
II JORNADAS SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE EN LA ESCUELA DE INGENIERIA DE EIBAR

- *“Energías Renovables Emergentes”*
- *“Energía Solar Térmica de Alta Temperatura”*

IMPARTIDO POR: **FUNDACIÓN TEKNIKER**
AUTORES: CRISTÓBAL VILLASANTE
IVÁN MESONERO
SUSANA LÓPEZ
cvillasante@tekniker.es
imesonero@tekniker.es
slopez@tekniker.es



ÍNDICE.

1. PRESENTACIÓN DE TEKNIKER	3
1.1. TEKNIKER Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES	4
1.1.1. <i>Tekniker y la energía Solar</i>	6
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. ENERGÍAS RENOVABLES.....	8
2.1.1. <i>Clasificación fundamental</i>	9
3. SISTEMAS DE ALTA TEMPERATURA.....	27
3.1. CONCENTRACIÓN Y SEGUIMIENTO SOLAR.....	27
3.2. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	31

1. PRESENTACIÓN DE TEKNIKER

TEKNIKER está constituida jurídicamente como una Fundación sin ánimo de lucro, que nace en 1981 con el compromiso de contribuir a mejorar la competitividad del tejido industrial y de servicios desde el apoyo tecnológico a través de la generación y aplicación de la tecnología y el conocimiento.

Históricamente la Fundación TEKNIKER es ampliamente reconocida como Centro de las Tecnologías de Fabricación (“Manufacturing”), es decir: en todo lo relacionado con el producto, proceso, medios de producción (maquinaria), manipulación (bienes de equipo) y gestión integral del ciclo de vida del producto.

En la actualidad, además de su ámbito tradicional de competencias, TEKNIKER se constituye en Centro de las Microtecnologías; con especial énfasis en la Ingeniería de Precisión y la Microfabricación.

Con esta especialización Tekniker domina una gran variedad de tecnologías que aplica preferentemente a los siguientes sectores:

- Bienes de equipo mecánico.
- Gran equipamiento e instrumentación científicos.
- Energías Renovables.
- Tecnología Social.
- Auxiliar de Automoción.
- Máquina-herramienta.
- Equipamiento médico avanzado y de mínima invasión.
- Equipos y dispositivos para Biotecnología.
- Transformación metálica.
- Aeroespacial.
- Electrónica profesional.
- Petróleo y derivados.

En la actualidad, Tekniker cuenta con más de 250 personas para el desarrollo de su labor de investigación y desarrollo y factura 20 millones de Euros. Las figuras adjuntas ilustran de forma somera estas características de Tekniker. No obstante, se sugiere la consulta de la web (www.tekniker.es) para ampliar estas y otras informaciones.

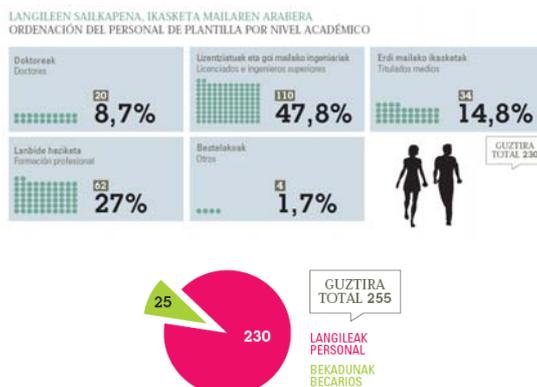


Figura 1-1: Información sobre el personal



Figura 1-2: Evolución de los ingresos en los últimos 5 años

Además, Tekniker está integrado en numerosas redes y plataformas tecnológicas españolas y europeas. Cabe destacar que Tekniker se integra en la Plataforma Tecnológica IK4 (www.ik4.es) como socio fundador junto con Ceit, Ikerlan y Gaiker. Con posterioridad, también se han incorporado otros centros como Cidetec, Ideko o VICOMTech y otros se encuentran en proceso de integración.



Figura 1-3: Estructura y datos de IK4

1.1. TEKNIKER Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES

La especialización de Tekniker en todo lo relacionado con el “Manufacturing” le ha hecho adquirir una excelencia reconocida en distintas disciplinas (Mecatrónica, Recubrimientos, Lubricación, Micro y nanotecnologías) que resultan claves para el desarrollo de distintas Energías Renovables.

Esto ha hecho que Tekniker participe en numerosos proyectos de desarrollo en distintos campos y sea miembro activo de distintas redes¹, plataformas europeas de investigación² y Asociaciones españolas y europeas³ ligadas al ramo. Algunos de los más relevantes son los siguientes:

1

- Red Española de Aprovechamiento de Glicerina (RAG)
- Red Tecnológica del Sector Eólico (Reoltec).

2

- European Solar Thermal Technology Platform (ESTTP).
- European Technology Platform for Wind Energy (TPWind).
- European Technology Platform for Sustainable Chemistry (SUSCHEM).

3

- European Wind Energy Association (EWEA)
- Asociación española del Hidrógeno (AEH2)
- Real Sociedad Española de Química (RSEQ)
- Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT)
- European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA)
- Asociación Española para la Promoción de la Industria Energética Termosolar (Protermosolar)

- Desde 1997 Tekniker viene trabajado en procesos de transesterificación de **biodiesel** a partir de aceites vegetales usados y de grasas animales. Ya en esos primeros años, se trabajó en el diseño e instalación de una planta piloto para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales usados (1999) y de una planta piloto para la purificación de glicerina obtenida del proceso de transesterificación de aceites vegetales usados para la producción de biodiesel (2000). Igualmente, nuestros laboratorios caracterizan habitualmente los biocombustibles que se le remiten aplicando ensayos de caracterización de biodiesel como la EN 14214.

Actualmente Tekniker centra sus esfuerzos en buscar posibles utilidades a la glicerina que se obtiene del proceso de producción del biodiesel dados los graves problemas que este subproducto del proceso está generando. De hecho, en la actualidad lidera la Red Española de Aprovechamiento de Glicerina (RAG). Una de las líneas que surgen de esta búsqueda es el desarrollo de **biolubricantes** a partir de glicerina.

- La experiencia de Tekniker en el **sector eólico** está ligada al diseño y mantenimiento de aerogeneradores de gran potencia. En este campo, y al margen de servicios de diseño y cálculo avanzado de distintos elementos, se tiene una contrastada experiencia en el desarrollo de modelos de simulación mecatrónica (mecánica y control) y el desarrollo de algoritmos avanzados de control de palas.

Por otro lado, se han implementado complejos sistemas de monitorización de aerogeneradores y desarrollado sensores específicos para el control del lubricante en uso. A su vez, los laboratorios de análisis metalográficos y de aceites de TEKNIKER dan un soporte importante a las labores de mantenimiento de los parques eólicos.

Por otro lado y ligado a la problemática de la discontinuidad del suministro de las energías renovables existe una gran actividad a nivel mundial para el desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía (Hidrógeno y otros). En este campo también es relevante la actividad de Tekniker en muchos de ellos:

- Tekniker trabaja en el desarrollo de superficies con alta capacidad de **almacenamiento de hidrógeno** y en la aplicación de capas protectoras en pilas de combustible.
- En el campo de los sistemas de **acumulación de energía** no convencionales Tekniker lidera la actividad investigadora en España para el desarrollo de volantes de inercia de alta densidad de energía cinética (flywheels) aptos para almacenar grandes cantidades de energía con un alto rendimiento, alta potencia y gran fiabilidad.

Para conseguir sistemas eficientes, estos desarrollos precisan de sistemas de levitación magnética girando a gran velocidad y en vacío por lo que la complejidad del desarrollo es máxima.

- En el campo de los sistemas de **acumulación térmica** Tekniker tiene también una actividad incipiente para el desarrollo de sistemas de acumulación térmica de larga duración mediante nuevos materiales y/o mejora de las propiedades de otros ya en uso.

1.1.1. TEKNIKER Y LA ENERGÍA SOLAR.

La experiencia de Tekniker en este campo es más reciente y nace de trasladar algunas de las tecnologías que tradicionalmente se aplican a otros campos al campo de la energía solar (especialmente en la solar térmica de media y alta temperatura).

Esto ha permitido a Tekniker posicionarse en este campo y ser referente en algunas de las tecnologías críticas para el sector. Algunos ejemplos de desarrollos recientes o en marcha en este campo son por ejemplo:

- La funcionalización de superficies que pueden permitir mejorar sus características o proporcionarles nuevas propiedades (ej. recubrimientos selectivos, superficies autolimpiantes, superficies con propiedades de reflexión mejoradas, etc.).
- A partir de la experiencia en mecatrónica se trabaja en el desarrollo de estructuras más ligeras, rígidas y fáciles de controlar, o de nuevos sistemas de accionamiento y control de los sistemas de seguimiento solar.
- Desarrollo de catalizadores para procesos de depuración de fluidos mediante fotocatalisis.
- Desarrollo de fluidos ecológicos que durante años Tekniker han desarrollado para el mundo de los biolubricantes pero que en los últimos tiempos empieza a aplicar a anticongelantes para colectores solares térmicos, fluidos térmicos para media y alta temperatura, etc.
- Gestión de sistemas de producción mediante elementos autónomos y sistemas wire-less.
- Desarrollo de modelos de simulación mecánica, electrónica y térmica de equipos y sistemas completos así como optimización de los sistemas de control asociados.
- Desarrollo de motores de combustión externa (Stirling) alimentados con energía solar concentrada.
- El diseño e implementación de sistemas de medida y verificación dimensional incluyendo verificación geométrica 3D con técnicas como fotogrametría o láser tracker.
- Desarrollo de sensores específicos para aplicaciones solares.
- ...

2. INTRODUCCIÓN

La población mundial sigue creciendo a razón de un cuarto de millón por día, lo que incrementa el consumo de energía. Además, el consumo de energía per cápita de China, India y otros países en desarrollo sigue incrementándose a medida que las personas que viven en estos países adoptan los estilos de vida occidentales.

Aún así, actualmente, todavía una pequeña parte de la población mundial consume una gran parte de los recursos. Estados Unidos por ejemplo, tiene una población de 296 millones de personas, pero consume más petróleo que China con 1.300 millones.

Así, por ejemplo, si China e India tuvieran una huella ecológica⁴ por habitante similar a la de Japón hoy en día, necesitarían ellos solos toda la Tierra para cubrir sus necesidades.

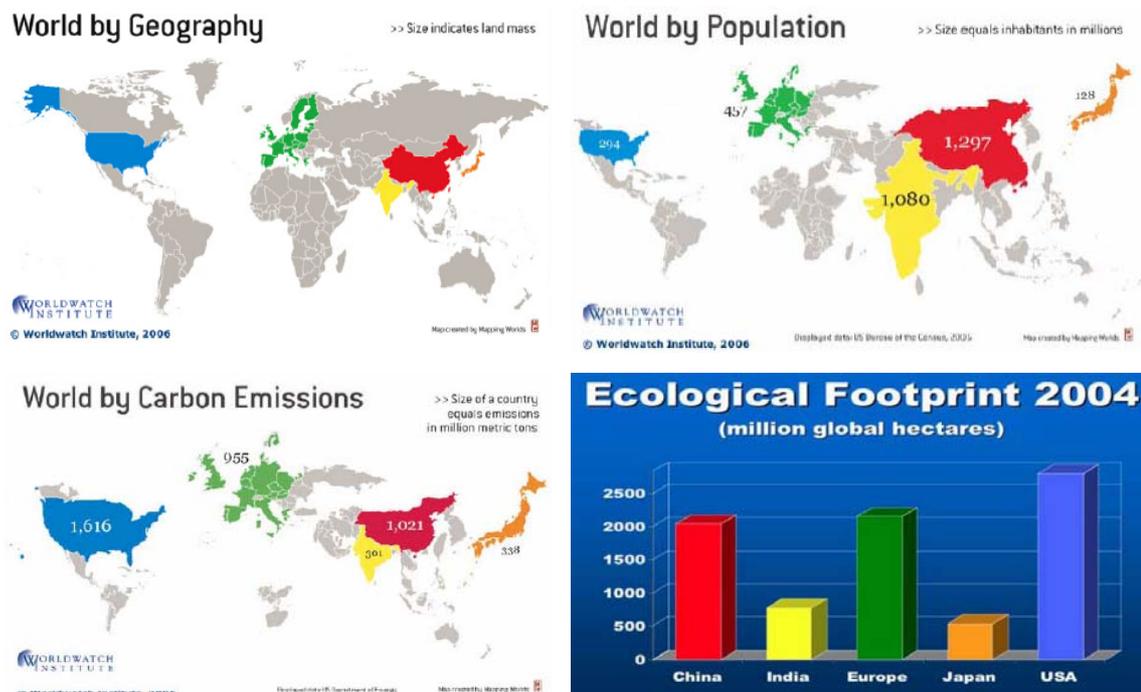


Figura 2-1: Huella ecológica de los principales países y bloques del mundo.

Con esta perspectiva, y ante las sucesivas crisis económicas y ecológicas (efecto invernadero, vertidos,...), los conceptos de desarrollo sostenible⁵, consumo responsable, etc. se oyen cada vez más y se hace cada día más necesaria su

⁴ **Huella ecológica:** Área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población dada con un modo de vida específico de forma indefinida

⁵ El **desarrollo sostenible** o **desarrollo sustentable** hace referencia a la utilización de forma racional (con lógica social en beneficio de las grandes mayorías) de los recursos naturales de un lugar, cuidando que no sean esquilados (sobre todo con la lógica de la maximización de las ganancias a corto plazo) y las generaciones futuras puedan hacer uso de ellos igual que hemos hecho nosotros, es decir, sin que nuestras prácticas, fundamentalmente económicas, imposibiliten el futuro de la vida humana en la Tierra (http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_sostenible).

incorporación a las políticas de los gobiernos, a las prácticas empresariales⁶ y a los hábitos de los ciudadanos.

Como uno de los pilares fundamentales de ese desarrollo sostenible se encuentran las denominadas **energías renovables** y las técnicas encaminadas a mejorar la eficiencia energética (arquitectura bioclimática, cogeneración⁷, etc.).

2.1. ENERGÍAS RENOVABLES.

Se denominan energías renovables a aquellas que son virtualmente inagotables (ej. Sol) o que pueden regenerarse por medios naturales (ej. biomasa o biocombustible). No obstante, este concepto suele ligarse al concepto de energía limpia o de energía sostenible que sería más restrictivo e indicaría que ni el modo de obtención, ni el uso, ni los residuos generados afectan negativamente al medio ambiente.

Estrictamente, esta energía “limpia” no existe y por lo tanto, el primer principio para conseguir un desarrollo sostenible es minimizar el consumo de energía. Sin embargo, es claro que energías como la solar tienen un impacto ambiental muy reducido mientras que los combustibles fósiles o la energía hidráulica a gran escala tienen un impacto muy considerable.

El hombre ha aprovechado las energías renovables desde sus orígenes. De hecho, hasta la revolución industrial, fueron la base de la energía utilizada por el hombre (ej. barcos a vela, molinos de viento, molinos y forjas hidráulicas, etc.).

Con la llegada de la máquina de vapor se sustituyeron masivamente estas fuentes de energía por máquinas de combustión que se consideraban una fuente de energía más estable y dócil.

➤ ***Ventajas e inconvenientes fundamentales.***

Efectivamente, algunas de las principales críticas que reciben las energías renovables son su **difícil predicción** y la imposibilidad de **garantizar el suministro** en un momento concreto. A esto se suele añadir otra crítica en el sentido de que son en general energías difusas (con poca potencia por unidad de superficie).

Si bien, estas limitaciones son ciertas en general, pueden ser reducidas mediante sistemas de acumulación y/o compensadas mediante un mix energético suficientemente variado. El carácter disperso, incluso, puede verse como un elemento positivo como se explica más adelante.

⁶ Se suele hablar de **Responsabilidad Social Corporativa (RSC)** o **Responsabilidad Social Empresarial (RSE)** como la contribución activa y voluntaria de las empresas a la sostenibilidad, u otros compromisos sociales, económicos y ambientales.

⁷ La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente, aire caliente, por ejemplo). Al generar electricidad con un motor generador o una turbina, el aprovechamiento de la energía en el combustible es del 25% al 35%, lo demás se pierde. Al cogenerar se puede llegar a aprovechar del 70% al 85% de la energía que entrega el combustible.

A cambio, las energías renovables presentan numerosas ventajas que se pueden resumir en:

- Una gran **diversidad y abundancia**.
- La ausencia de **emisiones** en operación, tanto las causantes del efecto invernadero como otras.
- La no generación de **residuos peligrosos**.
- La disposición **libre y gratuita** de muchas de ellas.
- El carácter disperso implica una **distribución** de las mismas a nivel mundial sin yacimientos concentrados.

Como ya se ha mencionado, el carácter distribuido de la generación y la disponibilidad de varios tipos de energía renovable en prácticamente cualquier punto del planeta es un elemento que las hace radicalmente distintas a la generación con combustibles fósiles o nucleares.

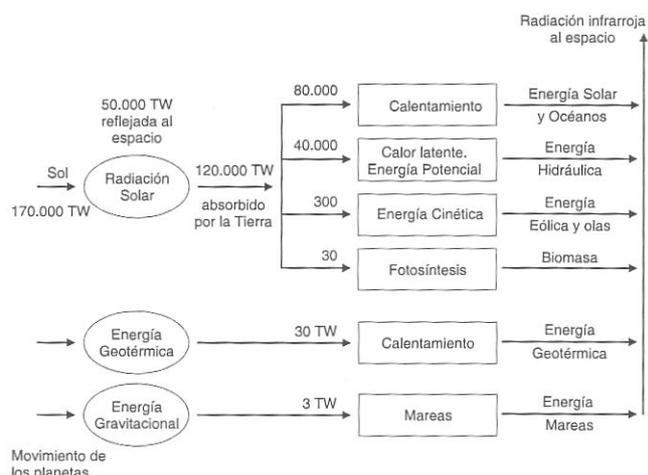
Estas últimas se han basado en la explotación de grandes yacimientos en puntos concretos del planeta. Este combustible se transporta hasta el usuario o hasta grandes puntos de producción de energía eléctrica que debe distribuirse a través de una compleja red.

El nuevo concepto de generación distribuida supondrá un notable cambio en los sistemas de transporte y almacenamiento de energía. Esto implica un problema para la gestión de la red existente en la actualidad. Pasar de un modelo en el que la generación se produce en unos pocos puntos alejados del consumidor, a otro en el que el usuario está próximo a la generación, e incluso puede convertirse en productor, plantea un reto tecnológico importante para los próximos años.

Al mismo tiempo, el carácter distribuido del recurso reduce sensiblemente, si no elimina, las tensiones que genera el modelo basado en combustibles fósiles. No en vano, la mayor parte de los conflictos bélicos vividos desde la revolución industrial hasta el presente inmediato, están ligados directa o indirectamente con el control de los recursos energéticos.

2.1.1. CLASIFICACIÓN FUNDAMENTAL.

Dentro de los recursos energéticos que se consideran renovables podemos distinguir un gran grupo que procede de la energía solar directa o indirectamente. Es decir que, además del aprovechamiento directo de la radiación solar, la energía que la Tierra recibe del Sol es la causa de que exista el ciclo hidrológico, los vientos, las olas en el mar así como del desarrollo de la biomasa.



A parte de estos recursos de origen solar, se consideran

recursos renovables tanto la energía geotérmica como la energía de las mareas cuya causa es la fuerza de atracción gravitacional.

Figura 2-2: Flujos de energía renovable en el mundo

2.1.1.1. Energía Hidráulica

Esta energía como casi todas las renovables tiene su origen en la energía solar. El Sol a través de la evaporación, transporta grandes cantidades de agua a zonas elevadas y la energía hidráulica aprovecha la energía cinética y potencial de las corrientes de agua generadas que fluyen sobre la superficie terrestre hacia el mar.

Tradicionalmente, esta energía se ha utilizado para moler cereales en molinos situados junto a los ríos y en la actualidad se usa fundamentalmente para producir electricidad. Así, las centrales hidroeléctricas incorporan una turbina accionada por el agua que se acopla a un generador eléctrico.

Existen fundamentalmente dos tipos de centrales hidroeléctricas:

- **Centrales de agua fluyente:** son los aprovechamientos que mediante una obra de toma, captan una parte del caudal circulante por el río y lo conducen hacia la central para ser turbinado. Después, este caudal es devuelto al cauce del río. Estas centrales se caracterizan por tener un salto útil prácticamente constante, y un caudal turbinado muy variable, dependiendo de la hidrología. Por tanto, en este tipo de aprovechamiento, la potencia instalada está directamente relacionada con el caudal que pasa por el río.
- **Centrales de pie de presa:** son aquellas situadas aguas abajo de los embalses destinados a usos hidroeléctricos o a otros fines como abastecimiento de agua a poblaciones o riegos, susceptibles de producir energía eléctrica. Tienen la ventaja de almacenar la energía (el agua) y poder emplearla en los momentos en que más se necesiten. Normalmente son las que regulan la capacidad del sistema eléctrico y con las que se logra de mejor forma el balance consumo/producción.



Otra posible clasificación consiste en dividir las según la potencia generada. En general, las centrales de gran potencia obligan a alterar seriamente el cauce del río y anegar grandes extensiones por lo que provocan un impacto ambiental importante. Las centrales de potencia inferior a 10MW se suelen denominar centrales minihidráulicas y provocan **impactos ambientales** mucho menores sobre todo si son de agua fluyente.

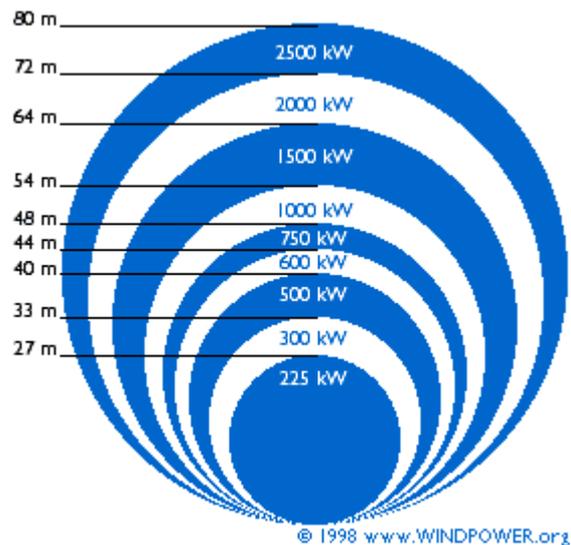
2.1.1.2. Energía Eólica

Entre un 1% y un 2% de la energía que llega del Sol es convertida en energía eólica (entre 50 y 100 veces más que la convertida en biomasa por las plantas). Por eso, no es de extrañar que la energía eólica se haya utilizado desde hace mucho tiempo para navegar, bombear agua o moler grano (ej. molinos de viento de la mancha o Holanda).

En los últimos años, el interés por esta energía y sobre todo por el uso de la misma para la producción de electricidad ha ido creciendo.

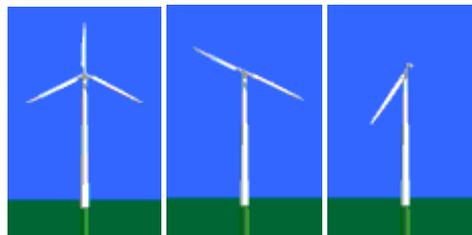
Gracias al impulso inicial de grupos de entusiastas daneses que fueron construyendo de forma artesanal sucesivos prototipos, en las últimas décadas se ha desarrollado enormemente la industria de los aerogeneradores. De esta forma, se ha pasado de los pequeños generadores de algunos kilovatios a los grandes generadores actuales que pueden alcanzar los 5 MW.

Aunque la tecnología ha tenido que cambiar para permitir el desarrollo de estos grandes aerogeneradores, el principio básico es el mismo que el de los primeros. El viento incide sobre una hélice solidaria con un rotor que a su vez y mediante una transmisión mecánica adecuada acciona un generador eléctrico que produce la energía eléctrica.



Potencia del generadores función del diámetro del rotor .

Por otro lado, existen o han existido diferentes configuraciones de aerogenerador (eje horizontal o vertical, rotor a barlovento o sotavento, distinto número de palas, etc.), la mayoría de los aerogeneradores modernos (especialmente los de gran tamaño), constan de un rotor tripala de eje horizontal a barlovento (hélice en la cara de la torre donde incide el viento). A este diseño se le suele llamar el clásico "diseño danés" basado en el aerogenerador de Gedser.



← Aerogeneradores de eje horizontal →

Aerogenerador de eje vertical ⇒



Hay que tener en cuenta que, para aportar energía a la red eléctrica, la corriente debe ser generada de forma sincrónica con la red (50 Hz en Europa). Esto obliga a un sofisticado sistema de sincronización y a la incorporación de grandes cajas multiplicadoras que aumenten la velocidad de giro entre el eje de la hélice y el eje de giro del generador eléctrico.

Estas cajas multiplicadoras son a menudo un punto crítico en los aerogeneradores pero si se quiere acoplar directamente el eje de la hélice al eje de un generador con 1, 2 o incluso 3 pares de polos, tendríamos que la hélice giraría a más de 1000 r.p.m.. En los grandes generadores actuales (rotores de más de 70m. de diámetro) esto supone que la velocidad en el extremo de la pala sería de varias veces la velocidad del sonido, lo cual no es posible.

Los grandes aerogeneradores modernos están diseñados para generar electricidad entre los 3 y los 25 m/s. Por debajo del primer límite no son capaces de generar electricidad, a medida que la velocidad del viento aumenta son capaces de producir más potencia eléctrica y por encima del umbral superior de seguridad, giran las palas para no ofrecer resistencia al viento y evitar daños.

Además de la tendencia a utilizar molinos cada vez más grandes y lentos, existe un interés creciente por implantar parques eólicos en el mar. Este interés se debe a las siguientes razones:

- A pesar de que el ambiente marino puede ser más agresivo para los materiales, en general el viento en el mar es menos turbulento que en tierra y esto hace que la vida de los aerogeneradores es el mar sea más larga.
- La energía que contiene el viento es lógicamente proporcional a la velocidad del viento pero también a la densidad del aire que es mucho mayor en el mar al ir cargado con gran cantidad de humedad.
- Puede considerarse que la rugosidad del mar es en general baja y los obstáculos pocos. Esto hace que la variación de la velocidad con la altura sea menor y por lo tanto la altura de las torres puede ser menor.

2.1.1.3. Biomasa y biocarburantes

El concepto de biomasa energética incluye todos aquellos materiales que siendo biomasa (materia orgánica, de origen vegetal o animal), son susceptibles de ser utilizados con fines energéticos. Cualquier tipo de biomasa tiene en común con el resto el hecho de provenir en última instancia de la fotosíntesis vegetal.

Este tipo de recurso se aprovecha habitualmente quemándolo directamente o generando biogases que también serán quemados. Ambos procesos, al implicar combustión, desprenden CO₂ pero puede considerarse que el balance total de CO₂ es nulo ya que el gas emitido será igual al que fue absorbido mediante fotosíntesis.

Algunos tipos de biomasa que puede utilizarse como recurso energético son:

- Residuos forestales: residuos de tratamientos selvícolas como podas, entresacas, o limpieza de matorrales.
- Residuos agrícolas: restos de podas de árboles frutales, olivos, vides o de cosechas de cereales, tabaco, algodón, girasol,...
- Residuos de industrias forestales: residuos de las actividades industriales del sector de la madera como cortezas, recortes, virutas, serrines,...

- Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias: residuos de la fabricación de aceite de oliva, cáscaras de frutos secos, semillas,...
- Residuos biodegradables: subproductos susceptibles de ser transformados mediante degradación anaerobia descomponiéndose y dando lugar a una fracción en estado gaseoso (biogases). Los residuos que usualmente se asocian a este proceso son: purines y estiércoles, residuos de animales muertos, lodos de depuradora y aguas residuales urbanas.

Mención aparte requieren los cultivos energéticos y biocarburantes dado que agrupan principalmente a cultivos que se realizan exclusivamente de cara a su aprovechamiento energético. Se pueden diferenciar dos tipos de cultivos energéticos:

- Orientados a la producción de materiales leñosos
- Orientados a la producción de otros tipos de materiales vegetales mediante especies de ciclo anual, destinada a la obtención de biocombustibles líquidos capaces de sustituir total o parcialmente a los combustibles fósiles convencionales que se emplean en los motores de los vehículos (biocarburantes).

Los biocarburantes pueden clasificarse a su vez en dos tipos:

- **Bioetanoles** obtenidos a partir de la fermentación de productos que contienen azúcares o hidratos de carbono: remolacha, caña de azúcar, cereales, tubérculos,...
- **Biodieseles** obtenidos a partir de la esterificación de aceites vegetales de colza, girasol o incluso aceites usados.

2.1.1.4. Energía Geotérmica

Habitualmente se entiende por energía geotérmica aquella porción del calor contenido en el interior de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre.

Así entendido, este recurso se encuentra desigualmente repartido por la superficie terrestre y depende del gradiente geotérmico que exista en la zona. Se define el gradiente geotérmico como el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A las profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología moderna (sobre 10.000 m), el gradiente geotérmico promedio es alrededor de 25 a 30°C/km. Sin embargo hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico alcanza más de diez veces el valor promedio y por tanto el aprovechamiento de esta energía se hace especialmente interesante.

Existen diferentes tipos de yacimientos geotérmicos que básicamente pueden clasificarse en función de si disponen o no de un reservorio o fuente natural de agua.

- En aquellos en los que existe un reservorio natural de agua, ésta puede ser directamente extraída y, tras su uso, devuelta al reservorio a través de pozos de reinyección (ejemplo de este tipo de yacimientos son los manantiales de aguas termales, los géiseres,...).
- Los yacimientos en los que no existe fuente de agua se denominan habitualmente de “rocas secas calientes”, en este caso se bombea agua a alta presión a través de pozos hasta un cuerpo de rocas calientes y compactas causando su fracturamiento hidráulico. El agua circula por estas fracturas artificiales, extrayendo calor de la roca circundante y es posteriormente extraída a través de otro pozo.

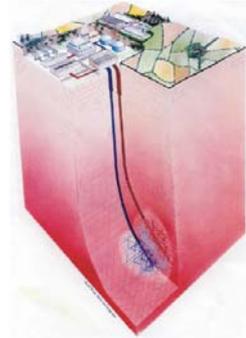


Figura 2-3: Esquema de un sistema de roca seca caliente a escala comercial

A su vez, son tres las tecnologías principales de aprovechamiento del calor generado por la Tierra tras la localización de yacimientos naturales de calor o agua caliente:

- Las centrales geotérmicas productoras de electricidad pueden diseñarse a partir de yacimientos de las dos clases (con o sin fuente de agua) y la generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor.
- Las utilidades de uso directo del calor: calefacción y producción de agua caliente para uso domestico, agrícola (cultivo en invernaderos) o industrial. En este caso también pueden utilizarse las dos clases de yacimiento pero habitualmente se recurre a aquellos en los que existe una fuente natural de agua.
- Las bombas de calor geotérmicas donde la energía de suelos poco profundos se utiliza para calentar y refrigerar edificios mediante una bomba de calor⁸.

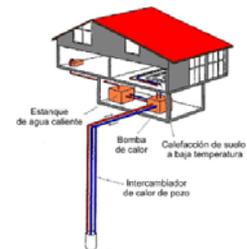


Figura 2-4: Sistema geotérmico con bomba de calor

2.1.1.5. Energía Oceánica

Aunque el potencial energético del mar, es muy alto, su desarrollo hasta el momento ha sido muy escaso. En general, cualquier país con costa puede aprovechar alguna de las formas de energía marina que se pueden dividir en los siguiente tipos:

⁸ Una bomba de calor es básicamente un refrigerador que capta calor de un espacio y lo transmite a otro espacio que se encuentra a mayor temperatura. La única diferencia entre un refrigerador y una bomba de calor es el efecto deseado, habitualmente enfriamiento en el primer caso y calefacción en el segundo, aunque las bombas de calor reversibles pueden ejercer las dos funciones.

La **energía de las olas, o energía undimotriz**, es considerada por muchos como la fuente de energía renovable más interesante para los países marítimos.

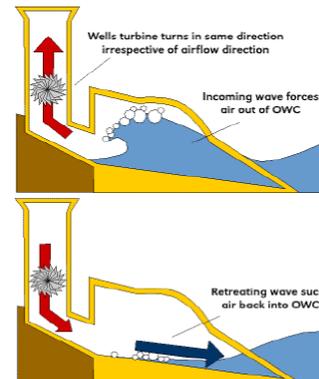
Su origen está en las olas que se forman en cualquier punto del mar por la acción del viento y corren por su superficie (a medida que el viento es más fuerte, el tamaño de las olas crece) impactando con los objetos que encuentran en su camino y disipando grandes cantidades de energía.

Existen numerosos diseños de sistemas para aprovechar esta energía de los cuales se describen a continuación algunos de ellos:

- Dispositivos de columna oscilante de agua: Estos dispositivos aprovechan el movimiento del agua para comprimir y aspirar sucesivamente, el aire encerrado en una cavidad.

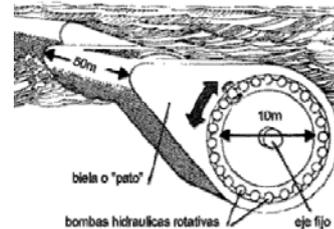
Cuando el agua sube, el aire se comprime y pasa a través de una turbina conectada a un generador.

Cuando el agua cae, se crea una succión que vuelve a hacer pasar el aire por la turbina (ahora en dirección contraria).



- Dispositivos que flotan en la superficie del agua o debajo de ella:

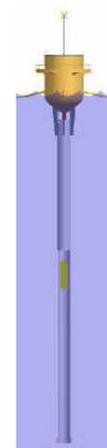
- El llamado Pato Salter se amarra al fondo marino por un sistema de amarradura apretado o flojo. Por su parte, los flotadores giran impulsados por las olas y ese movimiento de giro impulsa una bomba de aceite que luego se turbin.



- Los dispositivos Pelamis: constan de cilindros flotantes unidos mediante bisagras. El movimiento de estas bisagras permite bombear aceite a alta presión que luego acciona unos motores hidráulicos. Estos a su vez accionan unos generadores eléctricos (750kW, 700 ton, 142m largo, 3,5m de Ø).



- Los dispositivos ITS: constan de una boya circular u oval con el diámetro y el peso adaptados a la situación predominante de la ola en la zona. La boya puede moverse arriba y abajo contra la masa de agua que contiene el tubo vertical sumergido bajo la boya. Dicho movimiento relativo mueve un pistón que luego acciona el sistema generador.



Estos sistemas son los principales pero, dado que la tecnología es incipiente, existen multitud de dispositivos flotantes

que aquí no pueden desarrollarse.

La **energía de las mareas** (diferencia de altura de los mares en función de la posición relativa de Luna respecto a la Tierra) o **energía mareomotriz** se genera por la atracción gravitatoria sobre los mares.



Para su aprovechamiento, es necesario cerrar las entradas a estuarios o ensenadas y dejar libre tan sólo una entrada donde se colocan turbinas. El agua al entrar y salir acciona las turbinas y produce electricidad.

Es fácil imaginar que la alteración de las corrientes y del medio en general produce un gran impacto medioambiental y es difícil ver esta energía como una energía “verde”.

Otra fuente de energía marina es la de las **corrientes marinas**. El aprovechamiento de éstas es similar al de la energía eólica. En este caso, la turbina se sumerge en la corriente y es accionada por la energía de ésta. Estos sistemas requieren de velocidades de al menos 5 nudos (12m/s).



Por último, la **conversión de energía térmica oceánica o energía del gradiente térmico** trata de convertir en energía útil la diferencia de temperaturas a distintas profundidades del mar. En zonas tropicales por ejemplo, la diferencia entre la superficie y el agua a 100 metros de profundidad oscila entre 20°C y 24°C.

Aparte de estas tecnologías, están por explorar otras como la diferencia de salinidad del agua de mar y la de los ríos que produce una diferencia de presión osmótica susceptible de generar un trabajo.

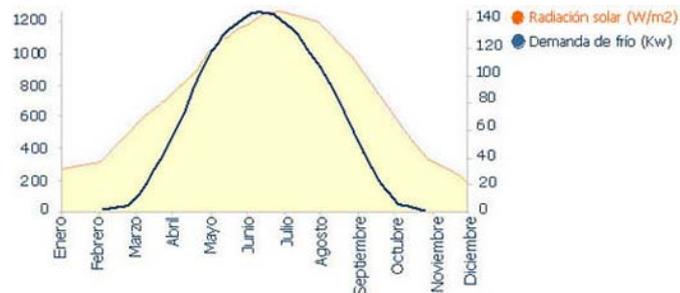
2.1.1.6. Nuevas aplicaciones de la energía solar térmica

2.1.1.6.1. Refrigeración.

Actualmente el consumo creciente de aire acondicionado y refrigeración, abastecido principalmente mediante equipos eléctricos, ha desplazado el tradicional pico de demanda eléctrica invernal al periodo estival.

Los sistemas de refrigeración resultan una ironía técnica puesto que envían más calor al planeta que frío a las necesidades de las personas. Esto supone que utilizar sistemas de refrigeración continúa acelerando la espiral de calentamiento global.

Por otro lado, la producción de frío mediante máquinas de absorción u otros equipos térmicos es un campo de aplicación de la energía solar especialmente interesante dada, la coincidencia del máximo de la demanda con el máximo de la insolación.



Otra ventaja de este tipo de aplicaciones es que, combinadas con la producción de A.C.S. y calefacción, mejoran sustancialmente el factor de uso y con ello la rentabilidad de las instalaciones solares.

Esto es así porque, las instalaciones solares térmicas para producción de A.C.S. y calefacción se diseñan siempre de manera que en los meses de mayor insolación la instalación cubra el 100% de la demanda. Si las instalaciones fueran diseñadas para cubrir las necesidades en los meses más fríos, en verano su producción superaría a la demanda y sería necesario disipar el calor sobrante (o cubrir parte del campo de captadores) para no sobrecalentar la instalación.

Esto provoca que en los meses de mayor demanda de A.C.S. y calefacción, la instalación no pueda cubrir la demanda aunque exista recurso solar suficiente.

Al incluir un sistema de refrigeración, en verano la necesidad de captación solar aumenta apreciablemente, por lo que el campo de colectores puede diseñarse de acuerdo a las necesidades en los meses más fríos sin que se encuentre sobredimensionada en verano.

Las tecnologías de refrigeración que se pueden acoplar a un sistema solar son las máquinas enfriadoras térmicas, tanto las de absorción como las de adsorción, y los procesos de desecación y enfriamiento evaporativo.

Aunque el rendimiento de las máquinas de absorción y adsorción es relativamente bajo comparado con máquinas convencionales (COP^9 0.5-1.2), proporcionan

⁹ C.O.P \equiv Coefficient of Performance = $Q / (Q_a + W)$

Q \equiv Frío producido por la máquina

Q_a \equiv Calor adicionado en la máquina

W \equiv Consumo eléctrico de la máquina

numerosas ventajas, como el bajo consumo eléctrico, llegando incluso a la independencia de energía eléctrica de la red en combinación con energía fotovoltaica. Además, los fluidos refrigerantes de este tipo de máquinas, no son ni CFCs y HCFCs y por lo tanto, no provocan la destrucción de la capa de ozono ni efecto invernadero.

➤ **Máquinas de absorción**

El ciclo de trabajo de las máquinas de absorción es similar al de los sistemas de aire acondicionado eléctricos.

En ambos casos, se hace circular un refrigerante en ciclo cerrado. En un punto del ciclo, se baja drásticamente la presión del mismo de forma que se fuerza su evaporación. Al evaporarse, absorbe una gran cantidad de calor y provoca el efecto refrigerante.

Para cerrar el ciclo, es necesario volver a comprimir el refrigerante y condensarlo posteriormente. Es en la fase de compresión donde el sistema consume trabajo.

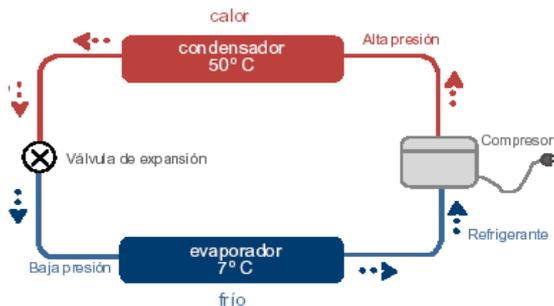


Figura 2-5: Ciclo de compresión de vapor mecánico.

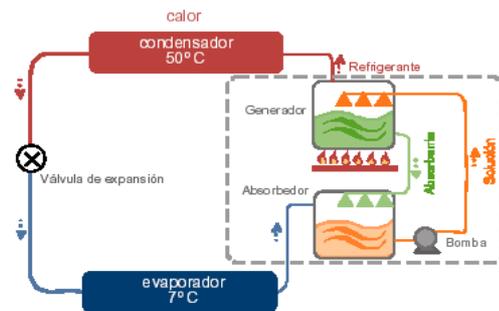


Figura 2-6: Ciclo de refrigeración por absorción.

Así pues, tanto las máquinas de absorción como los sistemas de aire acondicionado eléctricos tienen una fase de compresión y otra de expansión. En los sistemas convencionales la compresión es mecánica y se acciona mediante un motor eléctrico.

En la máquina de absorción, ese consumo eléctrico se reduce drásticamente al incluir un absorbente químico, una bomba y un generador térmico en lugar del compresor. En este caso, no se comprime un refrigerante en estado gaseoso (operación que consume mucha energía). En su lugar, se consigue que ese refrigerante sea absorbido en un líquido y la mezcla líquida es la que se bombea hasta alcanzar la presión necesaria. Posteriormente, se calienta para forzar la desorción del refrigerante obteniendo por un lado el refrigerante gaseoso a alta presión y por otra el absorbente puro de nuevo.

Por lo tanto, se necesita una fuente de calor para provocar la desorción. Esta fuente de calor es agua caliente a una temperatura entre 90° y 120° que puede ser generada en colectores solares.

➤ **Máquinas de adsorción**

En este caso, y a diferencia de las de absorción, en lugar de un absorbente (líquido) se utiliza un adsorbente (sólido). El ciclo de funcionamiento no es continuo, sino que tiene una fase de carga y de descarga.

El COP de estas máquinas se encuentra entre 0,55-0,65 y la temperatura de la fuente caliente puede ser inferior a la de las máquinas de absorción (a partir de los 55°C).

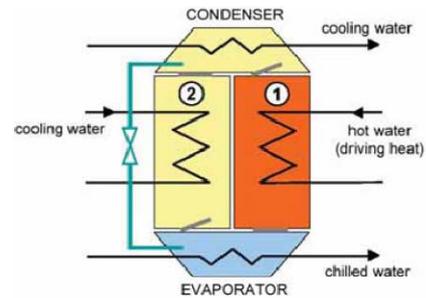


Figura 2-7: Máquina de adsorción.

➤ **Refrigeración solar mediante desecación y refrigeración evaporativa:**

Este sistema consiste en un ciclo en el que el aire a climatizar es primeramente secado y después enfriado por humidificación. Así pues, trata por separado la carga latente y sensible, hecho que permite un control muy preciso de las condiciones de confort.

Se utiliza la energía solar a baja temperatura (45-60°C) para regenerar el equipo principal, que es una rueda desecante. Ésta gira lentamente adsorbiendo el agua contenida en la corriente de aire. La regeneración consiste en evaporar el agua que ha ido absorbiendo para mantener la capacidad desecante del material y que el ciclo sea continuo.

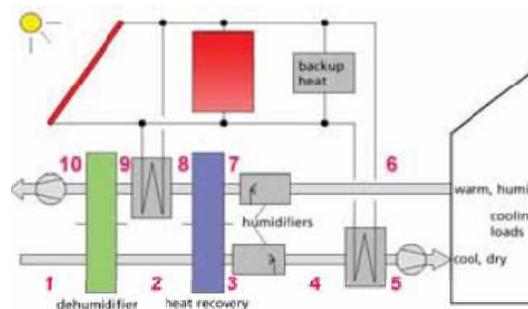


Figura 2-8: Instalación de refrigeración solar mediante desecación y refrigeración evaporativa.

2.1.1.7. Usos industriales.

En muchos procesos industriales (generación de vapor, lavado, secado, destilación, pasteurización, etc.) se necesita calor en el rango de 80 a 250°C. No obstante, y aunque su potencial es muy importante, son escasas las aplicaciones solares a este tipo de instalaciones.

Los campos de colectores solares pueden integrarse en los techos de las naves industriales, o bien instalarse en un terreno disponible y la gran escala de las instalaciones industriales permite sistemas de muy bajo coste, con una buena rentabilidad económica.

La demanda de calor industrial a temperaturas hasta 250 °C en los países de la UE es estimada a unos 300 millones de MWh, un 8 % de la demanda total de energía final. De hecho, alrededor del 50 % de la demanda de calor industrial se realiza a

temperaturas en la gama baja (<60 °C), media (60 °C – 150 °C) y media-alta (150 °C – 250 °C).

El porcentaje de la demanda energética en forma de calor en esta gama de temperaturas media y media-alta es especialmente elevado en las industrias alimentaria, papelera, textil, y química como se muestra en la Figura 2-9.

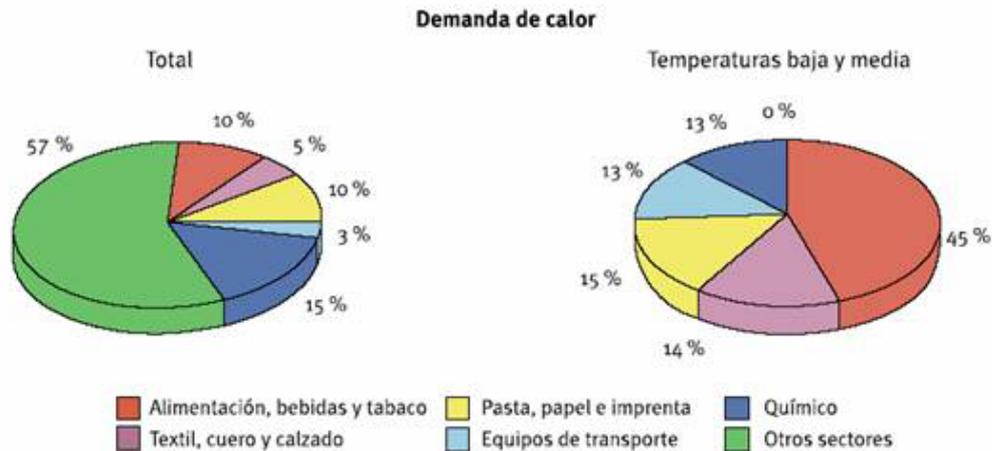


Figura 2-9: Demanda de calor par baja y media temperatura estimada a partir de datos propios. Datos para España 1999. Fuente: MCYT, IDAE

Las condiciones para la aplicación de la energía son favorables en procesos con una demanda de calor continua durante las horas de insolación y durante todo el año.

Procesos indicados son por ejemplo:

- El calentamiento de baños de líquidos para procesos de lavado, tintado, procesos químicos etc.
- El calentamiento de aire para procesos de secado.
- La generación de vapor de baja presión para usos diversos.
- Etc.

En el caso del secado de productos agroforestales, además de los sistemas de captación convencionales descritos en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, pueden utilizarse sistemas que combinan la captación de la energía solar y el secado de los productos en el mismo componente.

Estos sistemas de secado solar pueden clasificarse en dos grandes tipos: secaderos solares **activos** y **pasivos**. Los activos se caracterizan por la circulación forzada del aire a través del producto a secar y los pasivos en cambio recurren a la circulación natural del aire.

Por otra parte, según la morfología del secadero pueden distinguirse también dos tipos básicos:

- **Directos** o integrales, donde la radiación solar incide directamente sobre el producto a secar. Resultan muy económicos y sencillos pero tienen la desventaja de que ciertos productos pueden dañarse en caso de que la cubierta permita el paso de radiación ultravioleta.
- **Indirectos** o distribuidos: Se asimilan mucho a un colector de aire conectado a una cámara de secado, la radiación solar incide únicamente sobre la superficie “colectora”. Resultan más complejos y caros pero evitan

los daños por radiación ultravioleta y permiten aislar de manera eficiente la cámara de secado del exterior.

Existen también diseños mixtos que combinan las dos morfologías anteriores.

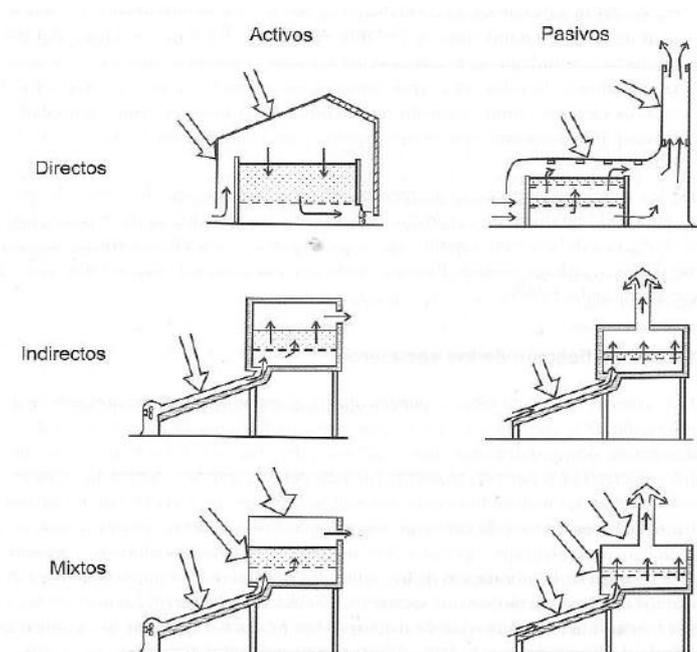


Figura 2-10: Tipologías de secaderos

2.1.1.8. Química solar.

➤ **Desinfección fotolítica**

La Desinfección Solar del Agua es una solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico, en lugares en los que la población consume agua microbiológicamente contaminada. El método SODIS¹⁰ usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano.

Los microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar, la radiación en el espectro de luz ultravioleta (longitud de onda 320-400nm) y el calor (incremento en la temperatura del agua).

- La radiación ultravioleta tiene efecto germicida: La radiación ultravioleta interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, cambia la estructura molecular y puede producir la muerte de la célula. Además, la radiación reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y produce formas altamente reactivas de oxígenos que también matan a los patógenos.

¹⁰ <http://www.sodis.ch/>

- Radiaciones de longitud de onda más largas elevan la temperatura del agua generando el efecto de pasteurización al alcanzarse los 70-75°C sin necesidad de alcanzar la ebullición. Incluso sin llegar a esas temperaturas, el calentamiento del agua acelera el efecto germicida de los rayos ultravioleta. De hecho, si la temperatura del agua se encuentra por encima de 50°C el proceso de desinfección por radiación ultravioleta es tres veces más rápido.

La técnica más sencilla para la desinfección del agua mediante energía solar consiste en colocar el agua contaminada microbiológicamente en recipientes transparentes y exponerlos durante 6 horas al Sol.

Cuando la nubosidad es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas de plástico durante 2 días consecutivos para obtener agua segura para el consumo humano.

Se recomienda el uso de botellas de PET.

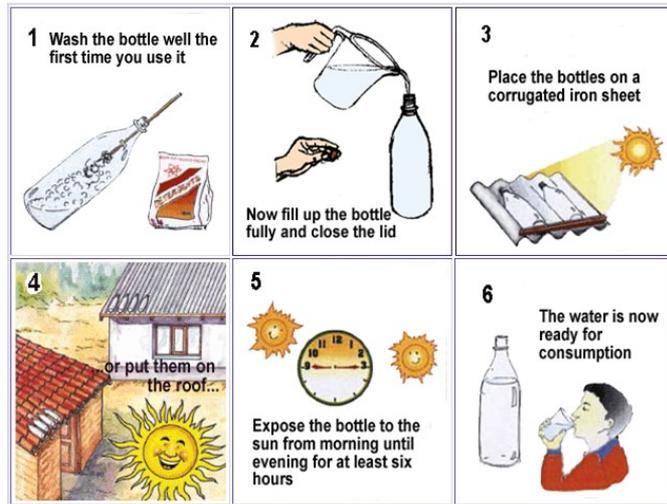


Figura 2-11: Método SODIS, de desinfección solar del agua .

Para mejorar la eficacia del proceso se debe usar agua con baja turbiedad, llenar las botellas de agua completamente para evitar bolsas de aire, colocar las botellas ligeramente inclinadas sobre una superficie y situarlas sobre un fondo que refleje la radiación solar.

➤ **Desinfección fotocatalítica**

La desinfección solar con catalizadores tiene un gran potencial para el tratamiento de aguas subterráneas, suelos contaminados con sustancias orgánicas así como para el tratamiento de ciertas aguas residuales industriales. Esta aplicación se basa en el uso de reacciones fotocatalíticas.

El óxido de titanio ha sido la sustancia más utilizada como catalizador en esta aplicación. Cuando incide radiación ultravioleta sobre este semiconductor, se excita un átomo de su banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones y huecos resultantes del óxido de titanio son altamente energéticos y móviles por lo que se pueden recombinar cediendo



Figura 2-12: Sistema de desinfección fotocatalítica

energía térmica o alcanzar la superficie.

En la superficie reaccionan con moléculas absorbidas de otras especies causando la oxidación o reducción de éstas. Las reacciones de óxido-reducción generan radicales libres muy reactivos que reaccionarán con las especies a su alrededor, rompiendo algunos enlaces moleculares y reduciendo u oxidándolas hasta convertirlas en especies menos complejas. Esta reducción en la complejidad molecular generalmente se traduce en una reducción del grado de contaminación o peligrosidad de la especie que se está tratando.

2.1.1.9. Desalación.

El agua potable constituye actualmente un bien muy escaso en el planeta. Existen muchos lugares con escasez de agua potable pero con niveles altos de irradiación y accesibilidad al agua salada (zonas costeras). En estos lugares, la desalación solar puede proporcionar una solución parcial a este problema.

Los métodos de desalinización solar pueden clasificarse en función del tipo de energía que consumen: eléctrica o térmica.

Por una parte, existen dos métodos que requieren **energía eléctrica**, que pueden ser combinados con instalaciones fotovoltaicas:

- *Ósmosis inversa*: mediante una membrana y un importante gradiente de presión se fuerza la separación de las moléculas de agua de las moléculas minerales.
- *Electrodiálisis*: una membrana selectiva que contiene iones positivos y negativos separa el agua de los minerales empleando electricidad fotovoltaica.

Por otra parte existen diversos tipos de instalaciones tanto experimentales como comerciales que utilizan **energía solar térmica**. Estas instalaciones evaporan el agua, y posteriormente, condensan el líquido separado del contenido mineral inicial: *Desalinización solar evaporativa*.

Este tipo de instalaciones pueden clasificarse en:

- Directas: el agua que va a ser desalinizada es la que se calienta mediante energía solar térmica.
- Indirectas: el sistema solar térmico es independiente de la planta de destilación.

A su vez dentro de las instalaciones directas se puede distinguir entre sistemas pasivos y activos. En los primeros, el proceso de evaporación tiene lugar en el sistema de captación solar mientras que los segundos cuentan con dos dispositivos independientes: sistema de captación (con o sin sistema de seguimiento) y destilador.

2.1.1.10. Hornos y cocinas solares.

Las cocinas y los hornos solares sirven para cocinar alimentos valiéndose únicamente de la energía solar. Para cocinar alimentos no se requieren temperaturas tan altas como las que proporcionan las cocinas convencionales (eléctricas, gas,...). Con temperaturas más bajas y mayores tiempos de cocción puede conseguirse el mismo resultado.

Dentro de los sistemas de cocina solar podemos distinguir dos tecnologías que actualmente se encuentran extendidas en diversos países del Sur¹¹: cocinas solares parabólicas y hornos solares.

➤ **Cocinas solares parabólicas**

Las cocinas parabólicas comerciales suelen constar de una parábola de unos 1.4m de diámetro que habitualmente se construyen a partir de secciones de aluminio de alta reflexión y consiguen una potencia en el punto focal que permite cocinar como en una cocina convencional. Su potencia máxima suele ser de aproximadamente 600 W con cielo despejado, pudiendo alcanzar temperaturas cercanas a 200°C. Utilizan la radiación directa del Sol, por lo que deben ser orientadas cada 15/20 minutos.

La parrilla de cocción (colocada en el foco de la parábola) se encuentra fija a la base de la cocina y permanece horizontal mientras el reflector gira libremente sobre la base para ser orientado al Sol. La forma de utilizar estos reflectores para cocinar, consiste en colocar el recipiente de cocción en el punto de concentración. El recipiente debe ser de un material que absorba la radiación (color negro mate preferentemente) y lo transfiera rápidamente a los alimentos que se encuentren en su interior (recipientes metálicos).



Figura 2-13: Cocina solar parabólica.

Una cocina de este tipo de 1,4 metros diámetro permite cocinar para entre 8 y 12 personas, y dado que su potencia es proporcional a su área de apertura es adecuada para aplicaciones domésticas. Aplicaciones de tipo comercial requerirían cocinas con parábolas mucho mayores.

Este tipo de cocina permite utilizar todas las técnicas de cocina clásicas: cocción, fritura, horneado,...

El horneado de productos de panadería se realiza en este tipo de cocinas utilizando la cazuela a modo de horno. En el interior de la cazuela, debidamente tapada, se debe introducir el molde o moldes de los productos a hornear.

➤ **Los hornos solares**

Dentro de esta clasificación se agrupan tecnologías bien diferenciadas que proporcionan sistemas con la funcionalidad de un horno convencional. Este tipo de sistemas permiten hornear y cocer alimentos pero no realizar frituras.

¹¹ Para más información consultar: <http://solarcooking.org/>

Las cocinas solares de acumulación, comúnmente llamadas hornos por su forma de cocinar (mediante aire caliente), consisten en una caja con una ventana acristalada (o cualquier otro material que permita el paso de los rayos solares) orientada al Sol. Lo que se pretende en un horno solar es, una vez que la radiación solar ha entrado a través del vidrio, acumular su energía en el interior de la caja, absorber el máximo y reducir las pérdidas.



Figura 2-14: Hornos solares tipo caja artesanales fabricados a partir de dos cajas de cartón y una lámina de vidrio.



Figura 2-15: Horno solar comercial de la marca Global Sun Oven.

Para acumular el calor en este tipo de hornos solares:

- El recipiente que contiene la comida y la chapa metálica del fondo del horno deben ser negros para absorber mejor el calor.
- Se deben aislar los laterales y el fondo de la caja para evitar que se pierda calor. Se puede usar corcho, papel de periódico o fibra de coco. En ocasiones se coloca doble vidrio para mejorar el aislamiento.

Existe una amplia variedad de modelos de hornos solares, desde los que se realizan de forma artesanal utilizando cajas de cartón, vidrio y papel de aluminio (baratos y sencillos de construir), hasta los comerciales que utilizan materiales más resistentes, como plásticos rígidos y láminas metálicas para reflectores. Aunque los diseños de hornos solares son muy variados en cuanto a forma, tamaño y materiales, hay algunas propiedades generales comunes que se detallan a continuación:

- En la mayoría de hornos se alcanza una temperatura ambiente en su interior de 120° C (algunos logran alcanzar los 200°C), por lo que la cocción es lenta y no existe el riesgo de alimentos quemados.
- Al igual que los hornos convencionales, tardan un tiempo en calentarse, por lo que se recomienda pre-calentarlos, es decir, orientarlos correctamente al Sol un tiempo antes de introducir los alimentos.
- Pierden parte del calor almacenado cada vez que se abren. Es mejor cocinar en ellos alimentos que no requieran mezclarse o añadir ingredientes en diferentes tiempos. Lo óptimo es introducir el recipiente con todos los ingredientes desde el principio. Esto más que una restricción es una ventaja porque una vez adquirida experiencia se puede cocinar prácticamente sin la intervención del usuario durante la cocción.
- Este tipo de cocina utiliza los dos tipos de radiación: directa y difusa, aunque las mayores temperaturas se alcanzan en días despejados (mayor radiación directa). Tienen alta inercia térmica y las temperaturas no descienden drásticamente cuando una nube bloquea momentáneamente la radiación incidente sobre la caja.

3. SISTEMAS DE ALTA TEMPERATURA

Los sistemas solares de producción termoeléctrica son sistemas que apenas han tenido desarrollo comercial y por lo tanto una tecnología emergente que requiere aún de un importante desarrollo científico y sobre todo tecnológico para su implantación.

La energía solar termoeléctrica agrupa un conjunto de tecnologías diferenciadas que se caracterizan por realizar concentración solar con el fin de alcanzar temperaturas que permitan la generación eléctrica. Las plantas constan de dos partes diferenciadas: una que concentra la radiación solar y la transforma en calor y otra que convierte esa energía calorífica en electricidad de la misma forma que en las centrales térmicas convencionales.

Producir electricidad a partir de la energía de los rayos solares es un proceso relativamente sencillo. La radiación solar directa se puede concentrar y recoger mediante las tecnologías de concentración de energía solar (TCS, CSP en inglés) para conseguir calor de temperatura media a alta. Este calor se usa entonces para operar un ciclo convencional de electricidad, por ejemplo mediante una turbina de vapor o de gas o un motor Stirling.

La generación combinada de calor y electricidad por TCS tiene un potencial especialmente prometedor, ya que el alto valor de entrada energética se usa a la mayor eficiencia posible, superando el 85%. El calor del proceso de generación combinada se puede usar para aplicaciones industriales, refrigeración de distrito o desalación de agua.

Las actuales tecnologías TCS incluyen las centrales de concentradores parabólicos, las centrales de receptor central y los discos parabólicos. Las centrales de colectores cilindroparabólicos con una capacidad instalada de 354 MW llevan en operación comercial varios años mientras que las centrales de receptor central y los discos parabólicos tan sólo se han probado con éxito en varios proyectos experimentales. Se describen a continuación estas tecnologías de concentración.

3.1. CONCENTRACIÓN Y SEGUIMIENTO SOLAR.

Determinadas aplicaciones (ej. generación de vapor, producción de electricidad, etc.) precisan de temperaturas de funcionamiento elevadas.

Además, del segundo principio de la termodinámica se deriva que las aplicaciones termosolares cuyo objetivo sea producir electricidad, serán tanto más eficientes cuanto mayor sea la temperatura del foco caliente. Recuérdese que el rendimiento de una máquina de Carnot viene dado por la expresión: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

Por otro lado, cuando el sistema necesita temperaturas de funcionamiento alto, se hace preciso concentrar la radiación solar y esto a su vez obliga a un seguimiento

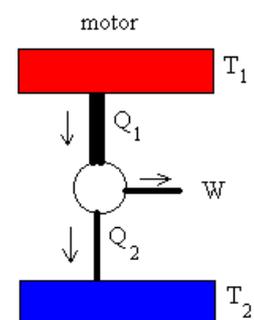


Figura 3-1: Máquina de Carnot

solar tanto más preciso cuanto mayor sea la razón de concentración.

➤ **Concentración.**

Así pues, para aumentar la temperatura se debe aumentar la radiación incidente en el absorbedor. Para ello, se utilizan concentradores (lentes convergentes y/o espejos cóncavos) que redireccionan los rayos del Sol que inciden sobre una superficie (superficie de captación, A_C) hacia una superficie menor (superficie absorbidora, A_{Abs}).

Lógicamente, y obviando las pérdidas ópticas que se producen en el sistema, la densidad de energía recibida por el absorbedor es A_C/A_{Abs} veces mayor que la radiación directa recibida en esa zona, pasando de los valores típicos (en torno a 1kW/m^2) a valores muy superiores.

Para entender este efecto, podemos tomar el ejemplo de un espejo cilindro-parabólico. Por la propia geometría de la parábola, si los rayos del Sol llegasen perfectamente paralelos al eje de la parábola, todos ellos se reflejarían en el foco y la razón geométrica de concentración sería ∞ .

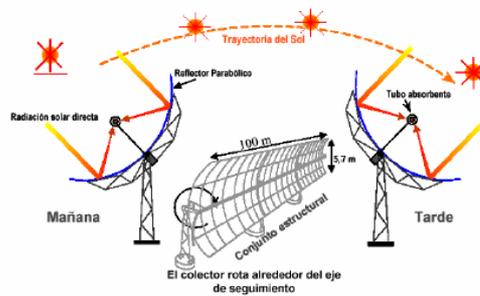
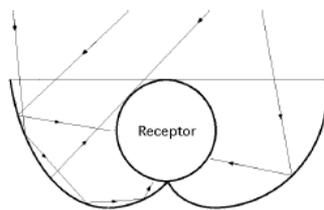


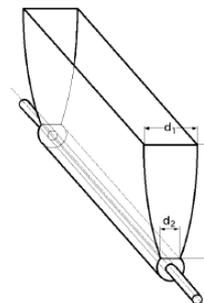
Figura 3-2: Seguimiento solar de un sistema cilindro-parabólico.

Al margen de los errores de fabricación, el Sol no es una fuente luminosa puntual y los rayos del Sol no llegan paralelos sino distribuidos sobre un cono de semiángulo 4.653 mrad . por lo que la razón de concentración geométrica siempre será menor. Además, el elemento absorbedor tiene unas dimensiones finitas y esto introduce nuevas pérdidas.

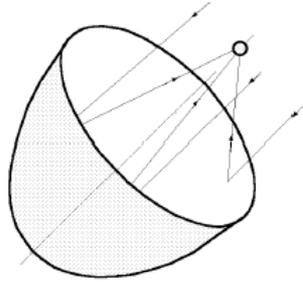
Los dispositivos más usuales para la concentración solar, son los reflectores cilindro-parabólicos y los paraboloides de revolución además de los sistemas basados en reflectores y lentes de Fresnel. No obstante, en función del nivel de concentración requerido y de la aplicación, existen otras alternativas.



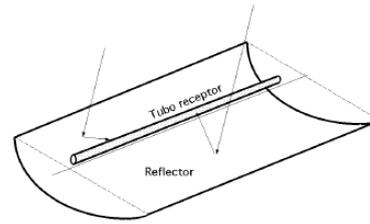
a) Concentrador parabólico compuesto (perfil de evolvente de círculo)



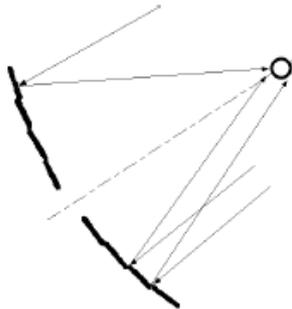
b) Concentrador parabólico compuesto



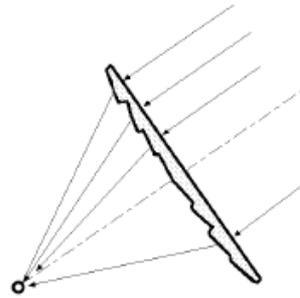
c) Paraboloide de revolución



d) Concentrador cilindroparábólico



e) Concentrador cilindroparábólico tipo Fresnel



f) Lente de Fresnel

Figura 3-3: Distintos sistemas de concentración solar.

El efecto de la concentración sobre la temperatura es doble, ya que no sólo se aumenta la densidad de energía incidente sino que además, la superficie caliente es menor y por lo tanto, las pérdidas por radiación y convección son menores.

Por supuesto, las pérdidas son proporcionales a la temperatura y por lo tanto, el aumentar la temperatura sí tiene una incidencia sobre las pérdidas de calor del absorbedor.

Estos sistemas, tienen además dos inconvenientes o limitaciones claras:

- En los días nublados, la radiación es difusa y los concentradores no pueden realizar su misión, ya que los concentradores sólo son útiles si la radiación incide en la dirección del eje del sistema de concentración (ej. paralela al eje de la parábola). Esto implica que todos los rayos solares deben incidir aproximadamente paralelos.
- En días claros, sí se puede conseguir que el eje del concentrador esté orientado según la dirección de la radiación solar. Pero dado que el Sol se mueve a lo largo del día es necesario incorporar un sistema de seguimiento para mantener constantemente orientado el concentrador.

La precisión de este seguidor tendrá que ser mayor si la razón de concentración es mayor (menor tamaño de A_{Abs}) ya que de lo contrario, los rayos no incidirán sobre la superficie absorbidora. Sólo para valores de la razón de concentración inferiores a 2 (ej. concentradores tipo CPC¹²) se pueden conseguir concentradores que no necesiten reorientarse a lo largo del día.

➤ **Seguimiento solar.**

¹² Concentradores cilindro parabólicos compuestos.

En los últimos años ha habido un gran número de desarrollos en el mundo de los seguidores solares. Esta actividad está impulsada en gran medida por la proliferación de las llamadas “huertas solares” fotovoltaicas. En estas instalaciones, el interés de realizar un seguimiento solar viene dado por la necesidad de aumentar la producción de energía eléctrica y de amortizar en menor tiempo la instalación fotovoltaica.

En el caso de la energía solar térmica tenemos una situación que tiene ciertas particularidades respecto a lo expuesto en fotovoltaica. Por un lado, las instalaciones de baja temperatura (ej. colectores planos), en general, no justifican la incorporación de un seguidor ya que el coste adicional no se amortizaría fácilmente. Por otro, las instalaciones de media y alta temperatura, incorporan concentradores, que no sólo justifican el uso de sistemas de seguimiento sino que obligan a ello.

Cualquier sistema de concentración que tenga un factor de concentración superior a 2 necesita un sistema de seguimiento solar, ya que estos dispositivos sólo aprovechan la radiación solar directa. A su vez, estos sistemas concentran la luz en elementos de un tamaño relativamente pequeño y por lo tanto, la precisión de estos sistemas de seguimiento es crítica (típicamente, se necesitan precisiones que garanticen errores inferiores a 0.1°) para el rendimiento de los sistemas.

Estas precisiones, son muy superiores a las exigidas por los sistemas solares fotovoltaicos clásicos aunque similares a los que exigen los nuevos sistemas fotovoltaicos de concentración que se están empezando a desarrollar.

Estos sistemas se aplican principalmente en aquellas instalaciones que requieran temperaturas en el rango medio-alto: generación termoeléctrica y aplicaciones industriales. En la actualidad, existen múltiples topologías de seguidores con ventajas e inconvenientes desde el punto de vista de precisión, fiabilidad, etc.

La primera clasificación de estos sistemas que puede realizarse distingue dos formas alternativas de control del seguimiento solar: método de lazo abierto o seguimiento por efemérides astronómica y el método de lazo cerrado o seguimiento directo:

- **Seguimiento por efemérides astronómica:** La mayoría de sistemas solares térmicos con seguimiento utilizan este sistema que, mediante algoritmos astronómicos, determina la posición relativa del Sol respecto a la Tierra y en base a esa posición orienta el concentrador. Este sistema requiere capacidad computacional y un preciso sistema de relojería que hoy en día puede ser sustituido por la señal temporal captada por un GPS. Requiere conocer la localización exacta del concentrador y una posición de referencia del mismo. Esta referencia puede ser ajustada en el principio de la operación pero es necesaria una continua recalibración.
- **Seguimiento directo:** El control mediante este sistema puede realizarse a través de sensores de irradiación solar. Esto permite, mediante realimentación continuada del sensor, apuntar el concentrador en la dirección de máxima irradiación. Los inconvenientes del seguimiento directo radican fundamentalmente en los días nublados en que las regiones del cielo de máxima intensidad luminosa no coinciden con la posición del Sol, de tal forma que el concentrador varía continuamente su orientación buscando la irradiación máxima.
- **Sistema mixto:** Combinación de los dos sistemas anteriores, que permite recalibrar automáticamente el sistema de control astronómico mediante la señal del sensor de irradiación solar. Este sistema permite responder a

perturbaciones en la irradiación solar o a perturbaciones sobre la estructura (ej. viento).

Otra clasificación habitual de los seguidores solares se realiza en base al número de ejes del mismo:

- Con seguimiento en un eje:** Permiten al concentrador movimientos diarios respecto a un eje de rotación, este eje puede tener orientaciones N-S, E-O, polar u otras. Todas estas configuraciones implican diferentes aprovechamientos energéticos anuales. Utilizan este tipo de seguimiento, por ejemplo, los concentradores cilindroparabólicos.

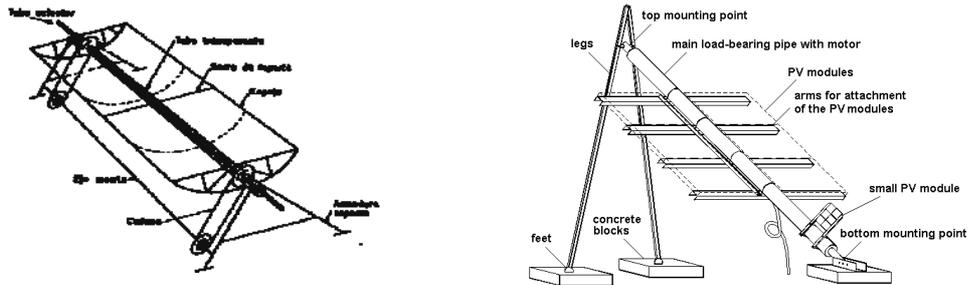


Figura 3-4: Sistemas de seguimiento en un eje.

- Con seguimiento en dos ejes:** Consigue tener continuamente enfocado el concentrador al Sol, o dirigir de forma eficiente la radiación reflejada hacia un punto, de tal forma que se alcanzan índices más altos de concentración. Utilizan este tipo de seguimiento los concentradores tipo disco parabólico y los helióstatos de las centrales de torre.

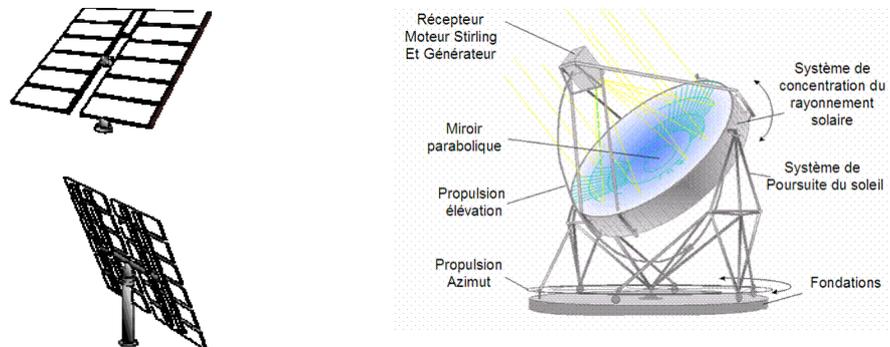


Figura 3-5: Sistemas de seguimiento en dos ejes.

3.2. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

3.2.1.1. Sistemas basados en concentradores cilindroparabólicos (CCP).

Los CCP son colectores solares de concentración con foco lineal que pueden operar eficientemente hasta temperaturas del orden de 450°C con aceites sintéticos como fluido de trabajo y alrededor de 550°C en el caso de los sistemas de generación directa de vapor.

Estos sistemas están compuestos básicamente por un espejo cilíndrico parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola. La radiación solar concentrada produce el calentamiento del fluido que circula por el interior del tubo receptor.

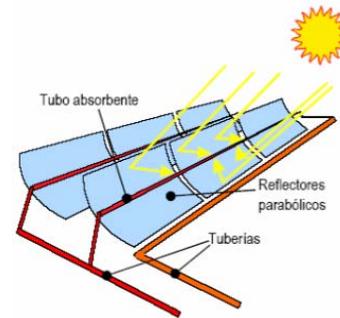


Figura 3-6: Esquema de funcionamiento de un CPC.

Los elementos principales de un colector cilindroparabólico son:

- La **estructura metálica** que soporta el resto de los elementos. Los sistemas comerciales están basados en estructuras de celosía sobre las que se amarran los espejos reflectores.
- El **reflector** cilindroparabólico: que consiste en un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola (formado a partir de varias facetas), que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano de apertura. La superficie especular se consigue a base de películas de plata o aluminio depositadas generalmente sobre vidrio. Los espejos utilizados en esta aplicación se denominan espejos de vidrio grueso y están preconformados en caliente para proporcionarles la curvatura parabólica necesaria.
- El **tubo absorbedor**: que es uno de los elementos fundamentales de los CCP, ya que de él depende en gran medida el rendimiento global del colector. El tubo absorbedor de un CCP consta de dos tubos concéntricos: el tubo interior, por el que circula el fluido que se calienta que es metálico y el tubo exterior que es de vidrio.

El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad (>90%) y una baja emisividad en el espectro infrarrojo (<20%). Entre ambos tubos existe un vacío parcial que tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de proteger su recubrimiento selectivo (se degrada en contacto con aire por oxidación). Los extremos del tubo de vidrio van soldados, mediante una soldadura vidrio-metal, a un fuelle metálico que, a su vez, va soldado por su otro extremo al tubo absorbente metálico. De esta forma se logra que exista un espacio anular estanco entre el tubo metálico y el de vidrio, a la vez que la diferente dilatación térmica de los tubos de vidrio y metal es compensada por el fuelle metálico.

El tubo de vidrio exterior suele llevar también un tratamiento antirreflexivo en sus dos caras, para aumentar su transmisividad a la radiación solar.

Dentro de estos sistemas se introducen además unos componentes llamados getters cuya misión es absorber gases que puedan afectar al grado de vacío entre los tubos. Suelen tener capacidad para retener los gases que se desprenden del recubrimiento en los primeros calentamientos y, en caso de utilizar aceite como fluido caloportador, también captan el hidrógeno que se desprende de estos aceites y que se difunde a través del tubo metálico.

- El **sistema de seguimiento** del Sol que es igualmente imprescindible ya que un CCP, como cualquier sistema solar de concentración, solo puede aprovechar la radiación solar directa y esto exige que el colector vaya provisto de un mecanismo de seguimiento solar que lo mueva a lo largo del día conforme el Sol describe su trayectoria diaria en el cielo. El sistema de seguimiento solar más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje

Un colector CCP completo está formado por varios módulos concentradores cilindroparabólicos que están unidos rígidamente en serie y son movidos por un mismo mecanismo de seguimiento solar.

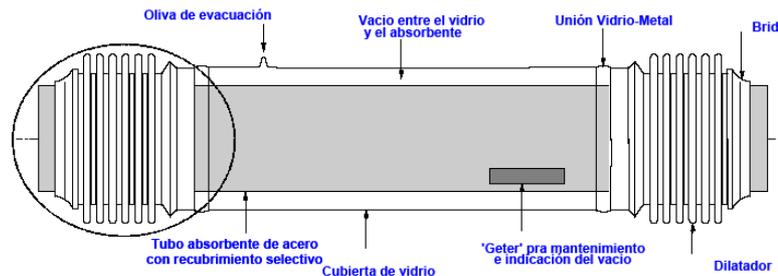


Figura 3-7: Esquema del tubo absorbente de un CCP.

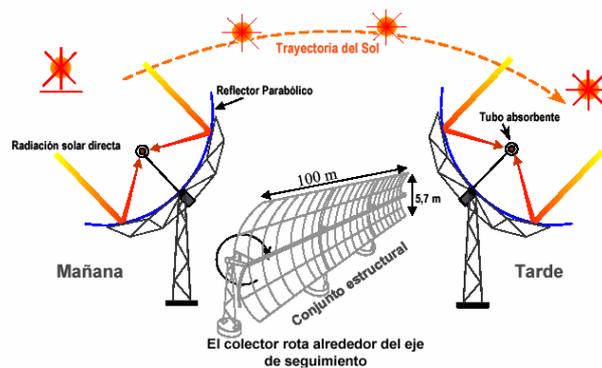


Figura 3-8: Esquema de funcionamiento del sistema de seguimiento de un CPC.

A día de hoy, las únicas plantas solares termoeléctricas comerciales existentes, son de tecnología cilindroparabólica, se encuentran en California y utilizan aceite sintético como fluido de transferencia de calor. Esto exige disponer de un intercambiador de calor aceite-agua donde se produce el vapor sobrecalentado requerido para accionar un turbo-alternador, generándose de este modo energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico Rankine.

Esta es la tecnología denominada Heat Transfer Fluid, conocida internacionalmente por las siglas HTF, ya que se basa en el uso de un medio caloportador para transportar la energía térmica desde el campo solar al bloque de potencia donde se genera la electricidad.

Existen actualmente numerosos proyectos basados en esta tecnología, algunos ya en construcción, en el sur de España. El primero de ellos, situado en la provincia de Granada, contará con un sistema de almacenamiento de sales fundidas que le permitirá gestionar la producción de la planta, independizándola parcialmente de la radiación solar.

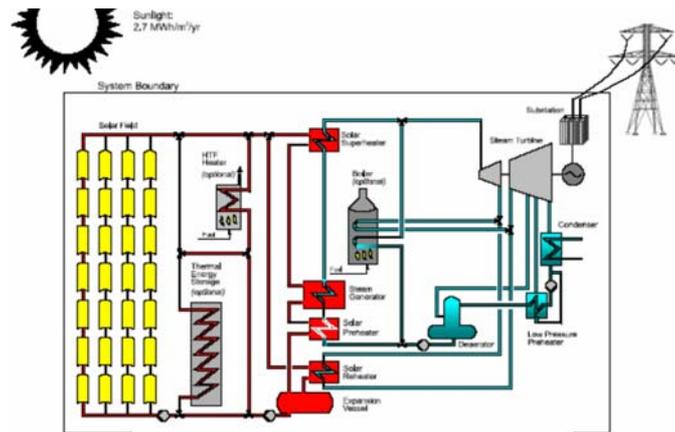


Figura 3-9: Esquema de una planta tipo CPC

Existe otra tecnología alternativa a los sistemas HTF, que consiste en generar vapor directamente en los tubos receptores de los concentradores. Esto supone eliminar la necesidad de una transferencia de calor intermedia por lo que se aumenta la eficiencia y se disminuyen los costes. Esta tecnología se encuentra actualmente en fase de investigación y está prevista la instalación de una planta de demostración precomercial de 5MW de potencia en las cercanías de la PSA pero a día de hoy hay aún numerosas incertidumbres tecnológicas sobre su posible aplicación comercial.



Figura 3-10: Fotografía del campo de concentradores de una planta CPC

3.2.1.2. Sistemas de receptor central con campo de helióstatos (SRC)

Los sistemas de receptor central se caracterizan porque el sistema colector está compuesto por un grupo de concentradores individuales, llamados helióstatos, que dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central normalmente situado a una cierta altura sobre el suelo en una torre.

Los SRCs son sistemas que concentran la radiación solar en tres dimensiones, por lo que pueden alcanzar un valor elevado de la razón de concentración. Por esta razón, se consiguen altos flujos de radiación incidente que permiten trabajar a temperaturas por encima de 1000°C.

Los elementos principales de un sistema de receptor central son:

- El **sistema de control** responsable de la adecuada orientación de los helióstatos.
- Los **helióstatos**: que constan básicamente de una superficie reflectante concentradora sobre una estructura y un mecanismo de seguimiento con sus accionamientos.

Existen diferentes tipologías de helióstato aunque la configuración más habitual consiste en una estructura metálica que sustenta espejos de vidrio de curvatura esférica (las superficies reflectantes más utilizadas son a base de espejos de vidrio de características similares a los descritos para los CCP).

- La **torre** cuya única misión es servir de soporte a diversos elementos auxiliares y al receptor, que normalmente debe situarse a una cierta altura sobre el nivel del campo de helióstatos para reducir las sombras y bloqueos entre ellos.
- El **receptor** que es el componente donde se convierte la radiación solar concentrada en energía térmica.

Se han propuesto numerosos tipos de receptores, con geometrías, materiales y fluidos de trabajo diferentes que pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Receptores de tubos: Constan de una malla de tubos recubiertos por un material selectivo por los que circula un fluido encargado de extraer la potencia solar absorbida en la superficie exterior de estos. Atendiendo al tipo de fluido podemos distinguir:
 - Receptores de tecnología de sales: El fluido que circula por los tubos son sales fundidas. La temperatura de este tipo de receptores está por encima de los 600°C.
 - Receptores de agua: donde el receptor es similar a los de tecnología de sales pero en el se produce vapor saturado o sobresaturado.
- Receptores volumétricos de aire: donde el receptor consiste en un material poroso con alta capacidad para absorber la radiación solar por el que se hace circular aire. Este aire transfiere el calor a las

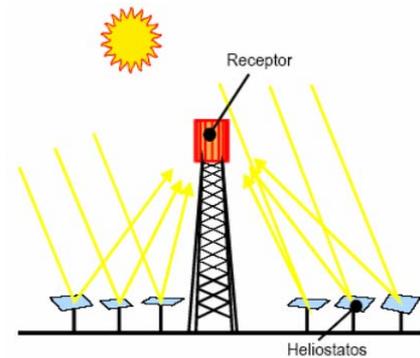


Figura 3-11: Esquema de funcionamiento de una planta de receptor central.



Figura 3-12: Helióstato de la planta PS10 de Solucar.

conducciones de agua que llegan hasta el receptor, generando vapor de agua. Las temperaturas de trabajo de este tipo de receptores son muy inferiores al caso anterior.

Ambas tipologías generales (receptores de tubos o volumétricos), en función de su geometría pueden ser a su vez:

- Receptores externos: la superficie absorbedora está directamente expuesta al medio ambiente.
- Receptores de cavidad: la superficie absorbedora se encuentra dentro de una cavidad que reduce las pérdidas térmicas en el absorbedor.

Actualmente existen dos proyectos comerciales en marcha en el estado español:

- *PS10*: es una planta de torre con receptor de agua saturada de 11MWe que dispone de 624 helióstatos de 120 m². Esta instalación generará directamente vapor de agua que posteriormente será turbinado. Dispondrá de un sistema de almacenamiento de vapor de agua a presión que le permitirá generar energía eléctrica, sin radiación solar, durante media hora.
- *Solar Tres*: es una planta de torre con receptor de tubos de sales fundidas de 17 MWe de potencia nominal que dispone de 2750 helióstatos de 96 m². Esta instalación calentará sales hasta temperaturas cercanas a los 600°C. Estas sales serán las que alimentaran el generador de vapor. Dispondrá de un sistema de almacenamiento de sales fundidas que le permitirá generar energía eléctrica, sin radiación solar, durante 15 horas.

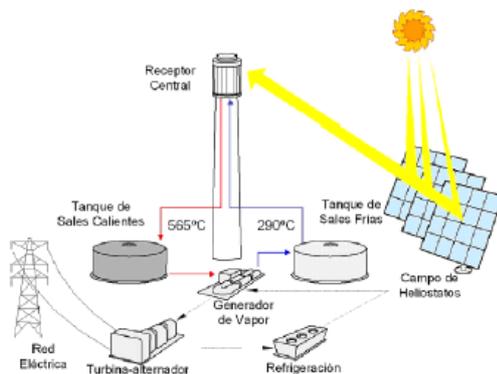


Figura 3-13: Esquema de una planta de receptor central con tecnología de sales fundidas.



Figura 3-14: Vista general de CESA-1, planta experimental de receptor central de la PSA.

3.2.1.3. Sistemas basados en discos parabólicos (DP).

Como se detalla más adelante, los sistemas de discos parabólicos se componen básicamente de un reflector con forma de paraboloide de revolución, un receptor situado en el foco de dicho paraboloide y un sistema de generación eléctrica compacto (motor de combustión externa o turbina más alternador), que suele formar un solo bloque con el receptor.

La radiación solar concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte en energía térmica que permite generar electricidad –trabajo mecánico- en el sistema generador. Los discos parabólicos han evolucionado tanto en EEUU como en Europa hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco.

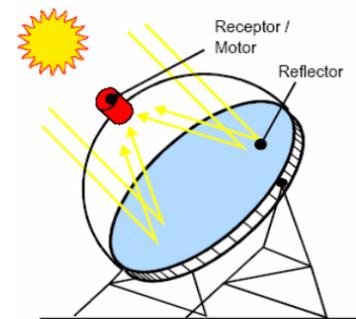


Figura 3-15: Esquema de funcionamiento de un DP

Los sistemas disco-Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30% y hasta un 25% de promedio diario en unidades de 7 a 25kW.

Así pues los DP se caracterizan por un alto rendimiento, modularidad y autonomía. Actualmente se encuentran en fase de desarrollo pero un buen número de prototipos están en operación en diversos lugares del mundo.

No obstante, la aún insuficiente fiabilidad (asociada principalmente a los motores) y su elevado coste constituyen los dos principales obstáculos para su introducción en el mercado de generación eléctrica.

Los componentes principales de un disco parabólico son:

- El **concentrador** que debe tener forma de paraboloide de revolución. Suelen ser construidos por alguna de las dos técnicas siguientes:
 - A partir de facetas que unidas se aproximan a la geometría deseada
 - Mediante membranas tensionadas de metal.

La superficie reflectante se consigue a base de espejos de vidrio de película fina (se conforman en frío) en la mayoría de las ocasiones.

- La **estructura** y el **sistema de seguimiento** que deben permitir un seguimiento en dos ejes de cierta precisión. Habitualmente se utiliza una de estas dos configuraciones:
 - Seguimiento en acimut-elevación: el movimiento se realiza en los ejes vertical y horizontal.
 - Seguimiento polar: uno de los ejes sigue las variaciones estacionales del Sol, por lo que se mueve solamente una vez al día y el otro tiene un movimiento a velocidad constante a lo largo de todo el día.



Figura 3-16: Unidad DP Eurodish de la PSA.

La configuración acimut-elevación resulta más simple desde el punto de vista constructivo, mientras que el sistema polar es más fácil de controlar.

- El **receptor** y el **sistema generador** que son los encargados de transformar el calor concentrado en energía eléctrica útil.

Existen fundamentalmente dos tipos de receptores, aquellos que calientan directamente el fluido de trabajo del sistema generador o los que por el contrario utilizan un fluido caloportador intermedio (habitualmente sodio) que evapora en el receptor y condensa en el intercambiador de calor donde se calienta el fluido de trabajo.

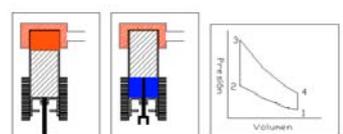
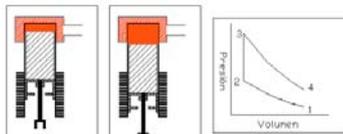
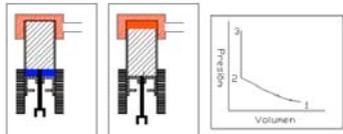
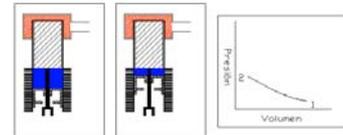
El sistema generador está formado por una máquina térmica que transforma el calor en energía mecánica y un generador eléctrico que transforma ésta, en electricidad. Aunque algunos desarrollos utilizan turbinas de gas como máquina térmica, el sistema más extendido para esta aplicación son los motores Stirling.

Estos motores habitualmente reciben la denominación de “motores de combustión externa” porque se alimentan a partir de una fuente de calor externa de cualquier procedencia¹³. Son máquinas de ciclo cerrado, ya que el fluido de trabajo (habitualmente helio o hidrógeno y en algunas ocasiones aire) se encuentra confinado en su interior y es sometido cíclicamente a las mismas transformaciones.

Básicamente el motor está formado por dos cámaras, una fría y otra caliente, y un sistema de pistones que obliga al fluido de trabajo a pasar de una a otra cámara cíclicamente.

El ciclo termodinámico Stirling al que se asemeja idealmente el funcionamiento de estos motores tiene las siguientes fases:

- **Compresión isoterma:** Partiendo de que todo el gas se encuentra en la cámara fría, y con ayuda de uno de los pistones, se comprime el gas manteniendo la temperatura constante.
- **Calentamiento isócoro:** Una vez comprimido se transfiere todo el gas a la cámara caliente manteniendo su volumen constante.
- **Expansión isoterma:** Ya en la cámara caliente el gas se expande, a temperatura constante, ejerciendo presión sobre el pistón y generando el trabajo útil del ciclo.
- **Enfriamiento isócoro:** Una vez expandido el gas, éste se transfiere a la cámara fría, manteniendo su volumen constante, y de esta forma comienza nuevamente el ciclo.



¹³ En este caso se trata de energía solar térmica concentrada pero podrían ser otras fuentes, como por ejemplo, calores residuales de procesos industriales.

En la práctica el funcionamiento de los motores reales se aleja de este ciclo ideal por varias razones:

- El movimiento de los pistones en lugar de ser discreto es continuo de tipo sinusoidal y las transformaciones no son ni perfectamente isothermas ni isócoras.
- Existen pérdidas térmicas a través de las paredes y otros componentes del motor.
- Otras pérdidas por: fricción del fluido, pérdidas de carga, saturación térmica, fricción mecánica, resistencia aerodinámica,...

El rendimiento de los motores comerciales de este tipo ronda el 35% pero por el momento tienen bastantes problemas de fiabilidad y fugas del fluido de trabajo.

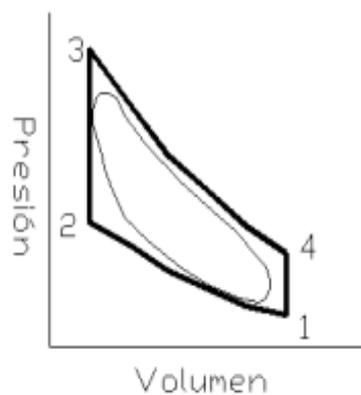


Figura 3-17: Ciclo real vs ciclo teórico.

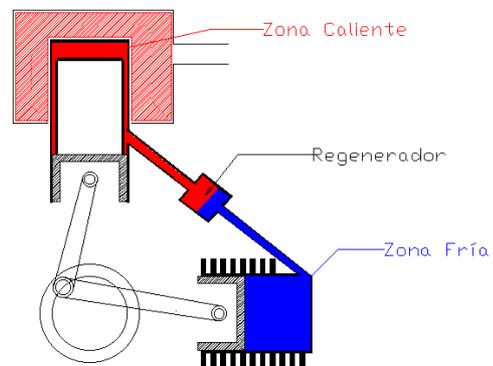


Figura 3-18: Configuración de los motores Stirling utilizados actualmente en la mayoría de los sistemas DP.