

# LA ENERGÍA EÓLICA

## Índice

EL ORIGEN DEL VIENTO .....	2
LA ENERGÍA DEL VIENTO .....	4
BREVE HISTORIA DEL APROVECHAMIENTO EÓLICO .....	5
Los primeros molinos .....	5
Del Renacimiento a la Revolución Industrial .....	7
La época contemporánea .....	8
Situación actual .....	9
MAQUINAS EÓLICAS .....	10
Soportes .....	11
Sistemas de captación: el rotor .....	11
Sistemas de orientación .....	13
Sistemas de regulación .....	15
Sistemas de transmisión .....	17
Sistemas de generación .....	17
DISEÑO DE INSTALACIONES EÓLICAS .....	19
Selección del emplazamiento: potencial eólico .....	20
Elección y diseño de la máquina eólica .....	22
Aspectos económicos .....	23
APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA .....	25
Aplicaciones centralizadas .....	25
Aplicaciones autónomas .....	26

# EL ORIGEN DEL VIENTO

El viento es una consecuencia de la radiación solar. Las diferencias de insolación entre los distintos puntos de la Tierra generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, que se traducen en variaciones de presión. El aire, como cualquier gas, se mueve desde las zonas de alta presión a las de baja presión. Se establece así cierto equilibrio por transferencia de energía entre las zonas de diferente temperatura, lo que ocasiona un desplazamiento de masas de aire, lo que produce el viento. De esta forma, se podría definir el viento como *una corriente de aire resultante de las diferencias de presión en la atmósfera, provocadas en la mayoría de los casos, por variaciones de la temperatura.*

Sin embargo, la circulación de las masas de aire está determinada por la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre ellas. Estas fuerzas son:

- Fuerza debida al gradiente de presión: acelera el aire cuando se establecen variaciones de presión.
- Fuerza gravitacional: produce una aceleración igual a la aceleración de la gravedad.
- Fuerza de rozamiento (también llamada *de fricción*): acelera el aire debido a gradientes de viscosidad; adquiere importancia en la capa de la atmósfera más cercana a la superficie de la Tierra.
- Fuerza de Coriolis (también denominada *fuerza de deflexión horizontal*): describe los efectos producidos por la rotación de la Tierra.

Así, estos factores inducen dos tipos de circulación del aire en la atmósfera:

- Circulación planetaria.
- Circulación a pequeña escala.

La **circulación planetaria** o general es debida fundamentalmente a la incidencia de los rayos del Sol sobre la Tierra y al efecto de la rotación de ésta. La zona ecuatorial recibe la máxima radiación solar, mientras que las zonas polares apenas perciben sus efectos. En una Tierra sin rotación, las diferencias térmicas y de presión entre la zona ecuatorial y las polares producirían un movimiento circulatorio del aire. El aire de las zona cálidas ascendería a las capas altas de la atmósfera, siendo reemplazado por aire más frío proveniente de los polos. El aire cálido a su vez se

desplazaría hacia los polos por las capas altas de la atmósfera, completando la circulación.

Ahora bien, si se considera el movimiento de rotación de la Tierra, el modelo de circulación global del aire sobre el planeta se hace mucho más complicado. En el hemisferio Norte, el movimiento del aire en las capas altas de la atmósfera tiende a desviarse hacia el Este, por efecto de la fuerza de Coriolis, y en las capas bajas tiende a desviarse hacia el Oeste. En el hemisferio Sur ocurre lo contrario. De esta forma, el ciclo que aparecía en un planeta estático ahora se subdivide.

Este modelo de circulación aún se ve perturbado por la formación de torbellinos que se generan en las zonas de interrelación de los diferentes ciclos (anticiclones y borrascas), quedando un esquema general de circulación planetaria mucho más complejo. Si se consideran además las estaciones del año (movimiento de traslación de la Tierra) y la presencia de masas continentales y oceánicas (de diferente capacidad calorífica), se obtiene la circulación verdadera del aire a escala planetaria.

A escala local, no obstante, hay que tener en cuenta los efectos producidos por el mar, las montañas y, en general, los que se derivan de la orografía del terreno, que pueden perturbar considerablemente el movimiento de las capas bajas de la atmósfera originando la llamada **circulación a pequeña escala** del aire.

Así, durante el día, el agua de los océanos permanece relativamente más fría que la superficie terrestre. De la radiación solar que incide sobre la superficie del agua, se emplea parte en calentamiento y parte en evaporación; pero debido a la gran capacidad del agua para absorber calor, la temperatura en las capas superficiales apenas varía y lo mismo ocurre con la temperatura del aire que se encuentra en contacto con ellas.

Sobre la tierra, en cambio, la radiación solar que se recibe sobre el suelo se traduce en una elevación de la temperatura, tanto de la corteza terrestre como del aire circundante. El aire caliente se dilata, pierde presión y es reemplazado por el aire fresco que viene del mar. Durante la noche, el ciclo se invierte. La corteza terrestre se enfría más rápidamente, mientras que el agua del mar conserva mejor el calor acumulado a lo largo del día.

En las montañas ocurre un proceso parecido. Unas laderas reciben más insolación que otras, en función de su orientación y pendiente. El calentamiento del

suelo es desigual, y los desplazamientos del aire tienden a compensar las diferencias de presión.

Por su parte, la orografía del emplazamiento ejerce un efecto muy importante sobre las características del viento. El aire que se desplaza en la proximidad de la tierra debe sortear los innumerables obstáculos que se encuentran a su paso, alterándose en mayor o menor grado sus características.

Así, las montañas constituyen un importante obstáculo al desplazamiento del aire y su comportamiento ante ellas puede resultar muy complejo. También en zonas libres de obstáculos se ejerce un efecto de frenado. Las fuerzas de rozamiento, que actúan en las capas de la atmósfera que se encuentran en contacto con el suelo, tienden a disminuir la velocidad del viento, siendo sus efectos menores a medida que se gana altura sobre el terreno.

En definitiva, se puede considerar que, a nivel general, las variables que definen el régimen de vientos en un punto determinado son las siguientes:

- Situación geográfica.
- Características climáticas locales.
- Estructura topográfica de la zona.
- Irregularidades puntuales del terreno.
- Altura sobre el nivel del suelo.

Su estudio es de gran importancia a la hora de acometer el diseño de un dispositivo que sea capaz de aprovechar la energía que contiene el viento.

## LA ENERGÍA DEL VIENTO

Se ha calculado que aproximadamente el 2% de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía de los vientos (**energía eólica**) y que un 35% de ésta se disipa en la zona inferior de la atmósfera, de 1 km de espesor. Si se estima razonable, cualesquiera que sean los progresos técnicos alcanzados con las máquinas, que no es posible utilizar más del 10% de la energía eólica disponible a nivel del suelo, estos cálculos indican, para el conjunto del planeta, un potencial energético igual a  $1,3 \cdot 10^{11}$  kW, es decir, unas 20 veces el actual consumo mundial de energía. Esto hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovables de primera magnitud.

La energía del viento es de tipo cinético, por lo que la potencia teórica obtenible,

no sólo depende del área de la superficie captadora, sino de forma mucho más acusada de la velocidad del viento.

Puede pensarse que con un dispositivo perfecto sería posible transformar toda esta potencia teórica en potencia aprovechable, es decir, extraer del viento toda la energía. Desgraciadamente, como demostró Betz, esto no es posible, ya que el viento, por su propia naturaleza, no puede ser despojado de toda su energía cinética (de lo contrario quedaría detenido), sino que al pasar a través del dispositivo captador, sale de él con su velocidad reducida.

El teorema de Betz permite demostrar que el viento que pasa a través de un dispositivo captador de energía eólica reduce su velocidad como máximo en  $2/3$  de su valor inicial, lo que equivale a la extracción del 59% de la energía cinética inicial del viento, lo que se lograría con un dispositivo de captación ideal, es decir, con un rendimiento del 100%. Aunque tal dispositivo no existe, el ser humano ha intentado obtener desde los tiempos más antiguos el mayor rendimiento posible de la energía del viento, como queda patente al hacer un breve repaso histórico del aprovechamiento de la energía eólica.

## **BREVE HISTORIA DEL APROVECHAMIENTO EÓLICO**

Las primeras referencias que se tienen con respecto al aprovechamiento de la energía eólica son unos grabados egipcios sobre navegación a vela del cuarto o quinto milenio a.C. Los molinos de viento debieron conocerse algo más tarde, tal vez hacia el tercer milenio a.C. y probablemente en el área de Mesopotamia, aunque no existe ninguna prueba de ello.

### **Los primeros molinos**

La primera referencia histórica sobre una posible aplicación de la energía eólica que no fuera la navegación, data del año 1.700 a.C., siendo los babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento para bombear agua con el fin de regar sus campos.

El primer molino de viento de aplicaciones utilitarias que se conoce con cierto detalle es el molino persa de eje vertical. Este molino se empleaba para moler grano y fue de uso corriente en la antigua Persia, posiblemente varios siglos antes de nuestra era. La aparición de este molino debió tener alguna relación con las ruedas hidráulicas

que, sin duda, existieron con anterioridad.

Hasta el siglo X no es posible encontrar un documento histórico irrefutable en el que se haga mención de los molinos de viento como práctica generalizada. Muchos historiadores han dejado abundantes textos en los que se hace constante referencia a estas máquinas.

A partir del siglo XI-XII la aplicación de los molinos de viento se desarrolla por dos canales aparentemente sin ninguna relación entre sí. El primero de ellos se extiende a través de la civilización islámica, que ocupa todo el Mediterráneo meridional, llegando hasta la mitad sur de la Península Ibérica. El segundo canal aparece en la zona norte de Francia, Inglaterra y Países Bajos, donde pudo haber llegado a través de los cruzados que vuelven de Palestina, o bien, haber surgido espontáneamente.

El molino mediterráneo, con su característico rotor a vela, se utilizó para moler grano y para bombear agua en toda la extensión del imperio musulmán, aunque con las diferencias propias de cada región en lo que se refiere a los métodos y detalles constructivos. El molino con aspas a vela, montado sobre trípode, se utilizó extensamente en Creta para bombear agua, existiendo todavía en dicha isla unas 6.000 unidades de este tipo funcionando en la actualidad.

Los primeros molinos de grano eran unas rudimentarias máquinas con un rotor fijo, sin posibilidad de orientarse en la dirección del viento. Con el tiempo estos molinos se fueron perfeccionando hasta convertirse en los clásicos de tipo torre. Esta, construida en mampostería, estaba coronada por una cúpula orientable donde se alojaban el eje, los engranajes y demás mecanismos que transmitían el movimiento a las muelas, situadas en un nivel inferior. A este tipo de molinos pertenecen los llamados *molinos ibéricos*, que se extendieron por toda la cuenca meridional del Mediterráneo, hacia los siglos XII y XIII, alcanzando los reinos del Sur de la Península Ibérica.

El típico molino manchego y mallorquín, tienen evidentes raíces en el molino mediterráneo, especialmente en la ejecución de la torre. Sin embargo, la forma y construcción de las palas es más bien de tipo europeo. Ambos tipos de molinos constituyen un nexo de unión entre las dos culturas.

En Europa, el molino de viento aparece a mediados del siglo XII, a partir del cual se pueden encontrar innumerables referencias relacionadas con los molinos. Aunque

la aparición de los molinos en Europa pudiera estar relacionada con las Cruzadas, como ya se indicó anteriormente, muchos autores defienden que Europa tenía, por esta época, la suficiente capacidad técnica para haber desarrollado un molino de viento a partir de mejoras realizadas en los molinos hidráulicos. En cualquier caso, los primeros molinos europeos llevaban un rotor de cuatro aspas, de entramado de madera recubierto de tela.

## **Del Renacimiento a la Revolución Industrial**

Aunque la evolución en la historia de los molinos de viento transcurre sin discontinuidades, a finales de la Edad Media las innovaciones y las aplicaciones de las máquinas eólicas se producen con rapidez. Los sistemas hidráulicos y eólicos constituyen las principales fuentes de energía motriz en el Renacimiento, y se multiplican las invenciones que utilizan las ruedas hidráulicas o los molinos de viento como fuerza impulsora.

A lo largo del siglo XVI son innumerables los diseños y proyectos relacionados con máquinas eólicas. La mayoría de ellos nunca llegaría a construirse, pero los dibujos y grabados que se conservan, demuestran unos conocimientos técnicos que nada tienen que ver con las épocas anteriores.

A partir del siglo XV se extienden por Europa dos tipos de molinos estructuralmente bien diferenciados, y que se desarrollan hasta mediados del siglo XIX. Son los molinos de trípode y de torre. Con el tiempo, el trípode acabaría recubriéndose para utilizarlo como almacén o vivienda. Las torres son de ladrillo o piedra y adoptan una sección circular u octogonal.

El siglo XVIII será un siglo de mejoras tecnológicas. En líneas generales, el formato exterior de los molinos se mantiene sin demasiadas modificaciones pero, en cambio, aparecen por primera vez los sistemas mecánicos de orientación y regulación. Paralelamente se empezaron a publicar los primeros tratados teóricos sobre molinos de viento. Ya no eran simples descripciones sobre diferentes tipos de máquinas, sino estudios en profundidad sobre: el comportamiento aerodinámico de los rotores, sistemas de regulación automática, o sistemas de orientación.

Entre la segunda mitad del siglo XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento, dentro de las

limitaciones de la tecnología artesanal. Los sistemas de orientación y de regulación de potencia se ven completados por mecanismos internos que ayudan en las operaciones de transporte y manipulación de las materias primas y de la molienda en sí, convirtiendo los molinos de viento en factorías mecanizadas con un alto grado de automatización.

Al final de este período, la bella línea de los molinos de viento se puede encontrar por todos los rincones de Europa, y tampoco resultan raros en EE.UU., Canadá, Australia, países latinoamericanos y, en general, en todos los países en que se habían establecido los emigrantes europeos.

## **La época contemporánea**

Aunque los molinos de viento habían llegado a convertirse en unas máquinas relativamente eficaces, su constitución era demasiado sólida y su estructura demasiado compleja para poder competir con los nuevos sistemas industriales de producción energética. Por otra parte, las características operacionales de los molinos clásicos, la irregularidad de su funcionamiento y la falta de sistemas de almacenamiento energético, no les permitían adaptarse a las exigencias de las fábricas surgidas a la sombra de la Revolución Industrial.

En la segunda mitad del siglo XIX comienza a aparecer una nueva generación de turbinas eólicas, con una concepción de diseño diferente. Son máquinas sencillas, susceptibles de ser fabricadas en serie, reduciéndose su ámbito de aplicación a zonas rurales, donde se utilizan casi exclusivamente para bombear agua de los pozos.

Se trata de rotores multipala acoplados a una bomba de pistón, llegando a convertirse en el molino de viento más extendido de cuantos hayan existido. La imagen de este *multipala americano* es corriente en cualquier parte del mundo, conservándose todavía en la actualidad unos 150.000 de los 6 millones fabricados entonces.

Sin embargo, aunque los multipalas habían abierto el camino hacia un nuevo concepto de las turbinas eólicas, la limitación de sus aplicaciones al bombeo no favorecía su desarrollo tecnológico, por lo que en Europa se encaminaron los esfuerzos hacia la reconversión de los viejos molinos, de forma que pudieran producir electricidad. El hecho de que la teoría aerodinámica estuviese aún insuficientemente desarrollada, obligaba a las nuevas plantas eólicas a seguir utilizando los rotores

clásicos, de bajo rendimiento.

Hasta las primeras décadas del siglo XX no se tuvieron los conocimientos suficientes para aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos desarrollados para la aviación. Los mismos científicos que habían elaborado las teorías aerodinámicas para usos aeronáuticos sentaron las bases teóricas de los modernos aerogeneradores, que ahora ya podían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir buenos rendimientos.

A pesar de la mayor eficacia aerodinámica y de la adaptación de las nuevas turbinas como generadoras de electricidad, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaron declinando durante esta época. Los combustibles fósiles y, en particular, el petróleo, se habían ido imponiendo cada vez más como la principal e insustituible fuente de energía. No obstante, hubo determinadas ocasiones a lo largo del siglo XX (después de ambas Guerras Mundiales) en que los recursos energéticos renovables y, en especial, la energía eólica, recibieron nuevos impulsos.

El período descrito termina a finales de los años sesenta, con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en diferentes países, sin demasiada conexión entre sí. Solamente en Francia y Gran Bretaña se llevaron a cabo programas de mayor alcance. La facilidad para conseguir combustible barato cerró el camino del desarrollo de la tecnología eólica en los países occidentales, y en las áreas poco industrializadas no se disponía de los recursos necesarios para hacer frente a programas de grandes inversiones.

## **Situación actual**

En 1973, y como consecuencia de la primera crisis del petróleo, se inicia otro período en el campo del aprovechamiento eólico como fuente de energía, aunque en esta ocasión, compartiendo el protagonismo con la energía solar, como recursos renovables y no contaminantes.

Sin embargo, en este período las circunstancias son radicalmente distintas que en los anteriores. En esta ocasión, la crisis energética se manifiesta más por el fuerte incremento de los precios, que por las dificultades de suministro (como sucedía durante las posguerras). La nueva estructura de los precios energéticos ha favorecido el

desarrollo de grandes turbinas aerogeneradoras, capaces de producir energía eléctrica a precios competitivos.

Dada la situación, la mayoría de los países occidentales que se han visto afectados por la crisis del petróleo y, en especial, los que ya tenían cierta tradición en el aprovechamiento de sus recursos eólicos, han preparado nuevos programas de investigación y desarrollo, con el fin de potenciar al máximo esta fuente de energía para principios del siglo XXI.

Dichos programas han centrado su interés en dos aspectos diferentes:

- Elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos.
- Cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia.

Paralelamente se ha pretendido crear incentivos que motiven a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitan cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

## MAQUINAS EÓLICAS

Una máquina eólica es cualquier dispositivo accionado por el viento. Si se utiliza directamente la energía mecánica, será un **aeromotor**, y si se acciona un generador eléctrico, se tratará de un **aerogenerador**.

La caracterización de una máquina eólica se realiza según los parámetros que se definen a continuación:

- Velocidad de arranque: velocidad mínima del viento que hace girar la máquina.
- Velocidad de conexión: velocidad mínima del viento a partir de la cual la máquina genera potencia.
- Velocidad nominal: velocidad mínima del viento que permite generar la máxima potencia (potencia nominal).
- Velocidad de frenado: velocidad máxima del viento que puede soportar la máquina generando potencia sin dañarse.
- Área de captación: superficie del sistema captador de la máquina perpendicular al viento.

Los distintos elementos de que consta una máquina eólica son, en general, los siguientes:

- Soportes.
- Sistema de captación.
- Sistema de orientación.
- Sistema de regulación.
- Sistema de transmisión.
- Sistema de generación.

A continuación se emprende el estudio de cada uno de estos elementos de la máquina eólica, lo que permitirá comprender mejor las variaciones en el rendimiento global del sistema y proporcionará las bases para el diseño y construcción de estos aparatos.

## Soportes

Las máquinas eólicas han de estar colocadas sobre un soporte, que debe ser capaz de tolerar todo el empuje del viento que transmita el sistema de captación y las eventuales vibraciones. Por otra parte, su altura debe ser suficiente para evitar que las turbulencias debidas al suelo afecten a la máquina y superar los posibles obstáculos cercanos, que puedan perturbar el viento. Dentro de estos dispositivos se pueden distinguir los soportes **autoportantes** y los soportes **atirantados**.

Los **soportes autoportantes** pueden ser de **estructura metálica** (parecida a las utilizadas para el transporte de energía eléctrica), sobre la que hay que colocar una plataforma de servicio para facilitar el mantenimiento de la máquina; los **soportes de hormigón** crean menos turbulencias que los de estructura metálica; las **torres tubulares** autoportantes pueden usarse cuando lo permite el peso de la máquina (< 1.000 kg) y sea imposible utilizar un soporte atirantado a causa del relieve del terreno.

Siempre que el terreno lo permita, es aconsejable, para máquinas pequeñas, utilizar un **soporte atirantado** basculante, que facilita el mantenimiento en el suelo con mayor comodidad y sin peligro, tanto de la máquina eólica como del propio soporte. El atirantamiento debe realizarse con cuatro vientos, y la unión de los cables al suelo debe hacerse a través de tensores que permitan regular la tensión del cable.

## Sistemas de captación: el rotor

El rotor es el elemento principal de una máquina eólica. Está compuesto por un

determinado número de *palas*, siendo su misión la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica utilizable. Existe gran variedad de rotores y su clasificación más usual se realiza en función de la disposición del eje: rotores de **eje horizontal** y rotores de **eje vertical**, ya en desuso.

Las características generales de un rotor se definen por los siguientes parámetros:

- Velocidad típica.
- Solidez.
- Rendimiento aerodinámico.

La **velocidad típica** o *coeficiente de velocidad*, se define como la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento. Este parámetro adimensional permite clasificar los rotores en lentos (velocidad típica próxima a 1) o rápidos (velocidad típica de 5 a 8).

La **solidez** se define como la relación entre la superficie proyectada por las palas y la superficie descrita por las mismas en su movimiento de rotación. Este parámetro permite comparar diferentes tipos de rotores desde el punto de vista de la eficacia del material utilizado y de la sencillez constructiva. Evidentemente, un multipala tiene una solidez próxima a 1, mientras que un bipala puede llegar a valores de este parámetro de hasta 0,1.

El **rendimiento aerodinámico** o *coeficiente de potencia*, expresa la parte de la energía del viento que se transforma en energía mecánica en el eje del rotor. Como ya se ha indicado, el teorema de Betz expresa que bajo condiciones ideales, el rendimiento aerodinámico de los rotores alcanza un máximo del 59%. En realidad, dicho rendimiento oscila entre el 20 y el 40%, según los tipos de rotores (número de palas) y en función de la velocidad típica de operación.

A su vez, el rendimiento aerodinámico de un rotor depende de las características geométricas de las palas:

- Longitud.
- Perfil.
- Calaje.
- Anchura.

La **longitud** de las palas está en función de la potencia deseada. La

determinación de aquélla fija también la frecuencia de rotación máxima, que la hélice no deberá pasar para evitar tensiones en las palas, debidas a la fuerza centrípeta. Es esencial tener en cuenta la fatiga de las palas y los riesgos de vibraciones, sobre todo para las palas muy largas.

El **perfil** es la forma del borde de ataque de la pala contra el viento, siendo un parámetro de gran importancia en el diseño, ya que de él depende fuertemente el rendimiento del rotor. Se ha comprobado que el perfil de ala de avión proporciona un empuje máximo y una resistencia mínima, por lo que es muy utilizado en la construcción de palas.

Una vez elegido el perfil y la velocidad típica del rotor se determina el calaje o ángulo de ataque de la pala contra el viento, que permite no sólo obtener la potencia óptima, sino que puede utilizarse como sistema de regulación, como se verá más adelante.

La **anchura** de las palas no interviene en la potencia de la máquina eólica, que sólo es función de la superficie barrida. Sin embargo, interviene en el par de arranque. Con palas estrechas y finas se consigue una velocidad de rotación más elevada, pero el par de arranque (facilidad para arrancar) es mayor cuanto más ancha sea la pala. El resultado ha de ser, pues, un compromiso entre estos dos factores.

Ahora bien, contrariamente a lo que se cree frecuentemente, no es la propia aerodinámica en donde está la dificultad de fabricación de un rotor, sino en la construcción y la resistencia de los materiales de la pala. El material utilizado para las palas debe responder a las diferentes exigencias de la máquina eólica que, a menudo, son contrapuestas. En conjunto, el material debe ser: resistente, rígido, ligero y de mínimo coste.

En los últimos años se han ensayado todo tipo de materiales: la *madera*, gran variedad de *aleaciones metálicas* y, en especial, los *polímeros de resinas plásticas*, que han dado muy buen resultado y han reducido los costes de la pala de forma considerable.

## **Sistemas de orientación**

Aunque las máquinas eólicas de eje vertical no necesitan orientación, prácticamente todas las de eje horizontal precisan de un sistema que oriente el rotor,

es decir, que de alguna manera detecte la dirección del viento y sitúe el rotor en su misma dirección. Ello disminuye los esfuerzos y las pérdidas de potencia.

Las máquinas eólicas de eje horizontal están sometidas a fuertes esfuerzos durante los cambios de velocidad y dirección del viento. Por ello, el sistema de orientación deberá cumplir la condición de mantener el rotor cara al viento sin provocar grandes cambios de dirección del rotor cuando se produzcan cambios rápidos de la dirección del viento. Existen varios dispositivos de orientación, elegidos generalmente de acuerdo con la potencia de la instalación eólica.

Para las máquinas de pequeña potencia (< 50 kW), cuyo rotor está situado cara al viento, el dispositivo más adecuado suele ser una **cola**, constituida generalmente por una superficie plana situada en el extremo de un soporte unido al cuerpo del aeromotor. La cola actúa como una veleta, y cualquier alteración de la posición de equilibrio, genera un empuje sobre la misma que tiende a devolver la turbina a su posición original. Es recomendable que la cola se encuentre fuera de la zona de turbulencias creada por el rotor.

Se utiliza también en máquinas de baja potencia el sistema de **rotores auxiliares**, que consiste en disponer dos pequeñas hélices tras el rotor y en dirección perpendicular al mismo. El viento sólo actúa sobre las hélices cuando el rotor no está orientado. La rotación producida por el viento en las hélices auxiliares actúa sobre un mecanismo que mueve toda la turbina hasta que queda de nuevo orientada.

Las máquinas eólicas mayores (diámetros superiores a los 20 m) funcionan generalmente con el rotor a sotavento de la torre, es decir, detrás de la misma. En este caso, se utiliza el **efecto de conicidad**. Las palas se inclinan ligeramente hacia detrás, de forma que en su rotación describan un cono. Cuando el rotor no está orientado, las palas que se encuentran más a favor del viento reciben un mayor empuje aerodinámico, que tiende a variar la orientación del rotor hasta conseguir la posición de equilibrio, donde todas las palas sufren el mismo empuje.

Sin embargo, la disposición del rotor a sotavento genera un problema adicional, conocido como *efecto sombra*: a cada paso de una pala por detrás de la torre, se producirá una variación en la corriente de aire que incide sobre el rotor, lo que crea inevitablemente esfuerzos periódicos, que son los más destructivos.

En las grandes máquinas eólicas, la solución del problema de la orientación del

rotor no es tan sencilla como las expuestas hasta aquí. En estos casos generalmente se dispone de **motores auxiliares**, que funcionan automáticamente mediante servomecanismos (se detecta la dirección del viento mediante una veleta y se compara con la posición del rotor), y que son los que se encargan de orientar el rotor en la dirección adecuada.

## Sistemas de regulación

Los sistemas de regulación tienen por objeto controlar la velocidad de rotación y el par motor en el eje del rotor, evitando las fluctuaciones producidas por la velocidad del viento.

Los sistemas más sencillos operan sólo en la etapa de exceso de potencia, evitando velocidades de rotación demasiado elevadas (vientos fuertes), que podrían poner en peligro la integridad de la máquina (sistemas de frenado). Estos se utilizan solamente en máquinas de pequeña potencia y, en general, en instalaciones en las que son aceptables variaciones en la potencia de salida.

Por otra parte, los sistemas más elaborados, o bien mantienen las fluctuaciones en la velocidad de giro dentro de unos márgenes muy estrechos, o bien permiten al sistema adaptarse a cualquier condición de viento y de potencia.

Los dos grandes grupos de sistemas de regulación vienen definidos por su forma de actuación. En unos, el control se realiza por **actuación sobre el rotor**, aumentando o disminuyendo la potencia absorbida. En los otros, la regulación se lleva a cabo **sobre el eje motor**. Los primeros sólo son posibles en rotores de eje horizontal, mientras que los segundos se pueden adaptar a cualquier tipo de máquina eólica.

El sistema de regulación más sencillo del tipo de **actuación sobre el rotor**, utilizado en máquinas de pequeña potencia, es el de **puesta en bandera**, aunque no es propiamente un sistema de regulación, sino más bien de frenado. Este dispositivo funciona automáticamente, bien mediante una veleta, que hace girar la turbina cuando la velocidad del viento es demasiado elevada, o bien aprovechando la fuerza del empuje aerodinámico sobre una excéntrica. Ambos sistemas actúan contra un resorte, que devuelve la máquina a su posición normal cuando la velocidad del viento disminuye.

Probablemente, la forma de regulación más eficaz y de utilización más extendida

en máquinas de mediana potencia sea la de **paso variable**. Este sistema actúa variando el ángulo de ataque de las palas, con lo que aumenta o disminuye el rendimiento aerodinámico y, en consecuencia, la potencia absorbida.

Dentro de los diferentes tipos de regulación por paso variable, los más sencillos, que actúan sólo en la etapa de exceso de potencia, suelen ir provistos de algún **mecanismo de acción centrífuga** que mueve el ángulo de calaje de las palas cuando la velocidad de rotación es muy elevada, llegando a ponerlas en posición de bandera cuando la velocidad del viento alcanza la de desconexión de la turbina.

Este tipo de regulador es el que se viene utilizando en la mayoría de las máquinas eólicas de baja potencia, con muchas variantes y peculiaridades propias de cada fabricante.

En el caso de las turbinas de gran potencia, la fuerza necesaria para mover las palas es demasiado grande para confiarla a una masa centrífuga. Así, se dispone un **mecanismo que actúa a través del eje de la pala**, variando el calaje. Este sistema se controla desde el interior de la máquina mediante un microprocesador y se impulsa mediante motores eléctricos. Resulta mucho más complejo que los sistemas anteriores y, por supuesto, más costoso, pero permite adaptarse a cualquier condición de viento y de potencia de salida, siguiendo un programa preestablecido. Las variantes de este dispositivo son:

- Variación del calaje de toda la pala.
- Variación del calaje de parte de la pala.
- Variación del calaje por alerones (*flaps*).

Una última posibilidad es la de aprovechar las condiciones aerodinámicas de la propia pala. Diseñando adecuadamente el perfil, con un calaje adecuado (**paso fijo**), puede conseguirse que en unas determinadas condiciones la pala entre en pérdida, variando de esta forma su rendimiento y la potencia absorbida.

Los sistemas de regulación **por acción sobre el eje** se utilizan en las máquinas eólicas de eje vertical y en las de eje horizontal de paso fijo. El control de la potencia se realiza mediante el frenado del eje. El freno puede ser de zapatas, de disco o de tipo electromagnético y actuar mandado por algún mecanismo centrífugo o mediante algún tipo de circuito de control. Este sistema tiene que realizar esfuerzos mayores que los anteriormente citados, pero tiene la ventaja de ser más sencillo y de encontrarse

ya comercializado, hecho que disminuye considerablemente sus costes.

## Sistemas de transmisión

La energía mecánica obtenida en el rotor debe ser transmitida de alguna forma para poder ser aprovechada en una determinada tarea.

Cuando no interesa generar electricidad, la energía mecánica se puede transmitir como tal mediante poleas, engranajes o utilizando un sistema cigüeñal-biela. Existen otros sistemas de transmisión (oleohidráulico e hidráulico), pero su reducida aplicación actual hace que sólo sean citados aquí a título informativo.

Cuando se trata de aerogeneradores es necesario aumentar primeramente la velocidad de giro, ya que generalmente los rotores tienen velocidades de rotación demasiado bajas ( $< 200$  rpm) como para poder accionar directamente un generador de corriente eléctrica. Por tanto, para estas máquinas es imprescindible intercalar un **multiplicador** entre el rotor y el generador.

El más sencillo es el **multiplicador de engranajes**, de uno o varios ejes de ruedas dentadas cilíndricas. En el mercado se encuentran estos dispositivos de diferentes tipos para toda la escala de potencias y con adecuadas relaciones de multiplicación, siendo los **multiplicadores de planetarios**, con ejes de entrada y salida coaxiales, los que proporcionan multiplicaciones más elevadas en espacios más reducidos. Otro sistema muy utilizado es el **multiplicador de acoplamiento cónico**, que permite disponer el eje de salida perpendicular al de entrada.

En definitiva, el sistema de transmisión de la mayoría de los aerogeneradores actuales se ajusta a un mismo esquema general, tanto para los de eje horizontal como vertical. El sistema consta de un eje primario acoplado directamente al de rotación del captador, que a través de un multiplicador transmite la potencia al eje del generador (eje secundario).

Los rendimientos actuales de estos sistemas varían entre el 95 y el 99% y su funcionamiento es bastante silencioso.

## Sistemas de generación

Aunque la energía mecánica que genera una turbina eólica puede utilizarse directamente como tal para el bombeo de agua y, en menor medida, de aire, el sistema

de aprovechamiento de la energía eólica más generalizado en la actualidad y, sin duda alguna, el de mayor interés, es la producción de electricidad, debido a la facilidad en la manipulación y transporte inherente a este tipo de energía, así como la versatilidad de sus aplicaciones posteriores.

El sistema eléctrico de una aeroturbina está condicionado por las características de operación del rotor (velocidad constante o variable) y por el sistema de aprovechamiento de la energía obtenida (conexión directa a la red o almacenamiento). Los generadores que transforman la energía mecánica en eléctrica pueden ser **dinamos** o **alternadores**. Estos últimos pueden ser, a su vez, de inducción (**asíncronos**) o de excitación (**síncronos**). Cada uno de estos sistemas de generación tiene diferentes características, tanto en los requerimientos de entrada como en las particularidades de la corriente de salida.

La **dinamo** es una máquina eléctrica sencilla, que produce corriente continua. Requiere un colector con escobillas que se desgastan con el uso y, por tanto, precisa de mantenimientos periódicos.

En las dinamos el inducido es el rotor; la corriente generada en las bobinas inducidas es alterna, pero la salida se obtiene mediante dos semianillos recorridos en su giro por dos escobillas colectoras, lo que permite que la corriente circule siempre en el mismo sentido (continua). Las bobinas inductoras se encuentran en el estátor y son alimentadas por la corriente generada por la propia máquina.

La tensión generada depende de la velocidad de giro y del número de polos; la intensidad de la corriente está relacionada con la tensión y con la carga. Bien diseñada, una dinamo es capaz de proporcionar potencia a escasas revoluciones, con lo que a veces se puede prescindir de la etapa previa de multiplicación. Normalmente, la corriente eléctrica producida por una dinamo se almacena como tal en un sistema de acumulación de baterías.

Los **alternadores** se diferencian de las dinamos, aparte de producir corriente alterna, en que reciben la corriente de excitación del inductor de una fuente externa, y en que el inductor es el rotor. Para una misma potencia son más ligeros y baratos que las dinamos. Asimismo, no requieren escobillas, y en caso de estar excitadas por imanes permanentes, ni siquiera necesitan anillos rozantes, con lo que no precisan mantenimiento especial. Al trabajar a elevado número de revoluciones, necesitan un

multiplicador, siendo su rendimiento algo superior al de las dinamos.

Según sea la corriente de excitación de los generadores de corriente alterna, éstos pueden clasificarse en dos tipos bien diferenciados, cuyas características operacionales son marcadamente distintas: generadores **síncronos** y generadores **asíncronos**.

Los generadores **síncronos** o de excitación reciben la corriente de excitación en forma de corriente continua, suministrando una corriente con una frecuencia que depende de la velocidad de rotación del captador eólico, por lo que, si se desean frecuencias estabilizadas, es necesario disponer de un sistema de regulación muy preciso. Por su parte, el inducido actúa como regulador de intensidad, por efecto de autoinducción, pero es necesario instalar un regulador de tensión que evite los fuertes incrementos de tensión que se producirían a elevadas velocidades del rotor

La ventaja de los generadores síncronos es que funcionan siempre de forma muy regular y que pueden trabajar tanto en paralelo con la red, como alimentando sistemas eólicos autónomos.

Los generadores **asíncronos** o de inducción reciben la corriente de excitación en forma de corriente alterna, que crea un campo magnético alterno de la misma frecuencia en el inductor.

La frecuencia de la corriente generada depende de la frecuencia de excitación y su intensidad, de la caída de velocidad de giro respecto a la de sincronismo. Estos generadores son, por tanto, muy adecuados para obtener frecuencias estables, lo que representa su mayor ventaja para su conexión a la red.

## **DISEÑO DE INSTALACIONES EÓLICAS**

Una vez estudiadas las diversas partes de que consta un sistema de aprovechamiento de la energía eólica, es necesario pasar revista a los distintos factores que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar y construir una instalación. Se trata, en definitiva, de determinar:

- El emplazamiento.
- El tamaño de la máquina.
- Los costes.

## Selección del emplazamiento: potencial eólico

Antes de pensar en instalar una máquina eólica en un lugar determinado, es necesaria una evaluación del potencial eólico de la zona. A primera vista, como la velocidad del viento es el factor energético predominante, se puede suponer que los emplazamientos más adecuados son aquéllos en los que sopla el viento con velocidades más elevadas. Sin embargo, si se tienen en cuenta las características operacionales de las aeroturbinas, habrá que considerar no sólo el valor medio de las velocidades del viento, sino también su distribución temporal.

Así pues, para obtener un mejor aprovechamiento de la energía del viento, hay que elegir cuidadosamente la velocidad de diseño de la aeroturbina, y buscar un emplazamiento en el que la velocidad del viento tenga un elevado valor medio y sople con regularidad. Se hace necesario, por tanto, disponer de una información meteorológica detallada sobre la estructura y distribución de los vientos. Las mediciones estadísticas deben realizarse durante un período mínimo de tres años, para poder obtener unos valores fiables, que una vez procesados permiten elaborar:

- Mapas eólicos.
- Distribuciones de velocidad.
- Perfil de velocidades.

Los **mapas eólicos** proporcionan una información global sobre el nivel medio de los vientos en una determinada zona geográfica, situando las zonas más idóneas desde el punto de vista energético. En muchos países se han realizado prospecciones eólicas con objeto de conocer las mejores zonas para intentar aprovechar la energía eólica, implicando largos años de medida y estudio que, sin embargo, han fructificado posteriormente en una rápida obtención de datos eólicos en el momento de diseñar un sistema de aprovechamiento determinado; de ahí la importancia de estas investigaciones.

El estudio a escala zonal de un mapa eólico incluye la determinación de la **distribución de velocidades**, que proporciona el número de horas al año en las que el viento tiene una dirección y una velocidad determinadas. Ello se consigue construyendo una *rosa de los vientos*, que muestra los períodos de calmas y aquéllos en los que el viento sopla en una determinada dirección con una cierta velocidad.

A partir de estas medidas se obtienen por procedimientos estadísticos las curvas

de distribución de velocidades. De forma aproximada se pueden ajustar analíticamente unas funciones de distribución que suelen dar buenos resultados. Las más utilizadas en aplicaciones eólicas son la distribución de Weibull y la de Raleigh. Con ayuda de estas curvas y conociendo los márgenes de velocidades del viento entre los que funciona la turbina, se pueden obtener las horas previsibles de actuación de la máquina a lo largo del año.

Por su parte, la finalidad de un estudio puntual es obtener el **perfil de velocidades**, variación de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo. Las fuerzas de rozamiento y el efecto de frenado debido a las irregularidades del terreno son más intensos en las capas que se encuentran en contacto con el terreno, y la distribución de velocidades con la altura sigue una ley de tipo exponencial.

Con la información que proporciona el perfil de velocidades se puede determinar la altura más adecuada para instalar el rotor. Esta altura se obtiene como una solución de compromiso entre el incremento de coste por cada metro adicional de torre y el aumento de ganancia energética que representa.

Todas las mediciones indicadas se hacen con diversos aparatos, más o menos sofisticados, basados principalmente en el funcionamiento del **anemómetro** (medidor de la velocidad del viento), y se procede a su registro y almacenamiento en soporte magnético para facilitar su estudio mediante ordenadores.

En resumen, la elección del emplazamiento de una máquina eólica es un elemento determinante cara a su explotación, y depende de forma casi total del potencial eólico de la zona. Sin embargo, los parámetros definitorios últimos del lugar son sensiblemente diferentes si se trata de una máquina eólica de pequeña potencia (menor de 10 kW) o de mediana o gran potencia (mayor de 100 kW).

Así, para las grandes máquinas, el número de emplazamientos es muy limitado, puesto que el criterio esencial de elección es que el coste de la unidad de energía producida debe ser competitivo con otras fuentes de energía, lo que hace necesario disponer de un gran potencial eólico.

Por otro lado, para pequeñas potencias, el número de emplazamientos disponibles es ilimitado, puesto que el criterio esencial es, en este caso, la proximidad al usuario. No es indispensable una gran cantidad de energía potencial, ya que el usuario no tiene generalmente otra elección.

## Elección y diseño de la máquina eólica

Los problemas técnicos de las máquinas eólicas están fuertemente ligados a la potencia para la que se diseñan. En el caso de las grandes plantas eólicas, el objetivo principal es conseguir unidades tan grandes como sea posible, con el fin de reducir los costes por kW obtenido, de forma que resulten comparativamente rentables frente a los de las plantas generadoras convencionales. Los problemas básicos de estas grandes máquinas son de tipo estructural; los rotores de grandes dimensiones se ven sometidos a esfuerzos elevados, en gran parte debidos a vibraciones, que ponen en peligro su integridad estructural. Se ha de conocer la resistencia de los materiales utilizados y recurrir a técnicas sofisticadas, propias de la industria aeronáutica.

En el caso de las aeroturbinas de baja potencia, el problema es diferente. Su aplicación suele estar dirigida, bien al bombeo de agua o bien a otros usos agrícolas en zonas más o menos aisladas, donde el suministro de energía eléctrica es difícil y costoso. Los precios de dicha energía resultan en estos casos bastante altos, por lo que, debido a la relativa facilidad de construcción de los pequeños aerogeneradores, se podrían obtener costes de la energía de origen eólico comparables a los de la red. Por ello, el objetivo técnico principal en estas máquinas eólicas es la reducción de su mantenimiento al mínimo posible, dada la dificultad de asistencia técnica en zonas rurales. Un cuidadoso diseño y un buen acoplamiento de todos los elementos que componen la máquina es esencial para conseguirlo y prolongar la vida útil del aparato a fin de obtener una buena rentabilidad.

De aquí se deduce que el criterio de selección y diseño de la máquina eólica es su coste, aunque hay que contemplar asimismo su aplicación. Así, si se desea producir energía eléctrica para distribuir a la red, es lógico diseñar una planta eólica mediana o grande, mientras que si se trata de utilizar esta energía de forma aislada, será más adecuada la construcción de una máquina pequeña, o acaso mediana.

El cálculo y diseño de un aerogenerador puede resultar un proceso complicado cuando se trata de máquinas industriales, pero se puede simplificar con métodos aproximados para aplicaciones utilitarias. En estos casos, el primer paso es la evaluación de las necesidades energéticas en función de los aparatos que se pretenda alimentar con el aerogenerador.

Una vez conocida la potencia de consumo y la velocidad media del viento, se

puede pasar a calcular el diámetro del rotor, teniendo en cuenta la variación de la velocidad con la altura de la torre que, en general, se suele construir de 10 a 12 m de altura, y sin olvidar los rendimientos de los distintos componentes del sistema.

Determinado el diámetro del rotor, se procede al diseño de las palas, cuyo número se puede determinar en base a consideraciones constructivas y económicas. Para rotores de baja potencia y aplicaciones utilitarias, tres palas puede ser una solución razonable.

La elección del tipo de perfil tampoco es un problema importante para este tipo de rotores. En general, los perfiles denominados NACA, de la serie 12 ó 44, son de uso corriente.

La decisión sobre la velocidad típica de funcionamiento es más complicada, por lo que generalmente se toma un valor entre 5 y 10. Este dato, junto con las características del perfil, permite la elección del calaje de la pala y, posteriormente, de su anchura.

Una vez diseñado el rotor, se deciden el resto de los componentes del sistema en función de su coste ya que, como se ha indicado anteriormente, la etapa crítica en el diseño de una máquina eólica es el sistema de captación.

## Aspectos económicos

El tamaño de la planta eólica determina el nivel de producción de energía y, por tanto, influye en los costes unitarios de la instalación. Asimismo, dentro de los costes hay que distinguir el coste de la instalación (coste por kW de la planta eólica) y el coste de la energía (coste del kW.h).

En plantas eólicas de **gran potencia**, la evolución del **coste unitario de la instalación** presenta una economía de escala: para bajas potencias, predomina la importancia relativa de los costes fijos (que no dependen de la potencia instalada) y los coste unitarios son elevados. A medida que las potencias son mayores, la aportación de los costes fijos va disminuyendo, y con ella el coste del kW. La tendencia se mantiene hasta alcanzar un valor mínimo, que define el tamaño óptimo del sistema. A partir de ese valor, los costes unitarios vuelven a subir, a causa de las dificultades técnicas que se crean por el excesivo tamaño de los elementos de la máquina. Como es lógico, por otro lado, la evolución de los coste dependerá de la velocidad media a la que se haya optimizado el sistema. Asimismo, el coste global de la instalación

descenderá de forma apreciable en función del número de plantas que se construyan.

Por otra parte, el **coste de la energía** (coste del kW.h) obtenido mediante un sistema eólico de **gran potencia** depende de:

- Coste de la instalación, que debe amortizarse a lo largo de la vida de la planta.
- Coste de mantenimiento.
- Energía producida, que a su vez depende en gran medida de la velocidad media del emplazamiento.

La evaluación del coste de la energía habrá que hacerla, pues, basándose en estudios meteorológicos y sobre una estimación del factor de utilización de la planta (porcentaje de tiempo de funcionamiento en condiciones nominales) y sobre la vida media de funcionamiento. Con los dos primeros datos se determina la producción anual de energía y con el tercero, el coste de amortización anual de la instalación.

Los costes de la energía eólica obtenidos estimativamente, deben lógicamente sufrir un fuerte descenso al aumentar el tamaño de la planta, estabilizándose a potencias del orden de 1 MW.

Finalmente, con respecto a las **pequeñas máquinas eólicas**, el **coste de instalación** no resulta fácil de determinar, dada la variedad de factores que intervienen en su evaluación y, en particular, el volumen de fabricación, que es el que más puede afectar al precio final de la máquina. Desde el punto de vista económico, el elemento crítico de los aerogeneradores de baja potencia es el sistema de almacenamiento, que puede suponer un incremento de hasta el 50% sobre el coste total de la máquina.

Por su parte, el **coste de la energía** con estos **pequeños sistemas** es, sin duda, muy superior al precio de la energía convencional. Sin embargo, la rentabilidad de las pequeñas máquinas puede resultar positiva si se tiene en cuenta su ámbito de aplicación (generalmente abastecido con grupos electrógenos), o donde el coste de la energía suministrada por la red es muy superior al coste en los grandes centros de consumo, una vez añadidos los gastos de instalación de la línea.

Teniendo en cuenta que los costes de electrificación rural son costes sociales y que toda medida que suponga una disminución en el consumo de energías convencionales incide en el interés nacional, el impulso y desarrollo de la industria de pequeñas máquinas eólicas ha constituido un objetivo preferente en los planes eólicos de algunos países en los últimos años.

# APLICACIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA

En su forma primaria, la energía eólica captada por el rotor es de tipo mecánico, aunque pueda ser transformada posteriormente en corriente eléctrica. El hecho de utilizar un tipo u otro de energía dependerá fundamentalmente de las aplicaciones que se le quiera dar a ésta. Bajo este punto de vista, se pueden clasificar las aplicaciones de la energía eólica, según su ámbito, como **aplicaciones centralizadas**, caracterizadas por la producción de energía eléctrica en cantidades relativamente importantes, vertidas directamente a la red de distribución, o **aplicaciones autónomas**, dentro de las que cabe distinguir el uso directo de la energía mecánica o su conversión en calor o electricidad.

## Aplicaciones centralizadas

Cada vez se está generalizando más la producción de energía eléctrica de fuentes eólicas en conexión directa con la red de distribución convencional. Por la variabilidad de la energía eólica, siempre será necesario que la potencia base de la red la proporcione una fuente de energía más estable, estimándose que la potencia eólica instalada en un sistema eléctrico podría ser de hasta el 10% de la potencia total del mismo, sin perjudicar su estabilidad.

Podría pensarse en su utilización como generación continua de energía, pero para ello debería preverse un sistema de almacenamiento de energía eléctrica; este modo de utilización llevaría a unos costes de instalación inadmisibles.

En el marco de las aplicaciones centralizadas cabe destacar dos grandes tipos de instalaciones eólicas:

- **Aerogeneradores de gran potencia:** se están llevando a cabo experiencias piloto en varios países con aerogeneradores en el rango de potencias de los MW, si bien con el objetivo principal de estudiar el comportamiento de los materiales, los rendimientos y los costes.
- **Parques eólicos:** se trata de centrales eólicas formadas por agrupaciones de aerogeneradores de mediana potencia conectados entre sí, que vierten su energía conjuntamente a la red. Hasta hace poco, los aerogeneradores instalados en dichos parques o granjas estaban en el rango de 20 a 100 kW; sin

embargo, ya se instalan unidades en el rango de 100 a 500 kw. La generalización de este tipo de instalaciones permitiría una importante contribución de la energía eólica a la producción de electricidad a gran escala.

En cualquier caso, las redes eléctricas pueden aceptar, sin modificaciones importantes de los criterios de explotación utilizados con las centrales convencionales, un determinado grado de penetración de energía de origen eólico, grado que depende de la composición del sistema eólico, ya que las variaciones de frecuencia provocadas por las variaciones de la potencia eólica no son importantes en las redes interconectadas. No obstante, para reducir los impactos dinámicos sobre la red, será necesario disponer de previsiones de vientos con la suficiente precisión.

## Aplicaciones autónomas

Las aplicaciones de máquinas eólicas de pequeña potencia para usuarios situados en lugares aislados pueden ser rentables en muchos casos, según las condiciones eólicas de los mismos y las características concretas de las diferentes alternativas que se comparen. Las posibilidades que existen en este ámbito se pueden dividir en tres grupos diferentes, según el tipo de energía utilizada:

- Energía mecánica.
- Energía térmica.
- Energía eléctrica.

Sin embargo, es evidente que pueden utilizarse directamente aerogeneradores para posteriormente transformar la electricidad en energía mecánica o térmica.

El uso directo de la **energía mecánica** proporcionada por una máquina eólica tiene su aplicación más inmediata en el bombeo de agua, para lo cual son especialmente adecuadas las turbinas eólicas de baja potencia. La ventaja de esta aplicación es que permite obviar uno de los inconvenientes más importantes de esta fuente de energía, su acumulación, almacenando el mismo producto a utilizar, el agua, a cotas de altura mayores, para poder utilizar posteriormente la energía potencial de la masa de agua almacenada (almacenamiento por bombeo).

El tipo de bomba que se utilice es determinante del comportamiento del circuito de bombeo, y su acoplamiento a las características de la salida de la turbina es fundamental para que la instalación funcione en buenas condiciones. Generalmente

se utilizan **bombas de pistón, bombas de tornillo helicoidal o bombas centrífugas** para estos sistemas, a los que hay que dotar de los mecanismos de transmisión adecuados que permitan operar correctamente las bombas.

La posibilidad de accionamiento mecánico de diverso tipo de maquinaria de instalación fija (muelas, sierras, etc.) es factible, siempre que la tarea a realizar pueda adaptarse sin problemas a una fuente de energía aleatoria como es la del viento. Evidentemente, el empleo del aerogenerador en las tareas citadas puede representar mayor versatilidad, pero el rendimiento de la instalación sería más bajo, al realizarse una doble conversión de la energía (mecánica-eléctrica-mecánica).

La energía mecánica procedente de una máquina eólica se puede transformar directamente en **energía térmica** por dos mecanismos: calentamiento de agua por rozamiento mecánico o compresión del fluido refrigerante de una bomba de calor. En ambos casos, el calor producido se puede enviar, a través de un cambiador de calor, a un sistema de calefacción convencional.

Obsérvese que el primer método citado presenta un rendimiento de prácticamente el 100%, ya que la energía de rotación en un sistema cerrado se transforma casi en su totalidad en calor, debido al rozamiento.

De nuevo es necesario destacar que la generación de calor para el acondicionamiento térmico de entornos cerrados se puede llevar a cabo vía electricidad, lo cual incrementa el grado de aplicabilidad, pero disminuye el rendimiento global del sistema.

La aplicación descentralizada quizá más interesante es la generación de **energía eléctrica** debido, como ya se ha constatado, a la versatilidad de su uso. Sin embargo, la acumulación de la electricidad producida obliga a su almacenamiento en sistemas generalmente costosos y de baja capacidad, por lo que cada vez es más frecuente la interconexión del sistema de generación autónomo con la red de distribución eléctrica.

La energía requerida por el usuario puede ser suministrada por el sistema eólico y por la red eléctrica. La existencia del almacenamiento de electricidad (baterías) es opcional, pero su inclusión exige la de dispositivos rectificadores de corriente alterna para la carga de las baterías, y onduladores de corriente continua (inversores) si toda la demanda del usuario es de corriente alterna.

Cuando no se dispone de dispositivo de almacenamiento, si el aerogenerador

produce energía en exceso, se entrega el sobrante a la red eléctrica, y si se produce menos energía de la requerida se toma de la misma la que falta. Cuando se dispone de almacenamiento, los intercambios de energía con la red sólo se realizan si las baterías han alcanzado el nivel máximo o mínimo. Sin embargo, el mantenimiento de las especificaciones exigidas por las compañías eléctricas para entregar la energía a la red exige un equipamiento excesivamente costoso para que este método de funcionamiento sea de fácil aplicación.

En resumen, las aplicaciones de la energía eólica descentralizadas o autónomas están basadas principalmente en las necesidades de pequeñas comunidades o de tareas agrícolas, pudiendo sintetizarse en los siguientes puntos:

- Bombeo de agua y riego.
- Acondicionamiento y refrigeración de almacenes.
- Refrigeración de productos agrarios.
- Secado de cosechas.
- Calentamiento de agua.
- Acondicionamiento de naves de cría de ganado.
- Alumbrado y usos eléctricos diversos.

Asimismo resulta de interés el empleo de aerogeneradores para dispositivos de ayuda a la navegación, repetidores de radio y televisión y estaciones meteorológicas, instalaciones situadas generalmente en lugares en que es frecuente una localización prominente que ofrece potenciales eólicos aceptables y que suelen distar de la red de distribución eléctrica. Normalmente hay que prever en estos casos un sistema de acumulación por baterías o una fuente alternativa, por ejemplo, un grupo electrógeno, para hacer frente a las posibles calmas.