

CAPÍTULO 2 RECURSOS ENERGÉTICOS NATURALES

2.1 COMBUSTIBLES FÓSILES

Combustible fósil es un término no muy bien definido que se usa comúnmente para referirse a los depósitos geológicos combustibles de materiales orgánicos, que se han formado a partir de restos de plantas y animales atrapados en rocas sedimentarias, durante cientos de millones de años, por efecto del calor y de la presión dentro de la corteza terrestre.

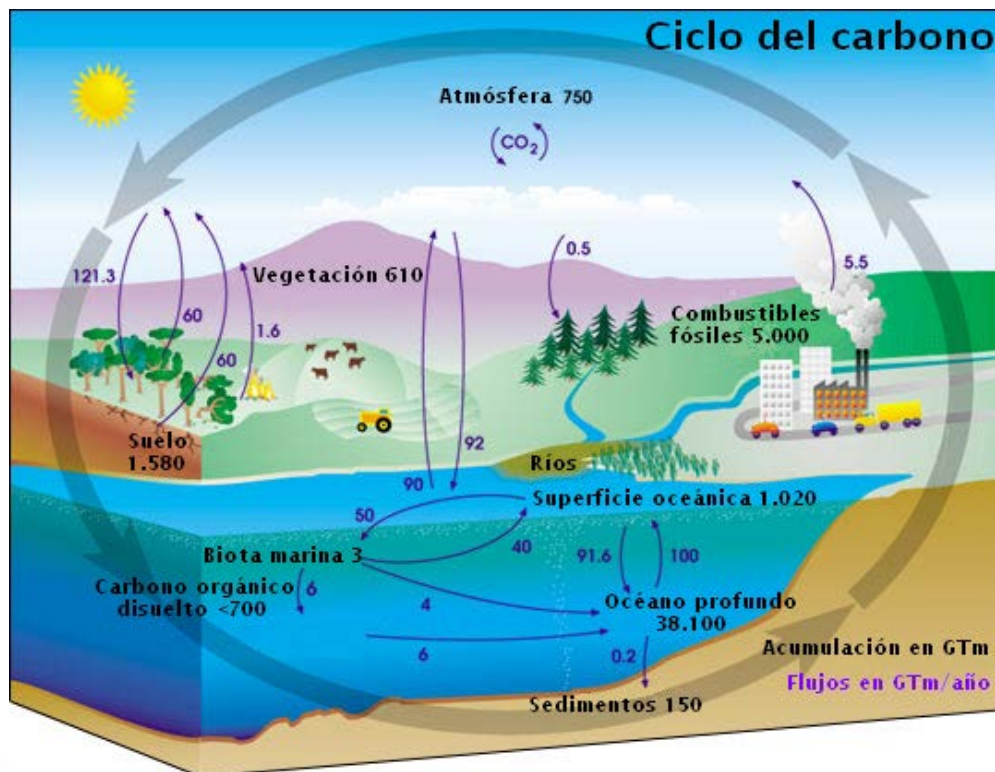


Figura 2.1 El ciclo del carbono. Las cifras en color negro se refieren a cantidades acumuladas (en GTm) y las cifras en azul a cantidad de carbono transportada (en GTm/año).

Estos depósitos forman parte del **ciclo del carbono** y tienen su origen en un pequeño porcentaje, inferior al 1%, del material orgánico enterrado que bajo determinadas circunstancias se preserva sin descomponerse y, por tanto, sin volver a reciclarse como CO_2 en la atmósfera. Debido a este proceso, ingentes cantidades de carbono fueron retirándose del ciclo natural durante periodos geológicos y almacenándose principalmente en forma de hidrocarburos, siguiendo un lento y complicado proceso químico en el que podemos distinguir tres etapas:

- **Degradación bioquímica:** Esta primera etapa se inicia con la acción bacteriana sobre la materia orgánica. Este proceso se realiza a través de la respiración en condiciones aerobias o por fermentación en condiciones anaerobias (sin oxígeno). Se desprende gas metano –el gas de los pantanos– y se va concentrando el carbono, transformándose la materia vegetal en turba.
- **Policondensación:** Con el aumento de la profundidad del sedimento, las transformaciones de origen bioquímico van siendo desplazadas por las puramente químicas y físicas. Muchas de estas moléculas degradadas son muy reactivas químicamente y se unen entre sí formando polímeros (geopolímeros) y liberando otros compuestos orgánicos más sencillos y agua.

- Insolubilización: En esta última etapa, hay una mayor policondensación y reordenamiento molecular debidos al aumento de presión y temperatura. De esta forma, el material resultante va adquiriendo un poder calorífico cada vez más elevado.

En general, los combustibles fósiles se dividen en tres grandes grupos, denominados: carbón, petróleo y gas natural. En menores cantidades aparecen bajo otras formas menos familiares, como la turba, la pizarra bituminosa, las arenas asfálticas y el petróleo pesado. En los sedimentos marinos la materia orgánica se altera generalmente a gas natural y petróleo líquido, mientras que en las rocas terrestres tienden a formar gas y carbón.

Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía que utiliza actualmente nuestra sociedad, en torno al 85% del total (véase la figura 4 del capítulo 1). No ha sido siempre así, ni será así, si se consideran periodos largos de la historia de la Tierra, en los que la composición del “cóctel” de combustibles utilizados ha variado apreciablemente (véase la figura 3 del capítulo 1).

El ciclo del carbono: Los átomos de carbono que forman parte de la biosfera sufren un ciclo de ida y vuelta, pasando por diferentes estructuras moleculares, que se transforman unas en otras, transportándose y acumulándose en el aire, el agua, el suelo y formando parte de los organismos que viven en estos medios.

La distribución aproximada del carbono en los diferentes medios naturales se ve en la siguiente tabla. Las cifras de la tabla están referidas a valores de finales del pasado siglo, cuando la atmósfera contenía unas 750 gigatoneladas (GTm) de carbono en forma de CO₂. Esta cantidad de carbono correspondía a una concentración promedio atmosférica de CO₂ de 358 ppm en volumen. Durante la pasada década esta concentración promedio ha ido creciendo en torno a 1,5 ppm por año; de modo que en 2005 la concentración se aproximaba a 370, que corresponde a unas 775 GTm de carbono.

Repositorios naturales de carbono	Contenido (GTm de C)
Atmósfera	750
Bosques	610
Suelo	1.580
Superficie del océano	1.020
Océano profundo	38.100
Combustibles fósiles:	
Carbón	4.000
Petróleo	500
Gas Natural	500
Total Combustibles fósiles	5.000

Tabla 2.1 Acumulación de carbono en los repositorios naturales

En comparación, la vegetación terrestre contiene unas 610 GTm, almacenadas como celulosa en los árboles. El suelo contiene entre dos y tres veces esta cantidad en forma de materia orgánica en descomposición, o humus. El océano contiene una cantidad aún más grande, unas 38.000 GTm, aunque realmente en su mayor parte están en forma de bicarbonatos disueltos a gran profundidad y, por tanto, al margen de la circulación.

Los combustibles fósiles son una de las mayores fuentes potenciales de dióxido de carbono, contribuyendo con 5.000 GTm de carbono. Es decir, bastante más del que hay actualmente en la atmósfera, de modo que la combustión de estos combustibles fósiles produciría grandes cambios en el contenido atmosférico de CO₂, antes de que pudiera ser reciclado por los procesos naturales.

2.1.1 Carbón

El carbón es una roca sedimentaria de origen orgánico (restos vegetales), compuesta en gran parte por carbono con cantidades menores de otros elementos. Algunas de las formas más antiguas de carbón pueden considerarse como rocas metamórficas por las altas presiones y temperaturas a que han estado sometidas.

Las propiedades físico-químicas del carbón varían mucho de unos yacimientos a otros y los carbones se han clasificado de muchas formas, atendiendo a diferentes criterios:

- **Tipo:** diferencias en el tipo y clase de material vegetal que contenga (tejido leñoso, tejido cortical, esporas, resinas, ...) traducida a los denominados macerales o componentes macroscópicos del carbón: vitrinita, exinita, inertinita.
- **Rango:** diferencias en el grado de evolución o carbonización que haya sufrido, debidos a las condiciones de presión y temperatura a que hayan estado sometidos.
- **Grado:** clasifica el carbón en función de la naturaleza y cantidad de la materia inorgánica (cenizas) que contenga.

La clasificación más habitual es atendiendo al rango, midiendo el grado de cambio de composición química durante la transición de celulosa a grafito. De modo que un rango bajo indica un grado de cambio pequeño, como en la *turba*, mientras que un rango mayor indica un mayor grado de cambio, como en la *antracita*, entre ambos se sitúan los carbones *sub-bituminosos* y *bituminosos* a los que se aplica habitualmente el nombre de *hulla* (figura 2.2).

Las características físicas que se utilizan para definir un carbón son:

- El *contenido en humedad* es el contenido en agua libre, y se determina por la pérdida de peso relativa de la muestra calentada a 107°C durante una hora en una atmósfera inerte.
- La *proporción de volátiles* viene dada por la pérdida de peso de una muestra seca por calentamiento a temperaturas entre 875 y 1050°C fuera del contacto con el aire.
- El *contenido en cenizas* se determina por combustión en aire; el residuo, expresado como tanto por ciento con respecto del peso original de la muestra, constituye la expresión de este parámetro. Sería un fiel reflejo del contenido en materia mineral de un carbón, de no ser por el hecho de que en la fracción inorgánica de éste pueden existir carbonatos y sulfuros que se descomponen a esas temperaturas.
- El *poder calorífico* es el calor que se libera durante la combustión de una muestra de carbón. Se determina por combustión dentro de un calorímetro.

Otra propiedad importante del carbón es su *densidad*, que se relaciona de forma directa con su contenido en cenizas. Todos los procesos de lavado y concentración de carbones se basan en el aprovechamiento de esta propiedad.

La determinación de estas características constituye lo que se llama el **Análisis Inmediato**, (el término inglés correspondiente es *Proximate Analysis*) que comprende una serie de ensayos normalizados mediante los cuales se determinan los porcentajes de Humedad, Cenizas, Materia Volátil, así como el Poder Calorífico.

Desde el punto de vista químico, el carbón está constituido fundamentalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, con proporciones menores de nitrógeno y azufre. La determinación de las proporciones relativas de estos constituyentes en una muestra de carbón, seca y libre de ceniza, es lo que se denomina **Análisis Elemental** (en la terminología inglesa, *Ultimate Analysis*):

- El carbono y el hidrógeno se determinan por combustión y medida del CO₂ y de la cantidad de agua, generados en los gases de combustión, por absorción en cal y en cloruro cálcico, respectivamente.
- La concentración de nitrógeno se determina por calentamiento de la muestra de carbón en ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador. El nitrógeno pasa a amoníaco y éste se absorbe en un medio alcalino.
- El azufre se convierte en sulfatos, calentando el carbón en una mezcla de óxido de magnesio y carbonato sódico, de donde se estima la concentración de sulfatos gravimétricamente por reacción con

cloruro de bario y precipitación como sulfato de bario. El azufre se presenta en el carbón en dos formas, azufre orgánico y pirita (FeS_2).

- En menor cantidad (normalmente menos del 0,3 %) se encuentra cloro en forma de cloruros, sódico y potásico.
- La concentración de oxígeno se determina por diferencia con respecto a la masa total.

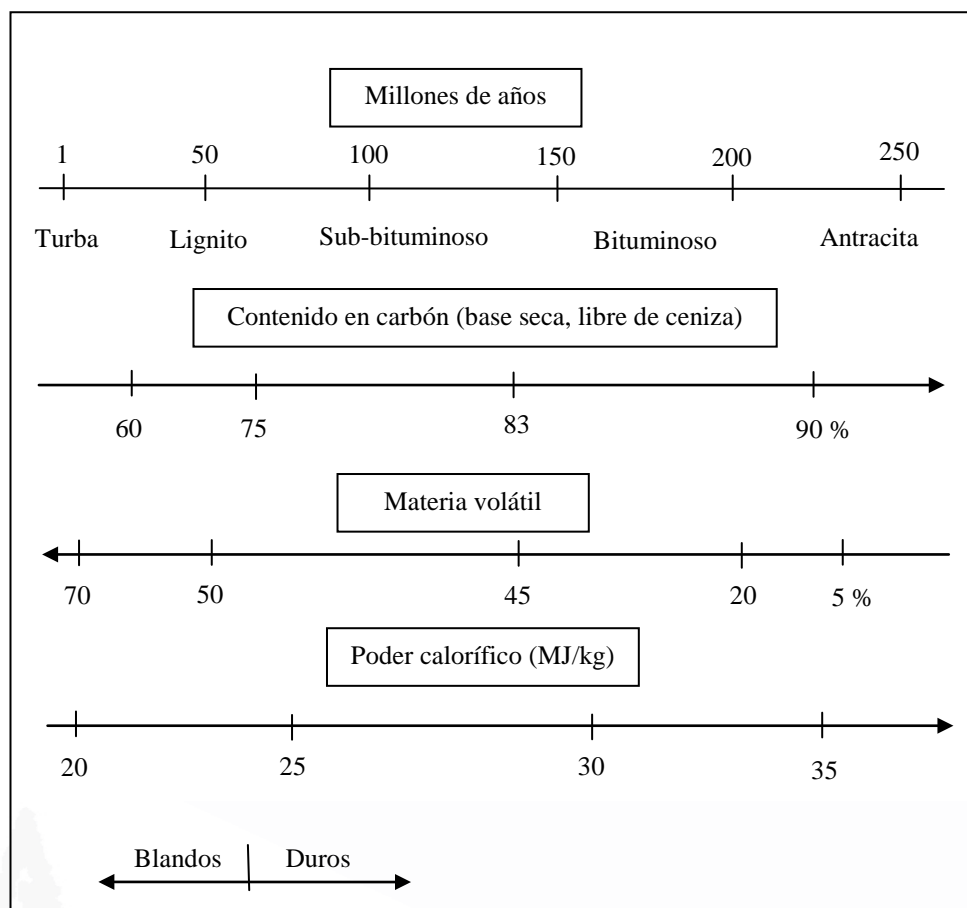


Figura 2.2 *Propiedades del carbón según su rango.*

En el *Inventario de recursos de carbón*, editado en 1979 por el Centro de Estudios de la Energía del Ministerio de Industria, se reconocen cincuenta y dos cuencas de carbón en España (Figura 2.3). De ellas, casi la mitad ya eran conocidas a finales del siglo XVIII y principios del XIX, gracias principalmente a la actividad de las minorías ilustradas (entre las que destacaron nombres tan conocidos como Campomanes y, sobre todo, Jovellanos) e incluso de algunos extranjeros provenientes de otros países europeos, que contaban ya con experiencia en la explotación de minas de carbón.

En comparación con los países de nuestro entorno europeo, las reservas de carbón españolas han sido escasas. Ello en razón no sólo de unos recursos naturales¹ nada excepcionales, en cuanto a su cuantía, sino principalmente por las dificultades planteadas por su explotación: capas con inclinación acusada, discontinuas, de poca *potencia* (grosor) y escasa consistencia. Resultando que la explotación de un mismo volumen de producción cuesta más que en otros países europeos y americanos.

¹ Se aplica el término de *reservas* a aquella parte de los recursos minerales que está bien identificada y cuya explotación resulta técnica y económicamente factible en el momento de hacer la evaluación.

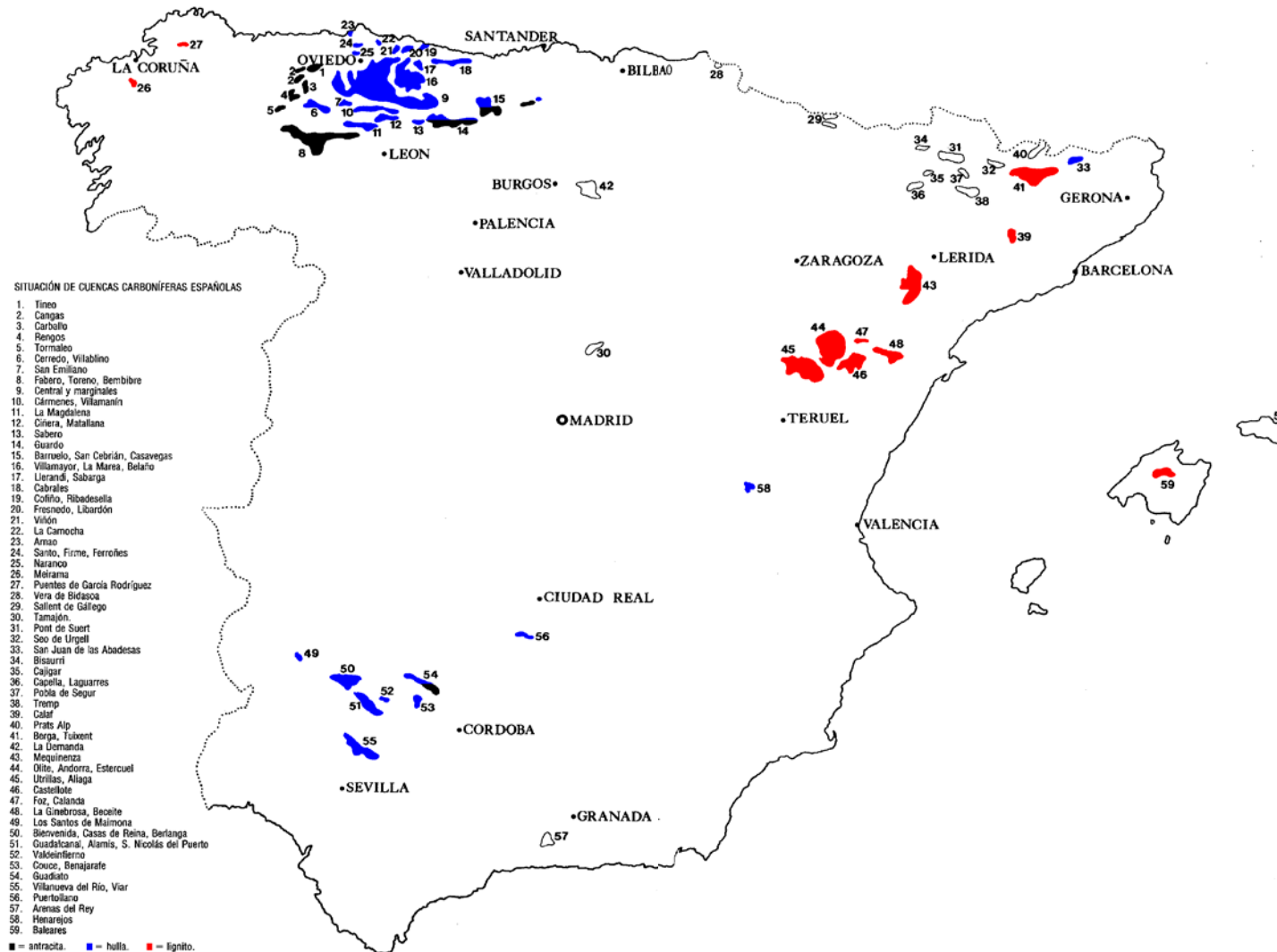


Figura 2.3 Cuencas de carbón en España. (Fuente: *El carbón en España*, S. Coll Martín y C. Sudrià i Triay, 1986, TURNER)

2.1.2 Petróleo

El petróleo (del latín *aceite de roca*) tiene su origen en la microflora y microfauna, del tipo plancton, que se acumuló junto con otros sedimentos en el fondo del mar, en un proceso que se inició hace unos 500 millones de años.

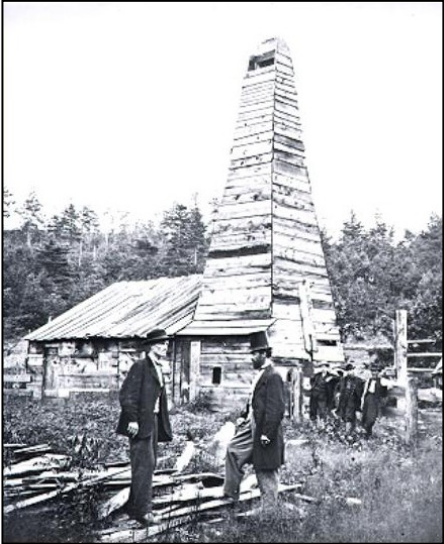


Figura 2.4 Edwin ('colonel') Drake frente a su pozo en Oil Creek.

El uso del petróleo desde la más remota antigüedad (3000 años AC) está reconocido y señalado así en escritos que datan de la Grecia clásica. No obstante no pasaron de ser aprovechamientos de afloramientos naturales que, todo lo más, se intentaban ampliar mediante excavaciones y que sólo proporcionaban cantidades muy limitadas de petróleo. En general se pensaba que estas afloraciones eran exudaciones de yacimientos de carbón. La idea de que el método de extracción adecuado para el petróleo no era la excavación sino la perforación tardó en llegar, parece que inspirado en el desarrollo de las técnicas de perforación de suelos en busca de agua.

Así, el punto de partida de la extracción industrial de petróleo se suele datar en agosto de 1859, cuando de la perforación dirigida por el "coronel" Drake en Oil Creek, cerca de Titusville (Pensilvania, EEUU), comenzó a surgir petróleo después de más de un año de intentos y pocos días antes de recibir la carta con la orden de suspender las prospecciones. El éxito coronó así un intento que había comenzado unos cinco años antes con el encargo al químico Benjamin Silliman, profesor de la Universidad de Yale, de estudiar las posibilidades del aceite de roca para producir un destilado que pudiera usarse como combustible de lámparas. El informe de Silliman estableció, sin ninguna duda, los potenciales nuevos usos del aceite de roca (por aquel entonces usado con propósitos medicinales y como lubricante).

En el informe se señalaba que se podía llevar el aceite a varios niveles de ebullición, destilando diferentes fracciones, todas compuestas de carbono e hidrógeno, sentando así las bases del proceso de *refino* que se desarrollaría después. En poco tiempo, la fiebre del petróleo creció de forma imparable y cuando su importancia como combustible de iluminación pareció que iba a remitir, dando paso a la iluminación eléctrica, el desarrollo de los motores de explosión interna consagraron el uso del petróleo como el combustible de una nueva era.

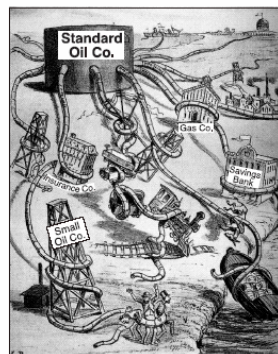


Figura 2.5 John D. Rockefeller fundó la compañía Standard Oil (1870) iniciando la industria del petróleo. (Foto y caricatura de la época).

Los elementos más abundantes en el petróleo son el carbono (85 – 90 %) y el hidrógeno (10 – 14 %), con pequeñas cantidades de azufre (0,2 – 7 %), nitrógeno (0,1 – 2 %) y oxígeno (0 – 1,5 %). Además, también aparecen trazas de elementos como vanadio y níquel y puede estar contaminado con cloro, arsénico y plomo. Los elementos traza y los contaminantes están normalmente presentes en concentraciones del orden de 10 ppm.

El petróleo crudo es una mezcla compleja de un amplio número (centenares) de diferentes compuestos, con una composición muy variable dependiendo de la ubicación del yacimiento. Para una primera clasificación de los crudos, se determina el contenido en diferentes hidrocarburos clasificando éstos en tres grandes grupos (Figura 2.4): Alifáticos (hidrocarburos saturados), aromáticos (hidrocarburos bencénicos) y un tercer grupo que incluye resinas y asfaltenos (hidrocarburos de gran peso molecular que contienen átomos de azufre, nitrógeno, oxígeno).

El crudo se separa en estas fracciones en las refinerías por destilación en una columna de fraccionamiento. Debido a la variedad en las características de los crudos de diferentes yacimientos, así como los requerimientos específicos para cada tipo de combustible, las refinerías mezclan crudos de diferentes orígenes. El *craqueo térmico* permite romper las fracciones más pesadas y obtener fracciones ligeras. El producto final de una refinería es una mezcla de varios componentes, cada uno de ellos poseyendo algunas, pero no necesariamente todas, de las características deseables en el producto final.

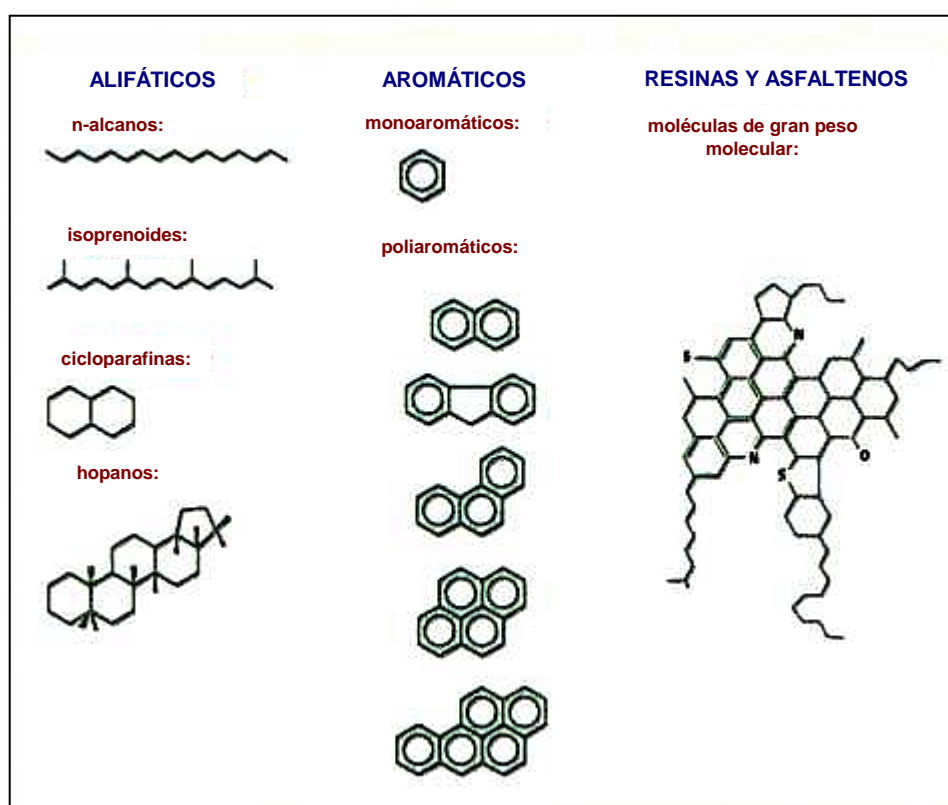


Figura 2.6 Principales fracciones del crudo.

El primer paso del refino es la destilación o fraccionamiento del petróleo crudo en una serie de fracciones, de acuerdo con sus temperaturas de condensación. El petróleo crudo se calienta primero a una temperatura cercana a los 500° C y se separa después en un gran número de productos diferentes. El proceso se divide en dos etapas, una destilación atmosférica y una destilación a vacío. Los destilados atmosféricos son: gas (que puede ser licuado como GLP), gasolina, nafta, keroseno, gasoil y fuel oil. Los destilados a vacío son: destilados de cera y asfaltos.

En los primeros días de la industria del petróleo, la destilación era el método más importante para separar productos. La fracciones más usadas eran el queroseno, los aceites para calefacción y los aceites lubricantes; la

gasolina era muy explosiva para el uso casero y normalmente se desechaba. Al llegar la era del automóvil, se incrementó la demanda de un porcentaje cada vez mayor de gasolina. En razón de esta demanda, se desarrollaron técnicas para convertir fracciones pesadas menos útiles en otras más ligeras.

Se llama *craqueo térmico* a la aplicación de calor y presión a los hidrocarburos pesados para “craquearlos” o romperlos, y conseguir otros más ligeros. El *craqueo catalítico* obtiene el mismo resultado mediante el uso de un catalizador, normalmente una zeolita sintética, que acelera y facilita el proceso. La zeolita, al actuar como catalizador, no sólo reduce la energía que se requiere para el craqueo, sino que también se utiliza para adicionar hidrógeno a los hidrocarburos del petróleo; a este proceso se le llama *hidrogenización*, proceso que incrementa la producción de gasolina. Los crudos son muy variados en cuanto a la calidad de los productos de la destilación y al contenido en contaminantes (sobre todo azufre, aunque también algunos metales, como níquel y vanadio), pero en una refinería moderna se puede producir cerca del 50% de gasolina, 30% de gasoil, y 7,5% de fuel, a partir del crudo original. Para que los productos derivados del petróleo sean aceptables desde un punto de vista ambiental es preciso retirar el azufre, lo que ha tenido como consecuencia que las refinerías de petróleo hayan llegado a ser importantes productoras de este elemento.

2.1.3 Gas Natural

Antes de la década de los 40, el crecimiento de la industria del gas fue lento e inmensas cantidades de gas, que no tenían mercado, se dejaban escapar o se quemaban en antorchas. Los gaseoductos sin uniones que hacían posible la transmisión del gas natural a grandes distancias ya estaban operativos en la década de los 20, pero no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial, con la reconstrucción de Europa y el crecimiento de los suburbios en las grandes ciudades, cuando tuvieron un mercado grande y floreciente. Se vio que el gas era especialmente atractivo como combustible, ya que no precisaba refino y sólo requería un procesado poco importante; era fácil de manipular, de combustión limpia, y proporcionaba más calor por unidad de peso que cualquier otro combustible fósil. Actualmente, decenas de millones de hogares, negocios, instituciones e industrias se abastecen de gas natural por gaseoductos que proporcionan, más o menos, el 25% del total de la energía que necesitan Europa y Estados Unidos. Además de su uso como combustible para calefacción, el gas natural se emplea mucho en la fabricación de cientos de sustancias químicas, y es el componente fundamental para una gran variedad de productos, como plásticos, detergentes, fármacos, y fertilizantes.

Una composición típica del gas natural es: metano 85 %, etano 10 % y propano 3 %. También puede haber cantidades menores de hidrocarburos más pesados, $C_5 - C_{10}$, así como algo de CO_2 , N_2 , He, H_2S y trazas de muchos otros gases. Aproximadamente, el 80% de las reservas mundiales de gas se cree que son de origen termogénico; este gas se recupera en pozos que varían en longitud desde unos pocos cientos de metros hasta cerca de 10.000. El 20% restante del gas natural, que es de origen biogénico, se encuentra normalmente a profundidades relativamente superficiales.

Hasta hace pocos años no era rentable transportar gas natural de los campos dispersos alrededor del mundo hasta los consumidores industriales importantes, porque no se había desarrollado un método de conducción adecuado. La demanda creciente de este producto ha generado la construcción de muchos gaseoductos entre países y a través de ellos. Además, gran parte del gas natural de los campos de Oriente Medio, África, y Sudamérica que antes se quemaba, ahora se licua y se transporta mediante grandes buques metaneros, como los especializados en el transporte de gases licuados del petróleo (GLP). El gas se enfría y se mantiene a temperaturas por debajo de los $-162^\circ C$. A esta temperatura se licua y ocupa solo 1/600 del volumen del gas. Los tanques refrigerados de los buques permiten transportar rentablemente por todo el mundo grandes cantidades de gas licuado, conocido por las siglas GNL (Gas Natural Licuado), o bien por sus siglas en inglés LNG (Liquefied Natural Gas). Cuando llega a su destino, el gas licuado se calienta para que recupere su estado gaseoso (regasificación) y se introduce en las conducciones normales.

CAPÍTULO 2 RECURSOS ENERGÉTICOS NATURALES

2.2 ENERGÍA NUCLEAR

La radiactividad se descubrió a finales del siglo XIX, pero no fue aprovechada para producir comercialmente energía eléctrica hasta la década de 1950. El primer reactor nuclear comercial del mundo, construido en Calder Hall, Cumbria, Inglaterra, comenzó a suministrar electricidad en 1956. El inmenso potencial de la radiactividad para producir electricidad utilizando el calor generado por las reacciones controladas de fisión tuvo un comienzo prometedor, con veinte años de funcionamiento casi libres de accidentes. Se extendieron, de esta forma, puntos de vista ingenuos, en los que se afirmaba que la electricidad de origen nuclear sería tan barata que llegaría a ser prácticamente gratuita. Sin embargo, en 1979, la fusión parcial del reactor nuclear de Three Miles Island (isla de las Tres Millas), en Pensilvania (EE.UU.), resultó ser un golpe decisivo para la industria nuclear. A pesar de que no hubo ningún daño personal por radiación, y de que se reconoció que el desastre se debió a errores humanos, la población norteamericana quedó tan conmocionada que todas las centrales nucleares que estaban todavía en proceso de planificación se cancelaron. La industria nuclear tuvo que soportar otro golpe aún más grave cuando la central eléctrica de Chernobyl, cerca de Kiev, en Ucrania, se incendió, en 1986, y liberó una enorme cantidad de radiación. Aunque el número de víctimas inmediatas que se produjeron en Chernobyl fue pequeño, centenares de miles de personas quedaron expuestas a la radiación, y se espera que decenas de miles desarrollen cáncer. En consecuencia, la dependencia de la energía nuclear ha variado mucho en distintas zonas del mundo; mientras unos países han abandonado los planes de utilizarla, otros siguen considerándola una de las formas más eficaces y seguras de producir electricidad. Actualmente, la energía nuclear proporciona un porcentaje elevado de la generación eléctrica en Francia y en un buen número de países, incluyendo China, Finlandia, India, Japón, Rusia, Suecia, Reino Unido, Estados Unidos y España.

En todo el mundo, hay unas 430 centrales nucleares operativas que en 2002 generaron el 17 % del total de electricidad producida mundialmente. En los países de la OCDE había 346 reactores conectados a la red eléctrica a finales de 2006, constituyendo el 23,1 % y el 30 % de la producción de energía eléctrica de la OCDE y de la UE, respectivamente. En particular, en España funcionan 6 centrales nucleares (en total, 8 reactores) con una potencia instalada de 7,73 GWe y que producen el 17,5 % de la electricidad.

Por un lado, es posible que estas cifras disminuyan, dados los tímidos planes que existen en la actualidad para la construcción de nuevas centrales nucleares, que reemplacen a las que se vayan cerrando por envejecimiento. A corto y medio plazo, la vida-media de las plantas existentes podría extenderse de los 40 años iniciales hasta los 60. Como contrapunto, los crecientes temores frente a un cambio climático global potenciado por las emisiones de combustión han reabierto el debate en torno a un creciente uso de energía nuclear que, además, puede ofrecer una contribución positiva a la seguridad del abastecimiento de energía porque la mayoría de las reservas de uranio y torio usados en la tecnología nuclear no se encuentran en regiones 'inestables'. Sin embargo, los deshechos radiactivos, la seguridad de los reactores y la proliferación nuclear, así como los temas de responsabilidad corporativa, continúan siendo aspectos preocupantes. El primero de estos problemas es uno de los más complicados que se han planteado: ¿qué hacer con el material altamente radiactivo, pero que ya no es útil, de las barras de combustible, después de que hayan sido utilizadas en las centrales nucleares? Los países lo almacenan de diversas formas o vuelven a procesar las barras, para extraer el combustible que todavía queda en ellas. Una de las opciones que se barajan es el almacenamiento en repositorios geológicos, denominados AGP (Almacenamiento Geológico Profundo, en inglés DGR: Deep Geological Repository). Los Montes Yucca, en el desierto de Nevada (EE.UU.) y Olkiluoto en Finlandia, son dos de los contados sitios escogidos como adecuados para este almacenamiento geológico. Sin embargo, estudios científicos recientes, así como disputas políticas, amenazan la apertura y operación de este tipo de instalación por lo que, en el ínterin, se utilizan almacenes temporales (ATC: Almacén Temporal Centralizado) para dar cabida a los residuos de las centrales desmanteladas. Además de las discusiones sobre las localidades de almacenamiento, existe una tenaz oposición al transporte de las barras de combustible gastadas, que son muy radiactivas, y el traslado de barras desde las centrales nucleares hasta los repositorios va a ser, desde luego, un asunto muy delicado. El transporte de combustibles nucleares por ferrocarril ya ha ocasionado protestas no violentas en Alemania y amenazas de acciones semejantes en otros países. Otra alternativa que se está explorando en la actualidad, es la transmutación nuclear de los residuos altamente radiactivos,

transformándolos en residuos de menor intensidad, utilizando reactores especialmente diseñados para este propósito en combinación con aceleradores de partículas (ADS: Accelerator Driven System). Una de estas iniciativas es el proyecto europeo MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications).

2.2.1 El mineral de uranio

El uranio es un elemento relativamente raro, que tiene una concentración media en la corteza terrestre de solamente unas 2 ppm. Aunque puede aparecer en cantidades traza en varios minerales, el gran tamaño del átomo de uranio tiende a excluirlo de los minerales que cristalizan antes en el magma. Por lo tanto, el uranio se concentra normalmente en el magma y en los fluidos residuales, y en rocas ricas en sílice como granitos, con grandes concentraciones en elementos alcalinos, como sodio y potasio. En estas rocas, las concentraciones de uranio pueden alcanzar y superar las 100 ppm. Este uranio se localiza a veces en algunos minerales raros que se encuentran en dichas rocas como componentes menores (por ejemplo circón, esfena y apatito), o puede



Figura 2.7 Henri Becquerel descubrió la radiactividad natural del uranio en 1896.

presentarse como la mena de uranio más importante, la uraninita (UO_2 , cristalizada en el sistema cúbico o bien en la variedad amorfa llamada *pechblenda*). Es un mineral de profundo color negro que también se conoce como *uranio píceo*. Ocasionalmente, dentro o cerca de estas rocas ígneas, pueden encontrarse concentraciones muy altas de minerales de uranio, tanto en filones como en diseminaciones más irregularmente distribuidas. Semejantes yacimientos fueron los primeros que se descubrieron y se explotaron, y de ellos procedía en gran parte el uranio que usaron Pierre y Marie Curie para su trabajo pionero sobre la radiactividad en los primeros años del siglo XX.

Desde 1945 hasta la década de los 60, el uranio ha sido objeto de la más intensa exploración mineral que se haya llevado a cabo para un metal. Esta actividad implicó tanto a las agencias gubernamentales como a compañías privadas. La búsqueda empleó todas las técnicas de exploración convencionales, pero también hizo uso de técnicas que detectaban la radiación emitida durante la desintegración radiactiva natural del uranio.

Los dos métodos principales fueron la simple medida directa, y la espectrometría de rayos gamma. El primer método emplea un detector de Geiger-Muller, que detecta todos los tipos de radiación de alta energía, mientras que el segundo método es capaz de detectar de forma separada la radiación específica que emite cada elemento radiactivo diferente. Los detectores varían entre los manuales y los autotransportados, o aerotransportados, dependiendo de la sensibilidad deseada, el tamaño del área a investigar y el presupuesto asignado. Otro método hace pruebas, no sobre el uranio directamente, sino sobre el radón (^{222}Rn), un producto de desintegración del uranio. El radón (también conocido como contaminante doméstico potencial) es un gas que puede migrar a través de las fracturas de las rocas y capas de suelo, y puede disolverse en el agua. Por consiguiente, el radón puede dispersarse alrededor de los depósitos de uranio, y su detección puede conducir a los puntos en los que se encuentra el yacimiento original de este elemento.

2.2.2 Reservas de uranio

Las reservas de yacimientos ricos en uranio están ampliamente distribuidas, pero no son grandes, estimándose en unos 3,3 millones de toneladas, aunque el secreto que suele acompañar a todo lo relacionado con el uranio hace pensar que estas cifras sean probablemente conservadoras. En todos los continentes se conocen yacimientos importantes, que ya son rentables en la actualidad, o que podrían serlo en un futuro próximo.

Si todas las reservas y recursos se usaran solamente por su contenido en ^{235}U y la conversión de energía calorífica en electricidad tuviese un 40% de rendimiento, la energía total producida sería solamente de 8×10^{20} J. Por el contrario, un reactor rápido de realimentación con igual rendimiento sería capaz de extraer $1,140 \times 10^{23}$ J, porque puede utilizar el ^{238}U , que es mucho más abundante. El ^{238}U almacenado y las reservas conocidas podrían suministrar energía mediante un sistema de reactores rápidos de realimentación durante varios cientos de años.

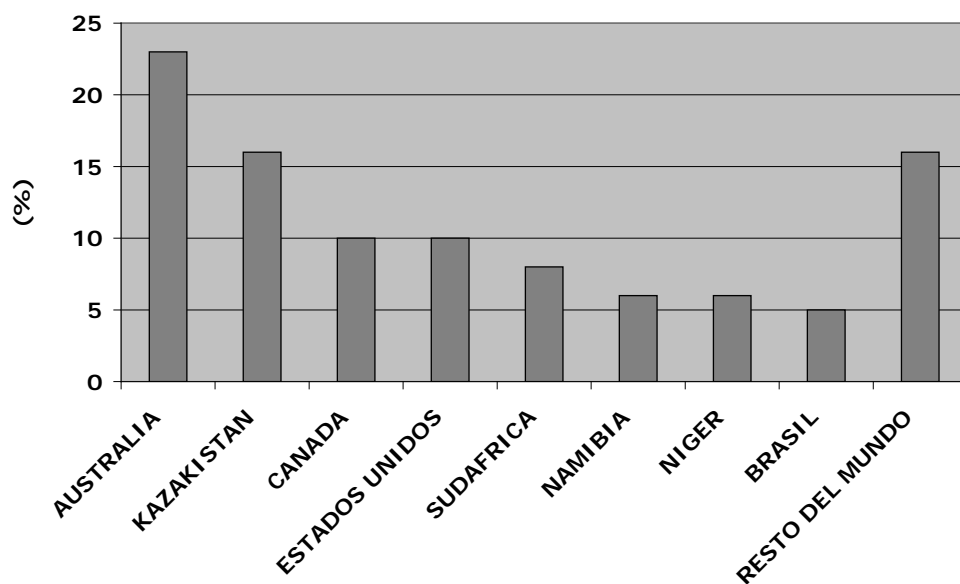


Figura 2.8 Distribución mundial de las reservas de uranio.

CAPÍTULO 2 RECURSOS ENERGÉTICOS NATURALES

2.3 ENERGÍAS RENOVABLES Y ALTERNATIVAS

La génesis de los combustibles fósiles requiere el transcurso de eras geológicas de millones de años para su consumación, lo que a la escala humana resulta un tiempo difícil de percibir. Sin embargo, la energía que puede desarrollar el viento, las olas, las mareas, etc., se renueva continuamente resultando, a nuestra escala, una fuente prácticamente inagotable de energía, que solamente dejará de serlo cuando lo haga el Sol, en unos miles de millones de años. Así pues, basar las necesidades energéticas de la sociedad en fuentes energéticas renovables es garantizar un suministro energético estable para las generaciones futuras. Su aprovechamiento no es una idea nueva, se ha utilizado desde los albores de la civilización, pero conseguir que este suministro sea de la calidad adecuada y medioambientalmente aceptable es un reto que habrá de ser superado para que estas energías se implanten de forma intensiva.

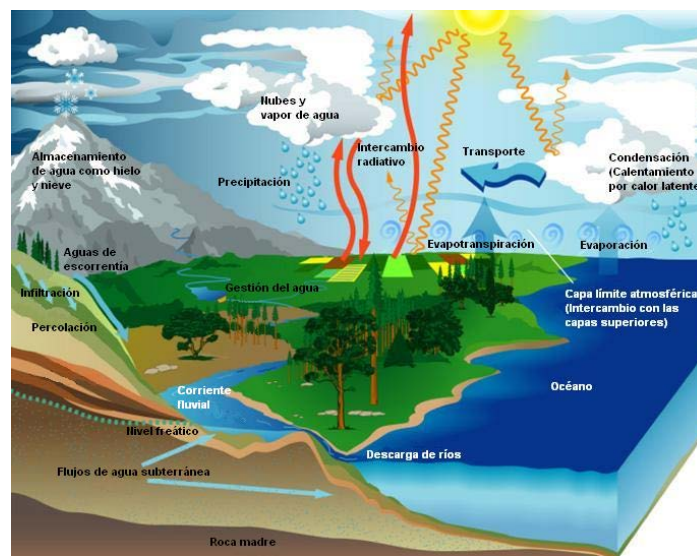


Figura 2.9 Ciclo del agua.

El Sol, la Luna y la propia Tierra están en el origen de las principales fuentes renovables de energía, como consecuencia directa de la radiación solar, la atracción gravitacional, las bolsas de magma, etc. Adicionalmente a estas energías de origen natural, también se han desarrollado tecnologías para el aprovechamiento energético de las ingentes cantidades de residuos que nuestra sociedad industrial genera, tanto de los residuos sólidos urbanos como de los residuos industriales, agrícolas y ganaderos.

2.3.1 Energía hidráulica

La energía hidráulica es una manifestación de la radiación solar que al calentar la superficie de mares y océanos mantiene el ciclo del agua, por el que ésta se evapora y precipita luego formando las aguas de escorrentía que dan lugar a los ríos. Se sabe de la utilización de este tipo de energía desde muy antiguo, siendo aprovechada principalmente para el movimiento de ruedas de molino. En la actualidad, es la forma más utilizada de producción de electricidad a través de un recurso renovable mediante el uso de turbinas en saltos hidráulicos.

2.3.2 Energía eólica

La energía eólica es también una manifestación de la radiación solar que, al calentar más intensamente las zonas próximas al Ecuador, origina un movimiento ascendente del aire hacia los límites de la troposfera por donde se desplaza hacia los polos, imprimiendo las características principales de la circulación atmosférica. Esta corriente, una vez fría, desciende en torno a los 30° de latitud en ambos hemisferios, originando otras

corrientes similares de tipo convectivo en las regiones más septentrionales. A esta estructura convectiva de carácter global, se superpone el efecto de la rotación de la Tierra y otras corrientes debidas a diferencias locales de temperatura que dan lugar a los vientos preponderantes en cada región. El uso de este tipo de energía renovable para impulsar aerogeneradores es el de mayor crecimiento en los últimos años, ya que ha alcanzado un grado de madurez tecnológica y de competitividad suficiente como para permitir el desarrollo que está teniendo en la actualidad.

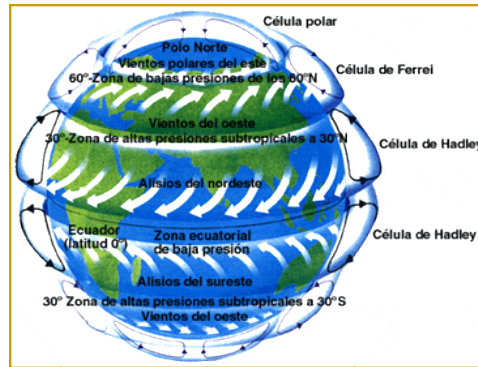


Figura 2.10 Circulación atmosférica.

2.3.3 Energía de la biomasa

La combustión de biomasa fue la fuente energética por excelencia en la era preindustrial y, aún hoy en día, lo sigue siendo en extensas regiones del tercer mundo. En la sociedad actual, la obtención de energía de biomasa está orientada hacia la producción de combustibles sólidos a partir de residuos agrícolas y forestales. La utilización de cultivos energéticos aún no se ha desarrollado suficientemente, si bien el potencial es muy elevado.



Figura 2.11 Combustión de “pellets” de biomasa densificada.

La tecnología que se usa actualmente es la de combustión en calderas similares a las utilizadas en las centrales de carbón. Como tecnología de futuro, se está desarrollando la gasificación de biomasa, que genera gas combustible para alimentar motores o calderas. Otra aplicación energética de la biomasa es su utilización como materia prima para la fabricación de combustibles líquidos, tanto biodiesel como alcoholes.

2.3.4 Energía solar

La energía solar es la energía debida a la energía radiante que proviene del Sol y al llegar a la Tierra interactúa con la atmósfera y la superficie terrestres. El valor de su intensidad en el borde de la atmósfera se conoce como *constante solar* y resulta ser aproximadamente $1,4 \text{ kW/m}^2$. La intensidad disponible en la

superficie terrestre es menor que la constante solar, reduciéndose a unos 350 W/m^2 , debido a la absorción y dispersión producidas por la atmósfera. Los efectos directos de esta radiación pueden utilizarse para usos térmicos, mediante colectores solares, o para generación de electricidad mediante células fotovoltaicas.

2.3.5 Energía oceánica

Este término incluye todos los recursos energéticos derivados de los océanos: las mareas, las olas, el gradiente térmico y el gradiente salino.



Figura 2.12 Arriba: La central de La Rance (Francia). Abajo: Detalle de la construcción de la presa.

2.3.5.1 Las mareas (energía mareomotriz)

Las mareas se deben fundamentalmente a la interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Ya entre 1581 y 1822 funcionó sobre el río Támesis, una gran rueda accionada por la marea, que bombeaba el agua hasta el centro de la ciudad de Londres. Para aprovechar hoy esta energía se construyen presas de gran longitud que almacenan el agua en el embalse existente entre éstas y las orillas de la ensenada, haciéndola pasar, tanto en el flujo ascendente como en el reflujo descendente, por una zona relativamente estrecha en la que se ubican las turbinas. Para rentabilizar estas obras es necesario que la diferencia entre mareas sea como mínimo de 5 m. El potencial energético es muy elevado: la central de La Rance, en Francia, tiene una potencia instalada de 240 MW, pero aunque hay gran número de proyectos en estudio, sólo existen otras dos centrales más: una en la bahía de Fundy (Canadá) equipada con una turbina de 20 MW y otra de 500 kW en Kislaya (Rusia). Los dos grandes problemas que plantea el aprovechamiento de este recurso son el elevado coste de inversión y el formidable impacto ambiental que supone una presa cerrando una gran bahía.

2.3.5.2 Las olas

El efecto del viento y la gravedad producen sobre la superficie del mar olas que pueden llegar a tener más de 20 m de altura y cuyo potencial energético se estima en millones de megavatios. Los principales dispositivos que se han probado en el mar para captar esta energía son: el de columna oscilante y el de focalizador de olas conocido como canal convergente. El primero consiste en una envolvente sin fondo en la que le agua puede entrar y salir libremente y de la que sobresale una columna, abierta en su parte superior, en la que el movimiento de las olas hace que el agua, al subir y bajar, comprima y descomprima el aire que acciona una turbina neumática conectada a un generador eléctrico. El focalizador de olas, construido en tierra,

es un canal convergente que focaliza las olas para que el agua ascienda por el canal hasta un depósito elevado que se vacía a través de una turbina hidráulica convencional.

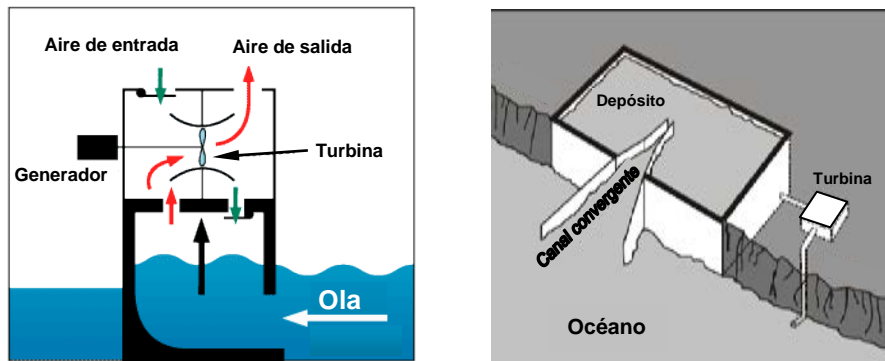


Figura 2.13 Izquierda: Columna oscilante. Derecha: Focalizador de olas

2.3.5.3 El gradiente térmico

Los océanos, que cubren más del 70% de la superficie del planeta, reciben y absorben la mayor parte de la radiación solar. Esta absorción se realiza en una franja de agua próxima a la superficie, estableciéndose una apreciable diferencia de temperatura con el agua de las profundidades. Esta diferencia de temperatura permite generar electricidad, por ejemplo, provocando la expansión de un gas en un turbogenerador, situado en la región superficial caliente, y la posterior condensación del gas utilizando el agua fría de las capas profundas. El sistema es factible siempre que exista suficiente diferencia de temperatura entre la superficie y la capa situada a unos 1000 m de profundidad, lo que sucede en los mares tropicales y subtropicales. En 1891, el físico francés J. Arsène d'Arsonval fue el primero en señalar la posibilidad de aprovechar este recurso y la primera instalación, de 22kW, la construyó su estudiante G. Claude, el inventor de la lámpara de neón, en 1930 en Cuba. En la actualidad, el principio de funcionamiento de estas plantas recibe el nombre de OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) y la planta de mayor potencia, 100 kW, se encuentra cerca de Japón.

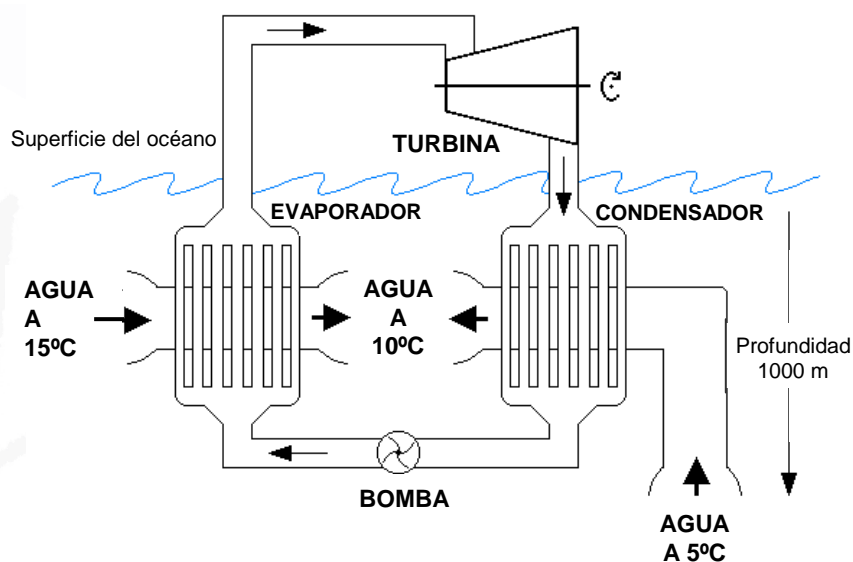


Figura 2.14 Principio de funcionamiento de una planta OTEC de ciclo cerrado, utilizando amoníaco como fluido de trabajo.

2.3.5.4 Las corrientes marinas

El aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas con turbinas de baja presión tropieza con los mismos obstáculos que han impedido hasta ahora la explotación de los aprovechamientos hidráulicos con una altura de salto inferior a los 3 m.

2.3.5.5 El gradiente salino

La diferencia de presión osmótica entre las aguas de baja salinidad que se encuentran en la desembocadura de los ríos y las aguas mar adentro, es una fuente potencial de energía que, por el momento, no ha salido del dominio teórico.

2.3.6 Energía geotérmica

Al igual que la energía mareomotriz y la de las olas, la geotérmica no tiene su origen inmediato en la radiación solar, contrariamente a las otras energías alternativas, sino en el calor existente en el interior de la Tierra. Esta energía en general es de muy débil densidad, pero existen determinadas zonas de la corteza terrestre –los denominados campos geotérmicos– en las que el calor se ha concentrado como consecuencia de los movimientos de las placas tectónicas, formando bolsas de magma a profundidades relativamente pequeñas, que resultan económicamente accesibles y cuya presencia va en general acompañada de manifestaciones de actividad térmica como géiseres y fumarolas.

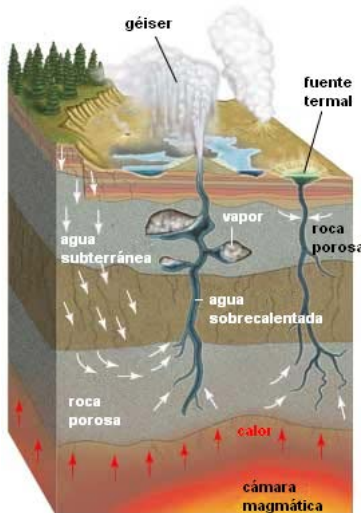


Figura 2.15 *Formación natural de vapor en un punto caliente. (Adaptado de la Enciclopedia Británica).*

Para que exista un campo geotérmico se requiere un acuífero de agua circulante, que esté situado entre 300 m y 2000 m de profundidad y una fuente de calor magmático a no más de 10 km de profundidad. Un campo geotérmico se explota empleando técnicas parecidas a las de extracción del petróleo. El agua del acuífero alcanza muy altas temperaturas y presiones en las cercanías del punto caliente y se evapora instantáneamente al alcanzar la superficie, con lo que basta expansionarla en una turbina para generar electricidad.

En los campos de rocas calientes secas, el calor se extrae inyectando un fluido, generalmente agua, que se calienta en contacto con las rocas, siempre que la superficie de intercambio entre el fluido y la roca sea la adecuada. Si no hay suficiente superficie de contacto, se fractura artificialmente la roca cercana al pozo que se pretende explotar. Una vez expandido y condensado, el fluido geotérmico se devuelve al acuífero a través de pozos de reinyección para mantener el equilibrio del terreno y para evitar la contaminación.

El agua de los acuíferos de media y baja entalpía se utiliza para calentar edificios, para determinados usos agrícolas y como fuente de calor en procesos industriales.

En la Unión Europea, sólo Italia y Portugal tienen un potencial geotérmico realmente aprovechable aunque estudios recientes parecen confirmar la viabilidad de una explotación en la isla de La Palma que sería capaz de cubrir las necesidades eléctricas del 15% de la población.