6.2.1 Características Darrieus

El rotor Darrieus consta de unas finas palas, con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje sólo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje.

El modelo de curva más utilizado es el denominado Troposkien, aunque también se utiliza la catenaria.

Igual que el resto de aerogeneradores de eje vertical, el Darrieus no necesita de un sistema de orientación. Esta característica de captación omnidireccional le permite ser instalado en cualquier terreno sin necesidad de levantar altas torres, lo cual se traduce en un ahorro económico sustancial.

Los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga. Al trabajar en pura tensión y hace que los alerones sean simples y económicos.

Este rotor presenta el problema que no puede arrancar por sí mismo, teniendo que emplearse un sistema de arranque secundario, aunque una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a su aerodinámica y diseño de sus palas.

Normalmente se instala un generador de inducción conectado a la red. Una vez que el Darrieus se encuentra en velocidad de operación empieza a otorgar potencia. Este tipo de generador es simple, robusto y barato respecto a los otros tipos utilizados en generación eólica.

También en Canada, se ha invertido en estos aerogeneradores. Hace unos años el más grande aerogenerador era justamente uno de este tipo (foto 6.2) y fue construido en Quebec en 1987, con 64 m de diámetro y una altura de 96 m. Con una potencia nominal de 4 MW, fue el primer Darrieus en tener este orden de magnitud, en potencia generada y tal como las turbinas hidroeléctricas no precisaba de una caja de cambio. El generador tenía 162 polos y globalmente otorgaba potencia a la red de Quebec, con un sistema AC-DC-AC. Para asegurar una vida útil más larga se le hizo trabajar a 2,5 MW. Actualmente no está operativo.

Foto 6.2. 4 MW

Mejoras aplicadas a VentCat.

Del rotor Darrieus, surgió la idea original de la estructura y forma de diseño, del aerogenerador VentCat.

Los componentes principales de la estructura basados en un eje central, aspas y base a pie de suelo, fueron tomados para el desarrollo de nuestro aerogenerador. El Diseño de la hélice es muy similar, pero en el aerogenerador VentCat (Ver figura 3.2), se diseñaran de tal manera que la parte central de las aspas es más ancha que la de los extremos, De esta manera se ha conseguido obtener un mayor par de arranque y una mayor aceleración de las aspas. Consta de unas finas palas, con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje sólo por los dos extremos, con una curva especial y helicoidal, diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje.

Figura 3.2, Aerogenerador VentCat

6.3 Darrieus tipo H o Giromill

La patente de Darrieus también abarco a las turbinas con alerones verticales de eje recto llamadas Giromills. Una variante del Giromill es la Cycloturbine, con alerones orientados mecánicamente, con el fin de cambiar el ángulo de ataque tal como se puede apreciar en la foto 6.3 y 6.4. Este tipo de turbina fue investigada por el *National Renewable Energy Laboratory*.

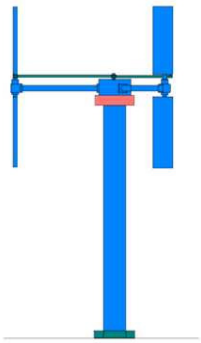


Foto 6.3: Giromill vista frontal

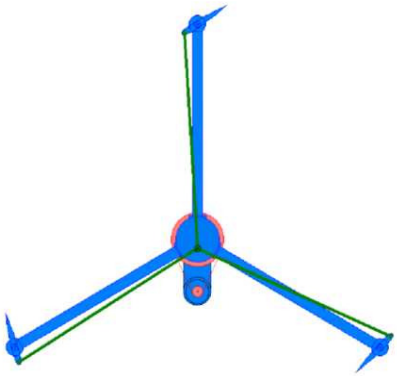


Foto 6.4: Giromill vista superior

6.3.1 Mejoras aplicadas a VentCat.

Del rotor Darrieus tipo H o Giromill, se selecciono la idea de instalar 3 hélices, totalmente idénticas y separadas entre ellas 120°, de esta manera se logra un mayor rendimiento al disponer de mayor superficie de contacto y una mucho mejor estabilidad del aerogenerador a velocidades altas.

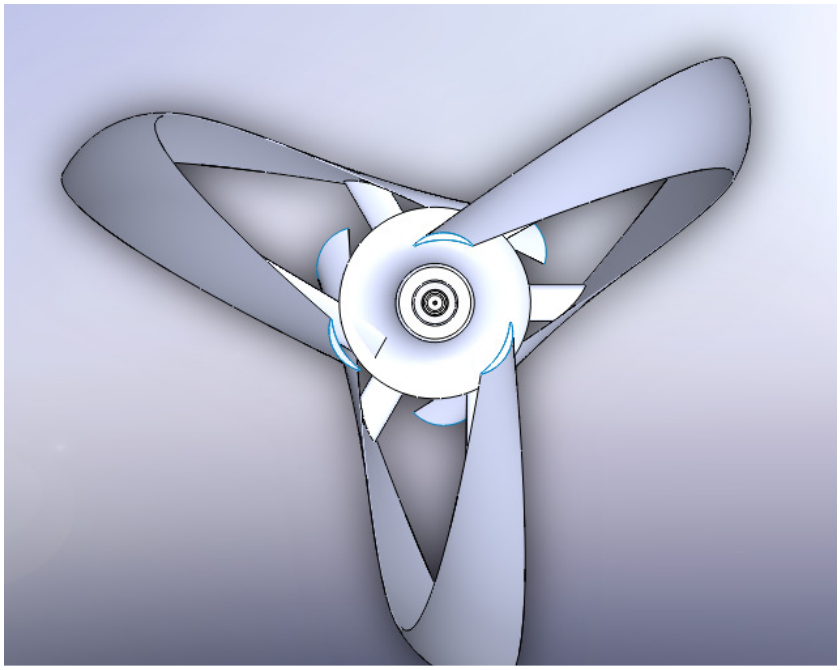


Figura 3.3, Aerogenerador VentCat, posicionamiento de las hélices a 120°

6.4 Prototipo Windside

Este novedoso aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside.

En la Foto 6.5 se puede apreciar un par de estos aerogeneradores capaces de entregar 50[kW] y que tienen la tarea de climatizar un centro comercial en las cercanías de Turku (Finlandia).

Foto 6.5: Turbinas Windside

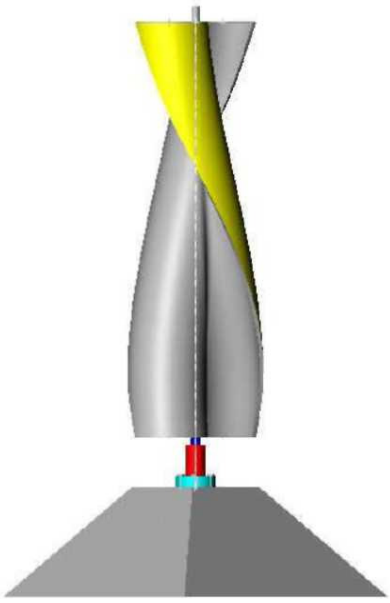


Foto 6.5: Detalle turbina Windside

Esta tecnología relativamente nueva y prometedora, con rendimientos similares a los aerogeneradores de eje horizontal, es aplicada para abastecer medianos y pequeños consumos. El concepto aerodinámico es lo que lo hace distinto e interesante respecto a los otros.

6.4.1 Mejoras aplicadas a VentCat.

Del Aerogenerador Windside, se selecciono la idea de instalar las hélices en forma helicoidal(como se puede apreciar en las figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7), para poder abarcar la mayor superficie posible de empuje, con la mínima altura disponible. También las aspas tipo Savonius, una vez diseñadas y desarrolladas en nuestro aerogenerador, se pensó en realizar una protusión helicoidal a lo largo del eje central, que durante las simulaciones realizadas se vio como aumentaba exponencialmente el rendimiento del aerogenerador, incluso facilitando el arranque del Aerogenerador a velocidades de viento de 3.5 m/s.

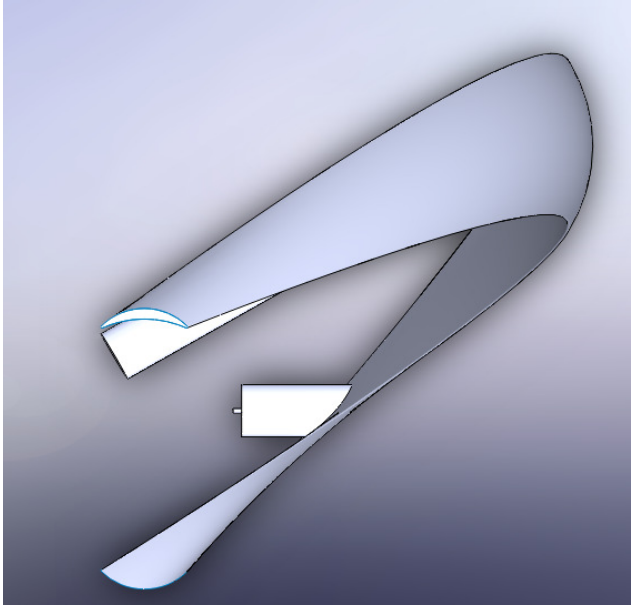


Figura 3.4, vista Alzado hélice

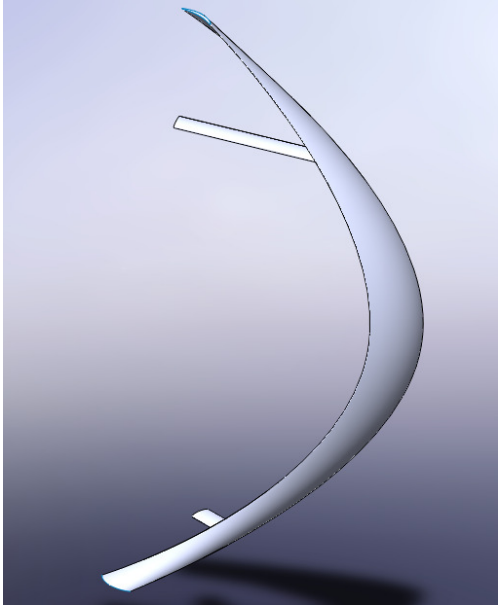


Figura 3.5, vista Isométrica hélice

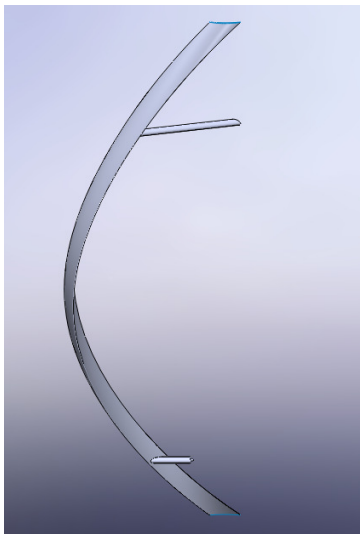


Figura 3.6, vista Lateral izq. hélice

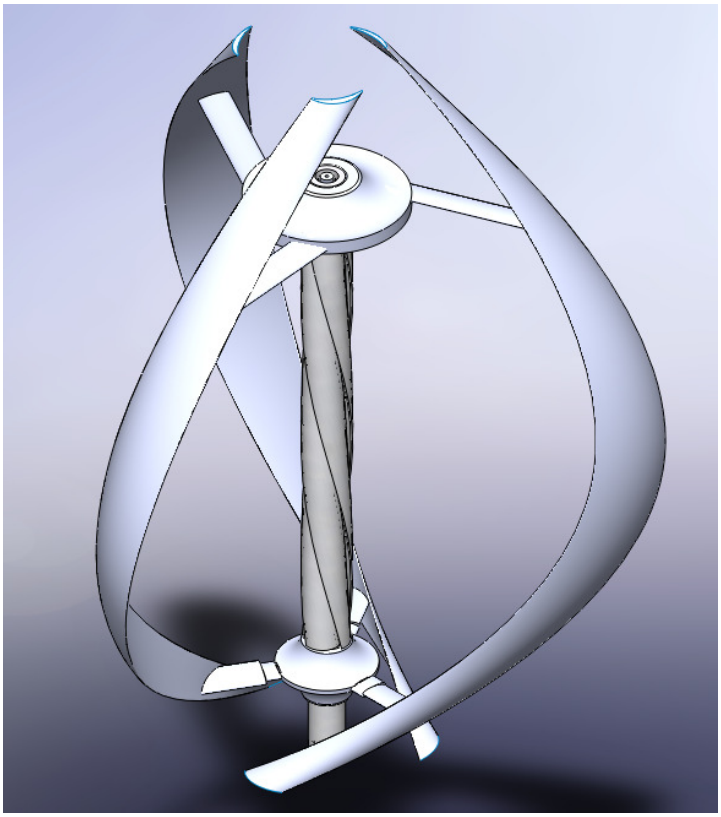
Figura 3.7, vista Lateral izq. hélice

6.5 Conclusión del desarrollo Ventcat.

Una vez realizado estudio estructural y de diseño de los Aerogeneradores Verticales existentes en el mercado, se inicio el desarrollo del aerogenerador VentCat.

El desarrollo del aerogenerador paso por varias etapas de diseño, solamente en el diseño estructural y desarrollo aerodinámico, simulaciones y materiales, para mejorar de la eficiencia y rendimiento del aerogenerador Ventcat, se ha invirtido más de dos, de estudio.

Tal y como he explicado, en cada uno de los aerogeneradores, en los cuales me he inspirado (Savonius, Darrieus, Darrieus tipo H o Giromill y Windside). Hemos ido seleccionando, de cada uno de ellos las partes más importante y las cuales han hecho, que cada uno de estos aerogeneradores, tengan sus características especiales, aun siendo de un mismo tipo de aerogenerador (aerogeneradores verticales) y los cuales han tenido un uso concurrido, durante los últimos años, aun contando con la gran implantación de los Aerogeneradores de eje horizontal.



6.6 Hitos para el diseño

Una vez descrito el desarrollo y diseño del aerogenerador VentCat, se empezó a realizar estudios, mediante programas de elementos finitos, teniendo en cuenta tanto las condiciones ambientales, velocidades del viento, resistencia de los materiales, etc..

A continuación realizaremos una breve descripción de los hitos que se han tenido en cuenta, para la realización y diseño del aerogenerador VentCat.

6.7 La Velocidad.

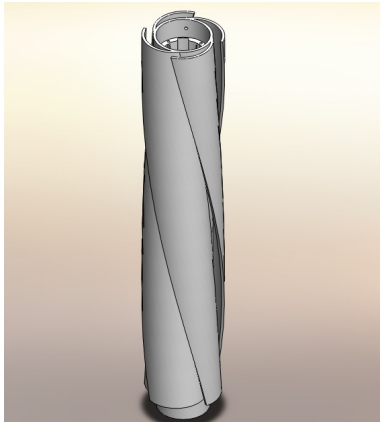
Uno de los grandes problemas de los aerogeneradores, es su funcionamiento frente a la aleatoriedad del estímulo otorgado por el viento. El viento puede ir a velocidades elevadas como muy lentas, en cortos periodos de tiempo y también puede ser constante o presentarse en forma de ráfagas. Las exigencias climáticas que sufren los aerogeneradores son notables. Esto me ha llevado a desarrollar un equipo robusto, resistente, flexible y capaz de soportar las más adversas condiciones climáticas.

Para lograr una velocidad constante en el eje del generador se pueden utilizar diversas soluciones que van desde la sistemas mecánicos (caja de cambio) hasta la alteración del comportamiento aerodinámico del aerogenerador frente al viento (variación del Angulo de ataque de la aspas y diseño de perdida aerodinámica de las aspas). En nuestro caso hemos utilizado una caja de cambios.

Ya que la idea es que el sistema utilizados para controlar la velocidad del aerogenerador, tiendan a aumentar al máximo la eficiencia y sobre todo que logren un control total y efectivo de la operación del aerogenerador y su seguridad.

6.8 Sistemas de control aerodinámico.

El sistema de control aerodinámico que dispone nuestro aerogenerador, son las aspas del eje central, dichas aspas están diseñadas para facilitar la arrancada del aerogenerador VentCat y en el caso de que existieran sobre presiones dichas palas se deforman, modificando su perfil de arrastre y facilitando allí donde haya presión la una fuga de aire.



ASPAS EJE CENTRAL

HELICE

Tal y como se puede apreciar en la fotografía de la hélice, las 3 hélices tienen un diseño especial. Los extremos son muchas más estrechos que la parte central, esto es así para poder facilitar la salida de aire, en el caso de velocidades de aire altas y evitar momentos de sobreesfuerzo en las extremidades de las hélices, que podrían ocasionar desperfectos en el equipo. La parte más ancha, que está en el centro, al estar separada del eje central ejerce un par torsor, respecto el eje central facilitando de esta manera la funcionhabilidad del aerogenerador a bajas velocidades.

6.9 Sistemas de control eléctrico

Donde más se puede apreciar las mejoras en la regulación de velocidad son en los sistemas encargados de la generación eléctrica. Como se verá en el capítulo 3, existen generadores de distinta naturaleza. Para aquellos que otorgan su energía a una red continua se podría contar con el control de la corriente de campo (si se trata de alternadores de rotor bobinado y con rectificación). Esto es correcto considerando que:

$$E = M \cdot U \cdot Icampo$$

Donde:

E = Es el valor peak de la onda generada tal como se aprecia en la figura 6.10.1
Icampo = Es la corriente que circula por el bobinado de rotor.
M = es una constante que involucra el número de vueltas del embobinado de estator y el porcentaje de flujo magnético generado en el rotor que excita el estator.

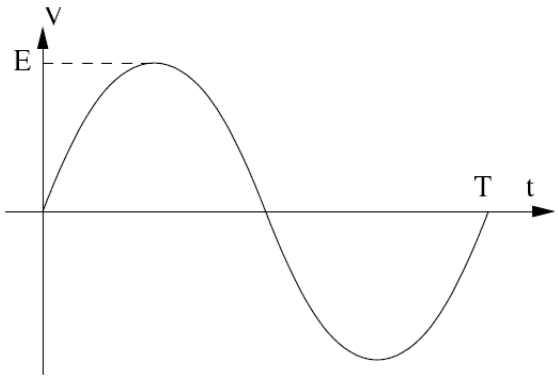


Figura 6.10.1- Onda sinusoidal generada en cada enrollado del estator.

El esquema siguiente (figura 6.10.2), describe la estructura general de un alternador (máquina síncrona), la cual puede ser utilizada para aportar energía a un sistema continuo, agregando una posterior etapa de rectificación. La fórmula 6.10.1, es general, pero al utilizar, el alternador como máquina alterna trifásica (que aporta su energía a una red infinita de la misma naturaleza), con la corriente de campo se modifican las potencias activa y reactiva generadas y no el nivel de voltaje.
Cabe destacar que el generador, se puede utilizar como freno eléctrico en caso de necesidad, disipando toda la energía en forma de calor, emitido por una carga resistiva. Esto hace que el rotor del aerogenerador gire más lentamente.

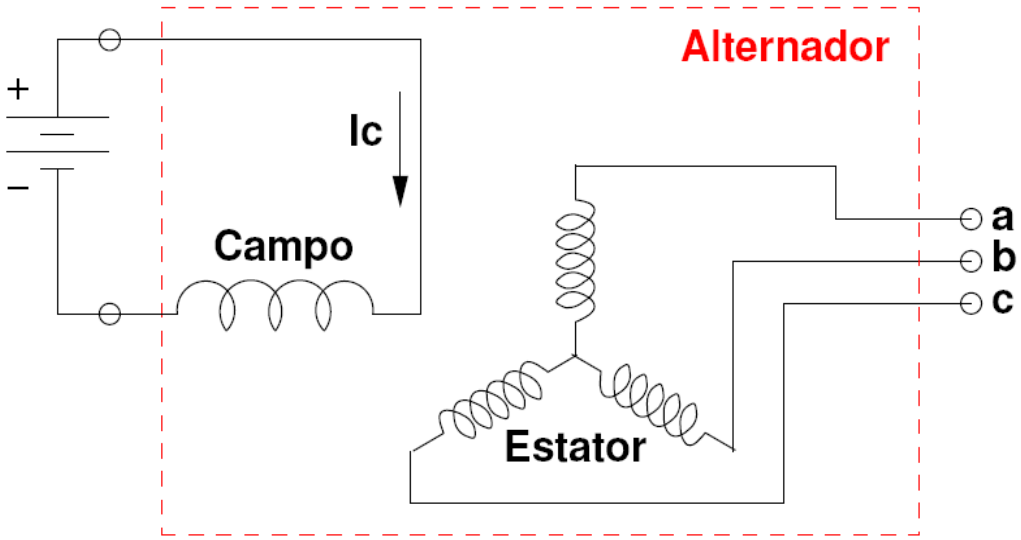


Figura 6.10.2- Esquema general de un alternador.

7 CAPITULO 3

7.1 Tipos de generadores

En la generación de electricidad a partir de la energía del viento se utilizan dos tipos de generadores:

- Generadores de corriente continua,
- Generadores de corriente alterna.

Los generadores de corriente continua (DC) puros, o dínamos, se utilizan en pequeños aerogeneradores ya que la estructura de delgas[1] y múltiples enrollados los hace complejos y poco eficientes. Al aumentar la potencia generada, aumentan las pérdidas que se generan en la transición de las escobillas sobre las delgas[1].

Como se verá en la sección 7.2, obtener corriente continua es factible también trabajando con generadores alternos, gracias a los puentes rectificadores, compuestos por diodos en su forma más elemental.

Hay varias técnicas de control que aprovechan los parámetros eléctricos del generador, para poder manejar las fluctuaciones en la potencia y consecuentemente del voltaje. Entre ellas se encuentran los sistemas de control adaptativos y los siempre más frecuentes sistemas de lógica difusa.

7.2 Sistemas DC

Hay varias maneras de generar en continua:

- Con generadores de corriente continua.
- Con generadores síncronos de corriente alterna, con una posterior etapa de rectificación con semiconductores.

(1) *DELGAS. f. Fís. Cada una de las chapitas o varillas conductoras que, aisladas unas de otras, forman el colector de una máquina dinamoeléctrica.*

7.2.1 Dínamos

Los generadores DC o dínamos, convierten una energía mecánica de entrada, en energía eléctrica de salida, en forma de corriente continua. En la actualidad, estos generadores han caído en desuso y han sido sustituidos por rectificadores de silicio (diodos), que transforman la CA en DC en forma estática y con mayor rendimiento.

Consisten en un inductor (embobinado alimentado con DC) colocado en el estator el cual tiene la tarea de generar un campo magnético constante (idealmente podría ser un imán permanente). El rotor, y en este caso inducido giratorio, está provisto de un colector de delgas sobre el cual se deslizan las escobillas.

7.2.2 Alternador en continua

Como se menciono anteriormente es normal generar energía continua, con generadores alternos, típicamente alternadores (maquinas sincrónicas). Se puede decir, que los pequeños aerogeneradores entregan su energía a una red DC, tal como se ve en la figura 7.2.2.1 y el generador de imán permanente mostrado en la figura 7.2.2.2.

En el ámbito eólico, la tendencia es utilizar alternadores de múltiples imanes permanentes, con igual número de bobinados de estator, lo cual define un gran número de polos. El descubrimiento de materiales que manifiestan un poder magnético superior ha sido determinante en el desarrollo de pequeños y medianos generadores, permitiendo disminuir considerablemente su tamaño sustituyendo los electroimanes. Colocar un mayor número de imanes en el generador implica rebajar su rango de operación en sus revoluciones en el eje. Rebajar el rango de operación del alternador tiene el objetivo de evitar el uso de una caja mecánica amplificadora de RPM. Dejar de lado componentes mecánicos, significa evitar pérdidas que comprometan la eficiencia global de la conversión energética.

En los últimos años se empezaron a construir enormes generadores con este mismo concepto para lograr una máxima eficiencia. Al tener rotores gigantescos, se ha optado por colocar innumerables electroimanes. La magnitud de esto se puede apreciar en el rotor del alternador del Enercon E-112 en la figura 7.2.2.2.

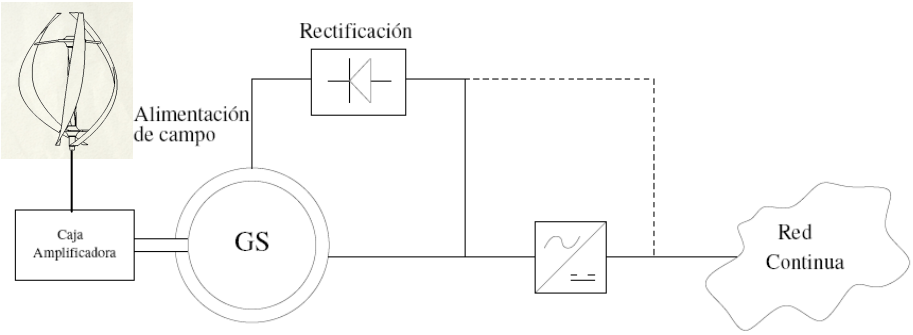


Figura 7.2.2.1- Generador alterna conectado a una red de continua.

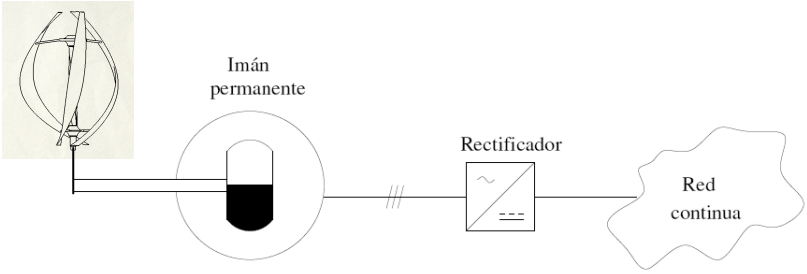


Figura 7.2.2.2- Generador imán permanente conectado a una red de continua.

Figura 7.2.2.3- Rotor del alternador E-112

Como se puede apreciar en la figura 7.2.2.1, el sistema contempla una caja amplificadora de RPM. Si se diseña un alternador con un número de polos adecuados, para que su velocidad de operación, coincida con la velocidad rotacional de las aspas, entonces, se puede omitir la caja amplificadora. Lo anterior es válido también para la configuración mostrada en la figura 7.2.2.2, donde el rotor es constituido por imanes permanentes. Se justifica el uso de estos imanes para lograr alternadores de múltiples polos, con un rotor de diámetro razonable. Si se quisiera dotar al rotor de electroimanes manteniendo el número de polos, difícilmente se lograría mantener el diámetro de la máquina y aumentaría, de todas formas, una complejidad estructural considerable. Construir alternadores de múltiples polos con electroimanes es sustentable, únicamente para generadores donde es posible concebir y diseñar un rotor de diámetro muy grande.

7.2.3 Sistemas CA

7.2.4 Generadores sincrónicos

Las maquinas sincrónicas tienen una velocidad de rotación rígidamente vinculada a la frecuencia de la red, que alimenta el estator. Esta relación es definida por la siguiente ecuación:

$$n = (60 \cdot f)/p$$

Donde:
n : revoluciones por minuto [RPM]
f : frecuencia de la red (España 50 [Hz])
p : número de pares de polos en el estator

También denominadas alternadores, estas maquinas son ampliamente utilizadas en la generación de electricidad por la facilidad de manejar la magnitud y el tipo de potencia que se suministra a la red, modificando la corriente de campo. Manejando el punto de operación es posible determinar cuanta potencia activa y reactiva se está aportando a la red (consumiendo de la red). Esto permite al generador síncrono ir ajustando el factor de potencia de forma fácil y rápida.
Hay varias configuraciones utilizadas en el ámbito eólico, sobre todo para grandes aerogeneradores que se conectan directamente a la red de un sistema interconectado. Estas configuraciones se pueden apreciar en las figuras 1 y 2.

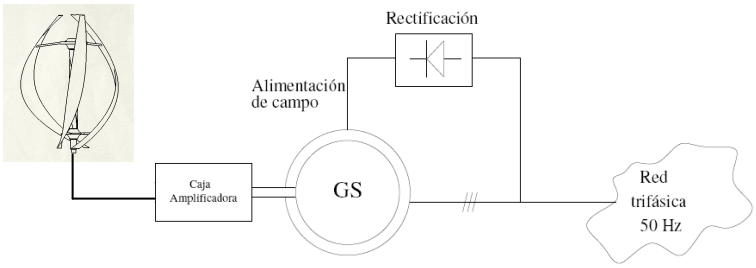


Figura 1 - Generador síncrono conectado directamente a una red alterna

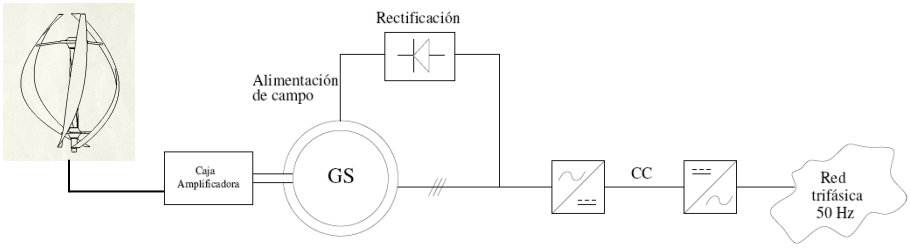


Figura 2 - Generador síncrono con etapa de rectificación e inversión

La diferencia, entre la figura1 y la figura 2, representadas anteriormente, radica en la forma en que se comporta el generador para el abastecimiento de su energía manteniendo la sincronización. En el caso de la figura 1, el sincronismo dependerá de la velocidad del rotor del generador, como define en la ecuación del punto 7.2.4, el cual puede ser ajustado con medidas aerodinámicas, (cambio de ángulo de ataque en las aspas) y/o con una caja amplificadora de velocidad variable.

En el segundo caso (figura 2) no es muy importante la velocidad de giro del generador, ya que la frecuencia de la señal de voltaje resultante no influirá, pues sufrirá una rectificación mediante un puente rectificador trifásico, para obtener una señal continua. Posteriormente se generan nuevamente las tres fases alternas

desfasadas en 120^0, típicas de los sistemas trifásicos, con la frecuencia de 50 [Hz] y el sincronismo perfecto con el sistema interconectado.

Esto gracias a un inversor capaz de entregar la frecuencia adecuada y el nivel de voltaje necesario. De esta manera se puede evitar un control bastante complejo como el de la velocidad de giro del aerogenerador la cual está sujeta a una fuente motriz aleatoria, como lo es el viento.

Como mencionado anteriormente, diseñar un alternador de múltiples polos puede otorgar la posibilidad de eliminar la caja amplificadora de RPM llevando la velocidad de operación de la maquina a la velocidad de rotación de las aspas (ver figura 3). Esto permite mejorar la eficiencia, ya que se eliminan componentes con perdidas asociadas. El control de la frecuencia y del nivel de voltaje puede ser efectuado únicamente con electrónica de potencia (rectificación e inversión) o en conjunto al control del ángulo de ataque de las aspas.

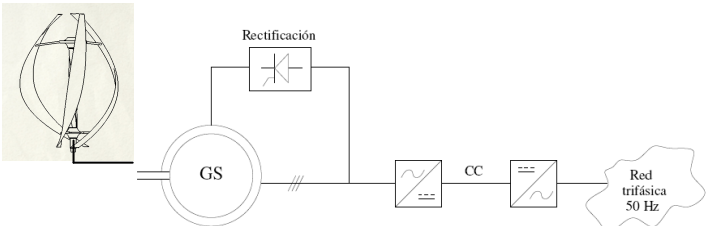


Figura 3- Generador sincrónico de múltiples polos con etapa de rectificación e inversión.

Considerando la ecuación n = (60 · f)/p, y una velocidad rotacional de las aspas de 10[RPM] (valido para ENERCON-112) ,se determina que para obtener una frecuencia de 50[HZ] , se necesitan 300 pares de polos.

7.2.5 Descripción generadores asincrónicos

Se basan en el fenómeno de campo magnético rotatorio resultante, al alimentar los embobinados de estator, con voltajes sinusoidales trifásicos desfasados en 120° entre sí. Se definen, asincrónicos porque la velocidad del rotor no es la del sincronismo impuesto por la red. El equipo más popular es claramente el motor de inducción de jaula de ardilla, el que conectado a la red puede operar como generador. Generalmente estos equipos, se utilizan como motores trifásicos y no como generadores.

7.2.6 Generadores de inducción

Estos equipos se utilizan como generadores al estar conectados a una red trifásica controlando el desplazamiento. No necesitan control, salvo el manejo de la

potencia mecánica y por su estructura de rotor de jaula de ardilla no tienen escobillas conectadas, lo cual elimina parte del mantenimiento, típico que tienen estos generadores eléctricos de rotor bobinado. También se utiliza un cicloconversor en la salida que permite bajar el nivel de voltaje generado adaptándolo al nivel de la red, tal y como se puede ver en la figura 7.1.

Existe otra familia de generadores, de inducción que sí utilizan embobinado de rotor, el cual puede estar en cortocircuito, para operar como jaula de ardilla. La ventaja de tener bobinados de rotor, es la posibilidad de controlar la magnitud de la corriente que circula por ellos y así modificar el deslizamiento favorablemente.

Algunos grandes aerogeneradores, utilizan el sistema de modificación de deslizamiento y las soluciones para lograr esto se muestran en las figuras 7.2 y 7.3.

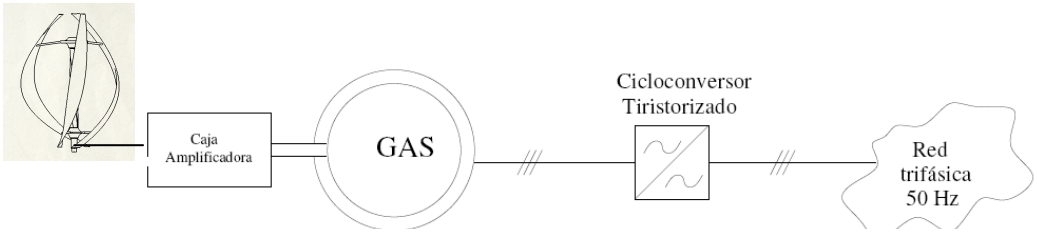


Figura 7.1: Generador asincrónico, conectado directamente a la red alterna mediante cicloconversor.

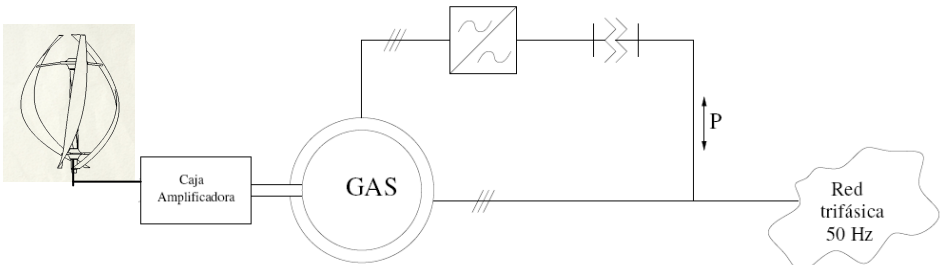


Figura 7.2: Generador asincrónico, conectado directamente a la red alterna doblemente alimentado.

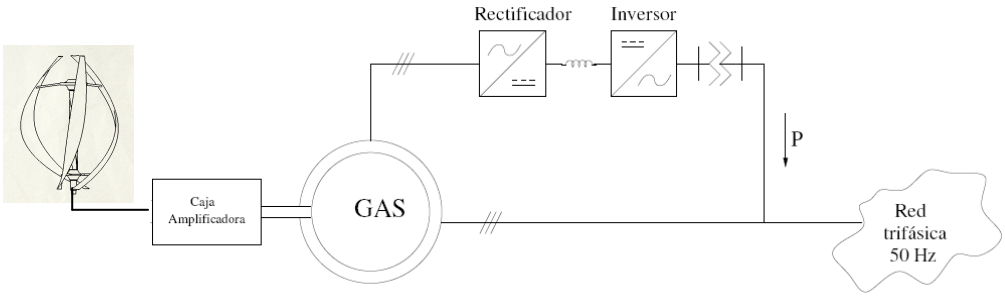


Figura 7.3: Generador asíncrono con etapa de rectificación e inversión.

8 CAPITULO 4

8.1 Modelos para el uso de la energía eólica.

Casi toda la energía del viento que disponemos proviene del sol. Es el la causa de los vientos, evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, lluvias, etc.

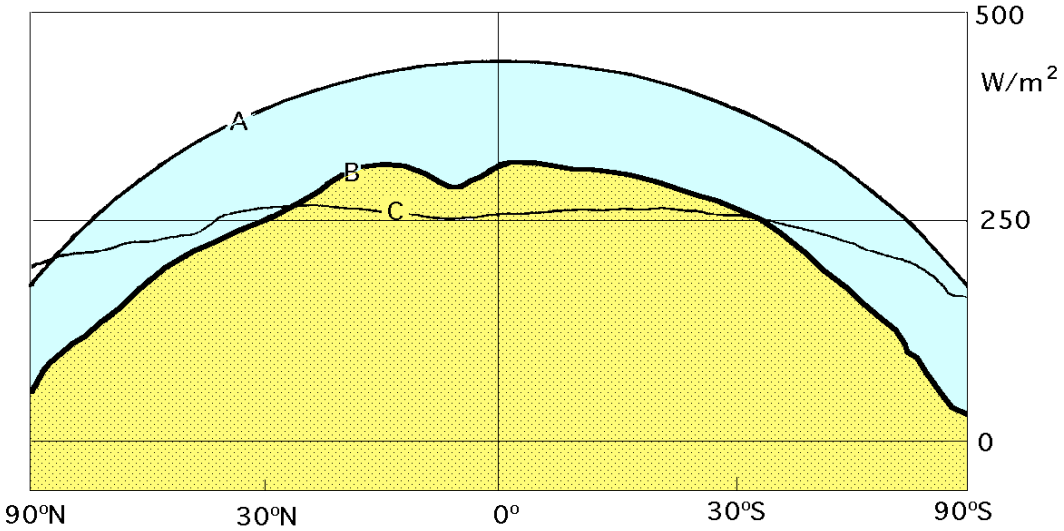
La radiación solar tiene una gran importancia en todas las energías renovables, como el viento, las olas o la biomasa, no son más que manifestaciones indirectas del sol.

En este capítulo vamos a entregar el bagaje teórico necesario para dimensionar matemáticamente el viento y su estructura.

8.2 El viento y su energía.

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/m2 anuales; el 2% de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden de 1017 kW.



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

Figura 8.1

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento, Fig 8.1. 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 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:

aabsoluta= arelativa + aarrastre + aCoriolis

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 8.2, yendo de O a E en el hemisferio Norte.

El eje principal de esta circulación es una corriente en chorro que se produce por encima de los 10.000 metros 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.

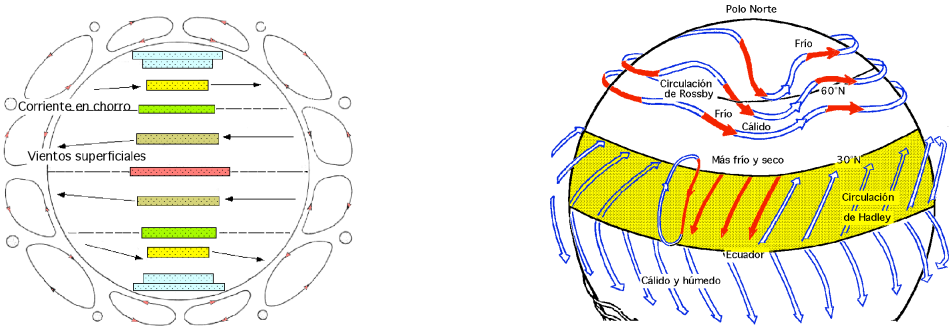


Figura 8.2 *Circulación general del aire en superficie*

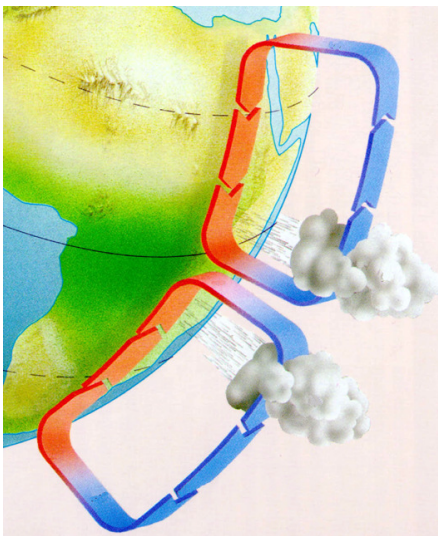


Figura 8.3 *El aire frío tiende a descender hacia el Ecuador*

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 sucede al revés; estos vientos se denominan *monzones*.

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.

8.2.1 Tipos de viento.

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.

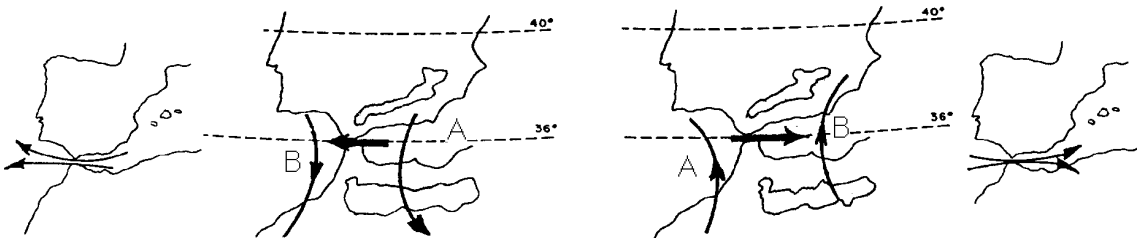
Tanto los vientos generales, como los sinópticos, que se describen acontinuación, están ligados a la circulación atmosférica y mantienen las mismas características sobre grandes extensiones de terreno.

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).

VIENTOS SINÓPTICOS

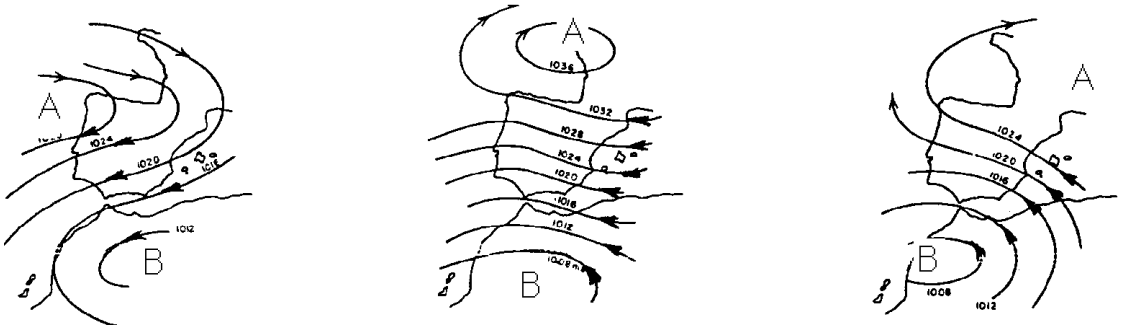
El viento sopla de las altas a las bajas presiones

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



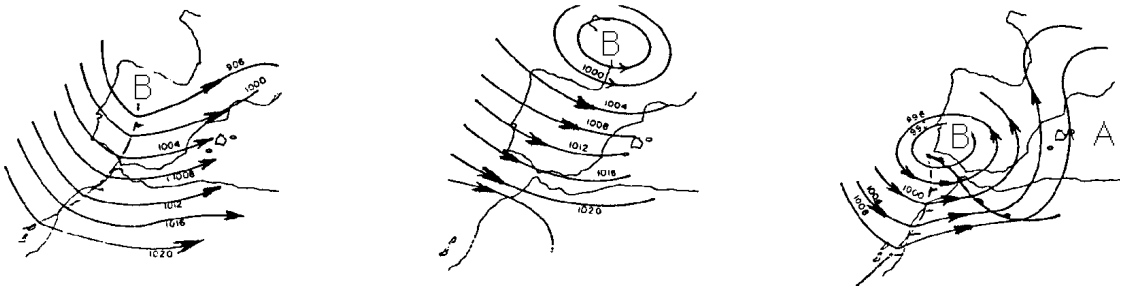
Vientos de Levante

a) Componente E-NE. Anticiclón sobre España y Portugal Bajas presiones en Marruecos-Canarias.
Situación en zeta. AZB
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. BSA



Vientos de Poniente

*a) Componente W-NW. Vaguada en forma de **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 **U**.*



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 8.4.

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 8.4; 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 8.5. 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 8.4.

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 8.4; 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 8.5.

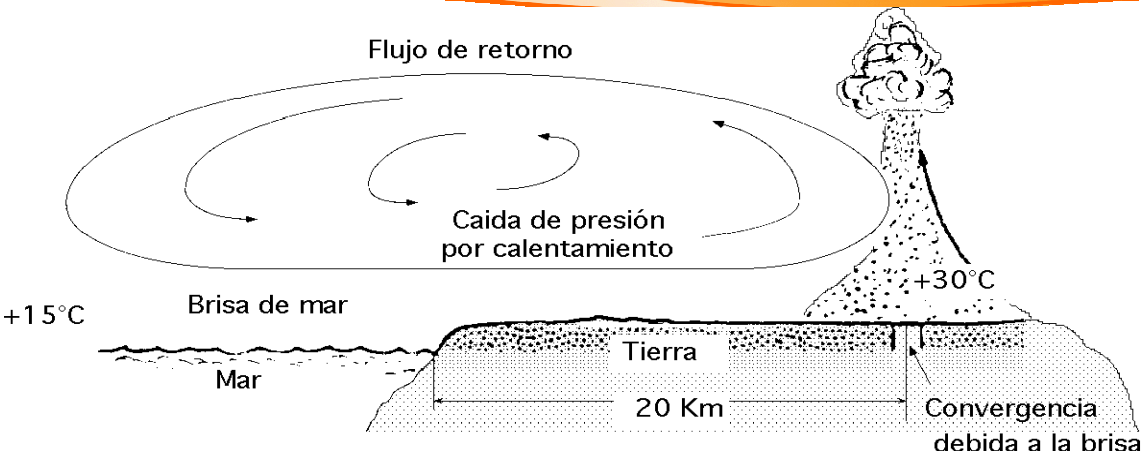
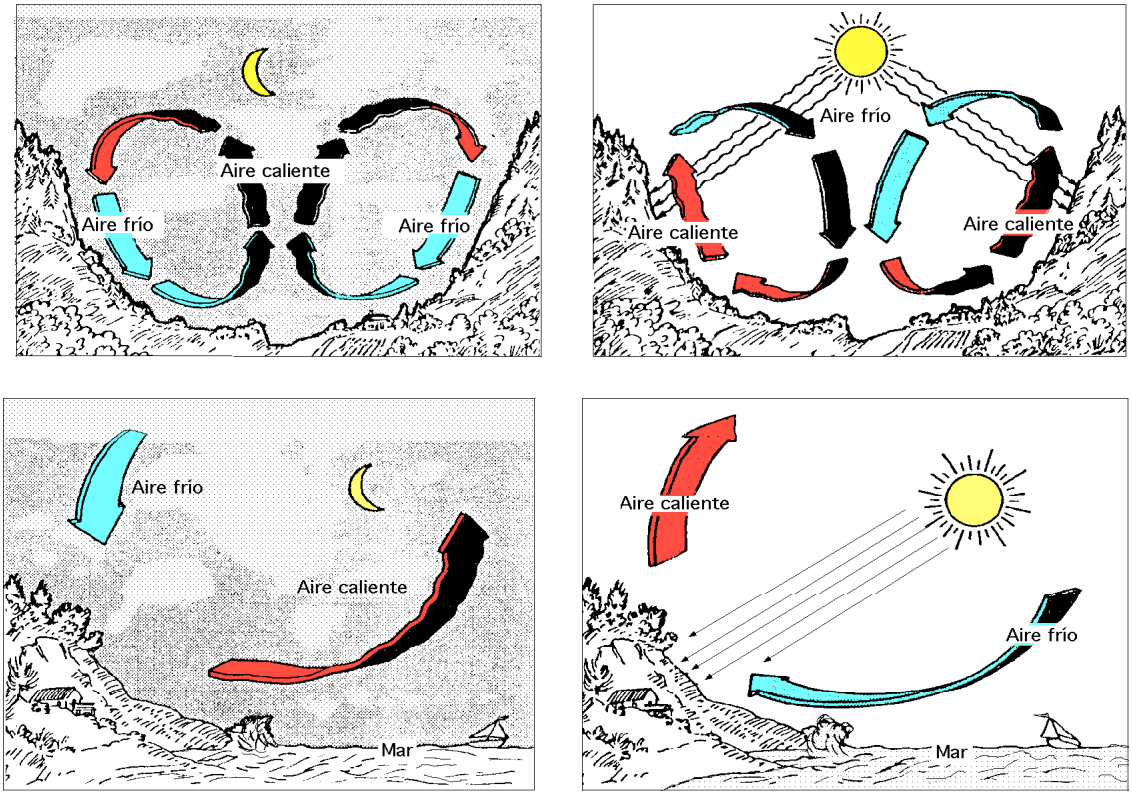


Fig 8.4.- Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas)



Brisas de mar

Fig 8.5.- Vientos particulares y locales

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. 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). hacía 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. 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 8.6, 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.

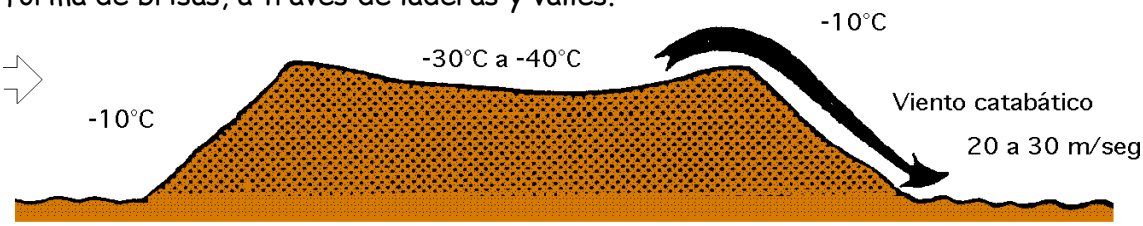


Fig.8.6.- Viento catabático

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.

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 8.7; 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 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. 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 8.8.

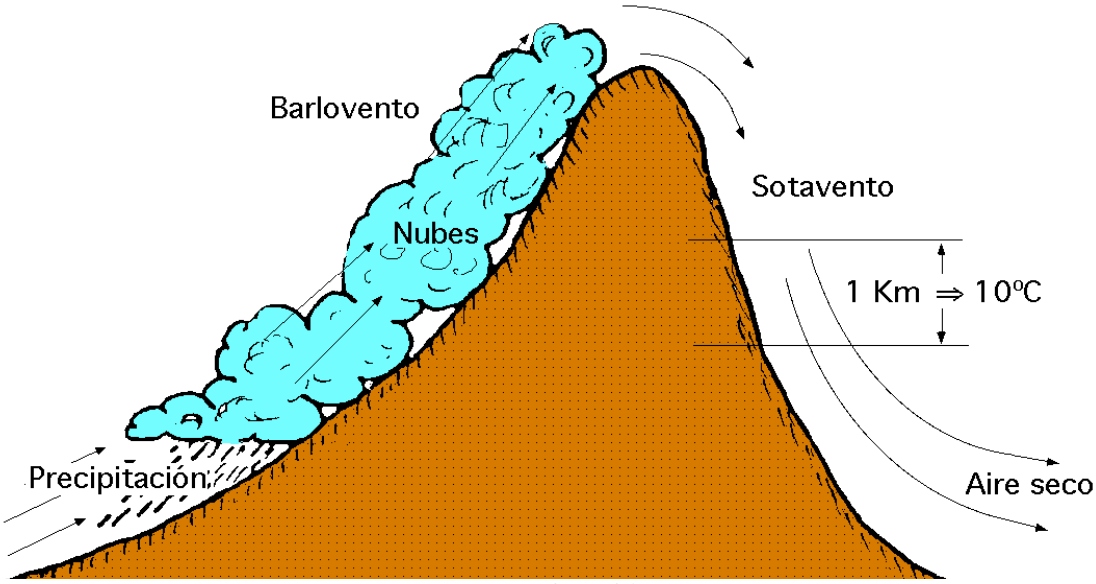


Fig 8.7.- Efecto föhn

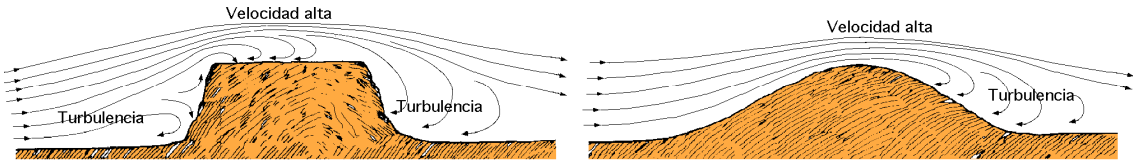


Fig 8.8.- Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento

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 8.9. 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.

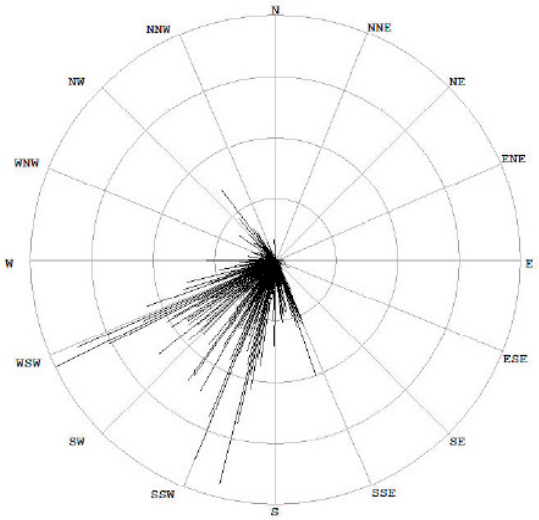


Fig 8.9.- Rosa de los vientos

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.

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.

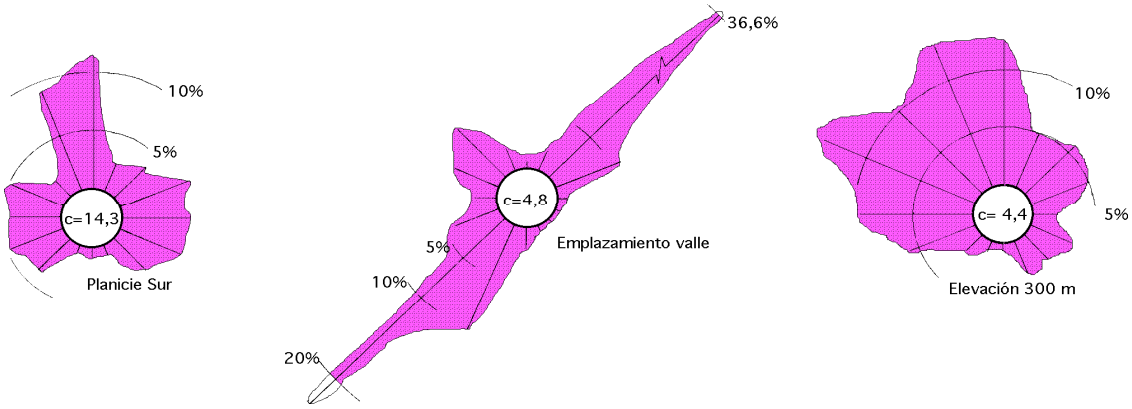


Fig 8.9.- Rosas de viento características para un flujo dominante dentro de un valle, en una planicie sur y por encima de las elevaciones extremas de un valle

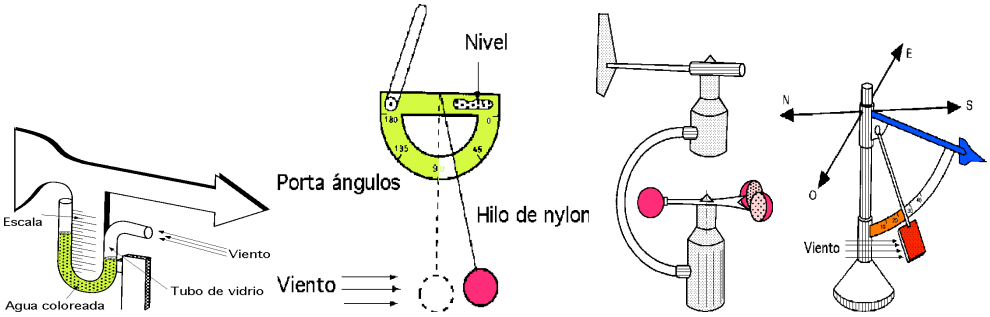


Fig 8.10.- Diversos tipos de anemómetros

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 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* .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 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/m2 año, y en otras puede que no se llegue a los 200 kW/m2 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:

$$vh= v10 (h/10) á$$

en la que *vh* es la velocidad del viento a la altura *h*, *v10* es la velocidad del viento a 10 metros de altura y á es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la Tabla 8.10. En la Fig 8.11, se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann.

Lugares llanos con hielo o hierba	α = 0,08 ÷ 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	α = 0,14
Terrenos poco accidentados	α = 0,13 ÷ 0,16
Zonas rústicas	α = 0,2
Terrenos accidentados o bosques	α = 0,2 ÷ 0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	α = 0,25 ÷ 0,4

Tabla 8.10.- Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno

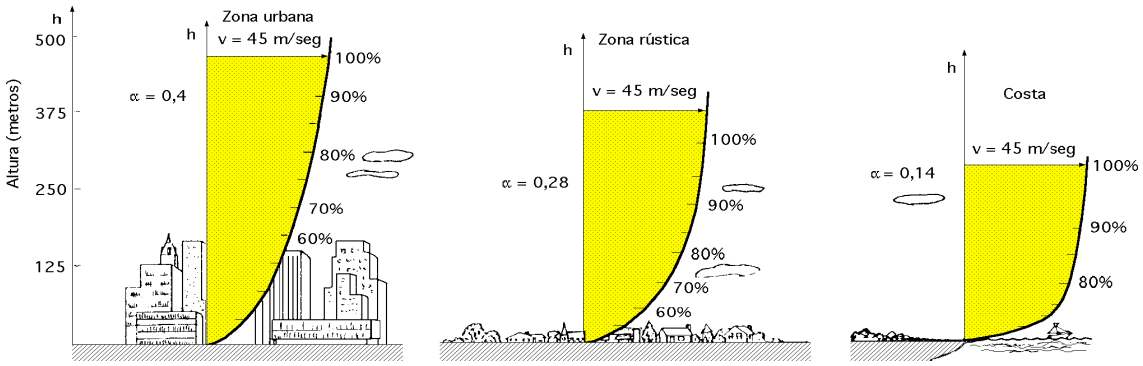


Fig 8.11.- Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann.

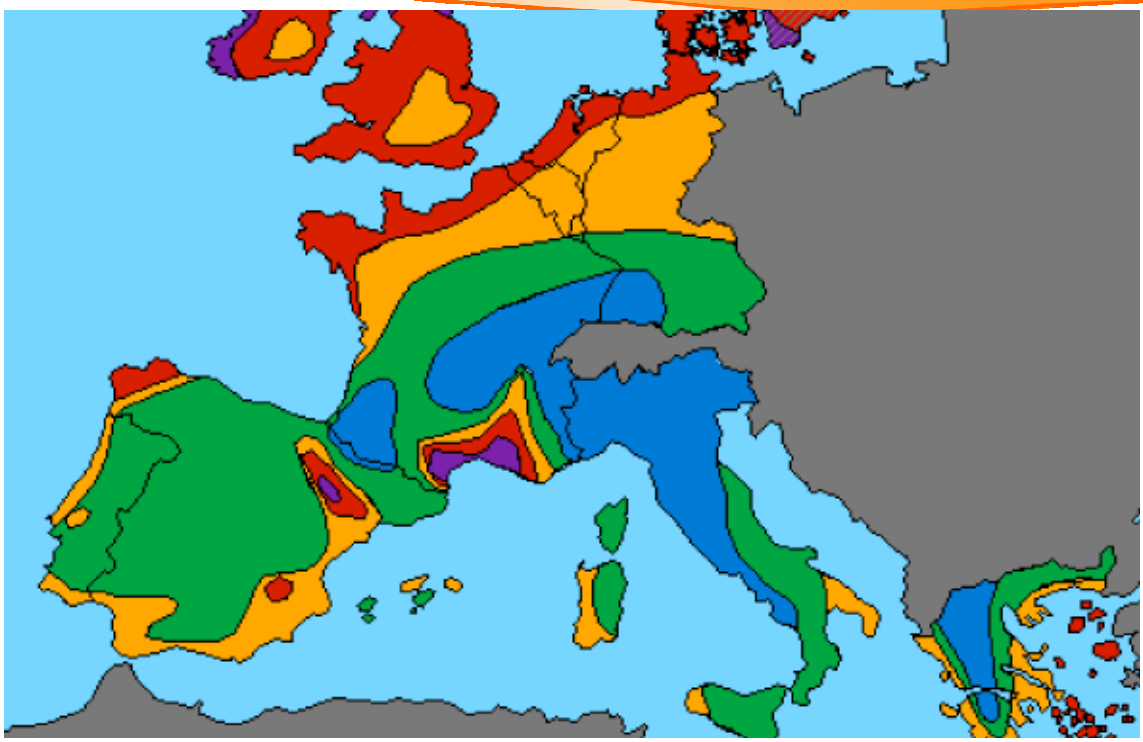
Debido a que las máquinas eólicas arrancan para una determinada velocidad del viento, al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada *vnom*, es natural que los datos a utilizar sean las curvas de *duración de velocidad* que se pueden convertir en curvas energéticas utilizando en el eje de ordenadas magnitudes N = *k* v3* 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 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:

$$\frac{N_{viento}}{A} = I_h = I_{10}\,(\frac{h}{10})^{3a} = I_{10}\,(\frac{v_h}{v_{10}})^3$$



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

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

La *velocidad de conexión* r *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* r *v nom* es la velocidad del viento para 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* r *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.

8.2.2 Energía útil del viento.

El viento es una masa de aire en movimiento. Al considerar la energía cinética asociada:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m_{aire} \cdot v^2$$

E_{cin} : Energía cinetica del viento en [J].
m_{aire}: Masa del aire en [kg].
V : velocidad del viento en (m/s).

De la ecuación anterior se puede definir la potencia del viento como:

$$P\,[W] = \frac{dE_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{aire}}{dt} \cdot v^2$$

P : Potencia del viento en [W].

La potencia es definida respecto a la cantidad de aire (masa), que circula por un determinado sector del espacio. A su vez la masa puede ser expresada por:

$$m_{aire}\,[kg] = \rho \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot V\,[m^3]$$

ρ: Densidad del aire (Kg/m^3)
V: volumen de aire (m^3)

Pero definir la variación de masa en el tiempo conlleva una variación del volumen de aire que circula por el mismo sector:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot \frac{dV_{aire}}{dt}$$

A su vez el flujo está definido como:

$$F\left[\frac{m^3}{s}\right] = \frac{dV_{aire}}{dt}$$

F= Flujo de aire en (m^3/s)

También es válida la siguiente igualdad:

$$F\left[\frac{m^3}{s}\right] = | A\,[m^2] \cdot v\left[\frac{m}{s}\right]$$

A: sección ortogonal al vector de velocidad del aire^2 en [m^2].

Se puede definir la variación de volumen en el tiempo como:

$$\frac{dV_{aire}}{dt} = A\left[m^2\right] \cdot v\left[\frac{m}{s}\right]$$

A 15^{0}C y presión normal la densidad es de 1,225 (Kg/m^3).
En nuestro caso será la superficie cubierta por el aerogenerador.

Sustituyendo la ecuación $\frac{dV_{aire}}{dt} = A\left[m^2\right] \cdot v\left[\frac{m}{s}\right]$ y en la ecuación se $\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot \frac{dV_{aire}}{dt}$ obtiene:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot A\left[m^2\right] \cdot v\left[\frac{m}{s}\right]$$

Luego, sustituyendo $\frac{dm_{aire}}{dt} = \rho \cdot A\left[m^2\right] \cdot v\left[\frac{m}{s}\right]$ en $P\left[W\right] = \frac{dE_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{aire}}{dt} \cdot v^2$,se obtiene la ecuación que define, el comportamiento de la potencia de una masa de aire (viento), que se desplaza con una cierta velocidad por unidad de superficie:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Se puede notar que los factores que definen esta potencia son:

A : superficie (m^2).
ρ densidad del aire (kg/m^3),(varía con la temperatura, la altura y la humedad).
V:velocidad del viento (m/s).

La ecuación expresada, indica la potencia en función del cubo de la velocidad del viento y proporcional a la superficie de la sección. Se puede afirmar que la potencia sigue un comportamiento cuadrático respecto al diámetro del aerogenerador si se considera la velocidad del viento como constante. El gráfico 8.1 muestra la magnitud de potencia de un aerogenerador a dependencia de su diámetro.

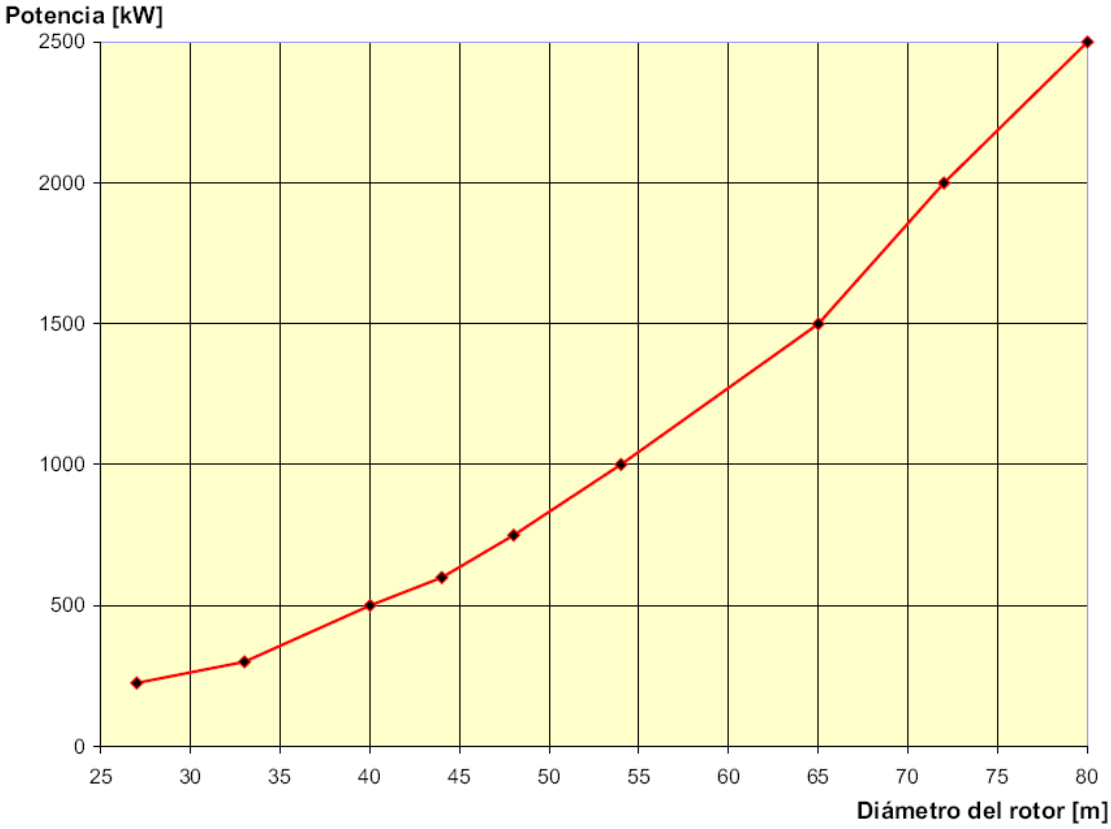
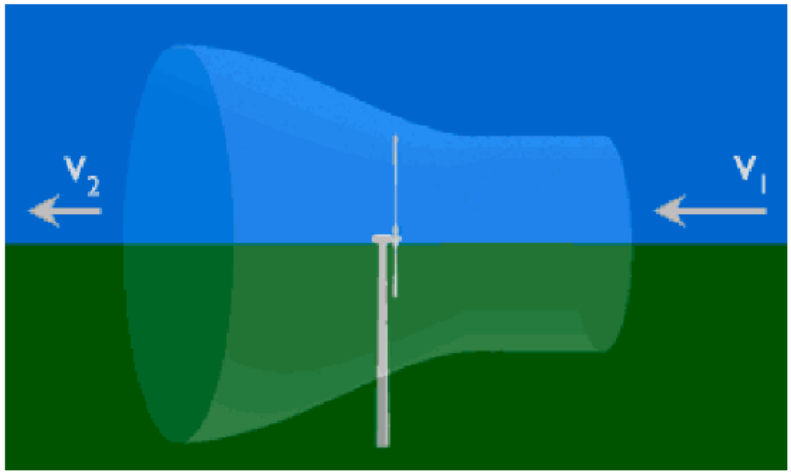


Gráfico 8.1, Potencia Vs diámetro del aerogenerador.

Se aprecia que la potencia crece proporcionalmente con el cubo de la velocidad y al cuadrado respecto al radio del aerogenerador (superficie).

8.3 La ley de Betz y la máxima eficiencia de conversión.

La ley de Betz, fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento, que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores. Betz, define la potencia captada por un obstáculo, que frena el libre movimiento del viento (tal como se ilustra en la figura 8.2). Por clara conveniencia se va a considerar un aerogenerador como obstáculo.



Consideremos, cosa bastante razonable, que la velocidad promedio del viento a través del área del rotor es el promedio de la velocidad del viento sin perturbar antes de la turbina eólica, v 1 , y la velocidad del viento después de su paso por el plano del rotor, v 2 , esto es, (v 1 +v 2)/2. (Betz ofrece una demostración de esto).

La potencia captada por el aerogenerador se define como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un tiempo Δt

$$P_{captado} = \frac{E_{cin_1} - E_{cin_2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right)$$

Otra manera para definir la masa de aire que pasa por el aerogenerador, se logra considerando el promedio de las velocidades antes y después del obstáculo:

$$\frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2}$$

Sustituyendo la masa del aire con lo expresado en la ecuación $P_{captado} = \frac{E_{cin_1} - E_{cin_2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$

$$P_{captado} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right) \cdot \left(v_1 + v_2\right)$$

Luego se define la razón entre la potencia captada sobre potencia del viento definida por la ecuación $P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3$, donde V será V_1:

$$\frac{P_{captado}}{P_{viento}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

Lo anterior permite definir una función $P_{captado}$ / P_{viento} vs. una variable V_2/V_1 tal como se muestra en la gráfica 8.3.

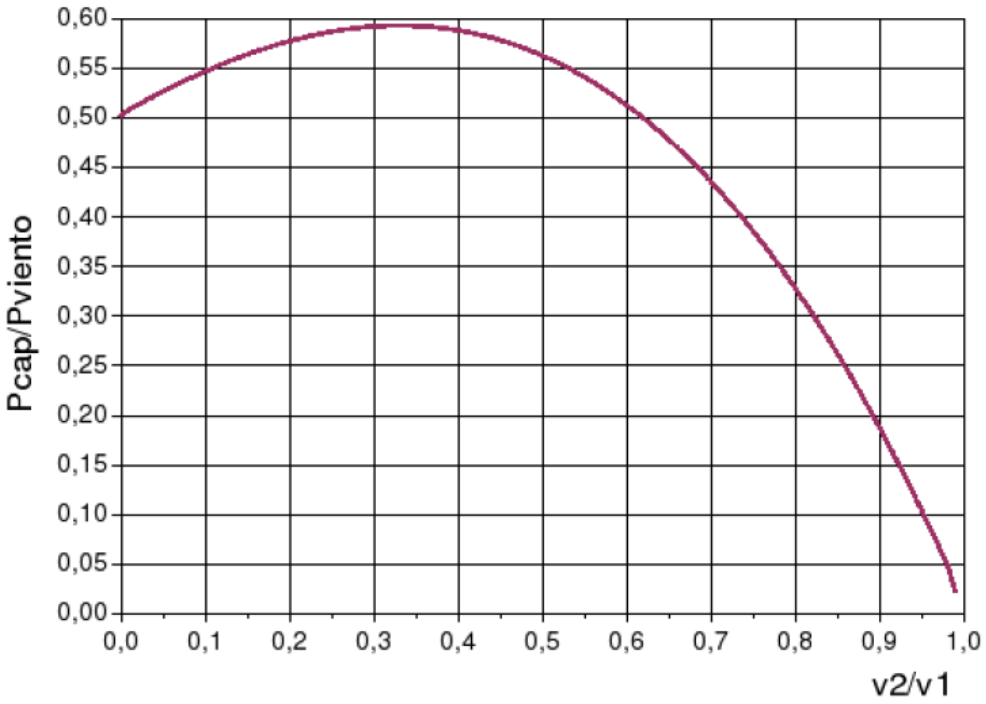


Figura 8.3: Curva de eficiencia de Betz

La curva obtenida anteriormente, define un máximo en v2/v1= 1/3, con una potencia máxima captada de Pcaptada = 16/27 · Pviento.

Como resumen de esto, se define la relación aproximada, con la ecuación que se muestra a continuación y se denomina, Ley de Betz y representa la máxima cantidad de energía del viento, que se puede transformar en energía mecánica rotacional.

$$P_{captado} = 0{,}59 \cdot P_{viento}$$

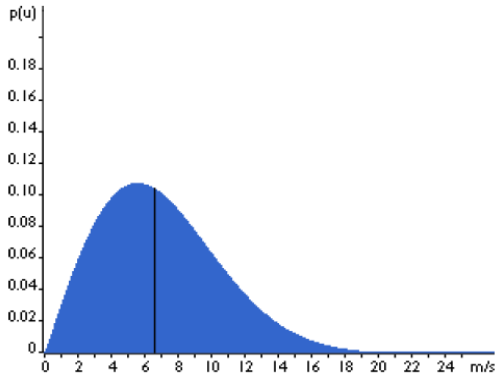
Esta ecuación es un límite teórico ideal, ya que no considera los siguientes factores reales de operación:

- Resistencia aerodinámica de las hélices.
- La compresibilidad del fluido.
- La interferencia de las hélices.

8.4 La distribución de Weibull

La curva de distribución de Weibull, es la que mejor se adapta a los datos estadísticos de velocidades de los vientos, que se pueden registrar en una zona a lo largo de un año.

Tal como se puede apreciar en el gráfico siguiente, esta curva indica con qué probabilidad se puede observar una determinada velocidad de viento dentro del universo de muestras obtenidas. El área bajo la curva vale 1. El viento promedio se define como aquel que corta el área bajo la curva justo en la mitad. Esto significa que el área a la derecha del viento promedio es igual al área de la izquierda.



Curva de distribución del viento Weibull.

Pero, como se explicará a continuación, el viento promedio no nos entrega el promedio de la potencia que este recurso es capaz de aportar. Hay que recodar que la ecuación $\mathbf{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$ define la potencia del viento, en función de su velocidad al cubo. Esto implica que la función de distribución de la potencia del viento tendrá que sufrir un cambio de variable no lineal al obtenerla de la curva de distribución del viento.

Esta alteración altera bastante la curva, que al ser distribución, debe seguir manteniendo la relación del área igual a 1. En consecuencia, la potencia promedio es definida, en base a su curva, respecto a una velocidad de viento distinta de la velocidad de viento promedio. Esto se puede explicar de forma intuitiva considerando que los raros vientos de mayor velocidad pueden aportar una potencia bastante más alta, que vientos más moderados, que se sucedem más a menudo. Todo esto, simplemente por el factor al cubo, que liga la velocidad del viento a la potencia.

8.5 La rugosidad

Es importante cuantificar el efecto de la morfología del territorio circundante al aerogenerador sobre la velocidad del viento. Para esto se define la "rugosidad" expresada por la siguiente ecuación. Esta ecuación, se modifica dependiendo de los obstáculos físicos presentes en el entorno que inciden sobre el desplazamiento del aire.

$$v(z) = v_{ref} \cdot \frac{ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

z = Altura desde el suelo.
V_{ref} = Es la velocidad media a una altura z_{ref}.
Z_0 = Es la longuitud de la rugosidad, ver tabla adjunta.

Tabla de rugosidad y paisaje :

Clase de rugosidad	Tipo de paisaje
0	Superficie del agua
0.5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos
1.5	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 1250[m])
2	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 500[m])
2.5	Agrícola con muchas casas, arbustos y planta(dist. 250[m])
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola
3.5	Ciudades mas grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Coeficientes de rugosidad.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad [m]	índice de energía(%)
0	0.0002	100
0.5	0.0024	73
1	0.03	52
1.5	0.055	45
2	0.1	39
2.5	0.2	31
3	0.4	24
3.5	0.8	18
4	1.6	13

8.6 Rendimiento de los aerogeneradores.

Como se vio en la sección 8.2, y en particular en la ecuación general $P_{captada}$, no se puede convertir toda la energía cinética del viento, en energía mecánica rotacional.

Este límite se ve inicialmente disminuido por varios elementos, que conllevan distintas pérdidas en el proceso, de conversión de la energía eólica en energía eléctrica.

Inicialmente se puede expresar, lo anterior mente descrito con la siguiente ecuación:

$$P_{mec} = C_p \cdot P_{viento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

, donde C_p no puede superar el límite de Betz. Y adicionalmente:

$$P_{el} = C_e \cdot P_{mec} = C_e \cdot C_p \cdot P_{mec} = C_e \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

, donde C_e es la eficiencia (aproximadamente un 90%), de la máquina eléctrica. C_p no es constante y varía con la velocidad del viento, la velocidad angular de la turbina y con el ángulo de ataque de las hélices, para los aerogeneradores que poseen dichas características. Y todo lo anteriormente descrito, depende fuertemente del bloqueo, que el aerogenerador genera sobre el flujo de aire.

Una manera más útil para determinar la eficiencia del aerogenerador es utilizar la relación de velocidad tangencial o TSR4. Es un término que sustituye al

número de revoluciones por minuto de la turbina; sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

Y se define con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{r_{aero} \cdot \omega_{aero}}{v_{viento}}$$

λ = TSR (tip speed ratio)
r_{aereo} = Radio aerogenerador (m)
$ù_{aereo}$ = Velocidad angular de la turbina (rad/s)
v_{viento} = Velocidad del viento (m/s)

El TSR es una buena manera para analizar, el comportamiento del C_p, de cada tipo de aerogenerador. Un resultado, de lo anteriormente comentado, se puede observar en la figura C_p vs TSR, donde compiten los modelos más exitosos, tal como el Darrieus y los HAWT5 tradicionales.

Los HAWT y los Darrieus tienen la característica, de alcanzar una velocidad rotacional muy elevada y esto hace que la variable $ù_{aereo}$, se desligue de la velocidad del viento, e inclusive que la supere en su componente tangencial. Por esto logran TSR > 1. Para otros VAWT es difícil lograr una velocidad rotacional independiente y superior a la que impone el viento. Pero esto no implica, que se puedan lograr buenos C_p con bajos TSR. Por ejemplo, se podría pensar en mejorar la estructura del Savonius, para que la curva, que se muestra a continuación, se desplace un poco hacia arriba alcanzando nuevos valores de C_p. Justamente lo anterior, es una de las metas que se han pretendido alcanzar la construcción de nuestro prototipo el aerogenerador VentCat.

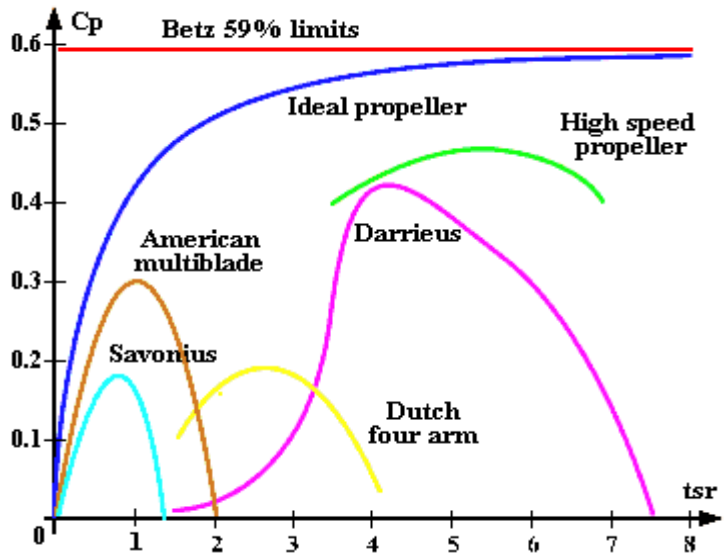
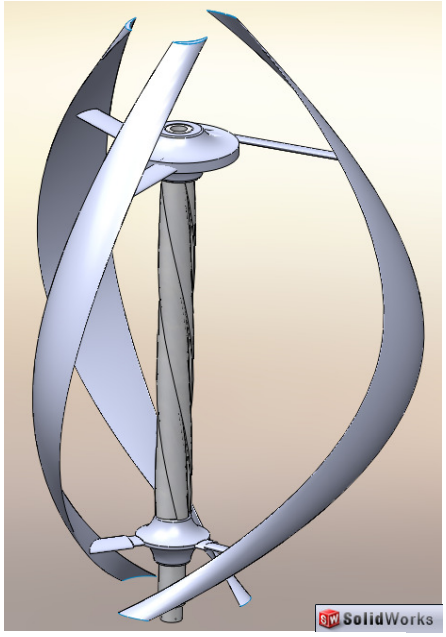


Figura C_p vs TSR.

9 CAPITULO 5

9.1 El prototipo.



Modelo 3D (solidworks 2008)

Las Características Generales y específicas del prototipo son:

- Clase de Aerogenerador (VentCat): Para vientos fuertes, Clase IA
- Potencia Nominal: 10 kW
- Velocidad viento (conexión-desconexión): 2.4 - 28 m/seg
- Temperatura Externa de Operación: -20 / 65°C

Tipo:

De velocidad variable con control de paso, caja multiplicadora y generador de inducción de rotor bobinado, con doble alimentación ("DFIG")

Rotor

- Número de Palas: 3 palas diseño VentCat.
- Diámetro del Rotor: 4 m.
- Orientación del Rotor: no precisa sistema de posicionamiento.
- Velocidad del rotor (variable): 10,5 - 30 rpm
- Control de paso Individual

• Eje central tubular de carbono reforzado, con aspas autodeformables y con posibilidad de una única estructura o con tres tramos bridados, de acero al carbono.
• Altura del eje Central: 6 m
• Diámetro inferior: 1 m
• Diámetro medio: 4 m
• Diámetro superior: 1 m

Control de Potencia

• Velocidad variable con control de paso, generador de inducción con rotor bobinado y doble alimentación.

Sistema de Control

• Por medio de un PLC (Controlador Lógico Programable), incluye sistema de control y monitoreo remoto, con SCADA.

Caja Multiplicadora

• Una etapa planetaria y dos etapas con engranajes cilíndricos helicoidales.

Generador

• Asincrónico trifásico doblemente alimentado, con Convertidor de Frecuencia, tecnología IGBT, modulación ancho de pulso.

10 LAS HELICES

El viento está compuesto por partículas de aire en movimiento; cuando la masa de aire esté conformada por filetes y sobrepuestos, perfectamente individualizados, se dice que el movimiento del mismo es laminar, mientras que si los filetes de aire se entrecruzan y no conservan su individualidad, se dice que el movimiento es turbulento; éste es el caso más general que acontece en el viento. Si en cada punto de una masa de aire en movimiento turbulento se miden las velocidades instantáneas, se observa que estas varían en magnitud y en dirección sin ninguna regularidad, pero no suelen apartarse mucho de un valor medio. Los movimientos desordenados del aire a nivel macroscópico se llaman turbulencias, que pueden influir en masas de aire importantes. Cuando el viento se encuentra con un obstáculo, su movimiento empieza a ser perturbado y a hacerse irregular a una cierta distancia del mismo.

Una vez realizada la pequeña introducción del viento en su régimen turbulento y laminar, continuaremos definiendo, los cálculos y conocimientos mínimos necesarios que hemos aplicado en el diseño de las hélices de nuestro aerogenerador vertical VentCat.

A continuación se explicara las fuerzas que se aplican sobre un perfil, como actúa el viento respecto a un perfil y su rendimiento, un modelo teórico de Betz, etc.

Se incluirá los planos con las medidas básicas de nuestra hélice y la representación de los esfuerzos y rendimiento de la hélice mediante programas de elementos finitos.

10.1 FUERZAS SOBRE UN PERFIL

Un objeto situado en el seno de una corriente de aire presenta una resistencia al avance deformando los filetes fluidos; esto depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del viento, Fig 10.1. Al estudiar los efectos de la resistencia del aire sobre una placa plana, se observa que *la* resultante R de las fuerzas aplicadas a la placa es un vector cuyo punto de aplicación es su centro aerodinámico o centro de empuje, siendo su dirección perpendicular a la placa, su sentido el del viento, y su intensidad proporcional a la superficie S expuesta y al cuadrado de la velocidad del viento *v*, en la forma:

$$R = C_w \, \rho \, \frac{S \, v^2}{2} = k \, S \, v^2$$

En la que:

- k es un coeficiente que depende del ángulo ά de incidencia, de las unidades elegidas y de la turbulencia del movimiento.
- Cw es el coeficiente de resistencia (penetración).
- ñ es la densidad del aire.
- S la sección frontal del perfil.

Si el ángulo que forma el plano de la placa con la dirección del viento es grande, existe una sobrepresión en la parte delantera de la placa y una depresión en su parte posterior de carácter turbillonario, Fig 10.2; si el ángulo de incidencia es pequeño, la sobrepresión aparece en la parte inferior de la placa y la depresión por encima, por lo que aparece una fuerza que tiende a elevarla, Fig 10.3, conocida como fuerza de sustentación o de elevación.

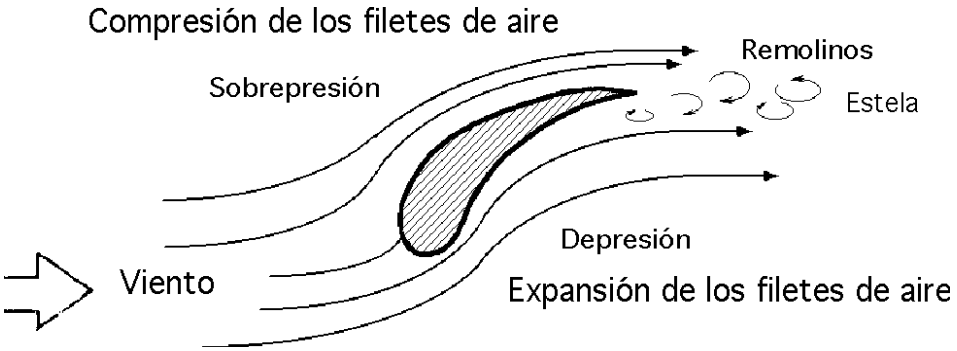


Fig 10.1.- Perfil situado en el seno de una corriente fluida

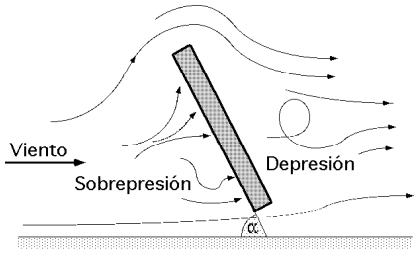


Fig 10.2

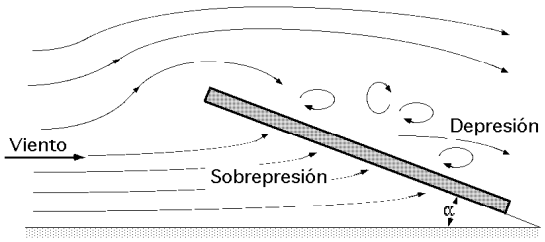


Fig 10.3

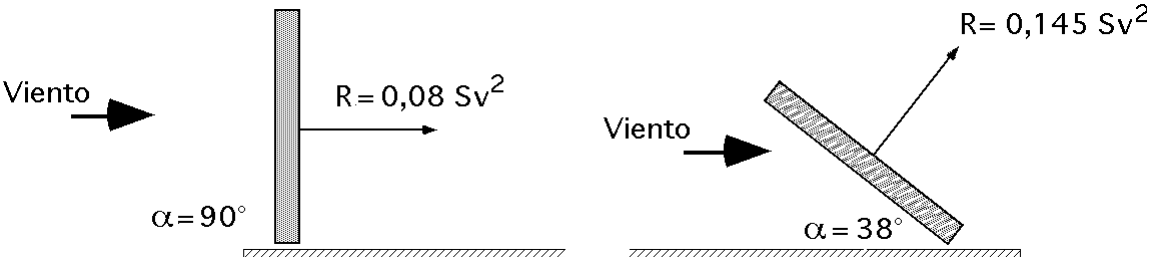


Fig 10.4.- Angulos de ataque y efecto sobre perfiles

En la Fig 10.4 se representa un perfil placa plana con dos tipos de inclinación; se indican los valoresde R, observándose que, contra más pequeño sea el ángulo á de inclinación, la resultante R será mayor.

Para perfiles planos (fijos) de longitud L paralelos a la velocidad *v* del viento, el valor del nº de Reynolds y el coeficiente de penetración son:

$$Re = \frac{v\,L}{\nu} \quad ; \quad C_w = \begin{cases} \text{Régimen laminar:} \;\; C_w = \dfrac{1{,}328}{\sqrt{Re}} \;\; ; \;\; Re < 10^5 \\ \text{Régimen turbulento:} \begin{cases} C_w = \dfrac{0{,}074}{Re^{1/5}} \;\; ; \;\; 10^5 < Re < 10^7 \\ C_w = \dfrac{0{,}455}{(\log Re)^{-2{,}58}} \;\; ; \;\; Re > 10^7 \end{cases} \end{cases}$$

Para otros perfiles no planos con su eje de simetría paralelo a la dirección del viento, se indica en la Fig 10.5 el valor del coeficiente Cw.

Para un perfil diseñado en forma aerodinámica se definen dos zonas que son:

a) El extradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en depresión.
b) El intradós, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en sobrepresión.

Si la placa no está perfilada convenientemente, las turbulencias originadas sobre el extradós disminuyen la energía cinética del aire. Si se permite que la placa se desplace bajo el efecto de la fuerza ejercida por el viento, producirá un cierto trabajo recuperable en forma de energía mecánica; contra menor sea la turbulencia, mayor será este trabajo.

10.2 Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles fijos.

La componente $\vec{R}$ en la dirección del viento es la fuerza de arrastre $\vec{F}_{arr}$ mientras que la componente $\vec{R}$ de perpendicular a la fuerza de arrastre es la fuerza ascensional $\vec{F}_{asc}$.

$$F_{arr} = R\ sen\ \alpha = k_x\ S\ v^2$$
$$F_{asc} = R\ cos\ \alpha = k_y\ S\ v^2$$

La fuerza $\vec{R}$ se considera normal a la cuerda del perfil, que es al mismo tiempo, su longitud característica. El empuje ascensional aumenta a medida que α disminuye. La cuerda se considera desde el borde de ataque del perfil, al borde de salida posterior.

Si la forma del perfil no es plana, se puede descomponer R en función de dos tipos de coeficientes, kx de arrastre y ky ascensional, siendo el eje *x* paralelo a la dirección del viento, Fig. 10.6.

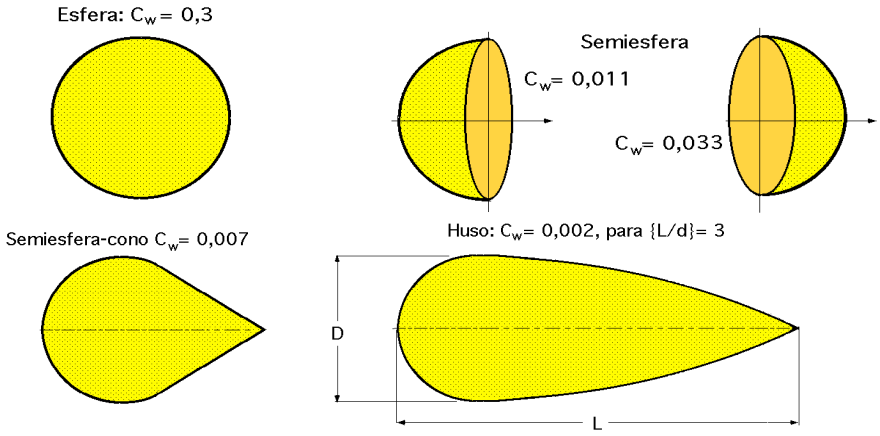


Fig 10.5.- Coeficiente Cw para algunos perfiles semiesféricos

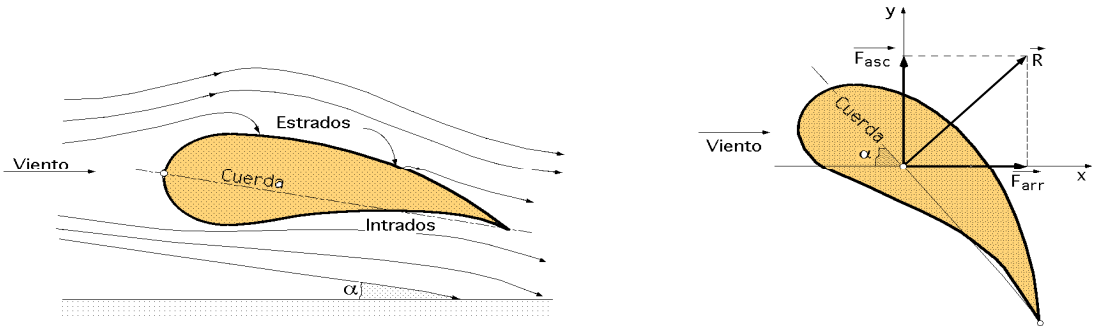


Fig 10.6.- Fuerzas de arrastre y ascensional en un perfil fijo.

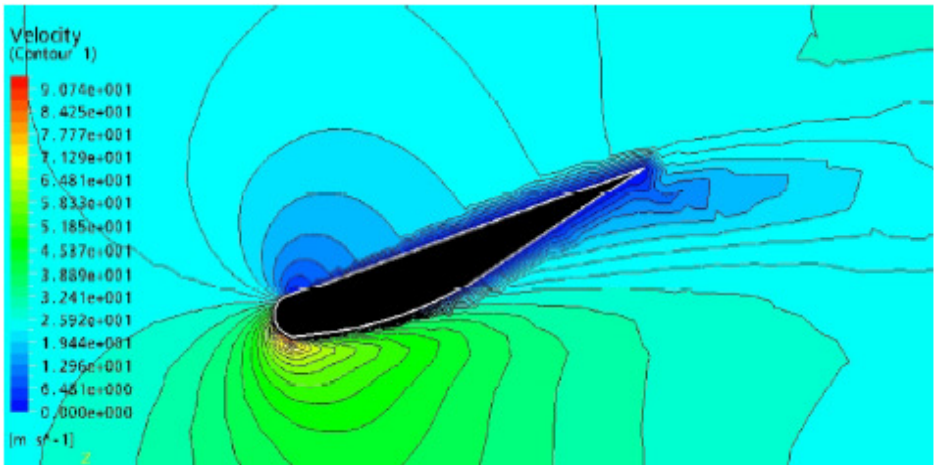


Fig 10.7a.- Distribución de velocidades sobre un perfil con áataque= 12° y áresultante= 3,57°

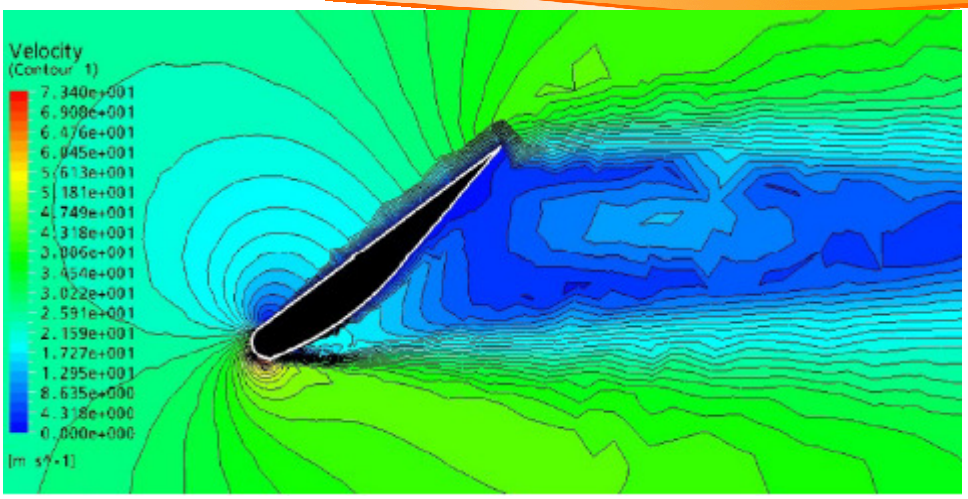


Fig 10.7b.- Distribución de velocidades sobre perfil con átaque= 30° y área resultante= 25,77°

Polar de un perfil.- Se define la esbeltez de un perfil para un valor dado de α. como la relación entre los coeficientes ky y kx, en la forma:

$$Esbeltez:\ f = \frac{k_y}{k_x} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{tg\ \alpha}$$

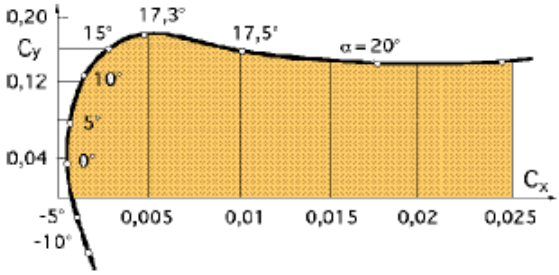


Fig 10.8 Polar de un perfil

La curva *Cy = f(Cx)*, Fig 10.7, se denomina polar del perfil y se determina haciendo mediciones de los valores de *Farr* y *Fasc* mediante una balanza de torsión en un túnel de viento, para diversos valores del ángulo de ataque α. .

10.3 Acción del viento sobre el perfil. Potencia útil y rendimiento.

Palas perfiladas: El elemento básico nuestra aeroturbina es el rotor, que está formado por 3 hélices o palas, (su teoría de cálculo elemental es análoga a la de las hélices de avión). En el rotor están situadas las palas, cuyo número en nuestro caso es 3; las 3 palas tiene un perfil que tiene forma aerodinámica; éstos perfiles tienen un extremo romo, que es el borde de ataque mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida.

Durante el diseño del proyecto, se observo y realizo pruebas, con distintos perfiles que según sus nombres y según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós y el extradós son convexos y plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos. La mayoría de los tipos de perfiles utilizados en las máquinas eólicas rápidas, son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría.

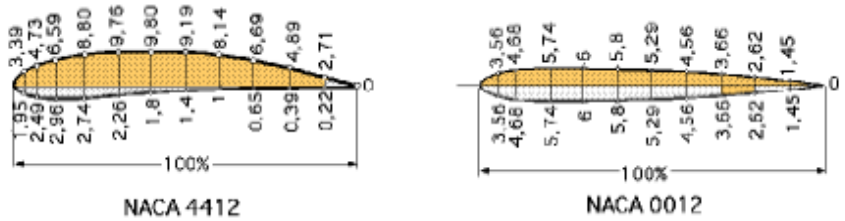


Fig 10.9 perfiles NACA

El Perfil utilizado en nuestro aerogenerador VentCat, es del tipo NACA 4412. El significado de la nomenclatura NACA es:

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en % , proporcionando la máxima curvatura.

- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura.

- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo del perfil en % respecto a la cuerda.

El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media Ejemplo: El perfil NACA2415, tiene un 2% de altura máxima de la línea media, situada a un 40% del borde de ataque, con un espesor relativo del 15%.

Los perfiles NACA44XX tienen el intradós con parte convexa, por lo que son de construcción más compleja y al igual que los anteriores el XX indica el máximo espesor del perfil.

Ángulos de la cuerda:

La pala de una hélice de un aerogenerador eólico es una pala perfilada que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Las fuerzas que actúan sobre un elemento de longitud de pala dx en rotación, se

obtienen estudiando la acción del viento relativo que recibe la pala de velocidad $\vec{c}$ (viento aparente o estela), que se puede considerar suma del viento real de Velocidad $\vec{v}$, y de un viento originado por el movimiento de rotación de la pala, de velocidadr $\vec{u}$, Fig 10.10.

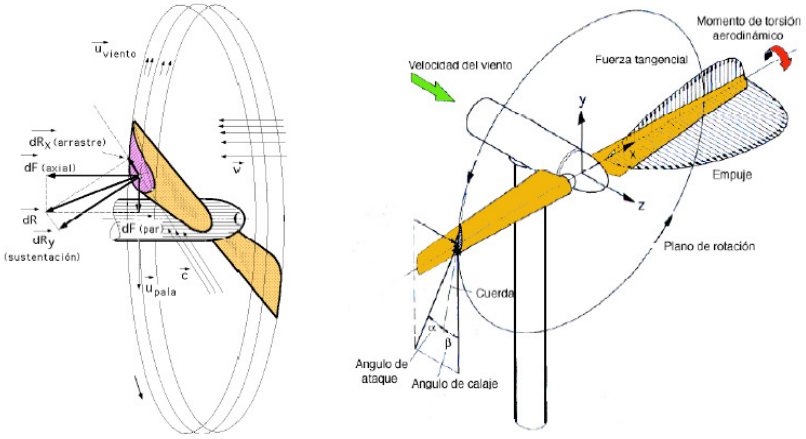


Fig. 10.10, Fuerzas que actúan sobre una hélice

Si se trata de una hélice de avión (propulsiva), como el viento incidente es un viento relativo debido al desplazamiento del avión, existe una diferencia en la posición de la pala respecto a la del aerogenerador, como se indica en las Fig 10.11 y 10.12, en las que:

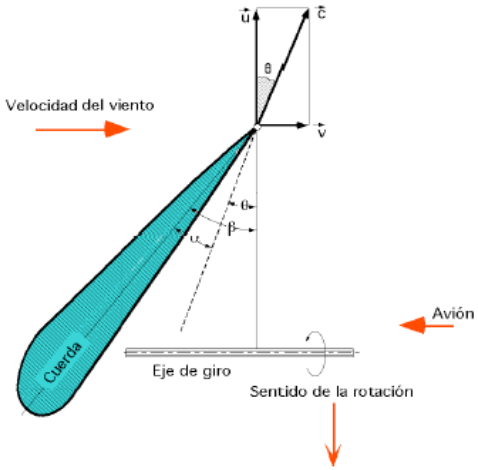


Fig. 10.11, Pala de helice de un avión

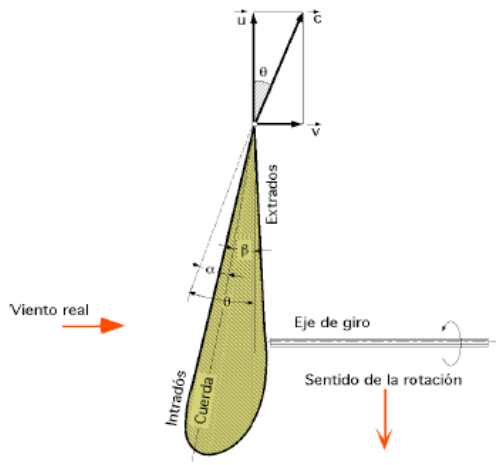


Fig. 10.12, Pala helice de aerogenerador

β es el ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación; es el ángulo de calaje o de inclinación (cuerda/u).

α *es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento* $\vec{c}$ *(ángulo de incidenciao de ataque).*

θ *es el ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque; se conoce como ángulo aparente del viento.*

Se tiene que:

- B= θ - **α**, para una hélice de aerogenerador
- B= θ **+ α, para una hélice de un avión**
- $\vec{u}$ es la velocidad del viento creada por el desplazamiento(giro)
- $\vec{v}$ es la velocidad del viento real (velocidad nominal)

El *cabeceo* es una medida de la tendencia de un perfil de ala a bajar su borde de ataque en una corriente frontal del viento, dato importante a la hora de diseñar la estructura de las palas, mecanismos de hélices, etc; algunos perfiles son neutros porque no tienen momento de cabeceo, como es el caso del VentCat, que gracias al diseño helicoidal de las hélices, se elimina el cabeceo.

Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles móviles.- La fuerza que actúa en el centro aerodinámico de un elemento de pala en rotación, de superficie frontal elemental dS, (proyección del perfil sobre la dirección del viento aparente), viene dada por dR, Fig 10.13. Esta fuerza se puede descomponer a su vez en otras dos, tanto a la entrada del viento en el perfil móvil, como a la salida.

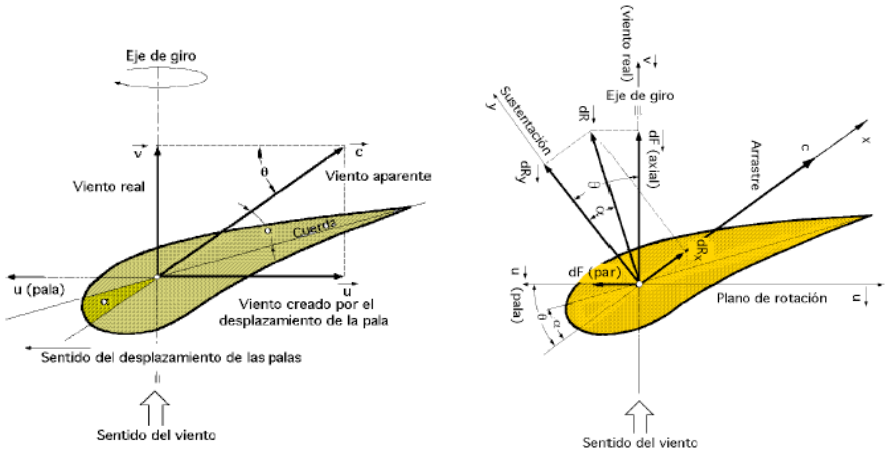


Fig. 10.13, Velocidades y Fuerzas que actúan sobre el perfil de la helice del VentCat.

Para el perfil VentCat el diseño de la pala diferencial en rotación dS, y de acuerdo con la Fig 10.13 se puede extraponer la siguiente formulación:

Fuerza de arrastre: $dR_x = dF_{arr} = \frac{1}{2} C_x \rho c^2 dS$

Fuerza ascensional: $dR_y = dF_{asc} = \frac{1}{2} C_y \rho c^2 dS$

Cx, es el coeficiente de arrastre

Cy es el coeficiente ascensional, que dependen del tipo de perfil y del ángulo de incidencia teniendo en cuenta el número de Reynolds.

dS, es el área del elemento diferencial de la pala que se ofrece al viento, de valor (*L dr*) siendo L la longitud característica del perfil, igual a la longitud de su cuerda.

Los coeficientes Cx y Cy están relacionados por el coeficiente aerodinámico total CT de la forma:

$$C_T^2 = C_x^2 + C_y^2$$

Fuerzas de par y axial.- Si se proyectan las fuerzas de arrastre o de resistencia dRx y de empuje ascensional o sustentación dRy, sobre el plano de rotación, se obtiene una fuerza útil, dFpar, (paralela a $\vec{u}$), que hace girar la hélice, y otra fuerza perpendicular, dFaxial, (fuerza de empuje del viento sobre el rotor), que se compensa por la reacción del soporte del eje del rotor de la hélice, de la forma:

$$dF_{par} = dR_y \, sen\ \theta - dR_x \cos\ \theta = \frac{1}{2}\rho c^2\, dS\,(C_y\, sen\ \theta - C_x \cos\ \theta) =$$
$$= \frac{1}{2}\rho \frac{v^2}{sen^2\theta}\, dS\,(C_y\, sen\ \theta - C_x \cos\ \theta) = \frac{\rho v^2}{2}(1 + cotg^2\theta)\, dS\,(C_y\, sen\ \theta - C_x \cos\ \theta)$$

$$dF_{axial} = dR_y \cos\ \theta + dR_x\, sen\ \theta = \frac{1}{2}\rho c^2\, dS\,(C_y \cos\ \theta + C_x\, sen\ \theta) =$$
$$= \frac{1}{2}\rho \frac{v^2}{sen^2\theta}\, dS\,(C_y \cos\ \theta + C_x\, sen\ \theta) = \frac{\rho v^2}{2}(1 + cotg^2\theta)\, dS\,(C_y \cos\ \theta + C_x\, sen\ \theta)$$

Siendo θ el ángulo que forma la dirección del viento aparente, entre los vectores velocidad $\vec{v}$ y $\vec{u}$.

Los valores que intervienen en el cálculo de estos elementos diferenciales son función de las velocidades en cada zona y, por tanto, del ángulo de ataque **α**, ya que conocido éste, es posible obtener los valores de Cx y Cy en función de él, Como:

$$C_y \cos\ \theta - C_x\, sen\ \theta = \left| tg\ \alpha = \frac{C_x}{C_y} \right| = C_y\,(sen\ \theta - \frac{C_x}{C_y} \cos\ \theta) = C_y\,(sen\ \theta - tg\ \alpha \cos\ \theta) = C_y \frac{sen\,(\theta - \alpha)}{\cos\ \alpha}$$

$$C_y \cos\ \theta + C_x\, sen\ \theta = \left| tg\ \alpha = \frac{C_x}{C_y} \right| = C_y\,(\cos\ \theta + \frac{C_x}{C_y} sen\ \theta) = C_y\,(\cos\ \theta + tg\ \alpha\, sen\ \theta) = C_y \frac{\cos\,(\theta - \alpha)}{\cos\ \alpha}$$

Resulta:

$$\begin{cases} dF_{par} = \dfrac{1}{2}\rho v^2\, dS\, C_y \dfrac{sen\,(\theta - \alpha)}{sen^2\theta \cos\ \alpha} \\ dF_{axial} = \dfrac{1}{2}\rho v^2\, dS\, C_y \dfrac{\cos\,(\theta - \alpha)}{sen^2\theta \cos\ \alpha} \end{cases}$$

La fuerza de sustentación aumenta con el ángulo de ataque **α** hasta un máximo y luego disminuye. Como $\vec{u}$ varía con el radio *r*, $\vec{c}$ también variará, por lo que el ángulo B deberá variar a lo largo de la pala, y de ahí que las hélices se tengan que construir alabeadas.

Par motor.- Para nuestro tipo de aerogenerador el par motor se obtiene a partir de la fuerza dopar:

$$dC = r\, dF_{par} = \frac{r}{2}\, \rho v^2\, dS\, (1 + cotg^2\theta)\, (C_y\, sen\ \theta - C_x\, cos\ \theta)$$

El rendimiento aerodinámico de las hélices.- La potencia útil generada por un elemento diferencial de pala es: d Nútil= dFpar u , y la potencia consumida por el viento: d Nviento= dFaxial v, por lo que se puede definir el rendimiento aerodinámico ηaerod como la relación entre la potencia útil generada por la pala y la consumida por el viento, en la forma:

$$\eta_{aerod} = \frac{dF_{par}\, u}{dF_{axial}\, v} = \frac{dR_y\, sen\ \theta - dR_x\, cos\ \theta}{dR_y\, cos\ \theta + dR_x\, sen\ \theta}\, \frac{u}{v} = \frac{sen\,(\theta - \alpha)}{cos\,(\theta - \alpha)}\, \frac{u}{v} = tg\,(\theta - \alpha)\, \frac{u}{v} =$$

$$= \frac{(dR_y/dR_x) - cotg\ \theta}{(dR_y/dR_x)\, cotg\ \theta + 1}\, \frac{u}{v} = \left| \begin{array}{l} f = \frac{1}{\mu} = \frac{dR_y}{dR_x} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{tg\ \theta} \\ TSR = \frac{u_{máx}}{v} = cotg\ \theta_{máx} = \frac{R\, w}{v} \end{array} \right| = \frac{1 - \mu\, cotg\ \theta}{1 + \mu\, tg\ \theta} = \frac{f - cotg\ \theta}{f + tg\ \theta}$$

Teniendo en cuenta la esbeltez *f*, Fig10.13, y del TSR (Tip-Speed-Ratio) definido como la relación entre la velocidad periférica de la pala $\vec{u}$ y la del viento $\vec{v}$, sin intervención de velocidades inducidas, siendo un concepto que en los aerogeneradores sustituye al número específico de revoluciones.

La relación entre la velocidad angular *w* para un radio *r* cualquiera y el ángulo θ, es:

$$SR = \frac{u}{v} = cotg\ \theta = \frac{r\, w}{v} = \frac{\pi\, r\, n}{30\, v}$$

Para hallar la potencia máxima se puede partir de la expresión de la potencia útil de la forma:

$$dN_{útil} = u\ dF_{par} = u\,(dR_y\ sen\ \theta - dR_x\ cos\ \theta) = \frac{u}{2}\rho c^2\ dS\,(C_y\ sen\ \theta - C_x\ cos\ \theta) =$$

$$= \frac{u}{2}\rho v^2 dS\ (cotg^2\theta + 1)\,(C_y sen\ \theta - C_x cos\ \theta) = \frac{\rho v^3 dS}{2}\ cotg\ \theta\,(cotg^2\theta + 1)\,(C_y sen\ \theta - C_x cos\ \theta)$$

Que en la práctica significa que θ < 20°, por lo que:

$$tg\ \theta = sen\ \theta\ \ ;\ \ cos\ \theta \approx 1\ \ ;\ \ cotg\ \theta \approx \frac{1}{sen\ \theta}$$

Quedando la expresión inútil, de la siguiente forma:

$$dN_{útil} = \frac{\rho v^3 dS}{2}\ \frac{1}{sen\ \theta}\ (cotg^2\theta + 1)\,(C_y sen\ \theta - C_x) = \frac{\rho v^3 dS}{2}\{C_y(cotg^2\theta + 1) - C_x \frac{cotg^2\theta + 1}{sen\ \theta}\} =$$

$$= \frac{\rho v^3 dS}{2}\left(\frac{C_y}{sen^2\theta} - \frac{C_x}{sen^3\theta}\right) = \frac{\rho v^3 dS}{2}\,(C_y cotg^2\theta - C_x cotg^3\theta)$$

La condición de potencia máxima desarrollada por el viento correspondiente al elemento de superficie de pala dS, se calcula derivando la expresión de la *dNútil* respecto de è, obteniéndose:

$$2\ C_y\ cotg\ \theta - 3\ C_x\ cotg^2\theta = 0$$

Cuyas soluciones son:

$$cotg\ \theta = 0$$

$$2\ C_y = 3\ C_x\ cotg\ \theta \quad \Rightarrow \quad cotg\ \theta = \frac{2\ C_y}{3\ C_x} = \frac{2\,f}{3} = \frac{2}{3\ \mu}$$

Resultando:

$$dN_{útil\ máx} = \frac{\rho v^3\ dS}{2}\left(C_y \frac{4\ C_y^2}{9\ C_x^2} - C_x \frac{8\ C_y^3}{27\ C_x^3}\right) = \frac{2\ \rho v^3\ dS}{27}\ \frac{C_y^3}{C_x^2}$$

El par motor dC correspondiente al elemento de superficie de pala dS se ha calculado anteriormente como:

$$dC = r\ dF_{par} = \frac{r}{2}\rho v^2\ dS\,(1 + cotg^2\theta)\,(C_y\ sen\ \theta - C_x\ cos\ \theta)$$

También se puede obtener a partir de la *dNútil*, de la forma siguiente:

$$dC = \frac{dN_{útil}}{w} = \frac{dN_{útil}}{u} r = \frac{dN_{útil}}{v \cot g\, \theta} r = \frac{r\, \rho\, v^2\, dS}{2} (C_y \cot g\, \theta - C_x \cot g^2 \theta)$$

que se anularía

$$\cot g\, \theta = \frac{C_y}{C_x}$$

La condición de par motor máximo se obtiene igualando a cero la anterior:

$$C_y = 2\, C_x \cot g\, \theta \quad \Rightarrow \quad \cot g\, \theta = \frac{C_y}{2\, C_x}$$

$$dC_{máx} = \frac{r\, \rho\, v^2\, dS}{2} \left(\frac{C_y^2}{2\, C_x} - \frac{C_x\, C_y^2}{4\, C_x^2} \right) = \frac{r\, \rho\, v^2\, dS}{8} \frac{C_y^2}{C_x}$$

La velocidad angular máxima wmáx es:

$$w_{máx} = \left(\frac{dN}{dC} \right)_{máx} = \frac{\frac{2\, \rho\, v^3\, dS}{27} \frac{C_y^3}{C_x^2}}{\frac{r\, \rho\, v^2\, dS}{8} \frac{C_y^2}{C_x}} = \frac{16}{27} \frac{v}{r} \frac{C_y}{C_x} = \frac{\pi\, n_{máx}}{30}$$

En los aerogeneradores de eje horizontal, para obtener una velocidad angular *w* uniforme, es necesario que tanto la velocidad *v* del viento, como su dirección, permanezcan constantes respecto a la pala. En nuestro caso, como es un aerogenerador de eje Vertical no es necesario tener en cuenta la dirección del viento.

A parte de los agentes externos y de diseño se tendrá que tener en cuenta, el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador:

Rendimiento de Betz 59,3%
Rendimiento de la hélice..... 85%
Rendimiento del multiplicador..... 98%
Rendimiento del alternador..... 95%
Rendimiento del transformador..... 98%

De lo cual podemos obtener un rendimiento terico global de la instalación del orden del 66%.

En la práctica el rendimiento del aerogenerador será aún menor, por lo que se puede aceptar como un valor bastante razonable para la potencia del mismo, la siguiente expresión:

$$N_{útil} = (0{,}11 \div 0{,}17)\, A\, v_1^3$$

En los rotores multipala como el de nuestro aerogenerador VentCat, y en especial a nuestras hélices afecta a:

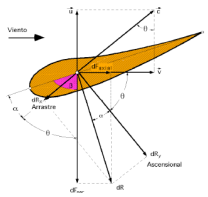
Fuerza axial.- Si la hélice tiene Z palas, siendo L la longitud de la cuerda del perfil y t el paso tangencial de las palas, la fuerza axial que se ejerce sobre un elemento de pala es:

$$dF_{axial} = \frac{1}{2}\,\frac{C_y\, \rho\, v^2 \cos(\theta - \alpha)\, L\, dr}{\cos\alpha\, sen^2\theta}$$

Fuerza axial total.- La fuerza *dFaxial total*, para Z palas es:

$$dF_{axial\,total} = Z\, dF_{axial} = \frac{Z}{2}\,\frac{C_y\, \rho\, v^2 \cos(\theta - \alpha)\, L\, dr}{\cos\alpha\, sen^2\theta}$$

Si se produjese un aprovechamiento total del viento *v2 = 0*, se tendría $v = \frac{v_1}{2}$ que , y la fuerza Ftotal en la dirección del eje del aerogenerador sería:



Dibujo del perfil hélice VentCat

$$dF_{axial\,total} = \rho\, dA\, v\,(v_1 - v_2) = 2\,\rho\, dA\, v^2 = \left| dA = 2\,\pi\, r\, dr \right| = 4\,\pi\,\rho\, v^2 r\, dr$$

Igualando las dos expresiones de dFaxial total se obtiene:

$$\frac{Z}{2}\,\frac{C_y\,\rho\, v^2 \cos(\theta - \alpha)\, L\, dr}{\cos\alpha\, sen^2\theta} = 4\,\pi\,\rho\, v^2 r\, dr \quad \Rightarrow \quad \frac{Z\,L\,C_y}{2\,\pi\, r} = \frac{4\cos\alpha\, sen^2\theta}{\cos(\theta - \alpha)}$$

Conocida la relación entre el paso tangencial *t* y el número de palas Z, se obtiene:

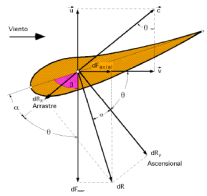
$$Z = \frac{2\,\pi\, r}{t} \;;\quad \frac{Z}{2\,\pi\, r} = \frac{1}{t} \;;\quad \frac{L\,C_y}{t} = 4\,\frac{\cos\alpha\, sen^2\theta}{\cos(\theta - \alpha)}$$

que es la relación que existe entre el ángulo de incidencia del viento α y el del movimiento relativo θ del mismo a la salida, en función de la longitud de la cuerda L, del paso *t*, y del coef. de sustentación Cy.

Para una velocidad aguas abajo de la forma *v 2 = b v1* se tiene:

$$\frac{Z\,L\,C_y}{2\,\pi\, r} = \frac{4\cos\alpha\, sen^2\theta}{\cos(\theta - \alpha)}\,\frac{1 - b}{1 + b} = \frac{L\,C_y}{t} = SP = Parámetro\ de\ forma$$

El viento llega axialmente a una pala, pero sabemos que a la salida de la misma ha cambiado de dirección, adquiriendo una velocidad aparente $\vec{c}$ que tiene una componente $\vec{u}$ (igual y de signo contrario a la velocidad periférica de la pala). El viento aparente a la entrada de la pala tiene una velocidad $\vec{c}_1$ y el viento aparente a la salida tiene una velocidad $\vec{c}_2$ conformando sobre los triángulos de velocidades, una componente para la velocidad aparente de la forma:



$$c = c_1 - c_2 = 2\,u\,a = 2\,w\,r\,a$$

en la que:

- $\vec{w}$ es la velocidad angular de la hélice.
- r es la distancia de la sección dS considerada al eje de giro.

- a es una variable a determinar, que depende de r, v, w y θ.

Si se aplica el Teorema de la Cantidad de movimiento a la sección anular barrida por las palas, de anchura dr, y que es atravesada por el viento en el tiempo unidad $\Delta t = 1$, se tiene:

$$dF_{par}\,\Delta t = dG\,(c_1 - c_2) \xrightarrow{\Delta t = 1}$$

$$dF_{par} = (2\,\pi\,r\,dr\,\rho\,v)\,(2\,w\,r\,a) = 4\,\pi\,\rho\,a\,w\,v\,r^2 dr$$

que es una expresión de dFpar para Z palas por cuanto en su determinación se ha tenido en cuenta el área barrida por las mismas, independientemente de su número.

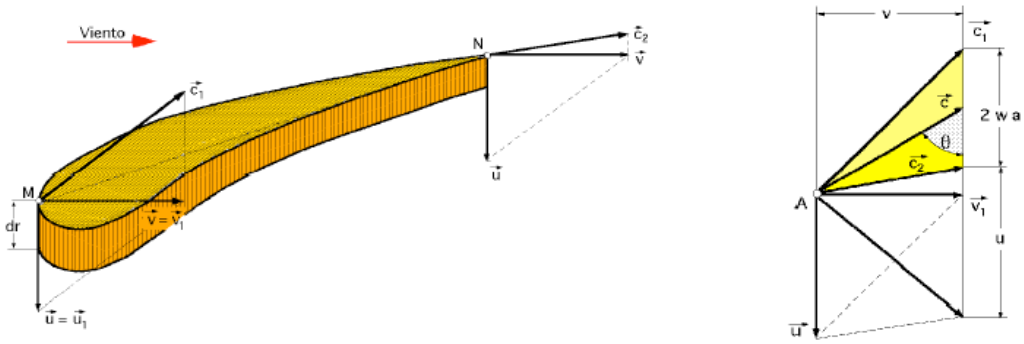


Fig II.17.- Triángulos de velocidades a la entrada y salida del perfil .

El momento dC (par motor) aplicado al elemento de superficie dS se obtiene multiplicando dR por su distancia r al eje de giro:

$$dC = dF_{par}\,r = 4\,\pi\,\rho\,a\,w\,v\,r^3 dr$$

La expresión de dC, para Z palas, es de la forma:

$$dC = 4\,\pi\,\rho\,a\,w\,v\,r^3 dr = \frac{Z}{2}\,\frac{C_y\,r\,\rho\,v^2 sen\,(\theta - \alpha)\,L\,dr}{cos\,\alpha\,sen^2\theta}$$

e igualando ambas expresiones del par motor se obtiene:

$$\frac{Z\,C_y\,v\,L}{2}\,\frac{sen\,(\theta - \alpha)}{cos\,\alpha\,sen^2\theta} = 4\,\pi\,a\,w\,r^2 = \left| Z = \frac{2\,\pi r}{t}\;\;;\;\; r = \frac{Z\,t}{2\,\pi} \right| = 4\,\pi a\,w\,r\,\frac{t\,Z}{2\,\pi}$$

función del radio *r*, paso *t* de las palas y su número Z, llegándose a:

$$\frac{L\,C_y}{t} = \frac{4\,a\,w\,r}{v}\,\frac{\cos\,\alpha\;\;sen^2\theta}{sen\;(\theta - \alpha)} = \frac{SP}{2\,\pi}$$

, siendo (SP) el parámetro de forma

Igualando las expresiones encontradas para $\frac{L\,C_y}{t}$,se llega a:

$$\frac{4\,a\,w\,r}{v}\,\frac{\cos\,\alpha\,sen^2\theta}{sen\;(\theta - \alpha)} = 4\,\frac{\cos\,\alpha\,sen^2\theta}{sen\;(\theta - \alpha)} \quad \Rightarrow \quad \frac{r\,w}{v} = \frac{tg\;(\theta - \alpha)}{a} = SR$$

Para una velocidad aguas abajo de la forma v 2 = b v1, se tiene: $SR = \frac{1-b}{1+b}\,\frac{tg(\theta - \alpha)}{a}$

Teniendo en cuenta los triángulos de velocidades a la entrada, a la salida y en el centro de sustentación de la pala, Fig II.16, se encuentra el valor de a :

$$tg\;\theta = \frac{v}{w\,r - w\,a\,r} = \frac{v}{w\,r\,(1 - a)} = \frac{v}{u\,(1 - a)} = \frac{1}{SR\,(1 - a)} \quad ; \quad a = 1 - \frac{1}{SR\,tg\;\theta}$$

, deduciéndose una relación entre la velocidad del viento $\vec{v}$ y la velocidad tangencial de las palas r *u* , en función de los ángulos è y á, de la forma:

$$v\,\{tg\;\theta\,tg\,(\theta - \alpha) + 1\} = w\,r\,tg\;\theta = \frac{\pi\,n}{30}\,r\,tg\;\theta \quad ; \quad \frac{v}{r\,w} = \frac{v}{u} = \frac{tg\;\theta}{tg\;\theta\,tg\,(\theta - \alpha) + 1} = \frac{1}{SR}$$

La representación gráfica de las ecuaciones $\begin{cases} \frac{SP}{2\,\pi} = \frac{C_y\,L}{t} = \frac{4\,\cos\,\alpha\,sen^2\theta}{\cos\,(\theta - \alpha)}\,\frac{1-b}{1+b}) \\ SR = \frac{1-b}{1+b}\,tg\,(\theta - \alpha) + \frac{1}{tg\;\theta} \end{cases}$

, en función del ángulo θ se presenta en la Fig II.18, en el intervalo *(0º< θ< 70º)* , para diversas situaciones de la velocidad del viento aguas abajo *(b = 0, y b = 0,448)*, y diversos ángulos de ataque (α = 1º y α = 8º); se observa que en el intervalo de valores de α comprendidos entre 0º y 6º, el valor de *SR* pasa por un mínimo para θ del orden de 45º.

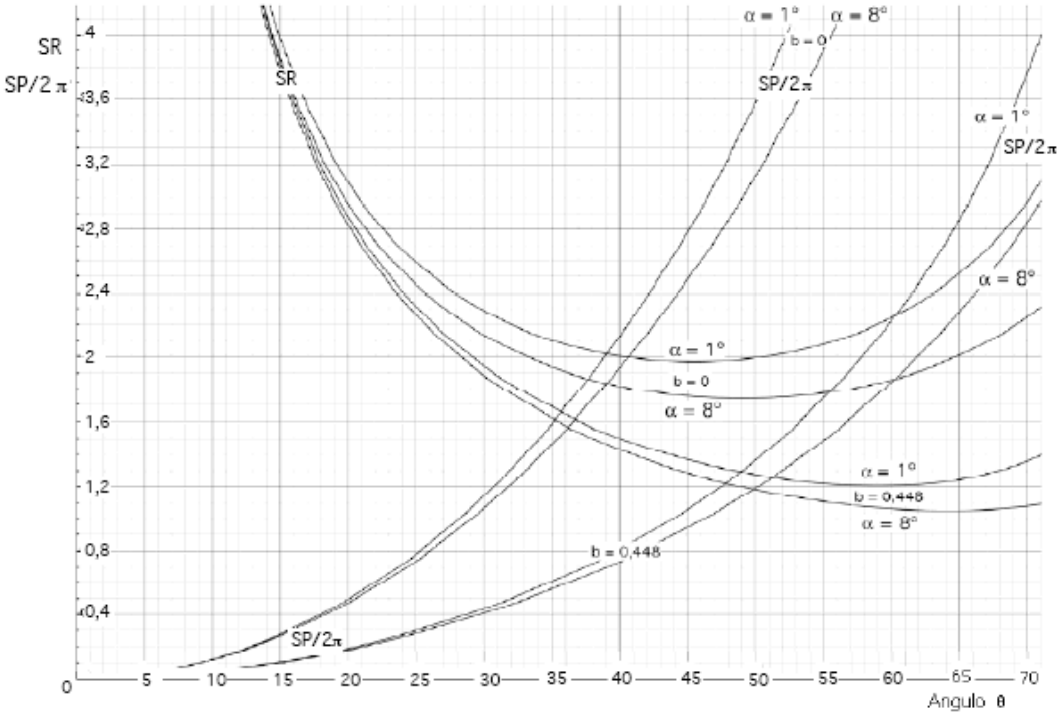
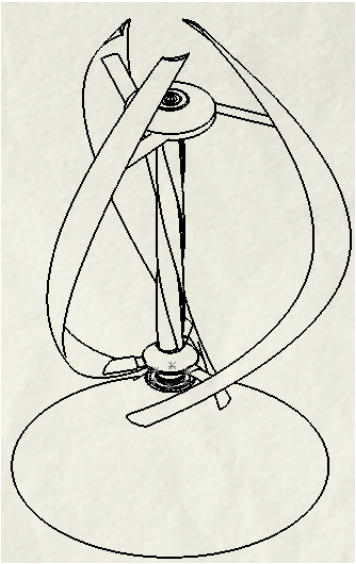


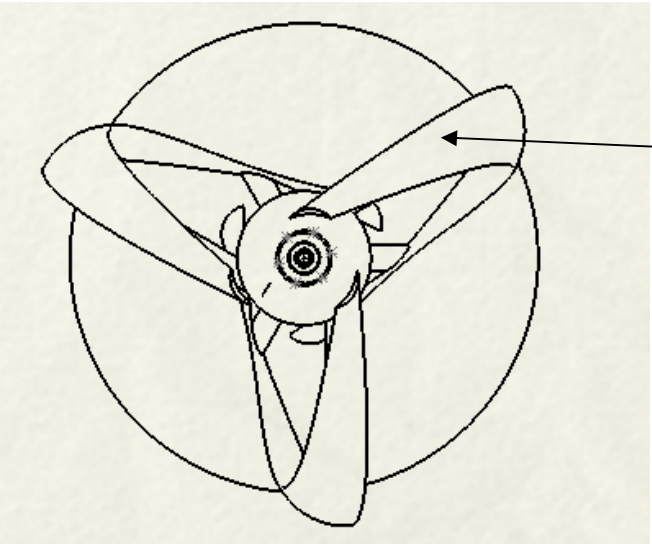
Fig II.18. Parámetros de diseño

Ya descritos todos los criterios y formulas de diseño, aplicado, comenzamos a indicar las características de nuestra hélice, planos, propiedades físicas y resistencia de esfuerzos aplicados con programas de elementos finitos.

10.4 Hélice VentCat.

Una de las principales características, de la Hélice diseñada para el aerogenerador ventCat, es su forma helicoidal. Forma adoptada, para conseguir la mayor superficie útil de contacto posible, con la mínima altura.





Sistema de instalación de 3 hélices helicoidales, desfasadas entre sí 120°

Gracias a la distribución de las 3 hélices con un desfase de 120°, conseguimos un perfecto equilibrio dinámico a altas revoluciones. A continuación se especifica las características físicas de nuestras hélices.

Hélice helicoidal Ventcat:

Masa = 20,68439 kilogramos

Altura hélice = 6000 mm

Material de construcción de la hélice:

Las hélices VentCat, están formadas por laminas de Fibras de Carbono por sus extradós (Laminas Exteriores), a simple vista el tejido de fibras terminadas con un gelcoat Epoxi transparente o de color según el entorno donde se instale el aerogenerador VentCat.

En su interior, hemos introducido un relleno de materiales compuestos combinados, con miles de pequeñas celdas, con aire que nos permiten alivianar la estructura del Composite (Conjunto de Materiales Compuestos) , formando un relleno liviano y resistente, que a su vez se encuentra subdividido en varias etapas generando un complejo multi-laminado en sándwich muy resistente a las deformaciones y rotura. De esta manera se logra un excelente peso, aproximadamente 30%-50% del peso respecto a cualquier pala actual o pala plástica de la misma medida y un coeficiente de elasticidad, "resistencia a las deformaciones" mucho mayor.

Para poder lograr, la máxima dureza del Composite, se tendrá que realizar el curado en un AUTOCLAVE, que permite someter la piezas de carbono Pre-impregnadas con Epoxi a una presión de 8Kg. por centímetro cuadrado y una temperatura de 180º Centígrados.

Características técnicas hélices VentCat.

Área de superficie en contacto (superficie de trabajo) = 4.68 metros^2

Centro de masa:
X = -0.37
Y = 3.30
Z = -0.50

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros^2)

Medido desde el centro de masa.

Ix = (0.05, 1.00, 0.03)	Px = 2189.34
Iy = (0.49, -0.05, 0.87)	Py = 38410.42
Iz = (0.87, -0.03, -0.50)	Pz = 40497.93

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
(Medido desde el centro de masa y alineado con el sistema de coordenadas resultante)

Lxx = 39898.70	Lxy = 1798.86	Lxz = 945.50
Lyx = 1798.86	Lyy = 2301.99	Lyz = 947.08
Lzx = 945.50	Lzy = 947.08	Lzz = 38897.00

Momentos de inercia: (kilogramos * metros^2)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

Ixx = 270701.62	Ixy = -23691.70	Ixz = 4798.15
Iyx = -23691.70	Iyy = 10336.12	Iyz = -33157.47
Izx = 4798.15	Izy = -33157.47	Izz = 267424.91

El aerogenerador VentCat, es una aerogenerador adecuado, para los vientos de Clase I A (la mayoría de las máquinas del mercado, son para vientos de Clase II y III y existe muy poca oferta para Clase I), dando una mayor versatilidad de mercado y lugares donde se puede instalar.

Vistas de las hélices:

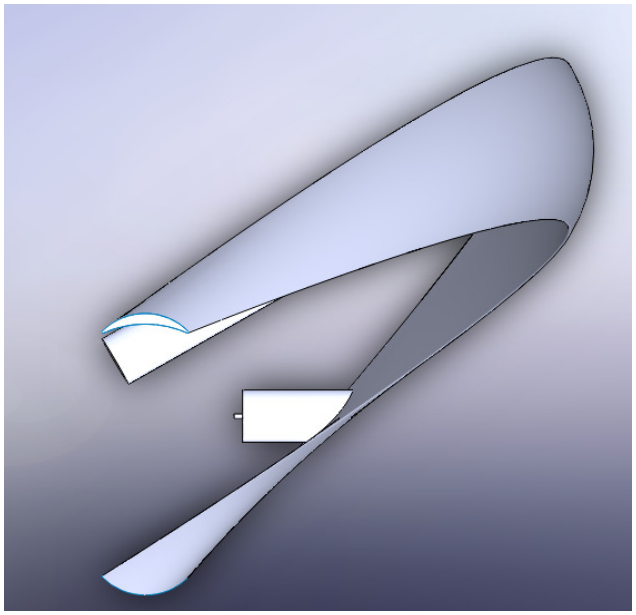


Figura 3.4, vista Alzado hélice

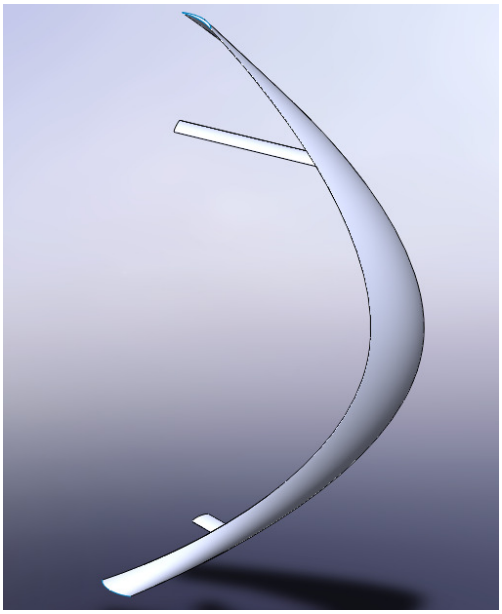


Figura 3.5, vista Isométrica hélice

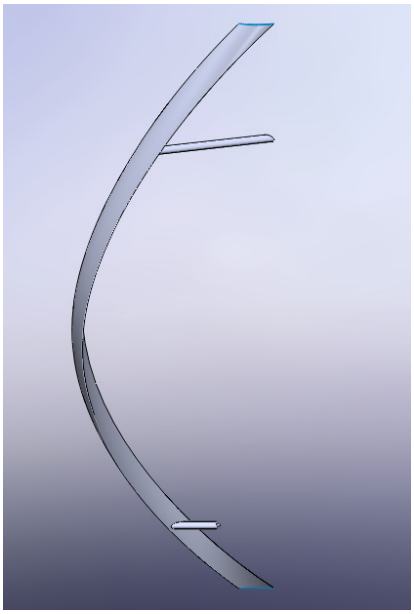
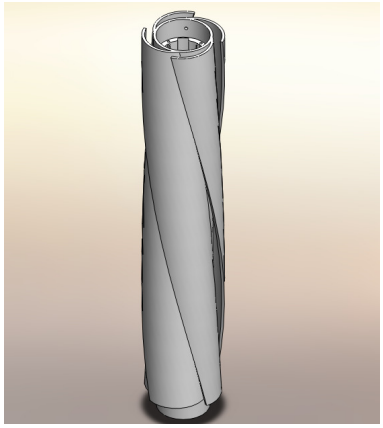


Figura 3.6, vista Lateral izq. hélice

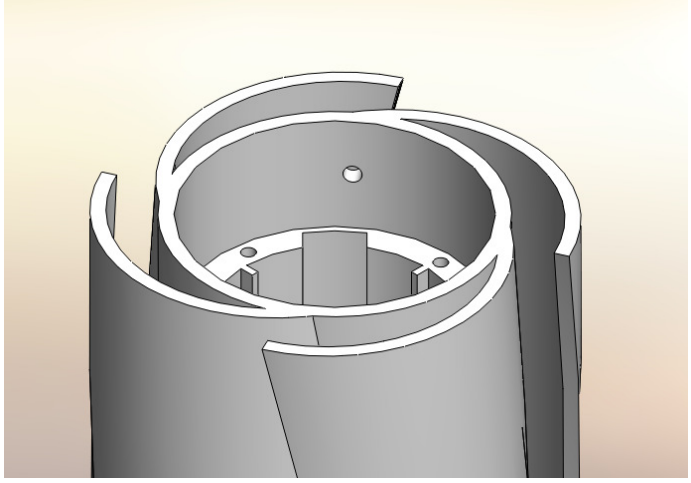
Figura 3.7, vista Lateral izq. hélice

11 EJE CENTRAL HELICOIDAL

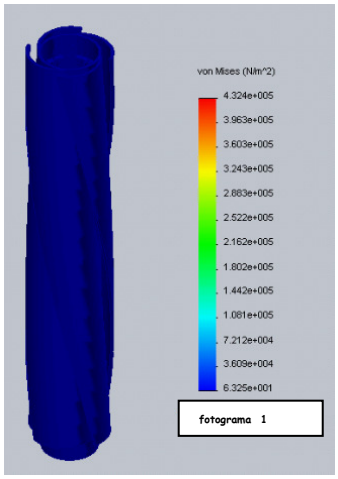


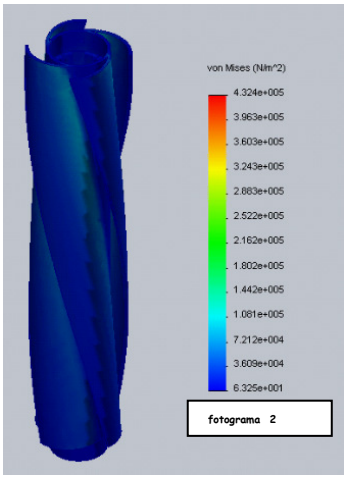
Las características de diseño del eje central, del aerogenerador Ventcat, no dista mucho de los cálculos realizados para las hélices VentCat, de hecho se han realizado los mismos cálculos y pruebas de resistencia, en el eje central del aerogenerador VentCat.

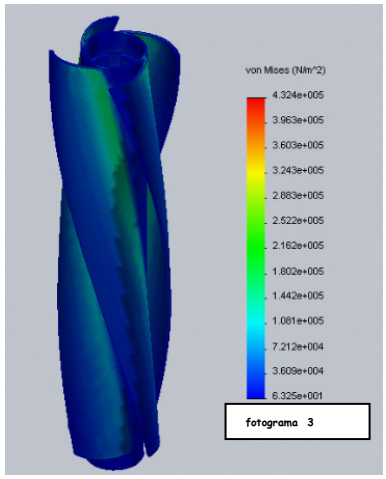
El eje central dispone de unas hélices helicoidadales, para facilitar la arrancada y estabilizar el peso del aerogenerador a velocidades elevadas.
En el hipotético caso de que el equipo reciba un exceso de velocidad, estas hélices se abren liberando la sobrepresión, para evitar desperfectos en el aerogenerador Ventcat.

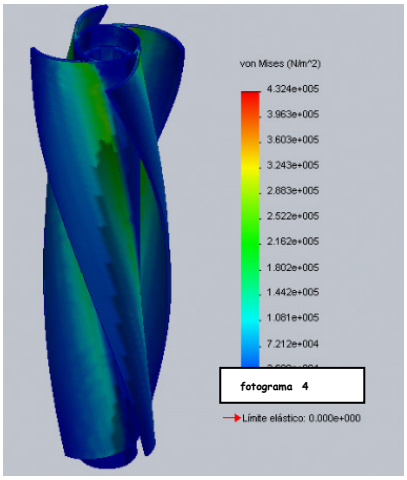


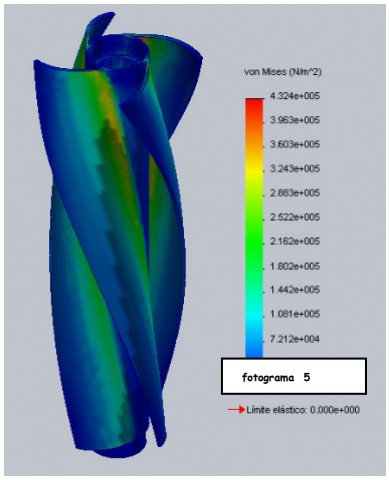
Fotografías que representan, la deformidad del eje central ,con una pequeña sobre presión de 200N, en la que se puede apreciar que el equipo no sufre ningún defecto.











El material de construcción, es igual que el de las hélices Ventcat, es de fibra de carbono. Pero con la diferencia que en el interior, hay un eje de acero al carbono, que facilita el paso de cables para futuras instalaciones y galgas extesiometricas, para en todo momento, tener conocimiento de las deformaciones y estado del equipo.

Otras de las grandes ventajas del aerogenerador Ventcat, es que el eje central es totalmente modulable, pudiendo conseguir alturas desde 1500mm a 6000mm. Únicamente intercambiando las hélices. El aerogenerador desarrollado en este proyecto es de 6 metros por lo cual precisa 4 unidades de eje helicoidal de 1500mm.