, para el transporte a distancia de los fluidos geotérmicos mediante tuberías, en tanto que la electricidad puede ser transportada con bajos costes a grandes distancias.

La utilización comercial de estos yacimientos requiere que el proceso de conversión sea económicamente competitivo. Por ello, los sistemas comerciales geotérmicos desarrollados hasta ahora son muy pocos, están aplicados a depósitos de alta entalpía y figuran muy dispersos por el mundo. La escasez de productos fósiles y su aumento de precio harán comercial la explotación de fuentes geotérmicas de menor entalpía en las próximas décadas.

Las fuentes geotérmica y solar comparten la desventaja común de tener un nivel térmico bajo. Una técnica de incrementar su calidad, así como su capacidad de transportes, es convertir la energía disponible en potencia eléctrica. Desgraciadamente, la eficacia de este proceso de conversión está limitada por el nivel térmico, con lo que las eficiencias, al convertir fuentes geotérmicas a temperaturas por debajo de los 200°C a electricidad, son sustancialmente menores que los de las plantas impulsadas por combustibles fósiles.

Por este motivo, se ha considerado seriamente el utilizar la energía geotérmica como posibilidad no eléctrica. Estimaciones recientes han mostrado que cerca del 37% del total de la energía consumida en los EE.UU. se utiliza por debajo de los 250°C. De esta cantidad, una gran parte se usa entre 50 y 80°C, tanto para aplicaciones domésticas como industriales de calefacción. Sin embargo, la conversión eléctrica todavía es la más deseada en la actualidad.

Si se utiliza directamente el fluido geotérmico, es necesario tener muy en cuenta cómo se produce éste, ya que puede predominar la fase líquida o bien la fase vapor. En el segundo caso, el procedimiento de conversión es relativamente sencillo, ya que basta hacer pasar el vapor por una turbina, que generará corriente eléctrica. Sin embargo, si la fase líquida es la que se obtiene en mayor proporción, es necesario utilizar un ciclo de expansión en una o varias etapas para convertir la mayor cantidad de líquido en vapor.

Los rendimientos máximos que se pueden obtener con temperaturas de la fuente de unos 300°C son del 25%, siempre y cuando el sistema opere a temperaturas de condensación muy bajas (alrededor de los 25°C). Aunque estos valores no son muy altos, alcanzan órdenes de magnitud similares a los de otras fuentes alternativas de energía.

La eficacia media de una planta geotérmica se ha calculado alrededor del 12%, valor que comparado con el de una moderna planta de carbón, que es del 38% y con el de una central nuclear (33%), es bastante bajo. Pero el factor económico influye de tal forma que, a pesar de todo, parece hacerla atractiva, ya que los costes actuales de generación de electricidad geotérmica son competitivos con los de las plantas que utilizan carbón, petróleo combustible nuclear.

Digamos, por último, que a pesar de que la producción de electricidad y calor a partir de fuentes geotérmicas, tanto de predominancia de la fase de vapor como de la fase líquida, está siendo una realidad en muchas partes del mundo desde los últimos años, no se ha desarrollado aún el vasto potencial de reservas naturales hidrotérmicas y de roca seca. Esto es debido, en parte, a que actualmente las energías fósiles son o parecen más baratas. Sin embargo, si se realizan los estudios pertinentes, tanto a nivel geológico como en la tecnología de procesos, la situación futura necesariamente ha de cambiar.

Según algunos datos que hemos podido obtener, una central eléctrica de tipo geotérmico, operando con un fluido a unos 175°C en ciclo binario para producir 10 MW brutos de energía, podría costar aproximadamente unos 1.200 millones de pesetas.

Los mayores problemas que pueden presentar las explotaciones geotérmicas son: la pérdida excesiva de agua, la permeabilidad del terreno, los posibles hundimientos de la tierra y una utilización de grandes superficies. La presencia de materias extrañas en los fluidos extraídos puede causar ciertos inconvenientes, debido a su influencia sobre el medio ambiente, ya que contienen generalmente gases no condensables, sales amoniacales, arsénico, flúor, boro y otros compuestos más o menos nocivos. Si estos residuos de los efluentes geotérmicos no son tratados convenientemente, pueden dañar seriamente la ecología de la zona donde se vierten.

Para cualquier explotación a gran escala de un campo geotérmico se considera necesario desarrollar un método ecológicamente seguro de eliminación de los efluentes geotérmicos. Una de las técnicas estudiadas para estos casos es la infiltración de los residuos por medio de estanques formados por depresiones topográficas, que tiene un coste de eliminación razonable; otro método es la rein-

yección en los pozos, pero la viabilidad de esta técnica es relativa, debido a la saturación que necesariamente se habría de producir con el tiempo. El hecho real es que todavía no existen formas convincentes de eliminación de los efluentes geotérmicos, por lo que se requieren mayores investigaciones en este campo, ya que la solución de verter estos residuos libremente, como sucede en algunos casos, sólo debe ser válida en casos muy extremos.

## **1.6.- CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA. PERSPECTIVAS FUTURAS**

La energía geotérmica, en aquellos casos en que puede ser empleada, presenta las siguientes ventajas sobre las fuentes energéticas convencionales:

- ◆ Es una fuente energética autóctona.
- ◆ Su coste puede ser competitivo respecto al de las energías convencionales.
- ◆ El elemento aportador de calor no experimenta alza de coste con el tiempo que dura la explotación.

Frente a estas ventajas, sin embargo, presenta también los siguientes inconvenientes:

- ◆ El rendimiento termodinámico es bajo, debido a las condiciones de baja presión y temperatura con que se obtiene el fluido geotérmico. Las inversiones son elevadas, considerando las potencias no excesivamente altas que se obtienen por pozo (del orden de 10 MW) y la incertidumbre que lleva consigo la exploración del yacimiento.
- ◆ No es transportable y, por tanto, su desarrollo y explotación están limitados por las posibilidades de utilización en las zonas próximas al yacimiento.

Aunque las cifras son poco importantes, hay que señalar que todos los países se han dado cuenta del gran potencial que supone la energía geotérmica y, en consecuencia, ha comenzado a desarrollarse gran número de investigaciones y proyectos que permitirán aumentar considerablemente la potencia instalada de origen geotérmico en las próximas décadas.

Así, su futuro estará en función de la competitividad frente a otros sistemas convencionales de energía y, como ya hemos dicho anteriormente, el gran porvenir reside en la utilización de los fluidos de baja entalpia, cuya viabilidad puede estar condicionada por factores de situación. Puesto que el agua

caliente no se puede transportar a distancias muy grandes del punto de salida, la utilidad de un campo geotérmico de baja entalpía está condicionada por factores tales como su proximidad a zonas pobladas con desarrollo industrial o agrícola considerable. A este respecto cabe indicar además la utilización de gases de bajo punto de ebullición y la expansión de los fluidos geotérmicos, si se quiere obtener energía eléctrica. También es de vital importancia aprovechar las zonas de flujo elevado, pero de roca seca, provocando su inundación por medio de agua fluvial o marina. España inició hace unos 10 años un programa de prospección geotérmica, pero esto lo detallaremos en los siguientes apartados.

### **1.7.- ESPAÑA Y LAS FUENTES GEOTÉRMICAS**

La evaluación primaria de las posibilidades geotérmicas de una región es un problema complejo, en el que se requiere la utilización de datos de diversos orígenes: imágenes de rayos infrarrojos obtenidos por satélites; datos abundantes de flujo térmico o, al menos, de gradientes geotérmicos en perforaciones profundas; cronología de la actividad ígnea y sus características en los últimos periodos geológicos; conocimiento de las grandes estructuras geológicas; estudio geoquímica de las fuentes termales y otras manifestaciones superficiales, etc.

Disponiendo de estos datos, para evaluar las posibilidades de un sector en donde pueda sospecharse la existencia de un posible campo geotérmico, es necesario realizar estudios detallados de las formaciones geológicas y sus estructuras, mediante la coordinación de técnicas geológicas, geofísicas y geoquímicas, y determinar el estado térmico del sector mediante mapas detallados de temperaturas en secciones cercanas a la superficie y de gradientes, a distintas profundidades, mediante sondeos de exploración.

En la Península Ibérica no existe volcanismo activo en la actualidad, aunque algunas zonas volcánicas (Gerona, Zaragoza, SE de España) han tenido episodios activos para los que se pueden definir edades inferiores al millón de años. En general, se han detectado varias zonas geotérmicas en diversos lugares, tal como muestra el mapa de la figura.

La estructura geológica de nuestro territorio, con frecuentes cuencas sedimentarias limitadas por accidentes tectónicos, en las que alternan con frecuencia formaciones porosas o impermeables, es, en principio, muy favorable para que si existen anomalías geotérmicas, éstas puedan ser aprovechadas. Desgraciadamente, apenas se dispone de datos sobre la distribución del calor en el interior del subsuelo.



Mapa geotérmico de España

Por unas u otras razones, no es de esperar que en las tres regiones volcánicas peninsulares recientes, existan muchas posibilidades de encontrar campos geotérmicos de alta entalpía. La carencia de géisers y las temperaturas relativamente bajas de las fuentes termales, que pueden ser herencia de la pasada actividad volcánica, parecen apoyar esta apreciación inicial.

En cuanto a la posibilidad de localizar en la península campos geotérmicos de baja entalpía que puedan servir como fuente directa de calor (calefacción urbana, procesos industriales) y, eventualmente, para producir energía eléctrica, las investigaciones concretas hasta ahora realizadas son también insuficientes.

Sin embargo, en el mes de abril de 1982, se ha encontrado una bolsa de agua caliente (70-80°C) situada entre 2.400 y 2.600 m de profundidad, en los alrededores de Madrid, que, según los expertos, su aprovechamiento significaría un ahorro energético de unas 5.000 toneladas anuales de petróleo y la provisión de agua caliente para unas 20.000 personas, a razón de 50 litros por segundo.

Por otro lado, la estructura geológica de nuestro territorio es muy favorable para que, si existen anomalías geotérmicas, puedan establecerse campos hidrotérmicos. Desgraciadamente, apenas se tienen datos sobre la distribución del calor en el interior de nuestro subsuelo, pues en España existen pocos datos fiables de determinación de flujo térmico. En tanto no se disponga de estos datos básicos fundamentales, es difícil realizar evaluaciones.

El interés por desarrollar la utilización de los recursos geotérmicos se viene concretando en nuestro país desde 1972, mediante las actuaciones del INI, la Empresa Nacional Adaro, algunas Facultades de Geología y, fundamentalmente, del Instituto Geológico y Minero de España, que en 1975 realizó el «Inventario Nacional de Manifestaciones Geotérmicas», verdadera base para la programación posterior, que supuso el «Plan Nacional de Investigación Geotérmica», incluido en el «Plan Energético Nacional».

Este plan se encuentra en estos momentos en fase de localización de yacimientos a nivel nacional, estudios tecnológicos y económicos sobre la utilización de este tipo de energía e investigaciones efectuadas en Canarias, cuenca de Madrid, Cataluña, Galicia, cuenca del Duero, Cartagena, etc. De estas investigaciones se deduce que son los yacimientos de baja entalpía los más numerosos y los más fácilmente aprovechables. Así, el campo de Cartagena ha sido la primera zona de España que se ha visto favorecida por la utilización de esta energía para la calefacción de invernaderos, con resultados muy positivos, ya que a partir de la incorporación de la energía geotérmica, se han incrementado los beneficios en los cultivos del orden del 100%. Por otra parte, se espera que en un futuro próximo toda la energía térmica consumida en el polígono industrial de Villalonquéjar (Burgos) provenga del subsuelo.

### **1.8.- EL CASO GEOTÉRMICO CANARIO**

El conocimiento de la anomalía térmica de Montaña de Fuego, en Lanzarote, data desde el descubrimiento de la isla, en 1312, habiendo suscitado gran interés durante sucesivas épocas, como se refleja en los informes existentes sobre su explotación, Benito y Comba (1946), Plan Camacho (1950), Calamai y Cerón (1970), etc., habiéndose establecido asimismo contactos con la Sociedad Larderello (Pisa, Italia) en los años 1959 y 1964, pero nunca se efectuó un estudio lo suficientemente detallado.

Asimismo, en casi todos los informes y estudios económicos de la región canaria, se ha recomendado vivamente la exploración geotérmica; por ejemplo, en «Water Disalination in Developing Countries, U.N., 1964» (Desalinización de Agua en Países en Desarrollo, Naciones Unidas. 1964) se encuentran claras recomendaciones al respecto. También el proyecto SPA-15 (Estudio Científico de los Recursos de Agua en las Islas Canarias), desarrollado por el M.O.P. en cooperación con la UNESCO, se interesó por la investigación de estos recursos geotérmicos.

Alrededor del año 1973, se comenzó una serie de campañas de investigación geológica, termometría de superficie, prospecciones eléctricas y gravimétricas que permitieron establecer un posible modelo geotérmico de la región (Araña y Fúster, 1973).

Este modelo supone la existencia de una fuente térmica a una profundidad de 3 a 5 km, correspondiente a una cámara magmática sobre la que se localizaría un acuífero de posible origen marino, confinado entre la fuente térmica y una capa impermeable. La aparición de fuertes anomalías térmicas en superficie (más de 200 C a pocos metros de la superficie) estaría condicionada a la presencia de fracturas en la capa impermeable por la que se escaparía parte del vapor sobrecalentado que explicaría la asociación existente entre las altas temperaturas detectadas y zonas de fracturas.

Poco tiempo después de estos estudios, se ejecutó un sondeo profundo de reconocimiento (Instituto Geológico y Minero de España y Enadimsa) de más de mil metros de profundidad, que no llegó a atravesar un espeso paquete de materiales volcánicos submarinos bastante compacto. Posiblemente, esta formación constituye la cubierta de las zonas profundas más calientes.

Este posible campo sigue siendo, pues, una incógnita, porque para demostrar su existencia y viabilidad se requieren investigaciones costosas adicionales que nadie ha realizado, o si se han realizado, nosotros no tenemos noticias de ello. Quizá la falsa esperanza defraudada de que el primer sondeo de exploración debía ser productivo (lo que casi nunca ocurre), y también el hecho de que se desconoce hasta ahora si existe en profundidad un sistema con agua y vapor, hayan sido factores que han desanimado a proseguir la campaña de sondeos profundos necesarios para evaluar definitivamente esta anomalía.

Téngase en cuenta que, simplemente la posible utilización de estos recursos potenciales para la potabilización de agua del mar, justificaría una inversión considerable en la prospección. En cualquier caso, a la rentabilidad previsible de una planta geotérmica en Canarias debe aplicársele un coeficiente multiplicador, dadas las especiales condiciones geoeconómicas y estratégicas del archipiélago.

No obstante, es necesario destacar finalmente que, en realidad, estos recursos se explotan ya de forma metódica y racional en Lanzarote, aunque en un aspecto que no tiene relación con el objeto de nuestro estudio. Tradicionalmente, la zona de mayor anomalía térmica superficial en las Montañas de Fuego-Timanfaya venía siendo utilizada por la población para cocinar y calentar alimentos en hornos naturales acondicionados a tal fin. Incluso el Cabildo Insular de Lanzarote ha trazado un itinerario turístico en dicha zona volcánica, habiéndose declarado Parque Nacional para preservarla de cualquier

atentado ecológico. Detallamos esta labor porque en una explotación futura no puede olvidarse esta industria turística, que no sólo es rentable, sino que representa un esfuerzo considerable en la defensa del ambiente, que creemos debe ser siempre respetado en esta área.

## **2.- La energía térmica marina**

### **2.1.- Introducción**

Fue en los Estados Unidos, el jueves 2 de agosto de 1979, donde se obtuvo por primera vez electricidad utilizando la diferencia de temperatura entre las aguas profundas y frías del océano y las aguas más cálidas de la superficie.

La energía térmica de los mares, que acaban de redescubrir los norteamericanos, está sin embargo asociada al nombre del francés Georges Claude, que hace cincuenta años ya había luchado para imponer esta nueva energía.

La primera mini-central estadounidense, de potencia útil modesta, ya que sólo produce 10 kw, será seguida, dentro de algunos años, por una fase industrial, con centrales de un centenar de megavatios eléctricos. Francia espera el resultado de un estudio de factibilidad técnico-económica antes de intentar una experiencia en aguas de las Antillas o de Polinesia.

«El objeto de estas pruebas es esencialmente demostrar que el mar podrá convertirse en el futuro en la fuente de fuerza motriz más potente y más económica...» Nos encontramos en 1934 en vísperas de las pruebas mar adentro en Brasil de la primera central flotante de energía térmica marina (ETM), y Georges Claude, animado de un gran entusiasmo, describía su proyecto en la Academia Brasileña de Ciencias: el mercante *Tunisie* fabricaría 1000 t diarias de hielo poniendo en práctica una genial utilización de la diferencia de temperatura de 20 °C que existe entre las aguas de la superficie y las aguas profundas (de 500 a 1000 m) del océano tropical. Y añadía: “En resumen, como ven ustedes, mostrar nuevas posibilidades a la industria del futuro y, al mismo tiempo, intentar aumentar el bienestar

en las regiones tropicales, tal es el doble objetivo de este barco que, gracias a una aparente paradoja, al hundir sus antenas en el mar humeante extraerá cada día una montaña de hielo.....”

Tras estos primeros ensayos, ha sido necesario más de medio siglo para que apareciese un nuevo prototipo. Éste, todavía de tamaño modesto, tiene potencia útil sólo es de 10 kwe, empezó a producir electricidad el jueves 2 de agosto de 1979 a las 11 h, 17' (hora local de Hawai). Este prototipo, denominado mini-OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) por la compañía Lockheed, marca la reaparición de esta energía antigua en su status de nueva energía, y es muy probable que próximamente veamos producir energía a nivel industrial a los mares tropicales.

¿Pero, en qué consiste la energía térmica marina? Es el reencuentro de Carnot y de Bougainville, de la termodinámica y de los trópicos. Aunque el fondo del océano es frío, no sucede lo mismo con su superficie, en la cual el agua alcanza corrientemente 25 °C o 28 °C en Polinesia, las Antillas y otros lugares. El segundo principio de la termodinámica, célebre principio de Carnot, enseña que es posible hacer funcionar una máquina térmica entre un foco cálido y un foco frío. Sólo las máquinas térmicas comunes de una central de fuel o de una central nuclear utilizan desniveles térmicos de varios centenares de grados en los que los caudales de fluido en el foco caliente o en el foco frío son muy pequeños... frente a los enormes caudales de aguas calientes y frías que serán necesarios en una central ETM. Por ello, para producir 100 Mwe, es decir la décima parte de la potencia de una central nuclear, habrá que utilizar unos 400 m<sup>3</sup>/s de agua en cada uno de los dos focos, frío y caliente: ¡el valor del caudal medio del Sena en París .Si bien el agua caliente todavía puede bombeares con relativa facilidad ya que está en la superficie, no sucede lo mismo con el agua fría que será necesario ir a buscar a 1000 m de profundidad, por medio de una larga canalización de gran diámetro, cosa que constituye sin duda un problema grave.

## **2.2.- Una enorme estación de bombeo**

El estudio de la variación de la temperatura del océano en función de la profundidad en la zona intertropical permite distinguir a grandes rasgos tres zonas:

⇒una capa superficial de 100 a 200 m de espesor particularmente caliente en las proximidades del ecuador (de 28°C a 30°C) y más tibia al nivel de los trópicos (25°C

a 28°C), que funciona como un inmenso colector plano asegurando al mismo tiempo un excelente almacenamiento térmico

⇒una zona de variación muy rápida de la temperatura, entre 200 y 400 m de profundidad, que funciona como una barrera térmica entre dos masas de agua de distintas densidades

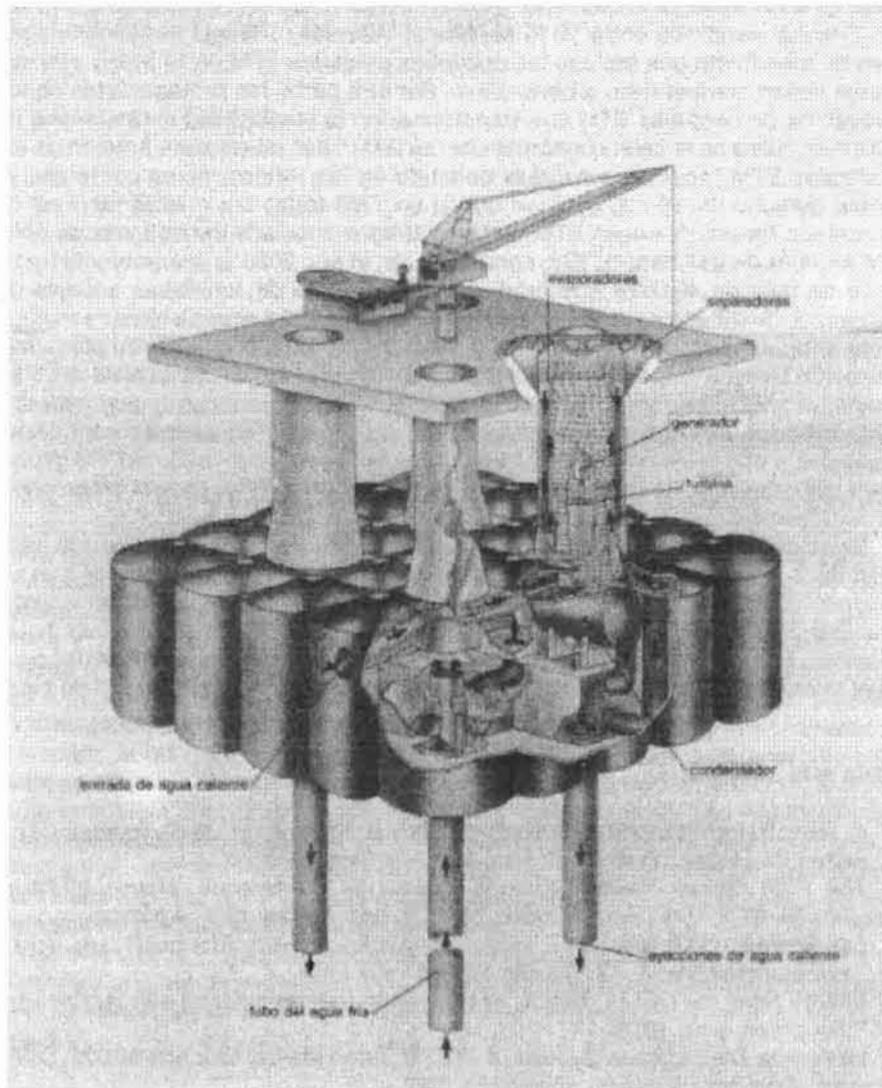
⇒una capa de aguas profundas en la que la temperatura decrece progresivamente hasta alcanzar 4 °C a 1000 m y 2 °C a 5000 m. Esas aguas profundas se han formado principalmente en las proximidades del continente Antártico (y en menor medida en el ártico) hace varios centenares de años

Si se admite que estas aguas frías tardan como promedio mil años en alcanzar la zona tropical y que su volumen total es de mil millones de kilómetros cúbicos, el caudal mundial del foco frío puede estimarse en unos 30.000.000 m<sup>3</sup>/s. El foco caliente de la superficie no supone ninguna limitación, y, en una central ETM son necesarios 3 m<sup>3</sup>/s de agua fría para producir 1 MW eléctrico. Por tanto, la potencia útil que se puede pensar en obtener del océano, conservando el carácter renovable del recurso, es de unos diez millones de MW, que podrían satisfacer ampliamente el consumo energético del año 2000.

En la zona intertropical, la diferencia de temperatura entre la superficie y los 1000 m de profundidad varía entre 16 y más de 24 °C en el Pacífico Este. Casi un tercio de la superficie de los océanos del mundo presentan una diferencia de temperatura respecto al fondo superior a los 18 °C. Por lo tanto, el mar constituye un inmenso depósito térmico en el que coexisten el foco caliente y el foco frío en la zona intertropical, donde se puede pensar en hacer funcionar una central de energía térmica marina por medio de una máquina térmica de baja temperatura.

Esta máquina puede funcionar por medio de dos ciclos termodinámicos distintos. En uno de ellos, denominado ciclo abierto, el agua marina, vaporizada al vacío en el foco caliente, alimentaría la turbina. En el otro, denominado ciclo cerrado, el agua marina caliente sirve para evaporar un fluido intermedio como el amoníaco que, tras haber producido un trabajo, se condensa en el foco frío.

El rendimiento global de una máquina de energía térmica marina es muy pequeño: del 2 al 3 % y los caudales de agua han de ser muy elevados. Por tanto, habrá que utilizar tuberías de gran diámetro para conducir esos caudales. Por ello, para producir potencias de 1, 10 y 100 MWe habrá que utilizar tubos con diámetros de 1.5 , 5 y 15 metros, respectivamente, mucho más grandes que los de



Francia no está ausente de la competición internacional. Dos grupos (Empain-Schnei, CGE-Alstom-ETPM) estudian varios proyectos, entre ellos uno de una central flotante de ciclo abierto. Con este tipo de central Francia adquiere una opción en una tecnología distinta de la utilizada ta ahora por los norteamericanos. La elección del ciclo abierto repercute incluso en la arquitectura de la central. Así, una plataforma semisumergible de hormigón surgida de las plataformas petrolíferas que se utilizan en el mar del Norte, ha tenido que ser especialmente diseñada para garantizar el funcionamiento de los evaporadores, que repercute en el rendimiento de la central, es indispensable una estabilidad muy grande incluso en presencia de un fuerte oleaje ,según Sea Tank Co.)

mayores tuberías del *off-shore* petrolero, pero en condiciones de presión y temperatura mucho menos drásticas. Al ser enormes los caudales de agua, las superficies necesarias para los intercambios térmicos en ciclo cerrado serán considerables: para producir 1 ó 100 MWe, los intercambiadores han de tener 1

o 100 hectáreas, respectivamente. Se calcula que aproximadamente un tercio de la potencia producida en el árbol de la turbina (la potencia bruta) se utilizará para bombear las aguas frías y cálidas. Por tanto, una central ETM puede compararse a una enorme estación de bombeo. Pese a los grandes caudales, las potencias de bombeo no son prohibitivas frente a la potencia total producida debido a que las alturas de bombeo sólo son de algunos metros (en una central en tierra: 3 m para el circuito de agua caliente y el doble para el circuito de agua fría). Esta altura de bombeo corresponde a la suma de las pérdidas de carga en las tomas de agua, en los circuitos de conducción, en los intercambiadores y en los circuitos de vertidos, a las que se añade la pérdida de carga (aproximadamente un metro) procedente de la diferencia de densidad entre las aguas bombeadas y las aguas de la superficie.

### **2.3.- Los sinsabores de Georges Claude**

El primero que sugirió utilizar la energía recuperable entre dos focos que presentasen una pequeña diferencia de temperaturas fue el físico francés d Arsonval, el 17 de septiembre de 1881, en la *Revue Scientifique*. Propuso utilizar las aguas calientes (30 °C) del pozo artesiano de Grenelle, en París, para evaporar un fluido intermedio, el dióxido de azufre; este vapor después de haber alimentado a una turbina se condensaba al entrar en contacto con un río vecino, como el Sena. Sugirió que su invento podría aplicarse en numerosos lugares, para empezar en las zonas tropicales de los océanos: había nacido la idea de la ETM. El norteamericano Campbell la recogió en 1913 y propuso en el *Engineering News* utilizar la ETM para producir fuerza motriz utilizando como intermediarios los gases licuados como el amoníaco. Pero fue el 13 de marzo de 1926 cuando Georges Claude y Paul Boucherot sugirieron utilizar el agua del mar como fluido de trabajo: acababa de inventarse el ciclo abierto. Desde entonces, la historia de la energía térmica marina prácticamente se confunde con la vida de un hombre fuera de lo común: Georges Claude.

En toda una serie de artículos, Georges Claude, inventor de numerosos métodos, entre ellos el de licuefacción del amoníaco, expone con gran ardor las ventajas del ciclo abierto.' Condena de un plumazo el ciclo cerrado: "Por más que nosotros mismos hayamos pensado en esta solución hemos renunciado rápidamente a ella. Las dificultades en el mantenimiento de sistemas de tuberías que trabajen con diferencias de temperatura tan pequeñas y necesariamente constituidas por una selva de tubos delgados y de gran diámetro sometidos a la acción corrosiva y a la densidad de vida del agua del mar, la

casi imposibilidad de garantizar, por medio de la limpieza permanente de estos tubos, una perfecta transmisión del calor, todo ello nos ha conducido a otra concepción”. Más adelante añade que “no hay necesidad de entretenerse malgastando en las paredes de los tubos los preciosos 20 °C que nos da la naturaleza” y explica la posibilidad de fabricar torrentes de vapor a 0,03 atmósferas haciendo hervir el agua al vacío; de esta forma 1 m<sup>3</sup> de agua tibia podría proporcionar hasta 100.000 kgm, es decir la energía de este mismo m<sup>3</sup> si cayese desde 100 metros.

Georges Claude experimentó su método en 1928 utilizando como foco caliente las aguas de refrigeración de un alto horno en Ougrée y como foco frío las aguas del Meuse; produjo 60 kw con una diferencia de temperaturas de 20 °C. De esta forma demostró a sus numerosos detractores que puede hacerse girar una turbina con presiones muy pequeñas y que la desgasificación sólo absorbe una pequeña parte de la energía producida por la dinamo.

Tras estos ensayos, George Claude decidió “acometer el inmenso mar”. En 1930, tras dos tentativas infructuosas, consiguió sumergir un tubo de 1,6 m de diámetro y de casi 2 km de largo en la bahía de Matanzas, en Cuba. Esto constituyó un éxito considerable para la época, habida cuenta del aislamiento del lugar, la pobreza de los medios utilizados y los límites de profundidad del trabajo de los buzos (40 m); de esta forma la primera fábrica de energía térmica marina produjo, en octubre, 22 kw con una diferencia de temperatura de 14 °C. Funcionó durante once días hasta que la conducción de agua fría fue destruida por una tempestad. Hay que señalar que, en este ensayo de Cuba, solo se utilizó 1/10 del agua fría bombeada, que se utilizó la turbina de Ougrée pese a no ser adecuada para este experimento, que el condensador sólo tenía una etapa y que la diferencia de temperatura era particularmente pequeña (14 °C). Georges Claude estimó entonces que si la instalación hubiese sido correctamente dimensionada habría tenido que producir 250 kw netos por m<sup>3</sup>/s de agua fría con una diferencia de temperaturas de 24 °C. Esta cifra podría incluso doblarse con las “centrales Claude-Boucherot del futuro”. El poder destructivo del océano era un factor con el que no había contado suficientemente. Entonces, abandonó provisionalmente las centrales en tierra para estudiar una central flotante por debajo de la cual una tubería permitiría bombear el agua de las profundidades: es la aventura del mercante *Tunisie*.

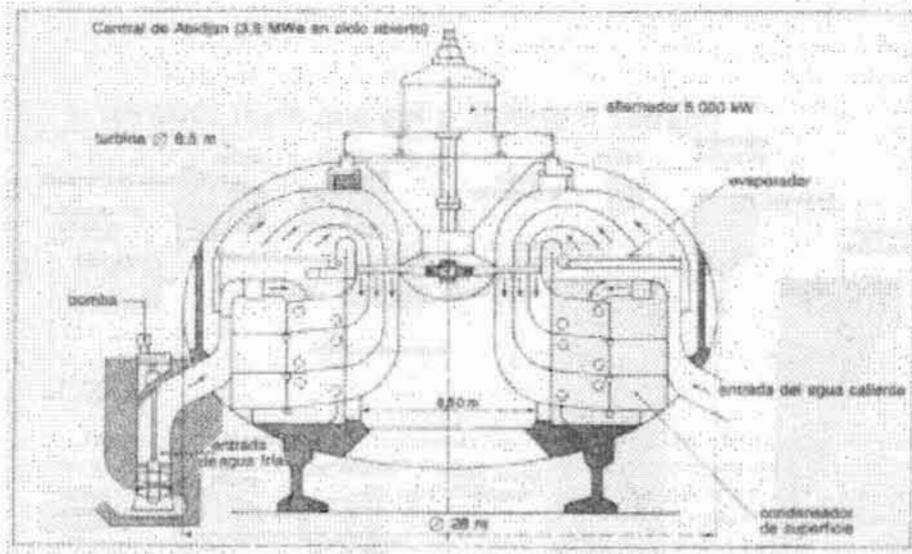
En 1933, Georges Claude hizo transformar a sus expensas un mercante de 10.000 t, el *Tunisie*, comprado a bajo precio en aquella época de crisis económica. Le hizo instalar, en los Chantiers de France, en Dunkerque, una fábrica térmica de 25 m de longitud y 8 m de diámetro, que comprendía 4

compartimentos de evaporación y 5 de condensación, y en la que el vacío del recinto se mantenía por medio de un extractor Rateau. La fábrica estaba destinada a producir hielo para la alimentación, producto de alto valor comercial en Brasil. Para ello, 8 turbinas de 257 kw unidas por sus extremos alimentaban a un alternador de 800 kw y a un compresor rotativo de amoniaco de 1200 kw, que fabricaría «cirios de hielo» que serían transportados a tierra por medio de chalanas.

El *Tunisie* llegó al Brasil a fines de 1934 y tras algunos arreglos complementarios se hizo a la mar y fue a anclar a 120 km mar adentro, de Río de Janeiro. Empezaron las dificultades: fue necesario colocar el tubo de agua fría. Se trataba de ensamblar segmentos de conductor de 2,5 m de diámetro por 6 de largo a partir de un gran flotador esférico que tenía que sumergirse, al terminar la colocación, a 20 m por debajo de la superficie al abrigo de las tempestades. El tubo, que tenía que medir 700 m de longitud, serviría, una vez colocado, para el anclaje del navío. Desgraciadamente, durante la colocación del quinto segmento, aparecieron peligrosos “golpes de catapulta” por la acción de la marejada: el flotador no oscilaba en fase con el compartimento de lastre situado al final de la tubería. Se decidió aumentar el lastre y entonces se produjo el naufragio definitivo del compartimento y el deterioro del tubo. Georges Claude estaba desanimado, los trabajos se habían retrasado ya varios meses y fabricar hielo destinado a luchar contra el calor para mejorar la calidad de vida resultaba ya inútil al final del verano austral: renunció a las reparaciones cuando había gastado ya mucho dinero en esta operación y se abandonó el proyecto.

El drama del *Tunisie*, víctima de una obstinada mala suerte, parecía no haber servido para nada. Cuando Georges Claude expuso sus desdichas en la Academia, el 18 de marzo de 1935, d'Arsonval, su maestro y amigo, intentó darle ánimos: “Por ello, mi querido Claude, tras vuestra accidentada campaña del Brasil, permitid a vuestros amigos, es decir a toda la Academia, que os renueve hoy su voto de confianza”.

Georges Claude no era de la clase de hombres que se rinden, tras algunos años de silencio volvía a ser él quien se encontraba tras el famoso proyecto de Abidjan, sin duda el más estudiado de toda la historia de la ETM.



He aquí un corte esquemático de la central de Abidjan, central de ciclo abierto, de 3,5 MWe, situada en tierra. Consiste en un recipiente elipsoide de revolución. En este dibujo el agua caliente recorre 3 evaporadores en serie, desde el centro hacia la periferia, y cada vez se forma un tercio del vapor a 27 °C, otro tercio a 28 °C y otro a 29 °C en vez de la totalidad del vapor a 27 °C. Éste es el fundamento de este proyecto. Estos tres flujos de vapor acometen, cada uno de ellos, a tres coronas concéntricas de álabes axiales. El agua fría, cuyo caudal es tan sólo un tercio del caudal del agua caliente, recorre tres condensadores en serie en cada uno de los cuales se calienta 3 °C (de 8° a 17 °C) y condensa a un tercio del caudal del agua caliente. Este sistema de etapas permite ganar de un 40 a un 50 % de potencia respecto al proyecto de Georges Claude que tan sólo comprendía un único condensador (proyecto de Abidjan.)

#### **2.4.- El proyecto Abidjan, económicamente viable**

Aprovechando las lecciones de los fracasos o semifracasos de Cuba y del Brasil, Georges Claude propuso en 1940 un bosquejo de una central de 40 MW destinada a Abidjan, que utilizaría las aguas frías de la albufera Ebrié y las aguas frías del "Pozo sin fondo" que alcanza 500 m de profundidad a 4 km de la costa. Era un proyecto muy osado pues el agua fría se bombeaba por medio de un largo túnel submarino excavado desde la orilla. La Comisión de trabajos públicos en las colonias, encargada de examinar este expediente lo juzgó como excesivamente audaz, pero con él nació la idea de una central ETM en Abidjan: este proyecto fue estudiado muy de cerca durante los quince años siguientes, primero por el CNRS, luego por la Société Energie Des Mers, creada especialmente por el ministerio francés de Ultramar, en la que se encontraron los principales sucesores de Georges Claude: Christian Beau y André Nizery.

Durante quince años se realizó un considerable trabajo. Se redujo la potencia bruta, del proyecto a 15 MW y luego a 10 MW, repartida en dos unidades. La potencia eléctrica neta del proyecto Abidjan es de 7 MWe repartida en dos módulos. Se trata de una central de ciclo abierto, implantada en tierra. Es, por tanto, necesario colocar un largo tubo de agua fría y diseñar una máquina térmica mucho más potente que la de Cuba.

Los estudios se iniciaron con el reconocimiento oceanográfico del Pozo sin fondo, con el alzado de la hidrología y la cartografía de los fondos. Paralelamente, se realizó en el laboratorio una investigación muy avanzada en hidráulica para determinar el espesor de la capa de agua fría que sería efectivamente bombeada teniendo en cuenta los muy elevados caudales de agua. En efecto, los detractores de la ETM pretendían que un trasiego como el proyectado conduciría al fondo las aguas tibias que se encuentran por encima de la toma de agua fría. Los ensayos fueron muy concluyentes ya que mostraron que un trasvase considerable, del orden de 100 m<sup>3</sup>/s sólo afectaría a una capa de 80 m de espesor en las proximidades de la toma de agua fría.

Los estudios técnicos propiamente dichos versaron sobre los componentes principales de la central'. Por lo que respecta al tubo de agua fría, las dificultades con las que se encontró Georges Claude demostraban la necesidad de liberarse del peligro de la marejada durante su colocación. El ingeniero André Nizery puso a punto una técnica que utiliza flotadores anti-marejada. En la metrópoli y en el emplazamiento de Abidjan tuvieron lugar diversas pruebas que culminaron en 1956 con la colocación de un segmento del conducto, de 2 m de diámetro y 150 de longitud, a trescientos metros de profundidad. El método elegido consiste en ensamblar en tierra segmentos más o menos rígidos y luego empalmarlos en el mar hasta formar elementos de 300 m de longitud. Entonces buzos que operan bajo los flotadores anti-marejada, tienen que enlazar los sucesivos fragmentos, que se colocan progresivamente en el mar adentro desde la costa hasta formar una serpiente marina de 4 km de longitud. A continuación, hay que empalmar una sección totalmente flexible de 700 m de longitud, destinada a sumergirse hacia el fondo del cañón y bajar suavemente el conjunto, suspendido mediante una docena de flotadores y mantenido en su posición por remolcadores.

En cuanto a los estudios y pruebas relativos a la máquina térmica (fig. de la central de Abidjan), se orientaron hacia los principales componentes del ciclo abierto:

- ⇒el desgasificador, destinado a extraer los gases disueltos en el agua marina;
- ⇒los evaporadores, para los que se construyó expresamente un circuito de prueba a escala semi-industrial con objeto de seleccionar el mejor dispositivo de evaporación;
- ⇒finalmente, la turbina que media 8 m de diámetro en cada unidad de 5 MW.

El estudio económico realizado en 1954 demostró que este proyecto era económicamente viable en Abidjan. El informe técnico podía considerarse completo y los principales aspectos difíciles del proyecto habían hallado respuestas satisfactorias. Quedaba por dar el gran paso de la decisión. Pero, razones de tipo político condujeron al cierre progresivo del dossier. En aquella época, el país concentraba sus esfuerzos en el desarrollo de fuentes de energía utilizables a corto plazo en la metrópoli: por ello se concedió prioridad a la hidroelectricidad, a la energía mareomotriz con la fábrica de la Rance, al petróleo y a la energía nuclear.

Y queda un dique construido en Costa de Marfil. El informe fue reestudiado por Électricité de France en 1958, para una central de 3,5 MWe en Guadalupe del mismo tipo que la de Abidjan, pero el asunto no siguió adelante: el proyecto no resultaba rentable, incluso si se vendía agua dulce.

Este último round fue fatal para el surgimiento de la ETM y sólo podemos lamentar la ausencia de una voluntad gubernamental suficiente en aquella época para intentar la aventura.

### **2.5.- Los intercambiadores: la mitad del precio de la central**

Fue necesario esperar hasta finales de los años sesenta para que aparecieran proyectos ETM totalmente nuevos: tres equipos universitarios norteamericanos presentaron proyectos de centrales flotantes de gran potencia que utilizaban el ciclo cerrado. Estos estudios universitarios, inicialmente financiados por la NSF anunciaban los tres grandes proyectos surgidos en dos industrias (Lockheed y TRW) y una universidad (John Hopkins) en 1.980. Estos tres últimos son flotantes. Este proyecto tiene la ventaja de la universalidad, y además es el único con el que puede pensarse para producir electricidad en Estados Unidos, ya que la plataforma continental es muy extensa y la diferencia de temperaturas de las aguas satisfactoria, sólo se obtiene a un centenar de kilómetros mar adentro. La idea de una central terrestre, limitada por una longitud aceptable de 5 km del conducto de agua fría, tiene, por tanto, que descartarse.

Al eliminar el ciclo abierto que, en un módulo de 100 MW exigiría una turbina enorme (de alrededor de 70 a 80 m de diámetro), parece ser que los norteamericanos han optado definitivamente por el ciclo cerrado que utiliza el amoníaco como fluido de trabajo. Los dos grandes proyectos de centrales representadas en las figuras de más adelante, prefiguran las futuras centrales ETM que dentro de unos diez, veinte o treinta años se extenderán por el océano tropical. Si bien los problemas técnicos que hay que resolver son numerosos, los especialistas están de acuerdo en reconocer que no son insuperables. Las principales dificultades derivan de la pequeña diferencia de temperaturas (20 °C) que determina considerables superficies de intercambio y grandes caudales de aguas frías y calientes.

Los intercambiadores (evaporador y condensador en ciclo cerrado) representan aproximadamente la mitad del precio de una central ETM. Son objeto de investigaciones intensas en Estados Unidos y Japón y pueden ser de diferentes tipos (esquema). Uno de los principales problemas que se plantean, debido a la larga permanencia de las centrales en el mar (una treintena de años) está relacionado con la agresividad del medio marino, que es a la vez un caldo de cultivo y un agente particularmente corrosivo. Los intercambiadores y, en particular, los evaporadores, recorridos por el agua caliente de la superficie, se verán afectados por la acumulación de suciedades del mar (micro y macrosuciedades) y de una intensa corrosión marina. En efecto, se admite comúnmente que las biosuciedades se desarrollan mucho menos en el circuito de agua fría en razón de su escaso contenido biológico debido a la ausencia de fotosíntesis en las profundidades. Las microsuciedades, constituidas por un delgado velo biológico que tiende a tapizar las importantes superficies de intercambio, pueden ser perjudiciales para el rendimiento térmico del evaporador: un velo de dos o tres décimas de milímetro reduciría a la mitad el coeficiente de intercambio. Si no se elimina este velo podrían desarrollarse organismos más importantes como mejillones o lapas. Se están experimentando diversos métodos para limpiar los intercambiadores: limpieza química por inyección de cloro o limpieza mecánica por medio de cepillos. Este último procedimiento parece adecuado para la limpieza continua de los tubos de los intercambiadores. Consiste en inyectar bolitas rugosas en el circuito de agua marina. En condiciones medias, debería bastar una limpieza semanal.

El material más adecuado para los intercambiadores parece ser el titanio pero es muy caro y actualmente se produce en pequeña cantidad. Las aleaciones a base de cobre han de eliminarse ya que son incompatibles con el amoníaco. Quedan determinados aceros inoxidables pero esta solución sería tan cara como el titanio. Las aleaciones de aluminio (como la aleación 5052 que contiene un 2,5 % de

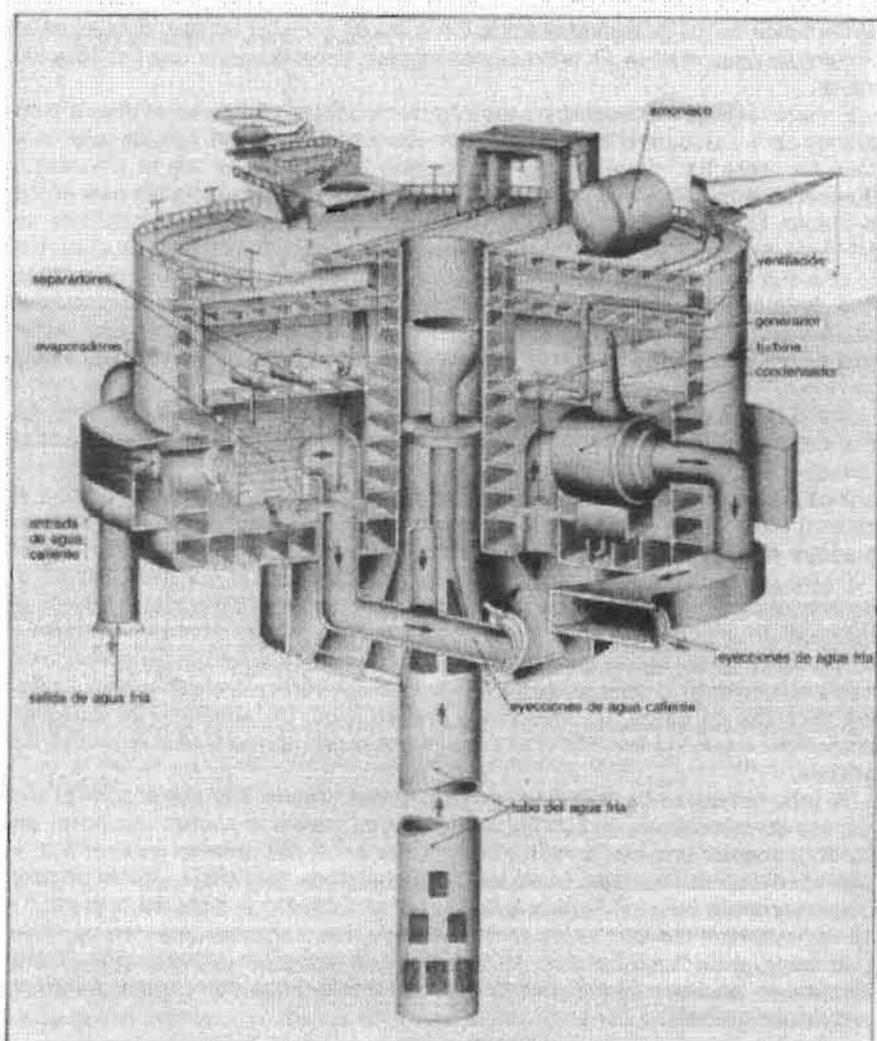
magnesio) son tres veces menos caras que el titanio, pero su duración de una quincena de años implicaría un cambio completo de los tubos durante la vida de la central. También amenazan con plantear problemas de erosión relacionados con las frecuentes limpiezas mecánicas. Además, habrá que evitar cualquier fuga de agua de mar en el amoníaco ya que entonces la mezcla es muy corrosiva.

Por lo que respecta a los problemas planteados por los tubos de agua fría, éstos son muy distintos según se trate de una central flotante o de una central terrestre. Se han estudiado diferentes tipos de tubos y de sus materiales constitutivos, como el acero, el aluminio, el hormigón armado, el plástico armado y el caucho armado. En el caso de una central flotante es necesario que el tubo de grandes dimensiones (800 m de longitud y 20 de diámetro en una central de 100 MW) pueda resistir los movimientos de la plataforma, lo que lleva casi necesariamente a pensar en un tubo relativamente flexible que amortigüe las sollicitaciones dinámicas a lo largo de toda su longitud. ¿Cómo fabricar, extender y empalmar una chimenea gigante como ésta? Ninguna solución ha conseguido hasta el momento la unanimidad. De todas formas parece preferible, para limitar las pérdidas de carga, no tener más que un tubo. Un apéndice de este tipo aumentará mucho la tracción sobre la barcaza lo que complicará el problema del anclaje.

El tubo terrestre nos lleva de nuevo a Georges Claude: hay que encontrar una técnica de colocación, un tipo de tubo capaz de resistir el punzonamiento del fondo y aceptar una cierta “entrada en falso” entre dos relieves submarinos, y, sobre todo, un método para franquear la zona agitada de la orilla: ¿hacer un pozo o aprovechar la inercia? Parece que el máximo diámetro posible del tubo (de 5 a 10 m) limitará el tamaño de las centrales terrestres a algunas decenas de MWe. Una longitud de 3 a 5 km sólo es posible si se resuelven algunas dificultades (anclaje en las corrientes, logística de la colocación) que actualmente están en estudio en Francia.

## **2.6.- ¿Electricidad, para qué?**

En el caso de una central terrestre, la electricidad producida sirve para alimentar la red local como “potencia básica”, es decir las 24 horas del día. Un subproducto particularmente interesante para los emplazamientos tropicales es el agua dulce, pero tan sólo en el caso del ciclo abierto que la fabrica naturalmente. También se ha propuesto utilizar las aguas frías, ricas en sales nutritivas



*Fig. 3.* La central flotante TRW de ciclo cerrado, tiene que producir 100 MWe de potencia neta. La plataforma es de hormigón y de forma cilíndrica; desplaza 215 000 t con un diámetro de 110 m y un calado de 35 m. Los cuatro módulos de 25 MWe de potencia unitaria están integrados en el casco. Cada uno de los 4 evaporadores comprende 65 000 tubos de titanio de 15 m de longitud y 4 cm de diámetro. El agua fría se bombea desde 1200 m de profundidad por medio de un tubo de 15 m de diámetro de plástico armado con fibras de vidrio que pesa, en el agua, 10.000 t. La estructura utiliza los vertidos de agua caliente para mantener su posición; por tanto, no está anclada y puede mantener su posición en el seno de una corriente de un nudo. (Según el documento TRW.)

para insembrar las cuencas con fitoplancton, el primer eslabón de la cadena biológica. Esto se basa en la doble constatación de que las aguas tropicales son pobres en sales nutritivas (pero ricas en Sol y, por tanto, favorables a la fotosíntesis) y de que las zonas de afloramiento de aguas frías (los *upwellings* de Perú o Mauritania) son particularmente fértiles y ricas en pesca. Sin embargo la rentabilidad de tal fabricación de algas destinadas a los camarones, los mariscos o a la piscicultura no ha sido demostrada.

También se han estudiado diversos procedimientos para utilizar la electricidad producida en el mar a bordo de las grandes centrales flotantes. La más sencilla consiste en volver al caso anterior por medio de un cable submarino. Esta solución no dejará de plantear determinados problemas como la conservación de las propiedades mecánicas y eléctricas del cable entre la plataforma y el fondo. Pero no faltan las perspectivas futuristas de fabricación en alta mar de productos “energívoros”.

Además, como ya hemos visto, el laboratorio de física aplicada de la Universidad John Hopkins piensa en la síntesis del amoníaco. Todavía falta saber electrolizar convenientemente el agua marina para extraer el hidrógeno, ya que la licuefacción del aire para producir nitrógeno no plantea ningún problema particular. En el caso de Estados Unidos, la fabricación de amoníaco permitiría ahorrar el gas natural a partir del cual se fabrica. El amoníaco interesa por si mismo en la industria de los abonos. También puede utilizarse como vector energético para disociarlo a continuación en hidrógeno, directamente utilizable en pilas de combustibles, en tierra, e incluso ser utilizado tal cual en pilas de combustible de amoníaco. Pero, para la utilización del hidrógeno como combustible todavía serán necesarios muchos años.

Finalmente, no es menos utópico fabricar aluminio en alta mar por medio de buques que transporten la bauxita que transportar el mineral por los altos valles alpinos... para fabricar 2 t de alúmina son necesarias 6 t de bauxita, la reducción de la alúmina proporciona entonces una tonelada de aluminio con un gasto de energía de unos 18 Mwh. Para tomar una decisión será necesario un análisis de la rentabilidad de la operación completa que depende fundamentalmente del coste de la electricidad ETM, así como del examen de las consecuencias socioeconómicas...

Hay muchas más ideas en el aire. Así, dado que el hidrógeno en forma líquida plantea un problema de transporte, sería sin duda ingenioso combinarlo con el carbono para sintetizar por ejemplo metanol o etanol, que sabemos cómo transportar y utilizar casi tal cual en los motores de

gasolina. Estas perspectivas, por futuristas que resulten actualmente, pueden a largo plazo, si encuentran salida, revolucionar un tanto el equilibrio energético del planeta... Los programas en curso que vamos a exponer sucintamente ilustran perfectamente lo que se ventila esta batalla.

### **2.7.- Investigaciones activas y diversificadas en Estados Unidos**

Como consecuencia de algunos trabajos universitarios que hacia 1970 redescubrieron las posibilidades de la energía térmica marina, su estudio ha avanzado espectacularmente en Estados Unidos. El presupuesto federal dedicado a la ETM ha pasado de 2 M\$ en 1978 a 36 M\$ en 1982 (es decir el 12 % del solar) y todavía crecerá sustancialmente en los próximos años.

La fase en "pequeña escala" se inició hace dos años, apunta principalmente a comprobar los intercambiadores (1 MW térmico) en un circuito de ensayo en Chicago, a medir las biosuciedades en la zona tropical (Islas Vírgenes, Ciudad de Panamá, Hawaii), a experimentar métodos de limpieza de los intercambiadores, a verificar materiales que resistan las agresiones marinas. Paralelamente, están en estudio tres centrales flotantes de gran potencia.

La fase en "gran escala en el mar" se inició en 1978 y apunta a experimentar diversos tipos de intercambiadores ETM (1 MWe, es decir 40 MW térmicos) en el mar en un petrolero recuperado con este objeto (OTEC) que es operacional desde 1980. Paralelamente, se siguen haciendo diversas experiencias sobre los tubos en el mar. Se proyectó la realización de una o dos plantas piloto a partir de 1982, cuyas plataformas están pensadas para una eventual extrapolación a 40 MWe en caso de éxito. Una de estas plantas piloto transmitiría electricidad a tierra por medio de un cable, la otra sería del tipo central en alta mar que produciría amoniaco y no estaría anclada (*grazing concept*). Por otra parte, se están evaluando diversos emplazamientos (golfo de México, Hawaii, Puerto Rico). Los primeros estudios acerca del impacto sobre el medio son muy tranquilizadores, ya que una gran central de 100 MWe situada en Hawaii (Keahole Point) produciría un enfriamiento de las aguas superficiales inferior a 1 °C a 500 m de la zona de vertido, con una perturbación térmica del orden de 0,3 °C en los 10 km<sup>2</sup> que rodearían a la central. Además, se ha calculado que el funcionamiento simultáneo de cien grandes centrales en el golfo de México sólo calentaría el foco frío 0,8°C.

Aparte de estos trabajos dirigidos por el DOE (Department of Energy), existe la iniciativa privada de Lockheed que ha hecho posible el funcionamiento en aguas de Hawai de una pequeña central flotante de ciclo cerrado, mini OTEC de 50 kw de potencia bruta y 10 kwe de potencia eléctrica y que, en consecuencia, produce menos energía que la que había conseguido Georges Claude cincuenta años antes, pero basada en una tecnología totalmente distinta.

Esta fase de "comprobación" del programa estadounidense terminó en 1985 y, debía desembocar en una fase "industrial", en el intervalo 40-100 MWe para el mercado de grandes islas, como Hawai o Puerto Rico en las que podría acometerse una realización de unos 3 GWe de aquí al año 2000. Se piensa en unidades todavía más grandes (100 a 400 MW) para el Sudeste de Estados Unidos a partir de 1998, con lo cual la contribución de la energía térmica marina podría alcanzar de 20 a 40 GWe en el año 2000 alcanzando de esta forma del 2 al 3 % de la potencia instalada prevista para esa época.

En Japón, los estudios de Investigación y Desarrollo en materia de energía térmica marina se iniciaron en 1977 bajo la dirección del gobierno japonés. En 1974, se había creado un consorcio japonés con objeto de estudiar las potencialidades de la energía térmica marina en el marco del proyecto (Sunshine). Las soluciones técnicas estudiadas privilegian el sistema de central de ciclo cerrado y se ha considerado el amoníaco como el mejor fluido de trabajo. Se está experimentando un circuito de pruebas para los intercambiadores y se han seleccionado cinco emplazamientos potenciales en Japón. Durante los próximos cinco años se pondrán a punto los principales subsistemas y se ha programado la construcción de un módulo de 1 MWe en una barcaza. Hacia finales de los años 80 estaba previsto construir y verificar en el mar una fábrica piloto de 10 a 15 MWe que daría lugar hacia 1990 a una central de demostración de gran potencia (100 MWe). Con ello el programa japonés resulta comparable por sus objetivos al programa esta-

dounidense, con una duración más larga, pero con una financiación que, por el momento, sería del orden del millón de dólares, sin incluir la contribución sin duda importante de los industriales.

En Francia, se realizó un estudio sobre las posibilidades técnico-económicas en el intervalo de potencias comprendido entre 1 y 10 MWe que finalizaría a inicios de 1980. Se examinan las soluciones técnicas para una central en tierra y para una central flotante, además se están comparando los dos ciclos, abierto y cerrado. Si los resultados son favorables, podría construirse

una central de pruebas de algunos MW en los DOMITOM hacia 1985, tras una fase de ensayos de los componentes.

Finalmente, un grupo de industriales europeos (EUROCEAN), dominado en realidad por intereses suecos, ha iniciado recientemente un estudio teórico para delimitar los problemas planteados por las grandes centrales.

#### **CUATRO TIPOS DE INTERCAMBIADORES EN ESTUDIO**

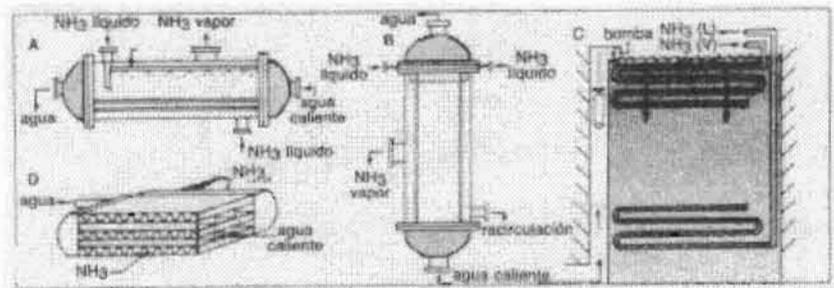
En el caso del ciclo cerrado adoptado en los distintos proyectos de explotación de la energía térmica marina, uno de los problemas tecnológicos importantes que hay que resolver es el planteado por los intercambiadores: evaporador y condensador. En efecto, la pequeña diferencia de temperatura (20°) entre las aguas de la superficie y las del fondo exige considerables superficies de intercambio y grandes caudales de aguas calientes y frías. En Estados Unidos y Japón, se están realizando investigaciones avanzadas sobre cuatro tipos de intercambiadores.

*A. Intercambiador de tubos horizontales:* se trata de un esquema muy clásico que hay que adaptar a las condiciones de la ETM: pequeñas diferencias de temperatura y presiones inferiores a 10 kg/cm<sup>2</sup>. El agua de mar caliente circula por tubos horizontales provocando la evaporación del amoníaco. Las investigaciones en curso apuntan a mejorar el coeficiente de transferencia térmica de los tubos del amoníaco. por ejemplo por deposición de un metal poroso, con lo que los poros se comportarían como otros tantos núcleos que favorecerían la ebullición nucleada del amoníaco.

*B. Intercambiador de película vertical:* el amoníaco fluye a lo largo de tubos verticales dentados. Las microondas producidas por el paso del amoníaco por las estrías mejoran el coeficiente de intercambio térmico en varios órdenes de magnitud. Se trata de una idea prometedora, pero quedan problemas de fabricación por resolver tales como el del modo de practicar el estriado en tubos de titanio.

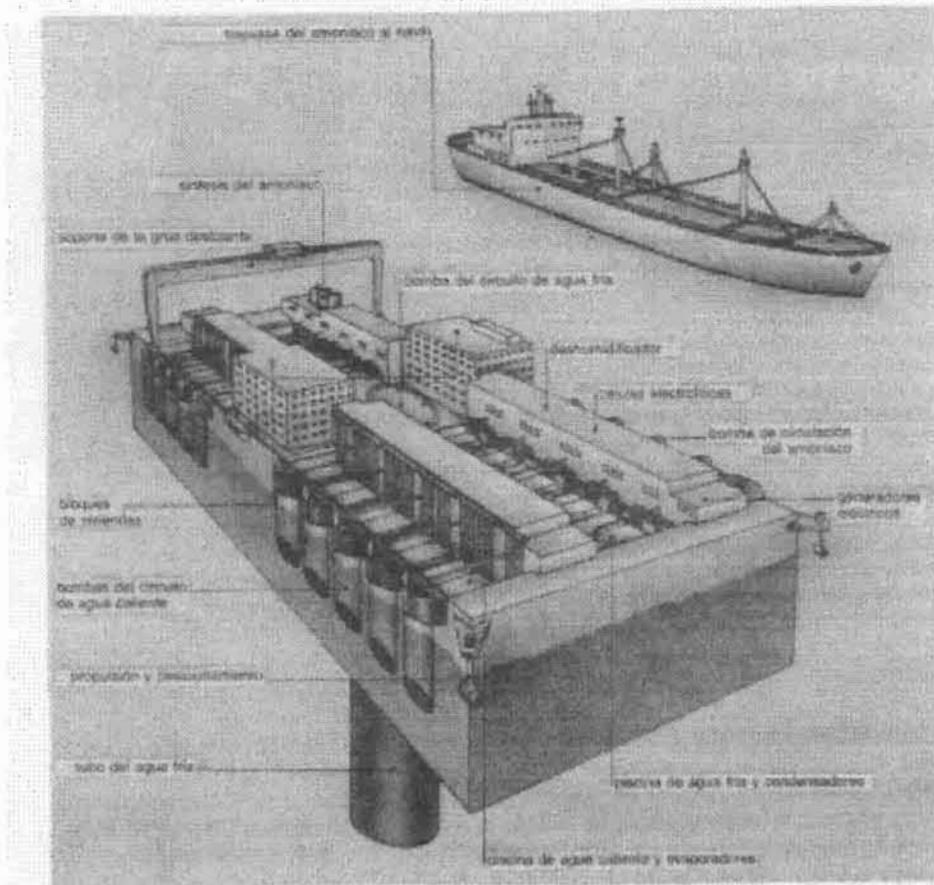
*C. Intercambiador trombón:* se trata del modelo "(rústico" por el que se optó en el proyecto APL: un tubo liso, en forma de trombón y recorrido por el amoníaco, está sumergido en una piscina de agua caliente. La limpieza de un sistema como este por cepillado parece sin embargo difícil. Se está estudiando su limpieza por medio de ultrasonidos.

**D. Intercambiador de placas:** es una técnica con futuro El agua caliente y el amoníaco están separados por una placa de metal cuya superficie puede estar más o menos trabajada" para aumentar el intercambio térmico Los intercambiadores de placas que todavía plantean algunos problemas (limpieza) resultarían cinco veces menos obstructivos que los intercambiadores tubulares (según 6th OTEC Conf.)



## **2.8.- Una energía para el futuro**

La central terrestre de Abidjan hubiese podido ser rentable en las condiciones económicas de la época, en 1955. Hoy en día los estudios norteamericanos permiten avanzar los costes de las centrales de 100 MW o más. Son necesarias dos puntualizaciones. Al igual que en las otras centrales de energía renovable, en las que las inversiones son grandes, el periodo de amortización, así como el interés de los empréstitos que han de tenerse en cuenta influirán muy sensiblemente en el precio del kWh. Por otra parte, el precio de la energía térmica marina es tanto más bajo cuanto mayor es la diferencia de temperaturas. Por tanto, interesará o bien bombear el agua a grandes profundidades, pero más allá de los 1000 m la temperatura disminuye muy lentamente por debajo de los 4 °C, o bien utilizar al máximo las eventuales posibilidades de sobrecalentamiento en



La central de ciclo cerrado presentada por el laboratorio APL (Applied physics laboratory) de la John Hopkins University es muy distinta de la precedente: no transmite la electricidad producida a la costa por medio de un cable sino que la utiliza para fabricar amoníaco en el mismo lugar. El hidrógeno se obtiene por electrólisis del agua y el nitrógeno por licuefacción del aire. Una combinación catalítica del hidrógeno y del nitrógeno produce el amoníaco que a continuación se embarca en navíos especializados: los transportes de gas licuado cuya tecnología está actualmente a punto. Una estructura de este tipo sin cordón umbilical no tiene que anclarse. Migra en busca de los mejores "pastos térmicos" en los que la diferencia de temperaturas es lo más elevada posible, por ejemplo, en alta mar en el NE de Brasil, fuera de las aguas territoriales, en una zona sin tempestades ni ciclones, de ahí su aspecto basto y poco marinero de paralelepípedo rectángulo de hormigón. La investigación del mínimo coste unida a la de la máxima diferencia de temperaturas permite, según la Universidad John Hopkins, avanzar un precio del kWh producido inferior a la mitad que en los dos casos precedentes de Lockheed y TWR. Esta gran piscina (160 x 60 x 25 m) compartimentada en subpiscinas calientes y frías en las que se bañan los intercambiadores trombón (recuadro 3) muy sencillos en una versión de 100 MWe, producirá 300 t diarias de amoníaco por medio de 20 módulos de 5 MW. El mercado para estas centrales, de aquí a fines de siglo, comprenderá unas cincuenta unidades en una versión comercial que producirá 1000 t diarias de amoníaco. (Según APL.)

superficie: con este procedimiento el proyecto Abidjan ganaba algunos grados para el foco caliente al bombear el agua en una laguna poco profunda

En todo caso, en el estado actual de la tecnología, es conveniente ser prudentes hasta que una gran fábrica de demostración no funcione verdaderamente. La mayoría de los proyectos de centrales de 100 MWe evalúan el kw instalado entre 6 000 y 12 000 francos y el kWh entre 15 y 25 céntimos de franco. Los más pesimistas estiman un techo de 50 céntimos para el precio del kWh. Por tanto el kWh ETM no sería por el momento mucho más caro que el kWh en Francia (estimado entre 12-16 céntimos). Por otra parte, los protagonistas proyectos de centrales ETM que transformarían la electricidad en alta mar, fuera de la zona económica de las 200 millas (el estatuto centrales ETM todavía no ha sido debatido en las interminables sobre derecho marítimo), estiman que si en 1990 todas las nueva amoníaco fuesen de origen ETM, Estados Unidos ahorraría mil millones anuales de gas natural. Ello conduciría, en el año 2000, a una potencia instalada de mas de 40 GWe que produciría 45 millones de toneladas amoníaco destinado a la industria de los fertilizantes.' La energía térmica marina, este antiguo invento recientemente redescubierto, está, por tanto, en plena maduración técnica. Sin embargo, tendrá que demostrar su validez al nivel del MW. Tiene, ya ahora, las ventajas de ser renovable, limpia, naturalmente concentrada, disponible de forma continua e incluso puede producir en grandes cantidades agua dulce con el ciclo abierto. A largo plazo, la apuesta a favor de la ETM dependerá del desarrollo de vectores energéticos tales como el metanol, el amoníaco o el hidrógeno...

Estas perspectivas pueden parecer futuristas hoy en día, pero la historia mundial de la energía nos enseña que el monolitismo en materia energética es un engaño. El futuro no dependerá exclusivamente del carbón, ni de la energía nuclear, ni del petróleo, ni de la energía solar; se basará en la diversidad de las fuentes. Por lo que respecta a la ETM, esta tiene la ambición de competir con el fuel térmico a corto plazo y con la energía nuclear o el carbón a finales de siglo.

### **Un ciclo tiene que ser o abierto o cerrado**

Una máquina térmica puede funcionar con dos clases de ciclos termodinámicos: el ciclo abierto y el ciclo cerrado. El fundamento del ciclo abierto es muy sencillo: el agua de mar caliente (25 a 30 °C) se distribuye por un evaporador en el que la presión es muy pequeña (del orden de 3/100 de atmósfera),

lo que provoca la ebullición espontánea del agua, el vapor así producido alimenta entonces a una turbina antes de mezclarse con el agua fría del condensador, en el que la presión es todavía mas pequeña que en el evaporador. La pequeñísima diferencia de presión entre los extremos de la turbina (entre 1 y 2/100 de atmósfera) implica que para obtener alguna potencia sean necesarios grandes caudales de vapor, y, por tanto, que la turbina sea de gran diámetro (8 m en el proyecto Abidjan de 5 MW).

El mantenimiento de la central en funcionamiento supone que deben vigilarse muy cuidadosamente todas las fugas posibles, empezando por el fenómeno de desgasificación del agua marina en el foco caliente y en el frío. Si no se evacuasen los gases disueltos en el agua marina, la turbina se pararía muy rápidamente, ya que el vacío desaparecería enseguida del recinto; ésta es una complicación técnica inherente al ciclo abierto: la presencia de un desgasificador que utiliza una pequeña parte de la potencia producida por la central.

El ciclo abierto presenta la ventaja de poder producir grandes cantidades de agua dulce si se reemplazan los condensadores de mezcla (en los que el vapor de agua que sale de la turbina se mezcla con el agua fría del fondo del mar) por condensadores de superficie, en los que el vapor de agua (dulce) se condensa en la pared fría del intercambiador. El caudal de agua dulce puede alcanzar 100 m<sup>3</sup>/h por MW producido.

El ciclo cerrado recurre a un fluido intermedio muy volátil como el amoníaco. El agua marina caliente cede su calor al amoníaco o a través de un intercambiador y éste se vaporiza. El vapor así producido se envía a la turbina en la que produce un trabajo motriz antes de condensarse al entrar en contacto con la pared fría del condensador que se alimenta con agua marina fría. Una bomba de circulación garantiza la recuperación del fluido condensado y su transmisión al evaporador para iniciar un nuevo ciclo.

El fluido intermedio que se utiliza más frecuentemente es el amoníaco: además de sus buenas propiedades termodinámicas y de su elevada presión de vapor (9 kg/cm<sup>2</sup> a 25 °C), tiene la ventaja de ser bien conocido a nivel industrial, barato y biodegradable en caso de fuga. El ciclo cerrado se caracteriza, por lo tanto, por sus turbinas pequeñas, pero presenta el gran inconveniente de necesitar intercambiadores de superficies muy grandes, debido a las pequeñas variaciones de temperatura en los intercambiadores.

Una central de 1 MW y de “tecnología rústica” necesitaría una superficie de evaporador (o de condensador) de casi una hectárea. La investigación de intercambiadores de mejores rendimientos (y más caros) podría llevar a reducir estas superficies en un factor 5, lo que reduciría en la misma proporción el espinoso problema de la corrosión y de las biosuciedades.

### **Pequeño rendimiento de Carnot, grandes caudales de agua**

El rendimiento máximo de una máquina térmica que funcione entre un foco caliente  $T_2$  y un foco frío  $T_1$  es  $(T_2 - T_1)/T_2$  según señala el ciclo de Carnot.

La diferencia  $T_2 - T_1$  que alcanza varios centenares de °C en los motores clásicos y en ciertas turbinas, tan sólo es de 20 °C en el caso de la ETM. El cálculo que sigue, indicativo para una central de 1 MW de ciclo cerrado, proporciona algunos órdenes de magnitud útiles.

El agua caliente a 25 °C se enfría hasta 22 °C en el evaporador, en el que genera el vapor de amoníaco a 20 °C que, después de accionar la turbina, se condensa a 10 °C en el condensador, donde el agua de las profundidades, que entra a 5 °C, sale a 8 °C. Como la diferencia de temperaturas entre los bornes de la turbina sólo es de 10 °C, el rendimiento del ciclo de Carnot será:  $10/293 = 0,034$ . Si se tiene en cuenta el rendimiento de la turbina (0,8), el del alternador (0,95) y el rendimiento real del fluido respecto a su ciclo teórico (0,095), el rendimiento global de la central resulta muy pequeño:  $P_g = 0,024$ .

Los caudales de agua en el foco frío y en el foco caliente son muy elevados, ya que corresponden a variaciones de temperatura  $\Delta t$  del agua marina muy pequeñas en los intercambiadores. Para esta central de 1 MW los cálculos dan un caudal de 43 m<sup>3</sup>/s.

## BIBLIOGRAFÍA

◆ “Energías alternativas renovables”

F. Jarabo Friedrich / J. Hernández González

COLECCIÓN MINOR, 1.983 (Univ. de La Laguna)

Este es un libro divulgativo y muy aconsejable para cualquier estudiante o profesional que desee hacerse a la idea de las energías renovables y de sus aplicaciones en Canarias.

◆ “Las nuevas energías”

Colección Ciencias, 1.984

Ed. Fontalba

El libro al que nos estamos refiriendo tiene las mismas características que el anterior, si bien al no estar referido a Canarias, expone nuevas formas de energía aplicables a otras partes del planeta. Este libro está compuesto por una recopilación de artículos de LA RECHERCHE.

◆ “El correo de la Unesco”

Revista de la UNESCO, Julio 81

Esta revista presenta artículos que tratan temas que interesan a la UNESCO, entre los que encontramos varios sobre innovaciones energéticas.

◆ “La electricidad en España”

UNESA, 1.991

Este libro tiene por finalidad resolver las dudas básicas de los lectores acerca de las distintas formas de obtener electricidad en España.