



INSTITUTO ARGENTINO DE LA ENERGIA "GENERAL MOSCONI"

1983 - 20° Aniversario - 2003

ENERGIA EOLICA



Jaime Moragues y Alfredo Rapallini

1. Origen de los vientos

El calentamiento dispar de la superficie terrestre por acción de la radiación solar es el principal causante de los vientos. En las regiones ecuatoriales se produce una mayor absorción de radiación solar que en las polares; el aire caliente que se eleva en los trópicos es reemplazado por las masas de aire fresco superficiales proveniente de los polos. El ciclo se cierra con el desplazamiento, por la alta atmósfera, del aire caliente hacia los polos. Esta circulación general, que sería la observada si la tierra no girase, se ve profundamente alterada por el movimiento de rotación de la tierra generando zonas de vientos dominantes que responden a patrones definidos (ver Figura 1). A lo largo de un año las variaciones estacionales de la radiación solar incidente provocan variaciones en la intensidad y dirección de los vientos dominantes en cada uno de los puntos de la corteza terrestre.

Además del movimiento general de la atmósfera, que define los vientos dominantes en las grandes regiones de la tierra, al estar ésta más caliente, existen fenómenos de características locales que originan estructuras particulares de los vientos. Tal es el caso de las brisas de tierra y de mar, motivadas por el calentamiento desigual de las masas de aire. Durante el día

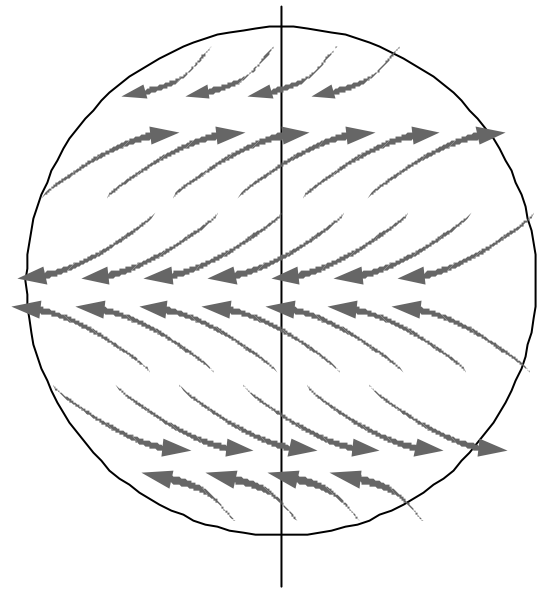


Figura 1 - Circulación de la atmósfera

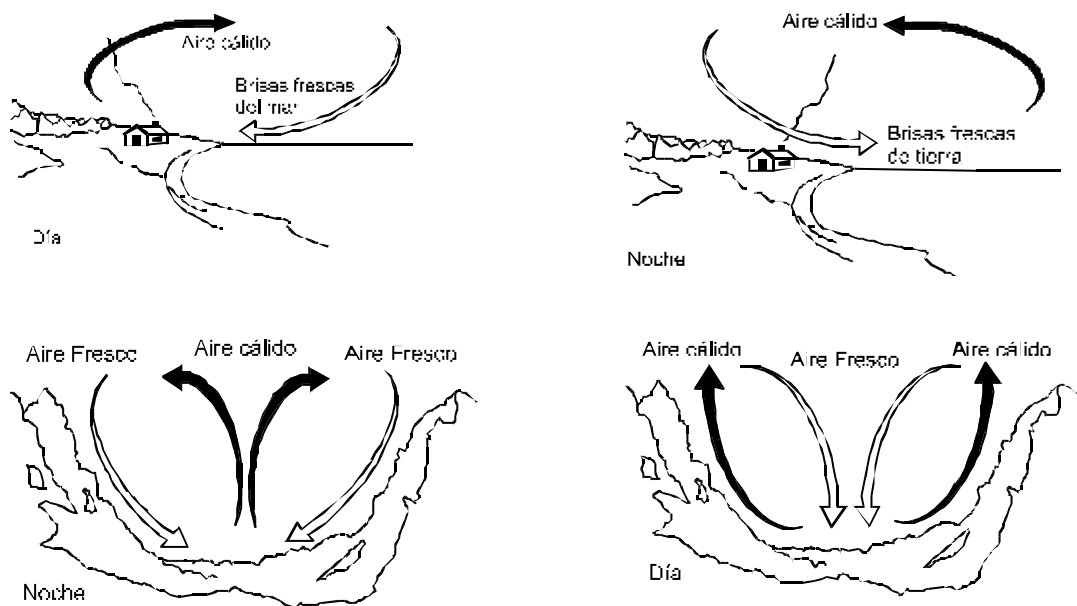


Figura 2 - Vientos locales

se generan a lo largo de la costa vientos desde el mar hacia tierra, revirtiéndose el proceso en horas nocturnas (Figura 2). Un fenómeno similar sucede en zonas montañosas donde las brisas de montaña y de valle son originadas por el calentamiento del aire en contacto con las laderas, generándose corrientes ascendentes durante las horas de sol y descendentes durante la noche.

Es importante señalar que la velocidad del viento varía con la altura (Figura 3) y depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[\frac{h_1}{h_2} \right]^\alpha$$

donde $V_1 < V_2$ representan las velocidades del viento a las alturas $h_1 < h_2$, respectivamente. El exponente α caracteriza al terreno, pudiendo variar entre 0,08 (sobre superficies lisas como hielo, lagunas, etc.) y 0,40 (sobre terrenos muy accidentados).

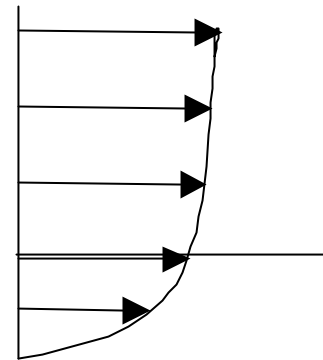


Figura 3 - Perfil del viento con la altura

De todo lo dicho se concluye que el viento es un recurso esencialmente variable y dependiente de muchos factores.

La correcta utilización de la energía eólica exige tomar en cuenta velocidades medias, ráfagas, direcciones dominantes y eventuales obstáculos para seleccionar tanto los lugares de emplazamiento como las características constructivas (altura de la torre, velocidades máximas que soportan, velocidad de puesta en marcha, etc.) de las máquinas a instalar.

2. Historia de la energía eólica

El uso más antiguo de la energía eólica del que se tiene documentación es como medio de locomoción. Existen dibujos egipcios, de 5000 años de antigüedad, que muestran naves con velas utilizadas para trasladarse por el Nilo. Hasta el siglo XIX, con el perfeccionamiento e introducción de las máquinas de vapor, la navegación dependió casi exclusivamente de este recurso energético. Ya en el siglo XX, con la invención de los motores de combustión interna, la navegación a vela quedó relegada solo a las actividades deportivas y a algunas actividades comerciales en pueblos costeros. Recientemente, sobre todo motivadas por los aumentos de los precios del petróleo de los años 1973 y 1979, se realizaron experiencias y construyeron barcos prototipo que utilizan la energía eólica como medio para ahorrar combustible. En transporte transoceánico, con los diseños actuales, podrían alcanzarse ahorros del orden del 10%.

Las primeras máquinas eólicas de las que se tiene documentación datan del siglo VI d.c.. Eran de eje vertical (Ver Figura 4) y se las utilizaba para moler granos y bombear agua en la región de Sijistán, entre Irán y Afganistán. Existen indicios, aunque

no demostrados, de que el uso de estos molinos, denominados panémonas, se remonta según distintos autores a entre 200 y 500 años antes de nuestra era.

Con posterioridad, y especialmente en las islas griegas del Mediterráneo, se desarrollaron molinos de viento de eje horizontal (Figura 5) cuya principal característica fue la utilización de velas triangulares a modo de palas. Aún hoy son utilizados en la isla griega de Mikonos para moler granos. Es de destacar que este tipo de diseño permite ajustar la superficie de captación, según la velocidad del viento, arrollando las velas en sus "mástiles".

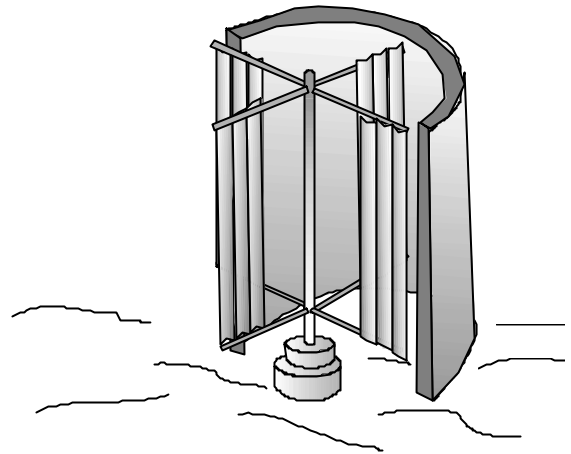


Figura 4 - Panémonas

En el siglo XI d.c. los molinos de viento eran extensivamente utilizados en el Medio Oriente. Recién en el siglo XIII y como consecuencia de las Cruzadas fueron introducidos en Europa.

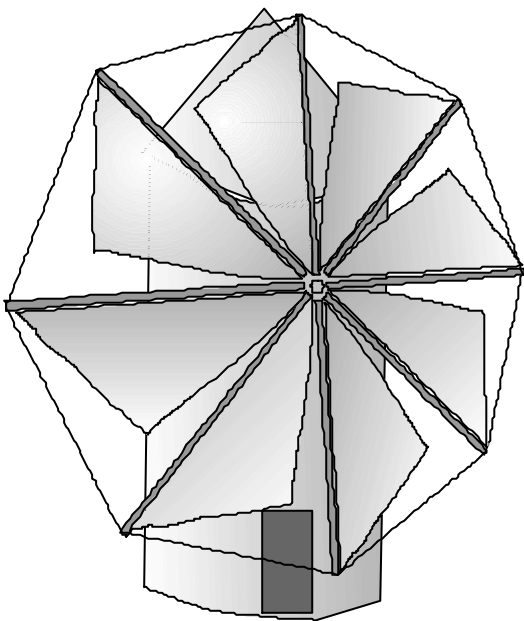


Figura 5 - Molino griego

Durante la Edad Media se construyeron muchos molinos llegando al extremo de que los señores feudales se reservaban el derecho de autorizar su construcción, como modo de obligar a sus súbditos a moler los granos en los molinos de su propiedad. Plantar árboles cerca de ellos estaba prohibido pues debía asegurarse la libre incidencia del viento.

En el siglo XIV los holandeses tomaron el liderazgo en el mejoramiento de los molinos y comenzaron a utilizarlos extensivamente para drenar las regiones pantanosas del delta del río Rin. A fines del siglo XV se construyeron los primeros molinos de viento para la elaboración de aceites, papel y procesar la madera en aserraderos. A comienzos del siglo XVI se empezaron a utilizar para el drenaje de "polders", empleándose máquinas de hasta 37 kW (50 HP) cada una,

ver Figura 6. A mediados del siglo XIX cerca de 9000 molinos operaban en Holanda con diferentes propósitos, algunos de hasta 65 kW (90 HP). Con la introducción de las máquinas de vapor durante la Revolución Industrial comenzaron a declinar y menos de 1000 máquinas estaban en condiciones de operación a mediados del siglo XX.

En Dinamarca, al finalizar el siglo XIX, cerca de 3000 molinos eran utilizados con fines industriales y cerca de 30.000 en casa y granjas, proveyendo una potencia equivalente a 200 MW.

Como en otras regiones del mundo la aparición de alternativas más baratas de abastecimiento energético hizo que paulatinamente fueran reemplazándose por máquinas térmicas o motores eléctricos alimentados desde las redes.

Procesos similares tuvieron lugar en otras regiones del mundo, haciendo que el uso del recurso eólico quedase relegado a satisfacer necesidades puntuales en medios rurales o comunidades aisladas, sin ninguna participación en el mercado energético.

Como señalamos en la introducción, la toma de conciencia sobre la agotabilidad de los recursos energéticos no renovables (o de los renovables no debidamente utilizados), la creciente preocupación por el impacto sobre el medio ambiente de los combustibles fósiles y la energía nuclear, y las bruscas alzas de los precios del petróleo ocurridos en la década del 70, intensificaron la búsqueda de alternativas de abastecimiento energético, renaciendo el interés por el recurso eólico.

Los países industrializados focalizaron sus desarrollos en el abastecimiento de energía eléctrica. Los logros alcanzados en el plano de la investigación y desarrollo y, más aún, en las tecnologías de producción de turbinas eólicas, han hecho que, en el presente, el recurso eólico haya dejado de ser una potencial alternativa de abastecimiento para convertirse en una realidad. Las turbinas eólicas son hoy una opción más en el mercado de la generación eléctrica.

Distinto es el caso de los países no industrializados, o menos desarrollados, donde la falta de sistemas de distribución y la carencia de recursos para afrontar las enormes inversiones necesarias, modifican el enfoque. En muchos de estos países el interés se focaliza en la urgente necesidad de cubrir demandas insatisfechas y potenciar el desarrollo regional. Esto a motorizado el desarrollo de máquinas eólicas de menor porte que, experiencias mediante, han demostrado ser competitivas.

Más adelante, luego de analizar las características particulares del recurso eólico y de los equipos necesarios para su aprovechamiento, veremos con mayor detalle el estado actual de la tecnología y su implementación.

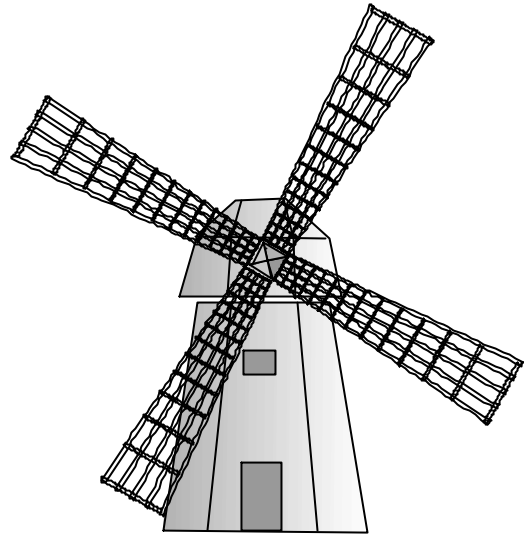


Figura 6 - Molino holandés

3. Energía obtenible del viento

La energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

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

donde E_c = energía cinética [joule/s]
 m = flujo de aire [kg/s]
 V = velocidad del viento [m/s]

Si suponemos una área de captación A (o área barrida por las palas) perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire circulante que la atraviesa será:

$$m = \delta A V$$

siendo δ = densidad del aire [kg/m³]
 A = área de captación [m²]

la energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área ($A=1$) que podremos extraer de una masa de aire en movimiento, será entonces:

$$P_m = \frac{1}{2} \delta V^3$$

A esta energía se la denomina potencia meteorológica y se la expresa en W/m²,

Como la velocidad del viento, luego de atravesar la superficie de captación, no es nula, la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima energía recuperable, con un aerogenerador ideal, es igual a 16/27 (≈60%) de la energía total. Tomando en cuenta que ningún rotor es ideal, para caracterizarlo es necesario conocer su eficiencia o rendimiento η . La potencia obtenible por unidad de área de rotor, medida en W/m², puede expresarse entonces como:

$$P_a = \frac{1}{2} \eta \delta V^3$$

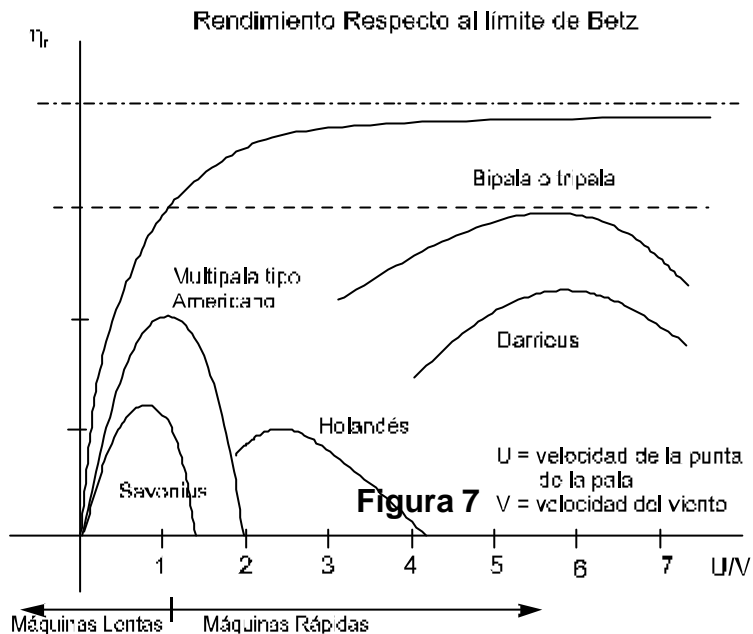
y la potencia total para el área descrita por las palas al girar, $A = \pi R^2 = \pi D^2/4$, en W/m², queda como:

$$P_t = \frac{1}{2} \eta \delta (\pi D^2/4) V^3$$

siendo: D y R = diámetro y radio del rotor expresado en metros

La densidad media del aire es 1,25 kg/m³, valor que multiplicado por $\pi/4$ da aproximadamente 1. Por lo tanto, podemos expresar la potencia obtenible de una máquina eólica, tomando el diámetro en metros y la velocidad en metros por segundo, como:

$$P \approx \frac{1}{2} \eta V^3$$



El rendimiento h depende del tipo de máquina y de las condiciones de operación. En la Figura 7 se representan los rendimientos típicos de diversos tipos de rotores eólicos, cuya descripción veremos luego, referidos a la relación entre la velocidad de la punta de las palas en los rotores de eje horizontal (o del punto más alejado del eje de rotación en el caso de los rotores de eje vertical tipo Darrius y Savonius) y la velocidad del viento.

Conociendo las características de una turbina eólica y la velocidad del viento en un instante dado, es sencillo determinar la potencia útil.

El problema radica en que la velocidad del viento no es constante y, por lo tanto, es necesario conocer su evolución temporal para estimar la energía útil que una turbina eólica es capaz de entregar en un período determinado. Lamentablemente, las mediciones que se realizan con fines climatológicos no tienen, por lo general, el grado de detalle que requieren ciertos proyectos eólicos. En el caso de instalaciones de pequeña potencia, o para analizar la prefactibilidad de instalaciones de potencias altas, existen métodos estadísticos que permiten, a partir de las características de un lugar y la velocidad media del viento, determinar la distribución de velocidades horarias a lo largo de, por ejemplo, todo un año y estimar la energía útil anual obtenible. Cuando se trate de instalaciones de mayor potencia será inevitable la realización de mediciones especiales, como frecuencia y velocidad máxima de ráfagas, que contribuyan a la selección de las máquinas y a un cálculo más preciso de la rentabilidad del proyecto.

4. Principio de operación de las máquinas eólicas

Los molinos de viento, aeromotores, máquinas eólicas (términos que pueden ser considerados sinónimos), o los aerogeneradores, o turbinas eólicas en su acepción, son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica.

Aunque existen dos tipos básicos de molinos, eje horizontal y eje vertical, el principio de operación es esencialmente el mismo. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las **palas**, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado **cubo** (conjunto que recibe el nombre de **rotor**). El principio aerodinámico, por el cual este conjunto gira, es similar al que hace que los aviones vuelen.

Según este principio, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o perfil inclinado (ver Figura 1) genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una **fuerza resultante (R)** que actúa sobre el perfil. Descomponiendo esta fuerza en dos direcciones se obtiene:

- a) la **fuerza de sustentación (S)**, o simplemente **sustentación**, de dirección perpendicular al viento, y,
- b) la **fuerza de arrastre (A)**, de dirección paralela al viento.

Para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las palas, evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones, se eligen perfiles de pala con formas convenientes desde el punto de vista aerodinámico. Según como estén montadas las palas con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será predominantemente la fuerza de arrastre o la de sustentación. Con excepción de las panémonas y los rotores tipo Savonius, en todas las máquinas modernas la fuerza dominante es la de sustentación pues permite obtener, con menor peso y costo, mayores potencias por unidad de área del rotor. Analizaremos únicamente el comportamiento aerodinámico de las turbinas eólicas cuyo par motor está originado por las fuerzas de sustentación.

Como la fuerza de sustentación es la única que dará origen al par o cupla motora habrá que diseñar el perfil y ubicar las palas dándole un **ángulo de ataque (a)** que haga máxima la relación **fuerza de sustentación/fuerza de arrastre**.

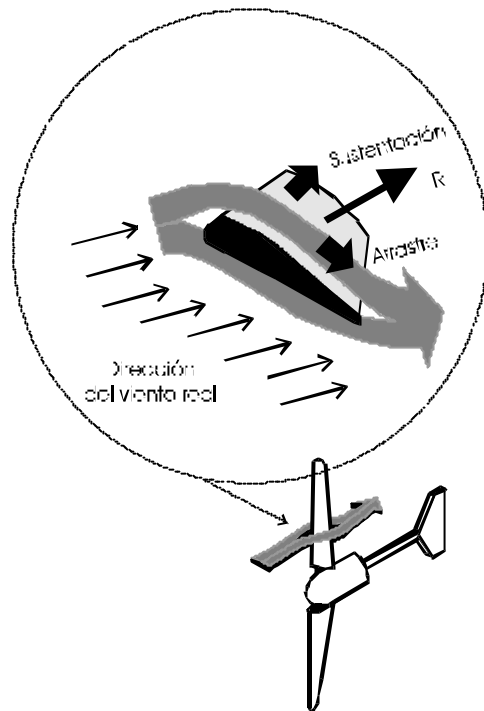


Figura 1 - Fuerzas de Sustentación y de Arrastre

Este análisis simple es solo válido cuando las palas de un molino están en reposo. Al permitir el giro del rotor, la fuerza resultante sobre las palas será el resultado de la combinación de la acción directa del viento real (U en la Figura 2) y la acción del "viento" (V) creado por las propias palas al girar. Dicho con otras palabras, el viento que "ven" las palas no es más el **viento real** (U) sino el llamado **viento aparente** (V_r), resultante de la composición de los vectores V y U .

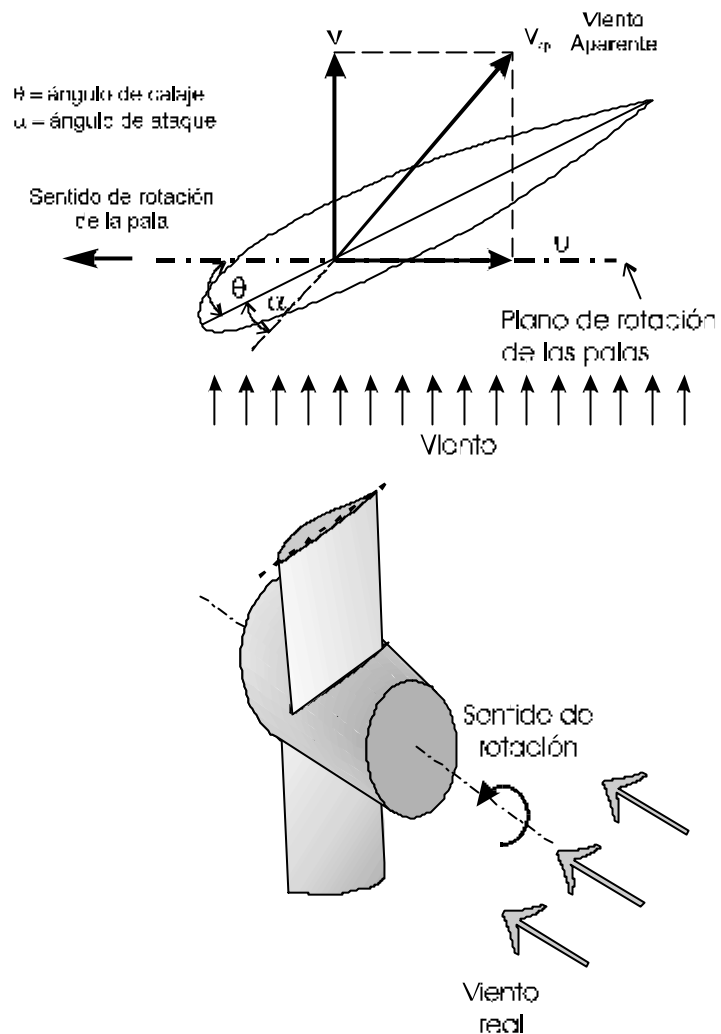


Figura 2 - Viento Aparente

Como cada sección de una pala tiene velocidad diferente el viento aparente también varía en el sentido longitudinal; por lo tanto, una pala ideal deberá presentar un ángulo de incidencia diferente a lo largo de toda su longitud, efecto que se logra dándole un **alabeo**. Asimismo, y también porque las velocidades son más altas al acercarnos a la punta de pala, el perfil podrá tener **dimensiones variables** para tener la misma fuerza resultante. Estas consideraciones son particularmente importantes en máquinas de gran tamaño. En molinos pequeños, por razones de simplicidad y fundamentalmente costos, se acostumbra optar por palas de sección constante y sin alabeo.

Si el viento no supera la denominada **velocidad de puesta en marcha** (valor mínimo necesario para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil) no es posible el arranque de un molino. Con velocidades mayores comenzará a girar entregando una potencia que responde a la conocida ley del cubo de la velocidad. Esto será así hasta que se alcance la **potencia nominal**, generalmente la máxima que puede entregar, punto en que comienzan a actuar mecanismos activos o pasivo de regulación para evitar que la máquina trabaje bajo condiciones para las cuales no fue diseñada. Continuará operando a velocidades mayores, aunque la potencia entregada no será muy diferente a la nominal, hasta que se alcance la **velocidad de corte** donde, por razones de seguridad, se detiene. En la Figura 3 se presenta una curva típica de potencia.

5. Tipos de maquinas eolicas

Desde los comienzos de la utilización de la energía eólica se han desarrollado gran cantidad de máquinas de los tipos más variados. Se dice que los pedidos de patentes superan a las de cualquier otro dispositivo que se haya ideado. De todos ellos, son relativamente pocos los que se generalizaron y alcanzaron escala de producción comercial.

Se acostumbra clasificar las máquinas eólicas según la posición del eje de rotación con respecto a la dirección del viento, pudiéndolos dividir en dos categorías principales:

-Molinos de eje horizontal.

Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

-Molinos de eje vertical.

Máquinas eólicas en las cuales el eje de rotación es perpendicular a la superficie terrestre y a la dirección del viento

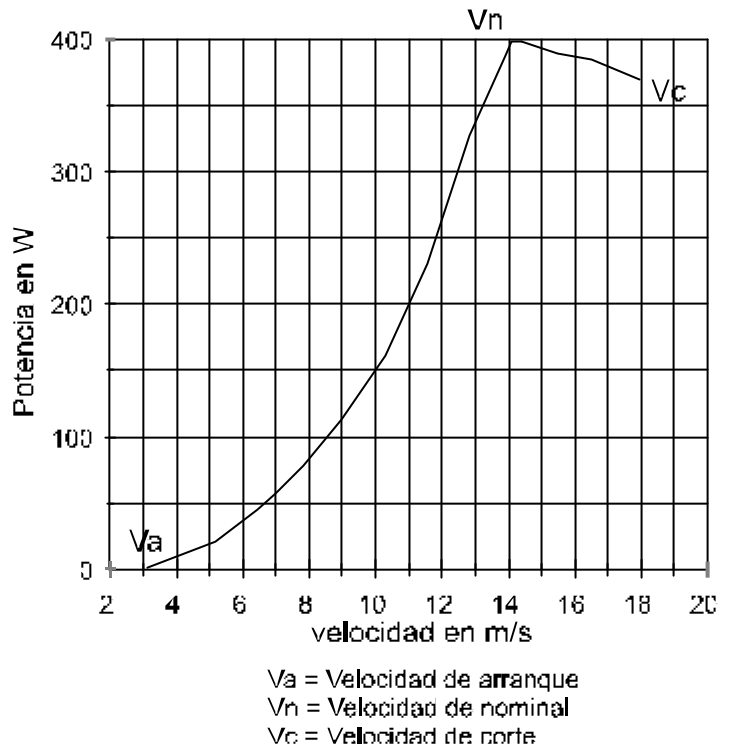
Existen otros tipos, como los molinos de eje horizontal perpendicular a la dirección del viento, o los que utilizan el desplazamiento de un móvil (Ver Figura 4a). Ambos casos podemos considerarlos como anecdóticos pues no han demostrado ser muy eficaces ni prácticos por lo que su desarrollo fue abandonado.

5.1 Molinos de eje horizontal

Los molinos de eje horizontal son los más difundidos y los que han permitido obtener las mayores eficiencias de conversión; los diseños más utilizados están representados en la Figura 4a. En su gran mayoría, la conversión de la energía disponible en el eje del rotor en otra forma de energía, se realiza mediante dispositivos ubicados sobre la torre. Tal es el caso de las turbinas eólicas destinadas a la producción de electricidad donde el generador eléctrico, acoplado al eje del rotor a través de un multiplicador, está localizado en la **navecilla**.

Las denominadas máquinas rápidas, con palas de perfil aerodinámico y casi exclusivamente empleadas para generación de electricidad, tiene rotores de 1 a 3 palas que, según los diseños, están ubicados a popa (sotavento) o a proa (barlovento) de

Figura 3 - Rendimiento típico de un aerogenerador pequeño (400 W)



la navecilla. Los rotores con palas a popa en principio no requieren de sistemas de orientación pues las fuerzas en juego tienden a orientarlo naturalmente, aunque en máquinas de gran tamaño se prefiere emplearlos para evitar los "cabeceos" que someterían las palas a vibraciones perjudiciales. En el caso de palas a proa los sistemas de orientación son imprescindibles; en molinos pequeños se emplean las clásicas colas de orientación pero en los grandes se prefieren los servomecanismos.

Existen diferentes modos de prevenir aumentos descontrolados de la velocidad de rotación del rotor en presencia de vientos fuertes, o de regularla ante condiciones variables de la carga. Ellos van desde el cambio de paso, o "calaje" de las palas, la utilización de "flaps" que se abren y aumentan la resistencia al viento, hasta dispositivos que desplazan el rotor de su orientación ideal logrando que aumenten las pérdidas aerodinámicas. Prácticamente todas las máquinas disponen de dispositivos de frenado para poder detenerlas bajo condiciones extremas de viento o efectuar reparaciones. En las máquinas relativamente pequeñas a veces se evitan estos mecanismos pues resulta más barato diseñarlas para soportar los máximos vientos esperables que adicionar sistemas de frenado.

Los rotores multipala, tipo americano, tienen por uso casi excluyente el bombeo de agua. Su alto par de arranque y su relativo bajo costo los hace muy aptos para accionar bombas de pistón. Se estima que en el mundo existen más de 1.000.000 de molinos de este tipo en operación.

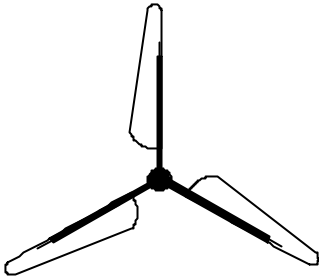
Molinos de Eje Horizontal



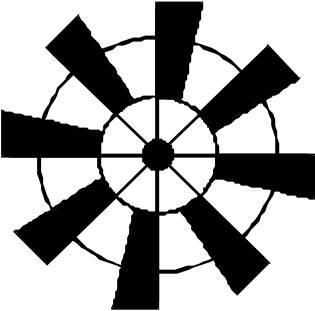
Monopala



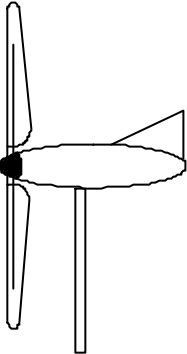
Bipala



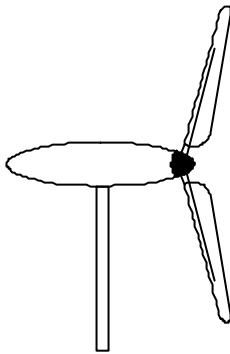
Tripala



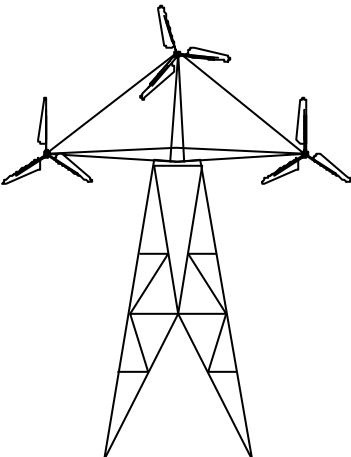
Multipala tipo americana



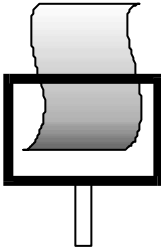
Palas a proa



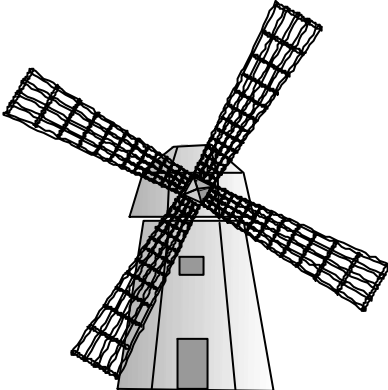
Palas a popa



Multi - rotor

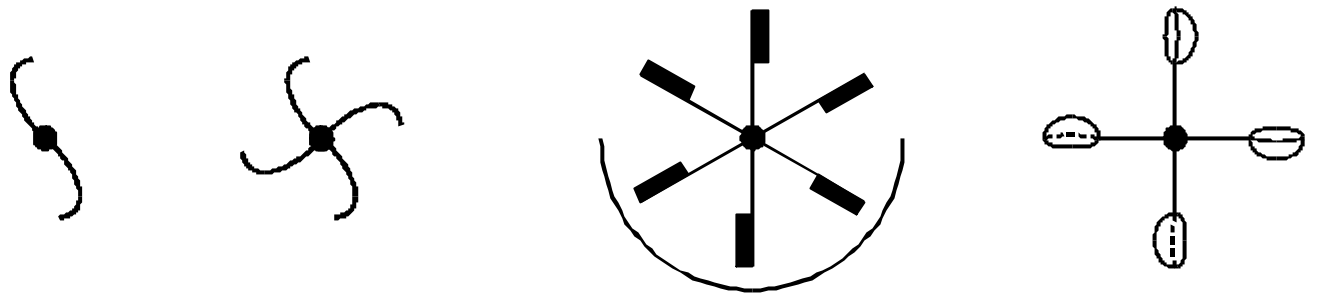


Savonius cruzado

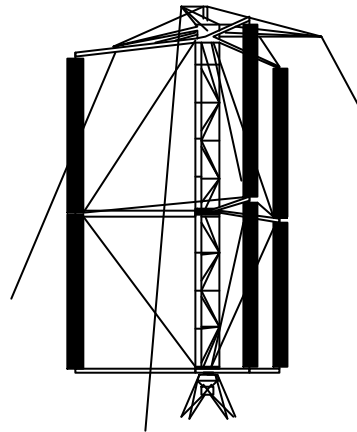
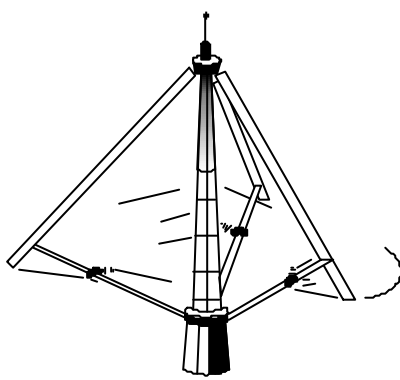
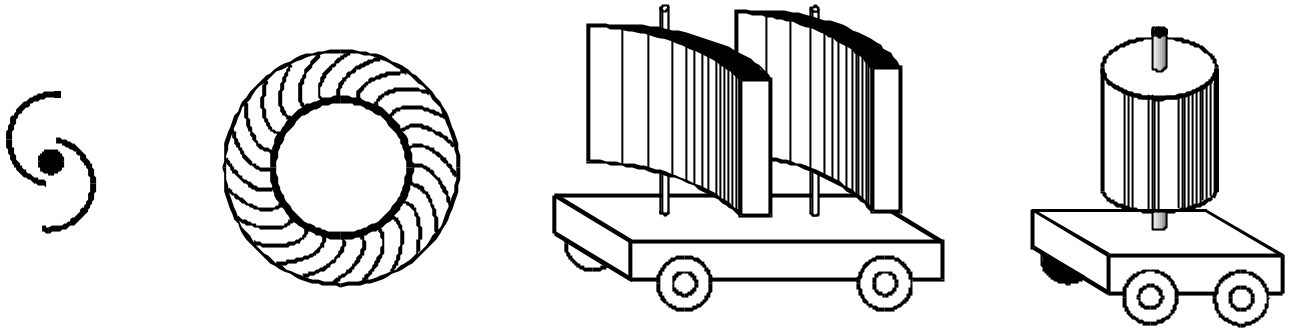


Molino holandés

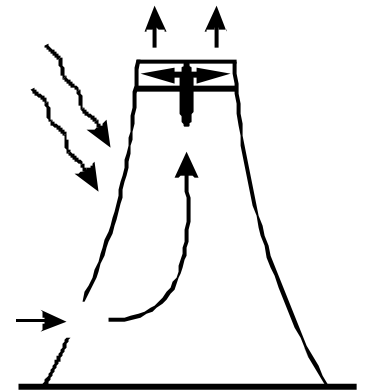
Figura 4a



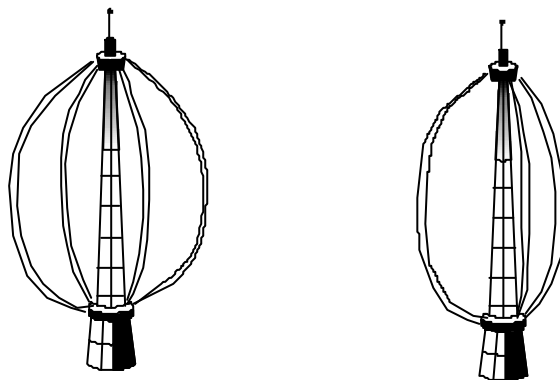
Savonius



Tipo Darrieus



Torre Vorticosa



Molinos de Eje Vertical

Figura 4a b

5.2 Molinos de Eje Vertical

La característica principal de los molinos de eje vertical es que no requieren de sistemas de orientación. Ventaja nada despreciable pues evita complejos mecanismos de direccionamiento y elimina los esfuerzos a que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Por su disposición permite colocar los sistemas de conversión prácticamente a nivel de suelo, evitando pesadas cargas en las torres, como ocurre en los de eje horizontal.

Existen dos diseños básicos de rotores de eje vertical: Savonius y Darrieus. El rotor Savonius trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque pero su eficiencia es pobre. Por su sencillez y bajo costo es fácil de construir con técnicas artesanales. Se los emplea en aplicaciones que requieren potencias pequeñas como es el caso de los extractores de aire en grandes edificios industriales o depósitos y en bombeo de agua.

Los rotores Darrieus, inventados por G.J.M.Darrieus en Francia en la década del 20, son actualmente los principales competidores de los de eje horizontal de palas aerodinámicas para la generación de electricidad. Las fuerzas dominantes son las de sustentación, tienen un par de arranque prácticamente nulo, pero entregan potencias altas por unidad de peso del rotor y por unidad de costo. El diseño original de palas curvadas a dado origen a otras configuraciones, tratando de mejorar algunas características constructivas u operacionales. Tal es el caso de la combinación con rotores Savonius para aumentar el par de arranque.

Se han concebido y ensayado otros tipos de máquinas eólicas de eje vertical. Tal es el caso de las torres vorticosas en las que se induce una circulación de aire, por el interior de una torre hueca, que succiona aire exterior haciéndolo pasar a través de una turbina ubicada en la base. Un esquema similar siguen las torres en donde el flujo de aire es inducido por calentamiento con energía solar. Estas variantes no han pasado del nivel de prototipo.

En la TABLA I se resumen las características salientes de los rotores eólicos más utilizados.

TABLA I

Características de rotores eólicos

Eje	Tipo de Rotor	Rendimiento Máximo	Características
HORIZONTAL	Holandés	0,17	<ul style="list-style-type: none"> - 30-60 kW - Alto par de arranque - Velocidades medias(*) - Diseño ineficiente de las palas - 4 palas
	Multipala Americano	0,15	<ul style="list-style-type: none"> - 0,4-6 kW - Alto par de arranque - Bajas velocidades - Muchas pérdidas - 12-15 palas
	Perfil Aerodinámico (hélices)	0,47	<ul style="list-style-type: none"> - 0,5-3.200 kW - Bajo par de arranque - Altas velocidades - Alto rendimiento - 1 a 3 palas
VERTICAL	Savonius	0,30	<ul style="list-style-type: none"> - 0-1,5 kW - No requiere ser orientado - Alto par de arranque - Bajas velocidades - 2 a 4 palas
	Darrieus	0,35	<ul style="list-style-type: none"> - 5-500 kW - No requiere ser orientado - No arranca solo - Altas velocidades - Buen rendimiento - 2 a 3 palas

(*) máquinas lentas son aquellas en las cuales la relación entre la velocidad de la punta de pala y la velocidad del viento es menor a 2, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mientras que en las máquinas rápidas esta relación es superior a 4.

6. APLICACIONES DE LAS MÁQUINAS EÓLICAS

La energía captada por el rotor de una máquina eólica se transforma inicialmente en energía mecánica disponible en un movimiento rotativo. Este movimiento puede utilizarse para impulsar dispositivos que la transformen en otras formas de energía: mecánica, eléctrica, térmica o potencial. Las aplicaciones más efectivas serán aquellas en las que se llega al uso final de la energía con el menor número de transformaciones.

TABLA I

APLICACIONES MAS USUALES DE LOS MOLINOS DE VIENTO

Objetivo	Categoría	Tipo de Rotor	Aplicación
Generación de energía eléctrica	Sistemas aislados o remotos	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal bipala o tripala rápidos 	<ul style="list-style-type: none"> – radioenlaces – comunicaciones – iluminación – electrodomésticos – seguridad
	Sistemas híbridos diesel eólicos	<ul style="list-style-type: none"> • Vertical Darrieus Horizontal 1 a 3 palas, rápidos 	– Abastecimiento eléctrico de comunidades o industrias aisladas.
	Sistemas conectados a las redes eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Vertical Darrieus • Horizontal 1 a 3 palas, rápidos 	– Abastecimiento eléctrico a través de redes de distribución
Obtención de Energía mecánica	Sistemas aislados o remotos	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal multipala • Vertical Savonius • Horizontal 1 a 3 palas, rápidos 	<ul style="list-style-type: none"> – Bombeo de agua – Molienda – Etc.

En términos generales, las aplicaciones de las máquinas eólicas pueden subdividirse en dos grandes grupos según el tipo de energía a obtener: energía mecánica o energía eléctrica (Ver TABLA I). Este último admite, según el servicio a prestar, tres clasificaciones bien diferenciadas: instalaciones aisladas o remotas, sistemas híbridos diesel-eólicos y sistemas interconectados a las redes de distribución de energía eléctrica. Cada una de estas aplicaciones tiene características particulares que condicionan tanto el tipo de máquina a utilizar como sus sistemas auxiliares.

6.1 *Generación de electricidad*

Para obtener electricidad a partir del viento es necesario accionar máquinas que, por arrancar prácticamente en vacío no exigen al rotor eólico un gran par de arranque.

Si a esto agregamos las mayores eficiencias de los rotores rápidos (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), es fácil comprender porqué son los que se emplean casi con exclusividad para generación de electricidad.

Los generadores eléctricos pueden ser de corriente continua (**dínamos**) o de corriente alterna, existiendo en este último caso dos tipos: generadores sincrónicos o alternadores y generadores asincrónicos o de inducción. Las dínamos tienen el inconveniente de utilizar escobillas, que exigen mantenimiento periódico, y son más pesadas y caras que los generadores de corriente alterna (C.A.) de igual potencia; aunque tienen la ventaja de no necesitar de sistemas especiales para cargar baterías, su uso se ha ido abandonando reemplazándolos por los generadores de C.A., con la excepción de algunos equipos para proveer muy bajas potencias, de construcción artesanal.

El tipo de generador de C.A. que se utilice depende fundamentalmente de las características del servicio a prestar. Como regla general puede decirse que los alternadores son mayoritariamente usados en máquinas que alimentan instalaciones autónomas y los generadores de inducción en turbinas eólicas interconectados con otros sistemas de generación.

Esto es así pues los generadores de inducción tienen la enorme ventaja de que, una vez en marcha y conectados a las líneas de distribución, giran a una velocidad constante impuesta por la frecuencia de la red, entregando más o menos energía según la intensidad del viento, pero siempre rotando al mismo número de revoluciones. En otras palabras, los aerogeneradores no requieren de costosos sistemas de regulación de velocidad, ventaja a la que se adiciona la apreciable diferencia de costos entre un generador asincrónico y un alternador de la misma potencia. Es importante destacar que los generadores asincrónicos necesitan tomar energía de la red para mantener la corriente de magnetización; de interrumpirse esta conexión la máquina debe ser frenada para evitar su aceleración.

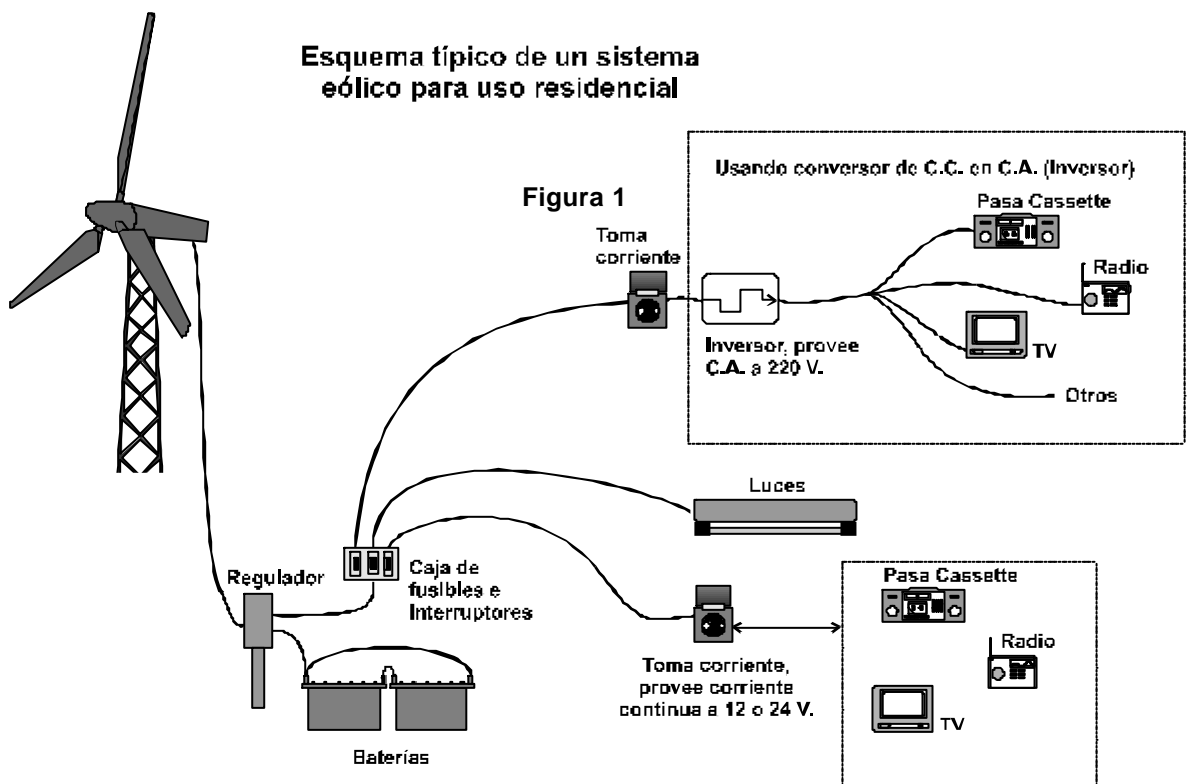
Los generadores sincrónicos, aunque tienen un mayor rendimiento potencial, deben operar a velocidad constante si se quiere mantener fija la frecuencia. El mantenimiento del número de revoluciones, acorde con la frecuencia de línea, es función exclusiva del motor que los impulsa (en nuestro caso el rotor eólico), siendo necesario elaborados sistemas de control. Distinto es el caso de las aplicaciones en que la única fuente de abastecimiento es el aerogenerador. En ellos el uso de generadores sincrónicos es casi obligado, pero no tan crítico el mantenimiento de la frecuencia de la C.A. generada pues, por lo general, los equipos a alimentar toleran variaciones en la frecuencia.

Es un hecho también que la variabilidad del recurso exige, en muchas instalaciones aisladas, acumular energía en baterías y desde ellas alimentar la demanda. En estos casos la frecuencia no tiene ninguna importancia pues habrá rectificadores que transformaran la C.A. en corriente continua (C.C.). Es obvio entonces que la utilización de alternadores responde en estos casos a la búsqueda de menores costos y mejores rendimientos y no a una característica del servicio.

El acoplamiento entre rotor eólico y generador se realiza a través de una caja multiplicadora. Su empleo es necesario pues a medida que crece el diámetro deben limitarse las r.p.m. del rotor para evitar que las puntas de las palas trabajen a velocidades que comprometan la resistencia de los materiales empleados o induzcan vibraciones perjudiciales. Por otra parte, los generadores comerciales requieren girar a velocidades que están entre las 1000 y las 3000 r.p.m., dependiendo de sus características constructivas y la frecuencia a obtener.

6.2 Configuración y Características de los Generadores Eólicos Aislados

La configuración típica de un sistema autónomo está representado en la Figura 12. Las potencias van de 0,15 hasta 10 kW. Se emplean rotores de eje horizontal habiendo máquinas de paso variable y de paso fijo. Se prefieren estas últimas pues presentan menos problemas de mantenimiento aunque en este caso serán necesarios dispositivos que la protejan ante vientos muy fuertes. Las soluciones adoptadas van desde sistemas excéntricos que “desalinean” al aerogenerador de su posición enfrentada al viento a sistemas de frenado que evitan que la palas giren en condiciones adversas. En la gran mayoría de los casos se emplean generadores sincrónicos de imán permanente y la acumulación se realiza en baterías de plomo-ácido. Para alimentar equipos que requieran C.A. desde las baterías es necesario utilizar convertidores de C.C. a C.A., llamados **inversores**.



Se han implementado sistemas autónomos para los más variados usos: alimentación de repetidoras de TV y telefonía, faros, instalaciones domiciliarias, etc. En todos ellos pudo demostrarse la factibilidad técnica. Estudios comparativos realizados en varios países indican que los aerogeneradores son económicamente competitivos con otros sistemas de abastecimiento eléctrico aislado cuando se trata de potencias no muy superiores a los 5 kW y el recurso eólico es abundante. Otros estudios indicaron que en el caso de electrificación rural puede competir, bajo ciertas condiciones, con la conexión a las redes. Se estimó que para demandas domiciliarias \cong 200 kWh/mes y velocidades de viento > 4 , m/s la generación eólica podía competir con el tendido de líneas más allá de los 5 km.

Tomando en cuenta que en el mundo aproximadamente 1.500 millones de personas no tiene acceso a los servicios eléctricos centralizados y que existe un sinnúmero de requerimientos de baja potencia, el mercado potencial para la generación eólica autónoma es sumamente amplio y promisorio.

6.3 Sistemas Híbridos Diesel-Eólicos.

En ciertas regiones del mundo, particularmente islas y países en desarrollo, se dan condiciones demográficas, geográficas o económicas que limitan la posibilidad de brindar abastecimiento eléctrico desde las redes interconectadas nacionales. Esto ha dado origen a la instalación de una gran cantidad de pequeñas redes aisladas, alimentadas, por lo general, con generadores diesel.

Debido al pequeño tamaño de las instalaciones o a su ubicación aislada, los costos de generación son apreciablemente más altos que los de los sistemas interconectados. Costos operativos en el rango de 1,5 a 4 ¢US/kWh son usuales en la generación en gran escala, mientras que valores entre 5 y 20 ¢US/kWh, y aún mayores, son típicos en instalaciones aisladas. Si se toma en cuenta que en lugares con buen viento se puede generar energía eléctrica en el rango de 5-15 ¢US/kWh, la operación en paralelo de aerogeneradores y equipos diesel surge como una alternativa interesante.

Hasta ahora, prácticamente todas las instalaciones Diesel-Eólicas fueron hechas con fines de demostración y están en un nivel de desarrollo que podríamos catalogar como prototipo. Si bien existe suficiente información sobre cada uno de los componentes, los datos operativos acumulados de instalaciones completas no son muy abundantes ni cubren períodos prolongados de funcionamiento. Los resultados son muy alentadores aunque todavía insuficientes para permitir el paso a una escala comercial comparable a la dada en los sistemas aislados o en los interconectados a las redes.

Una estrategia que se ha comenzado a emplear en los sistemas diesel-eólicos relativamente pequeños (5-15 kW) es la de incorporar acumulación en baterías y sólo emplear el generador diesel para recargar baterías y haciéndolo operar en el punto de máxima eficiencia. En estos casos el costo de la acumulación es compensado por el menor costo operativo del motor diesel.

6.4 *Aerogeneradores acoplados a las redes eléctricas*

Al margen de algunas experiencias aisladas como la del aerogenerador de 100 kW nominales instalado en Balaclava, URSS, que operó entre 1931 y 1942 o el aerogenerador 1,25 MW instalado en Grandpa's Knob, Vermont, USA en 1940, es a partir de comienzos de la década del 80 que la utilización del recurso eólico para generación de energía eléctrica experimentó un salto cualitativo y cuantitativo espectacular.

Esta es la aplicación actual más significativa de los aerogeneradores desde el punto de vista del total de energía generada. Países como Estados Unidos de América y Dinamarca, por mencionar los casos más destacables, han incentivado la generación eléctrica de origen renovable favoreciendo la implantación de los llamados parques o plantas eólicas. Países como EEUU de Norteamérica, Dinamarca y Alemania, entre otros, han promovido la instalación de grandes máquinas conectadas a las redes eléctricas, estimándose en la actualidad unos 25.000 aerogeneradores conectados a las redes.

Si bien las crisis petroleras de la década del 70 influyeron, en gran medida, en el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas, su real penetración en el mercado de la generación eléctrica no hubiera sido posible sin la creación de un marco legal, económico y político favorable para las inversiones del sector privado, como lo es la ley PURPA en los Estados Unidos de América. Es muy importante destacar este aspecto pues hay muchas regiones en el mundo donde existen condiciones climáticas iguales, o mejores, a las de Dinamarca o EE.UU. pero, sin un marco adecuado, estas inversiones son impensables.

Los aerogeneradores de tres palas son quienes dominan el mercado actual de tecnología (solo 3% son Darrieus o bipala). Con potencias que van desde los 50 a algo más de 1 MW, se producen en escala totalmente comercial. La gran mayoría utilizan generadores asincrónicos. El tamaño de las máquinas ha ido creciendo con el desarrollo tecnológico; a comienzos de la década del 80 eran usuales potencias entre 30 y 100 kW, actualmente la mayoría de las máquinas que se están instalando tienen potencias entre 400 kW y 1 MW. La mayor máquina de eje horizontal construida hasta la fecha tiene 3,2 MW nominales (100 metros de diámetro) y está en operación en Hawai desde 1987.

El costo de la energía generada es comparable a muchos sistemas de generación convencional. Los valores de la TABLA II son el resultado de un estudio realizado por la Comisión de Energía del Estado de California en 1988. Los costos de instalación son también comparables y están en el orden de 1000-1200 \$US/kW. Los factores de utilización oscilan entre 15 y 30%, dependiendo del lugar de instalación y del tipo de máquinas. Con el mejoramiento del diseño de los rotores y, sobre todo, con el desarrollo de metodologías para localizar parques eólicos y aerogeneradores, los factores de utilización en las nuevas instalaciones tienden a ubicarse en el orden del 30%, valor que se aproxima al de muchas centrales hidráulicas.

TABLA II

TIPO DE CENTRAL	COSTO DE LA ELECTRICIDAD ¢US/kWh
Eólica	5-22
Carbón	3-11
Nuclear	4-18
Fuel-Oil	4-14
Gas Natural	2-10
Hidráulica	3-20
Biomasa	6-14
Fotovoltaica	10-37

El estado de California, EE.UU., fue una región piloto para el desarrollo de los parques eólicos. Actualmente en las regiones de Altamont Pass, Tehachapi y San Gorgonio funcionan unos 14.500 molinos entregando más de 2.300 millones de kWh en las redes eléctricas, equivalente a la demanda residencial de una ciudad como San Francisco y economizando unos 430.000 m³ de petróleo por año. El más importante de los parques, Altamont Pass, tiene aproximadamente 7.300 aerogeneradores entre 40 y 750 kW y fue desarrollado por una veintena de empresas utilizando máquinas de distintos orígenes pero en su gran mayoría norteamericanas y dinamarquesas.

6.5 Obtención de Energía Mecánica.

Estas aplicaciones, típicamente autónomas, fueron históricamente las primeras y se las destinó a mover todo tipo de máquinas. La invención de los motores de combustión y del generador eléctrico (y el desarrollo de los sistemas de distribución) originaron su paulatino reemplazo por motores más controlables y estables en el tiempo.

En el caso de los molinos de viento destinados al bombeo de agua ocurrió un proceso similar al implementarse la electrificación rural, sobre todo en los países más desarrollados. Del total de 6.000.000 de molinos producidos en los EE.UU. hasta comienzos del siglo XX solo 150.000 quedan en operación en nuestros días. En regiones menos desarrolladas, el bombeo de agua con máquinas eólicas continuó siendo en muchos casos la única alternativa económicamente viable. En islas de

Grecia, donde aún se utilizan los molinos con palas de tela, y en la llamada pampa húmeda de Argentina y en las grandes llanuras australianas, donde se impusieron los molinos multipala tipo americano, las máquinas eólicas pueden contarse de a miles.

En lo que va del siglo XX, los molinos destinados al bombeo de agua no fueron objeto de desarrollos significativos. Las máquinas más utilizadas en la actualidad (multipala), con excepción de la incorporación de nuevos materiales, no difieren en mucho de las desarrolladas hace más de 100 años. Actualmente se están estudiando máquinas con acoplamiento directo a bombas centrífugas, salto tecnológico importante que podría permitir la extracción de mayores volúmenes de agua y alcanzar mayores profundidades que las permitidas por las bombas de pistón.

7. CONCLUSIONES

Las turbinas eólicas han experimentado durante los últimos 20 años un desarrollo significativo. Se han mejorado los rendimientos, ha aumentado la confiabilidad y se han reducido los costos. El único punto sobre el que quedan algunas dudas es la durabilidad. Si bien en los cálculos se acostumbra tomar 20 años de vida útil, por el momento, ninguna de las máquinas actualmente en operación ha alcanzado ese tope. La industria es aún demasiado joven y debe esperar unos 10 años más para demostrar con los hechos que esa meta es alcanzable; las tecnologías y materiales empleados dan un margen de confianza razonable.

Tanto en el campo de las pequeñas potencias como en el de los sistemas conectados a las grandes redes de distribución, la energía eólica puede competir, si las condiciones son adecuadas, con los sistemas convencionales de generación. Sus limitantes más importantes son, quizás, el desconocimiento que muchos tienen de esta realidad y la falta de incentivos para la realización de inversiones en el sector.