

LA VERITAT

(www.amics21.com)



Cómo empezar a intentar construir un sencillo generador eólico

por Manuel Franquesa Voneschen¹

Índice

Introducción.....	2
1. El señor Betz, la energía del viento y la potencia de un aerogenerador	2
2. Velocidad de giro de una eólica	3
3. Un poco de aerodinámica.....	4
4. Construcción de la eólica	5
5. Molino de Creta.....	13
Conclusión.....	16
Anexo: Fotos comentadas de un prototipo.....	17

¹ Autor de "Kleine Windräder : Berechnung u. Konstruktion" - Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag, 1989. ISBN 3-7625-2700-8. **El autor puede ser contactado vía Facebook.**

Introducción

Piensa globalmente, actúa localmente.

Tarde o temprano, el calentamiento global y la escasez del petróleo nos obligarán a buscar energías más respetuosas con la naturaleza.

Este breve manual te dará una idea de cómo se puede construir un pequeño aerogenerador con materiales sencillos.

¡Pero ojo: como toda máquina que gira, un aerogenerador es un artefacto bastante **peligroso!**

¡Hay que utilizar piezas MUY ROBUSTAS!

1. El señor Betz, la energía del viento y la potencia de un aerogenerador

La máxima potencia que le **podríamos** extraer al viento, ya sea con un molino de viento quijotesco o un aerogenerador de última generación (en lo siguiente “eólica”), se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot v^3$$

- **P** es la potencia expresada en **vatios [W]**
- **D** es el diámetro del rotor en **metros [m]**
- **v** es la velocidad del viento en **metros por segundo [m/s]**.

Esta sencilla fórmula es fruto del señor **Betz**², un sabio alemán que en 1926 publicó el primer tratado sobre la teoría aerodinámica aplicada a las turbinas eólicas. Esta fórmula también es conocida como **límite de Betz**.

Lo primero que salta a la vista es que la potencia aumenta con el cubo de la velocidad del viento, o, expresado de otro modo, a **más** viento, **mucha más** energía.

Sin embargo, en la vida real no será posible alcanzar este valor, ya que todos los componentes de una eólica tienen pérdidas aerodinámicas o mecánicas (el rotor, los cojinetes, el sistema de transmisión, el generador, los cables, la batería para almacenar la electricidad producida, etc.).

De modo que para **estimar** la potencia máxima de una eólica real usaremos la siguiente fórmula (asumiendo un rendimiento global de toda la máquina eólica de aprox. 50%):

² Hemos traducido al castellano buena parte del libro de Betz:
www.amics21.com/laveritat/betz_energia_eolica.pdf

$$P = 0,15 \cdot D^2 \cdot v^3$$

Ejemplo:

¿Qué potencia máxima podría generar una eólica cuyo rotor tiene un diámetro de 6 metros?

Si el viento sopla a 10 m/s (= 36 km/h), la potencia del molino será

$$P = 0,15 \cdot 36 \cdot 10^3 = 5400 \text{ [W]} = \mathbf{5,40 \text{ [kW]}}$$
 (1 kW = 1000 W)

Pero si sopla a 20 m/s = 72 km/h (¡un viento “peligroso” para una eólica casera!), la potencia será

$$P = 0,15 \cdot 36 \cdot 20^3 = 43200 \text{ [W]} = \mathbf{43,20 \text{ [kW]}}$$

Conclusión: a doble velocidad del viento, la eólica desarrollará **8 veces** más potencia.

2. Velocidad de giro de una eólica

La velocidad de giro de una eólica se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$n = (60 \cdot \lambda \cdot v) / (\pi \cdot D)$$

- **n** es el **número de revoluciones por minuto [rpm]**
- **λ** se llama velocidad específica. Este factor depende del tipo de eólica (rápida o lenta). Puede tener un valor comprendido entre aprox. 0,9 y 14. En la eólica que vamos a construir, este factor será de aprox. 4.
- **v** es la velocidad del viento en **metros por segundo [m/s]**.
- **D** es el diámetro de la eólica en **metros [m]**

La velocidad específica **λ** se define del siguiente modo:

$$\lambda = u_o/v$$

donde **u_o** es la velocidad (tangencial) de las puntas de las palas del rotor y **v** la velocidad del viento, ambas expresadas en [m/s] (Fig. 2.2.-1)

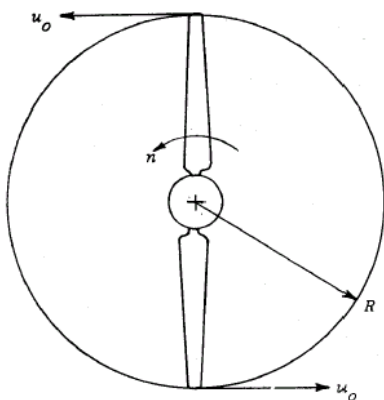


Fig. 2-1 Velocidad **u_o** de las puntas de las palas de una eólica

Para hacerse una idea:

En un aerogenerador moderno de 20 metros de diámetro (los que se utilizan en los controvertidos parques eólicos), la velocidad específica es del orden de $\lambda = 8$.

Calculemos con esta fórmula su velocidad de giro bajo un viento de 10 m/s (= 36 km/h):

$$n = (60 \cdot 8 \cdot 10) / (\pi \cdot 20) = 76,4 \text{ rpm}$$

No parece mucho, ¡pero las puntas de las palas giran a **288 km/h!** Esto produce bastante ruido y es un grave peligro para las aves.

Reglas generales:

- a más diámetro, menor velocidad de giro
- un mayor número de palas no aumenta necesariamente la velocidad de giro, pero sí el rendimiento de la eólica.

3. Un poco de aerodinámica

Las palas de un eólica no son otra cosa que alas de avión girando alrededor de un eje.

Al despegar, el motor empuja el avión hacia delante y las alas comienzan a “cortar” el aire. Al estar perfiladas y ligeramente inclinadas (ángulo de ataque), la circulación del aire alrededor de las alas crea una sobrepresión en la parte inferior de las mismas. Esta presión “empuja” las alas hacia arriba y, por consiguiente, el avión “vuela”.

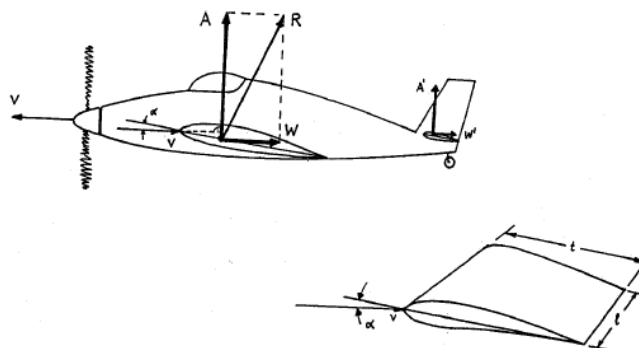


Fig. 3.1 A fuerza de sustentación, W fuerza de resistencia del ala (R resultante)

Como todo invento humano, las alas no son ideales: ofrecen resistencia al aire, a costa del consumo de combustible del avión.

La hélice del avión también tiene unas alas más pequeñas, que giran alrededor del eje del motor, “enroscándose” en el aire como un sacacorchos. En este contexto hay que decir que los aviones a hélice tienen un mejor rendimiento que los aviones a chorro, pero son más lentos. Desde el punto de vista medioambiental, los motores de propulsión a chorro son máquinas prehistóricas. Lo que genera su descomunal potencia no es otra cosa que un chorro de gases de escape mal quemados, cuya composición no se conoce con exactitud, que dejan en nuestra delgada atmósfera³ miles de billones de partículas de todos los tamaños altamente nocivas.

La sección de un ala moderna tiene un perfil en forma de gota alargada. Esta forma aumenta el empuje y disminuye la resistencia. Las alas largas, estrechas y delgadas tienen un rendimiento mucho más elevado que las cortas, anchas y gruesas. Un buen ejemplo son los albatros, que pueden volar durante días sin apenas mover las alas, o los planeadores en los Alpes suizos, que tienen alas extremadamente largas y estilizadas, gracias a las cuales pueden permanecer en el aire durante horas a pesar de no tener motor.

La ventaja de las eólicas (pequeñas) es que gracias a que el viento es (sigue siendo) gratuito, las palas no necesitan ser tan sofisticadas. ¡Las aspas de los viejos molinos a menudo eran simples tablas inclinadas de madera! El menor rendimiento de las palas más sencillas puede ser compensado aumentando ligeramente el diámetro del rotor.

4. Construcción de la eólica

4.1 Descripción de la máquina

Vamos a construir una eólica de velocidad específica nominal $\lambda_d = 4$ y un rotor de 2 metros de diámetro. Como generador de electricidad utilizaremos un alternador de automóvil con su correspondiente regulador.

Las palas rectangulares y ligeramente curvadas (“flecha” = 5% de la anchura de las palas) las haremos de chapa metálica, preferentemente aluminio. El grosor de la chapa debería ser aprox. un 1,5% de la anchura de las palas (ver más abajo).

³ La atmósfera tiene una altura entre 30 y 50 km. Si comparamos esta distancia con los aprox. 12000 km de diámetro que tiene la Tierra, la atmósfera es como una capa de látex de 1,5 mm de espesor aplicada a un balón de fútbol de 30 cm de diámetro.

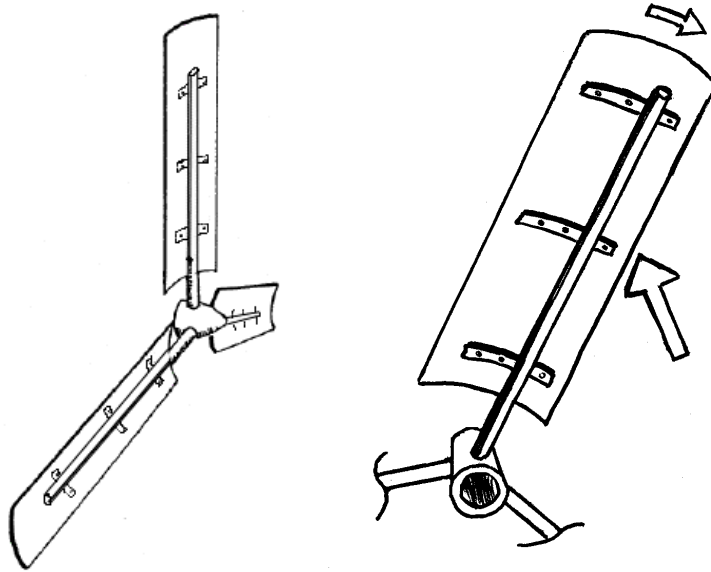


Fig. 4.1-1

Izquierda: rotor eólico con palas de chapa curvada

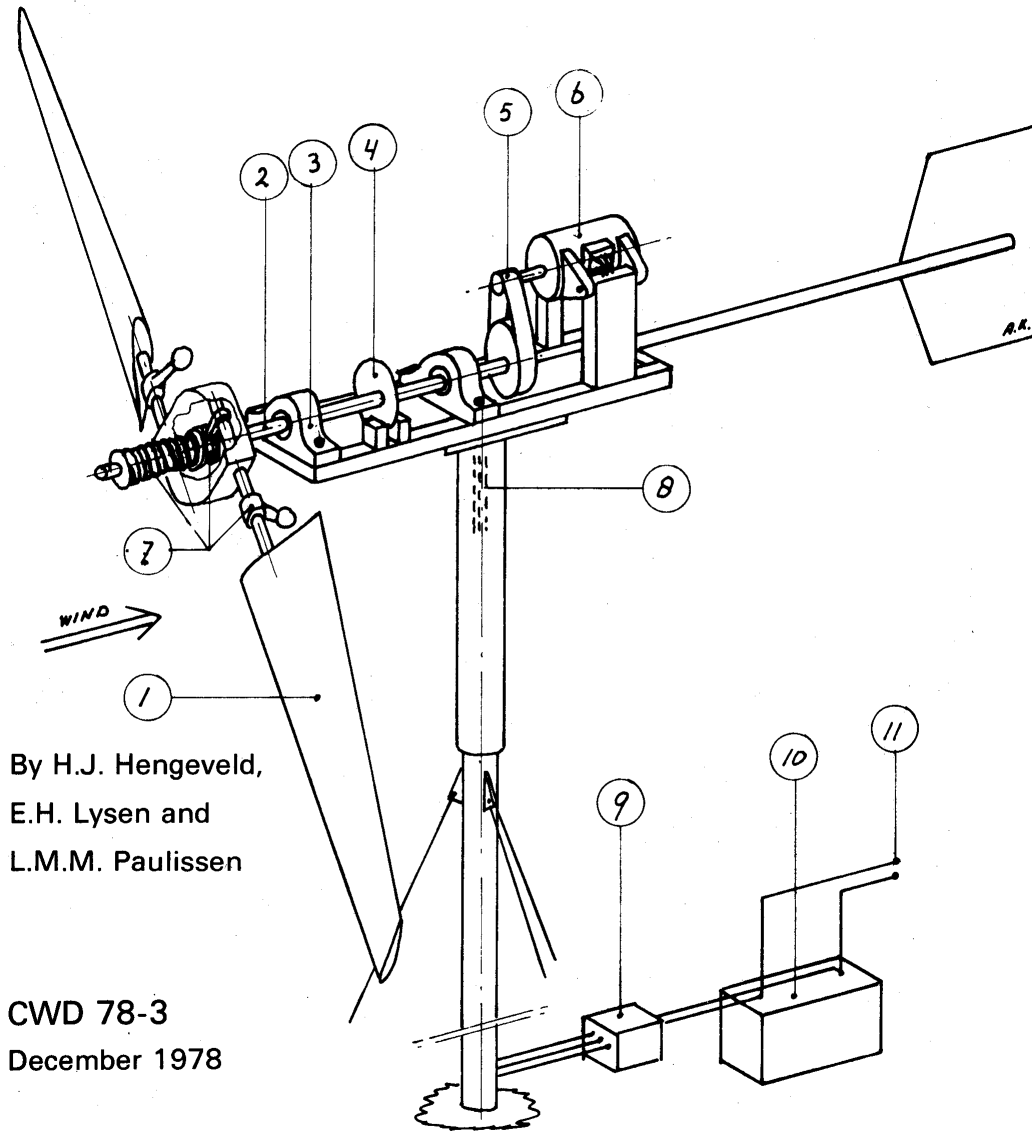
Derecha: una posibilidad de fijar las palas (por razones aerodinámicas es importante que la barra se encuentre en el intradós de las palas (la cara atacada por el viento), de lo contrario su rendimiento aerodinámico será considerablemente inferior.

Lo más difícil será encontrar el “cuerpo” de la eólica, es decir, el cojinete que transmitirá la rotación de las palas al generador (¡en los desguaces hay infinidad de piezas de coche o camión que podrían servir!).

- debe ser sólido
- debe tener un eje, que en un lado tenga un disco o similar para fijar las palas y en el otro extremo la posibilidad de fijar la polea de transmisión para el alternador

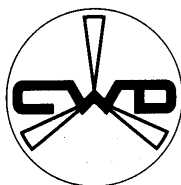
A continuación (Fig. 4.1-2) reproducimos la portada del excelente libro de *Hengeveld, Lysen et Paulissen* sobre la adaptación de rotores eólicos a generadores eléctricos de baja potencia. El dibujo es sumamente inspirador.

Matching of wind rotors to low power electrical generators



By H.J. Hengeveld,
E.H. Lysen and
L.M.M. Paulissen

CWD 78-3
December 1978



CONSULTANCY SERVICES
WIND ENERGY
DEVELOPING COUNTRIES

P.O. BOX 85
3800 AB AMERSFOORT
THE NETHERLANDS

Fig. 4.1-2

1 rotor, 2 eje, 3 cojinete, 4 freno de disco, 5 poleas de transmisión, 6 generador eléctrico (por ejemplo alternador de coche), 7 mecanismo centrífugo para modificar el ángulo de calado de las palas (regulación de la velocidad de giro del rotor), 8 cables, 9 regulador, 10 batería, 11 cables hacia el consumidor

4.2 Datos más importantes de la eólica

4.2.1 Anchura, ángulo de calado y flecha f de las palas rectangulares curvadas (5%) / grosor mínimo de la chapa

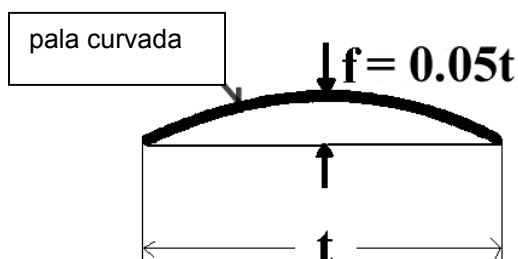


Fig. 4.2-1 Definición de la curvatura de la pala

Diámetro del rotor D	2 metros				
Número de palas* z	2	3	4	5	6
Anchura de las palas t **	31,4 cm	21 cm	15,7	12,6	10,5
Ángulo de inclinación (o de calado) de las palas***	10°	10°	10°	10°	10°
Flecha de las palas f	16 mm	11 mm	8mm	6 mm	5 mm
Grosor mínimo de la chapa	4 mm	3 mm	2 mm	2 mm	2 mm

* Nota: cuántas más palas, mayor será el rendimiento de la eólica

** Para otros diámetros y número de palas z , la anchura de las palas en [cm] puede calcularse con la siguiente fórmula $t[\text{cm}] = 31,4 \cdot (D[\text{m}]/z)$. Ej.: $D = 1 \text{ m}$, $z = 4 \rightarrow t = 31,4 \cdot (1/4) = 7,85 \text{ cm}$

*** Ángulo que las palas forman con el plano del rotor (perpendicular a la dirección del viento). Este ángulo no depende del diámetro ni del número de palas, sino sólo de la velocidad específica λ_d de la eólica contemplada

4.2.2 Valores aproximados de la velocidad óptima de giro, la potencia, el par de arranque y el par de giro de la eólica en función de la velocidad del viento

Velocidad del viento v	8 m/s	10 m/s	12 m/s
Potencia P_{max}	300 W	600 W	1000 W
Velocidad óptima de giro n_{opt}	305 rpm	380 rpm	460 rpm
Par de arranque M_o	4 Nm	6 Nm	9 Nm
Par de giro* M	9 Nm	15 Nm	20 Nm

*) El par de giro M se calcula con la siguiente fórmula: $M [\text{Nm}] = (60 \cdot P)/(2 \cdot \pi \cdot n)$ (Nota: Para obtener el par de giro en Newton metros [Nm] hay que introducir P en [W] y n en [rpm])

4.2.3 Factor de multiplicación entre el rotor eólico y el alternador

Es importante decir aquí que un alternador de coche no es la mejor elección para un aerogenerador. Tienen un pésimo rendimiento (probablemente un efecto secundario de los bajos precios del petróleo de

antaño): **raramente superará el 50%**! Sin embargo, tienen algunas ventajas: son muy robustos y baratos (chatarreros). Si no necesitamos que nuestro aerogenerador tenga un alto rendimiento, podemos empezar tranquilamente con un alternador de coche.

Un alternador de coche requiere una determinada velocidad de giro para empezar a suministrar corriente (como mínimo 750 rpm). Teniendo en cuenta que el rotor eólico gira mucho más lentamente, tendremos que prever un sistema de transmisión. La solución más simple es fijar al eje del rotor eólico una polea grande (por ejemplo la llanta de una rueda de bicicleta o la polea de transmisión del tambor de una vieja máquina de lavar), que uniremos a la polea del alternador mediante una correa o similar (ver Fig 4.1-2, Ref. 5).

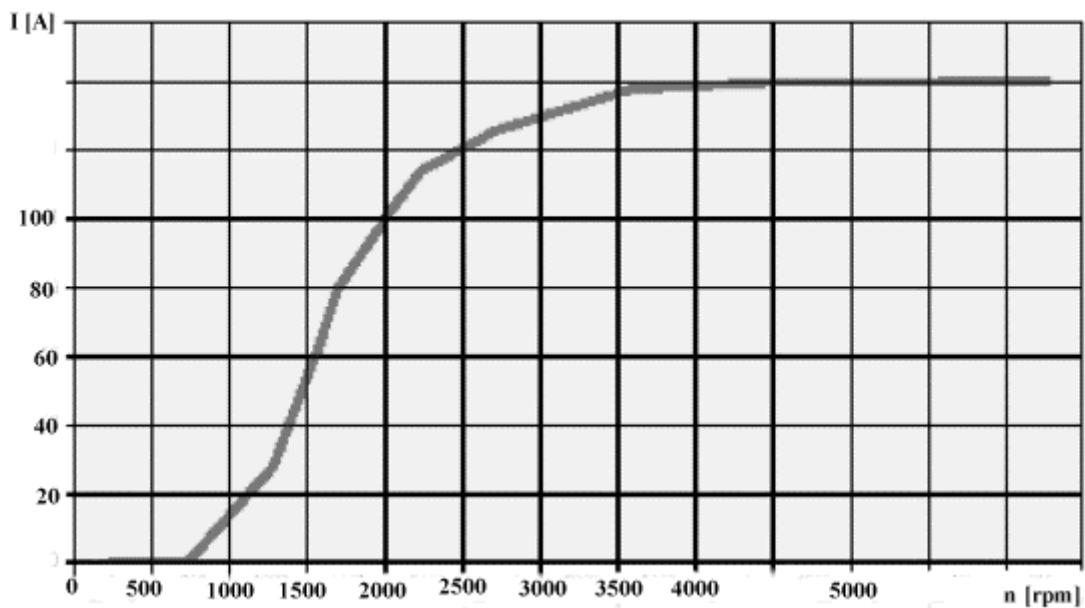


Fig. 4.2.3 Curva de corriente de un típico alternador de coche

Vemos que este alternador empieza a suministrar corriente a aprox. 750 rpm. A aprox. 1250 rpm, la corriente es de unos 25 amperios.

La siguiente tabla indica el factor de multiplicación en función de la velocidad de giro bajo la cual el alternador que tengamos a mano comienza a suministrar corriente (n_0):

Velocidad de giro (rpm) bajo la cual el alternador empieza a generar corriente (n_0)	1000	1200	1400	1600
Factor de multiplicación	2,6	3,2	3,7	4,2

Una vez determinados el factor de multiplicación, el diámetro de la rueda de transmisión solidaria al eje del rotor eólico dependerá del diámetro de la polea del alternador y de la velocidad de giro requerida por éste.

diámetro de la polea del rotor = $k \cdot$ diámetro de la polea del alternador
--

Velocidad mínima de giro del alternador $n_o = 1000$ rpm

Diámetro de la polea del alternador	4 cm	6 cm	8 cm
Diámetro aprox. de la rueda de transmisión de la eólica	10 cm	15 cm	20 cm

Velocidad de giro del alternador $n_o = 1200$ rpm

Diámetro de la polea del alternador	4 cm	6 cm	8 cm
Diámetro de la rueda de transmisión de la eólica	12 cm	20 cm	19 cm

Velocidad mínima de giro del alternador $n_o = 1400$ rpm

Diámetro de la polea del alternador	4 cm	6 cm	8 cm
Diámetro de la rueda de transmisión de la eólica	15 cm	22 cm	30 cm

Velocidad mínima de giro del alternador $n_o = 1600$ rpm

Diámetro de la polea del alternador	4 cm	6 cm	8 cm
Diámetro de la rueda de transmisión de la eólica	17 cm	25 cm	33 cm

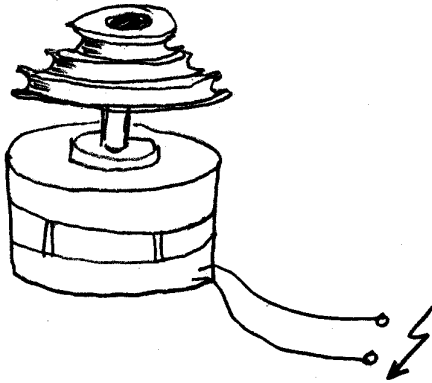
Existen poleas de máquinas o motores de todos los tamaños. Quien busca (en los desguaces) encuentra.

Observaciones:

1. Como se desprende de estas tablas, conviene utilizar un alternador con una polea de menor diámetro, de lo contrario la polea grande necesitará tener un diámetro mayor.

De todos modos, el diámetro ideal deberá encontrarse probando (utilizando el famoso "método probar y corregir"). Los motores de las taladradoras de sobremesa tienen una pieza cónica, formada por una torre de poleas de diferente diámetro (polea múltiple). Esto permite encontrar más rápidamente la

velocidad óptima de giro (prever un sistema para poder subir y bajar y tensar el alternador cada vez que se prueba otro diámetro.



Alternador con polea triple

Sobre el sistema eléctrico no diremos mucho. **Consultad con un buen mecánico o electricista de coches.** Es importante montar el alternador con su correspondiente **regulador**, que impide que la tensión suba demasiado, limita la corriente de carga y desconecta la batería cuando ésta está llena.

2. Cuanto mayor el factor de multiplicación, tanto mayor será el par de arranque del conjunto rotor eólico-generador, es decir, el rotor eólico le costará arrancar, sobre todo cuando el generador está excitado. Por este motivo es importante prever un sistema de regulación (en algunos casos puede servir el que el generador tenía en el automóvil (→ consular con el mecánico), que por un lado limita la corriente y por el otro mantiene interrumpida la corriente de excitación hasta que el generador haya alcanzado una determinada velocidad de giro.

4.2.4 La cola o timón de la eólica (veleta)

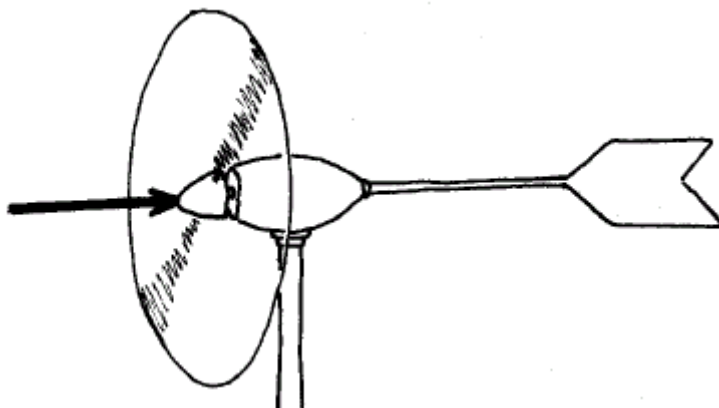


Fig. 4.2.4 El timón de una eólica

El timón sirve para orientar la eólica en la dirección del viento. Es una chapa, cuya forma no tiene demasiada relevancia (excepto la estética) fijada a una barra de una longitud comprendida entre el 60 y el 100% del diámetro de la eólica.

Deberá tener una superficie mínima, que se indica en la siguiente tabla:

Longitud de la barra de la cola*	1,2 m	2 m
Superficie mínima de la chapa de la cola	0,40 m² (por ejemplo chapa rectangular de 80 x 50 cm)	0,25 m² (por ejemplo chapa rectangular de 63 x 40 cm)

*Distancia entre el eje del mástil y el centro de gravedad de la chapa de la cola

4.2.5 Mástil o torre de la eólica

Como mástil de la eólica puede servir cualquier tubo lo sólido o incluso un poste de teléfonos de madera reciclado.

Deberá anclarse debidamente en el suelo (con hormigón) y eventualmente asegurarse con tres cables de acero también anclados en el suelo.

Tened en cuenta que el mástil no sólo debe aguantar el peso de la eólica, sino también el par de giro que genera la fuerza del viento sobre las palas en movimiento. Es como si uno empuja la punta de un palillo clavado en un corcho: si ejercemos demasiada fuerza, el palillo se partirá por la base o cerca de ella.

4.2.6 Sencillo sistema de seguridad contra los vientos excesivos

Recuerda que la energía del viento –y con ello las fuerzas- crece con el cubo de su velocidad. ¡Una ventolera puede destrozar tu eólica en cuestión de minutos, causando graves daños personales y/o materiales!

Se puede montar un freno de disco (ver Fig. 4.2), sobre cuyo sistema de activación desde el pie del mástil tendrás que hacerte algunos pensamientos.

Existe un método muy primitivo para sacar la eólica de los vientos excesivos:

Si vives al pie del cañón, es decir, si eres un agricultor que **jamás** puede abandonar su casa a causa de los animales, puedes atar dos sogas a la cola de la eólica, que dejarás “colgando” de un modo adecuado cuando la eólica trabaja con normalidad. En cuanto el viento empieza a ponerse bravo, tira de las sogas y saca la eólica del río, es decir, ponla en sentido perpendicular a la dirección del viento y ata los cabos de las sogas a sendos anclajes sólidos distanciados entre sí. Pero ten en cuenta que el viento es el protagonista principal de toda tormenta, y que no puedes saber por anticipado la jugada que te tiene preparada.

Pero si no vas a estar siempre al pie del cañón, puedes añadir a tu eólica un dispositivo mecánico relativamente sencillo que ofrece cierta seguridad.

Consiste en fijar solidariamente al cuerpo de la eólica un timón transversal, es decir, perpendicular a la dirección del viento. En este caso, el timón o cola principal deberá estar unido a la “caja” a través de una bisagra (que tendrás que inventar) y de un muelle (que tendrás que encontrar y probar). La Fig. 4.2.7 muestra muy esquemáticamente el principio.

Funcionamiento: Cuando el viento sobrepasa una cierta velocidad prudente, el timón transversal es “empujado” hasta que el muelle cede, sacando la eólica del viento (las palas dejan de girar o lo hacen lentamente).

Valor orientativo de la superficie de la veleta transversal: 5% de la superficie del rotor.

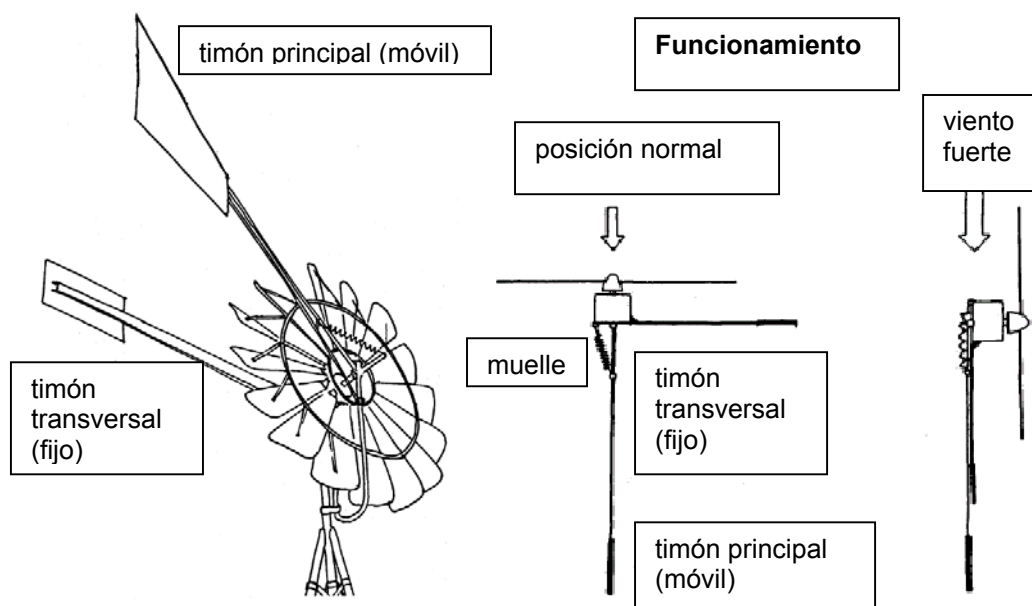


Fig. 4.2.7 Eólica con veleta transversal

5. Molino de Creta

El rotor de estas antiguas eólicas está construido con velas triangulares (Fig. 5.1).

Los “mástiles” de estas velas (= radios del rotor) pueden ser de madera, aunque en la actualidad se podrían utilizar tubos de aluminio. Deberían ser lo más delgados posible.

Cada vela está unida al siguiente radio con una cuerda o cable. También se pueden utilizar muelles o gomas para mantenerlas debidamente tensadas. Los muelles también tienen la ventaja de que las velas pueden ceder ante la presión del viento, lo cual disminuye la tensión sobre las mismas.

Debido a que las velas ofrecen una considerable resistencia al viento, generalmente estas eólicas tienen el eje del rotor prolongado hacia delante (pasando por el centro del buje), cuyo extremo va unido a los diferentes radios

con cables de acero, que impiden que la presión del viento sobre las velas pueda doblar los radios hacia atrás o – si son de madera - romperlos.

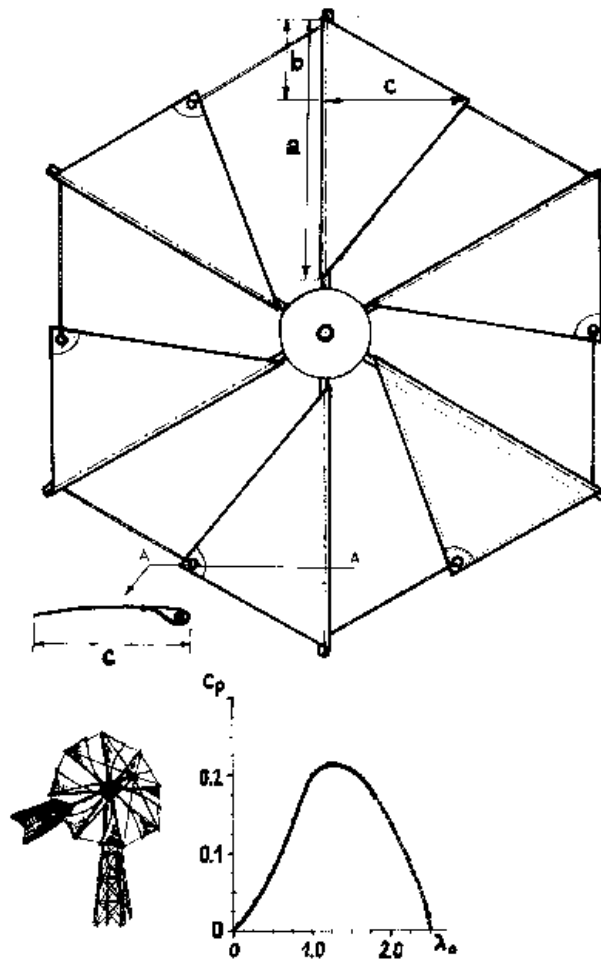


Fig. 5.1

Molino de Creta de 6 palas de radio R ($a = 0,8 \cdot R$; $b = 0,25 \cdot R$; $c = 0,45 \cdot R$)

Estos rotores tienen una velocidad específica nominal $\lambda_d = 1,2 \dots 1,4$, por lo que sus velocidades de giro son bajas. Para propulsar un alternador de coche se precisa un factor de multiplicación importante ($k > 8$ para un rotor de $D = 2$ m (Fig. 5.2). Su rendimiento es modesto, pero tienen la ventaja de tener un par de arranque mucho más generoso (unas 10 veces mayor que el de la eólica que hemos estudiada más arriba), lo cual facilita su puesta en movimiento a velocidades del viento relativamente bajas.

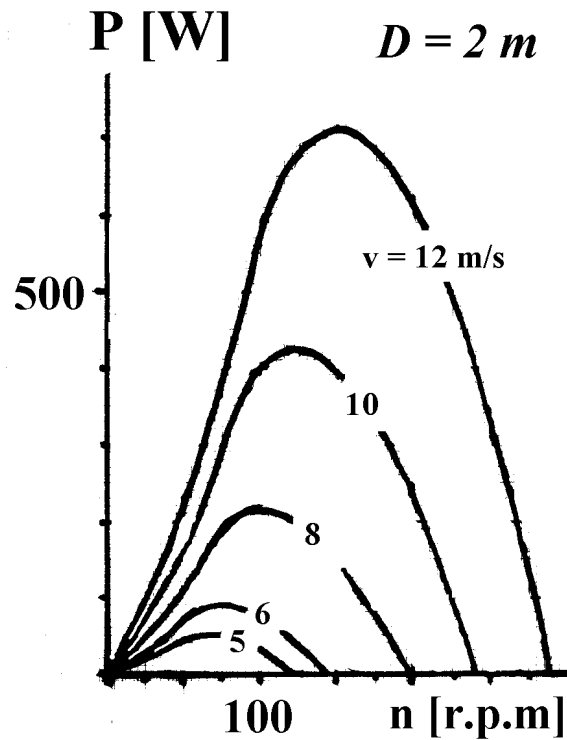


Fig. 5.2

Características P, n, v de un rotor de velas (molino de Creta) de 2 metros de diámetro y 6 palas (ver Fig. 5.1), medidas en un túnel de viento por [Smulders et al.]

Potencia máxima, velocidad de giro de un generador eólico construido con el rotor representado en la Fig. 5.1 (2 metros de diámetro) y un alternador de coche con un rendimiento de aprox. 50%:

Velocidad del viento v	8 m/s	10 m/s	12 m/s
Velocidad óptima de giro n_{opt}	100 rpm	125 rpm	144 rpm
Potencia P_{max}	100 W	200 W	350 W
Par de arranque M_o	44 Nm	68 Nm	99 Nm
Par de giro M	9,5 Nm	15 Nm	23 Nm

Factor de multiplicación aproximado entre el rotor tipo “molino de Creta” de 2 metros de diámetro y el alternador:

Velocidad mínima de giro del alternador n_o (rpm)	1000	1200	1400	1600
Factor de multiplicación k	8	10	12	14

Conclusión

Debo admitir que personalmente sólo he construido dos de estos generadores eólicos caseros. Lo que he expuesto aquí es la quintaesencia de mis modestas experiencias.

Sin embargo, estoy convencido de que este pequeño “manual” puede ser una valiosa ayuda para el principiante.

En el peor de los casos, es decir, si vuestro generador eólico casero no suministrara suficiente potencia, tendréis que mejorarlo por cuenta propia.

Esto os llevará más rápidamente a la tercera línea de este viejo proverbio chino:

**“De lo que oigo, me olvido;
de lo que veo, me acuerdo;
lo que hago, entiendo.”**

Os deseo salud, humor y buen viento

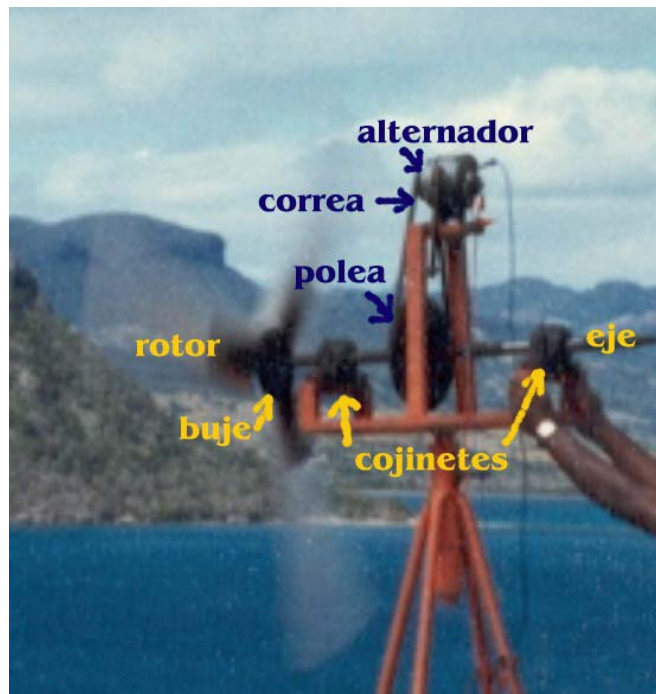


Manuel Franquesa Voneschen, Castelldefels, España

Anexo: Fotos comentadas de un prototipo



Realizando mediciones en un prototipo que en 1984 realizamos con los estudiantes de la Universidad de Madagascar en Diego Suarez (Antsiranana) (al fondo el "Pain de Sucre", la isla sagrada de la bahía de Andovobazaha, en la que antaño se refugiaban los piratas del Océano Índico)



Descripción del prototipo
Como rotor utilizamos una hélice de un viejo ventilador de techo (diámetro aprox. 1.2 m)

Ved también nuestro “manual” para construir un aerogenerador “casero” con las dos mitades de un barril de 200 litros (generador *Savonius*) en www.amics21.com/laveritat/generador_savonius.pdf

Para los novatos en la materia, recomendamos empezar por la siguiente obra: www.amics21.com/laveritat/nociones_de_energia_eolica.pdf

Y para los que deseen profundizar más en la teoría de las eólicas en general: www.amics21.com/laveritat/introduccion_teoria_turbinas_eolicas.pdf
www.amics21.com/laveritat/betz_energia_eolica.pdf