



ENERGIA EÓLICA

## UNIDAD I

1.- El viento, su medida y su aprovechamiento.

1.1- Características del viento.

1.2- Medición del viento.

1.3- Captación de la energía del viento.

1.4- Principios generales de la energía eólica.

1.4.1- Velocidad y variaciones del viento.

1.4.2- Consideraciones prácticas.

## UNIDAD II

2.- Tipos de máquinas eólicas.

2.1- Aerogeneradores de eje horizontal.

2.2- Aerogeneradores de eje vertical.

2.3- Eficiencia de los sistemas eólicos.

2.3.1- Comparación entre las turbinas de eje horizontal y eje vertical.

## UNIDAD III

3.- Construcción de aeromotores

3.1- Sistema de bombeo de agua (horizontal).

3.2- Sistema de producción de energía eléctrica (vertical).

## UNIDAD I

### 1.- El viento, su medida y su aprovechamiento.

- 1.1- Características del viento.
- 1.2- Medición del viento.
- 1.3- Captación de la energía del viento.
- 1.4- Principios generales de la energía eólica.
  - 1.4.1- Velocidad y variaciones del viento.
  - 1.4.2- Consideraciones prácticas.

## UNIDAD I

### 1.- El viento, su medida y su aprovechamiento.

Energía Eólica, es la energía del viento, se llama así en honor de Eolo, dios griego del viento. Las corrientes de aire que existen en nuestro planeta se deben principalmente al desigual calentamiento solar de las distintas regiones de la tierra. Se aprovecha esta energía por medio de los molinos de viento.

#### Historia de la Energía Eólica

El viento ha sido utilizado por el hombre para obtener energía desde la antigüedad. El primer uso que se conoce data del IV o V milenio a.C. cuando los egipcios lo utilizaban para impulsar sus embarcaciones de vela.



Figura.- bote a vela egipcio

La primera referencia sobre molinos de viento es del siglo VII d.C. en Persia, aunque ya en algunos manuscritos griegos hay alusiones a algún artilugio movido por el viento. En estos primeros molinos, utilizados para la molienda del grano o el bombeo de agua, la rueda que sujetaba las aspas era horizontal y estaba soportada sobre un eje vertical, son los denominados molinos de eje vertical.

Estas máquinas no resultaban demasiado eficaces, pero aún así se extendieron por China y el Oriente.



Figura.- molino europeo

En Europa se empezaron a utilizar de forma generalizada entre los siglos XI-XIII. Según algunos autores, su introducción se debe a las Cruzadas, mientras otros opinan que Occidente desarrolló su propia tecnología, ya que el molino occidental es de eje horizontal mientras que el oriental, como se comentó anteriormente, es vertical. Estas máquinas se han usado para moler, bombear agua, mover serrerías, extraer mineral, etc.



Figura.- Molino holandés

Holanda y Dinamarca fueron los países que más explotaron la utilización industrial de estos aparatos. En el siglo XIV, los holandeses tomaron el liderazgo en el mejoramiento de los molinos y comenzaron a utilizarlos

extensivamente para drenar las regiones pantanosas del delta del río Rin. A finales del siglo XV se construyeron los primeros molinos de viento para la elaboración de aceites, papel y procesar la madera en aserraderos y a comienzos del XVI se empezaron a utilizar para el drenaje de "polders", empleándose máquinas de hasta 37 kW cada una.

Los primeros molinos eran estructuras de madera que se hacían girar a mano alrededor de un poste central para levantar sus aspas. Con el paso del tiempo se fueron modernizando. En 1745 se agregó el abanico de aspas que los hacía girar a más velocidad y en 1772 se introdujo el aspa con resortes que permitía mantener una velocidad de giro constante, en caso de vientos variables, y que consistía en un sistema de cerraduras de madera que podía controlarse de forma manual o automática. Poco después se añadió el freno hidráulico para detener el movimiento, y se recurrió al uso de aspas aerodinámicas, en forma de hélices, para aumentar el rendimiento en zonas con vientos débiles.

La industria de estos aparatos fue creciendo significativamente hasta la aparición, en el siglo XIX, de los motores térmicos, primero la máquina de vapor y luego el motor de combustión interna. Estos motores, gracias al bajo precio de los combustibles, permitían la obtención de energía a costes más bajos, por lo que el uso de las máquinas eólicas quedó, prácticamente, restringido a la molienda del grano y el bombeo del agua en las regiones rurales, especialmente en las más remotas y pobres.

En la segunda mitad del siglo XIX, tiene lugar uno de los avances más importantes en la tecnología del aprovechamiento del viento. En 1854 Daniel Halladay diseñó un molino de eje horizontal con rotor multipala y en 1883 aparece el pequeño multipala americano diseñado por Steward Perry.



Figura.- Rotor multipala

Este molino, usado para el bombeo de agua en zonas aisladas ha sido el más vendido de la historia, se han llegado a fabricar más de 6 millones de unidades, de las que aún existen varios miles en funcionamiento.

Los intentos de producir electricidad mediante energía eólica surgen por primera vez en 1802, cuando Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina eólica. No obstante, hubo que esperar hasta 1850 cuando se inventó la Dínamo. En 1888 Brush, en EE.UU., construyó la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generar electricidad. Se trataba de un autentico gigante con un rotor que tenía de diámetro 17 m y 144 palas fabricadas con madera de cedro. Pero fue en 1892, en Dinamarca, cuando La Cour diseñó el primer aerogenerador eléctrico, constituido por cuatro palas de 25 metros de diámetro y capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW de potencia.

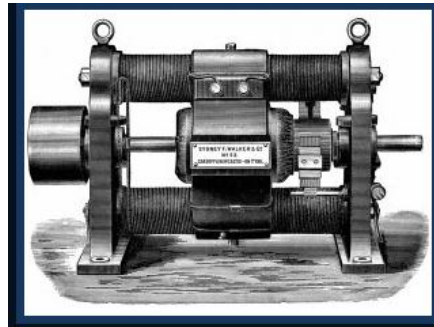
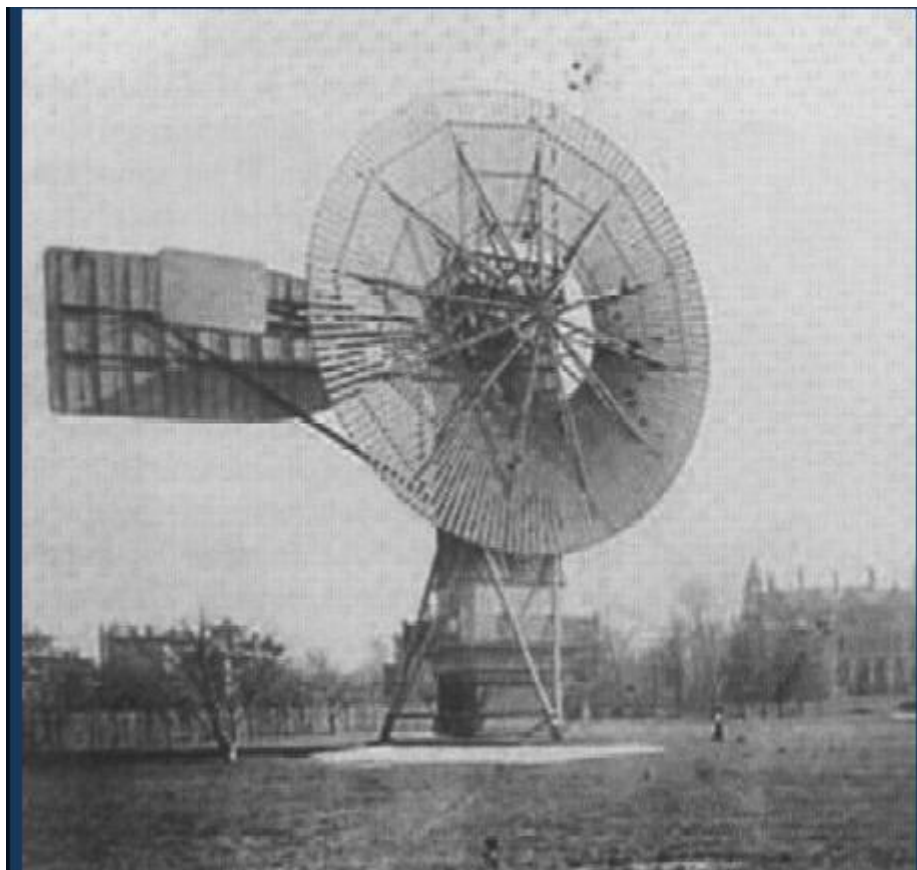


Figura.- El primer Dinamo

Los trabajos de La Cour constituyeron los primeros pasos para los aerogeneradores modernos, pero la aerodinámica no estaba aún suficientemente desarrollada y estas máquinas eólicas, a pesar de ser las más avanzadas de la época, seguían siendo rotores clásicos de bajo rendimiento.



La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX. En los años 20 se comienza a aplicar los perfiles aerodinámicos, que habían sido diseñados para las alas y hélices de los aviones, a los rotores eólicos. Así, en 1927, el holandés 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 a la del viento incidente frente al valor tradicional de dos o tres veces.

El primer sistema para conexión a la red eléctrica se desarrolló en Rusia con el generador Balaclava de 100 kW. El mayor de ellos se construyó en 1941 en EE.UU. con una potencia de 1.25 MW. En Europa, después de la segunda guerra mundial, cabe destacar la construcción de los primeros aerogeneradores de corriente alterna, Johannes Juul llegó a ser un pionero en el desarrollo de estos aerogeneradores con la construcción del aerogenerador Gedser de 200 kW para la compañía eléctrica SEAS que funcionó durante 11 años sin mantenimiento y que en 1975 fue reparado en petición de la NASA.



Figura.- Aerogenerador Gedser de 200 kW

En 1957, el gobierno danés, después de realizar una evaluación detallada de los recursos del país, instala un generador de este tipo con una potencia de 240 kW y que sirvió de base para el desarrollo pionero de modernas turbinas eólicas, lo que ha convertido a este país en un líder mundial.

El tamaño de las turbinas eólicas fue creciendo gradualmente desde 10 a 15 kW, después hasta 30 kW y por el año 1982 se llegaron a alcanzar los 50 kW. El periodo de crecimiento más espectacular ha tenido lugar a partir de los años 90 cuando la energía eólica, comenzó a ser una importante actividad industrial y económica y actualmente ya existen en servicio grandes aerogeneradores que llegan a producir potencias eléctricas de 2 MW e incluso superiores.

### 1.1- Características del viento.

#### **El Viento**

Aire en movimiento. Este término se suele aplicar al movimiento horizontal propio de la atmósfera; los movimientos verticales, o casi verticales, se llaman corrientes. Los vientos se producen por diferencias de presión atmosférica, atribuidas, sobre todo, a diferencias de temperatura. Las variaciones en la distribución de presión y temperatura se deben, en gran medida, a la distribución desigual del calentamiento solar, junto a las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Cuando las temperaturas de regiones adyacentes difieren, el aire más caliente tiende a ascender y a soplar sobre el aire más frío y, por tanto, más pesado. Los vientos generados de esta forma suelen quedar muy perturbados por la rotación de la Tierra.

Los vientos pueden clasificarse en cuatro clases principales: dominantes, estacionales, locales y, por último, ciclónicos y anticiclónicos

#### **Los vientos dominantes**

Cerca del ecuador hay una banda de bajas presiones, llamada zona de calmas ecuatoriales, situada entre los 10° de latitud S y los 10° de latitud N. En esta zona, el aire es caliente y sofocante. A unos 30° del ecuador en ambos hemisferios hay otra banda de presiones altas con calmas, vientos suaves y variables. El aire superficial, al moverse desde esta zona hasta la banda ecuatorial de presiones bajas, constituye los vientos alisios, dominantes en las latitudes menores. En el hemisferio norte, el viento del norte que sopla hacia el ecuador se desvía por la rotación de la Tierra hasta convertirse en un viento del noreste, llamada alisio del noreste. En el hemisferio sur el viento del sur se desvía de forma similar para ser el alisio del sureste.

Desde el lado polar de la banda de presión alta en ambos hemisferios la presión atmosférica disminuye hacia centros de presión baja en latitudes medias y altas. Los vientos dirigidos hacia los polos, puestos en marcha por estos sistemas de presión, se desvían hacia el este por la rotación de la Tierra. Puesto que los vientos se denominan según la dirección desde la que soplan, los vientos de las latitudes medias se califican como dominantes del oeste.



Éstos resultan muy modificados por las perturbaciones ciclónicas y anticiclónicas viajeras que provocan cambios diarios de las direcciones.

Las regiones más frías de los polos tienden a ser centros de alta presión, en particular en el hemisferio sur, y los vientos dominantes que parten de estas áreas se desvían para convertirse en los vientos polares del este.

El viento más fuerte que se ha medido con fiabilidad sobre la superficie de la Tierra tenía un velocidad de 362 km/h y se registró en el monte Washington, en New Hampshire (Estados Unidos), el 12 de abril de 1934. Sin embargo, se producen vientos mucho más fuertes cerca de los centros de los tornados.

Al aumentar la altura sobre la superficie de la Tierra, los vientos dominantes del oeste se aceleran y cubren una superficie mayor entre el ecuador y el polo. Así, los vientos alisios y los polares del este son bajos y, en general, son reemplazados por los del oeste sobre alturas de unos cientos de metros. Los vientos del oeste más fuertes se producen a alturas de entre 10 y 20 km y tienden a concentrarse en una banda bastante estrecha llamada corriente de chorro, donde se han medido hasta 550 km/h de velocidad.

### **Los vientos estacionales**

El aire sobre la tierra es más cálido en verano y más frío en invierno que el situado sobre el océano adyacente en una misma estación. Así, durante el verano, los continentes son lugares de presión baja con vientos que soplan desde los océanos, que están más fríos. En invierno, los continentes albergan altas presiones, y los vientos se dirigen hacia los océanos, ahora más cálidos. Los ejemplos típicos de estos vientos son los monzones del mar de la China y del océano Índico.

### **Los vientos locales**

Parecidos a las variaciones estacionales de temperatura y presión entre la tierra y el agua hay cambios diarios que ejercen efectos similares pero más localizados. En verano sobre todo, la tierra está más caliente que el mar durante el día y más fría durante la noche: esto induce un sistema de brisas dirigidas hacia tierra de día y hacia el mar de noche. Estas brisas penetran hasta unos 50 km tierra y mar adentro.

Hay cambios diarios de temperatura similares sobre terrenos irregulares que provocan brisas en las montañas y en los valles. Otros vientos inducidos por fenómenos locales son los torbellinos y los vientos asociados a las tormentas.

### **Escala de viento de Beaufort**

Los marinos y los meteorólogos utilizan la escala de viento de Beaufort para indicar la velocidad del viento. Fue diseñada en 1805 por el hidrógrafo irlandés Francis Beaufort. Sus denominaciones originales fueron modificadas más tarde; la escala que se usa en la actualidad es la dada en la tabla adjunta

Cifra	Nombre	Velocidad			Efectos del viento en alta mar	Altura ola (m)
		nudos	metros/seg.	km/h		
0	calma	1	0 - 0,2	1	Mar como un espejo	---
1	ventolina	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	Rizos como escamas de pescado pero sin espuma.	0,1
2	flojito	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	Pequeñas olas, crestas de apariencia vitrea, sin romperse	0,2 (0,3)
3	flojo	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	Pequeñas olas, crestas rompientes, espuma de aspecto vitreo aislados vellones de espuma	0,6 (1)
4	bonancible-moderado	11 - 16	5,5 - 7,9	20 - 28	Pequeñas olas creciendo, cabrilleo numeroso y frecuente de las olas	1 (1,5)
5	fresquito	17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	Olas medianas alargadas, cabrilleo (con salpicaduras)	2 (2,5)
6	fresco	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	Se forman olas grandes, crestas de espuma blanca (salpicaduras frecuentes)	3 (4)
7	frescachón	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	El mar crece; la espuma blanca que proviene de las olas es arrastrada por el viento	4 (5,5)
8	temporal	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	Olas de altura media y mas alargadas, del borde superior de sus crestas comienzan a destacarse torbellinos de salpicaduras	5,5 (7,5)
9	temporal fuerte	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	Grandes olas, espesas estelas de espuma a lo largo del viento, las crestas de las olas se rompen en rollos, las salpicaduras pueden reducir la visibilidad	7 (10)
10	temporal duro	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	Olas muy grandes con largas crestas en penachos, la espuma se aglomera en grandes bancos y es llevada por el viento en espesas estelas blancas en conjunto la superficie esta blanca, la visibilidad esta reducida	9 (12,5)
11	temporal muy duro	56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	Olas de altura excepcional, (pueden perderse de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio), mar cubierta de espuma, la visibilidad esta reducida	11,5 (14)
12	temporal huracanado	más de 64	más de 32,7	más de 118	Aire lleno de espuma, salpicaduras, mar cubierto de espuma visibilidad muy reducida	> 14

## El viento y los obstáculos

La orografía terrestre influye notablemente en la meteorología local. Los islotes, estrechos y cadenas montañosas provocan variaciones en el viento que deben ser conocidas por los navegantes.



Figura.- Nubes de desarrollo sobre una cadena montañosa.

El relieve terrestre influye notablemente en la meteorología, especialmente a nivel local en determinadas zonas. Algunos vientos, por ejemplo, están íntimamente ligados a regiones determinadas que presentan una orografía especial: montañas sobresalientes, sierras, estrechos, islas, etc.

Esto genera situaciones que no siempre se reflejan en los partes meteorológicos: alteraciones en la intensidad y dirección del viento, formación de nieblas, el desencadenamiento de súbitas tormentas, etc. Todo ello es la causa de que las condiciones sinópticas generales se vean sensiblemente alteradas de forma súbita e inesperada.

También, a nivel climático, la orografía origina datos muy variables entre regiones a ambos lados de la cordillera cantábrica, de los Andes, del

Himalaya, etc, incluso en regiones geográficamente muy próximas; un buen ejemplo de ello es la variedad de climas que presenta la península ibérica.

El origen y características de estas diferencias climáticas vienen determinados principalmente por la dirección del viento dominante y la situación de los grandes perfiles montañosos que son los principales elementos de alteración.

Por otra parte, desde el punto de vista de la navegación, la orografía influye en el paso de estrechos, el fondeo en calas de costas escarpadas, etc., que son maniobras que vienen determinadas por la previsión de las condiciones meteorológicas locales.

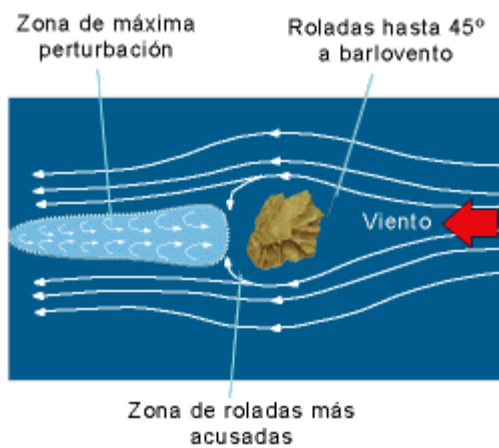
### Variaciones del viento a barlovento y a sotavento

Cualquier protuberancia incide alterando la dirección e intensidad del viento y variando también las variables de estado del aire en función del tipo de obstáculo. Se pueden considerar a los accidentes montañosos y los estrechos como los más significativos de cara a la navegación pues son los que producen perturbaciones de más trascendencia.

Las variaciones más importantes se producen a sotavento del obstáculo, donde existen zonas de desvente y turbulencias que se manifiestan en roladadas constantes y aparentemente aleatorias. Las perturbaciones producidas a barlovento del obstáculo no son tan perceptibles, pues sólo existen variaciones en la dirección y algo en la intensidad.

Los obstáculos se pueden dividir en dos grandes grupos:

- A) Los pequeños, que pueden ser rodeados por el viento
- B) Los estrechos de cierta magnitud, que no pueden ser rodeados por el viento.
- C) Las grandes cadenas montañosas



### A) Obstáculos pequeños

Los obstáculos aislados y de relativa poca anchura que producen tan sólo alteraciones en la dirección del viento (los grandes edificios, peñones, islotes y montañas de no más de 100 km de anchura), ya que el viento rodea el obstáculo

En este caso las alteraciones son muy locales pero notables en la dirección e intensidad del viento. A sotavento, justo detrás del obstáculo aparece una zona muy pequeña en la que el viento experimenta una desviación de aproximadamente 90 grados.

Más adelante, aparece otra, de forma cónica, en la que existen muchas turbulencias, con roladadas de hasta 180° (Ver la figura de la izquierda), cuanto más alto sea el obstáculo, más longitud tendrá la zona cónica de perturbaciones.

### B) Los estrechos

En los estrechos consideramos dos casos:

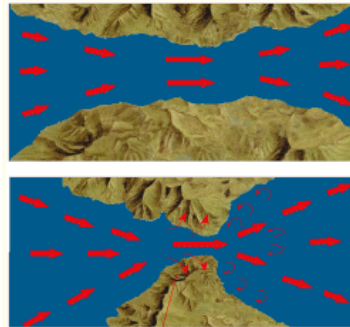
- a) El viento no circula en dirección al canal.

Aquí interviene la anchura del estrecho. Si es de menos de 25 millas no se producen importantes variaciones en la dirección del viento. Si la anchura es superior a 25 millas, puede llegar a desviar significativamente el flujo del aire, canalizándolo a través de él, en función de la altura del relieve de las costas.

b) El viento circula en la dirección del canal.

En este caso, se produce una aceleración que es función de la forma del estrechamiento (ver figura); si éste es pronunciado, el aire rebosa mediante corrientes ascendentes en el punto de máximo estrechamiento, formándose perturbaciones en forma de torbellinos a sotavento (ver figura de la izquierda).

En el caso de estrechos relativamente anchos se produce una alteración isobárica importante debido a la fuerte canalización del viento a lo largo del estrecho (ver figura de abajo).



### c) Las grandes cadenas montañosas

Las cadenas montañosas de gran longitud no sólo producen alteraciones en la dirección del viento sino variaciones en las variables de estado del aire (la humedad y la temperatura), debido a importantes depresiones y sobrepresiones. Este último es el caso de las grandes sistemas montañosos, como los Pirineos, la cordillera cantábrica y, a una mayor escala, los Andes o los Himalayas. En las cordilleras, estas alteraciones se producen tanto en el plano horizontal como en el vertical. En el plano horizontal se producen alteraciones en la fuerza del viento en los extremos de la cordillera, especialmente fuertes en el caso de que esta sea convexa. Este es el caso del fuerte mistral o tramontana originado en los Pirineos cuando existen condiciones del Norte o del Noroeste.

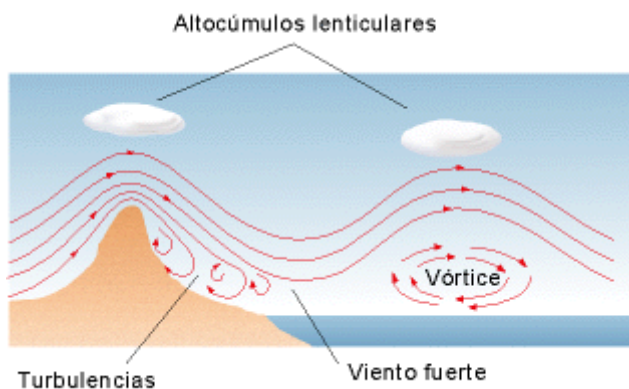


Figura.- Ondulación del viento al incidir sobre una cadena montañosa de más de 150 km de longitud.

En el caso de cordilleras de una longitud superior a los 150 km, el viento sufre alteraciones en el plano vertical que comportan también cambios significativos en los parámetros de estado del aire. En la ladera de barlovento, el viento presenta, una ascendencia forzada con velocidades crecientes. Al llegar a la cima, el viento gana velocidad hasta una altura que equivale a la tercera parte de la

elevación de la montaña.

En la ladera de sotavento, la corriente tiene tendencia a descender y lo hace con importantes turbulencias que producen torbellinos y rachas violentas y súbitas que pueden presentar volutas de hasta unos 180°.

Más allá de la ladera de sotavento se produce una ondulación del flujo del viento que puede adquirir una longitud de onda de una 4 a 5 millas.

Muchas veces aparecen en las crestas de estas ondulaciones nubes lenticulares denominadas también "de viento".

Entre las crestas de la ondulación se produce una zona de viento acelerado y justo de bajo de ellas se generan unos vórtices que producen vientos más débiles y generalmente opuestos a la dirección general del viento. Desde un punto de vista náutico, este efecto es muy característico de la costa este de Nueva Zelanda cuando sopla viento del NO.

Hay que considerar que en la práctica estas situaciones nunca se manifiestan de forma exacta ya que en estos fenómenos intervienen una gran cantidad de parámetros que pueden producir efectos contrapuestos. Por este motivo, es preciso recopilar la mayor cantidad posible de datos, sobre todo a nivel local para poder sacar conclusiones en forma de modelos de posibilidades.

### **Brisas térmicas**

Son vientos costeros debidos a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra. Su intensidad depende de muchos factores locales tanto sinópticos como climáticos.

En meteorología se denominan brisas térmicas a los vientos que soplan en las zonas de la costa del mar hacia tierra durante el día y de la tierra al mar durante la noche. Son vientos pues que no se generan por gradientes isobáricos a nivel general, sino a nivel local en las zonas costeras. En las latitudes medias, alcanzan su plenitud durante las épocas en el que el sol caliente con mayor intensidad, es decir, cuando está más alto: de finales de la primavera a finales de agosto. Su intensidad rara vez sobrepasa los 25 nudos y es normal que se sitúe alrededor de los 15.

### **Proceso de formación**

Las brisas se producen por el desfase existente en el proceso de calentamiento del mar y de la tierra por la acción de la radiación solar.



Figura.- Proceso de formación de la brisa marina

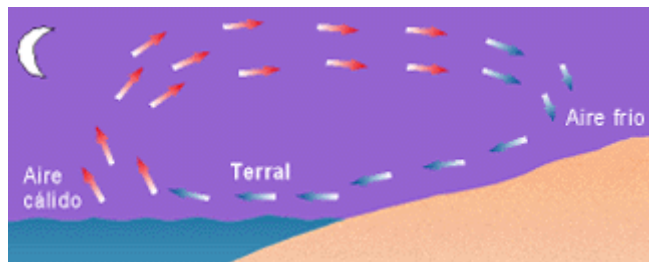


Figura.-Proceso de formación de la brisa terrestre o terral

## Durante el día

A medida que el sol asciende va calentando la tierra más rápidamente que el agua del mar. La tierra va calentando el aire en contacto con ella que asciende al aligerarse; su lugar a viene a ocuparlo el aire del mar que está más frío. Es decir, se origina un gradiente térmico que, a su vez, origina un gradiente de presión que causa el desplazamiento del aire de la zona de mayor presión - la superficie del mar - al de menor presión - la superficie de la tierra -, generándose así un viento del mar hacia la tierra que se denomina brisa marina o virazón.

## Durante la noche

Cuando la radiación solar desaparece, la superficie del mar conserva más tiempo el calor captado durante el día que la tierra, la cual se enfría con más rapidez. Se produce un gradiente térmico y de presión inverso al caso diurno: el aire más caliente del mar se eleva y su lugar pasa a ser ocupado por el aire más frío proveniente de la tierra. Se origina así la brisa terrestre o terral.

En cuanto el sol ha calentado lo suficiente la tierra el aire empieza a elevarse y poco a poco empieza a entrar el aire del mar. Esta masa de aire frío se comporta de forma similar a un frente de origen polar: "empujando" al aire caliente que tiene delante, el cual, al elevarse, se condensa generando nubes de desarrollo vertical. La llegada de la brisa marina está precedida pues por el paso del denominado frente de brisa, zona de convergencia que se forma en alta mar a lo largo de la mañana cuando el viento de tierra es débil y que se desplaza de forma irregular hacia tierra.

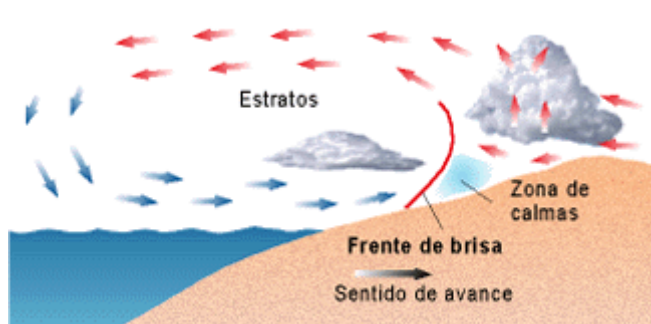


Figura.- El frente de brisa

Adyacente al frente de brisa hay una zona de viento en calma que marca el límite entre el terral y la brisa del mar. El frente de brisa se suele desplazar a una velocidad inferior a la fuerza de la brisa. Si la intensidad de la brisa es débil, la zona de calma del frente de brisa puede ser muy amplio, hasta alcanzar incluso kilómetros.

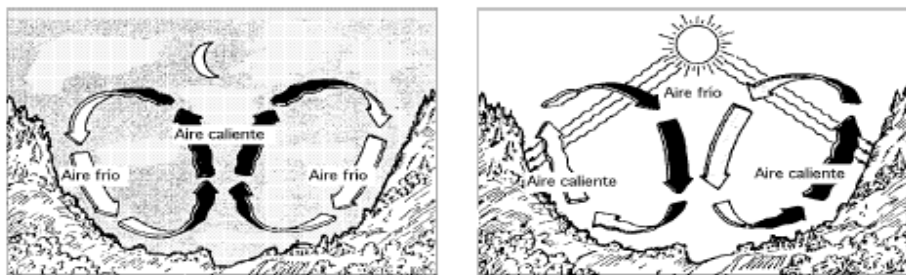
Las nubes de desarrollo vertical que se forman en la costa identifican visualmente el frente de brisa y son un buen indicador de la intensidad que el viento puede llegar a alcanzar. Cuanto más altas sean más intensidad y extensión puede alcanzar la brisa diurna. La brisa marina no suele penetrar más allá de 30-35 millas en tierra. El terral es mucho más débil y rara vez se adentra más de 20 millas en el mar.

### Dirección de la brisa

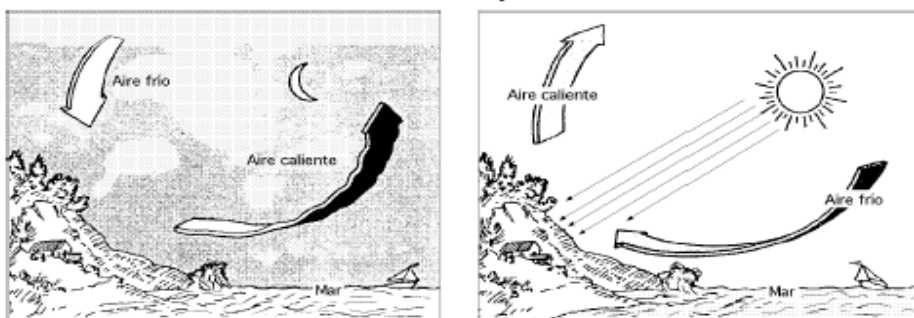
Cuando se manifiesta por primera vez en la mañana, la brisa marina suele ser muy suave y casi perpendicular a la línea media de la costa. A medida que avanza el día, tiene tendencia a rolar hacia la derecha (si se mira hacia barlovento) por efecto de la fuerza de Coriolis. La brisa marina acaba orientándose de forma casi paralela a la costa. La brisa terrestre sigue un proceso inverso durante la noche.

**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, 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. 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



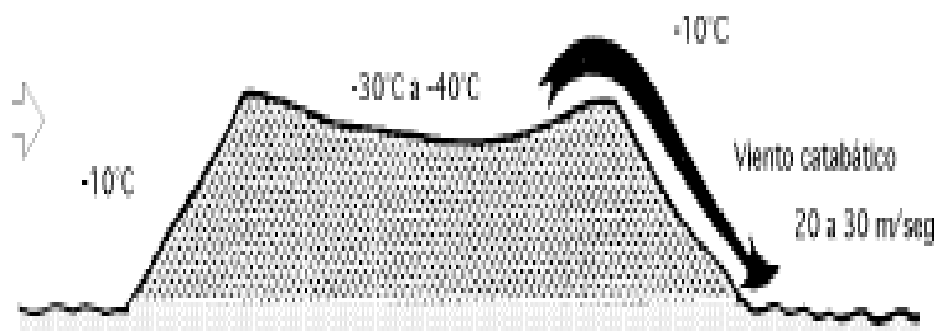
Brisas de mar Vientos particulares y locales

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 CATABATICOS Y ANABATICOS.-** El viento *catabático*, Fig I.6, es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas o regiones más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles.

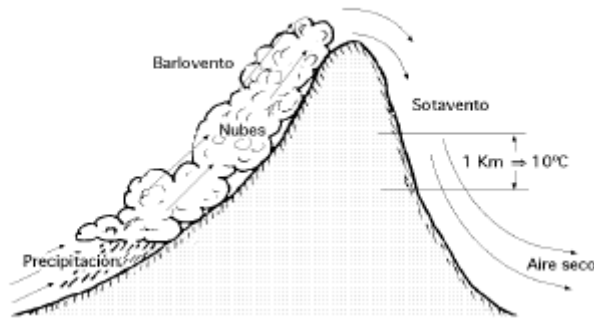


Viento catabático

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.

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

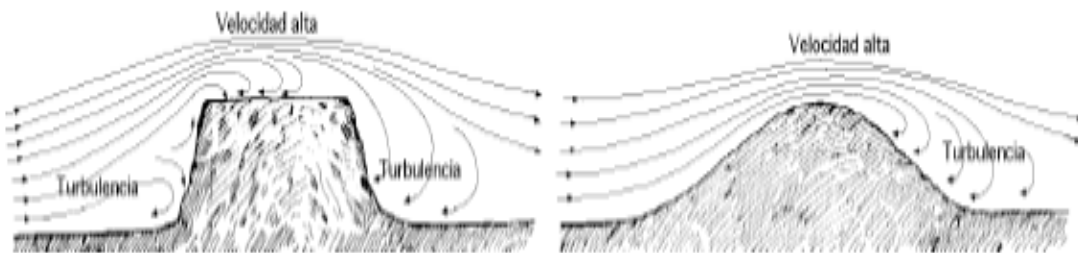
**FOHN.**- El *föhn* es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de los sistemas montañosos, un *föhn* fuerte se presenta precedido por un sistema de bajas presiones que avanza ocasionando fuertes vientos en la troposfera media y alta.



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

Efecto föhn

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.



### 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.

## **Condiciones favorables para la formación de brisas**

Todas las condiciones que favorezcan el incremento del gradiente de presiones entre aire del mar y el de favorecerán la formación de las brisas.

### **Un gradiente térmico de aproximadamente 4 o 5°C.**

Aunque, en general, basta que la temperatura del aire terrestre sea superior en al menos 1°C a la del aire marino se dan las circunstancias que posibilitan las brisas diurnas; por debajo de este valor difícilmente se establecen. Esto explica que en zonas donde el mar se calienta mucho, como el Mediterráneo, las condiciones favorables para el gradiente térmico se den en las épocas en el que el agua está todavía fría y el sol es capaz de calentar con intensidad la tierra; es decir, a finales de primavera y principios del verano. A partir de agosto, cuando la temperatura del agua supera los 22-23° y el sol empieza a perder altura, las brisas empiezan a disminuir de intensidad y se generan ya con dificultad al entrar el otoño. En invierno, la capacidad de calentamiento del sol es tan débil que cualquier circunstancia en contra hace que no existan brisas.

### **Los cielos despejados o la nubosidad débil.**

La ausencia de nubes favorece el calentamiento de la tierra durante el día y la su pérdida de calor durante la noche, por lo que se favorece el gradiente térmico diurno y nocturno. Los cielos nubosos no dejan calentar la tierra durante el día y guardan el calor de ésta durante la noche.

### **La inestabilidad térmica vertical.**

Cuanto más gradiente térmico vertical, más facilidad tendrá el aire caliente para ascender y generar una mayor depresión, por lo tanto más brisa habrá. Si en las capas altas de la atmósfera hay aire cálido, por más gradiente de temperatura que exista entre la tierra y el mar, no habrá brisa. Esto explica que visualmente se pueda predecir la intensidad de la brisa por las nubes de desarrollo vertical que se forman delante del frente de brisa en la costa: cuanto más altas, dependiendo evidentemente de otros factores locales, más intensa podrá llegar a ser la brisa, como ya se ha explicado.

### **La ausencia de vientos sinópticos generales.**

Si existen gradientes de presión general más fuertes provenientes de depresiones térmicas o polares, las condiciones de viento marcadas por éstos prevalecerán sobre las brisas térmicas; aunque, en realidad, ambos gradientes béricos - el general y el local que genera la brisa - se sumarán alterando la dirección e intensidad del viento sinóptico dominante o a la inversa: si las brisas son dominantes, las condiciones generales béricas las influirán en dirección e intensidad. Un caso típico de esto último lo constituye la característica baja térmica que se forma durante le verano en la península ibérica. Influye sobre todas las brisas que se generan en la costa mediterránea

desviándolas hacia el oeste.

### **Costa sin una orografía alta.**

Las paredes montañosas de considerable altitud en la línea de la costa es un freno considerable a la formación de brisas. Por contra, los valles las favorecen.

### **Terreno con alto coeficiente de absorción de calor.**

La tierra pelada tiene más coeficiente de absorción del calor solar (se calienta más) que los vegetales, por consiguiente las masas boscosas debilitan las brisas. Por el contrario, el cemento, piedra, metales y asfalto de las masas urbanas tienen un altísimo coeficiente de absorción del calor lo que incrementa las brisas. Por otra parte, los automóviles y las industrias de las grandes concentraciones urbanas incrementan aún más el calor del aire, por lo que las grandes ciudades costeras favorecen la formación de brisas en sus costas.

## 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.

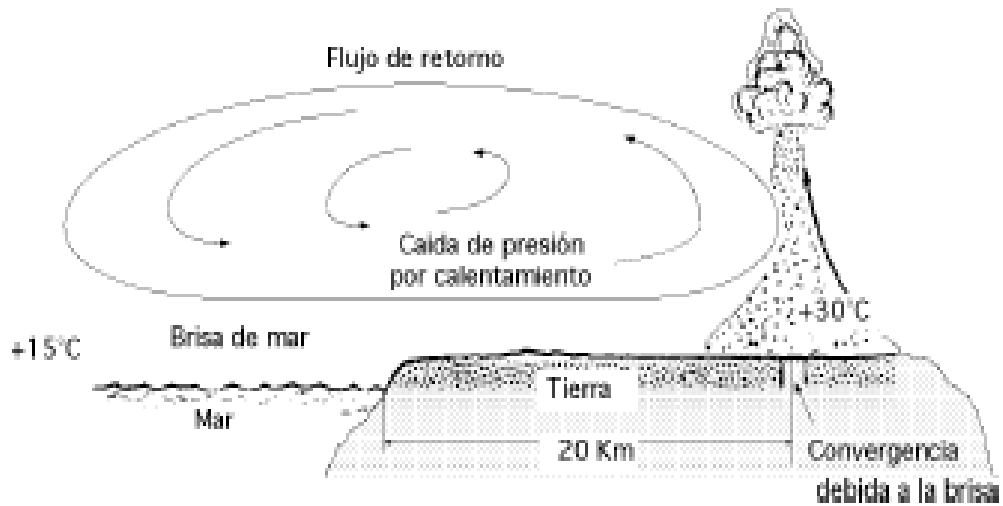
Existe un axioma (Bjerknes) que indica el movimiento o sentido de giro del viento:

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, 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.



### Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas)

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 (relieves, cotas, etc),

## 1.2- Medición del viento.

### Velocidad del viento.

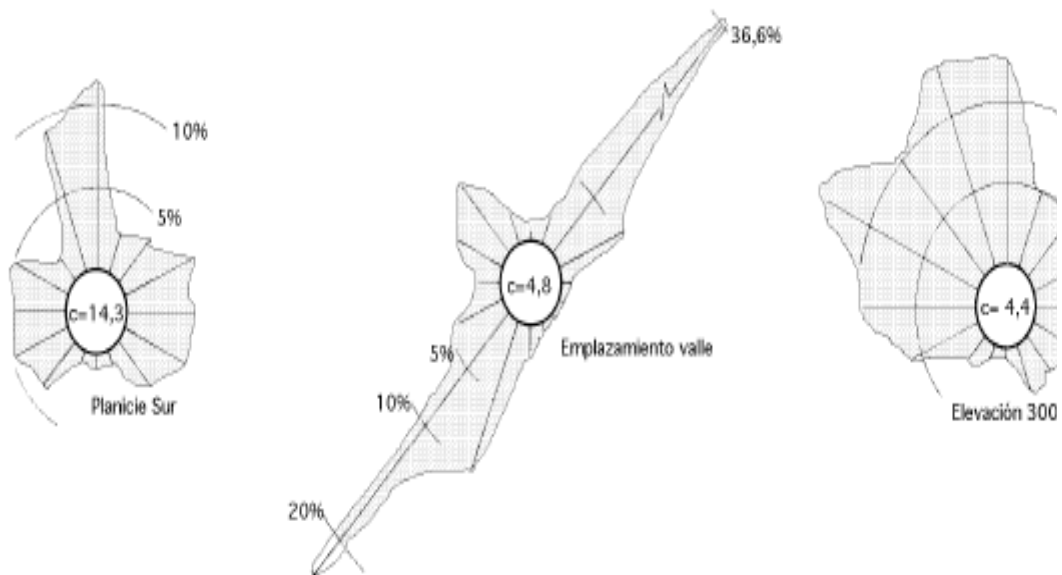
El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada *rosa de los vientos*.

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.

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.

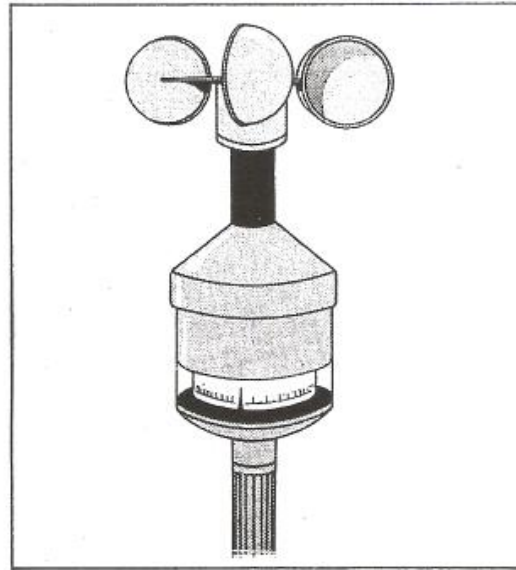


**Rosas de viento características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie sur y por encima de las elevaciones extremas de un valle**

## ¿CÓMO PODEMOS MEDIR LOS VIENTOS?

Los vientos, aunque inconstantes, son con frecuencia regulares. La mayoría se repiten, bien todos los días, bien en ciertas estaciones. Naturalmente los más aprovechables son los vientos diarios, representados por las brisas de mar y de tierra, porque nos permiten un funcionamiento casi continuo, y por tanto muy rentable, de un aeromotor o de un aerogenerador.

Los observatorios meteorológicos miden diariamente la velocidad del viento, con un aparato llamado **anemómetro**, y observan la dirección que indica la **veleta**. Con las anotaciones de todo el año se confeccionan los **mapas de vientos** de cada región.



Anemómetro de cazoletas con lectura instantánea de la velocidad

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.

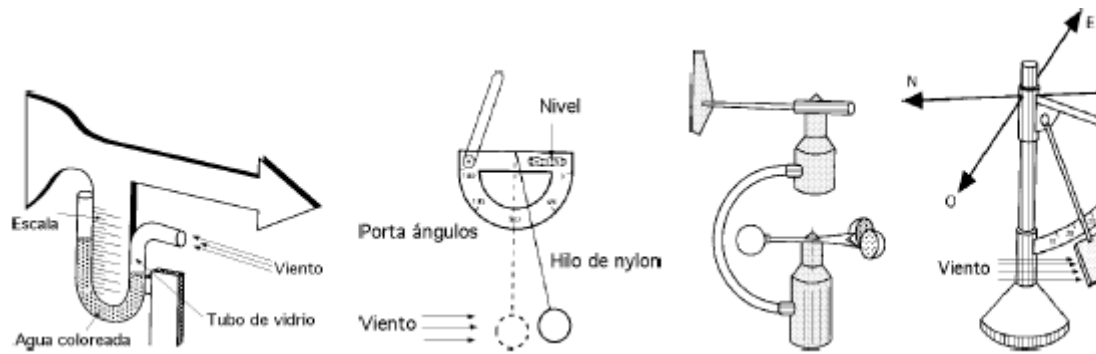
El anemómetro de presión se basa en el método del tubo de Pitot.

La dirección del viento se comprueba mediante una veleta, mientras que la velocidad se mide con un anemómetro.

Según sea la velocidad se pueden considerar tres tipos de definiciones:

- Viento instantáneo; se mide la velocidad del viento en un instante determinado.
- Viento medio aeronáutico; se mide la velocidad media durante 2 minutos
- Viento medio meteorológico; se mide la velocidad media durante 10 minutos

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



### Diversos tipos de anemómetros

Una *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 la velocidad media del viento, 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<sup>2</sup> año, y en otras puede que no se llegue a los 200 kW/m<sup>2</sup> 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:

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

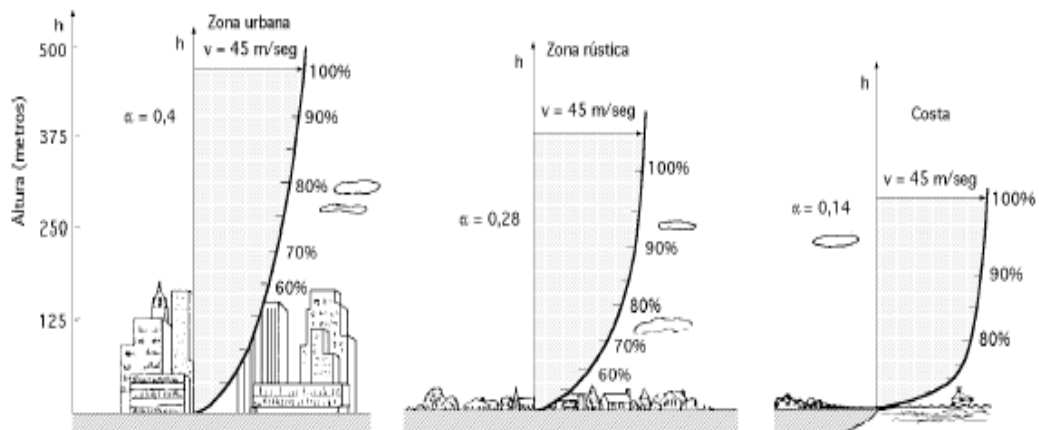
en la que  $v_h$  es la velocidad del viento a la altura  $h$ ,  $v_{10}$  es la velocidad del viento a 10 metros de altura y  $a$  es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la Tabla.

En la figura se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann.

Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

Lugares llanos con hielo o hierba	$a = 0,08 \text{ , } 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$a = 0,14a$
Terrenos poco accidentados	$a = 0,13 \text{ , } 0,16$
Zonas rústicas	$a = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$a = 0,2 \text{ , } 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$= 0,25 \text{ , } 0,4$





Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, 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 cantidades ( $N = k \cdot v^3$ ) que proporcionan la potencia disponible en el viento para cada velocidad y de la que sólo es posible extraer una fracción.

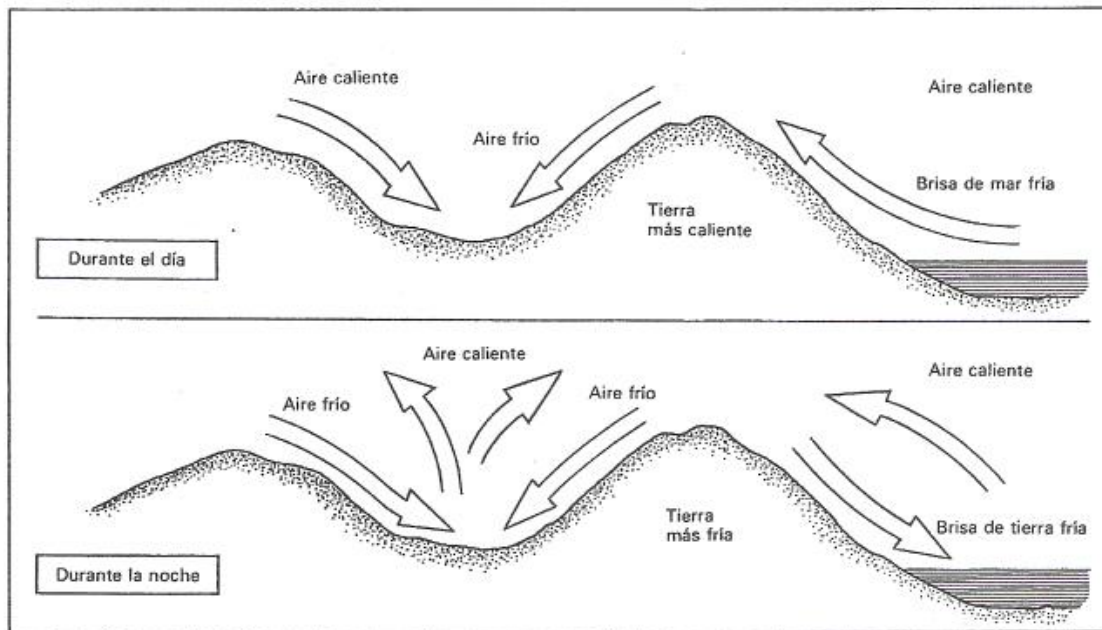
La curva de *duración de la velocidad* tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad.

*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.

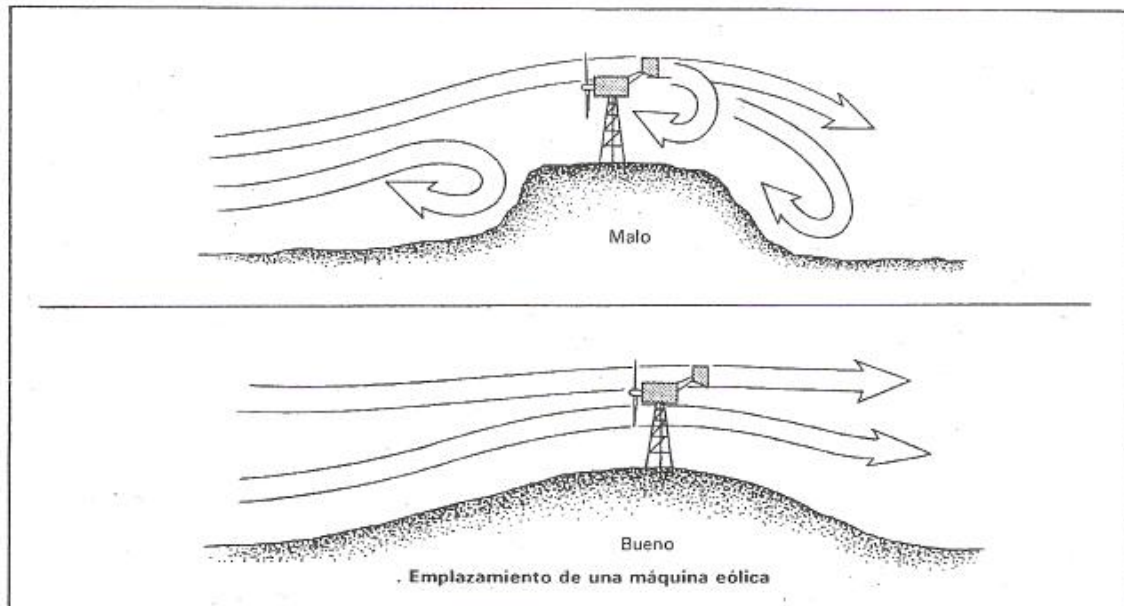
*La frecuencia de las direcciones* no es siempre una característica general en consonancia con la situación isobárica media como puede ser la posición respectiva media de los anticiclones y de las depresiones en el transcurso de los años; los vientos particulares y locales son la prueba.

### Escala Beaufort

Escala	Denominación	Efectos producidos en tierra por el viento	Velocidad del viento	
			en m/s.	en km./h.
0	Calma .....	El humo sube verticalmente.....	0 a 0,2	
1	Aire ligero .....	El humo se inclina pero no se mueven las veletas .....	0,3 a 1,5	1 a 5
2	Brisa ligera .....	Se nota el viento en la cara. Las hojas se mueven y las veletas giran.....	1,6 a 3,3	6 a 11
3	Brisa suave.....	Hojas y ramitas en movimiento continuo. Se agitan las banderitas.....	3,4 a 5,4	12 a 19
4	Brisa moderada...	El viento levanta polvo y hojas de papel. Las pequeñas ramas se agitan.....	5,5 a 7,9	20 a 28
5	Brisa fresca.....	Los árboles pequeños se balancean. Se originan olas en los estanques .....	8 a 10,7	29 a 38
6	Brisa fuerte.....	Las grandes ramas se agitan. Los hilos eléctricos vibran. Es difícil aguantar un paraguas.....	10,8 a 13,8	39 a 49
7	Viento moderado.	Los árboles se agitan. Es desagradable caminar cara al viento	13,9 a 17,1	50 a 61
8	Viento fresco ....	Se rompen las ramas pequeñas. Se camina mal cara al viento	17,2 a 20,7	62 a 74
9	Viento fuerte ....	Se pueden producir ligeros destrozos (caída de cubiertas, de chimeneas o de tejas).....	20,8 a 24,4	75 a 88
10	Viento fortísimo .	Se produce en muy contadas ocasiones en el interior de las tierras. Destrozos en los árboles y en los edificios.....	24,5 a 28,4	89 a 102



Brisas de mar y de tierra



Practica # 1: construir un anemómetro de cazoletas.

Practica # 2: tomar lecturas de la zona para la posible instalación de aereomotor.