



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA



ENERGÍA EÓLICA

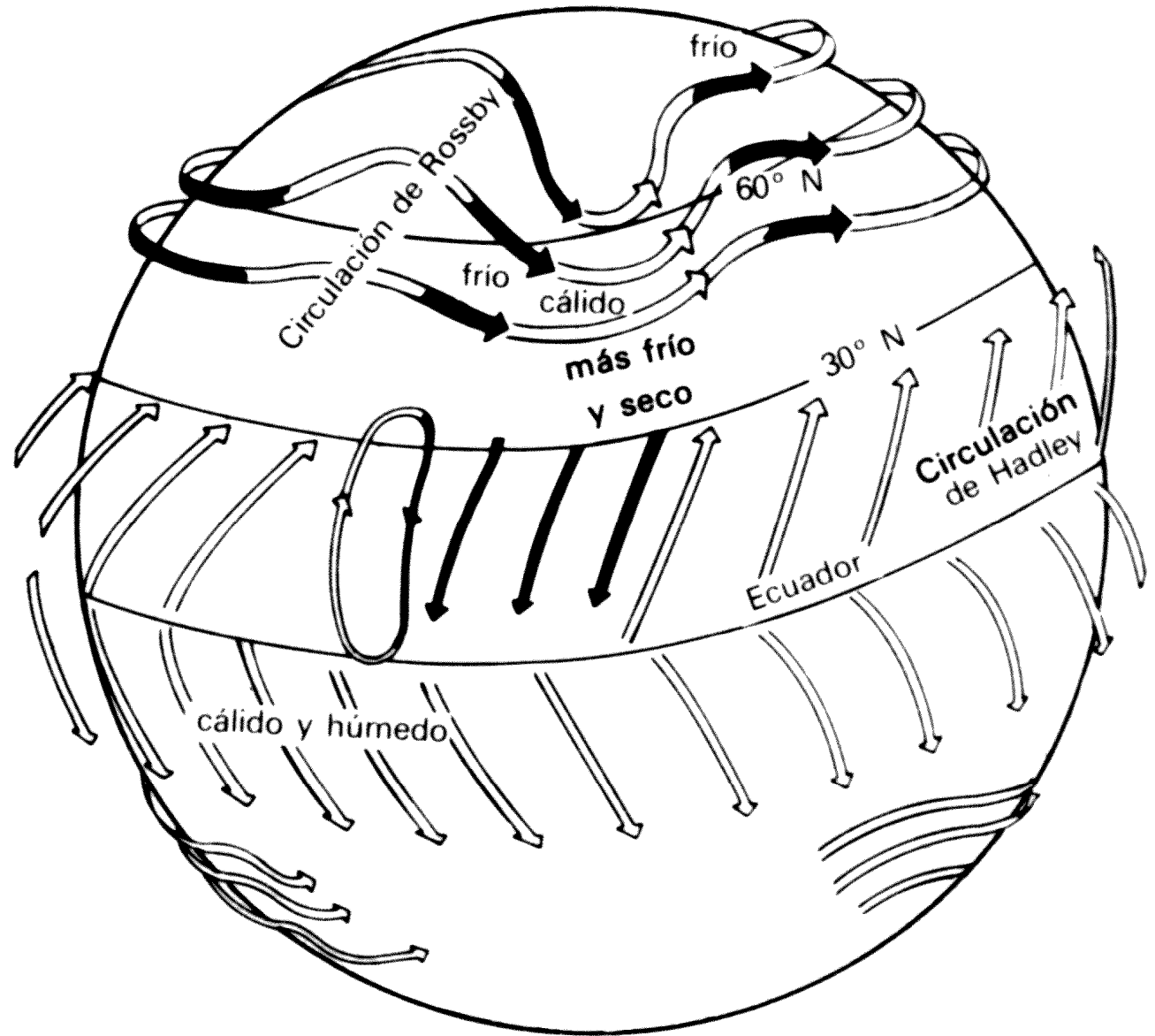
Miguel Angel Rodríguez Pozueta

EL VIENTO

- El **viento** está constituido por las corrientes de aire generadas a consecuencia del desigual calentamiento de la superficie de la Tierra. La no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que unas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región vecina. Al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo.
- La circulación de aire está influenciada por varias fuerzas:
 - La debida al gradiente de presión.
 - La debida a la gravedad.
 - La de rozamiento. Más importante en la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre.
 - De Coriolis. Debida al movimiento de rotación terrestre.

VIENTOS GLOBALES

- Los vientos globales son generados por las diferencias de temperatura y de presión y por el movimiento de rotación de la Tierra. Sobre ellos apenas influye la superficie terrestre. Estos vientos se encuentran a una altura de unos 1000 m sobre el nivel del mar.

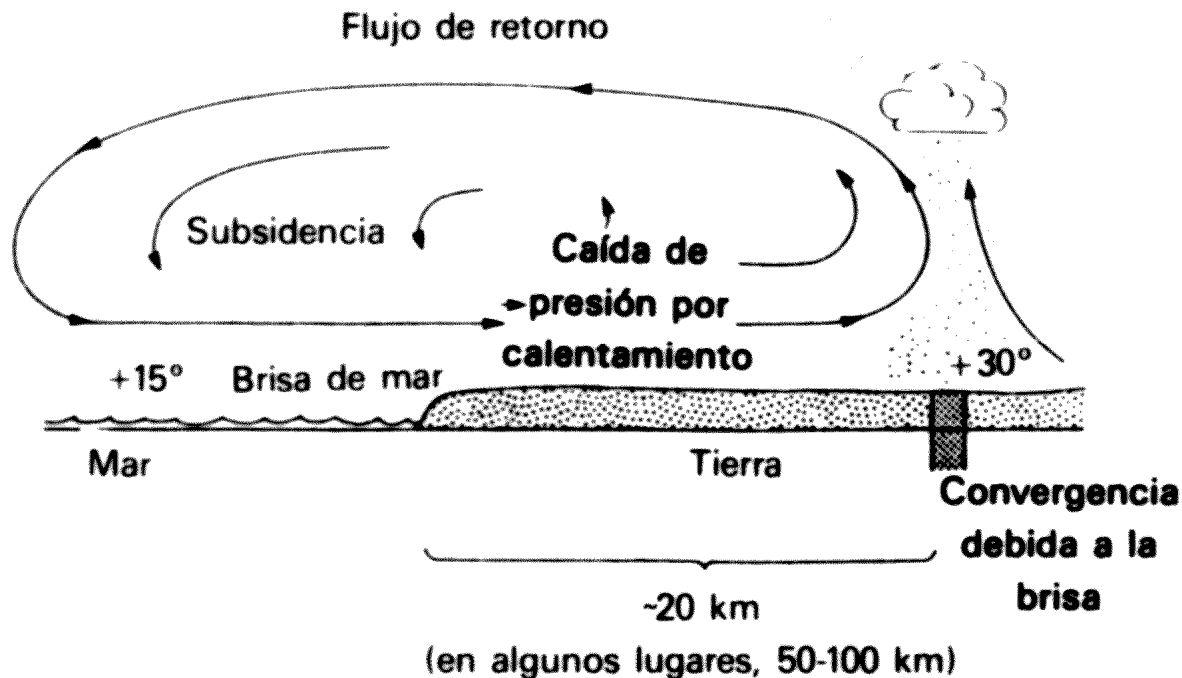


VIENTOS LOCALES

- A escala local y sobre todo en las capas bajas de la atmósfera (por debajo de 500 m de altitud) los vientos están muy influidos por la orografía del terreno. Algunos de estos vientos son:

Brisas

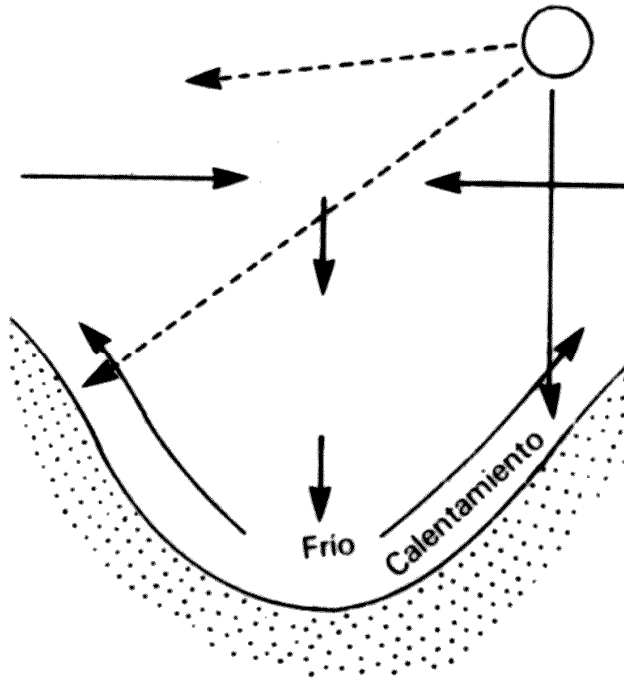
- Son variaciones periódicas del régimen de viento que se producen en las zonas costeras debidas a las diferencias de temperatura entre el mar y la tierra.
- Durante el día soplan las *brisas de mar* y por la noche las *brisas de tierra*.



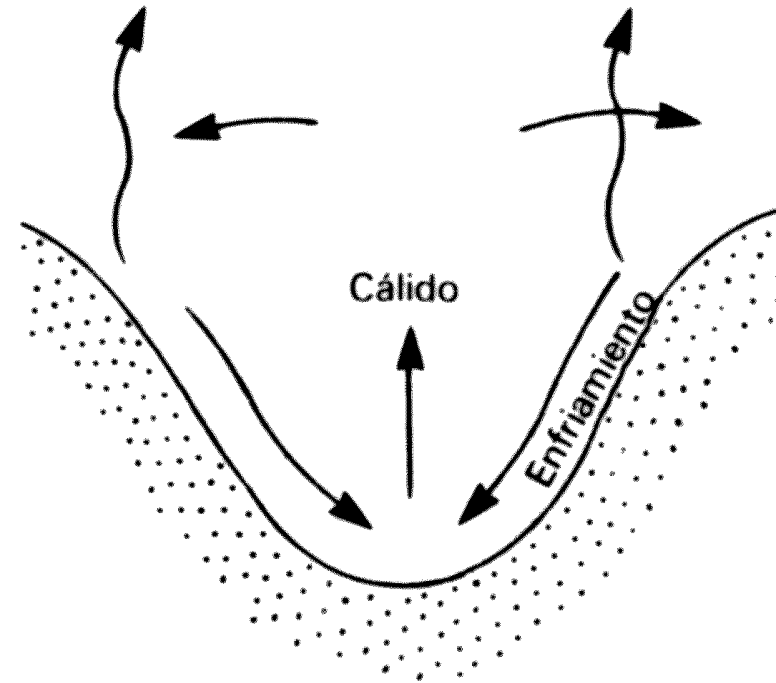
Brisa de mar

Vientos de valle y de montaña

- En un valle rodeado de montañas se produce una circulación de aire ascendente en las laderas de las montañas durante el día. Esto es debido a que el Sol calienta las laderas las cuales adquieren una temperatura más alta que en el fondo del valle. Sobre la vertical del fondo del valle el aire desciende con lo que se consigue una circulación cerrada. Este es el *viento de valle*.



Viento de valle



Viento de montaña

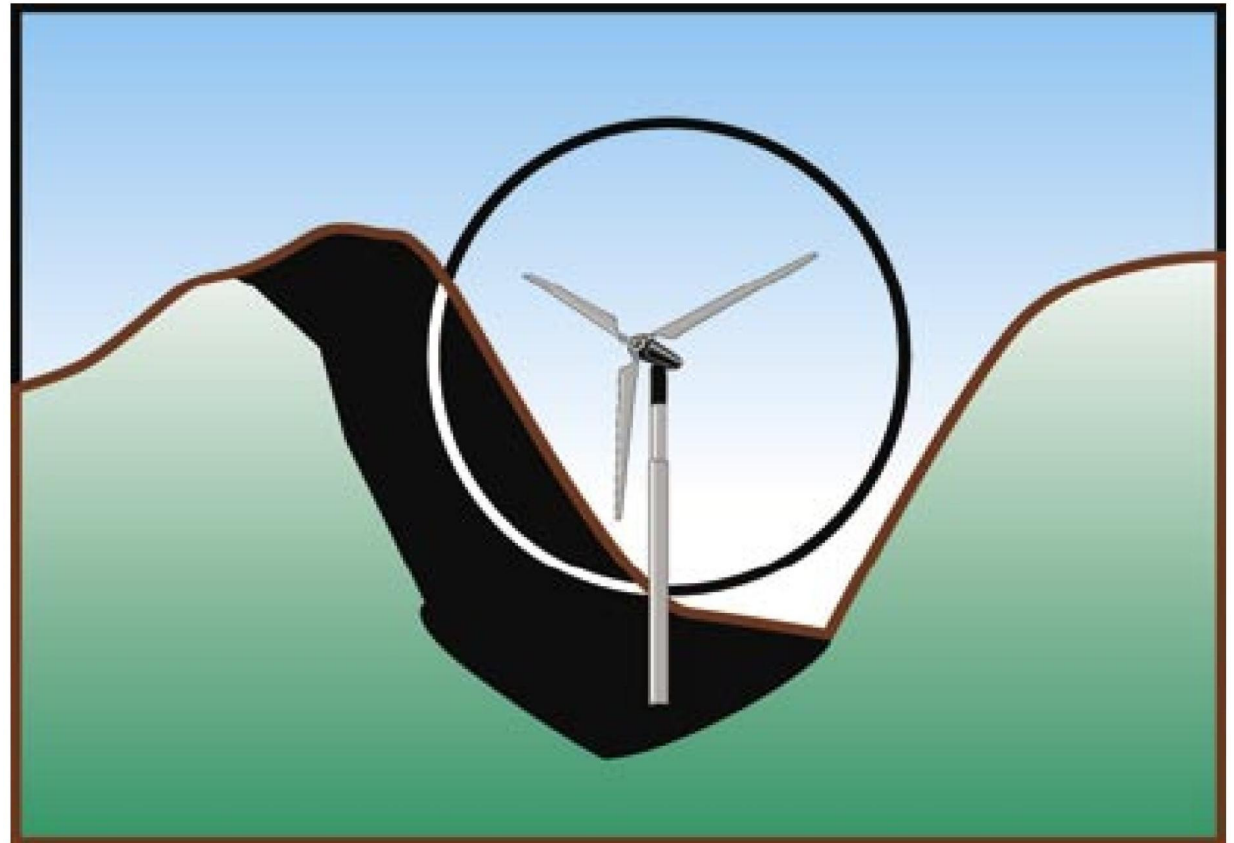
- Por la noche esta corriente de aire se invierte debido al enfriamiento de las laderas, apareciendo el *viento de montaña*.

EFFECTOS QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN UN EMPLAZAMIENTO

Efecto túnel

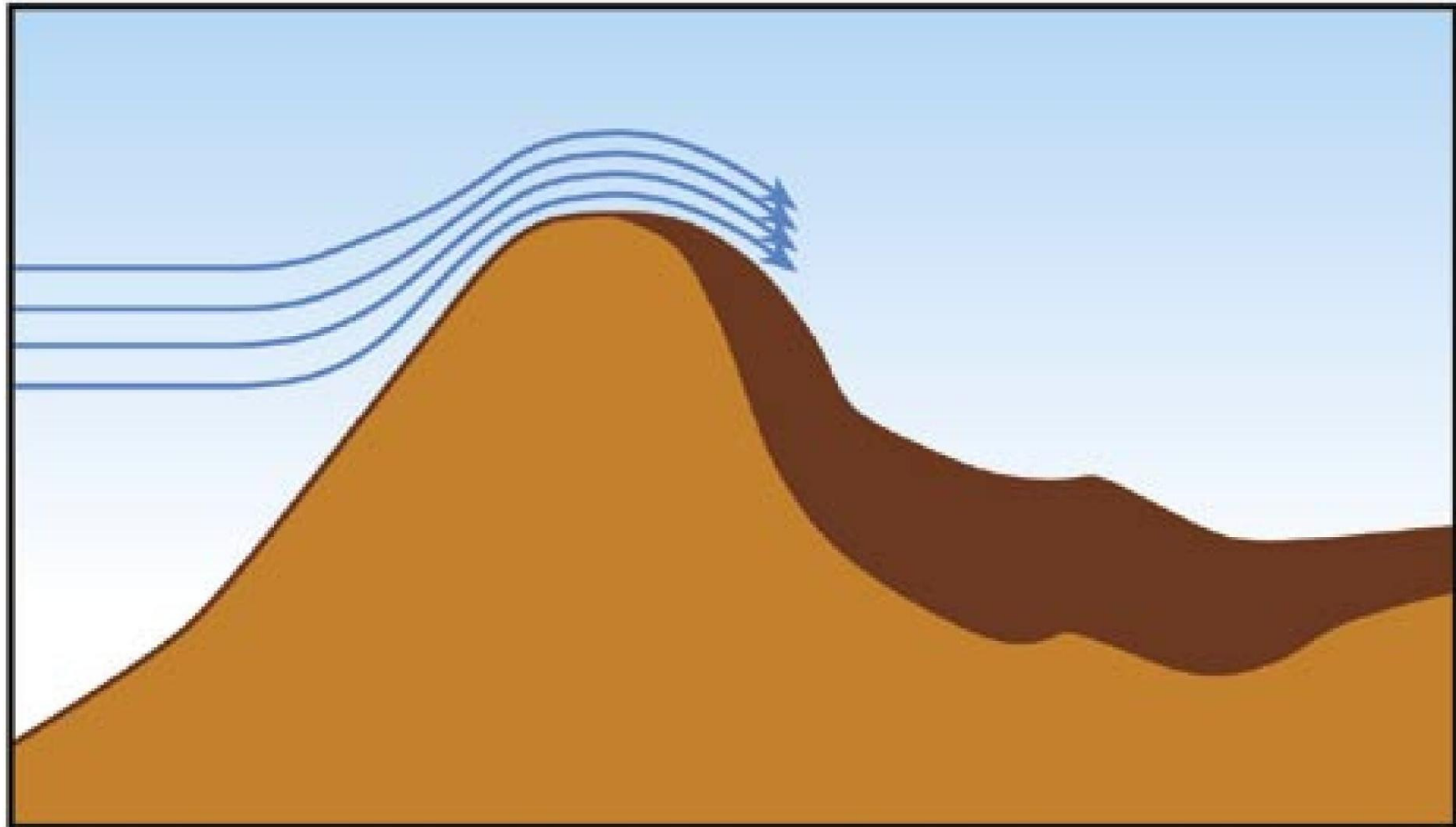
- Este efecto se produce cuando el aire circula por un paso estrecho, por ejemplo entre dos montañas. El aire al pasar se comprime en la parte que está expuesta al viento y su velocidad crece considerablemente dentro del paso estrecho. Esto es lo que se conoce como *efecto túnel*.
- Situar un aerogenerador en un túnel de este tipo permite obtener velocidades del viento superiores a las de las áreas colindantes. Para obtener un buen efecto túnel, debe estar suavemente enclavado en el paisaje. En el caso de que el paso sea muy accidentado, puede haber muchas turbulencias en esa área,

que pueden causar roturas y desgastes innecesarios en el aerogenerador.



Efecto colina

- En las colinas, siempre se aprecian velocidades de viento superiores a las de las áreas circundantes. Por esta razón es habitual instalar aerogeneradores en ellas. Sin embargo, si la colina es escarpada o tiene una superficie accidentada, puede haber una cantidad de turbulencias significativa, lo que puede anular la ventaja que representa el tener unas velocidades de viento mayores.



Variación del viento con la altura

- La variación del viento con la altura depende bastante del tipo de suelo y sigue aproximadamente una ley estadística denominada ***ley exponencial de Hellmann***:

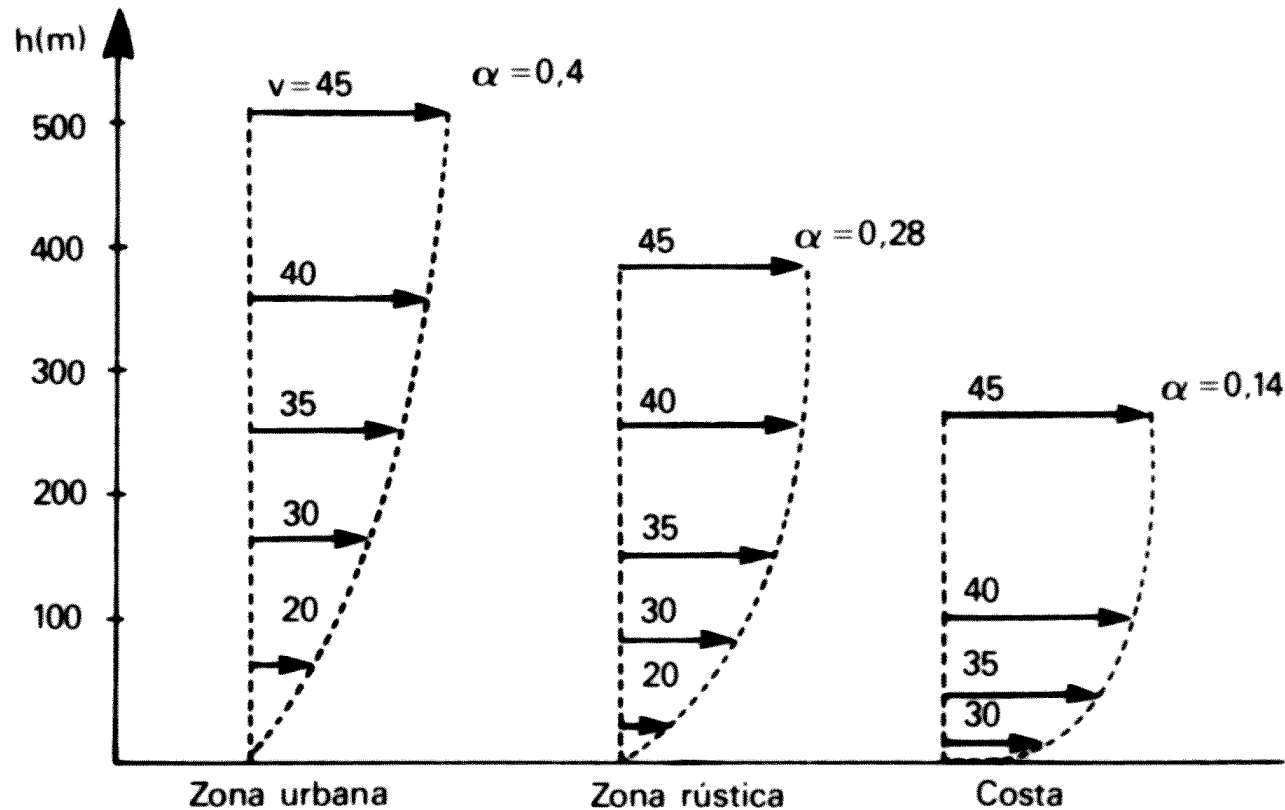
$$v_h = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

v_h es la velocidad del viento a calcular, a una altura h .

v_0 es la velocidad del viento conocida, a una altura h_0 .

α es el ***exponente de Hellmann*** que varía con la rugosidad del terreno:

Tipo de terreno	α
Liso (mar, arena, nieve)	0,10 - 0,13
Rugosidad moderada (hierba, cultivos)	0,13 - 0,20
Rugoso (bosques, edificaciones)	0,20 - 0,27
Muy rugoso (ciudades)	0,27 - 0,40

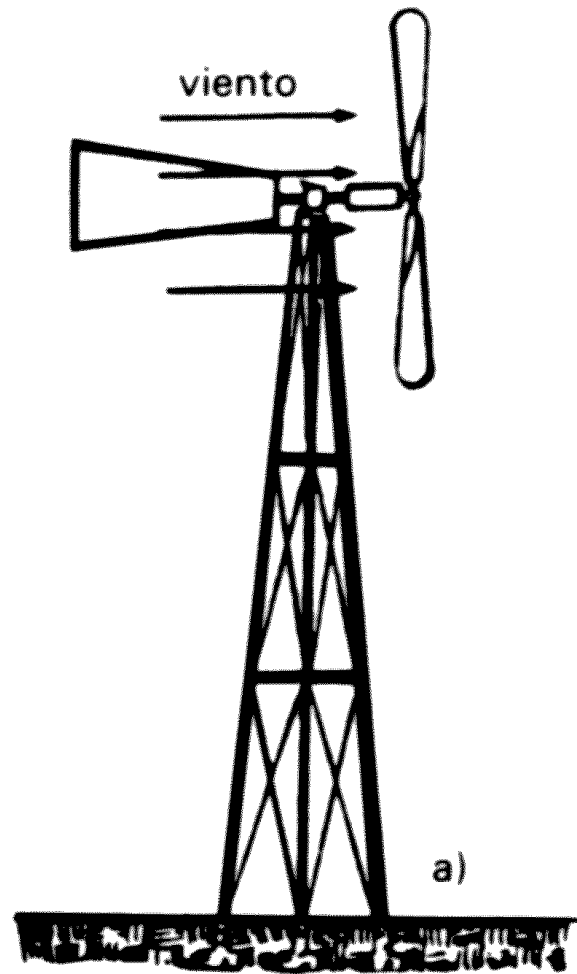


- La **intensidad energética del viento I** (potencia por unidad de superficie) es proporcional al cubo de la velocidad. Luego:

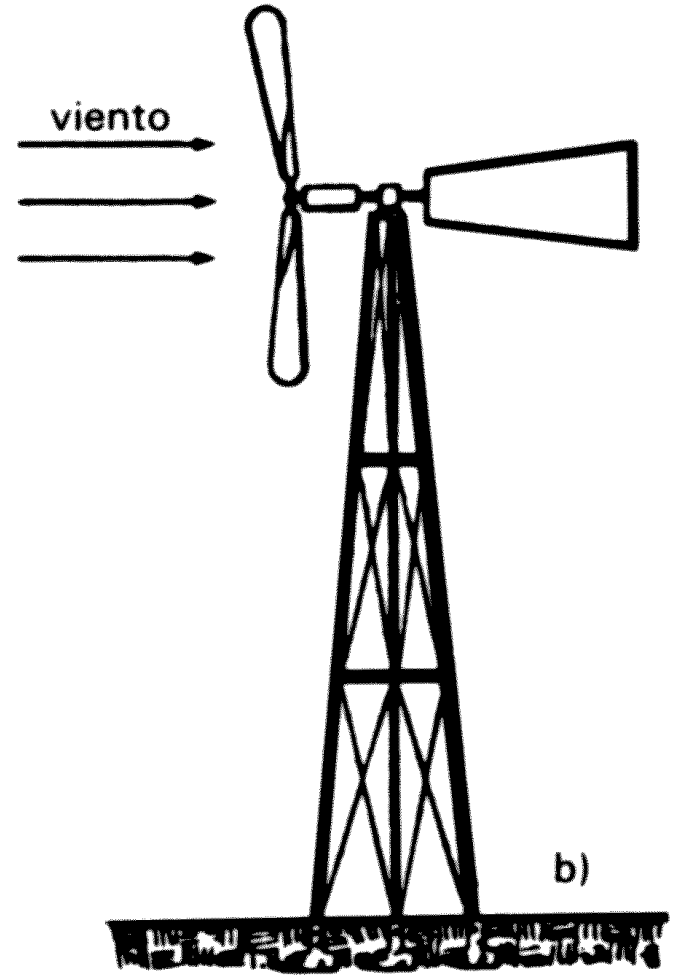
$$I_h = I_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{3\alpha}$$

AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL TIPO HÉLICE

- Son los más desarrollados pues se aprovechan de los avances en hélices de aviación.
- Constan de: una *aeroturbina* tipo hélice, la *góndola* o *navecilla* (donde se alojan el alternador, el multiplicador y los sistemas de control y orientación) y una *torre*, metálica o de hormigón. La góndola puede girar sobre la torre para orientar la hélice en la dirección del viento.
- La hélice puede estar situada en dos posiciones:
 - A *barlovento* (upwind): Frente al viento. Es la más utilizada.
 - A *sotavento* (downwind): A favor del viento. En este caso el aerogenerador es autoorientable, pero da lugar a mayores cargas de fatiga sobre las aspas de la hélice.
- El número de palas de la hélice suele oscilar entre 2 y 4, siendo tres el número más habitual. Cuantas menos palas más rápido giran.
- También existen aerogeneradores de eje vertical, pero se usan mucho menos porque en la mayor parte de los casos sus prestaciones son peores que los de eje horizontal.

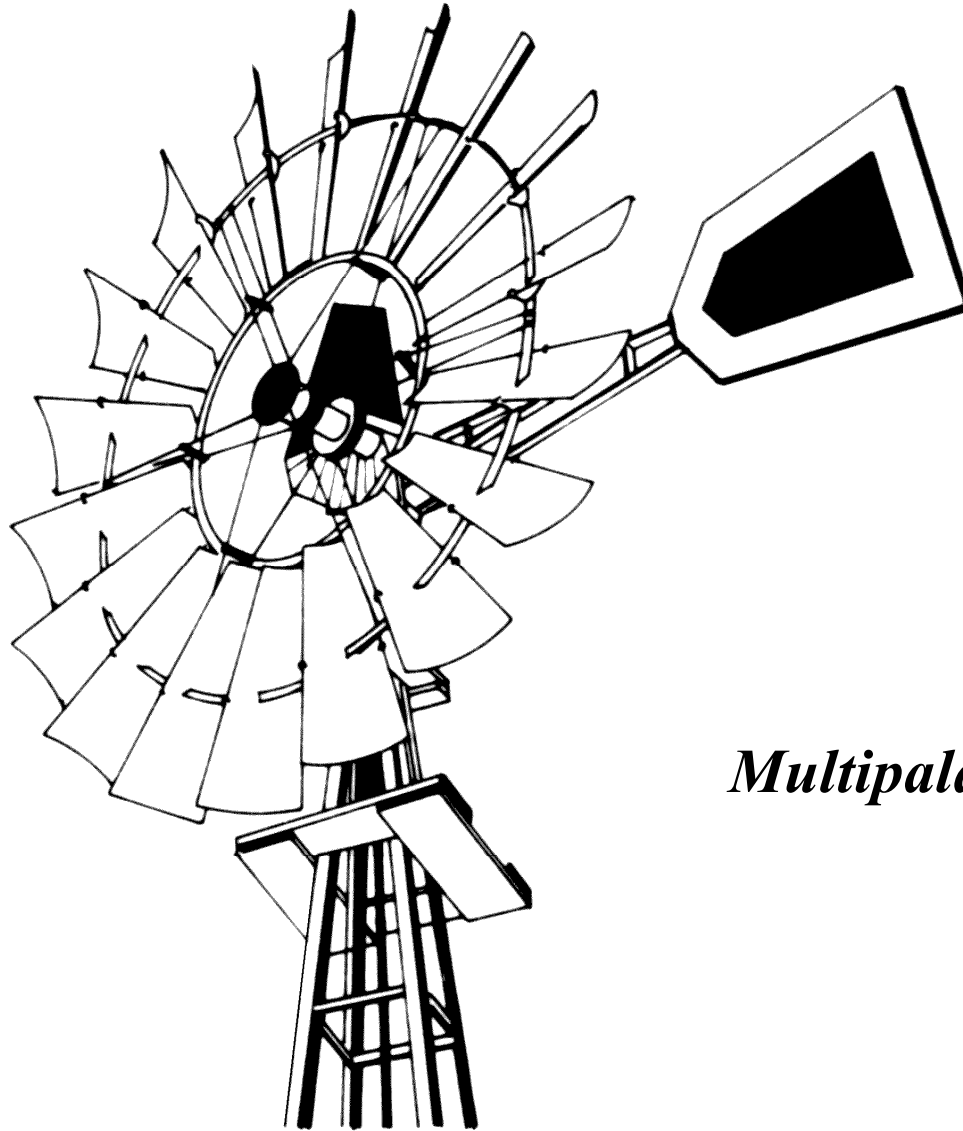


a) Sotavento



b) Barlovento

- Existen también molinos de viento de muchas palas (entre 6 y 24) y de pequeño diámetro. Son lentos, aunque requieren menos viento para funcionar. Su rendimiento es peor y no se emplean para producir electricidad, sino en molinos o para bombear agua.



Multipalas americano

ENERGÍA ÚTIL DEL VIENTO

POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE (P_d)

La potencia disponible en el viento (P_d) es proporcional al cubo de su velocidad:

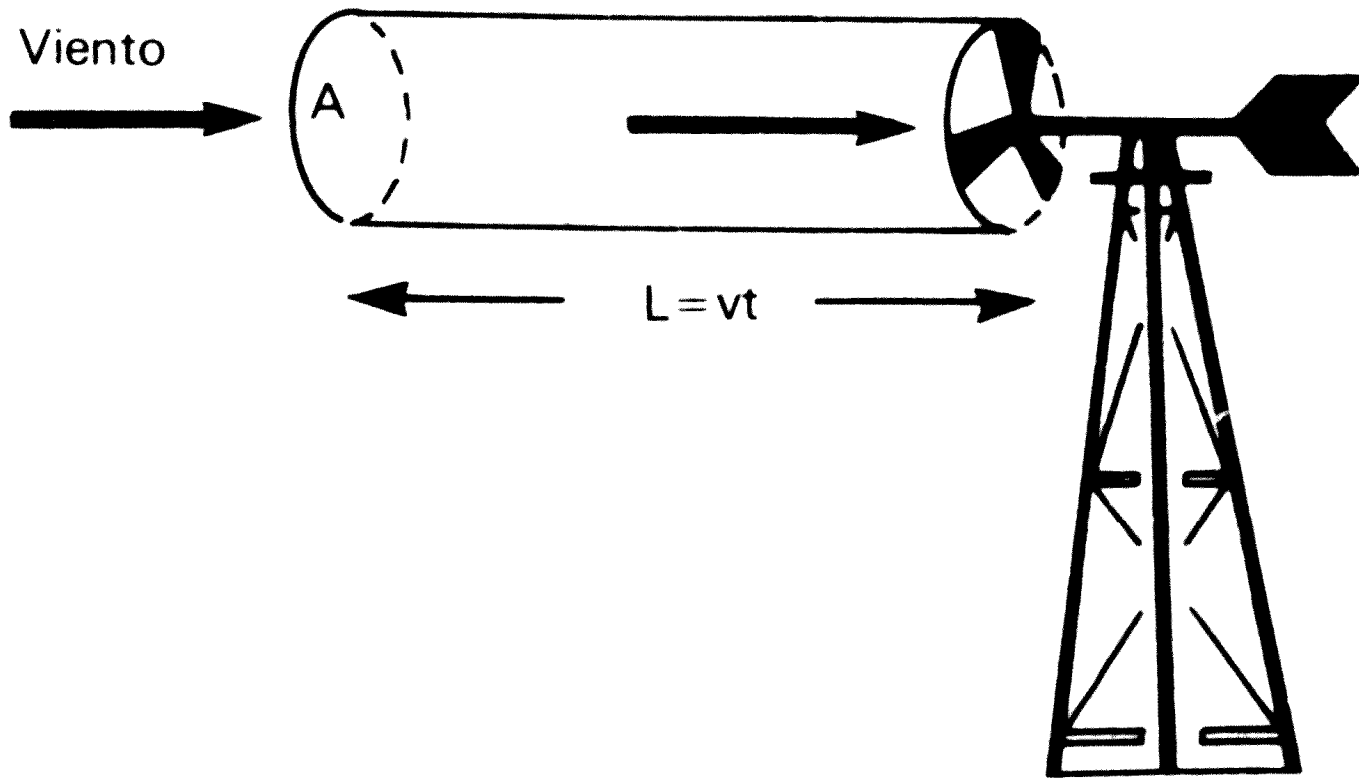
Supóngase un cilindro de aire de sección transversal A y longitud L circulando a través de las palas de un rotor con una velocidad v uniforme en toda la sección A . La densidad del aire es ρ . Por lo tanto, la masa de esta cantidad de aire es $m = \rho A L$ y su energía cinética es

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A L v^2$$

En consecuencia, la potencia del viento será

$$P_d = \frac{dE_c}{dt} = \frac{\frac{1}{2} dm v^2}{dt} = \frac{\frac{1}{2} (\rho A v dt) v^2}{dt}$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3$$



Para una aeroturbina de eje horizontal de diámetro D el área barrida es $A = \frac{1}{4} \pi D^2$. Luego, en este caso:

$$P_d = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3$$

Dado que la velocidad del viento es variable con el tiempo, la potencia P_d no es constante. Su valor medio anual $\overline{P_d}$ vale

$$\overline{P_d} = \frac{1}{2} \rho A \overline{v^3}$$

Donde $\overline{v^3}$ es el valor medio anual del cubo de la velocidad del viento.

Consecuencias:

- La potencia P_d varía fuertemente con la velocidad v . Luego, es preciso medir la velocidad v en el lugar exacto donde se quiere instalar la turbina. No valen los datos de lugares cercanos.
- La fuerte variación de P_d con la velocidad v hace difícil el aprovechamiento eficaz de P_d . Así un generador eólico diseñado para producir el máximo de potencia con una velocidad del viento dada, sufriría aproximadamente una disminución a $1/8$ de esta potencia si la velocidad se reduce a la mitad.
- El valor medio anual del cubo de la velocidad $\overline{v^3}$ es distinto del cubo del valor medio anual de la velocidad \overline{v}^3 . Por lo tanto, no basta con conocer la velocidad media anual del viento \overline{v} para estudiar la potencia media disponible en un lugar.
- La potencia P_d varía con la densidad del aire ρ . Como consecuencia de las variaciones de presión y de temperatura, la densidad ρ puede variar de un 10 a un 15% a lo largo del año.

ENERGÍA MÁXIMA EXTRAÍBLE DEL VIENTO. LÍMITE DE BETZ

Si se intentase extraer toda la energía del viento el aire saldría con una velocidad nula; es decir, el aire no podría abandonar la turbina. En ese caso no se extraería ninguna energía en absoluto, ya que también se impediría la entrada de aire al rotor del aerogenerador. En el otro caso extremo, el viento podría pasar a través de la turbina sin modificar su velocidad. En este caso tampoco se extraería ninguna energía del viento. Así pues, debe haber alguna forma de frenar el viento que esté entre estos dos extremos, y que sea más eficiente en la conversión de la energía del viento en energía mecánica útil.

En 1927, el ingeniero Carl Betz estudió un caso simplificado en el que despreciaba algunos fenómenos perjudiciales y obtuvo que la pérdida óptima de velocidad del viento deberá ser 2/3 de la velocidad inicial.

Con esta caída de velocidad óptima Betz dedujo que la potencia máxima que suministrará la turbina vale

$$P_{\text{máx}} = \frac{8}{27} \rho A v^3 = \frac{16}{27} \left(\frac{\rho A v^3}{2} \right) = \frac{16}{27} P_d$$

El parámetro 16/27 -que normalmente se redondea a 0,59- se denomina *coeficiente de Betz*.

Una turbina real nunca podrá llegar a proporcionar la potencia $P_{\text{máx}}$. El coeficiente de Betz es un límite similar al rendimiento de Carnot en una turbina térmica.

Los aerogeneradores que más se acercan al límite de Betz son aquellos diseñados de tal forma que la velocidad en el extremo de sus palas alcanza valores entre 5 a 10 veces la velocidad del viento. Las aeroturbinas actuales recuperan entre el 70 y el 80% del límite de Betz.

ALGUNOS PARÁMETROS DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Parámetro de velocidad o velocidad típica o velocidad específica λ

Es la relación entre la velocidad tangencial en la punta de las palas de la aeroturbina y la velocidad del viento:

$$\lambda = \frac{\Omega \frac{D}{2}}{v} = \frac{\Omega R}{v}$$

Donde R (= D/2) es el radio de la aeroturbina.

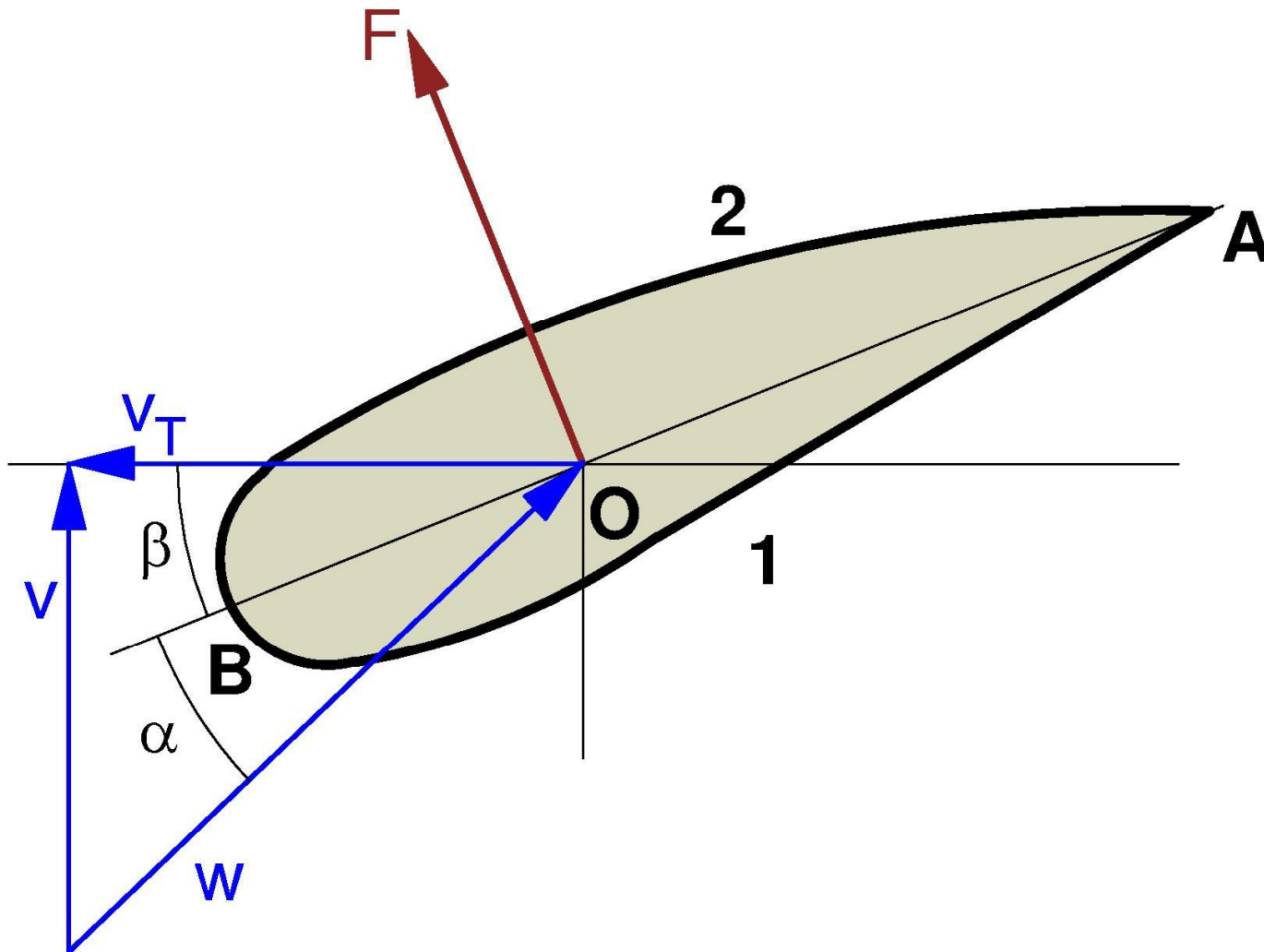
Coefficiente de potencia o rendimiento aerodinámico C_P

Es el cociente entre la potencia mecánica proporcionada por la aeroturbina P_m y la energía del viento P_d :

$$C_P = \frac{P_m}{P_d} = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

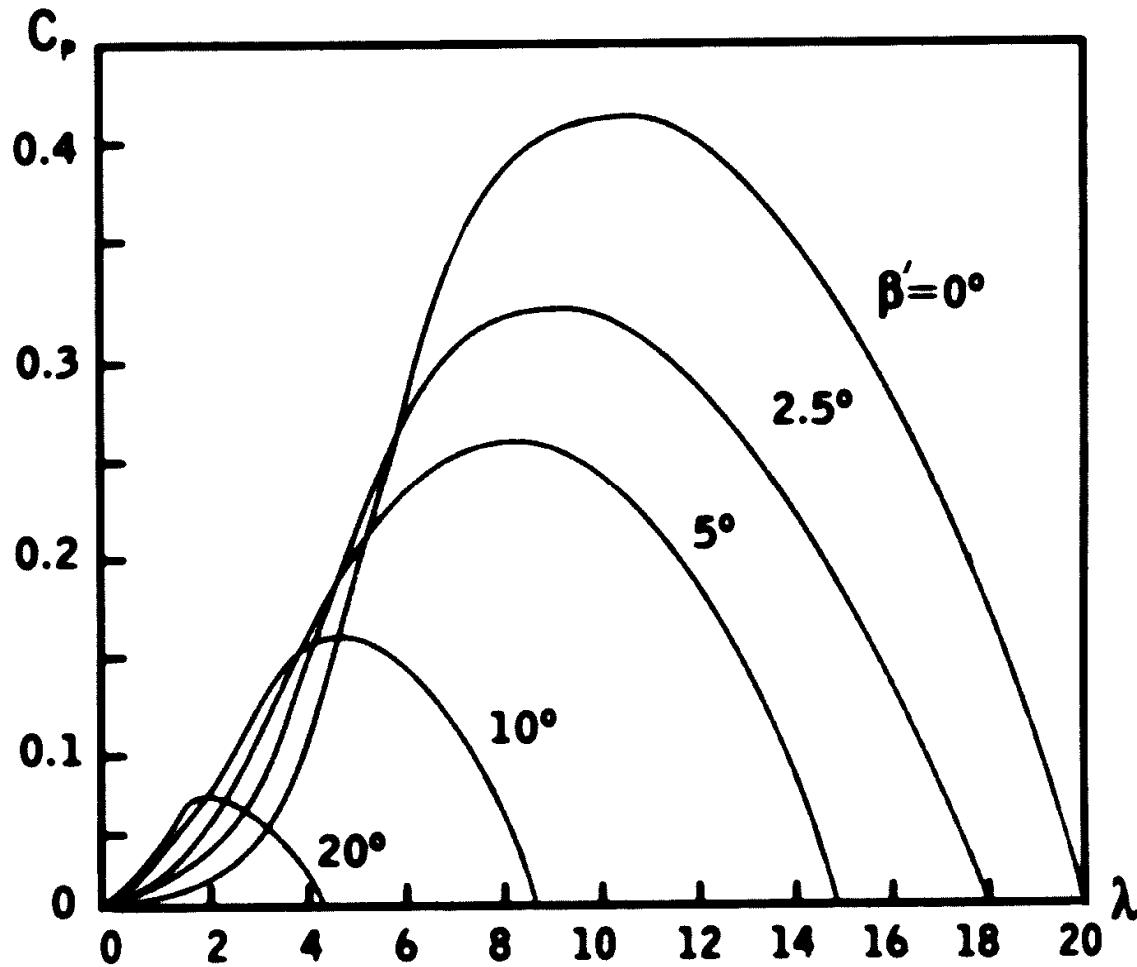
Evidentemente, el máximo valor que puede alcanzar este parámetro es el coeficiente de Betz (= 0,59).

AERODINÁMICA DE UNA TURBINA



- A-B **Cuerda** del perfil
- A-1-B **Intradós** del perfil
- A-2-B **Extradós** del perfil
- α **Ángulo de ataque** o de incidencia
- β **Ángulo de paso** o de calaje
- v Velocidad absoluta del viento
- v_T Velocidad tangencial del perfil
- w Velocidad relativa del viento respecto al perfil
- F Fuerza total sobre el perfil

CARACTERÍSTICAS DE LAS TURBINAS EÓLICAS



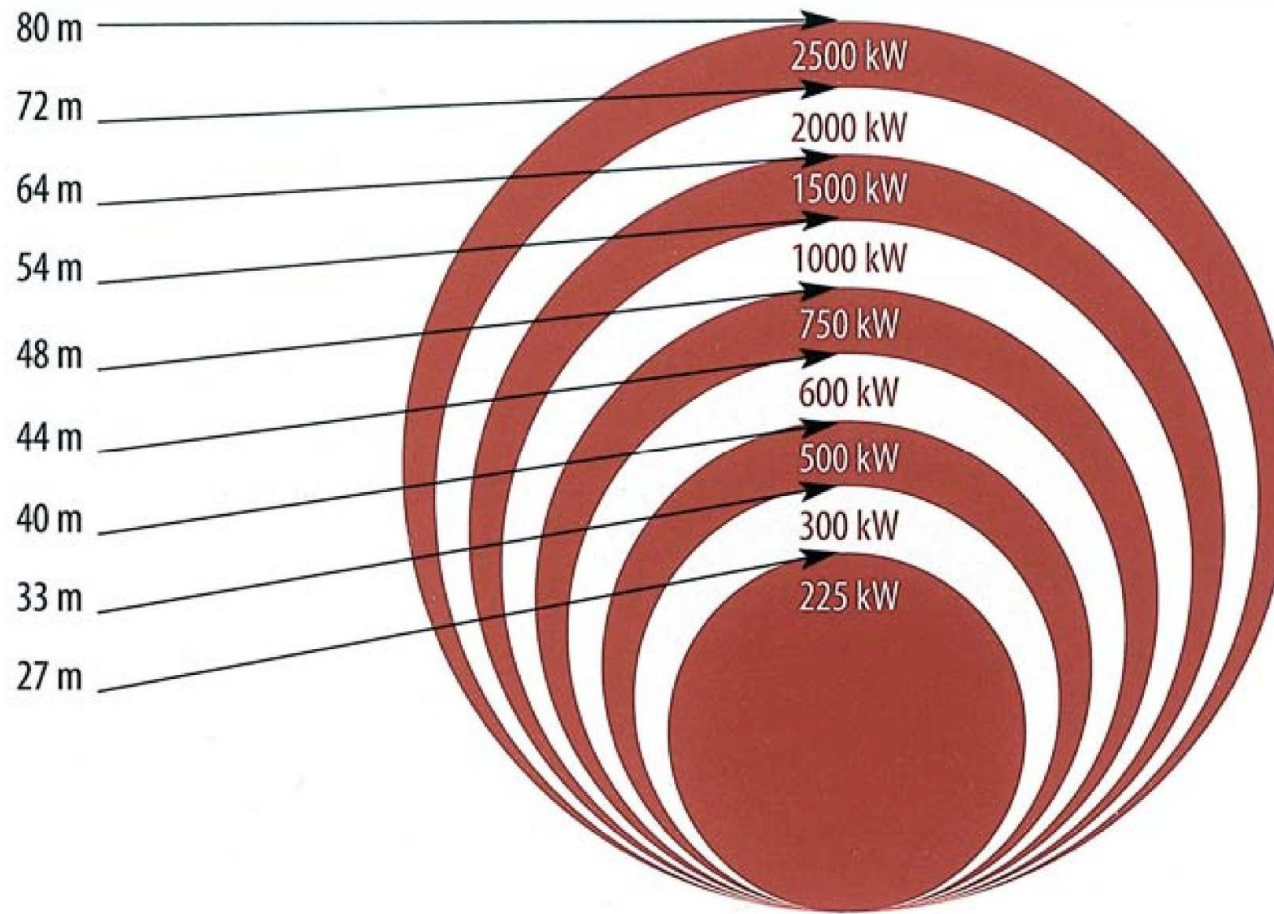
Familia de curvas C_p - λ de una hélice según su ángulo de paso de la pala β'

El ángulo de paso de la pala de una hélice β' es el ángulo de paso β de uno de sus perfiles elegido

previamente. Usualmente se elige el perfil situado en la punta de la pala.

De las curvas de la figura se deduce que:

- Para un ángulo de paso de la pala β' dado, el máximo C_p se produce para un único valor de λ . Por lo tanto, si en estas condiciones se quiere mantener el máximo C_p se debería variar la velocidad de giro de la turbina proporcionalmente a la velocidad del viento. No es fácil variar la velocidad de la turbina al mismo ritmo que la del viento debido a la inercia de estas máquinas y, además, muchas veces se utilizan generadores de velocidad prácticamente constante.
- Al aumentar β' disminuye C_p . Como se verá más adelante, esto se aprovecha para limitar la potencia desarrollada por la aeroturbina.

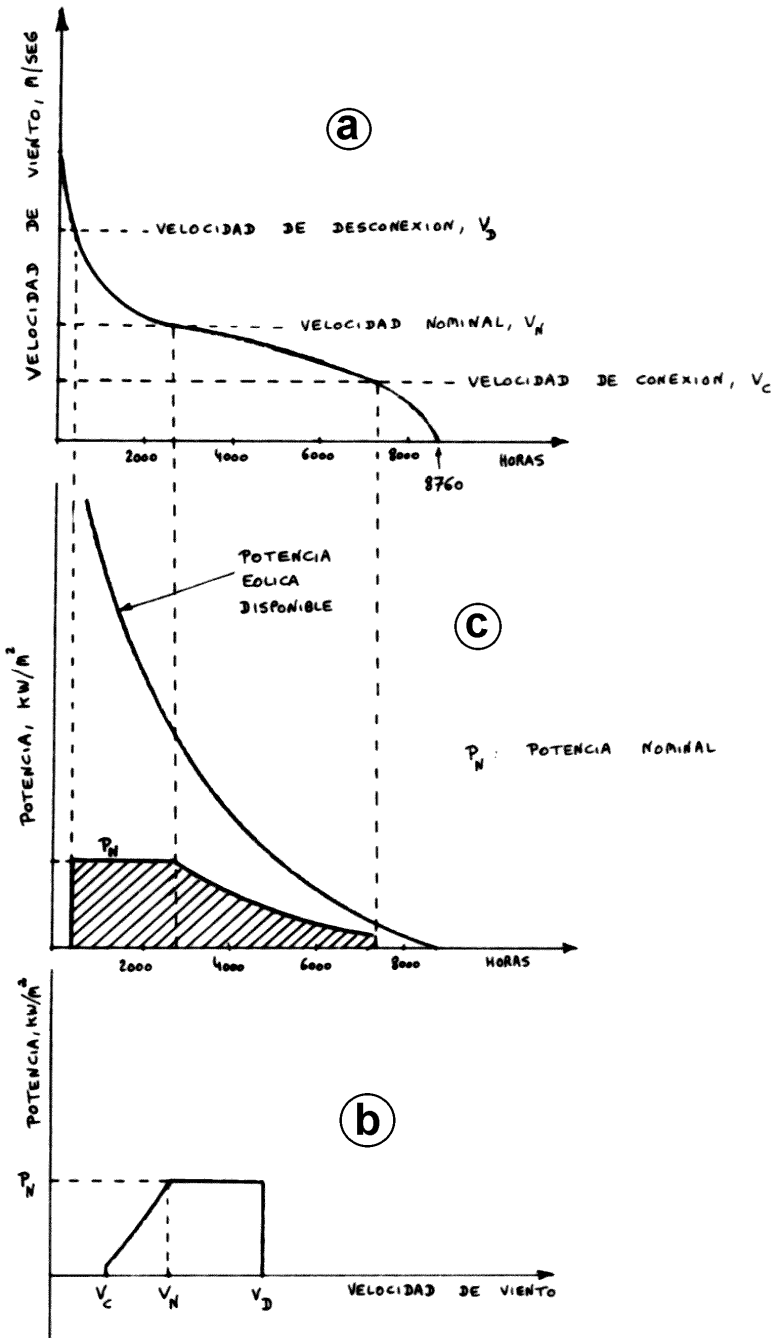


La potencia del viento P_d para una velocidad del viento dada depende del área barrida, luego depende del cuadrado del diámetro de la aeroturbina. La potencia que proporciona la turbina en este caso depende también de su coeficiente de potencia C_p .

En la figura se muestra la potencia que desarrolla una aeroturbina en función de su tamaño para velocidades del viento de 12 m/s y $C_p = 0,5$.

Las turbinas mayores (de unos 80 m de diámetro y unos 2 MW) se instalan en los parques eólicos marinos. En tierra, dependiendo de la rugosidad del terreno, el diámetro óptimo del rotor varía entre 45 y 55 m.

CURVAS DE POTENCIA (1)



En una aeroturbina existen 3 velocidades del viento básicas (ver la figura (b)):

V_C es la **velocidad umbral de conexión**

V_N es la **velocidad nominal**

V_D es la **velocidad de desconexión**

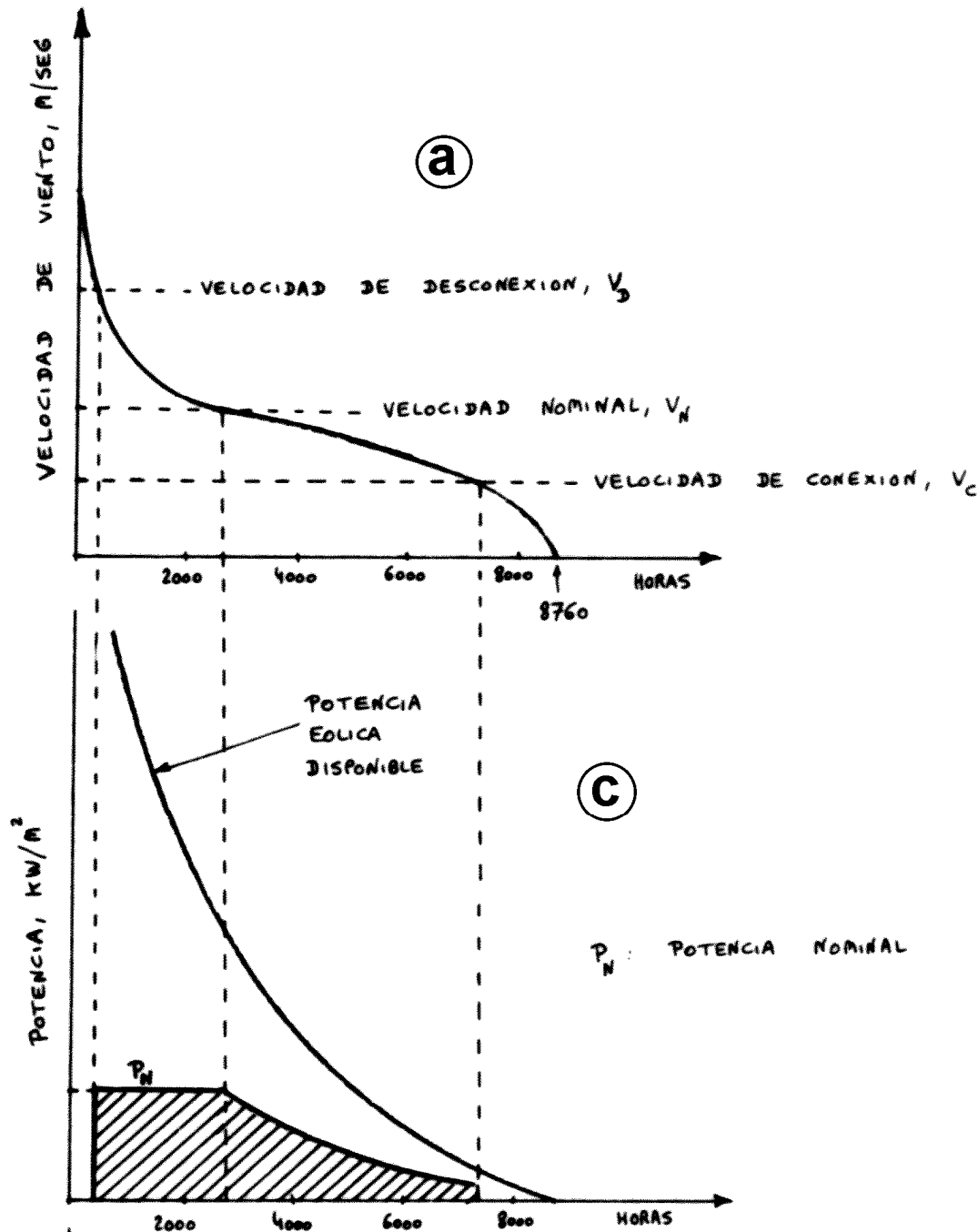
En las figuras (b) y (c) la potencia se indica por unidad de superficie barrida por las palas de la aeroturbina.

En la figura (b) se aprecia que la turbina no empieza a producir energía hasta que la velocidad del viento no es superior a V_C . A partir de ese momento la potencia que produce la turbina aumenta con la velocidad del viento hasta que se llega a la velocidad V_N a la cual se genera la potencia nominal o asignada P_N del generador eléctrico acoplado a la turbina.

Para velocidades superiores a V_N el sistema de control de la aeroturbina actúa y la potencia generada se mantiene constante. Así se evita la sobrecarga tanto del generador eléctrico como de la aeroturbina.

Cuando la velocidad del viento alcanza el valor V_D , los sistemas de seguridad del aerogenerador actúan y lo desconectan.

CURVAS DE POTENCIA (2)

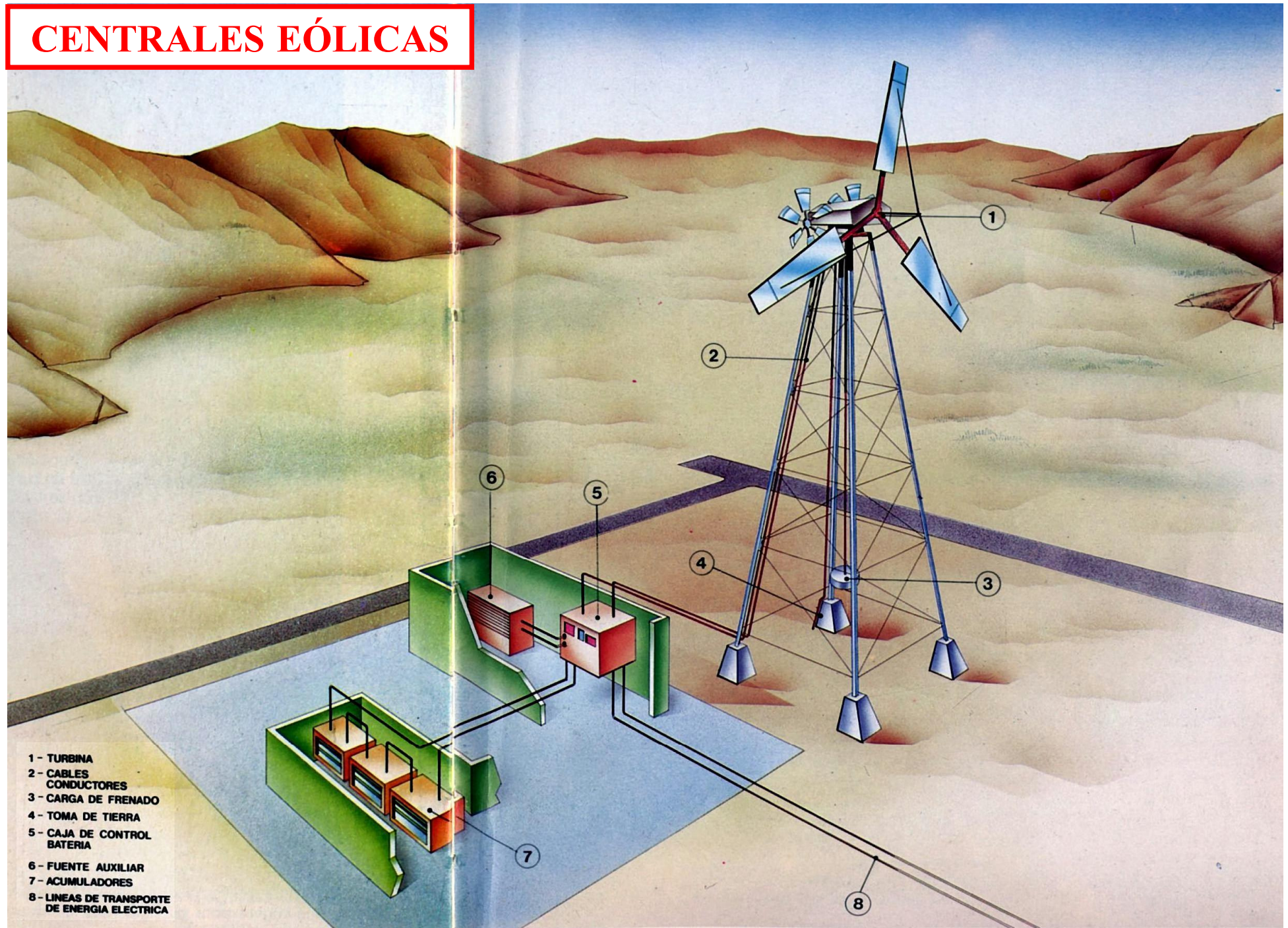


La figura (a) indica el número de horas al año que el viento en el emplazamiento de la turbina es igual o superior a un determinado valor (recuérdese que un año tiene 8760 horas).

De la figura (a) se obtiene la figura (c) que muestra el número de horas al año en las que la potencia disponible del viento, por unidad de área del rotor, supera cierto valor.

Conociendo el rendimiento del conjunto aerogenerador y los valores de V_C , V_N y V_D , a partir de la curva de la potencia eólica disponible (figura (c)) se puede obtener la curva anual de la potencia eléctrica suministrada. La integral de esta curva es la energía eléctrica producida anualmente. Por lo tanto, esta energía es igual al área rayada de la figura (c).

CENTRALES EÓLICAS



CENTRALES EÓLICAS

INTRODUCCIÓN

Una central eólica está compuesta por uno o varios aerogeneradores. En este último caso es preciso que la distancia entre torres permita evitar las interferencias aerodinámicas entre máquinas. La distancia mínima entre aerogeneradores es de 7 a 10 diámetros del rotor.

El emplazamiento donde se ubique una central eólica debe cumplir estas condiciones:

- Poseer una alta velocidad media anual de los vientos en la zona.
- Ausencia de grandes obstáculos en 2 o 3 km en la dirección dominante del viento.
- Estar situado en alguna de estas ubicaciones:
 - En lo alto de una colina de pendientes suaves y redondeadas.
 - En una isla sobre el agua de un lago o del mar.
 - En una llanura abierta o en una costa no accidentada.

Los componentes de un aerogenerador de eje horizontal son la **turbina** o **rotor**, que constituye el elemento fundamental que capta la energía del viento. El rotor transmite su giro a un eje alojado en la **navecilla** o **góndola**, donde están situados el **generador eléctrico**, un tren de engranajes que actúa como **multiplicador mecánico de velocidad**, y los **sistemas de control**. La góndola puede girar, cambiando el ángulo de guiñada, orientando la aeroturbina para que su eje de giro sea paralelo al viento. La góndola está en la parte superior de una **torre** que se cimenta en el terreno.

TURBINAS EÓLICAS

La función del rotor o turbina es convertir la energía cinética del viento en la energía mecánica que se utiliza para impulsar el generador eléctrico. Normalmente se utilizan turbinas tipo hélice de eje horizontal de tres palas.

Los subsistemas básicos que constituyen una turbina eólica de eje horizontal son las palas o aspas, el cubo o buje y la nariz.



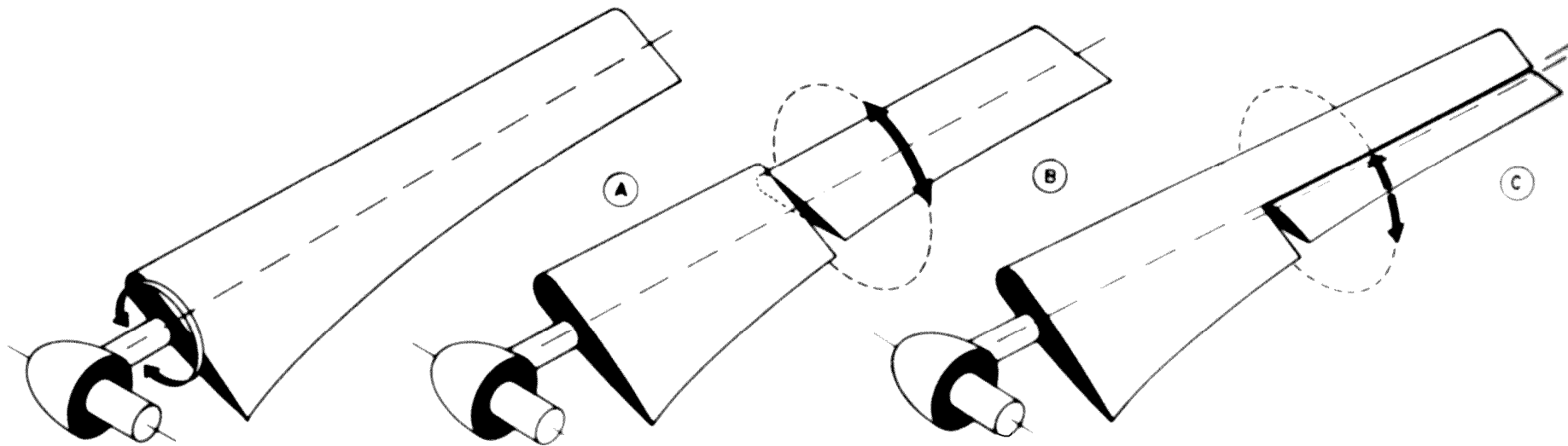
Turbina eólica:

- 1 Pala o aspa*
- 2 Cubo o buje*
- 3 Nariz*

Las *palas* o *aspas* son el elemento crítico de la turbina. Deben soportar intensas cargas aerodinámicas alternativas y deben estudiarse cuidadosamente sus modos de vibración y los de la torre, para reducir al mínimo las tensiones estructurales en ambos elementos. Inicialmente se fabricaron de acero, pero ahora se emplean materiales más ligeros como fibra de vidrio o carbono.

Lo más habitual es situar la turbina a barlovento para evitar el efecto sombra de la torre. En las turbinas a sotavento el efecto sombra de la torre no solo reduce la energía del viento cuando la pala pasa frente a la torre, sino que también hace que la pala se vea sometida a un esfuerzo cíclico (debido a la variación en el empuje sobre la pala cuando pasa frente a la torre respecto al que tiene en el resto del recorrido) más acusado que en las turbinas a barlovento.

La turbina en muchas ocasiones posee un **sistema de regulación** que actúa cambiando el ángulo de paso de las palas y cuya forma de actuación se describe en el apartado dedicado al sistema de regulación de potencia y velocidad. El ángulo de paso se puede modificar en toda la pala, sólo en parte de ella o mediante alerones.



Regulación del calaje de la pala:

- a) Toda la pala.
- b) Parte de la pala.
- c) Alerones.

El *cubo* o *buje* es el elemento donde se unen las palas y mediante el cual la potencia captada por el rotor se transmite al eje principal.

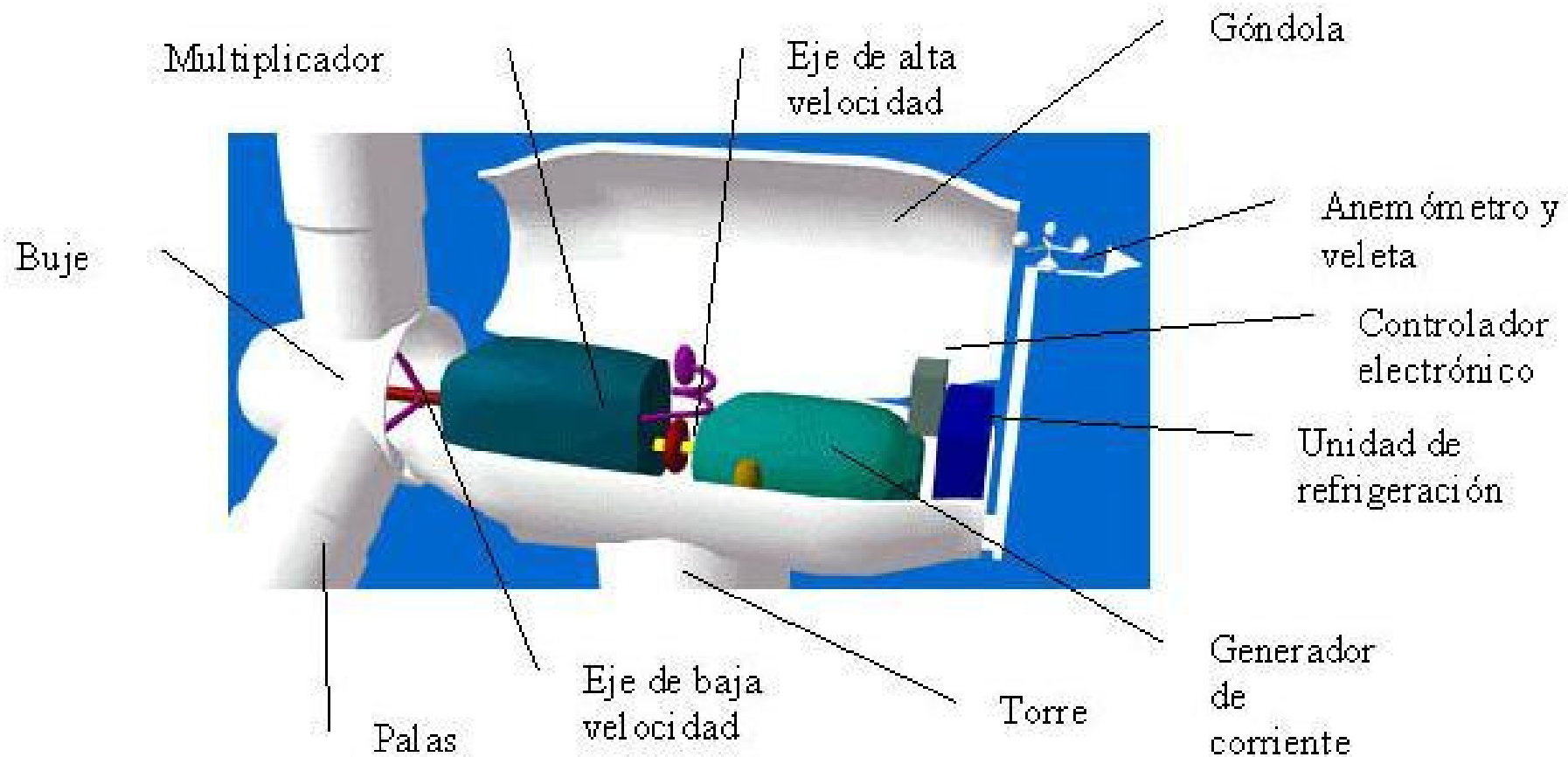
La *nariz* del rotor es una cubierta frontal en forma de cono que sirve para desviar el viento hacia el tren motor y mejorar la ventilación en el interior, eliminar turbulencia indeseable en el centro frontal del rotor y mejorar el aspecto estético.

Las turbinas eólicas se pueden clasificar según su potencia en:

- De *baja potencia*: $P < 30 \text{ kW}$; $D = 8 - 15 \text{ m}$
- De *media potencia*: $30 \text{ kW} < P < 300 \text{ kW}$; $D = 15 - 30 \text{ m}$
- De *alta potencia*: $P > 300 \text{ kW}$; $D > 30 \text{ m}$

Las turbinas más grandes tiene diámetros de 60 a 100 m y potencias entre 1 y 3 MW.

NAVECILLA O GÓNDOLA



La navecilla o góndola es una estructura metálica que contiene el equipo mecánico, eléctrico y de control del aerogenerador. Suele poseer un aislamiento acústico y térmico y habitualmente adopta una forma troncocónica o cilíndrica.

La góndola puede girar para orientar la turbina a favor del viento.

En el interior de la navecilla se encuentran el tren de engranajes, el generador eléctrico y los sistemas de control y de protección.

TREN DE ENGRANAJES

Las turbinas giran a unas velocidades comprendidas entre 19 y 64 r.p.m., mientras que los generadores eléctricos convencionales funcionan con unas velocidades nominales altas, usualmente entre 1200 a 1800 r.p.m. Por consiguiente, es necesario utilizar una caja de engranajes multiplicadora para acoplar el *eje de baja velocidad* de la turbina con el *eje de alta velocidad* del generador.

Si se utiliza un generador eléctrico de velocidad nominal baja ya no es necesario el tren engranajes. En este caso, el rotor se acopla directamente al generador eléctrico. Sin embargo, este es de fabricación especializada y sus dimensiones son relativamente grandes.

GENERADORES ELÉCTRICOS

Las turbinas eléctricas pueden accionar tanto generadores síncronos como asíncronos y utilizar varias formas de conexión directa o conexión indirecta del generador a la red eléctrica.

La *conexión directa a red* significa que el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna (generalmente trifásica). La *conexión indirecta a red* significa que la tensión que produce el generador pasa a través de una serie de dispositivos eléctricos y electrónicos que la ajustan para igualarla a la de la red.

Los generadores eléctricos más utilizados para la configuración de sistemas eólicos han sido los generadores asíncronos de jaula de ardilla, aunque con la reducción de costes en los sistemas con conexión indirecta están empezando a colocarse en mayor número los síncronos (especialmente de imanes permanentes) y los asíncronos doblemente alimentados.

La mayoría de turbinas eólicas usan generadores de 4 ó 6 polos. La razón por la que se utilizan estos generadores de velocidad relativamente alta es por ahorrar en tamaño y en costes.

Sistemas de velocidad constante

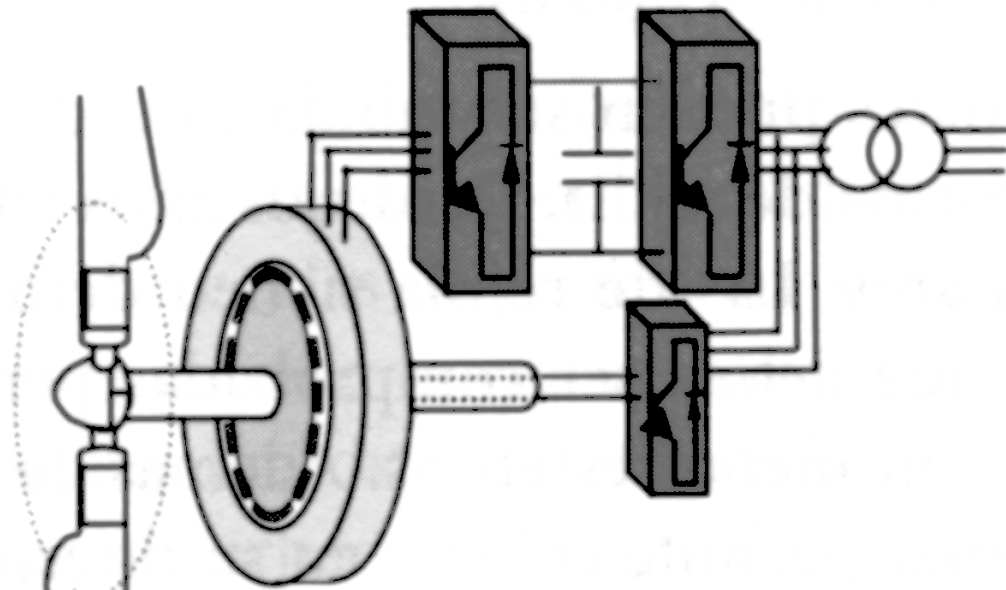
Los generadores asíncronos son máquinas de inducción que funcionan girando a una velocidad superior a su velocidad síncrona. Salvo cuando a estos generadores se les alimenta también por el rotor, su velocidad varía muy poco con la potencia que suministran. Por ello, a los aerogeneradores que utilizan este tipo de generadores conectados directamente a la red eléctrica se les conoce como de velocidad constante.

Sistemas de velocidad variable

En aerogeneradores la velocidad constante tiene la desventaja de originar cargas dinámicas importantes que exigen su construcción con estructuras robustas. Además, sus rotores trabajan a una eficiencia menor que aquella para la que fueron diseñados: a velocidad de giro constante el parámetro de velocidad λ varía cada vez que cambia la velocidad del viento. Solamente existe un valor de λ para el cual la eficiencia del rotor es máxima.

Estos inconvenientes han motivado el desarrollo de los llamados sistemas de velocidad variable, para los cuales la velocidad de operación no está limitada por la frecuencia de la línea eléctrica. En la mayoría de las máquinas de este tipo, los generadores eléctricos no se conectan directamente a la línea eléctrica, lo que permite que la velocidad de rotación del rotor siga a la velocidad del viento. Con ello, las cargas dinámicas se reducen y la eficiencia aumenta, pero se produce electricidad de frecuencia variable. Para que esta electricidad se pueda transferir a una línea eléctrica convencional es necesario convertirla a la frecuencia con que opera la línea. Para ello, se utiliza un convertidor electrónico constituido por un rectificador y un inversor. Esta configuración se conoce como CA-CC-CA. El incremento de energía generada se estima entre el 10 y el 12%. Sin embargo, las pérdidas en la electrónica lo reducen a ganancias netas entre el 5 y el 8 %.

Otra forma de obtener un sistema de velocidad variable es el utilizar un generador asíncrono doblemente alimentado (alimentado también por el rotor).

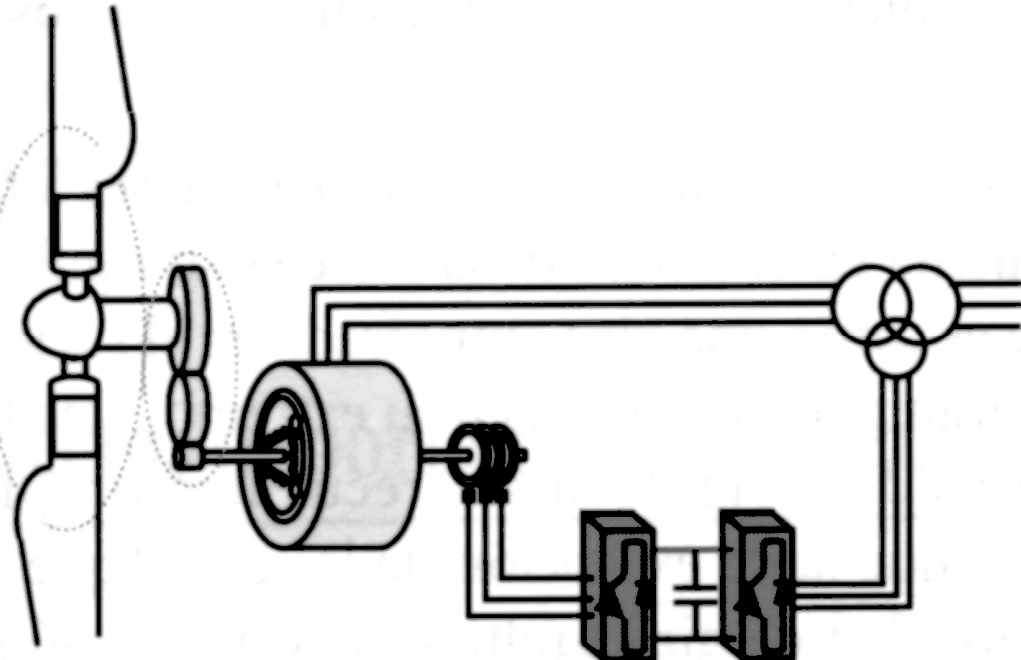


a)

Ejemplos de sistemas de velocidad variable:

a) Generador síncrono conectado directamente a la turbina (sin tren de engranajes) y con conexión indirecta a la red eléctrica

b) Generador asíncrono doblemente alimentado



b)

SISTEMAS DE REGULACIÓN DE POTENCIA Y VELOCIDAD

Los aerogeneradores están diseñados para producir energía eléctrica de la forma más barata posible. Así pues, suelen estar contruidos para rendir al máximo a velocidades alrededor de 15 m/s. Es mejor no diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes.

Como se vio al analizar las curvas de potencia, para velocidades por encima de la nominal es preciso limitar la potencia que proporciona la turbina a su valor nominal para no sobrecargar el generador eléctrico. En consecuencia, todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia.

Aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled")

Este método para la regulación de la potencia consiste en el control del ángulo de paso de la pala β' . Resulta evidente que, para una geometría dada de pala, si mecánicamente se cambia el ángulo β' se estará cambiando el ángulo de paso β de todos los perfiles de pala.

Cuando la velocidad del viento es inferior a la nominal, se mantiene el ángulo β' que maximiza la potencia suministrada por la turbina. Para velocidades del viento superiores a la nominal, se aumenta el ángulo de paso (con lo que se reduce el ángulo de ataque) para limitar la potencia a su valor nominal.

Los aerogeneradores que utilizan este sistema de control deben poder acelerar el rotor en caso de ráfagas de viento; ya que si no el sistema de regulación estará girando las palas continuamente y estaría muy solicitado. Esto justifica que el sistema de control por cambio del ángulo de paso se utilice sobre todo en sistemas de velocidad variable.

Aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled")

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdidas aerodinámicas tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree una cierta turbulencia en la parte de la pala que no da al viento.

La principal ventaja de esta regulación es que se evitan las partes móviles del rotor y un sistema de control complejo. Estos sistemas se usan sobre todo en máquinas de velocidad constante.

Aerogeneradores de regulación activa por pérdida aerodinámica

Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, pues ambos tienen palas que pueden girar.

Cuando la velocidad del viento es inferior a la nominal, se mantiene el ángulo β' que maximiza la potencia suministrada por la turbina. Para velocidades del viento superiores a la nominal, se limita la potencia a su valor nominal dando a β' un valor negativo. Es decir, la máquina girará las palas en dirección contraria a la que haría una máquina de regulación por cambio de ángulo de paso.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva.

Otra de las ventajas es que, en comparación con los sistemas por cambio del ángulo de paso tradicionales, estos sistemas necesitan cambiar muy poco el ángulo de paso para modificar apreciablemente la potencia. Esto hace que la pala gire menos veces y ángulos más pequeños, lo que permite utilizarlos en sistemas de velocidad fija.

Control de velocidad

Los sistemas de control de potencia mencionados anteriormente limitan la potencia a la nominal cuando la velocidad del viento es superior a la nominal.

Para velocidades del viento por debajo de la nominal el ángulo de paso se mantiene constante. En este caso, lo ideal es conseguir que la turbina varíe su velocidad de giro al compás de la velocidad del viento, para conseguir funcionar siempre con el parámetro de velocidad λ óptimo, el que da lugar al máximo valor del coeficiente de potencia C_p .

Esto sólo es posible en los sistemas de velocidad variable. En estos sistemas un microprocesador actúa sobre los convertidores de frecuencia para lograr que la máquina gire a la velocidad más adecuada a la velocidad del viento en cada momento, sin que por ello se modifique la frecuencia de la tensión que suministra a la red.

Además de permitir el extraer más energía del viento, los sistemas de velocidad variable presentan otras ventajas:

- Se reduce el ruido aerodinámico en el caso de vientos con baja velocidad, ya que las palas giran más despacio.
- El rotor actúa como un volante de inercia suavizando las oscilaciones del par motor.

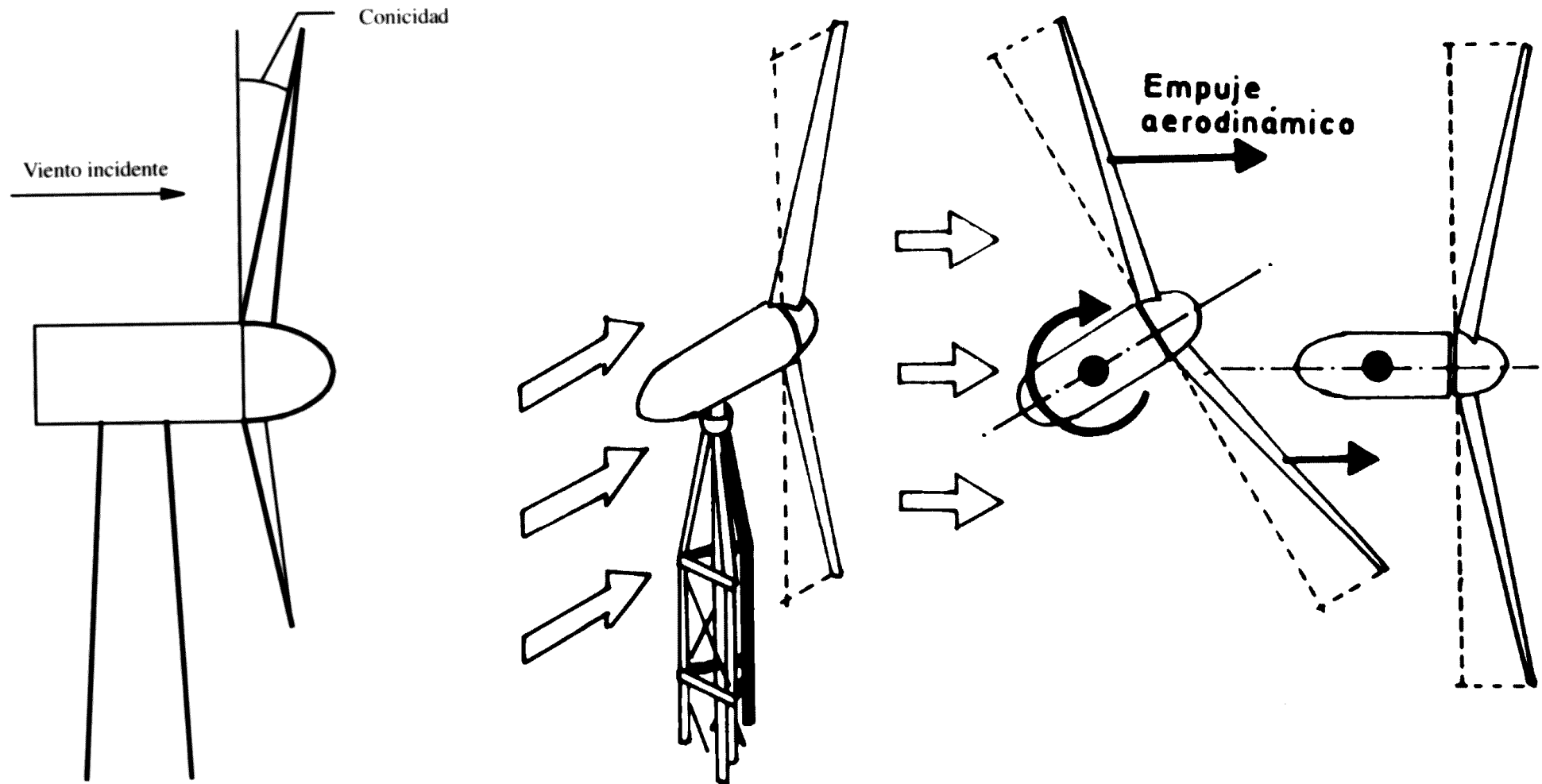
Sin embargo, los sistemas de velocidad variable son más complejos, por lo que algunos fabricantes los consideran menos fiables.

La mejora energética de los sistemas de velocidad variable frente a los de velocidad fija es del orden del 10%.

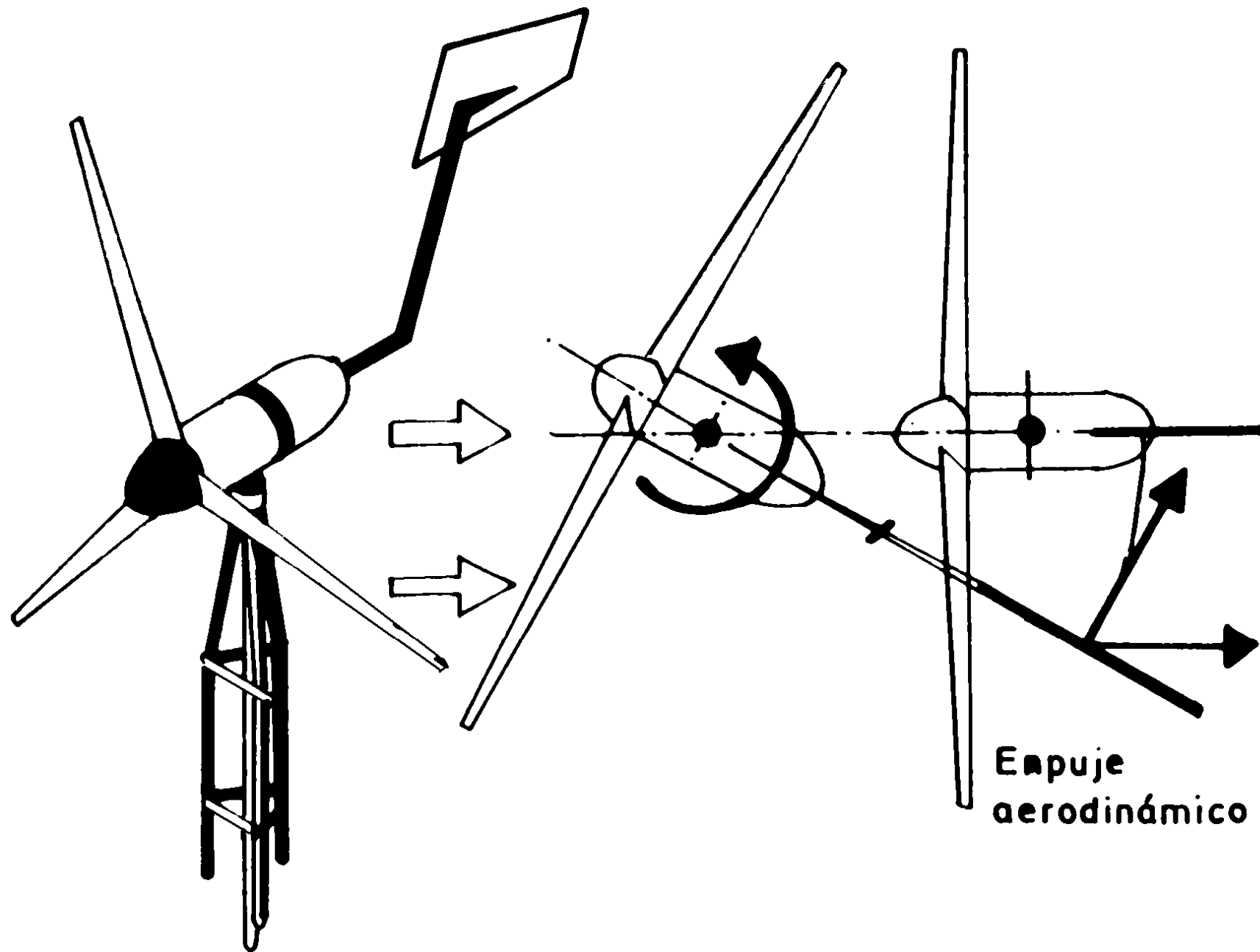
Una solución intermedia entre los sistemas de velocidad fija y variable es el utilizar generadores de polos conmutables, los cuáles tienen dos velocidades de giro nominales.

SISTEMAS DE ORIENTACIÓN

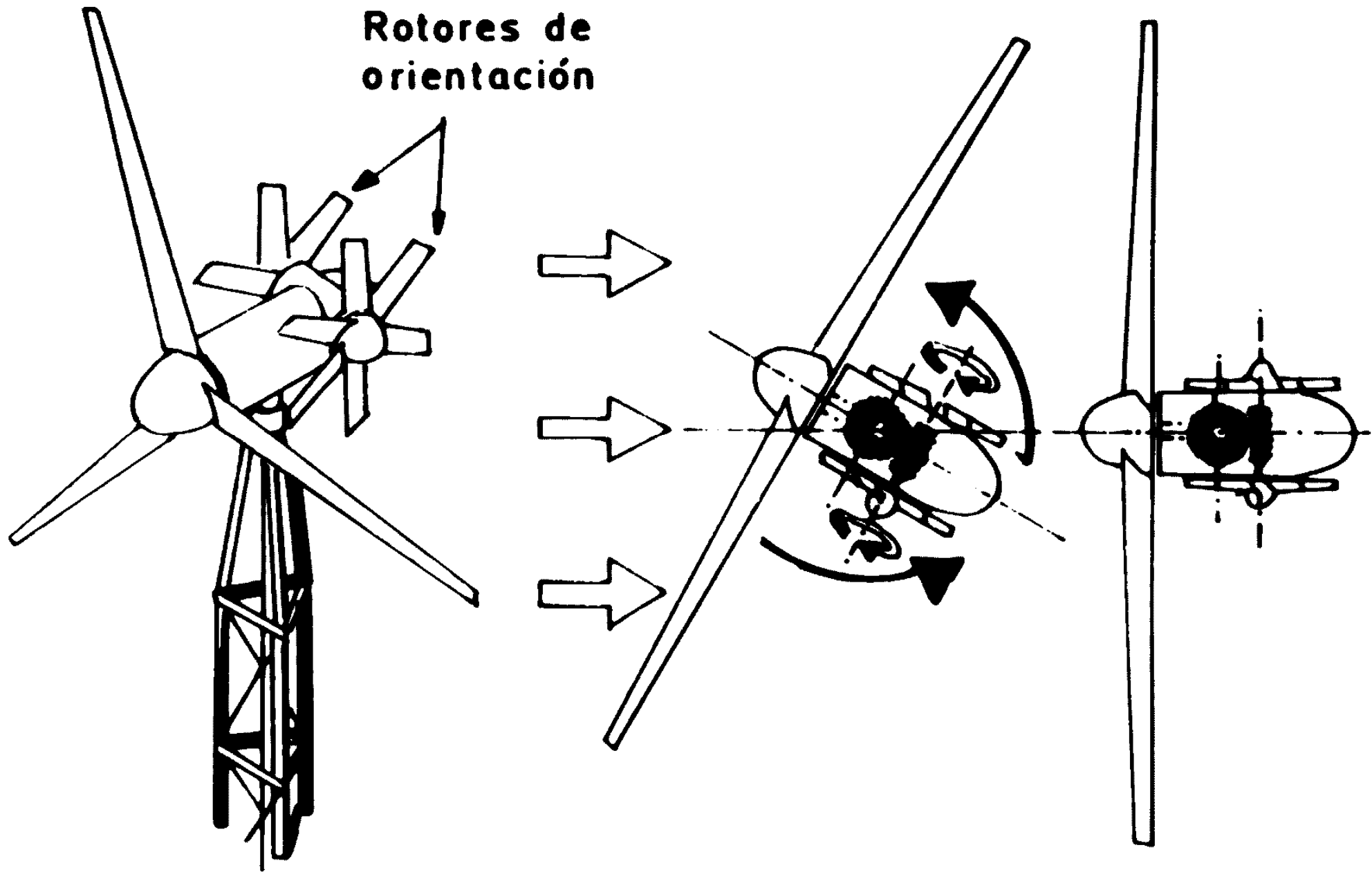
El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar la góndola y conseguir enfrenar la turbina contra del viento.



Orientación por conicidad en un aerogenerador a sotavento



Sistema de orientación por veleta



Sistema de orientación por molinos auxiliares

En el caso de aerogeneradores a sotavento se consigue que la máquina sea autororientable dotando a su rotor de cierta conicidad, aunque debe tener algún sistema que reduzca su velocidad de orientación para evitar cargas excesivas.

En las máquinas a barlovento hay que disponer sistemas activos de orientación del aerogenerador.

Uno de los métodos más sencillos es utilizar una veleta. Se emplea únicamente en los equipos pequeños.

Otro método utiliza unos molinos auxiliares situados a ambos lados de la góndola y cuyos ejes son perpendiculares al de la turbina. El viento actúa sobre los rotores auxiliares sólo cuando la turbina no está enfrentada al viento. La rotación de los molinos auxiliares hace girar la góndola hasta que la turbina queda de nuevo frente al viento.

En los grandes aerogeneradores generalmente se dispone de unos motores auxiliares que son controlados por un sistema de control en lazo cerrado que detecta la dirección del viento mediante una veleta. Estos motores son los que orientan la góndola para que la turbina quede orientada en la dirección adecuada. El sistema de control sólo actúa para errores de alineación superiores a cierto valor para evitar que la góndola esté girando continuamente. La velocidad de giro de la góndola es pequeña (0,5 grados/segundo) para reducir los esfuerzos mecánicos sobre la estructura.

DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

El objeto fundamental de este tipo de sistemas es el de proteger la integridad física de las personas, así como la del equipo en su conjunto. Por ello, estos sistemas se ponen en funcionamiento generalmente en situaciones como:

- Presencia de vientos mayores que la velocidad de salida.
- Velocidad de rotación por arriba del máximo aceptable.
- Pérdida de carga (desconexión o fallo de la línea de interconexión).
- Exceso de vibraciones.
- Temperaturas superiores a las máximas aceptables (en generadores, tren de engranajes, controladores electrónicos,...).
- Pérdida de presión en controladores hidráulicos.

Dado que el viento no es controlable, ante una de una de estas situaciones se debe reaccionar mediante el **paro forzado** de los aerogeneradores.

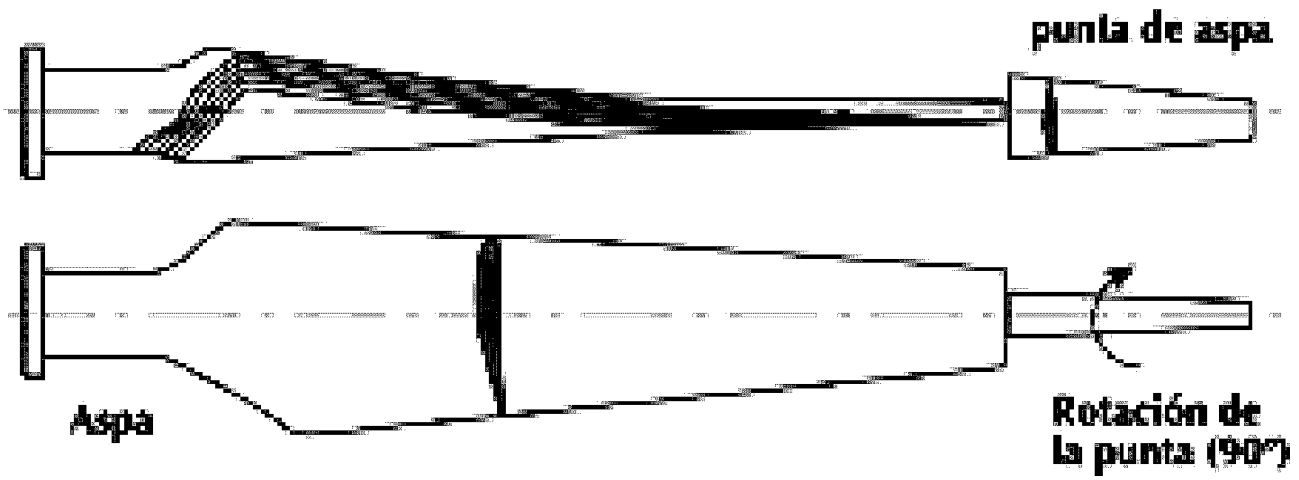
PARO FORZADO

Los medios que se utilizan para efectuar el paro forzado son:

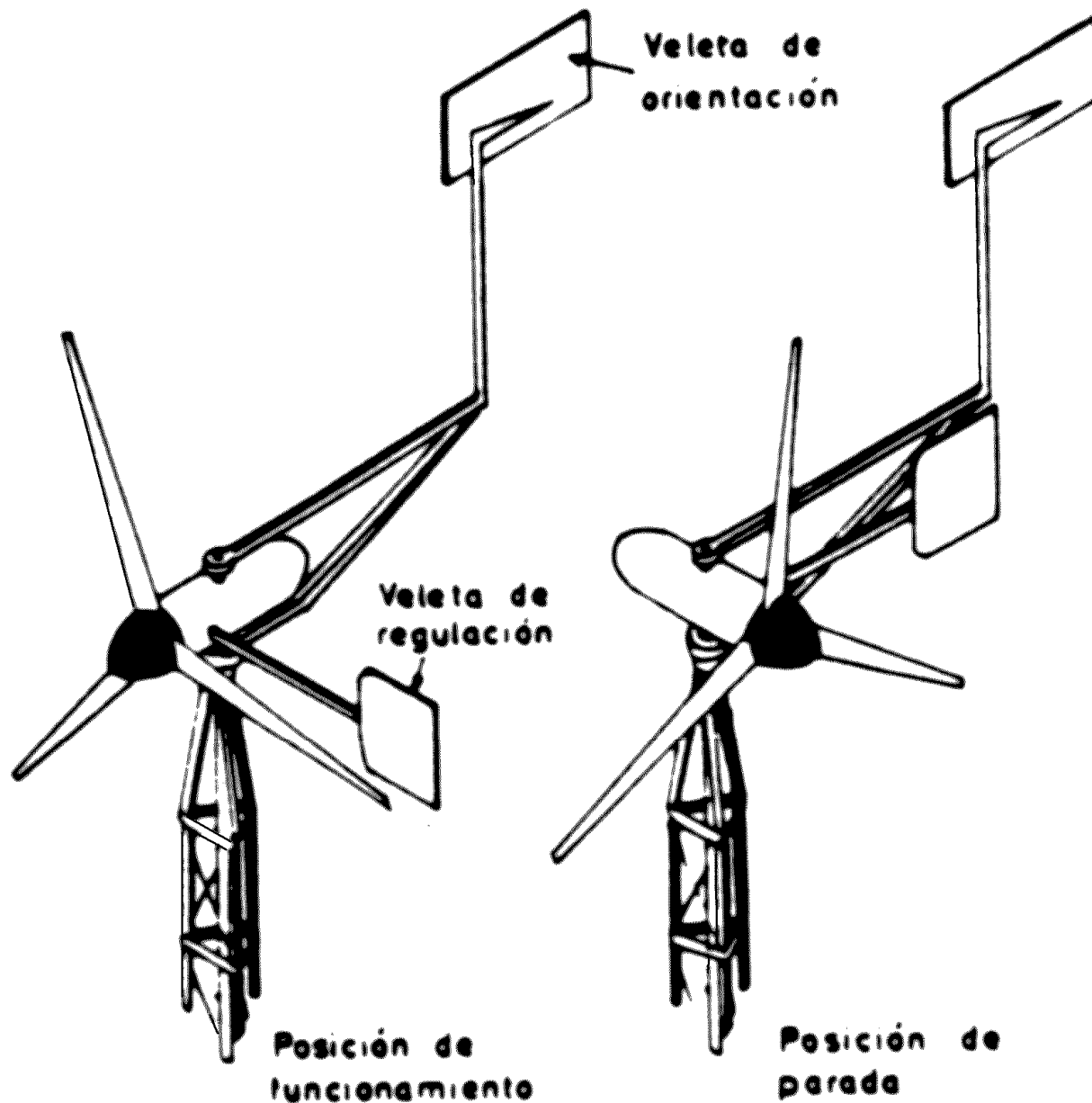
- Freno de disco.
- Control del ángulo de paso de las palas.
- Dispositivos de punta de pala (frenos aerodinámicos).
- Control de orientación al viento.

La mayoría de los aerogeneradores cuenta con dos (o más) de estos medios, los cuales pueden operar de manera independiente o coordinada. Dependiendo del modelo específico del aerogenerador se asigna uno de ellos como el medio principal de frenado.

En aerogeneradores que tienen sistemas de regulación de velocidad por control del ángulo de paso de las palas, usualmente se asigna este medio como el de frenado principal. En este caso, se amplía su rango de operación para que sea posible colocar la cuerda del elemento de punta de pala en una posición casi paralela con la dirección del viento (*posición de bandera*). Esta solución evita fuerzas mecánicas durante el evento. El freno secundario (usualmente un freno de disco), se aplica después que la velocidad de rotación del rotor se redujo considerablemente, y en consecuencia, el par motriz es mucho menor.



Frenos aerodinámicos



Los **frenos aerodinámicos** o **dispositivos de punta de pala** se utilizan en algunos aerogeneradores para reducir aerodinámicamente la velocidad del rotor antes de aplicar el freno de disco. Este dispositivo es una sección en la punta de la pala que se puede girar hasta 90° , con objeto de que su superficie se oponga aerodinámicamente al giro del rotor. Estos frenos se emplean sobre todo en rotores de palas fijas (sin sistemas de cambio del ángulo de paso).

También se puede parar la turbina orientándola de manera sea toda ella y no sólo las aspas la que quede en bandera; es decir, paralela a la dirección del viento.

Frenado por orientación de la turbina paralela al viento

TORRE

La torre constituye el elemento de apoyo del resto de elementos de la aeroturbina. Por lo tanto, su principal función es estructural. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta a medida que aumenta la altura sobre el nivel del suelo. Una turbina moderna de 600 kW tendrá una torre de 40 a 60 metros (la altura de un edificio de 13 a 20 plantas).

Las torres pueden ser *tubulares* (cilíndricas, troncocónicas o mezcla de ambas) o *de celosía*. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento de las turbinas, ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas.

Las torres tubulares son las más utilizadas y pueden ser de acero o de hormigón.

En la parte superior de la torre suele haber un rodamiento de gran diámetro sobre el que descansa la góndola y que permite el giro de ésta para orientarla en la dirección del viento.

En el diseño de la torre debe tenerse cuidado en que sus modos de vibración se acoplen adecuadamente con los del rotor.



Aerogenerador sobre torre tubular



Aerogenerador sobre torre de celosía



Parque eólico donde los aerogeneradores están instalados sobre torres tubulares