

CONRADO  
MORENO  
FIGUERO

# Energía eólica

Selección de artículos



editorial   
cubasolar

# **Energía eólica**

**CONRADO  
MORENO  
FIGUEREDO**

# **Energía eólica**

**Selección de artículos**

EDICIÓN

Y DISEÑO: **Alejandro Montecinos Larrosa**

CORRECCIÓN: **Lourdes Tagle Rodríguez**  
y **Jorge Santamarina Guerra**

ILUSTRACIÓN

DE CUBIERTA: **Pablo Picasso**

DISEÑO

DE PERFIL: **Alexis Rodríguez Diezcabezas de Armada**

© **Conrado Moreno Figueredo, 2006**

© **Sobre la presente edición:**

**Editorial CUBASOLAR, 2006**

**ISBN 959-7113-32-5**

**EDITORIAL**

**CUBASOLAR** Calle 20 No. 4113, esq. a 47, Miramar, Playa,  
Ciudad de La Habana, Cuba.

Tel.: (537) 2059949.

e-mail: [editora@cubasolar.cu](mailto:editora@cubasolar.cu)

<http://www.cubasolar.cu>

# Índice

CON TODOS LOS VIENTOS	7
MOLINOS DE VIENTO	9
En Cuba	9
Un poco de historia	10
Molino de viento multipala tradicional	12
Aerobombas de segunda generación	15
Aerobombas de manufactura informal	16
Aerobombas no convencionales	17
Sistema avanzado de bombeo eólico-eléctrico	18
Determinación del número de molinos de viento	19
PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD CON ENERGÍA EÓLICA	21
Breve hisotria de los aerogeneradores	21
Desarrollo de la aerodinámica	23
Desarrollo en el siglo xx	23
Realizaciones más importantes en oden cronológico	28
PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD	30
CON PEQUEÑOS AEROGENERADORES	
Desarrollo de los pequeños aerogeneradores	31
Desarrollo tecnológico	33
Costos	35

Sistemas híbridos	39
Diferencias entre aerogeneradores	39
Tecnología de los pequeños aerogeneradores	40
Experiencia cubana	42

## Con todos los vientos

Puede buscar el hispanoamericano en cualquier rincón de la memoria y siempre descubrirá el regocijo de haber oído hablar de la batalla de un caballero contra unos gigantes como de la más memorable historia sobre los molinos de viento.

Con la adarga firme y la lanza en ristre nos llegó el ingenioso hidalgo *Don Quijote de la Mancha*, quizá –según razonamiento de Sancho Panza– con algún que otro molino de viento en la cabeza.

¿Son éstos los molinos de viento más famosos? Eso no importa tanto: vale más ir, con todos los vientos, a gozar la obra grande de Don Miguel de Cervantes y Saavedra, de quien José Martí dijo ser el «temprano amigo del hombre que vivió en tiempos aciagos para la libertad y el decoro, y con la dulce tristeza del genio prefirió la vida entre los humildes al adelanto cortesano, y es a la vez deleite de las letras y uno de los caracteres más bellos de la historia».

Desde mucho antes de los tiempos del Quijote y Sancho –y mucho después de quienes cuenten nuestra historia–, el viento acompaña al hombre en su peregrinar hacia la felicidad, ya sea para mover los velámenes de

sus barcos, triturar los granos del sustento familiar, generar electricidad, o empinar un papalote junto a los años de la infancia.

Impulsadas por el viento llegaron a las costas cubanas las tres carabelas colombinas. Más tarde, en las sabanas y serranías emergieron los molinos de viento para el bombeo de agua. Y en las postrimerías del siglo xx, Cuba inaugura su primer Parque Eólico Demostrativo en Turiguanó, en Ciego de Ávila, el 16 de abril de 1999. El país, en su nueva estrategia energética, prevé la utilización creciente de la energía eólica, para incorporarla como uno de los soportes tecnológicos de la cultura solar que nos liberará del actual holocausto silencioso que provoca la combustión de los combustibles fósiles.

A Conrado Moreno le agradecemos su sabiduría y pasión por la energía eólica –denominada así en honor del dios griego Eolo–, y por los textos que ya nos adelantó en algunos números de la revista *Energía y tú*.

ALEJANDRO MONTECINOS LARROSA  
*Director de la Editorial CUBASOLAR*



## Molinos de viento

*La más tradicional  
de las fuentes renovables de energía  
en Cuba.*

*La ventura va guiando nuestras cosas mejor de lo que acertáramos á desear; porque ves allí, amigo Sancho Panza, donde se descubren treinta ó pocos mas desaforados gigantes con quien pienso hacer batalla y quitarles á todos las vidas (...). –Mire vuestra merced, respondió Sancho, que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas que, volteadas del viento, hacen andar la piedra del molino.*

He aquí un fragmento de la memorable historia sobre los «gigantes» que embistió el ingenioso hidalgo don Quijote de la Mancha, quizás los molinos de viento más famosos del mundo.

### EN CUBA

¿Cuándo se instaló el primer molino de viento para el bombeo de agua en Cuba? Esta es una pregunta digna de ser investigada por algún historiador curioso. Todos los interesados expresan que es tradicional el uso de los molinos de viento en Cuba, pero nadie sabe con exactitud cuándo comenzaron a utilizarse. Lo que sí se conoce es que hay molinos instalados desde hace

más de cien años de trabajo, según la tradición oral y la aseveración de sus propietarios.

El molino de viento que hoy conocemos se desarrolló en los últimos cincuenta años del siglo xix en Norteamérica. Con el conocimiento de la historia de Cuba decimonónica y sabiendo la ya fuerte influencia de la economía norteamericana desde finales de ese siglo y principios del siglo xx, no es difícil asegurar que en el entorno de esa época debió instalarse el primer molino de viento.

¿Qué pasó ya en pleno siglo xx? Se difundió esta máquina principalmente en las zonas ganaderas, desde Camagüey hacia el oriente. Las llanuras camagüeyanas, sus posibilidades de buena exposición al viento y su suave brisa hicieron que fueran un éxito en esta región. De aquí que también en Camagüey se fabricaran los primeros molinos de viento cubanos, tradición que se mantuvo hasta finales de los años ochenta.

A principios de los años noventa estos molinos se fabricaban, en menor escala, en Bayamo, Ciego de Ávila y en otros talleres y fábricas de la Isla. Hoy continúan fabricándose en las provincias de Granma y Pinar del Río.

¿Cuántos molinos de viento hay instalados en la actualidad en Cuba? Se estiman en más de seis mil, según investigaciones de la Dirección de Ganadería del Ministerio de la Agricultura. Si a esos les sumamos otros cientos de los campesinos particulares, llegamos a siete mil; aunque no todos funcionan, fundamentalmente por falta de mantenimiento, reparación y piezas de repuesto.

### **UN POCO DE HISTORIA**

Las turbinas eólicas se han utilizado desde hace muchos siglos para el bombeo de agua, la tritura-

ción de granos, cortar madera, etc. La primera referencia de un molino de viento aparece en los escritos del historiador árabe Tabari, en el año 850 d.n.e., sobre la existencia de estas máquinas en la provincia de Seistán, en Persia, en el 644 d.n.e.

Durante las cruzadas (1096-1191), la existencia de los molinos de viento se conoció en Europa, más tarde comenzó la expansión y los primeros se reportan en Holanda (1240), Alemania (1222), Grecia (1239), Dinamarca (1259), Finlandia (1463) y Rusia (1622). En América aparecen en Brasil (1576), Estados Unidos (1621) y Barbados (1651). En África, al final del siglo xvii, en Sudáfrica.

El desarrollo de los molinos de viento cambió de Europa a Estados Unidos durante el siglo xix, motivado por el movimiento de los colonos hacia las grandes llanuras durante los años cincuenta, cuando el mayor problema era el aprovisionamiento de agua para las dotaciones de ganado. Con el desarrollo del ferrocarril, la necesidad de agua para alimentar las locomotoras impulsó aún más el progreso de esta tecnología.

A finales de la década de los ochenta tuvo lugar la mayor producción de molinos de viento en Estados Unidos. El primer éxito comercial lo alcanzó el *American Farm Windpump*, inventado en 1854 por un mecánico de New England llamado Daniel Halladay, que tenía un rotor en forma de flor muy parecido al que conocemos hoy.

Los primeros molinos de viento fueron hechos de madera y el uso del hierro y el acero comenzó en el 1870, pero se necesitaron dos décadas para que fuera producido un gran número de molinos de acero.

A principios del siglo xx la mayor parte de los molinos se fabricaba de acero, posteriormente le introdujeron los

cojinetes en el eje principal, la autolubricación y el mecanismo reciprocante, que fue encerrado en un recipiente de hierro fundido que contenía aceite.

El pico de producción de molinos de viento en Estados Unidos tuvo lugar desde finales del siglo XIX hasta la Primera Guerra Mundial. Al finalizar el siglo XIX sólo la compañía *Aermotor* produjo más de ochocientos mil molinos de viento.

La tecnología del molino americano se difundió en el mundo durante la última década del siglo XIX y se producían, bajo licencia o con diseños similares, en Australia, Argentina, África del Sur, Inglaterra, Francia, Italia, Alemania y Suecia. Esta situación favorable se mantuvo hasta la década de los años veinte. En la década posterior, la gran depresión económica, los motores de combustión interna y la electrificación después de 1945 afectaron fuertemente a la industria de los molinos de viento. Durante los años cincuenta y sesenta sólo unos pocos fabricantes permanecían activos.

Sin embargo, la crisis del petróleo en 1973 provocó un interés renovado en las fuentes renovables de energía, en particular en la energía eólica, y las inversiones en la fabricación de molinos se tornaron nuevamente atractivas. A partir de este momento en que tuvo lugar el renacimiento de las aerobombas, apareció un gran número de interesantes innovaciones. Sin embargo, los sistemas de bombeo eólico pueden ser divididos en cinco categorías en dependencia de su diseño y construcción.

### **MOLINO DE VIENTO MULTIPALA TRADICIONAL**

Este es el más común de los molinos de viento, su desarrollo tuvo lugar entre 1850 y 1930 y es

conocido comúnmente como el *molino de viento americano* (*American Farm Windpump*).

Este tipo de máquina aprovecha la potencia del viento con un rotor compuesto por un rango de doce a veinticuatro palas o más, que mueve una bomba de pistón mediante una barra vertical. El acoplamiento entre el rotor y la barra se realiza por un mecanismo de biela y manivela con reducción por medio de engranes. La utilización de la caja reductora hace más versátil la máquina y la adecua para trabajar con agua a grandes profundidades. Por otro lado, la baja velocidad de trabajo hace la máquina más fiable debido al menor desgaste por fricción de los elementos de la bomba y disminuyen las roturas por fatigas. Los engranajes giran en un baño de aceite lubricante que debe ser comprobado periódicamente. En conclusión, estas máquinas requieren un mantenimiento mínimo.

El diámetro del rotor de estos molinos oscila entre 2 y 5 m, pudiendo llegar excepcionalmente hasta 10 m. Estas máquinas pueden ser instaladas en sitios con bajas velocidades del viento, entre 2 y 5 m/s.

A pesar de las bondades de estos molinos, poseen una serie de problemas, como son:

- La construcción es muy pesada debido a las necesidades del alto par de arranque (torque) requerido por la bomba, y en otros casos por el uso de una tecnología de fabricación obsoleta, lo que influye en los altos costes, tanto de la propia máquina como en el transporte e instalación.
- El molino de viento debe ser ubicado sobre el pozo o cercano a él; es decir, no tiene flexibilidad para instalar separadamente el rotor y la bomba. Esto ocasiona

serios problemas en el caso de terrenos que no son llanos.

- Tiene poca resistencia al polvo y la arena que penetran en el mecanismo de transmisión. Y el agua salobre puede reducir considerablemente la vida útil de los sellos de la bomba (de 6 a 12 meses).
- La tecnología no es fácil de reproducir en países con bajo desarrollo industrial.
- La eficiencia general es muy baja, principalmente debido al pobre diseño del rotor, al incorrecto acoplamiento entre el par entregado por el rotor y necesitado por la bomba, y el comportamiento del par de la bomba de simple efecto, caracterizado por una alta razón entre el par máximo y el par promedio (pulsación del par). La eficiencia global promedio, definida como la razón entre la energía hidráulica neta producida y la energía disponible en el viento, se encuentra normalmente entre 2 y 5 %.

Los principales esfuerzos para aumentar la eficiencia están dirigidos a reducir los efectos de las pulsaciones del par, por medio de bombas de doble efecto (bajas cargas) y por el balanceo del peso de la barra mediante contrapesos y muelles.

Un esfuerzo muy importante se realiza con la introducción de un mecanismo reciprocante variable para incrementar el par entregado a la bomba a medida que aumenta la velocidad de rotación. Igualmente se trabaja en el mejoramiento de la aerodinámica de las palas. Un aumento de 30 a 100 % puede esperarse en el volumen de agua bombeada con la aplicación de estos mecanismos.

Otras mejoras pueden incrementar la fiabilidad de estas máquinas, como son el uso de cámaras de aire

que reducen las ondas de choque en la carrera hacia arriba, y la utilización de sistemas de transmisión sellados y elementos de la bomba reemplazables que incrementan, en gran medida, la vida útil de la bomba.

En algunos casos la bomba que se acopla al molino es también de activación manual, con el fin de garantizar el suministro de agua en períodos de calma del viento.

Actualmente, los principales productores de estas máquinas en el mundo son Australia, África del Sur, Estados Unidos y Argentina. Este tipo de molino se conoce también en la literatura técnica como *aerobombas de primera generación*.

### **AEROBOMBAS DE SEGUNDA GENERACIÓN**

En un intento por superar las limitaciones que aún persisten en el molino tradicional para su aplicación extensiva en los países en desarrollo, ha surgido otro grupo de aerobombas con diferentes características, a las que se les ha denominado *aerobombas de segunda generación*.

La mayor parte de estas máquinas fue desarrollada después del año 1975 por varios fabricantes y organizaciones, como *IT Power* en Inglaterra, *Gaviotas* en Colombia, *CWD* en Holanda, *Vita* en Estados Unidos, *CAAMS* en China, entre otros.

Los objetivos del diseño de estas nuevas aerobombas son, esencialmente, más bajo coste inicial, menor peso de la estructura, mayor eficiencia, y manufactura, producción y mantenimiento locales.

Estas modernas aerobombas de bajo peso trabajan también con bombas de pistón y se caracterizan por el uso de materiales estándar, disponibles en el mercado

(rodamientos, tuberías, angulares, etc.), la ausencia de elementos de fundición y de cajas reductoras.

Otro parámetro fundamental para disminuir el peso y el coste es la reducción del par de arranque de la bomba, lo que permite la utilización de pocos álabes (de 3 a 8 álabes para bajas cargas), por medio de un pequeño orificio en el pistón; de esta forma el par de arranque es casi nulo y la velocidad del rotor aumenta. El efecto de fuga de líquido por el orificio es despreciable.

La eliminación de la caja reductora hace que la bomba trabaje con mayor velocidad, lo que aumenta las cargas sobre la bomba y disminuye la vida útil si la máquina no ha sido diseñada adecuadamente. La vida útil estimada de estas máquinas es de sólo diez años, lo que contrasta apreciablemente con el molino tradicional, que en muchos casos alcanza más de cincuenta años.

Una de las desventajas fundamentales de este tipo de máquinas es que sólo son capaces de trabajar a bajas cargas, como consecuencia de las transformaciones del rotor y la transmisión.

### **AEROBOMBAS DE MANUFACTURA INFORMAL**

Este tipo de aerobomba se caracteriza por su simplicidad, y por su fabricación y explotación con materiales disponibles localmente.

Los diseños pueden ser originales o modelos simplificados según los existentes, para adaptarlos a las disponibilidades locales.

Los materiales de construcción son de gran variedad. Pueden emplearse, por ejemplo, madera u otros materiales que se trabajan de forma artesanal con un mínimo de facilidades. La mayor parte de estas aerobombas no



usan caja reductora de velocidad, sino simplemente un cigüeñal rudimentario o un sistema de leva.

No obstante, la fiabilidad y el comportamiento resultan pobres en la mayor parte de los casos. Las ventajas son los bajos costes y el fácil mantenimiento por el propio usuario.

La aplicación de estas máquinas está restringida para bajas cargas. Un ejemplo de estas aerobombas es la fabricada en Nicaragua basada en una de segunda generación, *CWD*, y acoplada a una bomba de sogas que puede bombear agua desde 40 m de profundidad.

### **AEROBOMBAS NO CONVENCIONALES**

Bajo esta denominación se agrupan las aerobombas cuyo diseño y formas exteriores difieren de los tipos antes mencionados. Sus inventores, buscando máquinas más eficientes y simples a la vez, utilizan tecnologías de última generación, resultantes de investigaciones científicas en el campo de la aerodinámica, los nuevos materiales, la hidráulica, la mecánica, etc., que aportan como resultado máquinas atípicas.

En este grupo se encuentran también las aerobombas que retoman patentes que fueron desechadas en su momento y que pueden, con los adelantos de la ciencia, reutilizarse y mejorarse.

Ejemplo de las primeras son las aerobombas tipo *Delta*, varias de ellas instaladas y en operación en el Centro Integrado de Tecnología Apropriada (CITA), de Camagüey. Esta es una máquina con aletas en forma de delta, muy diferentes a las aspas que mueven los molinos tradicionales, porque son más cortas, se distribuye un número mayor y se ubican en el perímetro del rotor.

Los resultados alcanzados indican mayor entrega de agua en las mismas condiciones que otras aerobombas similares.

Al segundo grupo pertenecen los conocidos molinos tipo *Savonius*, máquina patentada a principios del siglo XIX y retomada en los comienzos de la crisis petrolera de los años setenta, que por su alto torque de arranque permite extraer agua de mayores profundidades. Son, además, muy simples y fáciles de fabricar. Han sido retomadas y desarrolladas en centros de investigación de varios países, distinguiéndose entre ellos Canadá.

### **SISTEMA AVANZADO DE BOMBEO EÓLICO-ELÉCTRICO**

En los países desarrollados hay un gran número de productores de aerogeneradores que recomiendan el uso de sus equipos acoplados a electrobombas para el trasiego de líquidos, los denominados *sistemas avanzados de bombeo eólico-eléctrico*.

Estos se componen de un aerogenerador que produce potencia eléctrica y alimenta al motor eléctrico, el cual mueve una bomba con baterías o sin ellas, y otros equipos de conversión de potencia.

Las principales ventajas con respecto a los sistemas mencionados anteriormente son:

- Mayor flexibilidad en cuanto a la ubicación; o sea, se puede ubicar el aerogenerador en el lugar de más fuerte viento, aún cuando éste no coincida con el lugar del pozo.
- Mayor eficiencia de bombeo (de 10 a 12 %).
- Incremento del volumen de agua bombeada y mayores cargas (de 10 a 40 m), debido a la posibilidad de usar rotores de mayor diámetro.

- Mayor versatilidad en su uso (bombeo, iluminación).
- Menor requerimiento de mantenimiento.
- Mayor fiabilidad.

Las desventajas principales son:

- Mayor coste de la inversión inicial.
- Para la instalación y el mantenimiento se necesita personal especializado.
- Necesita mayores velocidades del viento para operar ( $v > 4 \text{ m/s}$ ).

La clasificación expuesta intenta sistematizar la amplia gama de molinos de viento que se producen en la actualidad. Y se puede concluir que los sistemas avanzados de bombeo eólico-eléctrico son más adecuados para regímenes de viento entre medios y altos, y uso de gran potencia; mientras que los sistemas mecánicos resultan más convenientes para regímenes de viento entre bajos y medio, y aplicaciones de baja potencia.

### **DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MOLINOS DE VIENTO**

Si conocemos las estadísticas del viento, las capacidades de bombeo de los molinos, las profundidades del manto freático y los volúmenes de agua que se deben satisfacer, se puede determinar el tipo de molino que debemos emplear para cada sitio o región con características diferentes.

El mejor aprovechamiento de la potencia obtenida se logra al evitar pérdidas innecesarias de agua y con una interrelación eficiente entre los diferentes componentes del sistema: la fuente de agua, la velocidad y la estabilidad de los vientos, el molino, el cilindro o bomba, las tuberías de succión y conducción, y el almacenamiento del agua.

Para determinar el número de molinos de viento que deben instalarse para satisfacer una demanda, se divide la *necesidad de bombeo horaria requerida* por la *capacidad de bombeo horaria* del molino específico. Esta ecuación se comprende fácilmente mediante el siguiente ejemplo:

Partimos de la existencia de una vaquería de cien vacas lecheras. Como cada animal debe consumir como promedio 140 L de agua diarios, entonces se necesitan 14 000 L de agua cada día. Si consideramos que podemos disponer de sólo 5 h de aire favorable diariamente, dividimos los 14 000 L por 5 y nos dará la necesidad de bombeo horaria requerida, que es igual a 2 800 L/h.

Si optamos por instalar el molino MV-2/9, que con una velocidad del viento de 8 m/s tiene una capacidad de bombeo horaria de 600 L/h, entonces la división de 2 800 po 600 nos da un resultado de 4,7. Esto significa que deben instalarse 5 molinos de este tipo para satisfacer la demanda de agua.

*(Publicado en Energía y tú,  
No. 18, abril-junio de 2002)*

# **Producción de electricidad con energía eólica**

*En el inicio del tercer milenio  
la energía eólica presenta sus credenciales  
como alternativa competitiva  
en la generación de energía eléctrica.*

La historia de la producción de energía eléctrica con aerogeneradores tiene fechas importantes en la evolución de la tecnología eólica y el uso de las turbinas eólicas, y siempre resulta útil destacar los aspectos y momentos más importantes que han propiciado el nivel de desarrollo actual de esta tecnología.

## **BREVE HISTORIA DE LOS AEROMOTORES**

Ya en el siglo V a.C. aparecen las primeras máquinas eólicas en Asia, que eran de eje vertical. En algunas islas griegas aún se pueden contemplar y se les conoce como *panémonas*. Por la misma época se usaban molinos de eje horizontal en Egipto y aunque eran distintos desde el punto de vista tecnológico, tenían el mismo principio: transformar la energía eólica en energía para el bombeo de agua, moler los granos, etcétera.

En Europa aparecen las primeras máquinas eólicas en el siglo VII d.C., cuya tecnología evolucionará hasta nuestros días. Estas máquinas europeas dan lugar a los clásicos molinos holandeses, muy sofisticados mecánicamente, y en los Estados Unidos a los molinos de viento para el bombeo de agua, que se desarrollaron rápida-

mente después de la invención de la rueda multipala por los propios norteamericanos en 1870. El molino de eje horizontal con rotor multipala, diseñado por Daniel Halladay en 1854, fue el primero de una nueva generación de máquinas eólicas. Este molino se usó para bombear agua en zonas aisladas y desempeñó un papel fundamental en la colonización del Oeste americano. Por su lento movimiento, estas máquinas estaban apartadas de la idea de generar electricidad, pues para esto se necesitaban máquinas más rápidas. En los países europeos, que tradicionalmente habían considerado el viento como una importante fuente de energía, estos molinos americanos no ofrecían interés, lo que conllevó a que los lentos molinos se trataran de reconvertir de forma tal que produjeran electricidad.

Los intentos de producir electricidad con energía eólica surgen en 1802. Fue Lord Kelvin quien tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina eólica. No obstante, tuvo que esperarse hasta 1850, cuando se inventó la dinamo, para que llegara el momento de lo que hoy conocemos como aerogenerador.

En 1890, el Gobierno danés inició un programa de desarrollo eólico dirigido a la producción de electricidad, y se responsabilizó al profesor La Cour con la dirección de los trabajos. La máquina de Poul La Cour (el Edison danés), puesta en marcha en 1892, fue la primera concebida, diseñada y construida para generar electricidad. Los trabajos de La Cour constituyen los primeros pasos de los aerogeneradores modernos, pero la teoría aerodinámica estaba todavía insuficientemente desarrollada y sus máquinas eólicas, a pesar de ser las más avanzadas de la época, seguían siendo rotores clásicos de bajo rendimiento.

### **DESARROLLO DE LA AERODINÁMICA**

Desde finales del siglo **xix** y principios del siglo **xx**, los estudios sobre aerodinámica se desarrollaron de manera visible. Joukowski, Drzewieky y Sabinin en Rusia, Prandt y Betz en Alemania, y Constantin y Eiffel en Francia, determinaron los criterios de diseño que debían aplicarse en los perfiles aerodinámicos para la fabricación de alas y las hélices de los aviones. Sólo después de las primeras décadas del siglo **xx** se tuvieron conocimientos suficientes para aplicarlos a los rotores eólicos. Los criterios de diseño de estos investigadores se ajustaron a las nuevas generaciones de turbinas eólicas. Prandt y Betz demostraron analíticamente que el rendimiento máximo de los rotores eólicos no podía sobrepasar 59,3 % (límite de Betz). En los momentos actuales, los rotores más modernos no rebasan 45 %, lo cual certifica la validez de aquellos estudios. Se demuestra, además, que los nuevos rotores, con diseño aerodinámico, debían girar a altas velocidades para alcanzar altos rendimientos.

El primer aerogenerador que se construyó provisto de palas con sección aerodinámica fue concebido por el holandés A. J. Dekker. Este aerogenerador fue capaz de alcanzar velocidades de punta de pala cuatro o cinco veces superiores a la del viento incidente. En los molinos multipalas norteamericanos se habían conseguido velocidades máximas de punta de pala de dos veces la velocidad del viento. En los molinos clásicos era menor que la velocidad del viento incidente.

### **DESARROLLO EN EL SIGLO XX**

Durante la primera mitad del siglo **xx** se realizaron numerosos aportes al desarrollo de la tecnología

eólica, impulsados esencialmente por los conocimientos adquiridos en el campo de la aerodinámica, pero su principal aplicación durante estos años, y hasta principios de los años setenta, se limitó a los sistemas multipalas de bombeo mecánico de agua, debido en gran parte a la dificultad propia del recurso eólico, como lo es la variabilidad del viento, lo poco predecible y su baja densidad energética. En cuanto a la tecnología, las limitaciones estaban en la dificultad para la optimización de las máquinas eólicas. Por otro lado, el bajo costo relativo de las centrales termoeléctricas e hidroeléctricas hacía no competitiva la utilización de las plantas eólicas. Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, se imponían cada vez más como la principal e insustituible fuente de energía. Solamente en determinados períodos de crisis energética, el desarrollo de los recursos renovables, y en particular la energía eólica, alcanzó cierto impulso.

Después de la Primera Guerra Mundial apareció el primer tiempo de bonanza para la energía eólica. Los trabajos se dirigieron a los pequeños aerogeneradores para áreas rurales y, por otro lado, al diseño y construcción de grandes sistemas eólicos para producir electricidad a gran escala. En este período entre guerras fueron numerosos los trabajos realizados en Europa y los Estados Unidos.

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, y como resultado de la escasez de combustibles fósiles, los gobiernos europeos se interesaron de nuevo en el aprovechamiento de las energías renovables. En este período se desarrollaron metodologías de mediciones en varios países, así como para seleccionar los sitios idóneos para los emplazamientos. Este período se prolongó hasta mediados de los años sesenta, cuando la economía mundial



se restableció. Ya la electrificación era lo suficientemente extendida para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, y las plantas eólicas no resultaban competitivas con las plantas convencionales.

En 1973, y como resultado de la crisis petrolera ocurrida a raíz del conflicto árabe-israelí, se inicia otra etapa en el campo del aprovechamiento eólico como fuente de energía, compartiendo el protagonismo con la energía solar fotovoltaica, como recursos renovables y no contaminantes. Ya en los años ochenta la energía eólica recibe un impulso decisivo cuando los aspectos medioambientales se convirtieron en problemas de primer orden.

Como consecuencia de la ya mencionada crisis energética de 1973, aparecieron los primeros programas de investigación en torno a la energía eólica, tanto nacionales como supranacionales, que trajeron como resultado los prototipos de aerogeneradores antes mencionados.

Ya a finales de la década de los años setenta aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, los que se denominaron de nueva generación. De estas primeras máquinas, a los aerogeneradores que se están instalando actualmente, se ha alcanzado un notable desarrollo, lo que permite afirmar que la tecnología de los aerogeneradores, medianos y grandes, que se conectan a la red, es una tecnología madura.

Analizando las máquinas instaladas recientemente se concluye que la tecnología más usada en las plantas eólicas actuales son aerogeneradores de 40-60 m de diámetro de rotor, que equivale a una potencia unitaria de 500 a 1 500 kW y más.

El aerogenerador tipo más instalado es uno tripala con viento de frente (barlovento), con torre tubular, regulación

por pérdida y/o cambio de paso y sistema de orientación activa. Se denomina sistema de orientación al que ubica el rotor de frente al viento. Cuando se usa la veleta como sistema de orientación, se le denomina sistema pasivo.

La optimización de los componentes y el paso a su producción en serie ha permitido disminuir los costos de los aerogeneradores, que por término medio se sitúan actualmente entre 800 y 1 000 USD por kW. Los costos de explotación y mantenimiento igualmente han disminuido, por lo que el costo medio del kilowatt-hora producido se sitúa en el rango de 4-8 centavos, para zonas de aceptable potencial eólico.

Tabla 1. Evolución de los aerogeneradores (1982-2002)

CARACTERÍSTICAS	1982	2002
Diámetro del rotor (m)	15	52
Área barrida (m <sup>2</sup> )	177	2 124
Altura de la torre (m)	20	50
Potencia nominal (kW)	55	850
Producción anual (kWh)	110 000	2 550 000
Peso total (T)	12	80
Costo estimado (\$)	66 600	850 000
Producción/área barrida (kWh/m <sup>2</sup> )	621	1 200
Peso palas/área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	1,6	0,85
Peso góndola/área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	31	17
Peso total/área barrida (kg/m <sup>2</sup> )	67	37,6
Costo potencia instalada (\$/kW)	1 212	1 000

En la tabla 1 se presenta una comparación entre la tecnología utilizada en los sistemas conectados a las redes centralizadas de distribución en las últimas dos décadas. Para la comparación se utilizaron aerogeneradores tipo de las dos épocas comparadas, entre los años ochenta al 2002. Del estudio de esta tabla se llega a las conclusiones siguientes:

- Incremento del tamaño unitario de los aerogeneradores, pasando de aerogeneradores de 55 kW de potencia nominal y 15 m de diámetro, a los actuales aerogeneradores de 850-1 500 kW y más, y 40-60 m de diámetro.
- La producción se ha duplicado, de una producción específica de 600 kWh/año/m<sup>2</sup> de área de rotor se pasa a valores por encima de 1 200 kWh/año/m<sup>2</sup>.
- Importante disminución en el peso específico de los aerogeneradores, pasando de 68 kg/m<sup>2</sup> a los valores actuales de 38 kg/m<sup>2</sup>.
- El peso de las palas ha disminuido casi 50 %: de 1,6 a 0,85 kg/m<sup>2</sup>.

Estas mejoras han sido posibles debido a los nuevos diseños optimizados, junto con la utilización de materiales avanzados en su fabricación, esencialmente los denominados materiales compuestos.

A pesar de este rápido desarrollo de los medianos y grandes aerogeneradores conectados a la red que está teniendo lugar, los sistemas eólicos usados para suministrar energía a lugares aislados de la red han experimentado un desarrollo mucho más lento. Esos sistemas presentan una problemática claramente diferenciada con respecto a los sistemas conectados a la red.

### **REALIZACIONES MÁS IMPORTANTES EN ORDEN CRONOLÓGICO**

1892. Dinamarca. Profesor La Cour. Rotor de cuatro palas, 22,8 m de diámetro, 200 kW, con viento de 15 m/s. Parado en 1966.
1931. Rusia (Crimea, Balaklava). Rotor de tres palas, de 30 m de diámetro, 100 kW, con viento de 11 m/s. Parado en 1943.
1940. Gran Bretaña (Les Orcades). E. Golding y A. Stoddard. Rotor de tres palas, 12,5 m de diámetro, 100 kW. Funcionamiento defectuoso, desmontado.
1941. Estados Unidos (Grandpa's Knob, Vermont). P. C. Putnam. Fue la primera máquina con potencia superior a 1 000 kW. Rotor bipala, 53 m de diámetro, 1 250 kW a 15,3 m/s.
1950. Gran Bretaña (St. Albans). Enfield y Andreu. Rotor bipala con palas huecas, 24 m de diámetro y turbina alojada en el interior de la torre de soporte. Ayudado por la aspiración de aire desde la base de la torre, creada por la expulsión de aire por las puntas de las palas, 100 kW a 13,5 m/s. Rendimiento muy débil con relación a las máquinas clásicas. Desmontado.
1958. Francia. Experiencias de la Compañía de Electricidad de Francia (E.D.F.):
1. Saint-Remy-des-Landes-Neyrpic. Rotor de tres palas, 21,2 m de diámetro, 132 kW a 12,5 m/s. Desmontado en 1966.
  2. Saint-Remy-des-Landes-Neyrpic. Rotor de tres palas, de 35 m de diámetro, 1 000 kW a 17 m/s. Desmontado en 1966.
  3. Nogent-le-Rois. Rotor de tres palas, 30 m de diámetro, 800 kW a 17 m/s. Alto rendimiento para el momento: 70 % del límite de Betz (59,3 %).

1959. República Federal Alemana. Profesor U. Huter. Rotor bipala, 34 m de diámetro, 100 kW a 8 m/s.
1975. Estados Unidos. NASA-Erda. Rotor bipala, 37,5 m de diámetro, 100 kW a 8 m/s.
1977. Dinamarca. Aerogenerador Gedser. Rotor de tres palas, 24 m de diámetro, 200 kW. Funcionó durante ocho años.
1978. Estados Unidos. NASA-Erda. Cinco unidades instaladas en diversos lugares de Estados Unidos. Rotor bipala, 38 m de diámetro, 200 kW, con viento entre 8,3 y 17,5 m/s. Parado en ese año por rotura en la base de la pala.
1978. Dinamarca. Escuela de Tvind, Ultbor. Rotor de tres palas, 54 m de diámetro, 2 MW con viento de 15 m/s, velocidad variable. Se emplea principalmente para calefacción.
1979. Francia. Aerowatt, financiado por E.D.F. Rotor bipala, 18 m de diámetro, 100 kW a 15 m/s. Conectado a la red autónoma de la isla de Ouessant.
1979. Dinamarca. NIBE A y B. Rotor tripala, 40 m de diámetro, 630 kW a 13 m/s.
1979. Estados Unidos. MOD-1 General Electric, 61 m de diámetro, 2 MW a 11,4 m/s. Instalado en Boone, Carolina del Norte.

*(Publicado en Energía y tú,  
No. 32, octubre-diciembre de 2005)*

## **Producción de electricidad con pequeños aerogeneradores**

*En la nueva estrategia energética cubana también se prevé la generación de electricidad con pequeños sistemas eólicos aislados.*

El corazón de un pequeño sistema eólico aislado para la producción de electricidad es la turbina eólica, que se encuentra en la parte superior del sistema y se apropia de la energía del viento a través del rotor. Estos sistemas están provistos, además, de un sistema de control y un banco de baterías para acumular la energía.

Cuando se habla de energía eólica y nos referimos a su magnitud hay que mencionar el diámetro del rotor. Actualmente, el rango de las turbinas eólicas se extiende desde las minúsculas, de 500 mm de diámetro (20 W), hasta las gigantescas máquinas cuyos diámetros alcanzan casi 100 m, capaces de entregar 3 MW, es decir, tres millones de watt.

Las pequeñas turbinas eólicas son usualmente divididas en micro, mini y de tamaño doméstico. Las micro-turbinas son las más pequeñas, y por lo general sus rotores tienen menos de 1,25 m de diámetro. Las mini-turbinas son las intermedias y sus rotores llegan a 3 m de diámetro. Por su parte, turbinas de tamaño doméstico (del término danés *hustandmølle*) son más grandes (llegan hasta 10 m de diámetro), cubren un amplio rango

y son capaces de suministrar energía a viviendas en lugares aislados.

Esta subdivisión no es única, ya que algunos autores toman otros rangos; es decir, no hay una definición precisa de lo que se identifica como «pequeño». Algunos investigadores aplican el término a turbinas eólicas de hasta 30 kW de potencia. No obstante, las normas de certificación de aerogeneradores del Comité Electrónico Internacional (IEC) definen los aerogeneradores pequeños como «aeroturbinas eólicas con una superficie de captación del rotor inferior a 40 m<sup>2</sup>». En el caso de aerogeneradores de eje horizontal, esto corresponde a rotores con un radio inferior a 3,57 m, o sea, aproximadamente 7 m de diámetro. En conclusión, no existe un consenso general para identificar el tamaño de las turbinas eólicas de pequeño tamaño.

### **DESARROLLO DE LOS PEQUEÑOS AEROGENERADORES**

Cuando los generadores eléctricos aparecieron en los finales del siglo XIX, el hombre razonablemente trató de hacerlos girar con rotores eólicos. El ejemplo más conocido de un pequeño aerogenerador fue el construido por Charles Brush, en Cleveland, Ohio, en 1888, el cual no tuvo el impacto esperado en ese momento, aunque después estas máquinas se difundieron por todos los Estados Unidos. De estos pequeños aerogeneradores, el más reconocido como pionero fue el construido por Marcellus Jacobs, quien en los años veinte se dedicó a estudiar cómo adaptar los antiguos molinos de bombeo como aerogeneradores. Estos equipos eran de tres palas (tripalas) con perfiles de sección aerodinámica, por lo que puede decirse que poseían la ar-

quitectura de los modernos aerogeneradores actuales. Algo interesante también es que Jacobs le incorporó la batería de acumulación, para adaptarla a los usos en residencias particulares. Los pequeños aerogeneradores, como los de Jacobs, se hicieron muy populares en los Estados Unidos hasta que la expansión de la red eléctrica durante los años treinta marcó el comienzo del fin de su uso generalizado. Este aerogenerador ha sido recuperado por otras firmas y actualmente se encuentran otra vez disponible.

En el intervalo antes de la Segunda Guerra Mundial apareció otro aerogenerador de pequeña potencia, que todavía se puede encontrar en el mercado, la turbina Windcharger, de dos palas y un sistema de regulación mediante freno aerodinámico.

Posteriormente resurgieron las pequeñas turbinas eólicas, y China es uno de los países abanderados de este resurgimiento. Los grupos nómadas de la parte noroccidental de la nación asiática emplean más de cien mil pequeños sistemas eólicos. Estas turbinas eólicas son llevadas en lomos de caballos de un campamento a otro, y constituyen la única fuente de energía disponible en las grandes llanuras de Asia, que se extienden desde China hasta Rusia. En total, en China se han instalado hasta el 2002 más de doscientas treinta mil pequeñas turbinas eólicas, fabricadas fundamentalmente en el propio país.

Un estudio realizado en España, en el 2000, llegó a la conclusión de que actualmente existen unos treinta fabricantes de pequeños aerogeneradores, principalmente en la Unión Europea y los Estados Unidos.

El listado de ejemplos de aplicación de las pequeñas turbinas eólicas para la producción de electricidad es



sorprendente. Las podemos encontrar en los exploradores de la Antártica para alimentar de energía a los campamentos aislados; en las grandes llanuras mongolas, donde los grupos nómadas las emplean para cocinar sus alimentos; en las zonas ecuatoriales para la conservación de alimentos; en las antenas repetidoras de comunicación, radio y televisión; para la carga de cercas eléctricas; en los yates de recreo; en fin, son ilimitadas las aplicaciones de las pequeñas turbinas eólicas.

Una aplicación más reciente es la protección catódica de tubos, en el que los pequeños aerogeneradores suministran carga eléctrica a la superficie metálica del tubo. La carga evita la corrosión galvánica en sitios altamente agresivos. No se necesitan baterías durante los períodos de calma, pues la corrosión es un proceso lento que ocurre en períodos largos. Cuando vuelve el viento se recupera la protección.

### **DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Como se señaló en un artículo en esta revista (*Energía y tú*, No. 32), el desarrollo experimentado en el aprovechamiento de la energía eólica en los últimos años ha situado esta fuente renovable de energía en posición competitiva respecto a los sistemas convencionales de producción de energía. Esto ha sido posible gracias a la aplicación de programas nacionales y supranacionales de investigación y desarrollo. Como resultado del impulso realizado en la investigación a raíz de la crisis energética de 1973, a finales de la década de los setenta y principios de los ochenta, aparecen los primeros aerogeneradores comerciales de lo que se denomina nueva generación de sistemas de conversión eólica.

Actualmente se puede afirmar que la tecnología de aerogeneradores de media potencia (menos de 1 000 kW) es una tecnología madura. Los de gran potencia o megaturbinas (más de 1 000 kW) se encuentran en fase de consolidación.

A pesar de este rápido desarrollo de los medianos y grandes aerogeneradores conectados a la red que está teniendo lugar, los sistemas eólicos para generación de electricidad en áreas sin red eléctrica, o descentralizados, no han experimentado un desarrollo con la misma celeridad; es decir, la madurez tecnológica de los medianos y grandes aerogeneradores está más avanzada que los pequeños.

Existen varias razones:

- Mercados menos atractivos.
- Mayor complejidad técnica.
- Son producidos por pequeñas empresas sin acceso a herramientas de diseño de última generación.
- Insuficientes programas de investigación y desarrollo.

En los últimos años se ha trabajado en busca de disminuir los costos y aumentar la fiabilidad, lo que los ha convertido en máquinas insustituibles en aquellos sitios donde la red no alcanza y los vientos son sencillamente evidentes.

En el pasado, el talón de Aquiles era la fiabilidad de estos pequeños aerogeneradores. Estas máquinas en los años setenta se ganaron la mala fama de ser poco fiables, expuestos a fallas frecuentes. En el presente, han avanzado técnicamente de forma tal que si se comparan con aquellos modelos, estos son mucho más fiables. La práctica ha demostrado que la mayoría de las turbinas comerciales actuales pueden operar durante

tres años o más, en sitios de ambiente agresivo, sin necesidad de mantenimiento ni inspección. La fiabilidad y los costos de operación y mantenimiento de estas máquinas es igual al de las instalaciones fotovoltaicas.

### **COSTOS**

Los costos de la instalación de un sistema aislado de energía eólica incluyen los costos de la turbina eólica, la torre, el sistema de control, los cables y demás componentes eléctricos, las baterías, el inversor (si se incluye) y la instalación. Los otros gastos son los correspondientes a la operación, mantenimiento y reparación del sistema eólico. Estos pueden ser expresados en centavos por kilowatt-hora, o como un tanto por ciento del costo inicial. La experiencia alcanzada en los medianos y grandes aerogeneradores indica que estos costos de O y M llegan a 1-2 centavos por kilowatt-hora, y en las pequeñas turbinas evidentemente son menores. Estos sistemas se producen de forma tal que prácticamente están libres de mantenimiento en los primeros años. Experiencias de fabricantes norteamericanos han mostrado que después de tres años de servicio sin mantenimiento, los costos son mínimos.

Hay varias formas de expresar el costo de inversión de estos sistemas: el costo por área de barrido del rotor ( $\$/m^2$ ) y el costo por kilowatt de potencia nominal del aerogenerador ( $\$/kW$ ). El más empleado es el costo por kilowatt, aunque este es más adecuado para plantas de potencia eléctrica que trabajan entregando una potencia constante, como las termoeléctricas o los grupos electrógenos. En los sistemas que entregan valores de potencia irregularmente, como los sistemas eólicos y fotovoltaicos

cos, este indicador puede traer confusión y no ser totalmente objetivo; no obstante, es el que se emplea para hacer comparaciones. Un indicador más realista y útil para las máquinas eólicas es el costo por área de barrido del rotor ( $\$/\text{m}^2$ ). La limitación de este indicador es que no tiene en cuenta la eficiencia del sistema que convierte la energía del viento en electricidad.

Un resultado del análisis de los costos por área de barrido del rotor, en función de la potencia nominal, demostró una gran dispersión de estos en los valores obtenidos. Lo mismo ocurrió en el caso del costo por kilowatt, lo que demuestra inmadurez tecnológica en su desarrollo. No obstante, la tabla 1 muestra valores promedio de estos indicadores.

Tabla 1. Costos específicos

TAMAÑO DE LA TURBINA (M)	COSTO ( $\$/\text{kW}$ ) DE LA TURBINA SOLA	COSTO ( $\$/\text{m}^2$ )
1 (0,2 kW)	13 000	1 000
1,5 (0,4 kW)	5 500	700
3 (1 kW)	2 500	430
4 (2 kW)	2 100	400
5 (3,5 kW)	2 000	390
6 (4,5 kW)	1 700	370
7 (6,5 kW)	1 500	350

Las cifras entre paréntesis en la primera columna expresan aproximadamente la potencia nominal correspondiente, aunque en esto también hay dispersión de los valores, fundamentalmente a partir de turbinas de diámetros mayores de 3 m. En el mercado hay turbinas de 5 m de diámetro, de 1, 3, 4 y hasta 5 kW.

La tabla 1 confirma la tendencia general de que las turbinas eólicas se tornan más efectivas económicamente mientras mayor sea su tamaño. Esto las hace competitivas con los sistemas fotovoltaicos, pues en estos el costo por kilowatt prácticamente no varía, independientemente del tamaño. Las turbinas eólicas son más baratas mientras mayor es el tamaño, y el costo de los sistemas auxiliares de regulación y control son similares en ambos casos. Inclusive el costo de la torre no se diferencia mucho de los sistemas de sustentación de los sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos resultan muy atractivos para la solución de necesidades de electricidad en sitios aislados de la red, y es una tecnología probada en muchas regiones del mundo, incluyendo a Cuba. Al igual que los sistemas eólicos, no necesitan del suministro de combustibles fósiles y pueden trabajar por largo tiempo sin necesidad de mantenimiento. Es reconocida su fiabilidad porque no poseen partes móviles, son silenciosos y no provocan ninguna emisión dañina al medio ambiente. La combinación de estas ventajas ha hecho que la energía solar fotovoltaica sea una buena solución para los problemas que se plantean en sitios remotos que requieran un suministro pequeño y fiable de energía eléctrica.

Si tiene tantas ventajas, ¿por qué se cuestiona en ocasiones el empleo de la energía solar fotovoltaica? La razón principal es el costo. Una instalación fotovoltaica cuesta alrededor de \$5,00 por watt pico generado (Wp), y a esto se le añaden los no menos significativos costos de las baterías, inversores, controladores electrónicos y la instalación.

No obstante, los costos de los sistemas fotovoltaicos han descendido significativamente en los últimos veinte años y se espera que este descenso continúe en el futuro, en la medida en que avance la tecnología de las celdas fotovoltaicas, su tecnología de producción y la economía de escala se desarrolle y afiance. El costo del watt pico ha decrecido desde alrededor de \$100,00 en 1970 a \$5,00 actualmente, y se espera que decrezca hasta \$2,00 en el 2010. En la medida en que estos costos disminuyan, los sistemas fotovoltaicos se tornarán mucho más atractivos en todo el mundo. No obstante, es conveniente señalar que los costos de las instalaciones fotovoltaicas aún son superiores a los actuales precios de los sistemas eólicos, según se evidencia en la tabla 1.

### **SISTEMAS HÍBRIDOS**

Con el auge de las fuentes renovables de energía, desde hace ya treinta años, los defensores de los sistemas eólicos y solares enfocaron el problema a su modo de ver y conveniencia. En aquellos tiempos, cuando se solicitaba un sistema eólico para un sitio aislado de la red, el proveedor le suministraba las turbinas eólicas necesarias con sus baterías, según la demanda y los días sin viento estimados en el sitio. Si se hacía la solicitud a un proveedor de sistemas fotovoltaicos, éste le hubiera hecho lo mismo, le habría suministrado tantos paneles fotovoltaicos como hubiera sido necesario. Hoy no es así, porque todos los proveedores de estos sistemas están conscientes de que el uso de los sistemas híbridos es lo más adecuado, es decir, están de acuerdo en el uso de las energías fotovoltaica y eólica, simultáneamente. En muchos sitios los recursos solares y eóli-

cos se complementan. Los fuertes vientos del invierno se compensan con los largos y soleados días del verano. De esta forma los diseñadores reducen el tamaño de cada componente. Más aún, se ha comprobado que estos sistemas híbridos trabajan mejor cuando se acoplan a pequeños grupos electrógenos, y así reducen la cantidad de baterías, que los hacen más costosos y se reducen los costos de operación y mantenimiento.

### **DIFERENCIAS ENTRE AEROGENERADORES**

Existen evidentes diferencias entre los pequeños aerogeneradores instalados como sistemas aislados, y los de mediano y gran tamaño conectados a la red. Ambos presentan problemáticas muy diferentes.

- En el caso de las instalaciones conectadas a la red, la instalación entrega energía de acuerdo con la velocidad del viento. En el caso de las instalaciones aisladas, éstas tienen que cubrir las necesidades de la demanda, por lo que son necesarios sistemas de acumulación y regulación de la cantidad de energía generada.
- En los sistemas aislados, el emplazamiento y el consumo normalmente viene dado por la localización. El aerogenerador pequeño se ubica en el lugar donde existe la demanda o muy cercano a ella, para evitar pérdidas por transmisión de electricidad. En el caso de los sistemas conectados a la red, se selecciona el emplazamiento y no hay limitación de la energía generada.
- Desde el punto de vista técnico, en los aerogeneradores conectados a la red, es la propia red, a través de la frecuencia constante (60 Hz), la que mantiene la velocidad de rotación constante; pero en cambio, en

los sistemas aislados hay que controlar mediante subsistemas específicamente diseñados al efecto.

- Para instalar aerogeneradores pequeños no se necesitan estudios de viento, pero estos resultan imprescindibles en el caso de los aerogeneradores conectados a la red. Exploraciones in situ, análisis de evidencias ecológicas y extrapolaciones desde estaciones meteorológicas cercanas, son suficientes para la instalación de pequeñas máquinas. Los estudios que se necesitan para la instalación de parques eólicos son mucho más costosos que los que se realizan para los pequeños sistemas.

### **TECNOLOGÍA DE LOS PEQUEÑOS AEROGENERADORES**

Los pequeños aerogeneradores de menos de 7 m de diámetro poseen varios subsistemas: rotor, generador, sistema de frenado, sistema de orientación, sistema de generación de la velocidad de rotación y torre soportante.

En cuanto al rotor, la mayor parte de los modelos corresponde a aerogeneradores tripalas, y en menor medida bipalas, aunque se producen también de cuatro, cinco y seis palas. De igual manera, son mayoritariamente para trabajar a barlovento (viento de frente).

Los diseños de pequeña potencia utilizan, casi siempre, conexión directa entre el rotor del aerogenerador y el generador eléctrico, sin multiplicador. El generador más empleado es el alternador de imanes permanentes (PMG), de 4, 6, 8 y 10 polos. Existen también algunos diseños con generadores de reluctancia variable.

Los pequeños aerogeneradores deben poseer un mecanismo que detenga el aerogenerador cuando so-



brepasa la velocidad máxima permisible, es decir, un sistema de frenado capaz de reducir la velocidad del rotor o detener la rotación. Existen varias variantes en este caso: con un solo sistema de frenado, sin sistema y, la mayoría, con dos sistemas. El sistema más común es el freno mecánico, que se emplea en la mayor parte de las variantes. Existe también el freno aerodinámico, el de pala a bandera, el de desorientación, el de cabeceo y el de cortocircuito del generador. En los aerogeneradores que sólo llevan un sistema de frenado, la solución más común es mediante cortocircuito del generador eléctrico.

El sistema de orientación es por veleta de cola. En el caso de los modelos que trabajan a sotavento (viento por detrás), no emplean sistema de orientación.

El sistema de regulación de la velocidad de rotación es necesario para mantener el aerogenerador dentro de los límites de diseño. En particular, deben existir medios disponibles para prevenir que se supere la velocidad límite de rotación de cálculo. Los sistemas más usados son por cabeceo y por cambio de paso.

En relación con los diferentes tipos de torres, existen las atirantadas o autoportantes, tubulares y de celosía. En cuanto a las alturas, se encuentran torres de 6, 8, 12, 18, 24, 30 y 40 m.

En conclusión, el aerogenerador tipo de pequeña potencia sería uno de eje horizontal, tripala a barlovento, con un generador síncrono de imanes permanentes, orientado por timón de cola y con regulación de la velocidad mediante cabeceo o cambio de paso pasivo. Dispondría de dos sistemas de frenado, siendo uno de ellos un freno mecánico. El aerogenerador se ofrecería con diferentes tipos de torres soporte y alturas de buje.

### EXPERIENCIA CUBANA

Se conoce que después del auge alcanzado por los aerogeneradores tipo Windchargers, fundamentalmente en los Estados Unidos, algunos equipos fueron instalados en Cuba en fincas y residencias. No obstante, no han quedado huellas de esas instalaciones.

Tabla 2. Sistemas híbridos, con participación eólica, instalados por la empresa EcoSol Solar

TIPO	POTENCIA INSTALADA (kW)			CANTIDAD DE AEROGENERAD.
	(E)	(FV)	(Ds)	
Híbrido E-FV	0,40	0,24		1
Híbrido E-FV	0,40	0,17		1
Híbrido E-FV	0,40	0,17		1
Híbrido E-FV	0,40	0,17		1
Híbrido E-FV	0,40	0,10		1
Híbrido E-FV	0,40	0,17		1
Híbrido E-FV	0,40	0,17		1
Híbrido E-FV	0,80	0,33		2
Eólico	0,40			1
Híbrido E-FV	0,40	0,80		1
Híbrido E-FV	0,80	0,24		2
Híbrido E-FV	0,80	0,24		2
Híbrido E-FV	0,80	0,24		2
Híbrido E-Ds	3,00	10,00		1
Híbrido E-FV	3,00	2,00		1
Híbrido E-FV-Ds	6,00	16,00	10,00	1
Híbrido E-FV-Ds	1,50	2,40	20,00	1
Eólico	3,00			1
Eólico	1,50			1
Total	24,80	23,42	40,00	23

Leyenda: Eólico (E). Fotovoltaico (FV). Diésel (Ds).

A partir de los años noventa, algunas instituciones, como el Centro de Investigación de Energía Solar (CIES) y el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), incursionaron en el diseño y construcción de sistemas eólicos, aunque sin llegar a un grado de madurez tecnológico aceptable para acceder a su producción industrial.

También la Comisión Nacional de Energía en esos años importó más de diez pequeños aerogeneradores chinos, que fueron distribuidos por diferentes organismos, pero dejaron de operar por diversas razones. A esto se añade la producción informal de estas máquinas por parte de algunas entidades y personas interesadas en el tema.

Tabla 3. Resumen de las instalaciones

Sistemas eólicos simples	3
Sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos	13
Sistemas híbridos eólico-diésel	1
Sistemas híbridos eólico-FV-diésel	2
Total aerogeneradores instalados	2
Total sistemas instalados	19
Total aerogeneradores funcionando	16

A partir de 1996 la empresa EcoSol Solar, División de Copextel S.A., comienza un programa más coherente de instalación de sistemas eólicos e híbridos, que en la actualidad ya cuenta con una potencia instalada de 28,9 kW (Tablas 2 y 3), en dieciséis instalaciones, con veintitrés aerogeneradores de diferentes marcas y procedencias.

*(Publicado en Energía y tú,  
No. 33, enero-marzo de 2006)*

Este libro ha sido impreso  
por la Editorial CUBASOLAR.  
Se terminó de imprimir en La Habana,  
en abril de 2006.  
«Año de la Revolución Energética en Cuba».

Cuba, en su nueva estrategia energética, prevé la utilización creciente de la energía eólica, para incorporarla como uno de los soportes tecnológicos de la cultura solar que nos liberará del actual holocausto silencioso que provoca la combustión de los combustibles fósiles. Como uno de los artífices de ese vector hacia el desarrollo sostenible, a Conrado Moreno le agradecemos su sabiduría y pasión por la energía eólica –denominada así en honor del dios griego Eolo–, y por los textos que ya nos adelantó en algunos números de la revista *Energía y tú*.

CONRADO MORENO FIGUEREDO (Santa Rita, 1946). Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular y director del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevería (CUJAE). Académico Titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Autor del libro inédito *Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas*.

ISBN 959-7113-32-5



Ejemplar firmado y numerado por el autor.