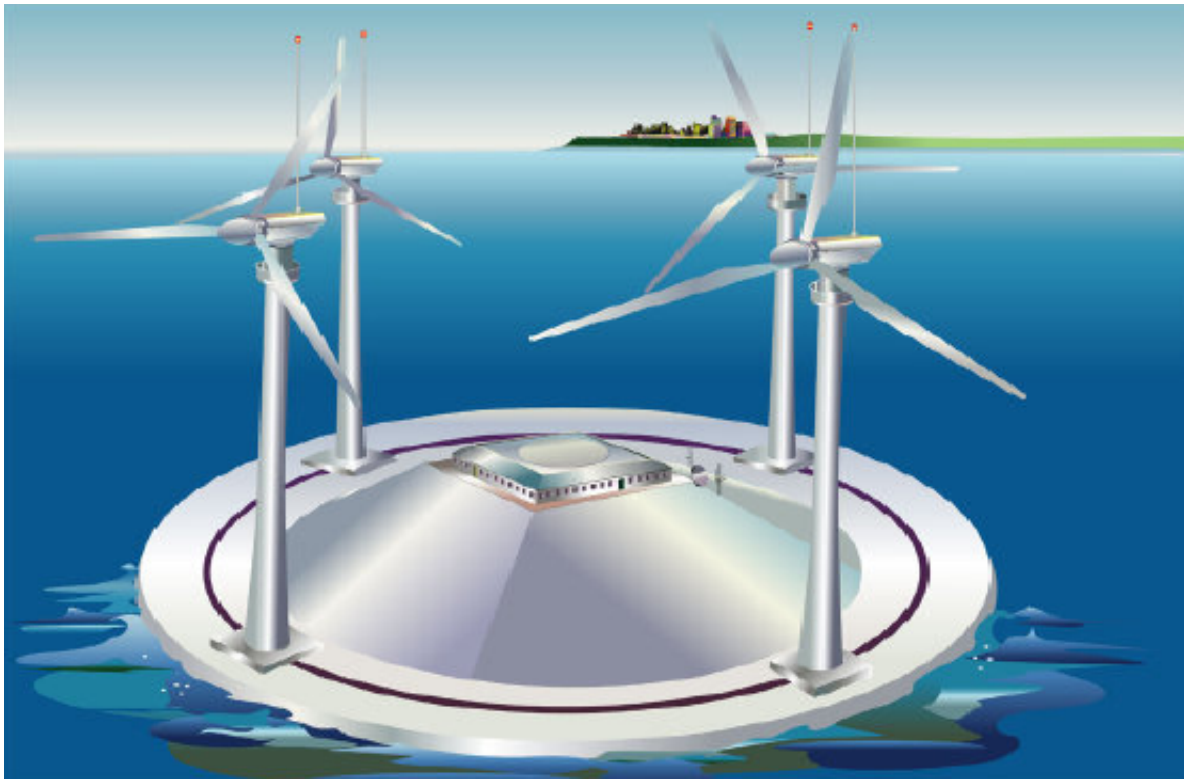
ENERGÍA EÓLICA



Pedro Fernández Díez
pfernandezdiez.es

ENERGIA EOLICA

1993 PEDRO FERNANDEZ DIEZ

I.S.B.N. 84-8102-019-2

Depósito Legal SA-252-1993

Edita: Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T.

Avda. de los Castros s/n

39005 Santander (España)

I.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y FUENTES EÓLICAS

pfernandezdiez.es

I.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Hasta la aparición de la máquina de vapor en el siglo XIX, la única energía de origen no animal para realización de trabajo mecánico era la proveniente del agua o del viento. La primera y más inmediata forma de aprovechamiento de la energía eólica ha sido desde los tiempos más remotos aplicada a la navegación; las primeras referencias de la utilización de embarcaciones a vela proceden de Egipto y datan del IV ó V milenio antes de J.C.

Los molinos de viento existían ya en la más remota antigüedad. Persia, Irak, Egipto y China disponían de máquinas eólicas muchos siglos antes de J.C.; Hammurab I. rey de Babilonia, 17 siglos antes de J.C. utilizó molinos accionados por el viento para regar las llanuras de Mesopotamia y para la molienda del grano. Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña, cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino. En China hay referencias de la existencia de molinos de rotor vertical y palas a base de telas colocadas sobre un armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua, máquinas conocidas como *panémonas*, precursoras de los molinos persas. El egipcio Hero de Alejandría representa en un estudio un molino de eje vertical de cuatro palas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. Si el origen de las máquinas eólicas presenta notables incertidumbres, no menos lo hace su expansión por el Mediterráneo y por toda Europa. Según algunos autores, se debe a los cruzados la introducción de la tecnología eólica en Occidente, si bien otros opinan que Europa desarrolla su propia tecnología, claramente distinta de la oriental, ya que en Europa se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

Sea cual fuese la forma de aparición de estas máquinas en diversos países europeos, lo cierto es que se encuentran abundantes ejemplos de la importancia que los molinos de viento llegaron a tener

en diversas aplicaciones; citemos como ejemplo relevante los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda y los no menos conocidos molinos holandeses usados desde 1430 para la desecación de los *polders*, todos ellos de eje horizontal. En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje; entre los años 1609 y 1612, Beemster Polder fue drenado con la ayuda de estas máquinas; sin embargo, no sólo utilizaron los molinos para drenar el agua, sino también para extraer aceites de semillas, moler grano, etc; precisamente el nombre de molinos proviene de este tipo de aplicaciones. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos la da el hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20.000 molinos, que les proporcionaban una media de 20 kW cada uno, energía nada despreciable para las necesidades de aquella época.

En 1724 Leopold Jacob proyecta un molino de ocho palas que mueve una bomba de pistón; en 1883 aparece el pequeño *multipala americano* diseñado por Steward Perry. Este molino, de unos 3 m de diámetro utilizado para bombeo, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento. Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar la aeroturbina danesa de Lacourt (1892), máquina capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW.

Hasta ese momento, las velocidades típicas que se habían conseguido con los multipala eran de dos veces la del viento, mientras que los molinos clásicos habrían funcionado con velocidades en el extremo de la pala del mismo orden de magnitud que la del viento.

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos Joukowski, Drzewiechy y Sabinin en Rusia; Prandtl y Betz en Alemania; Constantin y Enfield en Francia, etc, establecen los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas.

En el año 1910 Dinamarca tenía instalada una potencia eólica de 200 MW.

En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores la del viento incidente.

Betz demostró en su famoso artículo "Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung", (Berlín 1927), que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Por lo tanto, los nuevos rotores debían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir rendimientos más elevados. La teoría demostró también que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso cons-

truirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía. Sin embargo, el petróleo presentaba un grave inconveniente al crear una dependencia entre los países consumidores y los productores, de forma que cuando el orden económico se veía alterado por alguna crisis y la dependencia energética se hacía patente, se adoptaban políticas de apoyo de los recursos autónomos, que se abandonaban una vez se superaba la crisis.

La primera de estas etapas fue una consecuencia inmediata de la Primera Guerra. Con una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal y escasez de recursos para importar petróleo, las turbinas eólicas continuaron desarrollándose por dos caminos diferentes.

- Por un lado, hacia el diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de baja potencia, capaces de generar electricidad en áreas rurales más o menos aisladas, a las que todavía no habían llegado las redes de electrificación

- Por otro, y a la sombra de una industria aeronáutica en pleno desarrollo, hacia el diseño y construcción de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala

-

Este apoyo a los recursos energéticos autóctonos, que comenzó inmediatamente después de la guerra, se mantuvo durante la década siguiente, como consecuencia de la política proteccionista adoptada por los países occidentales tras la crisis de 1929.

Durante este período fueron innumerables los trabajos realizados sobre plantas eólicas de gran potencia en Europa y USA, centrando los programas eólicos su interés en aspectos diferentes como, la evaluación de los recursos disponibles, obtención y tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos, y el cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia, a la vez que intentó crear incentivos que motivasen a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitiesen cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

Dentro de los grandes proyectos, el Honnef alemán consistía en instalar torres de 300 m de altura, con 3 ó 5 rotores de 150 m de diámetro, capaces de generar 75 MW; aunque se realizaron estudios a pequeña escala, el prototipo de esta central fue destruido en una incursión aérea.

El anteproyecto Heronemus (U.S.A.) consistía en la construcción de estaciones eólicas compuestas por torres de 113 m de altura con tres rotores de 73 m de diámetro; se pensaba que con 1400 estaciones de este tipo, ubicadas en la costa se podría generar el 8% de la demanda eléctrica U.S.A.

En 1931 se instaló en el Mar Negro una máquina eólica de 100 kW.

Entre 1941 ÷ 1945 estuvo funcionando en U.S.A, una unidad de 1,2 MW.

Una vez finalizada la Segunda Guerra, y como consecuencia del período de escasez que siguió, los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas que se proyectaban.

El segundo periodo de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de 1960 en que, una vez restablecida la economía internacional, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales, por lo que el bajo precio del petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica; a esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos.

En esta época, las redes de electrificación empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas.

El período terminó con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre si.

Solamente en Francia, Dinamarca e Inglaterra se llevaron a cabo programas de cierta importancia. El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21.000, según datos de la Agencia Internacional de la Energía, con una potencia de 2.200 MW, equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia, y de los cuales la mitad estaban instalados en los parques eólicos de California.

A título anecdótico, a finales de 1991 la potencia de origen eólico instalada en la red eléctrica danesa ascendía a 410 MW con una producción de energía equivalente al 2,3% del consumo del país. En Alemania la potencia instalada era de 100 MW y estaba previsto alcanzar los 250 MW en breve plazo. Holanda contaba con 80 MW de potencia instalada y 100 más en construcción. El programa eólico holandés tenía previsto alcanzar los 1.000 MW hacia el año 2000 y los 2.000 MW en el 2010. España tenía en fase de realización varios proyectos que completarían los 50 MW hacia finales de 1992. El Plan de Energías Renovables, dentro del Plan Energético Nacional 1992/2000 alcanzó los 100 MW a finales de 1995, aunque las previsiones actuales sobrepasan ya muy ampliamente esas cifras.

En cuanto al tipo de máquinas de mayor interés, los resultados obtenidos de las numerosas experiencias realizadas permitieron concretar el campo de trabajo en dos modelos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y, en menor medida, las turbinas Darrieux de eje vertical.

El tamaño medio de las máquinas instaladas hasta 1990 estuvo en el rango de los 100 kW, aunque se observaba una clara tendencia

En los años siguientes, los pequeños aerogeneradores aumentaron poco a poco su potencia, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducían costes; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 kW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen costes, convergiendo hacia nuevas generaciones de aeroturbinas de $0,5 \div 1,2$ MW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología. La fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de distribución de electricidad muy extendidas, ya que los costes superiores de la energía en instalaciones pequeñas e individuales las hacen poco rentables.

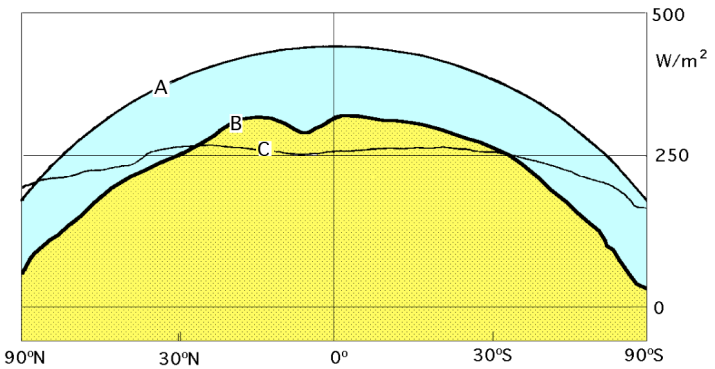
El precio del kW/h eólico puede ser, en aerogeneradores de potencia media, la mitad que en los aerogeneradores de potencia baja. La rentabilidad de las aeroturbinas eólicas implica el intentar disminuir costos, tanto en su instalación inicial, como en los gastos de mantenimiento, procurando que el tiempo de vida de la instalación sea superior al del período de amortización.

I.2.- CIRCULACIÓN GENERAL

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, o mejor dicho, la energía mecánica que en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento.

La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol que en lugares favorables puede llegar a ser del orden de 2000 kW/m^2 anuales; el 2% de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden de 10^{17} kW.

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento, Fig I.1.



A) Irradiancia solar sobre una superficie horizontal; B) Irradiancia solar absorbida por la Tierra
C) Irradiancia radiada al espacio exterior

Fig I.1 Irradiancia solar

La energía eólica tiene como ventajas la de ser inagotable, gratuita y no lesiva al medio ambiente, pero cuenta también con los grandes inconvenientes de ser dispersa y aleatoria. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento.

El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento viene influenciado por el giro de la Tierra.

Las causas principales del origen del viento son:

a) La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos

b) La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur

c) Las perturbaciones atmosféricas

El movimiento de la Tierra se rige por la siguiente relación entre aceleraciones:

$$a_{absoluta} = a_{relativa} + a_{arrastre} + a_{Coriolis}$$

ecuación que aplicada al movimiento del aire y simplificada adecuadamente proporciona la siguiente ecuación vectorial:

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \psi - 2 (w \wedge r)$$

en la que $\vec{v}$ es la velocidad del viento, p la presión, ρ la densidad, $\vec{w}$ la velocidad angular de la Tierra, $\vec{r}$ el vector de posición de las partículas y $\nabla \psi$ la aceleración de origen gravitatorio.

Esta ecuación vectorial da lugar a las ecuaciones diferenciales (Navier Stokes) que rigen el movimiento del aire sobre la Tierra, de la forma

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2 w \left(\cos \psi \frac{dz}{dt} - sen \psi \frac{dy}{dt} \right) \\ \frac{d^2y}{dt^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2 w \cos \psi \frac{dx}{dt} \\ \frac{d^2z}{dt^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2 w \cos \psi \frac{dx}{dt} - g \end{cases}$$

En aquellas zonas en donde la radiación solar es más intensa, como en el Ecuador, el globo terrestre acumula calor principalmente en el océano, calor que, por el contrario, se pierde en los Polos; sin embargo, ni el Ecuador ni los Polos vienen a ser, por término medio, los lugares más calientes, o más fríos, de la superficie terrestre.

Un ejemplo de la circulación general de los vientos que además afecta a España por su influencia en las islas Canarias son los *vientos alisios*. Al calentarse el aire en el Ecuador asciende y es sustituido por el aire más próximo a los Polos, formándose la llamada circulación de Hadley, que se hace

inestable a unos 30° de latitud y origina unos vientos generales que afectan a las islas Canarias. Este flujo no se proyecta directamente sobre los Polos debido a la fuerza de Coriolis que aparece como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, que modifica su curso; esta fuerza depende de la velocidad del viento y de la rotación de la Tierra, por lo que las masas de aire caliente se desplazan por esta circunstancia hacia el Este; la circulación general es semejante y simétrica en cada uno de los dos hemisferios, Fig I.2, yendo de O a E en el hemisferio Norte.

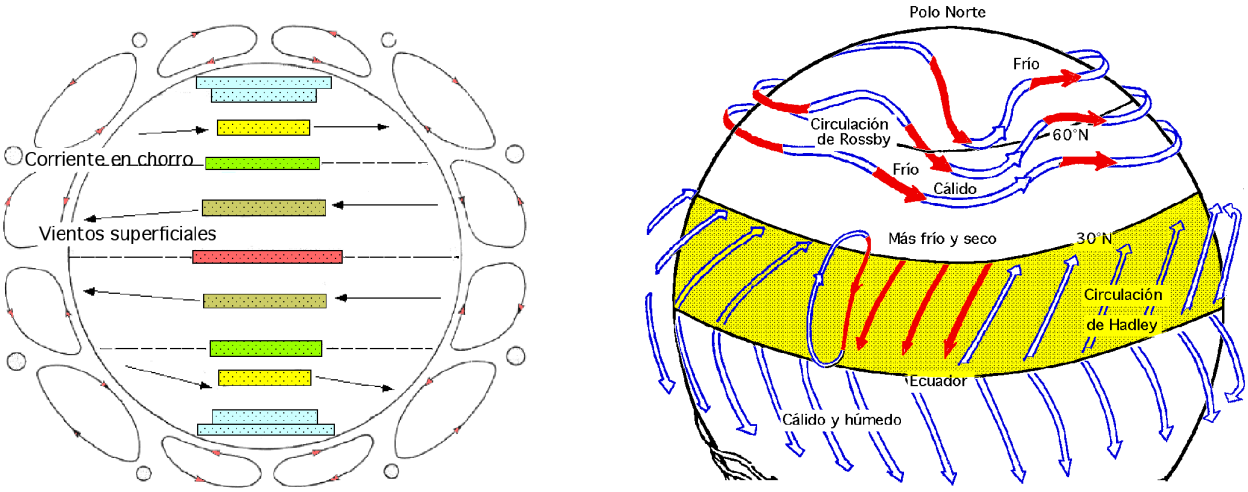


Fig I.2.-Circulación general del aire en superficie

El eje principal de esta circulación es una corriente en chorro que se produce por encima de los 10.000 m a una presión de 300 mb; se trata de un viento del Oeste que, en el hemisferio Norte, se localiza hacia el paralelo 45°, siendo su velocidad media de 200 km/hora, pero puede llegar a sobrepasar los 500 km/hora. A lo largo del eje del chorro circulan otras corrientes de aire a velocidades diferentes. El desplazamiento de las masas de aire se efectúa desde las zonas en las que la presión de la atmósfera y, por lo tanto la del aire, es más elevada (anticiclones), hacia las zonas de presión más baja (depresiones ó ciclones), por la aceleración de Coriolis. Las depresiones y los anticiclones están representados en las cartas meteorológicas por el trazado de las isobaras.

La circulación general en superficie depende del reparto medio de las presiones a lo largo de un cuarto de meridiano terrestre. Para el hemisferio Norte existe un centro anticiclónico en el Polo, un eje de depresión hacia los 60°N, un eje anticiclónico hacia los 30°N, conocido como cinturón subtropical, y una banda de depresión hacia el Ecuador. El viento perfila o contornea los anticiclones en el sentido de las agujas del reloj, dirigiéndose hacia las depresiones, y las contornea en sentido contrario. Un esquema de vientos generales es el siguiente:

Entre 90°N y 60°N, aire ártico (muy frío) (Circulación de Rossby)
Entre 60°N y 40°N, aire polar (frío)
Entre 40°N y 5°N, aire tropical (templado)
Entre 5°N y 5°S, aire ecuatorial (cálido)

En el límite de estas diferentes masas de aire existen zonas conflictivas o zonas frontales como:

- El frente ártico entre el aire ártico y el aire polar

- El frente polar entre el aire polar y el aire tropical

- La zona de convergencia intertropical, entre el aire tropical y el aire ecuatorial, en la que soplan vientos regulares (alisios) del Nordeste, contorneando el anticiclón de las Azores, (Corriente de Hadley)

Las diferentes masas de aire, así como los ejes de depresión (60°) y anticiclónicos (30°), se desplazan según las estaciones en el sentido del movimiento aparente del Sol; en el hemisferio Norte existe, en invierno, una traslación general hacia el Norte, y en verano hacia el Sur. En el hemisferio Sur al revés; estos vientos se denominan *monzones*.

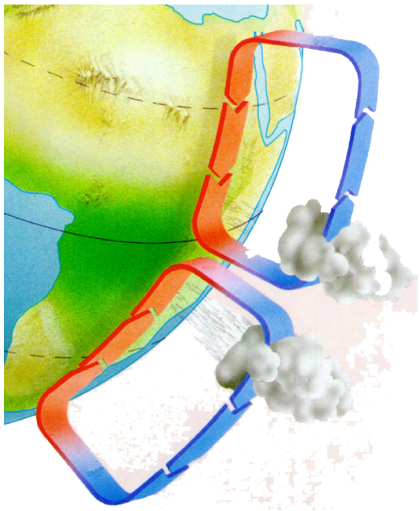


Fig I.2a
El aire frío tiende a descender hacia el Ecuador

No obstante, las condiciones generales de los vientos son modificadas localmente por temporales y gradientes de temperatura originados por los desiguales calentamientos de superficies de tierra y agua o por diversos accidentes orográficos; se puede considerar que los vientos vienen dirigidos por determinados centros de acción de la atmósfera, siendo lo más frecuente que su desplazamiento sea en sentido horizontal. La atmósfera no es homogénea, estando fraccionada en un número bastante grande de masas de aire más o menos calientes; la transición entre dos masas de aire puede ser lenta y continua o, por el contrario, brusca, constituyendo entonces una superficie frontal que forma una cierta pendiente en la que el aire caliente, más ligero, está por encima del aire frío.

La proyección sobre el suelo de una superficie frontal se denomina *frente*; un ejemplo típico lo constituye, en el hemisferio Norte, el frente polar atlántico, que representa la zona de separación entre el aire polar dirigido por la depresión de Islandia y el aire tropical conducido por el anticiclón de las Azores.

Los frentes no son estacionarios porque el aire frío tiende a descender hacia el Ecuador, mientras que el aire caliente tiende a remontar hacia el Polo, originándose en un punto una ondulación que se desarrolla y acentúa, al tiempo que es apresada por las corrientes de aire del Oeste, acompañada de una depresión móvil. Cuando el aire caliente remonta se crea un frente cálido; cuando el aire frío desciende se crea un frente frío. El conjunto *frente cálido-frente frío* constituye una perturbación; el frente frío alcanza al frente cálido, y el aire caliente es proyectado hacia arriba, formándose un frente ocluido. Una sucesión de perturbaciones, o familia de perturbaciones, suele estar ligada a diferentes sistemas nubosos característicos, que determinan así los diferentes tipos de vientos.

I.2.- TIPOS DE VIENTOS

El conocimiento de los vientos generales no es suficiente para una correcta utilización y ubicación de máquinas accionadas por el viento, por cuanto existen factores que modifican el régimen general y que deben ser conocidos y tenidos en cuenta a la hora de realizar un proyecto de este tipo.

Existe un axioma (Bjerknes) que indica el movimiento o sentido de giro del viento: *Cuando el gradiente de presión y el gradiente de temperatura tienen distinta dirección, se produce una circulación de aire de sentido el camino más corto desde el gradiente de presión al de temperatura.*

En general, los desplazamientos verticales del aire son pequeños en relación a los desplazamientos horizontales, por lo que se puede considerar que la dirección del desplazamiento del viento es sensiblemente horizontal y se determina y refiere mediante el ángulo que conforma respecto a una dirección fija, que es la del Norte geográfico. Tanto los vientos generales, como los sinópticos, Fig I.3, están ligados a la circulación atmosférica y mantienen las mismas características sobre grandes extensiones de terreno.

El viento sinóptico sopla prácticamente en la horizontal, lo que permite esquematizar su movimiento por un vector orientado en el sentido hacia el cual sopla y cuyo origen está situado en el lugar de observación.

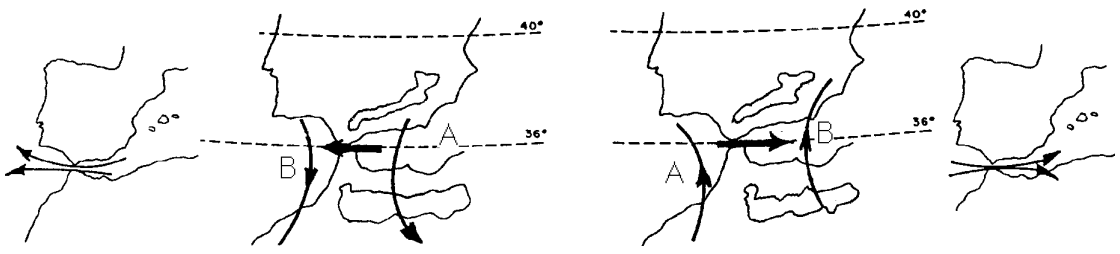
Los vientos regionales están regidos también por desplazamientos a la escala sinóptica de las masas de aire, (que es más fina y precisa que la circulación general de Hadley). Sus características vienen determinadas en función de situaciones meteorológicas dadas y muy precisas, como son la configuración isobárica y posición de los frentes, teniendo en cuenta también para cualquier lugar, tanto las condiciones geográficas regionales, como las locales, Fig I.4.

VIENTOS SINÓPTICOS

El viento sopla de las altas a las bajas presiones

a) Alta presión en el Mar de Alborán y baja presión en el Golfo de Cádiz.
Viento de Levante con efecto de embudo en el Mar de Alborán y difluencia en el Golfo de Cádiz

b) Alta en el Golfo de Cádiz y baja en el Mar de Alborán. Viento de Poniente.
Entrada abierta en el Golfo de Cádiz, confluencia en el Estrecho y efecto embudo en el Mar de Alborán.

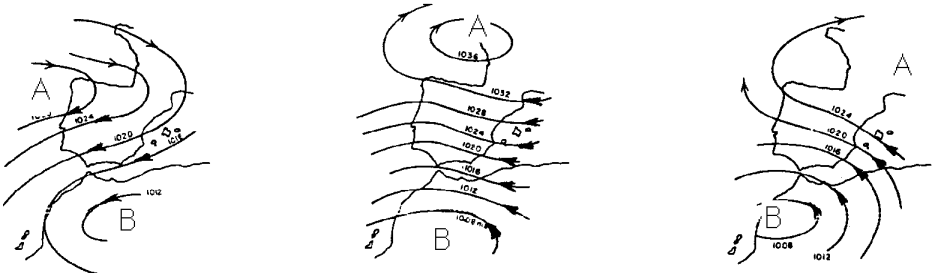


Vientos de Levante

a) Componente E-NE. Anticiclón sobre España y Portugal Bajas presiones en Marruecos-Canarias. Situación en zeta. $^{A}\boldsymbol{Z}_{B}$

b) Componente E. Anticiclón con eje horizontal sobre el Golfo de Vizcaya y mitad Norte de España. Bajas presiones sobre Marruecos.

c) Componente E. Altas presiones sobre el Norte de España, Baleares y Mediterráneo occidental. Bajas entre Canarias y el Golfo de Cádiz. Situación en ese. $_{B}\boldsymbol{S}^{A}$



Vientos de Poniente

a) Componente W-NW. Vaguada en forma de $\boldsymbol{V}$ *en altura, cruzando sobre la Península.*

b) Componente W. Profunda borrasca cerrada a todos los niveles sobre el Golfo de Vizcaya, con marcados gradientes de presión en superficie.

c) Componente W-SW. Baja presión pasando desde el Golfo de Cádiz hacia las Baleares. Arriba aparece una vaguada en forma de $\boldsymbol{U}$.

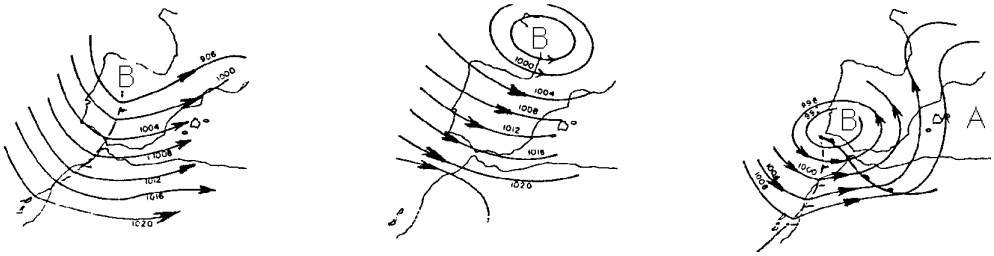


Fig I.3.- Vientos sinópticos en diversas regiones españolas

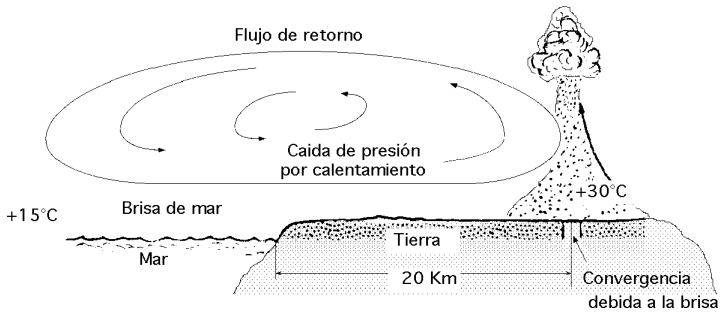


Fig I.4.- Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas)

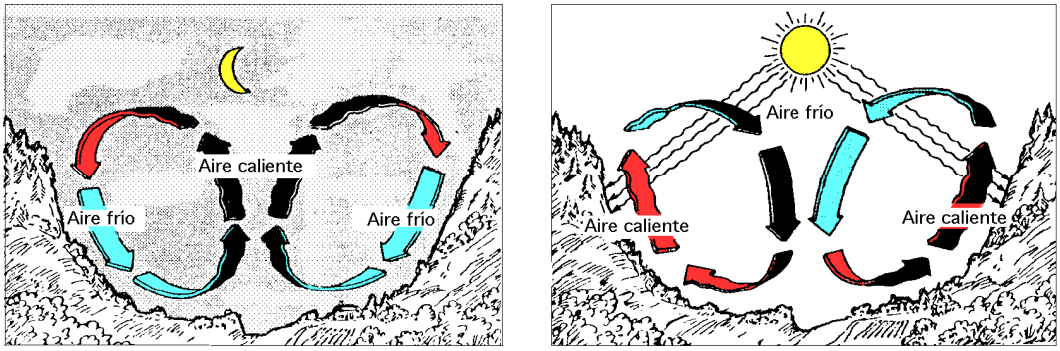
La dirección del viento a nivel del suelo, medida generalmente a algunos metros sobre el mismo, está fuertemente influenciada por la situación topográfica del lugar considerado.

La frecuencia de las direcciones no es siempre una característica general en consonancia con la

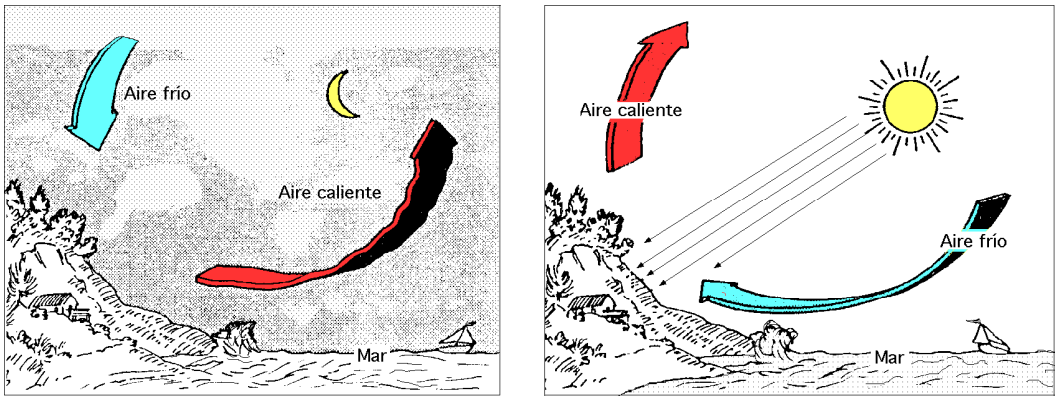
situación isobárica media como puede ser la posición respectiva media de los anticiclones y de las depresiones en el transcurso de los años; los vientos particulares y locales son la prueba.

Brisas.- Una aplicación del axioma anterior es la justificación del movimiento del aire *tierra-mar* en las costas, o *tierra-agua* en los lagos durante el día y la noche, Fig I.4; en las faldas de las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío, más pesado, baja hacia los valles, Fig I.5. Los movimientos característicos del aire (tierra-mar) en las costas o (tierra-agua) en los lagos durante el día y la noche dan lugar a las *brisas*.

El viento diurno o brisa marina, es debido a un descenso hacia la tierra del gradiente de presión barométrica, como consecuencia del calentamiento diurno de la capa inferior del aire que está en contacto con la tierra; como la superficie del mar adyacente no se calienta con tanta intensidad, permanece relativamente más fría.



Vientos de valles y montañas



Brisas de mar

Fig I.5.- Vientos particulares y locales

En respuesta al gradiente de presión local, el aire se dirige hacia la tierra a baja altura. La brisa marina es relativamente fría y proporciona un agradable alivio en una estrecha franja de la zona costera en las calurosas tardes del verano. Por la noche se invierte el gradiente de temperatura debido al más rápido enfriamiento de la superficie del terreno; el gradiente de presión es ahora de la tierra hacia el mar, motivando un flujo de aire hacia el océano (la brisa terrestre). Las condiciones

locales influyen considerablemente en el potencial eólico de una zona y puede suceder que dos lugares muy próximos tengan una gran diferencia de condiciones eólicas. Los valles y las zonas entre dos montañas afectan enormemente al citado potencial al aumentar considerablemente la acción del viento, que varía notablemente con la altura. Esta variación es consecuencia de la capa límite que se produce en el contacto de los fluidos viscosos con las superficies (aire y tierra).

Vientos catabáticos y anabáticos.- El viento *catabático*, Fig I.6, es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas a otras más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles. Este tipo de viento presenta poca relación con las isobaras, puesto que viene regido principalmente por la dirección de los valles a través de los cuales desciende.

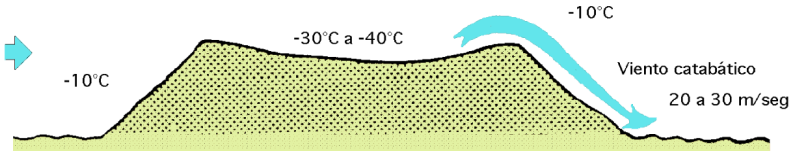


Fig. I.6.- Viento catabático

El viento *anabático* es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.

Föhn.- Es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de los sistemas montañosos, Fig I.7; un föhn fuerte se presenta por un sistema de bajas presiones que avanza ocasionando fuertes vientos en la troposfera media y alta.

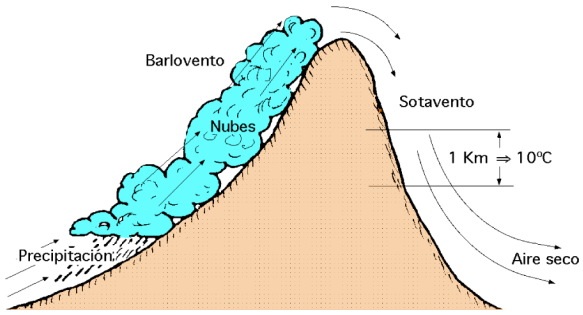


Fig I.7.- Efecto föhn

Cuando este sistema se acerca a una montaña, el aire sube por la ladera de barlovento, enfriándose por debajo de la temperatura de condensación, formando nubes que se mantienen adosadas a las cimas de las montañas, que provocan precipitaciones, por lo que el contenido de humedad del aire baja y así el aire que desciende por sotavento es seco, calentándose en el descenso a razón de 10°C por km.

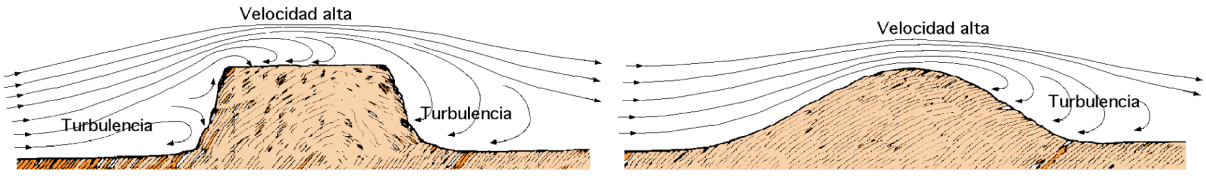


Fig I.8.- Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento

También influye grandemente en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra por donde discurre la corriente. Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos

son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente, Fig I.8.

I.3.- VELOCIDAD DEL VIENTO

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada *rosa de los vientos***,** Fig I.9. La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg, así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/seg, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía. La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, aumenta a partir de la salida del Sol y alcanza un máximo entre las 12 y 16 horas solares.

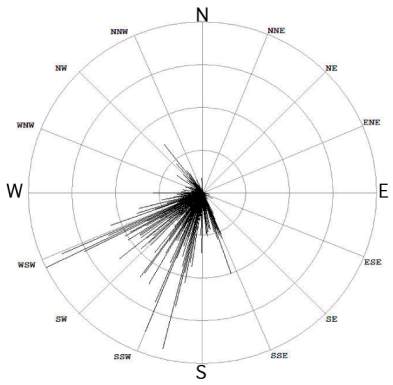


Fig I.9a.- Rosa de los vientos

Para realizar la medida de las velocidades del viento se utilizan los anemómetros; existen muy diversos tipos de estos aparatos, que en un principio se pueden clasificar en anemómetros de rotación y anemómetros de presión. El anemómetro de rotación más característico es el de Papillon, que es un molino de eje vertical con cazoletas en forma de semiesfera o el de aletas oblicuas de Jules Richard. El anemómetro de presión se basa en el tubo Pitot.

La dirección del viento se comprueba mediante una veleta, y la velocidad se mide con un anemómetro; según sea la velocidad se pueden considerar tres definiciones del viento:

- *Instantáneo; se mide la velocidad del viento en un instante determinado.*
- *Medio aeronáutico; se mide la velocidad media durante 2 minutos*
- *Medio meteorológico; se mide la velocidad media durante 10 minutos*

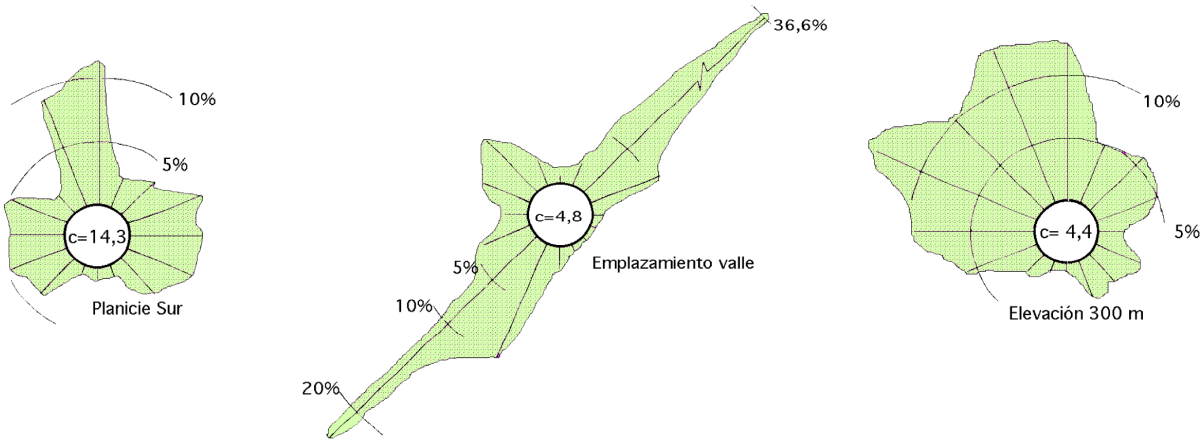


Fig I.9b.- Rosas de viento características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie sur y por encima de las elevaciones extremas de un valle

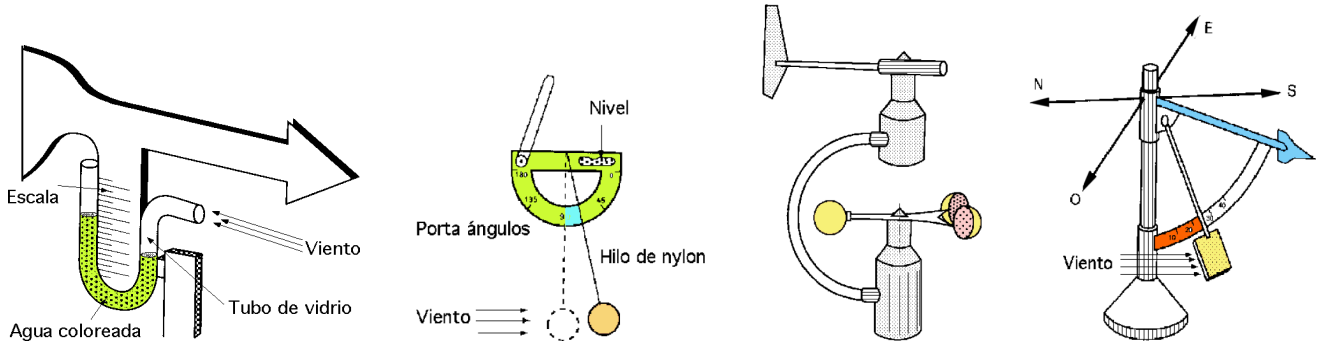


Fig I.10.- Diversos tipos de anemómetros

Hay que distinguir también entre *golpe de viento* y *ráfagas*

- La ráfaga es un aumento brutal y de corta duración de la velocidad del viento, propio de tormentas y borrascas.

- El golpe de viento concierne a su velocidad media, cuando sobrepasa los 34 nudos, 62 km/hora, y es una señal de advertencia, sobre todo para la navegación marítima. Un golpe de viento se corresponde con una velocidad media del viento comprendida entre 75 y 88 km/hora.

Las fuentes eólicas más interesantes se encuentran en las costas marinas y en determinados pasos entre montañas; existen zonas en las que se puede disponer de más de 3.000 kWh/m^2 año, y en otras puede que no se llegue a los 200 kW/m^2 año.

Ley exponencial de Hellmann.- La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, de la forma:

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha}$$

en la que v_h es la velocidad del viento a la altura h, v_{10} es la velocidad del viento a 10 m de altura y a es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la Tabla I.1.

Tabla I.1.- Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

Lugares llanos con hielo o hierba	*α = 0,08 a 012*
Lugares llanos (mar, costa)	*α = 0,14*
Terrenos poco accidentados	*α = 0,13 a 0,16*
Zonas rústicas	*α = 0,2*
Terrenos accidentados o bosques	*α = 0,2 a 0,26*
Terrenos muy accidentados y ciudades	*α = 0,25 a 0,4*

En la Fig I.11, se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann.

Debido a que las máquinas eólicas arrancan para una determinada velocidad del viento, al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada

v_{nom}, es natural que los datos a utilizar sean las curvas de *duración de velocidad* que se pueden convertir en curvas energéticas utilizando en el eje de ordenadas magnitudes $N = k*v^3$ que proporcionan la potencia disponible en el viento para cada velocidad y de la que sólo es posible extraer una fracción.

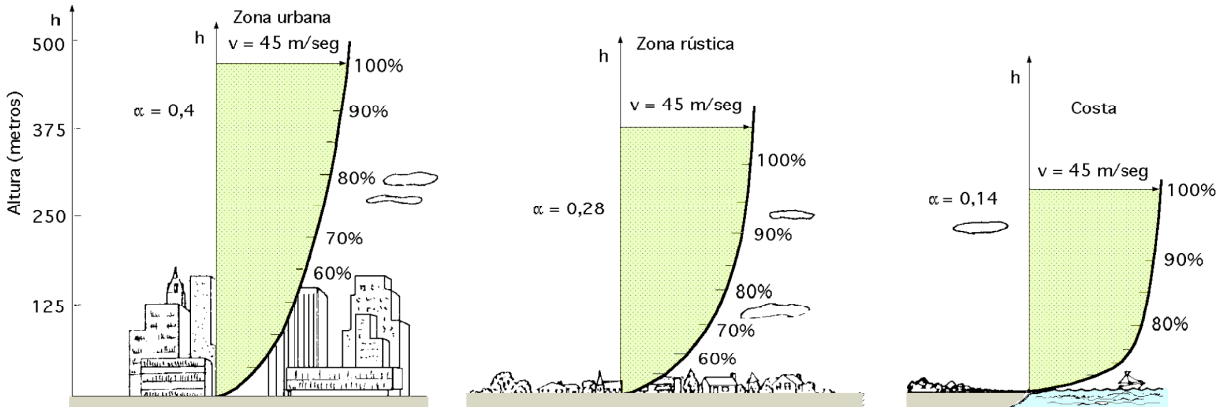


Fig I.11.- Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann

La curva de *duración de velocidad* tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad.

La velocidad media del viento es de la forma:

$$\hat{v} = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} v\, dt$$

y la intensidad energética del viento, definida como la relación entre la potencia y la superficie frontal (área barrida), es proporcional al cubo de la velocidad, en la forma:

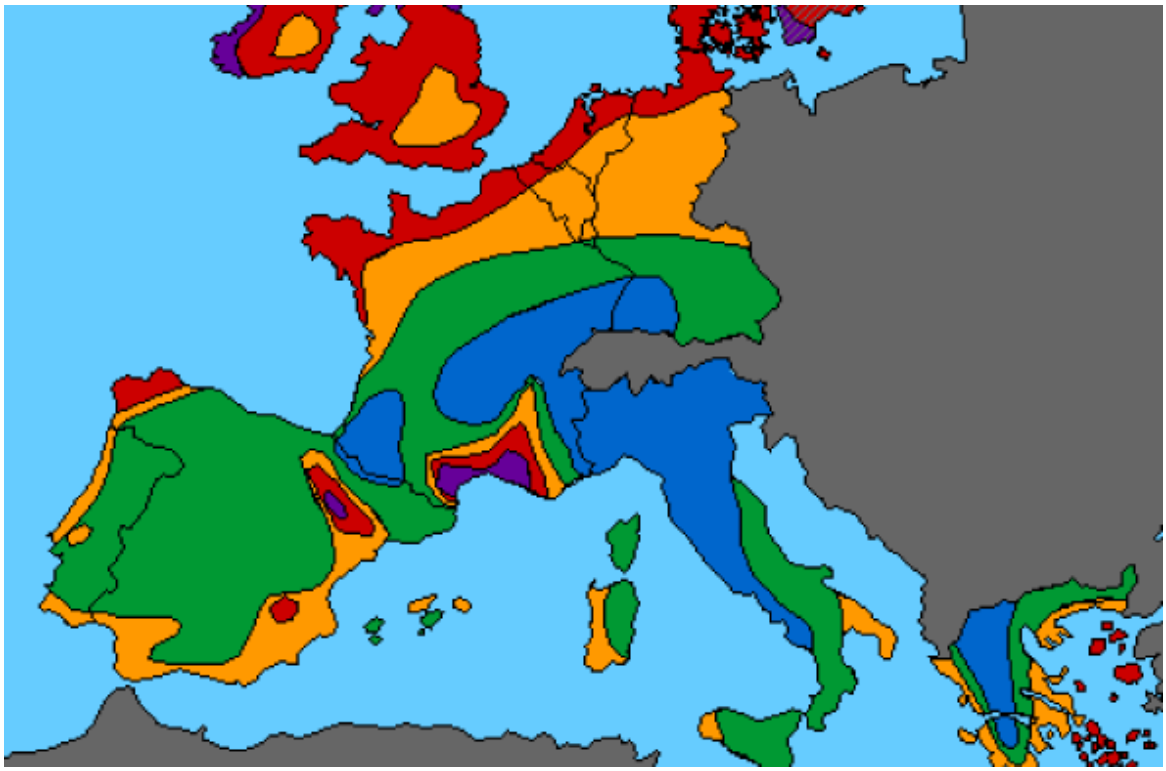
$$\frac{N_{viento}}{A} = I_h = I_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^{3\alpha} = I_{10} \left(\frac{v_h}{v_{10}}\right)^3$$

En una máquina eólica se pueden considerar tres velocidades del viento características:

- La *velocidad de conexión* $\vec{v}_{conex}$ es la velocidad del viento por encima de la cual se genera energía; por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía

- La *velocidad nominal* $\vec{v}_{nom}$ es la velocidad del viento a la cual la máquina eólica alcanza su potencia nominal; por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante

La *velocidad de desconexión* $\vec{v}_{emb}$ es la velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala; los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, desconectándola de la red a la que alimenta.



Color	Terreno accidentado		Campo abierto		En la costa		Altamar		Colinas y crestas	
	m/seg	W/m²	m/seg	W/m²	m/seg	W/m²	m/seg	W/m²	m/seg	W/m²
	> 6	> 250	>7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 11,5	> 1800
	5 a 6	150 a 200	6,5 a 7,5	300 a 500	7 a 8,5	400 a 700	8 a 9	600 a 800	10 a 11,5	1200 a 1800
	4,5 a 5	100 a 150	5,5 a 6,5	200 a 300	6 a 7	250 a 400	7 a 8	400 a 600	8,5 a 10	700 a 1200
	3,5 a 4,5	50 a 100	4,5 a 5,5	100 a 200	5 a 6	150 a 250	5,5 a 7	200 a 400	7 a 8,5	400 a 700
	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5	< 150	< 5,5	< 200	< 7	< 400

I.4.- ENERGÍA ÚTIL DEL VIENTO

En una corriente de aire de densidad ρ y velocidad $\vec{v}$, como se indica en la Fig I.12, la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie A y hace un recorrido L en el tiempo *t*, viene dada por la expresión:

$$N_{viento} = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{\frac{m\,v^2}{2}}{t} = \frac{v^2}{2\,t}\,(v\,t\,A\,\rho) = \frac{\rho\,A\,v^3}{2} = k^{*}v^3$$

La sección barrida por la pala en un aerogenerador de eje horizontal y diámetro D es: $A = \frac{\pi\,D^2}{4}$ y la potencia del viento:

$$N_{viento} = \frac{\pi\;r\,D^2\;v^3}{8}$$

La velocidad del viento varía con el tiempo y, por lo tanto, su potencia *N* también variará; se puede considerar el valor medio de ambas, por ejemplo a lo largo de una año, obteniéndose:

$$\hat{N}_{viento\ anual} = \frac{1}{2}\,\rho\,A\,\hat{v}^3_{anual}$$

De estos conceptos se obtienen las siguientes consecuencias:

a) La N_{viento} varía fuertemente con la velocidad $\vec{v}$, siendo preciso hacer las mediciones de $\vec{v}$ en el lugar exacto donde se quiera instalar la aeroturbina.

b) La N_{viento} varía con la densidad del aire ρ*, a causa de las variaciones de presión y temperatura, en valores que pueden oscilar de un 10% a un 15% a lo largo del año.*

Curvas de potencia.- Mediante las curvas de potencia se puede conocer cuando una aeroturbina suministra energía. Cuando el viento supera la velocidad mínima v_{conex} la máquina comienza a suministrar potencia aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que éste alcanza una velocidad v_{nom} que se corresponde con la potencia nominal del generador; para velocidades superiores los sistemas de control mantienen constante la potencia, evitando una sobrecarga en la turbina y en el generador.

Las curvas que relacionan la velocidad del viento, con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador $t = f(v)$, indican el número de horas al año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel. A partir de estas curvas se puede obtener la curva de potencia disponible del viento, y la curva de potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador. El área encerrada por esta última, proporciona la energía eléctrica generada en un año, siendo frecuente expresar estas potencias y energías, por unidad de superficie barrida por el rotor.

I.5.- REPRESENTACIÓN ESTADÍSTICA DEL VIENTO

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es obvio que la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

Normalmente se suele utilizar la distribución de Weibull; se trata de una distribución de dos parámetros: un parámetro de escala c y un parámetro factor de distribución de forma k.

En España los datos eólicos oficiales proceden de dos fuentes distintas, que son:

a) El Servicio Meteorológico Nacional, que tiene instaladas una serie de estaciones meteorológicas, distribuidas por distintos puntos de la geografía nacional, pero en las que su elección se ha hecho en base a su situación estratégica como ciudades, aeropuertos, etc, por lo que no han sido preparadas para hacer medidas de su potencial eólico

b) La Comisión Nacional de Energías Especiales sí tiene estaciones en toda España para la toma de datos eólicos. Los puntos de medición fueron seleccionados precisamente en lugares en los que se preveía un alto potencial eólico como en la zona del Estrecho, islas Canarias, Nordeste, Noroeste, Valle del Ebro, Baleares y Zona Sur

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. La distribución de Weibull utilizada puede variar tanto en la forma como en el valor medio.

Factor k de distribución de forma.- La energía $\hat{N}$ que portaría el viento si se desplazase con una velocidad igual a la media durante las 8760 horas del año, sería:

$$\hat{N} = \int_0^{8760} k^* \hat{v}^3 \, dt = 8760 \, k^* \hat{v}^3 = 4380 \, \rho \, A \, \hat{v}^3$$

mientras que la energía realmente disponible en el año es:

$$N_{anual} = \int_0^{8760} k^* v^3 \, dt$$

***El** factor de distribución de forma de energía eólica k* se define como la relación entre la energía obtenida en un año N_{anual} y la energía $\hat{N}$ que se obtendría en ese año si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media $\hat{v}$, es decir:

$$k = \frac{N_{anual}}{\hat{N}} = \frac{v^3}{\hat{v}^3}$$

En dos lugares en los que la velocidad media del viento $\hat{v}$ sea la misma, se tendrá más energía disponible en aquel en que el factor de distribución k sea mayor. El parámetro de forma k indica cómo es de puntiaguda la distribución de velocidades del viento; si siempre tienden a estar próximas a un cierto valor, la distribución tendrá un alto valor de k y será muy puntiaguda. Si los factores de distribución son k_1 y k_2 y las energías disponibles N_1 y N_2, se tiene que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{k_1}{k_2} \left(\frac{\hat{v}_1}{\hat{v}_2} \right)^3$$

En la mayoría de los casos los valores de k están comprendidos entre $1{,}3 < k < 4{,}3$; por ello, cuando no se dispone de muchos datos se suele aceptar la simplificación de hacer $k = 2$, que se conoce como distribución de Rayleigh.

Distribución de Rayleigh.- Con los datos disponibles de la velocidad del viento en un determinado lugar, se puede encontrar la ecuación de distribución de Rayleigh que describe la distribución de velocidades del viento con una aproximación razonable dentro de ciertos límites, siendo la velocidad media del mismo un parámetro a tener en cuenta, muy característico; sus valores vienen dados en la Tabla I.2.

Para velocidades del viento por debajo de 15 km/hora, la distribución de Rayleigh tiene poca precisión, no siendo útil su aplicación en lugares con una velocidad media del viento inferior a 13 km/

hora. El área bajo cualquier curva siempre vale la unidad, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100%. La mitad del área está a la izquierda de la vertical que pasa por el máximo, y el valor correspondiente es la mediana de la distribución, que significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de ese valor y la otra mitad soplará a más de ese valor.

La velocidad del viento media es el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos en ese emplazamiento; se observa que esta distribución de las velocidades del viento no es simétrica. A veces las velocidades del viento son muy altas, aunque raras, siendo las velocidades del viento más comunes las correspondientes al valor medio, que se conoce como valor modal de la distribución.

La distribución de Rayleigh es de la forma:

Tiempo en horas: $t = 8{,}76 \frac{\pi}{2} \frac{v}{\hat{v}} e^{-\xi}$; $\xi = \frac{\pi}{4} (\frac{v}{\hat{v}})^2$

siendo $\begin{cases} v \text{ la velocidad del viento en millas/seg, (1 milla} \approx 1{,}6095 \text{ km)} \\ \hat{v} \text{ la velocidad media del viento} \end{cases}$

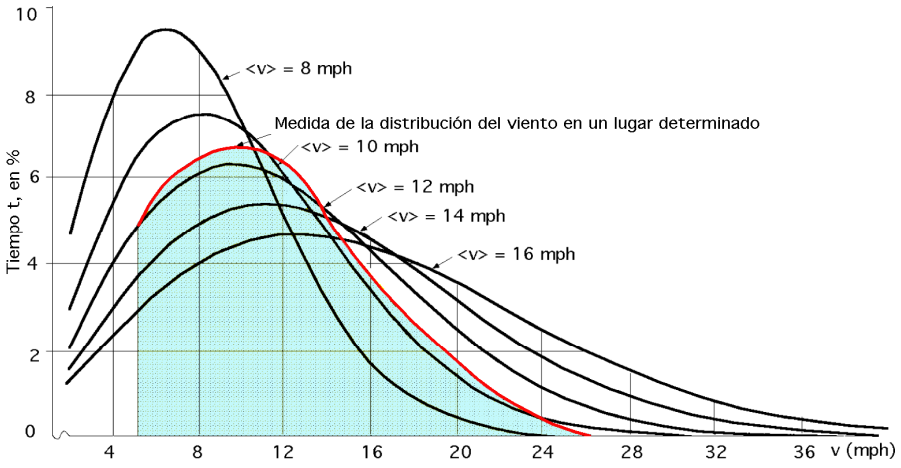


Fig I.13.- Distribución de Rayleigh y curva de resultados obtenidos en un lugar

Esta ecuación proporciona el número total de horas al año que se prevé pueda soplar el viento a la velocidad media $\hat{v}$ del lugar. Su representación gráfica se presenta en la Figura I.13, en la que se ha considerado el tiempo sobre el eje de ordenadas en %, y la velocidad del viento $\hat{v}$ en millas por hora sobre el eje de abscisas.

La energía que lleva el viento es proporcional al cubo de su velocidad, por lo que una velocidad más elevada implica un transporte energético de mayor densidad.

Si a los resultados obtenidos en un lugar determinado, por ejemplo con una velocidad media de 26 km por hora (16,2 mph), Fig I.13, se superpone una gráfica de Rayleigh, se observa que la distri-

bución de Rayleigh no coincide con la curva de distribución del viento en el lugar indicado, lo que indica que no se pueden sustituir los datos obtenidos de la distribución de Rayleigh como medidas actualizadas y propias de la velocidad del viento del lugar, pero sí pueden servir como una aproximación bastante razonable cuando los únicos datos de que se dispone sean los promedios anuales de la velocidad del viento.

Para una velocidad media del viento de 22,5 km/hora (14 mph), se puede esperar que el mismo sople a 37 km/hora (23) mph, durante un 2,2% del tiempo, ó 194 horas al año.

Para una velocidad media del viento de 10 mph, soplaría a 23 mph durante un 0,6% del tiempo ó 53 horas al año, Fig I.14.

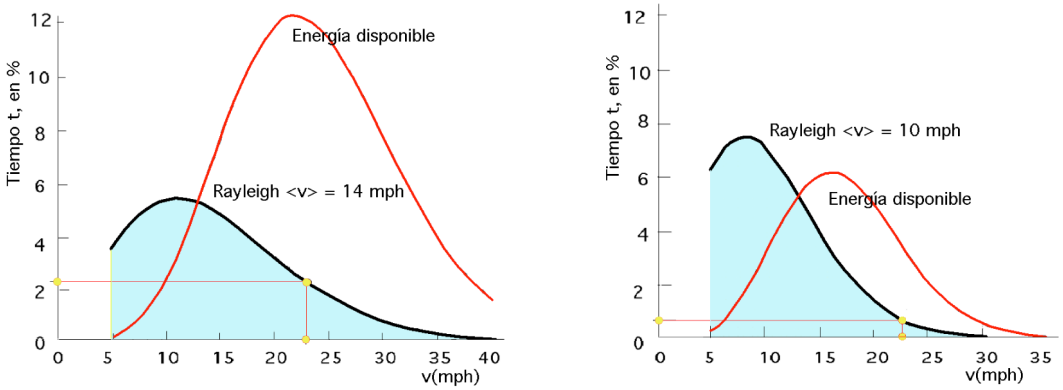


Fig I.14.- Comparación de la energía disponible con la curva de Rayleigh correspondiente

Tabla I.2- Curva de Rayleigh

Velocidad v (millas ph)	*Velocidad media (millas por hora)*									
	8	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*
	Número de horas									
8	*784*	*731*	*666*	*601*	*539*	*484*	*435*	*391*	*353*	*320*
9	*716*	*697*	*656*	*605*	*553*	*503*	*457*	*415*	*377*	*344*
10	*630*	*644*	*627*	*594*	*554*	*512*	*470*	*431*	*395*	*363*
11	*536*	*578*	*585*	*570*	*543*	*510*	*476*	*441*	*408*	*377*
12	*441*	*504*	*533*	*536*	*523*	*500*	*473*	*443*	*415*	*386*
13	*351*	*429*	*474*	*494*	*494*	*483*	*464*	*441*	*416*	*391*
14	*272*	*356*	*413*	*446*	*459*	*458*	*448*	*432*	*412*	*391*
15	*204*	*288*	*353*	*396*	*420*	*429*	*427*	*418*	*404*	*387*
16	*149*	*227*	*295*	*345*	*378*	*396*	*403*	*400*	*392*	*380*
17	*105*	*175*	*242*	*296*	*336*	*361*	*375*	*379*	*377*	*369*
18	*73*	*132*	*194*	*250*	*294*	*325*	*345*	*355*	*358*	*355*
19	*49*	*97*	*153*	*207*	*253*	*289*	*314*	*330*	*337*	*339*
20	*32*	*70*	*119*	*170*	*216*	*254*	*283*	*303*	*315*	*321*
21	*20*	*50*	*90*	*136*	*181*	*220*	*252*	*275*	*291*	*302*
22	*12*	*34*	*68*	*108*	*150*	*189*	*222*	*248*	*268*	*281*
23	*7*	*23*	*50*	*84*	*123*	*160*	*194*	*222*	*244*	*260*
24	*4*	*15*	*36*	*65*	*99*	*134*	*168*	*197*	*220*	*239*
25	*3*	*10*	*25*	*49*	*79*	*111*	*143*	*173*	*198*	*218*
26	*1*	*6*	*18*	*37*	*62*	*91*	*122*	*150*	*176*	*197*
27	*0,8*	*4*	*12*	*27*	*48*	*74*	*102*	*130*	*155*	*177*
28	*0,4*	*2*	*8*	*20*	*37*	*60*	*85*	*111*	*136*	*158*
29	*0,2*	*1*	*5*	*14*	*28*	*47*	*70*	*94*	*118*	*140*
30	*0,1*	*0,8*	*4*	*10*	*21*	*37*	*57*	*79*	*102*	*124*

31	0	0,5	2	7	16	29	46	66	87	108
32	0	0,3	1	5	11	22	37	55	74	94
33	0	0,1	0,9	3	8	17	29	45	63	81
34	0	0	0,5	2	6	13	23	37	53	70
35	0	0	0,3	1	4	10	18	30	44	60
36	0	0	0,2	0,9	3	7	14	24	36	51
37	0	0	0,1	0,6	2	5	11	19	30	43
38	0	0	0	0,4	1	4	8	15	24	36
39	0	0	0	0,2	0,9	3	6	12	20	30
40	0	0	0	0,1	0,6	2	5	9	16	25
41	0	0	0	0	0,4	1	3	7	13	20
42	0	0	0	0	0,3	0,9	3	5	10	17
43	0	0	0	0	0,2	0,6	2	4	8	13
44	0	0	0	0	0,1	0,4	1	3	6	11

La función de densidad de probabilidad de la distribución de la velocidad del viento de Rayleigh es de la forma:

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\hat{v}} \frac{1}{\hat{v}} e^{-x}$$

y la función de distribución correspondiente:

$$F(v) = 1 - e^{-\xi}$$

que se ajusta haciendo coincidir la velocidad media del viento en el lugar en estudio, con la velocidad $\vec{v}$. El empleo de un método más elaborado requiere disponer de más datos, caso en el que se utilizaría la distribución general de Weibull.

Distribución de Weibull.- La *función de densidad de probabilidad* de la distribución de la velocidad del viento *f(v)* es de la forma:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Se trata de una distribución de dos parámetros en la que *c* es el parámetro de escala y *k* es el factor de forma, que indican las características promediadas del viento en el emplazamiento; un valor muy utilizado es k = 2 (distribución de Rayleigh).

La función de distribución es: $F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$

El momento enésimo de la distribución de Weibull es: $v_{(n)} = \int_0^\infty v^n f(v)\, dv = \ldots = c^n\, \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right)$

La curva normal de error o integral de Gauss es: $\int_0^\infty e^{-t^2}\, dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, *que se obtiene a partir de:*

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = 2 \int_0^\infty e^{-t^2}\, dt = \sqrt{\pi}$$

La velocidad media del viento es el primer momento de la función de densidad (n = 1) siendo por tanto:

$$v_{(1)} = \hat{v} = c\, \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Si se multiplica la distribución de la velocidad del viento f(v) por la energía del viento N_{viento} se obtiene la distribución de energía del viento; la energía total E del viento es:

$$E = \int_0^\infty N_{viento}\ f(v)\ dv = \int_0^\infty \frac{\rho\ A\ v^3}{2}\ f(v)\ dv = \frac{\rho\ A}{2}\ c^3\ \Gamma(1 + \frac{3}{k})$$

En determinadas situaciones, como en lugares tierra adentro, la energía calculada por la distribución de Weibull es un 10% superior a la calculada experimentalmente.

Para determinar los parámetros c de escala y k de forma de la distribución, se puede utilizar una aproximación de mínimos cuadrados; partiendo de la función de distribución de Weibull en la forma:

$$1 - F(v) = e^{-(\frac{v}{c})^k}$$

y tomando logaritmos dos veces se puede poner en la forma:

$$- ln\ \{1 - F(v)\} = (\frac{v}{c})^k \quad \Rightarrow \quad ln\ [- ln\ \{1 - F(v)\}] = ln\ (\frac{v}{c})^k = k\ ln\ v - k\ ln\ c$$

$$y = k\ x + b\ ,\ con: \begin{cases} y = ln\ [- ln\ \{1 - F(v)\}] \\ x = ln\ v \quad ; \quad b = - k\ ln\ c \quad ; \quad c = e^{-b/k} \end{cases}$$

Para n pares de valores (x, y) mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de k y b, y a partir de éstos el de c:

$$k = \frac{\sum_{n=1}^{n} x\ y\ -\ \frac{\sum_{n=1}^{n} x\ \sum_{n=1}^{n} y}{n}}{\sum_{n=1}^{n} x^2\ -\ \frac{(\sum_{n=1}^{n} x)^2}{n}} \quad ; \quad b = y - k\ x = \frac{\sum_{n=1}^{n} y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^{n} x}{n} \quad ; \quad c = e^{-b/k} = exp\ \{-(\frac{\sum_{n=1}^{n} y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^{n} x}{n})\ \frac{\sum_{n=1}^{n} x^2\ -\ \frac{(\sum_{n=1}^{n} x)^2}{n}}{\sum_{n=1}^{n} x\ y\ -\ \frac{\sum_{n=1}^{n} x\ \sum_{n=1}^{n} y}{n}}\}$$

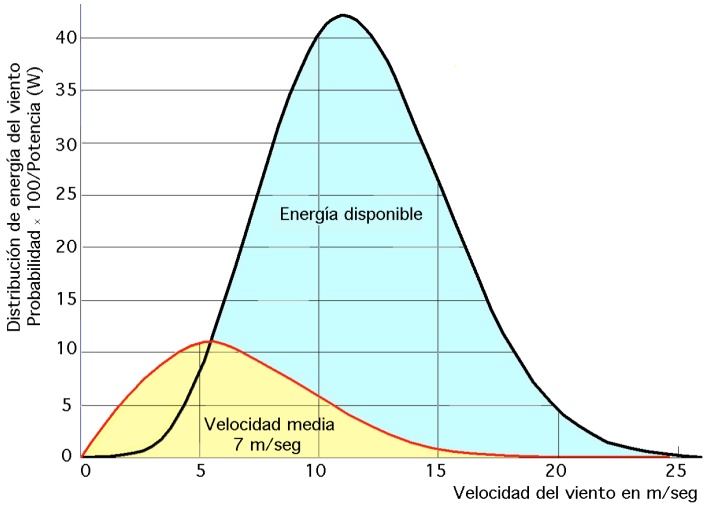


Fig I.15.- Distribución de energía disponible para una velocidad media del viento

En la Tabla I.3 se indican unas velocidades medias anuales de viento (correspondientes a un parque eólico situado a 950 m de altitud, con unas pérdidas del 8% por sombras, disponibilidad y transformación), que de acuerdo con la distribución estadística de Weibull, permiten conseguir la generación de electricidad en las horas de funcionamiento indicadas.

Tabla I.3.- Velocidad del viento y horas de funcionamiento

Veloc. media anual (m/seg)	*8,6*	*7,8*	*7,1*	*6,4*	*5,6*
Horas de funcionamiento	*3500*	*3000*	*2500*	*2000*	*1500*

Tabla I.4.- Datos climatológicos y vientos dominantes en España

Ciudades	*Condiciones normales verano*		*Condiciones normales invierno*		*Vientos dominantes (km/h)*	
	Temperatura seca	*Humedad*	*Temperatura seca*	*Días-grado acumulados*		
Albacete	*35*	*36*	*-7*	*1.377*	*O*	*12*
Alicante	*31*	*60*		*338*	*SE*	*9*
Almería	*30*	*70*	*5*	*208*	*OSO*	*9*
Avila	*30*	*41*	*-6*	*2.127*	*NO*	*11*
Badajoz	*38*	*47*	*-1*	*767*	*NO*	*7*
Barcelona	*31*	*68*	*2*	*656*	*S*	*8*
Bilbao	*30*	*71*	*0*	*820*		
Burgos	*30*	*42*	*-6*	*2.048*	*SO*	*8*
Cáceres	*38*	*37*	*-1*	*1.003*	*NO*	
Cádiz	*32*	*55*	*2*	*227*	*SE*	*20*
Castellón	*29*	*60*	*4*	*452*	*NO*	*3*
Ciudad Real	*37*	*56*	*-4*	*1.312*	*SO*	*4*
Córdoba	*38*	*33*	*-1*	*662*	*SO*	*5*
Coruña	*23*	*63*	*2*	*827*	*SO*	*18*
Cuenca	*33*	*52*	*-7*	*828*	*O*	
Gerona	*33*	*58*	*-3*	*939*	*S*	*5*
Granada	*36*	*49*	*-2*	*1.042*	*O*	*4*
Huelva	*31*	*57*	*1*	*402*	*SO*	
Huesca	*31*	*72*	*-5*	*1.350*	*calma*	
Jaén	*36*	*35*	*0*	*830*	*SO*	*5*
Las Palmas	*24*	*66*	*15*	*0*	*NE*	*9*
León	*28*	*45*	*-6*	*2.143*	*NO*	*8*
Lérida	*33*	*50*	*-5*	*1.226*		
Logroño	*33*	*59*	*-3*	*1.405*	*NO*	
Lugo	*26*	*67*	*-2*	*1.771*	*NE*	*12*
Madrid	*34*	*42*	*-3*	*1.405*	*NE*	*10*
Málaga	*28*	*60*	*13*	*248*	*S*	*7*
Murcia	*36*	*59*	*-1*	*432*	*SO*	
Orense			*-3*	*967*		
Oviedo	*26*	*70*	*-2*	*1.200*	*NE*	
Palencia	*30*	*45*	*-6*	*1.781*	*NE*	
Palma	*28*	*63*	*4*	*527*	*variable*	*9*
Pamplona	*32*	*51*	*-5*	*1.535*	*N*	*8*
Pontevedra	*27*	*62*	*0*	*871*	*N*	*12*
Salamanca	*34*	*46*	*-7*	*1.662*	*O*	
Santander	*25*	*74*	*2*	*724*	*O*	*20*
San Sebastian	*22*	*76*	*-1*	*913*	*S*	*17*
S. Cruz de Tenerife	*22*	*55*	*15*	*0*	*N*	*18*
Segovia	*33*	*35*	*-6*	*1.866*	*O*	
Sevilla	*40*	*43*	*1*	*438*	*SO*	
Soria	*29*	*45*	*-7*	*1.978*	*variable*	*15*
Tarragona	*26*	*68*	*1*	*626*	*S*	*5*
Teruel	*32*		*-8*	*1.802*		
Toledo	*34*	*34*	*-4*	*158*	*E*	*5*
Valencia	*32*	*68*	*0*	*516*	*O*	*10*
Valladolid	*33*	*45*	*-5*	*1.709*	*SO*	*10*
Vitoria	*26*	*70*	*-4*	*1.560*	*NE*	
Zamora	*32*	*65*	*-6*	*1.501*	*O*	*11*
Zaragoza	*34*	*57*	*-3*	*1.151*	*NO*	*15*