

# La energía del viento: *pasado, presente y futuro cercano*

La energía eólica es utilizada por el hombre desde hace miles de años, pero recién a partir de la crisis energética de 1973, con el aumento del precio del petróleo, tomó una importancia hasta entonces desconocida. Pero, ¿cómo se capta la energía del viento? En la presente nota se analizan los fundamentos de dicha fuente energética a partir del movimiento de las partículas del aire y la capacidad de la hélice para captar energía, la influencia del número de palas y cómo se determina el tamaño de una hélice.

**E**l hombre ha empleado el viento como fuente de energía durante miles de años, pero recién desde la crisis energética de 1973 adquirió gran desarrollo.

En la primera mitad del siglo XX, numerosos molinos del tipo tradicional con hélices multipalas fueron ideados y fabricados para moler granos o bombear agua. No obstante fueron las turbinas eólicas, construidas en las últimas décadas con diseños de avanzada y modernas tecnologías, las que permitieron generar electricidad con altos rendimientos.

En la década del '80, muchos países comenzaron a construir turbinas de 10 y 20 kw de potencia, pues, a pesar de que ya se habían construido algunas grandes turbinas experimentales, era necesario poner a punto una tecnología completamente nueva.

Dinamarca, Holanda, Inglaterra, Alemania y los Estados Unidos, principalmente, lideraron estos desarrollos fabricando turbinas con hélices

de dos y tres palas, de tamaños apreciables, para producir grandes cantidades de electricidad. Como en general en estos países de Europa y también en los Estados Unidos, la línea de distribución eléctrica se extiende por todo el territorio, las instalaciones de turbinas eólicas fueron realizadas para ser conectadas a la red y ahorrar combustibles o reducir las facturas de electricidad.

En países como el nuestro, que tienen zonas con buenos vientos y numerosas poblaciones aisladas, las turbinas eólicas medianas y pequeñas resultan atractivas para proveer electricidad a estas comunidades remotas que viven en condiciones muy precarias y no pueden conectarse a la red eléctrica, principalmente por razones económicas.

Para satisfacer las necesidades de muchas poblaciones de la Patagonia y de algunas bases en la Antártida, el

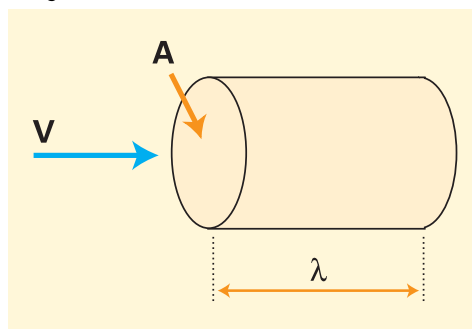
Por *Ricardo A. Bastianon*, Escuela Superior Técnica

Servicio Naval de Investigación y Desarrollo diseñó y construyó la Turbina Eólica Argentina (figura 1), cuya hélice de 11,5 m de diámetro comenzó a girar por primera vez en octubre de 1983, en Vicente López, a orillas del Río de la Plata. Esta turbina, capaz de generar una potencia eléctrica de 10 kw fue por capacidad y tamaño la mayor en su tipo que se construyó en América Latina; se constituyó así para esta región en la precursora.



Figura 1 • Turbina Eólica Argentina

Figura 2



|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| $V = 2 \text{ m/seg}$ | $P_d = 4,9 \text{ W}$   |
| $V = 4 \text{ m/seg}$ | $P_d = 39,2 \text{ W}$  |
| $V = 8 \text{ m/seg}$ | $P_d = 313,6 \text{ W}$ |

Puede notarse que, cuando la velocidad se duplica, la potencia aumenta ocho veces. Debido a que la velocidad está elevada al cubo, su efecto sobre la potencia es considerable y mucho cuidado debe observarse en su medición y análisis.

Para el aprovechamiento del viento se han diseñado muchos modelos diferentes de turbinas que efectivamente giran al enfrenar al viento. Sin embargo, existe una diferencia importante entre aquellas que continúan girando cuando se les aplica una carga o un cierto freno sobre el eje de rotación y las que se detienen ante esta resistencia.

Ensayos efectuados con modelos en el túnel de viento revelan que los mejores rendimientos corresponden a aquellas turbinas con hélices de tipo convencional de eje horizontal y las turbinas de eje vertical tipo Darrieus (figura 3). En lo que sigue nos referiremos a turbinas de eje horizontal.

### Hélices para turbinas de eje horizontal

La hélice es, posiblemente, el elemento más importante de una turbina eólica por ser el captador de la energía del viento. Al ser expuesta a la corriente de aire, experimenta una presión sobre su superficie, lo cual genera una cupla que la hace girar.

De la potencia disponible en el viento  $P_d$ , sólo una parte puede ser captada por la hélice y el grado de eficiencia de ésta es medido por el coeficiente de potencia  $C_p$ .

La potencia captada es entonces:

$$P_c = C_p \frac{1}{2} \rho V^3 A$$

Desde entonces, las máquinas fueron creciendo rápidamente en tamaño y potencia y dieron paso a las enormes turbinas que hoy ya se instalan comercialmente.

A continuación y, para comprender cómo se capta la energía del viento, analizaremos los fundamentos de esta fuente de energía a partir del movimiento de las partículas del aire y luego estudiaremos la capacidad de la hélice para captar esta energía, la influencia del número de palas y cómo se determina el tamaño de una hélice.

### Energía del viento

La energía del viento es consecuencia de la energía cinética de las partículas del aire en movimiento. La energía cinética es igual a:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

En donde  $m$  es la masa de las partículas del aire y  $V$ , la velocidad de éstas (figura 2).

A su vez, la masa que atraviesa una sección  $A$ , perpendicular a la dirección del viento es:

$$m = \rho A \lambda$$

En donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $\lambda$ , el desplazamiento de las partículas. Consecuentemente, la energía cinética que pasa por  $A$  es:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A \lambda V^2$$

Y la potencia disponible de la masa de aire en movimiento es energía por unidad de tiempo:

$$P_d = E_c / t = \frac{1}{2} \rho A V V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

En donde:  $\rho$  = densidad del aire.

En atmósfera estándar a nivel del mar:

$$\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3.$$

$V$  = velocidad del viento en m/seg.

$A$  = superficie perpendicular a la dirección del viento en  $\text{m}^2$ .

$P_d$  = potencia disponible en el viento en Watt (W).

Considerando el área como

$A = 1 \text{ m}^2$ , puede calcularse que para:

Para el molino multipala el máximo valor de  $C_p$  puede llegar a 0,12, mientras que una hélice eficiente de dos o tres palas puede alcanzar 0,42. El valor de  $C_{p_{\text{máx}}}$  representa el rendimiento aerodinámico máximo de la hélice.

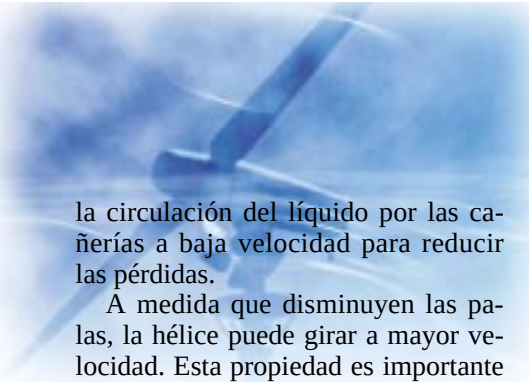
El perfil aerodinámico usado, la longitud y el número de las palas, el alabeo y la variación de la cuerda en función del radio son elementos que determinan, en forma sensible, las *performances* de la hélice.

### Número de palas

Los aparatos multipalas poseen una fuerte cupla de arranque y giran a baja velocidad. Estas máquinas se adaptan bien para el bombeo de agua, pues en el arranque pueden necesitar desplazar un importante volumen de no cortar fluido y, además, es preferible



Figura 3• Turbina de eje vertical tipo Darrieus



la circulación del líquido por las cañerías a baja velocidad para reducir las pérdidas.

A medida que disminuyen las palas, la hélice puede girar a mayor velocidad. Esta propiedad es importante pues la potencia resulta igual a la cupla  $C$ , por la velocidad angular  $\omega$ .

$$P = C \cdot \omega$$

Y por lo tanto, para una misma cupla, la potencia aumenta con la velocidad angular.

Por otro lado, para la generación de electricidad se requiere alta velocidad de rotación, con lo cual la máquina eléctrica reduce sus dimensiones, su peso y consecuentemente su precio.

Al disminuir el número de palas de la hélice, deberá tenerse en cuenta que la cupla de arranque también se reduce. Ésta no deberá descender por debajo del mínimo que le permita arrancar para una velocidad del viento de 3 a 4 m/seg.

En el cálculo de la hélice óptima se determina para cada valor del radio, una cuerda total  $C_{tot}$ , que es igual a la cuerda de una pala  $c$ , por el número  $N$  de éstas. Por lo tanto, para mayor  $N$ , menor  $c$ , es decir, la hélice óptima requiere palas delgadas que resultan frágiles. A partir de un cierto punto, por razones de resistencia estructural, la pala no puede hacerse más delgada y entonces su forma se aparta de la configuración óptima. Como consecuencia, es más fácil construir una hélice óptima de dos palas que una de un número mayor.

Se denomina solidez de una hélice a la relación entre la superficie ocupada por las palas y la superficie frontal barrida por la hélice. De acuerdo con esta definición, se observa que las hélices de elevada solidez son multipalas y pueden llegar a tener unas 25, mientras que las de baja solidez son de una, dos o tres palas.

Entre las de baja solidez debe mencionarse que, si bien el rendimiento

aerodinámico aumenta al acrecentarse el número de palas, este incremento se hace poco significativo para hélices con más de tres palas. Veamos las características de las hélices con una, dos y tres palas.

**Hélice de una pala:** requiere de un contrapeso que compense la pala, y el balanceo debe realizarse con mucho cuidado y precisión debido a la extrema sensibilidad que tiene a las vibraciones. Resulta atractiva económicamente porque necesita sólo una pala, que es un elemento costoso, pero las dificultades producidas por la vibraciones la hacen poco práctica.

**Hélice de dos palas:** es más económica que la de tres palas pero resulta más sensible que ésta a las vibraciones. En turbinas de baja potencia, con hélice de dos palas y de paso fijo, la hélice puede construirse entera con un solo larguero pasante, mientras que si es de paso variable esto ya no es posible, pero todo el mecanismo de cambio de paso resulta más



Figura 4 • Granja eólica con turbinas alemanas

simple que en una de mayor número de palas.

**Hélice de tres palas:** su característica principal es su mayor suavidad de funcionamiento y ésta es una importante cualidad.

Por todo lo que antecede, para hélices rápidas, de alta velocidad de giro, son recomendables las hélices de dos o tres palas.

### Tamaño de la hélice

Para determinar el tamaño de la hélice es necesario conocer la potencia eléctrica requerida por el usuario y los rendimientos de los distintos elementos que integran la turbina.

Un generador eléctrico tiene un rendimiento del 92% para máquinas de más de 10 kw pero para potencias menores en el mercado argentino puede llegar a valores tan bajos como el 50%.

Estos generadores eléctricos de poca potencia provienen de la industria del automotor, y sus rendimientos son normalmente bajos.

Como para la generación eléctrica es indispensable alcanzar un alto número de revoluciones, se debe incorporar un multiplicador de velocidades. Si éste es una caja de engranajes de rendimiento puede alcanzar el 90%.

Por su parte, la hélice de eje horizontal adecuadamente diseñada puede captar, de la potencia disponible en el viento, hasta un 42% mientras que hélices calculadas y realizadas con poco cuidado pueden bajar el rendimiento hasta un 10%. El rendimiento global  $\eta$  de la turbina será:

$$\eta = \eta_e \eta_m C_p$$

En donde:

$\eta_e$  = rendimiento eléctrico.

$\eta_m$  = rendimiento del multiplicador.

$C_p$  = coeficiente de potencia de la hélice.

De este modo la potencia eléctrica de salida será:

$$P_e = \eta \frac{1}{2} \rho V^3 A_{fb}$$

En donde  $A_{fb}$  es el área frontal barrida por la hélice. Despejando

$$A_{fb} = \frac{2 P_e}{\eta \rho V^3}$$

y como  $A_{fb} = \pi R^2$ , el radio de la hélice resulta:

$$R = \sqrt{\frac{2 P_e}{\pi \eta \rho V^3}}$$

En esta expresión,  $V$  es la velocidad del viento instantánea que, al incidir sobre una turbina con una hélice de radio  $R$ , genera una potencia eléctrica  $P_e$ .

### Granjas eólicas e instalaciones aisladas

Es importante distinguir el tipo de utilización que se dará a las turbinas eólicas, ya que éstas podrán ser instaladas en forma agrupada constituyendo las denominadas "granjas eólicas" o en instalaciones individuales, normalmente aisladas.

En el primer caso, las granjas eólicas son verdaderas centrales de generación eléctrica, en forma similar a una central hidroeléctrica o nuclear (figura 4). Generalmente son grandes

instalaciones de varios MW y la energía generada es entregada a la red de distribución. En este caso, la localización de la granja se efectúa después de una cuidadosa selección, teniendo especialmente en cuenta que el régimen de vientos sea suficientemente elevado, con una velocidad media anual de 8 a 10 m/seg o más.

En el caso de instalaciones aisladas, las turbinas se utilizan principalmente para viviendas ubicadas en localidades remotas, estancias, escuelas rurales, puestos policiales o de gendarmería y repetidoras de telecomunicaciones.

Para todas estas aplicaciones, la turbina se debe colocar al lado del usuario, en el sitio preciso donde se requiere la energía. De este modo, la selección del lugar de instalación queda limitada a las proximidades de la vivienda o puesto y, por lo tanto, la velocidad media del viento, usada para el diseño es menor que para las granjas, con un valor de alrededor de 7 m/seg.

### Conclusiones

La energía del viento ha sido reconocida desde hace mucho tiempo como una fuente de energía limpia e inagotable y, con el notable progreso tecnológico que las turbinas eólicas han alcanzado en las últimas décadas, esta fuente se ha convertido en una de las más económicas dentro de las energías renovables. Hoy, las turbinas eólicas están utilizando una tecnología probada y, gracias a ello, pueden proporcionar un suministro energético confiable y duradero. Por esta razón, en la actualidad, la industria eólica se halla en las condiciones más favorables, nunca ex-



perimentadas con anterioridad.

El desarrollo intensivo de las turbinas eólicas de altas *performances* comenzó en la década del '80. En esos años las turbinas se encontraban transitando las primeras etapas de su evolución, y los especialistas tuvieron que enfrentar problemas técnicos de las más variadas características. Los pasos iniciales no fueron simples y un gran esfuerzo fue realizado para analizar la respuesta dinámica de las turbinas frente a las condiciones cambiantes del viento. En su funcionamiento, las turbinas eólicas actúan como un filtro, que debe amortiguar y no amplificar la excitación variable que produce el viento. Las turbinas de buen diseño son capaces de captar la energía y funcionar suavemente, sin producir vibraciones.

A medida que pasó el tiempo, las turbinas fueron mejorando poco a poco y la generación de electricidad ganó confiabilidad. Un conocimiento

más profundo del comportamiento estadístico del viento y el perfeccionamiento de las máquinas eólicas permitieron generar electricidad a precios razonables que pronto comenzaron a ser competitivos y comparables con los obtenidos, a partir de las fuentes convencionales.

En las reuniones y congresos de energía eólica realizados entre los años '80 y '90, la mayoría de los trabajos que se presentaban incluían detalles sobre problemas técnicos de una tecnología que se hallaba en sus comienzos y con muchos problemas aún no resueltos.

En este período, particularmente en los Estados Unidos, la industria eólica estaba fuertemente subsidiada, libre de impuestos, con créditos muy convenientes, gracias a los cuales se originó un fuerte incentivo, especialmente en California, que permitió el comienzo de las importantes concentraciones de turbinas que generan



Figura 5 • Turbina de viento General Electric de 1,5 MW

electricidad para la red.

Los tiempos difíciles del desarrollo tecnológico inicial fueron superados y a partir de los años '90, las turbinas en su mayoría comenzaron a funcionar satisfactoriamente, con una disponibilidad superior al 98%. A partir de esta época, los comentarios que se escuchaban en los ambientes especializados eran que las máquinas estaban disponibles y sólo restaba efectuar su comercialización.

Desde entonces, las instalaciones de granjas eólicas han alcanzando un desarrollo formidable.

No obstante, es necesario advertir que, aun actualmente, la selección de una turbina debe efectuarse en forma muy cuidadosa pues no todos los equipos que se encuentran en el mercado son de la mejor calidad. Es indispensable que en la fase inicial de un proyecto eólico, un especialista, conocedor de las turbinas de viento en existencia, haga una evaluación y selección adecuada de la máquina. Un buen especialista, que también hay que saberlo elegir, conoce cuáles son las características que debe poseer la turbina y, si bien la evaluación tiene un cierto costo, esta inversión ahorra muchos dolores de cabeza posteriores: instalaciones que funcionan pobremente, máquinas que vibran o que no soportan las tormentas que pueden existir en el lugar donde se debe instalar el equipo.

En la actualidad, la generación eólica de electricidad tiene un costo de cuatro a cinco centavos de dólares por kWh. En algunos países con estos precios se puede competir con la generación convencional. Sin embargo,

#### Las instalaciones de turbinas en la Argentina a principios de 2000.

| Provincia    | Localidad      | Potencia c/turbina | Cantidad de turbinas | Potencia instalada (KW) |
|--------------|----------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| Santa Cruz   | Pico Truncado  | 600                | 2                    | 1.200                   |
| Chubut       |                |                    |                      | 6900                    |
|              | Com. Rivadavia | 250                | 2                    |                         |
|              |                | 750                | 8                    |                         |
|              | Rada Tily      | 400                | 1                    |                         |
| Buenos Aires |                |                    |                      | 5700                    |
|              | Tandil         | 400                | 2                    |                         |
|              | Punta Alta     | 400                | 1                    |                         |
|              |                | 600                | 3                    |                         |
|              | Darregueira    | 750                | 1                    |                         |
|              | My Buratovich  | 600                | 2                    |                         |
|              | Claromecó      | 750                | 1                    |                         |
| Neuquén      | Cutral-Có      | 400                | 1                    | 400                     |

Estas turbinas eólicas en la Argentina totalizan una potencia instalada de 14.200 KW.

en general se requiere de un apoyo estatal para impulsar esta energía renovable. Debido a ello, en la Argentina y en varios países, existe una Ley Eólica y Solar que otorga beneficios para estos tipos de generación. No obstante, por los problemas económicos recientes ha resultado difícil la materialización de este apoyo.

Por otro lado, las turbinas eólicas,

con el perfeccionamiento y avance tecnológico de los últimos tiempos han logrado disminuir los costos de su fabricación en forma progresiva, y además, se está comprobando la hipótesis de que las turbinas más grandes resultan más baratas por kw de potencia instalada. Coincidentemente, en el mercado mundial están apareciendo varias turbinas grandes que funcionan eficientemente. Una de ellas, la de General Electric de 1,5 MW de potencia, se muestra en las figuras 5 y 6.

Este argumento puede resultar decisivo para el futuro cercano de las instalaciones eólicas pues estas grandes turbinas, por su avanzada tecnología y tamaño, pueden representar una solución económi-

camente muy atractiva para entregar electricidad a la red sin necesidad de subsidios y aún así, lograr competir en forma ventajosa con la generación convencional. Y además, sin contaminar el medio ambiente. 

Figura 6 • Interior de la barquilla de la turbina General Electric de 1,5 MW.



**Ricardo A. Bastianon** se graduó como ingeniero aeronáutico en Córdoba en 1959 y se especializó en Ingeniería de Aviones y Misiles en la École Nationale Supérieure de l'Aéronautique, Francia. Posteriormente en 1971, en la Universidad de Stanford de los Estados Unidos, obtuvo su doctorado (Ph.D.) en Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica. Trabajó en la Fábrica de Aviones Marcel Dassault, en Francia, en proyectos especiales y en el Laboratorio de Investigaciones Científicas de Lockheed en los Estados Unidos; allí desarrolló la aerodinámica supersónica e hipersónica del transbordador espacial de la NASA. Fue Director Científico del SENID, donde desarrolló la mayor turbina eólica construida en Sudamérica. Actualmente es el director de investigaciones en la Escuela Superior Técnica. Posee 90 publicaciones en temas de su especialidad, entre ellas, el libro Energía del viento y diseño de turbinas eólicas.