

Resumen

El objetivo del proyecto es diseñar un aerogenerador de baja potencia, que cubra las necesidades energéticas de una vivienda aislada de la red la cual se encuentra situada en Portbou. Para ello se realiza un estudio energético en el cual se define el tamaño del aerogenerador. Al ser una aplicación doméstica, sin gran demanda de energía se diseña un aerogenerador de 2,5 m de diámetro de palas.

La principal característica del aerogenerador objeto de estudio es el alternador de imanes permanentes que lleva incorporado, cuyo rotor se acopla al eje principal de la máquina sin necesidad de utilizar un elemento intermedio para realizar su acoplamiento, convirtiendo este tipo de aerogeneradores en una solución atractiva en cuanto a costes se refiere, ya que se simplifica el diseño y se reducen los costes de mantenimiento.

El inconveniente de este tipo de máquinas es el rendimiento que presentan. Poseen un rendimiento bajo, dado a la imposibilidad de convertir toda la energía eólica en energía eléctrica, pero a pesar de esto, esta solución es más barata que llevar la red eléctrica a la vivienda, el coste del kW·h generado es menor que en el caso de contratar los servicios de una compañía y es un proceso de transformación de energía que no provoca daños medioambientales.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Objetivos del proyecto	9
2.2. Alcance del proyecto	9
3. ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADORES	11
3.1. Energía eólica	11
3.1.1. Procedencia de la energía eólica	11
3.1.3. Variación del viento.....	12
3.1.3. Selección del emplazamiento	13
3.2. Aerogeneradores	14
3.2.1. Partes del aerogenerador.....	14
3.2.2. Funcionamiento de un aerogenerador	16
3.2.3. Clasificación de los aerogeneradores	18
4. DEFINICIÓN DE LAS PRETACIONES	23
4.1. Estudio previo a la selección de la potencia.....	23
4.1.1. Estudio energético de la vivienda.....	23
4.1.2. Estudio eólico	25
4.2. Selección de la potencia del aerogenerador	30
5. DISEÑO DE LOS ÓRGANOS DEL AEROGENERADOR	35
5.1. Dispositivo de orientación	36
5.2. Transmisión de la potencia	38



5.2.1. Buje	39
5.2.2. Rodamientos	41
5.2.3. Eje horizontal	42
5.2.4. Unión rotor del alternador con eje horizontal	43
5.3. Góndola	44
5.4. Unión torre-góndola.....	45
5.4.1. Rodamientos	46
5.4.2. Eje vertical	47
5.4.3. Soporte rodamientos	48
5.5. Generadores	48
5.6. Sistema de frenado.....	51
5.7. Palas	53
5.8. Torre	55
6. MONTAJE	59
7. MANTENIMIENTO	61
8. ANÁLISIS ECONÓMICO	63
8.1. Presupuesto del proyecto	63
8.2. Estudio de rentabilidad.....	64
8.2.1. Cálculo del coste de generación de energía	64
8.2.2. Cálculo del período de retorno de la inversión	65
9. ANÁLISIS AMBIENTAL	69
9.1. Fase de planificación y diseño	69
9.2. Fase de construcción	69
9.3. Fase de operación	69
9.3.1. Avifauna	70
9.3.2. Impacto visual	70
9.3.3. Impacto derivado del ruido	70
9.3.4. Impacto derivado de las sombras	70



CONCLUSIONES	71
---------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	73
---------------------	-----------

ANEXOS

SUMARIO ANEXOS	1
-----------------------	----------

ANEXO 1: CÁLCULOS	3
--------------------------	----------

1. Parámetros de diseño de las palas	3
2. Esfuerzos sobre las palas	11
2.1. Cálculo de la fuerza centrífuga	11
2.2. Cálculo de la resistencia aerodinámica de la pala	12
2.3. Cálculo del momento flector de la pala	14
3. Cálculo de los rodamientos del eje horizontal	16
4. Cálculo del eje horizontal a fatiga	31
5. Cálculo de la chaveta	35
6. Cálculo de la interferencia eje horizontal y botón	36
7. Cálculo de las soldaduras	40
7.1. Soldadura soporta rodamientos A y base	41
7.1.1. Soldadura 1	41
7.1.2. Soldadura 2	43
7.2. Soldadura soporta rodamientos B y base	44
7.2.1. Soldadura 3	44
7.2.2. Soldadura 4	45
8. Cálculo de los tornillos unión buje y palas	47
8.1. Fuerza de montaje necesaria	47
8.2. Cálculo de la rigidez del tornillo y de las piezas	48
8.3. Cálculo del asentamiento	50
8.4. Comprobación de la fuerza de montaje (seguridad de la unión)	51
8.5. Comprobación del tornillo	51
9. Cálculo de los tornillos de la unión brida y soporte rodamiento	53



9.1. Cálculo de las rigidez de los tornillos y de las piezas	54
9.2. Cálculo del asentamiento	56
9.3. Comprobación de la unión	56
9.4. Comprobación del tornillo	58
9.5. Comprobación de los tornillos a fatiga	58
10. Cálculo de los rodamientos del eje vertical	60
11. Cálculo de los ajustes	64
11.1. Ajuste eje horizontal con anillo interior rodamientos	64
11.2. Ajuste soporte rodamientos horizontal con anillo exterior rodamientos ...	64
11.3. Ajuste brida con soporta rodamientos	65
11.4. Ajuste buje-casquillo con eje horizontal	65
11.5. Ajuste buje con embellecedor	66
11.6. Ajuste eje vertical con anillo interior de rodamientos	67
11.7. Ajuste soporte rodamientos verticales con anillo exterior	67
11.8. Ajuste eje vertical con botón del eje vertical	68
11.9. Ajuste eje vertical con base	69
11.10. Ajuste estator con patas del alternador	69
11.11. Ajuste rotor del alternador con eje horizontal	71
12. Estudio de cotas	72

ANEXO 2: CÁTÁLOGOS _____ **75**

ANEXO 3 : PLANOS



1. Glosario

C_p : coeficiente de potencia

P: potencia mínima

F: coeficiente de simultaneidad

E: energía

ρ : densidad del aire

A: área barrida por las palas

D: diámetro del rotor

v: velocidad del viento

h: altura

b: coeficiente de nivel de rugosidad del terreno

λ : velocidad específica del aerogenerador

ω (rad/s): velocidad de rotación del rotor

n (min^{-1}): velocidad de rotación del rotor

FC: factor de capacidad del aerogenerador

TIR: tasa interna de rentabilidad

r: tipo de interés

n: vida útil de la instalación

C_{om} : costes de operación y mantenimiento

C_C : coste de capital

I: inversión

Γ, M : par

L: anchura del perfil de pala

α : ángulo de incidencia

β : ángulo de inclinación

θ : ángulo de sustentación

C_Y, C_X : coeficientes adimensionales de resistencia al avance y sustentación

SR: relación de velocidades

SP: parámetro de forma

m: masa

Ω : coeficiente de solidez

μ : coeficiente de rozamiento

ν : coeficiente de Poisson



E: módulo de Young

σ, τ : tensiones

F: fuerza

R_e : límite elástico

R_m : límite plástico



2. Introducción

En este capítulo se detallan los objetivos principales del proyecto y se definen los estudios que se realizarán a lo largo de éste.

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar un aerogenerador de baja potencia, cuya misión será suministrar electricidad a una vivienda que se encuentra aislada de la red, teniendo en cuenta las necesidades energéticas de la misma y que el aerogenerador sea competitivo económicamente hablando.

2.2. Alcance del proyecto

Antes de la fase de diseño, se realiza un estudio de las necesidades energéticas de la vivienda y se estudian las características del viento en la ubicación seleccionada.

En la parte de diseño del aerogenerador, el estudio se centra en el diseño de la góndola y de su unión con la torre, valorando varias alternativas de cada componente. No se diseñan ni la torre ni las palas pero se realizará un estudio de los parámetros de diseño de las éstas, se calculan los esfuerzos que soportan y se comentan las soluciones adoptadas.

Finalmente se realiza un estudio medio ambiental y un estudio económico donde se calcula el presupuesto del proyecto y se estudia su viabilidad económica.





3. Energía eólica y aerogeneradores

En este primer capítulo se expone una breve introducción a la energía eólica y a los aerogeneradores y se comentan de forma resumida algunos factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un aerogenerador y escoger un emplazamiento óptimo para el mismo.

3.1. Energía eólica

El uso de la energía eólica es uno de los métodos de aprovechamiento de energía renovables más antiguos que existen y en su empleo industrial se pueden citar como ejemplos los molinos utilizados para el bombeo de agua o el molino de grano. En la actualidad, se está en la era de su aprovechamiento comercial como productor de energía eléctrica.

La energía eólica como todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica) proviene del sol. La Tierra recibe $1,74 \cdot 10^{17}$ W de potencia del Sol y alrededor de un 2% de esta energía es convertida en energía eólica.

3.1.1. Procedencia de la energía eólica

La energía eólica está asociada a la energía cinética del viento. La circulación del viento se debe a la diferencia de temperaturas de las zonas que se encuentran en el ecuador a 0° de latitud con las zonas ubicadas más alejadas de éste. El aire caliente es más ligero que el frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extenderá hacia el norte y sur. Alrededor de los 30° de latitud se encuentra una zona de altas presiones por lo que el aire empezará a descender y por lo tanto es atraído por la zona de baja presión que se encuentra ubicada en el ecuador. En general, el viento sopla de las zonas de alta presión a las de baja presión, modificando su dirección en función de la rotación del planeta (hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Sur).

En el anterior párrafo se ha estado hablando, de hecho, de los vientos geostróficos o vientos globales los cuales, son apenas influenciados por la superficie terrestre. Además de este tipo, existen otros como los vientos locales, de entre los cuales destacan los vientos de superficie, los cuales son frenados por la rugosidad terreno de la Tierra y por



los obstáculos. También hay que mencionar la brisa marina, corriente que se genera debido al gradiente de temperaturas que se origina entre el día y la noche entre el mar y la tierra; durante el día la brisa sopla del mar a la tierra mientras que durante la noche la dirección del viento se invierte. Por último mencionar la importancia de los vientos de montaña ocasionados por el calentamiento del aire próximo a las laderas, que hace ascender éste hasta la cima debido a la disminución de la densidad y como en el caso anterior durante la noche la dirección del viento se invierte.

Es importante al hacer un estudio de la zona de la cual se obtenga la energía eólica, tener en cuenta qué tipos de vientos locales existen cuyo efecto se sumen al de los vientos globales.

3.1.2. Variación del viento

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de la velocidad del viento. Esto es así ya que los proyectistas necesitan la información para optimizar el diseño de los aerogeneradores y poder minimizar sus costes. Un modelo utilizado para describir la variación del viento en un emplazamiento dado es la Distribución de Weibull.

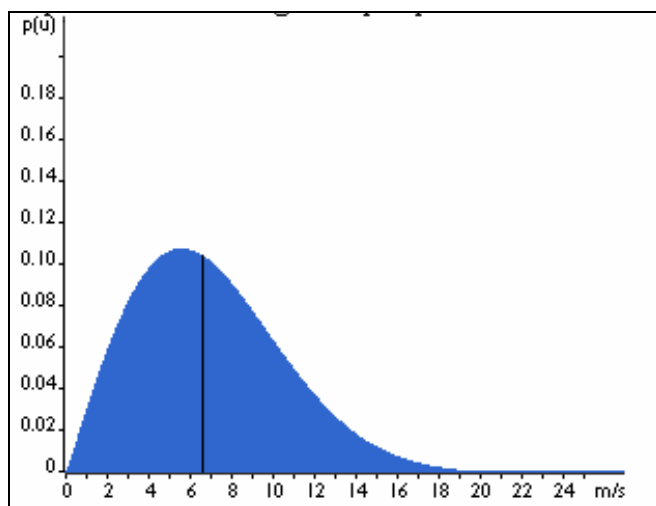


Fig. 3.1. Distribución de Weibull [1]

El gráfico de la Fig. 3.1 muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera



de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 %. La distribución de Weibull indica que la probabilidad de que sople el viento a bajas velocidades es más alta que en el caso de que sople a altas velocidades; si mide las velocidades del viento a lo largo de un año se puede observar que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie.

Un aspecto a destacar en el momento de diseñar un aerogenerador es que no basta con tomar datos de las velocidades y después utilizar la velocidad media para los cálculos, hay que ponderar la probabilidad de cada velocidad del viento con la correspondiente cantidad de potencia que es capaz de extraer a esa velocidad.

3.1.3. Selección del emplazamiento

A la hora de seleccionar un emplazamiento correcto para instalar un aerogenerador no es suficiente hacer un estudio de los mapas eólicos ni tomar medidas de viento en el lugar. Además de esto hay que tener en cuenta otros factores que pueden influir mucho en el futuro comportamiento del aerogenerador.

Las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En general cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.

Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador. Las turbulencias producen mayores roturas y desgastes en la turbina eólica.

Los obstáculos que se encuentra el viento tales como edificios, árboles, formaciones rocosas, etc. Pueden disminuir la velocidad del viento de forma significativa y a menudo crean turbulencias en torno a ellos. Así pues lo mejor es evitar grandes obstáculos cerca de turbinas eólicas y en particular si se encuentran situados justo en frente.



Cada aerogenerador crea un abrigo en la dirección en la que sopla el viento, es lo que se conoce como efecto estela. De hecho, se crea una estela tras la turbina, es decir, una larga cola de viento bastante turbulenta y ralentizada. Por esto en los parques eólicos para evitar este efecto, se debe mantener una distancia mínima entre turbinas.

Otro efecto a considerar es el efecto túnel que consiste en situar el aerogenerador en un paso estrecho entre montañas. De esta manera el aire se comprime en la parte de la montaña que está expuesta al viento y su velocidad aumenta considerablemente.

Otra forma corriente de emplazar aerogeneradores es situarlos en colinas. En las colinas se aprecian velocidades de vientos superiores que en las zonas circundantes.

Así pues, es importante ubicar los aerogeneradores en la dirección de los vientos dominantes, con mínimos obstáculos y una rugosidad lo más baja posible en esa dirección teniendo en cuenta efectos colinas y túnel.

3.2. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son las máquinas que se encargan de capturar la energía del viento y transformarla en energía eléctrica. En los siguientes subapartados se describe de forma resumida qué componentes constituyen un aerogenerador, el principio de funcionamiento del mismo y su clasificación.

3.2.1. Partes de un aerogenerador

En este subapartado se describe de forma breve los elementos más importantes de los aerogeneradores: las palas, el buje, el equipo multiplicador de potencia, los ejes de alta y baja velocidad, el generador, el controlador electrónico la torre. En la Figura 3.2. se muestra un dibujo de un aerogenerador detallando cual es cada parte.



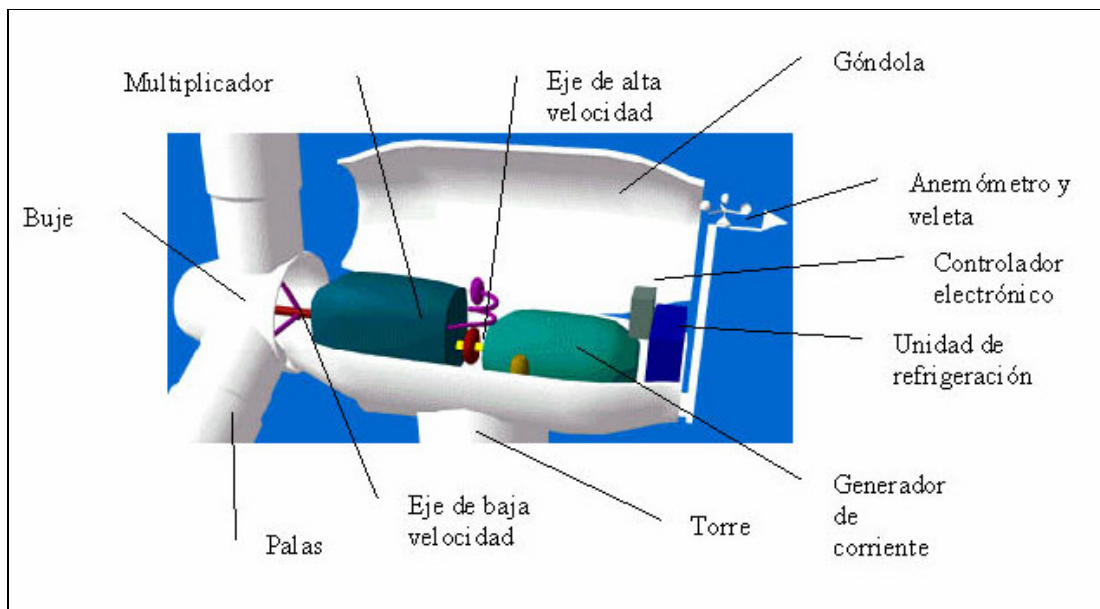


Figura 3.2. Partes de un aerogenerador [1]

Las palas son los elementos del aerogenerador que capturan la energía cinética del viento. Todas las palas del aerogenerador se unen de forma solidaria a un soporte denominado buje o cubo.

El buje es el elemento que realiza la unión de todas las palas del aerogenerador. El buje se monta sobre el eje de baja velocidad, desde el cual se transmite el par motriz a la transmisión de potencia del aerogenerador (normalmente al multiplicador).

El equipo que permite la multiplicación de velocidad, adaptando el eje de baja velocidad al eje de alta velocidad donde se acopla el generador recibe el nombre de multiplicador.

Los ejes son los elementos de transmisión que acoplan el multiplicador con las palas (eje de baja velocidad) y el multiplicador con el generador (eje de alta velocidad). El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

El generador está formado por una máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Al ser una máquina eléctrica se



compone de un rotor (parte móvil que genera un campo magnético variable al girar las palas) y un estator (parte fija sobre la que se genera la corriente eléctrica inducida).

Excepcionalmente, algunos aerogeneradores incorporan un controlador electrónico que tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación y la posición de las palas así como dirige los frenos. Éste es el caso de aerogeneradores de grandes potencias, como los que e ven en los parque eólicos.

El bastidor o góndola es la estructura en la cual se montan los distintos componentes del aerogenerador. En la góndola se montan el buje, el multiplicador de velocidad, los ejes y el generador.

Finalmente la torre es el componente que sustenta todo el conjunto del aerogenerador y le une al suelo.

3.2.2. Funcionamiento de un aerogenerador

Los aerogeneradores obtienen su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento.

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Así pues, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire. A presión atmosférica normal y a 15°C la densidad del aire es 1,255 kg/m³ aunque éste valor disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

En referencia al área de barrido de las palas, ésta determina cuanta energía del viento es capaz de capturar el aerogenerador. A mayor diámetro de palas, la superficie es mayor y por lo tanto la energía que absorbe el rotor es mayor.

La velocidad del viento es un parámetro muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. A mayor velocidad de viento, la energía que capte el aerogenerador es mayor.



La energía cinética del viento es capturada por aerogenerador gracias a las palas de rotor. Cuando el viento incide contra las palas, éstas giran en torno el eje del rotor y por lo tanto hacen girar el eje de baja velocidad al que está acoplado el buje. Éste gracias al multiplicador hace girar el eje de alta velocidad al que está acoplado el generador, que es el productor de energía eléctrica.

El rotor del aerogenerador se mueve gracias a la sustentación que se produce en las palas. La sustentación es una fuerza perpendicular a la dirección del viento y se produce debido a la diferencia de presiones a ambos lados de la pala, es decir, gracias al hecho de que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior. Si la inclinación de las palas es muy elevada se puede producir el fenómeno conocido como pérdida de sustentación, en el que el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala y por tanto las palas dejan de girar. Es por este motivo que las palas de los aerogeneradores están alabeadas con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo a lo largo de toda la longitud de la misma y no se produzca dicho fenómeno.

Como todas las máquinas transformadoras de energía los aerogeneradores no son capaces de transformar toda la energía eólica disponible del viento en energía mecánica y por lo tanto hay que tener en cuenta un rendimiento denominado coeficiente de potencia C_p . El coeficiente de potencia es la relación que hay entre la potencia eólica del emplazamiento y la potencia mecánica que se obtiene. Este coeficiente depende de la velocidad del viento (ver Fig. 3.3), a bajas velocidades el rendimiento del aerogenerador es mayor que a altas.



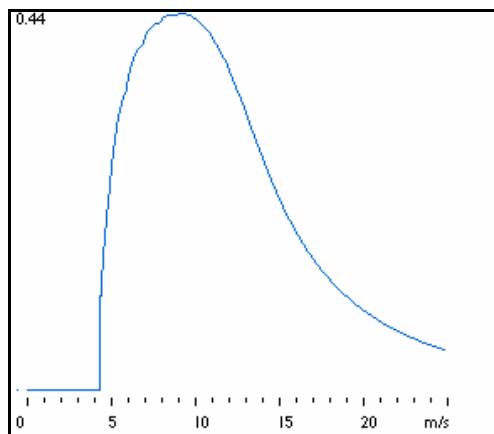


Fig. 3.3. Coeficiente de potencia [1]

De igual forma que el coeficiente de potencia, la potencia de un aerogenerador es variable con la velocidad del viento (ver Fig. 3.4). Esto se refleja en las curvas de potencia de los aerogeneradores, las cuales muestran la potencia eléctrica disponible en un aerogenerador a diferentes velocidades de viento.

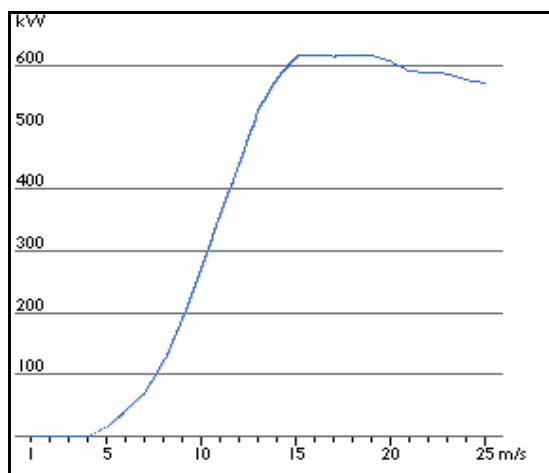


Fig. 3.4. Potencia de un aerogenerador [1]

3.2.3. Clasificación de los aerogeneradores

Una primera clasificación de aerogeneradores se basa en la posición de su eje principal. Existen dos tipos de aerogeneradores: los de eje horizontal y los de eje vertical.



Los aerogeneradores de eje horizontal deben su nombre al hecho que poseen los ejes principales situados paralelos al suelo. Este tipo de aerogeneradores necesitan un sistema de control de orientación al viento (normalmente un pequeño motor eléctrico para aerogeneradores de más de 50 kW). Los elementos de conexión (multiplicador y generador) se encuentran alojados a la altura del rotor en la góndola situado en lo alto de la torre. En este tipo de aerogeneradores las palas pueden estar en barlovento (situadas frente al viento) o bien en sotavento (situadas detrás del viento). La ventaja de poseer las palas en barlovento es que evita el abrigo tras la torre pero su desventaja es que el rotor ha de ser lo más rígido posible. Por otra parte si las palas están situadas en sotavento el flujo del viento se distorsiona por entrar en contacto con la góndola antes de incidir sobre las palas. En los aerogeneradores con palas situadas en sotavento las se producen fluctuaciones de la potencia eólica, lo cual puede crear cargas de fatiga.

Otra posible clasificación dentro de los aerogeneradores de eje horizontal es función del número de palas. Se diferencian las eólicas compuestas por palas con perfil de ala (ver Fig. 3.5) y las eólicas multipalas (ver Fig. 3.6).

Las primeras se les denomina turbinas rápidas y generalmente son bipalas o tripalas; el número de palas no tiene influencia en la potencia proporcionada, sino que es función de la superficie barrida por el rotor y cuya aplicación es la generación de energía eléctrica. En cambio las eólicas multipalas están compuestas por múltiples placas metálicas de perfil no aerodinámico y poseen un par de arranque proporcional al número de palas y al diámetro. Estas últimas destacan en aplicaciones mecánicas de baja potencia como por ejemplo el bombeo de agua.





Fig. 3.5. Aerogenerador de 3 palas [1]



Fig. 3.6. Turbina multipala [1]

Los aerogeneradores de eje vertical con los ejes principales perpendiculares al suelo, tienen la ventaja fundamental que captan el viento en cualquier dirección, por lo que no necesitan control de orientación. El enlace con los multiplicadores y generadores se realiza en el suelo, lo que supone una mayor sencillez y una reducción de costes en el montaje. Sin embargo poseen una eficiencia peor que los aerogeneradores de eje horizontal. En la Fig. 3.6 se muestra un aerogenerador de eje vertical (Rotor Darrieux).





Fig. 3.6. Aerogenerador de eje vertical [1]

En la Fig. 3.7 se puede ver una comparación de rendimientos de varios tipos de aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal. Se ve que los de eje horizontal (bipala y tripala) poseen mayores rendimientos que todos los demás, incluso que los de eje horizontal multipala. Como se ha comentado antes se puede observar que los aerogeneradores de eje vertical como el rotor Savonius o el rotor Darrieux poseen un rendimiento más bajo que los de eje horizontal.

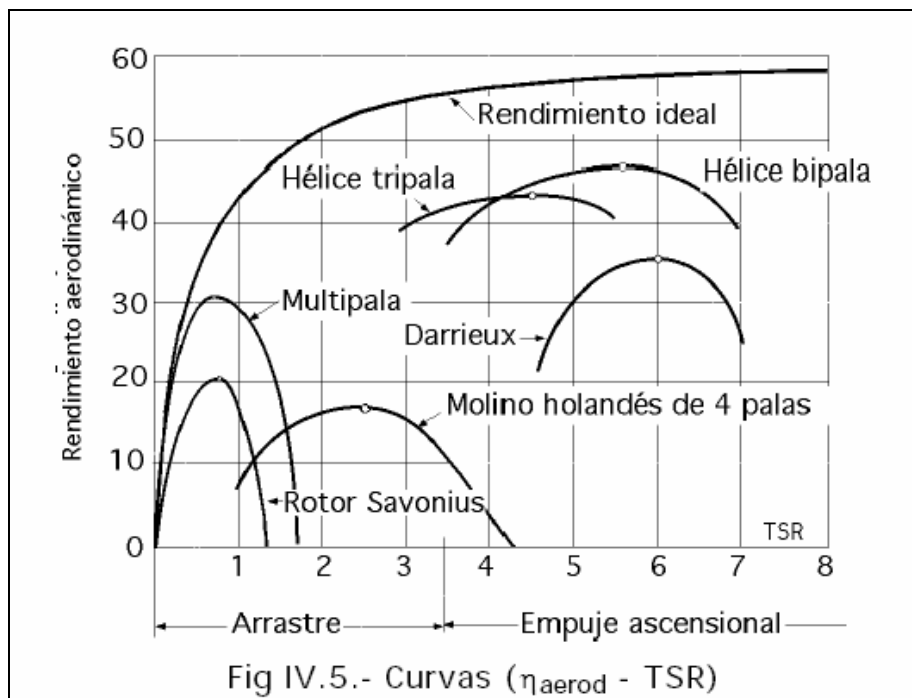


Fig. 3.7. Rendimiento aerodinámico de varios aerogeneradores [1]





4. Definición de las prestaciones

En este capítulo se define la potencia que se instalará en el aerogenerador previamente realizando un estudio de las necesidades energéticas de la vivienda para determinar la potencia mínima necesaria y un estudio eólico para definir el emplazamiento y la velocidad del viento.

Antes de realizar dichos estudios hay que comentar que el aerogenerador objeto de diseño será una máquina de eje horizontal con rotor a barlovento ya que posee una mayor eficiencia que las máquinas de eje vertical.

4.1. Estudio previo a la selección de la potencia

Para poder definir las prestaciones del aerogenerador es necesario estudiar la potencia eléctrica necesaria de la vivienda a la que vaya a abastecer de electricidad y la potencia eólica de la zona donde se ubique éste.

4.1.1. Estudio energético de la vivienda

El estudio de la potencia eléctrica consiste en sumar las potencias que consumen todos los aparatos eléctricos de la casa, pero debido a que no estarán conectados todos los aparatos a la vez, hay que ponderar éste valor por un coeficiente de simultaneidad F . A continuación se muestra en la Tabla 4.1 la lista de todos los aparatos eléctricos y de la iluminación detallando la potencia que consumen y las horas que se estima que estén conectados. Conociendo la potencia que consumen y el tiempo media que están conectados por día se calcula en la misma tabla la energía media consumida por cada uno de ellos.



APARATO	Potencia (W)	Horas consumo (h/día)	Total (W·h/día)
Frigorífico	250	24	6000
Batidora	300	0,25	75
Lavadora	2500	0,25	625
Tostadora	400	0,25	100
Microondas	600	0,5	300
Televisión	95	3	285
Vídeo	75	1	75
Mini-Cadena	85	1	85
Plancha	1200	0,5	600
Aspirador	900	0,25	225
Aire Acondicionado	1100	0,5	550
Ordenador	200	0,9	180
ILUMINACIÓN	Potencia (W)	Horas consumo (h/día)	Total (W·h/día)
Cocina	150	2,5	375
Baño 1	100	1,5	150
Baño 2	100	0,75	75
Habitación 1	150	1	150
Habitación 2	100	1,5	150
Habitación 3	100	0,25	25
Salón	200	5	1000
Pasillo	100	0,5	50
Recibidor	80	0,25	20
TOTAL	8135		10095

Tabla 4.1. Estudio de la potencia eléctrica (potencia instalada)

Como se ha mencionado anteriormente la potencia que consumen todos los aparatos o potencia instalada no corresponde con la potencia mínima que ha de ser capaz de suministrar el aerogenerador. Según la Ec. 4.1 la potencia mínima es la potencia eléctrica total ponderada por un coeficiente de simultaneidad F . Se estima un coeficiente de simultaneidad del 50 %, es decir, como máximo se consume el 50 % de la potencia instalada.

$$P_{\text{mínima}} = F \cdot P_{\text{instalada}} = 0,5 \cdot 8135 = 4,1\text{kW} \quad (\text{Ec. 4.1})$$



4.1.2. Estudio eólico

Una vez realizado el estudio de potencia eléctrica es necesario conocer qué cantidad de potencia será capaz de suministrar el emplazamiento elegido para instalar el aerogenerador.

La potencia eólica de una zona se determina mediante la Ec. 4.2 [2][3] y ésta depende de la densidad del aire, de la velocidad del viento y del área barrida por las palas.

$$P_{\text{eólica}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

La zona donde se instalará el aerogenerador se trata del municipio de Portbou situado en la comarca del Alt Empordà. Esto nos servirá para hacer una estimación de la media de la velocidad del viento. En la Tabla 4.2 [4] se detallan los datos referentes a las velocidades medias mensuales y la media anual recogidos en el año 2002 por el Servei Meteorològic de Catalunya (datos medidos a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo).

MES	Vm (m/s)
ENERO	6,9
FEBRERO	9,1
MARZO	9,3
ABRIL	9,5
MAYO	9,1
JUNIO	7,4
JULIO	9,2
AGOSTO	8,2
SEPTIEMBRE	10,7
OCTUBRE	8,1
NOVIEMBRE	10,2
DICIEMBRE	7,9
MEDIA ANUAL	8,8

Tabla 4.2. Velocidades medias mensuales en Portbou [4]

Pero debido a que la variación de velocidad depende del terreno y de la altura a la que se tome, hay que corregir la velocidad media calculada según la Ec. 4.3 [3].



$$v_{h_2} = v_{h_1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^b \quad (\text{Ec. 4.3})$$

donde v_{h_1}, v_{h_2} representan las velocidades del viento a las alturas h_1 y h_2 y b es un coeficiente que depende del nivel de rugosidad del terreno. En la Tabla 4.3 [3] se detallan diferentes valores del coeficiente b en función de distintos tipos de terreno.

Nivel de rugosidad del terreno	b
No rugoso (arena, nieve, mar)	0,10-0,13
Poco rugoso (hierba, campo de cereales)	0,13-0,20
Rugoso (bosque, casa pequeñas)	0,20-0,27
Muy rugoso (edificios grandes)	0,27-0,40

Tabla 5.3. Niveles de rugosidad del terreno [3]

Así pues, suponiendo que el rotor del aerogenerador estará situado a 8 m de altura y que la zona donde se ubicará es poco rugosa ($b=0,16$) la velocidad corregida es la que se muestra en la Ec 4.4.

$$v_{4m} = v_{10m} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{0,16} = 8,8 \cdot \left(\frac{8}{10}\right)^{0,16} = 8,5 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Como se comentó en el capítulo anterior, el viento sigue una distribución de Weibull pero en este caso para simplificar los cálculos se supone que la velocidad del viento se distribuye según el histograma de cargas de la Fig. 4.1. sabiendo que el aerogenerador trabaja 10,5 horas al día repartidas tal y como se muestra a continuación:

-2,5 horas a 4m/s

-7 horas a 8,5 m/s

-1 horas a 14 m/s



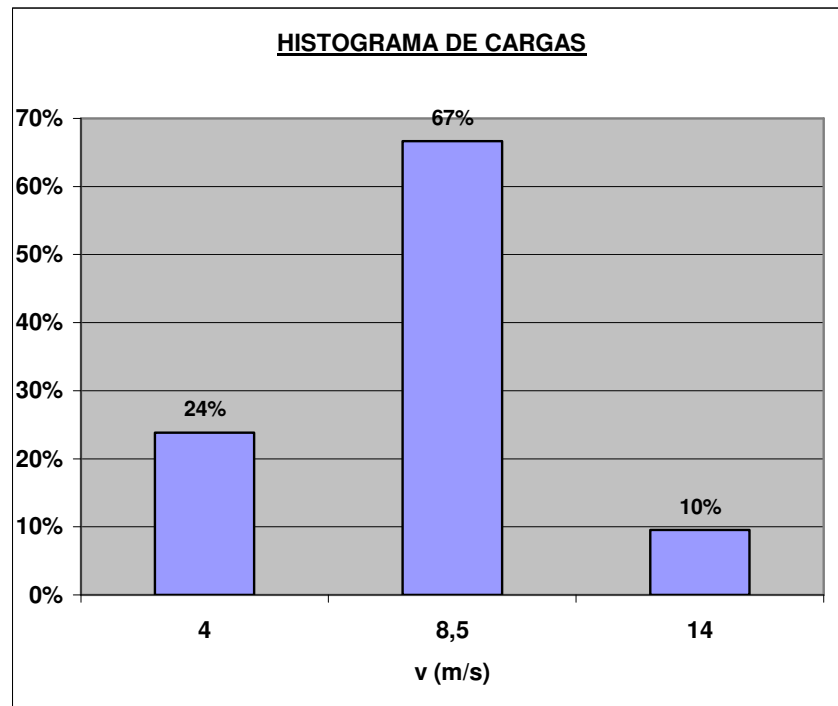


Fig. 4.1. Histograma de cargas

Al conocer el histograma de cargas se calcula la velocidad ponderada según su probabilidad en Ec. 4.5.

$$V_{\text{ponderada}} = 4 \cdot 0,24 + 8,5 \cdot 0,67 + 14 \cdot 0,1 = 8,1 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Tomando una velocidad de 8,1 m/s y una densidad del aire de $1,255 \text{ kg/m}^3$, el único factor que se puede variar para alcanzar la potencia eléctrica requerida por la vivienda es el diámetro del área de barrido de las palas. En la Tabla 4.4 se muestran valores de potencias eólicas extraíbles en función de distintos valores de diámetros de área de barrido de palas.



D (m)	P _{eólica} (kW)
1	0,25
2	1,01
4	4,035
6	9,085
8	16,15
10	25,24

Tabla 4.4. Potencia eólica [2]

Los resultados de la Tabla 4.4 no se refieren a potencia eléctrica si no a potencia eólica, por eso hay que corregir estos resultados según la Ec. 4.5 suponiendo un coeficiente de potencia de 0,55 (el máximo teórico que se puede conseguir según la Ley de Betz es de $C_p=0,59$ [3]).

Suponiendo que la velocidad promedio en el área del rotor es la suma de velocidades v_1 (velocidad en la parte frontal del aerogenerador; ver Fig. 4.2) y v_2 (velocidad en la parte trasera del aerogenerador; ver Fig. 4.2), sabiendo que la potencia del viento P extraída por el rotor es igual a la masa por la diferencia de los cuadrados de la velocidad del viento y relacionando ésta con la potencia del viento sin pasar por el aerogenerador P_o la Ley de Betz demuestra la Ec. 4.6.

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

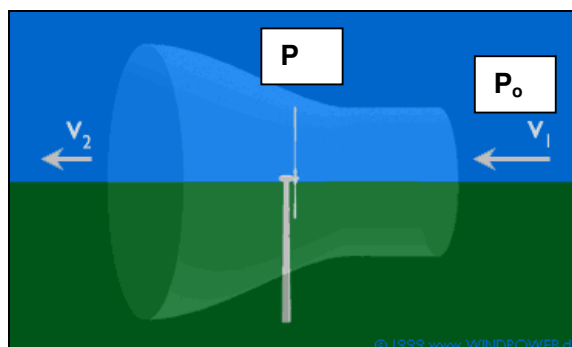


Fig. 4.2. Variación del viento al paso por el aerogenerador [1]



Si se interpreta la Ec. 4.6. en función de v_2/v_1 , se observa en la Fig. 4.3 que la función alcanza su máximo para la relación $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$.

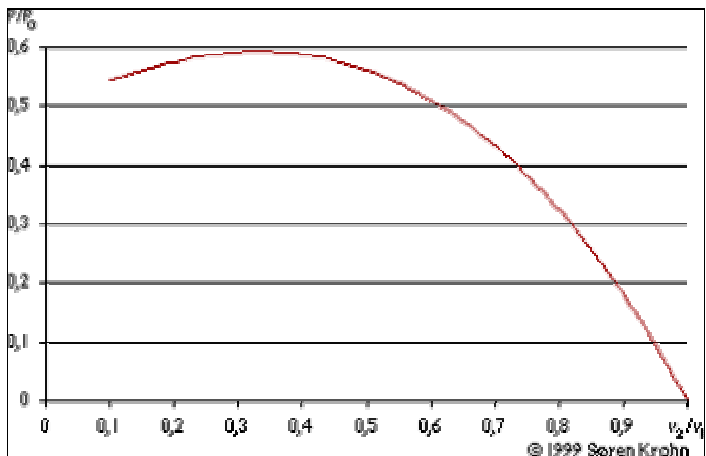


Fig. 4.3. P/P_0 en función de v_2/v_1 [1]

Sustituyendo el valor óptimo de v_2/v_1 en Ec. 4.6, se obtiene que la relación entre potencias eólicas antes del aerogenerador y en la superficie de barrida de las palas es de 0,59 (ver Ec. 4.7), es decir, el aerogenerador aprovecha el 59% de la energía eólica disponible para una relación de velocidades antes y después de pasar por el aerogenerador óptima.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) = \frac{16}{27} = 0,59 \tag{Ec. 4.7}$$

Después de explicar brevemente en qué consiste la Ley de Betz se continúa con el cálculo de la potencia eléctrica de la Tabla 4.4. Para ello se supone un rendimiento del sistema eléctrico del 0,95. En la Ec 4.8 se muestra la expresión para transformar la potencia eólica a potencia eléctrica.

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_{\text{sist. eléctrico}} \cdot P_{\text{mecánica}} = \eta_{\text{sist. eléctrico}} \cdot C_p \cdot P_{\text{eólica}} \tag{Ec. 4.8}$$



En la Tabla 4.5 se muestran las potencias máximas eléctricas que es capaz de suministrar un aerogenerador para distintos diámetros de área de barrido de las palas.

D (m)	P _{eléctrica} (kW)
1	0,13
2	0,51
4	2,02
6	4,55
8	8,08
10	12,62

Tabla 4.5. Potencia eléctrica

4.2. Selección de la potencia del aerogenerador

A la vista de los cálculos corregidos de la Tabla 4.5 el diámetro del área de barrido por las palas óptimo para esta aplicación es de 6 m ya que con este se obtiene la potencia eléctrica mínima. Pero aún se puede ajustar más la potencia del aerogenerador teniendo en cuenta que la demanda de electricidad de la vivienda no es siempre la potencia mínima calculada en Ec. 4.1 y si además se cuenta con un sistema de baterías, el tamaño del aerogenerador se puede reducir. Como se verá más adelante se selecciona un alternador, por ello es necesario instalar a la salida de éste un rectificador para poder cargar las baterías. El rectificador es un convertidor de corriente alterna a corriente continua. A la salida de las baterías hay que instalar un ondulator que convierte la corriente continua en alterna.

El consumo total de energía por de día es según la Tabla 4.1 de 11210 W·h/día y por lo tanto las baterías han de ser capaces de suministrar este valor. Pero hay que tener en cuenta que a este valor hay que sumarle el consumo de energía del sistema eléctrico, que se estima en el 10% del consumo total de energía.

Suponiendo que cada día el viento sopla a la velocidad ponderada calculada en Ec 4.5 durante 10,5 horas y sabiendo el consumo energético por día de la vivienda calculado en Tabla 4, se calcula en Ec. 4.9 la potencia mínima eléctrica del aerogenerador.



$$P_{\text{eléctrica-aerogenerador}} = \frac{1,1 \cdot 10095 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{día}}{10,5 \text{ h} / \text{día}} = 1057,6 \text{ W} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Para calcular el tamaño del aerogenerador (diámetro palas) en la Tabla 4.6 se ha calculado la potencia eólica (calculada según Ec. 4.2) y la potencia eléctrica (calculada según Ec. 4.8) para distintos valores de diámetros.

Diámetro palas (m)	Potencia eólica (W)	Potencia eléctrica (W)
0,5	72	43
1	289	171
1,5	651	384
2	1158	683
2,5	1809	1067
3	2605	1537
3,5	3545	2092
4	4630	2732
4,5	5860	3458
5	7235	4269
5,5	8754	5165
6	10418	6147
6,5	12227	7214
7	14181	8367
7,5	16279	9604
8	18522	10928

Tabla 4.6. Potencias

Se ha seleccionado como diámetro final de las palas del aerogenerador 2,5 m ya que la potencia eléctrica extraíble se ajusta bastante bien a la potencia mínima que tendría que tener el aerogenerador (Ec. 4.9).

Para validar que el diámetro de rotor seleccionado sea correcto, hay que comprobar que la velocidad en la punta de la pala no sea superior a la velocidad del sonido, ya que de lo contrario el diseño de las palas no sería óptimo ya que se podrían producir cavitación en la punta de la pala, cosa que implicaría pérdida de rendimiento de las mismas, ruido, vibraciones y erosión. A continuación en la Ec. 4.10 se realiza dicho cálculo de comprobación. Para realizar este cálculo es necesario saber a qué velocidad gira el rotor; como se verá en el Capítulo 5 se selecciona el alternador 145 STK6M que gira a una velocidad de 390 rpm para una velocidad de viento de 8 m/s.



$$v_{pp} = \omega \cdot r = n \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot r = 390 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1,25 = 51,2 \text{ m/s} < 340 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Para concluir se determina el número de palas de las que se compondrá el aerogenerador. Para ello es necesario saber la velocidad específica, la cual se define según la Ec. 4.11 como la relación entre la velocidad en la punta de la pala v_{pp} y la velocidad ponderada del viento v [2].

$$\lambda = \frac{v_{pp}}{v} = \frac{\omega \cdot r}{v} = \frac{n \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot r}{v} = \frac{390 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1,25}{8,1} = 6,02 \quad (\text{Ec. 4.11})$$

El número de palas es función de la velocidad específica tal y como se muestra la Tabla 4.7.

λ	Nº palas
1	6+20
2	4+12
3	3+8
4	3+5
5+8	2+4
5+15	1+2

Tabla 4.7. Número de palas [2]

Debido a que la velocidad específica λ tiene un valor de 6,02 el número de palas óptimo varía de 2 hasta 4 palas según la Tabla 4.4. Para decidir el número de palas se tendrá en cuenta que a menor número de palas, el coste es menor pero el aerogenerador sufre mayores cargas debido a que gira más rápido. En cambio a mayor número de palas, aunque el coste y el par de arranque aumentan, las cargas debidas a fatiga son menores. Finalmente se seleccionan dos palas considerando que es una solución de compromiso entre coste y las posibles cargas que pueda sufrir.

Para concluir este capítulo en la Tabla 4.8 se muestra el estudio de capacidad del aerogenerador. En esta tabla se muestra la velocidad media mensual a 8 m de altura calculada según Ec. 4.4. En esta tabla se calcula para cada mes la potencia eólica extraíble a 4 m/s, a la velocidad media del viento según el mes y a 14 m/s y según el



tiempo de funcionamiento a cada régimen de velocidades, se calcula los kW·h/día eólicos generados y los kW·h/día eléctricos que se pueden extraer (suponiendo un rendimiento $C_p=0,5$). Sabiendo que hay que cubrir 10,2 kW·h/día se observa que el sistema es capaz de cubrir las necesidades de la casa.

Hay que resaltar que estos resultados son teóricos ya que se ha supuesto que:

- La demanda de electricidad es constante durante todo el año
- El funcionamiento del aerogenerador es de 10,5 horas por día
- Un histograma de cargas para simplificar los cálculos

El sistema no es perfecto al 100 % ya que es muy difícil predecir en cada momento la energía eólica extraíble y el consumo de electricidad. En la última columna de la Tabla 4.8 se muestra el factor de capacidad FC del aerogenerador, factor que indica la relación entre energía eléctrica que se podría generar si el aerogenerador funcionará 24 horas al día (36,96 kW·h/día) y la energía eléctrica generada real. A la vista de los resultados se observa que los valores de FC son muy bajos, del orden del 30% de media. Esto manifiesta que la energía eólica es muy costosa ya que no se aprovecha el 100 % de la capacidad del aerogenerador.

	V_{media}	$P_{eólica-4m/s}$ (kW)	$P_{eólica-vm}$ (kW)	$P_{eólica-14m/s}$ (kW)	$E_{eólica}$	$E_{eléctrica}$	FC
MES	(m/s)	2,5h/día	7 h/día	1 h/día	kW·h/día	kW·h/día	(%)
ENERO	6,7	0,75	0,87	6,56	14,51	7,26	35,8%
FEBRERO	8,8	0,75	1,99	6,56	22,37	11,19	55,2%
MARZO	9,0	0,75	2,12	6,56	23,31	11,66	57,5%
ABRIL	9,2	0,75	2,26	6,56	24,29	12,15	59,9%
MAYO	8,8	0,75	1,99	6,56	22,37	11,19	55,2%
JUNIO	7,1	0,75	1,07	6,56	15,93	7,97	39,3%
JULIO	8,9	0,75	2,06	6,56	22,84	11,42	56,3%
AGOSTO	7,9	0,75	1,46	6,56	18,63	9,32	46,0%
SEPTIEMBRE	10,3	0,75	3,24	6,56	31,09	15,55	76,7%
OCTUBRE	7,8	0,75	1,40	6,56	18,27	9,13	45,1%
NOVIEMBRE	9,8	0,75	2,80	6,56	28,06	14,03	69,2%
DICIEMBRE	7,6	0,75	1,30	6,56	17,56	8,78	43,3%
MEDIA ANUAL	8,5	0,8	1,9	6,6	21,60	10,8	53,3%

Tabla 4.8. Estudio de capacidad del sistema





5. Diseño de los órganos del aerogenerador

En el capítulo anterior se definió que el aerogenerador será de eje horizontal con las palas situada a barlovento, el número de palas y el diámetro de las mismas. En este capítulo se estudian varias alternativas de diseño para cada componente: el dispositivo de orientación, la transmisión de potencia, la góndola, la unión torre-góndola, el generador, el sistema de frenado, las palas y el tipo de torre.

Como se verá en los siguientes subapartados se selecciona un alternador de imanes permanentes con el rotor fijado al eje horizontal del aerogenerador, evitando así la multiplicación de velocidad. El eje horizontal se une a la góndola mediante el soporte de los rodamientos que van montados sobre él. En el eje horizontal se monta el buje de las palas. El dispositivo de orientación se realiza mediante veleta que se une a la góndola por medio de un soporte. El conjunto se une a la torre por medio de un soporte con rodamientos que permite su giro. El sistema de frenado que se selecciona va unido a la elección del tipo de torre, se selecciona una torre abatible que actúe como freno en caso de vientos fuertes.

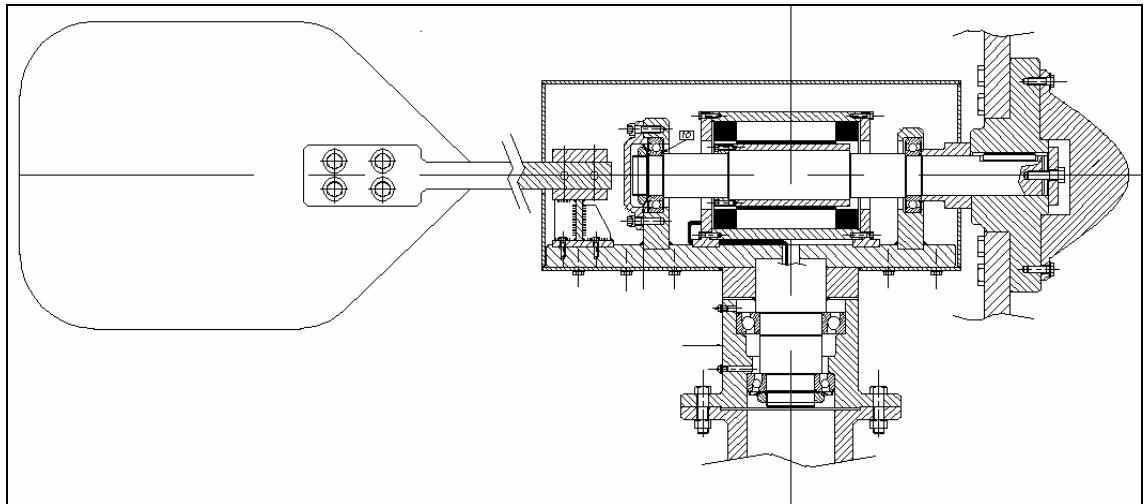


Fig. 5.1. Vista sección lateral del conjunto



5.1. Dispositivo de orientación

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para orientar el rotor perpendicular a la dirección del viento. La turbina eólica tiene un error de orientación si el rotor no está situado perpendicularmente al viento. Un error de orientación implica que no se está aprovechando toda la capacidad de las palas para capturar la energía disponible. Para solucionar esto es necesario instalar este tipo de dispositivos. A continuación se detallan tres posibles alternativas: orientación mediante aleta estabilizadora, mediante eólicas auxiliares y orientación del rotor mediante servomotor.

La solución con aleta estabilizadora se emplea principalmente para la orientación de eólicas hasta diámetros de 6 m. Esta solución consiste en una aleta que se acopla al rotor de la eólica tal como se observa en la Fig. 5.2 y mantiene el plano de rotación de las palas perpendicular al viento. Es una solución sencilla y de bajo coste, por eso se utiliza para aerogeneradores de baja potencia.

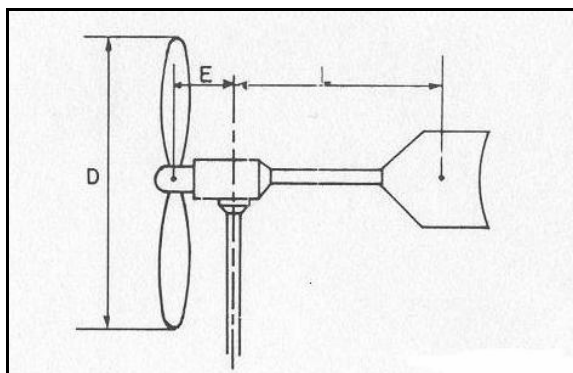


Fig. 5.2. Orientación mediante aleta estabilizadora [2]

En la Fig. 5.3 se muestra un dispositivo de orientación mediante eólicas auxiliares, las cuales se disponen en el lado del eje de la eólica principal cuyo ejes de rotación son perpendiculares a la eólica principal. Si la eólica principal no está orientada en la dirección del viento, la eólica auxiliar se pone en marcha arrastrando el tornillo sin fin hasta que se engrane sobre una corona dentada concéntrica con el eje del soporte. Las eólicas auxiliares se detienen cuando reciben el viento perpendicular a su eje.



Comparado con la alternativa de aleta estabilizadora, esta solución tiene la ventaja de ser más suave y sin movimientos bruscos pero es más cara y más complicada.

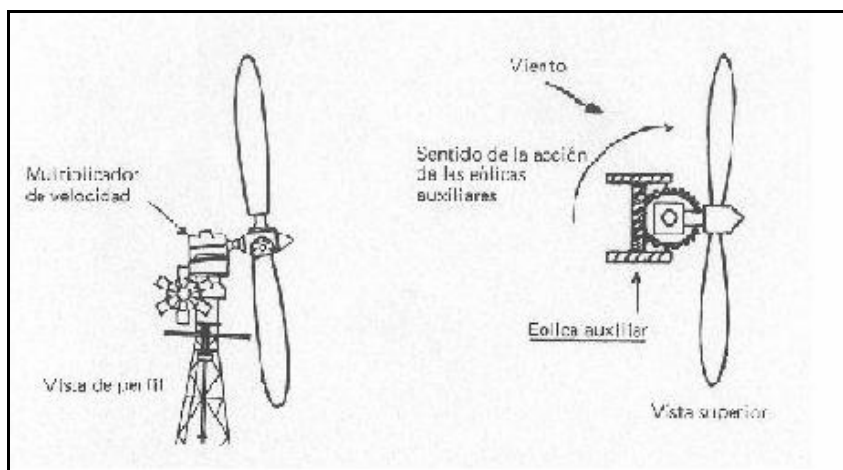


Fig. 5.3. Orientación mediante eólicas auxiliares [2]

Una última posible alternativa es la orientación del rotor de la eólica por servomotor. Esta solución consta de un motor de orientación, que puede girar en los dos sentidos, el cual está dirigido por una veleta. La veleta, que se encuentra sujeta a la góndola, toma la dirección del viento y mediante un sistema electrónico corrige la dirección del aerogenerador accionando el motor de orientación. A pesar de ser una solución muy precisa, es mucho más cara y más compleja que las comentadas anteriormente, por eso es utilizada en aerogeneradores de gran tamaño.

Así pues valorando el coste de las alternativas y su complejidad en cuanto a diseño para la aplicación se adoptará una solución con aleta estabilizadora.

Para este tipo de dispositivo de orientación de la góndola (diámetros de palas menor a 6 m) se recomienda que la distancia entre el eje de rotación de la góndola y la ubicación de la veleta sea de aproximadamente 4 veces la distancia entre el eje de rotación de la góndola y el plano del rotor.

La superficie de la veleta depende del área barrida por las palas (Ec. 5.1) . En el caso de eólicas compuestas por 2 palas la superficie de la veleta (Ec. 5.2.) tiene que ser el 4% del área barridas por las palas.



$$A_{\text{rotor}} = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 1,25^2 = 4,9\text{m}^2 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$A_{\text{veleta}} = 0,04 \cdot A_{\text{rotor}} = 0,04 \cdot 4,9 = 0,196\text{m}^2 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

En la Fig. 54. se muestra un detalle del dispositivo de orientación, consiste en una veleta unida a la góndola mediante un soporte que se colla a la base de la misma.

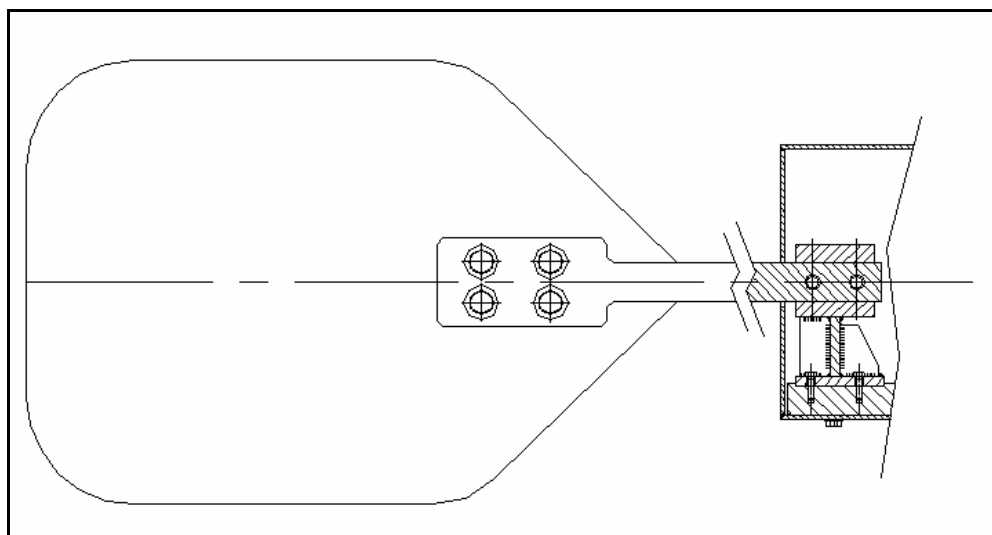


Fig. 5.4. Detalle de la veleta

5.2. Transmisión de la potencia

Normalmente el eje del rotor (eje de baja velocidad) no se acopla directamente al alternador (eje de alta velocidad) ya que la velocidad a la que giran las palas es inferior a la del accionamiento del alternador, por eso es necesario intercalar un multiplicador entre el buje y el alternador. Para realizar la unión mediante acoplamiento se unen el eje de baja velocidad al multiplicador y el alternador al multiplicador.

Pero hay otro tipo de solución, existen en el mercado alternadores de imanes permanentes que permiten acoplar el rotor del alternador directamente al eje sobre el cual se encuentra el buje. Esta solución además de ser más económica implica una



reducción de peso y de espacio en la eólica, por eso se tomará como solución esta alternativa.

La transmisión de potencia eólica se transmite a través de las palas al buje, y éste al estar acoplado al eje mediante una chaveta transmite el par al eje. El eje se sujeta gracias a una pareja de rodamientos ubicados en cada extremo del eje mediante unos soportes. Dado que el rotor del alternador se acopla directamente sobre el eje del buje, se realiza mediante una unión con interferencia con un casquillo que va collado al rotor.

5.2.1. Buje

El buje realiza la unión entre las palas y el eje y es que se encarga de transmitir la potencia al eje. Hay diversas alternativas de construcción:

- Eje por fabricado por forja dándole la forma ya del buje. Es una solución cara ya que se han de realizar las matrices y dado que es un proyecto singular el coste que supone esta solución es inviable.
- Buje unido por abrazamiento, es decir, mediante una unión con interferencia. La desventaja que presenta es que no se puede desmontar.
- Buje unido al eje mediante el perfil acanalado. Este tipo de solución es idónea para transmitir valores de pares elevados aunque el coste que supone es importante ya que se ha fresar el eje mediante rodadura y el cubo mediante brochado.
- Buje unido al árbol mediante una chaveta



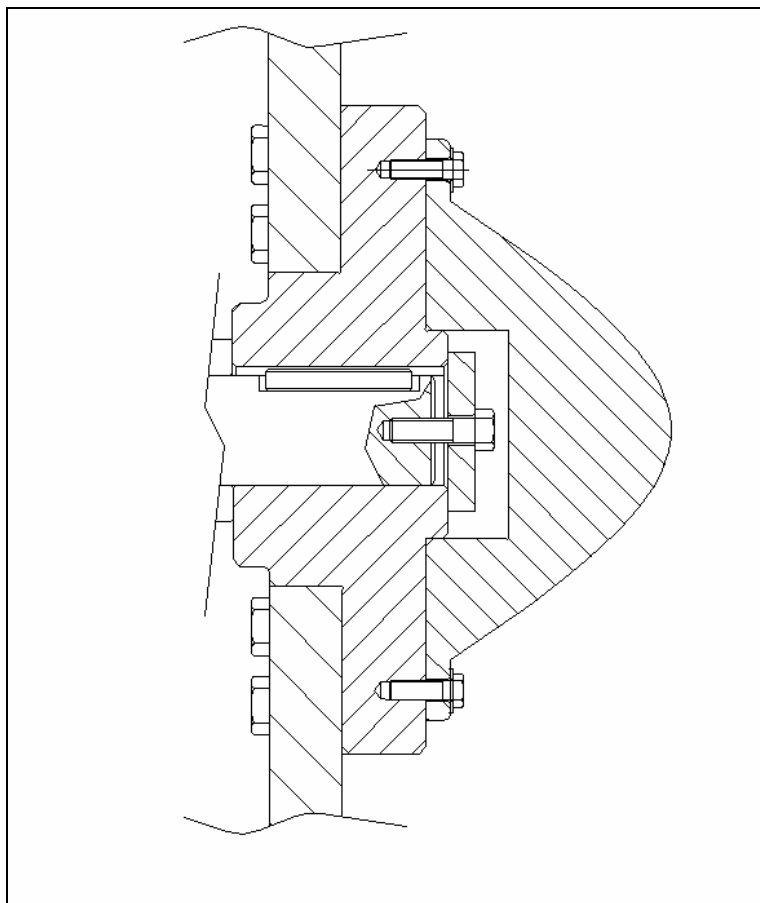


Fig. 5.5. Detalle unión buje-palas

La última solución (ver Fig. 5.5) resulta la más razonable en cuanto a coste ya que no es necesario realizar las matrices para el eje y sólo hay que mecanizar el chavetero en el buje y el eje. La chaveta se encarga de transmitir todo el par al eje por lo que se debe realizar la comprobación (ver Apartado 4 del Anexo 1). Así mismo, debido a la existencia de la fuerza centrífuga que soportan las palas (ver Apartado 1 del Anexo 1) hay que asegurar que la unión entre buje y palas no patine, por ello, se deben comprobar los tornillos que realizan dicha unión a la fuerza separadora a la que están sometidos (ver Apartado 8 del Anexo 1).

Sobre el buje se mecanizan alojamientos para poder fijar las palas mediante tornillos, por eso el estado superficial de estos alojamientos debe ser fino.



Dado que el buje es una pieza altamente solicitada debido al par que transmite mediante la chaveta el material tiene que ser de acero y en concreto se selecciona Acero St 60, ya que no es necesario utilizar aceros de tratados (aceros de cementación, nitruración...)

5.2.2. Rodamientos

Se disponen dos rodamientos rígidos de bolas de la casa SKF, uno en cada extremo del árbol. Uno de ellos está libre y otro está fijo ya que además de soportar carga radial soporta la carga axial debida al esfuerzo aerodinámico del viento. Los rodamientos seleccionados son rodamientos rígidos de bolas ya que la capacidad de soportar carga combinada es buena. Tal y como se muestra en el Apartado 3 del Anexo 1 .se comprueban que los dos rodamientos soportan las sollicitaciones que requiere la aplicación teniendo en cuenta que el viento es variable.

Dado que interesa minimizar el mantenimiento que se realice al aerogenerador se seleccionan rodamientos obturados que no necesitan ser lubricados.

Los dos rodamientos tienen el anillo interior giratorio y el anillo exterior fijo y debido a que la disposición de la carga es giratoria (teniendo en cuenta el desequilibrio generado por la palas) para el anillo interior se diseña juego y el anillo exterior se diseña con interferencia (los ajustes se encuentran en el Apartado 11 de Anexo 1).

El sistema de fijación de los rodamientos al eje se ha realizado mediante una arandela se seguridad y una tuerca entallada para el rodamiento B y para el rodamiento A se hace tope contra el rebaje del eje y mediante un casquillo que se interpone entre el rodamiento y el buje se acaba de fijar (ver Fig. 5.6). Como el rodamiento B es fijo ya que soporta también carga axial, se coloca una brida en el soporte del rodamiento que hace presión sobre el anillo exterior del mismo para evitar su movimiento. Este rodamiento transmite la fuerza axial que proviene del viento y se transmite por el eje a la brida, por eso se comprueban que los la unión que hace la brida no se abra (ver Apartado 9 del Anexo 1).



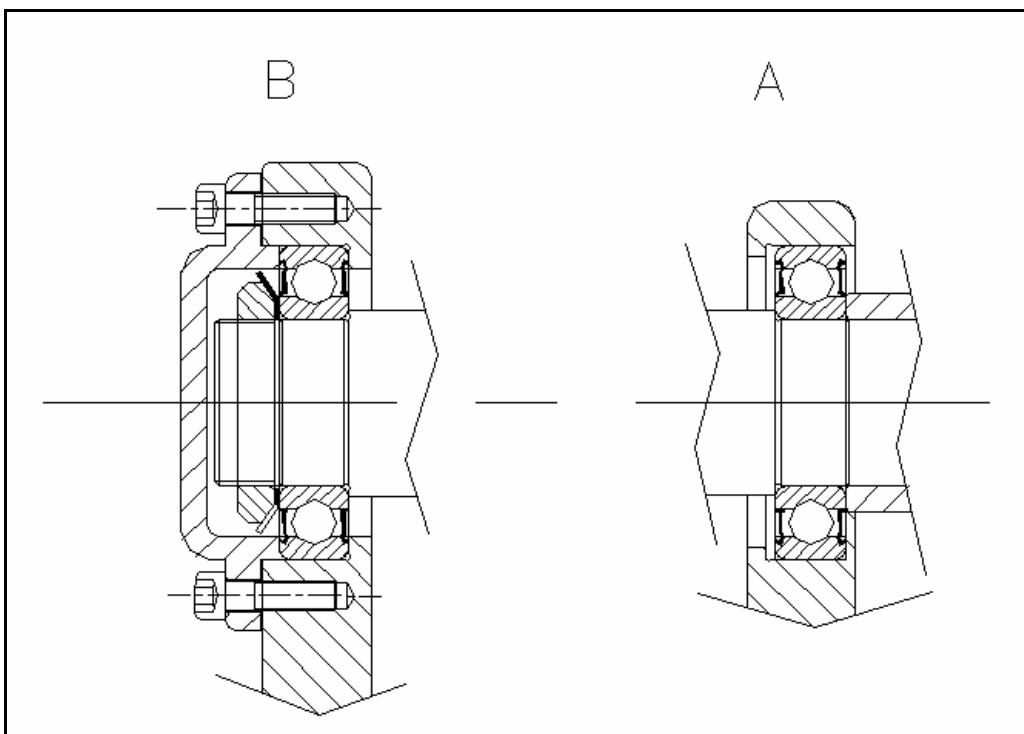


Fig. 5.6. Detalle del sistema de fijación del rodamiento A y B

5.2.3. Eje horizontal

Se selecciona Acero St 42 (conformado por laminación) idóneo para árboles moderadamente solicitados ya que no es necesario aceros más sofisticados para esta aplicación. Como se explica en el Apartado 5 del Anexo 1 el eje aguanta la fatiga debida a la torsión del movimiento rotatorio impulsado por las palas.

El eje se mecaniza (según los ajustes calculados en el Apartado 11 del Anexo 1) ya que sobre él se montan el rotor de al alternador, el casquillo con interferencia para collar el rotor, los rodamientos, el casquillo y el buje, además de disponer del alojamiento de la chaveta que se realiza por fresado.



5.2.4. Unión rotor del alternador con el eje horizontal

Hay varias alternativas para fijar el rotor del alternador al eje.

- Realizar un eje de diámetro de 71mm en vez de 56 mm (diámetro interior del rotor del alternador; corresponde al máximo diámetro del eje horizontal) para poder collar el rotor del alternador. Esta solución es muy cara ya que hay que mecanizar 7,5 mm de material en casi toda la longitud del eje para conseguir 12 mm de botón de diámetro 71 mm para fijar el rotor. Por lo tanto se descarta.
- Realizar una unión con chaveta entre el rotor y el eje, pero debido al tipo del material del rotor, que es hierro con propiedades magnéticas no es viable ya que al mecanizar este material se podrían ver alteradas las propiedades magnéticas del rotor.
- La unión por interferencia resulta la más razonable y económica a pesar de no poder desmontarla (ver Fig. 5.7).

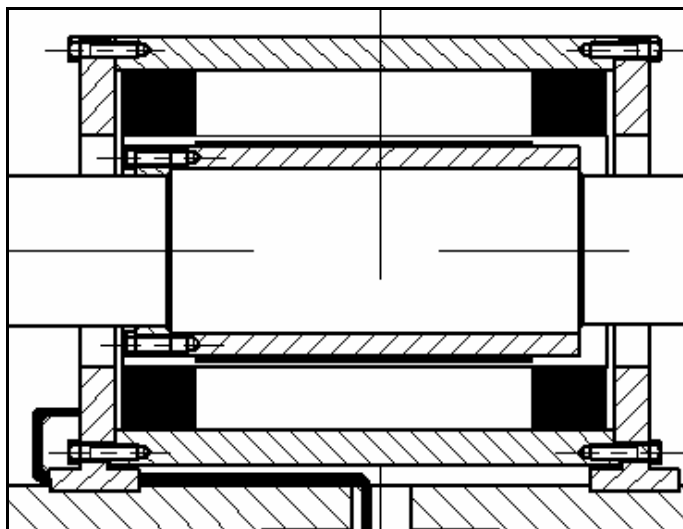


Fig. 5.7. Unión rotor – eje mediante interferencia

Se selecciona la unión por interferencia entre el eje y la pieza que collar el rotor. El tipo de interferencia encaje térmico tal y como se explica en el Apartado 6 del Anexo 1.



5.3. Góndola

La góndola consiste en una base donde se fijan todos los componentes y dos carcasas (superior e inferior) para cerrar el conjunto tal y como se ve en la Fig. 5.8.

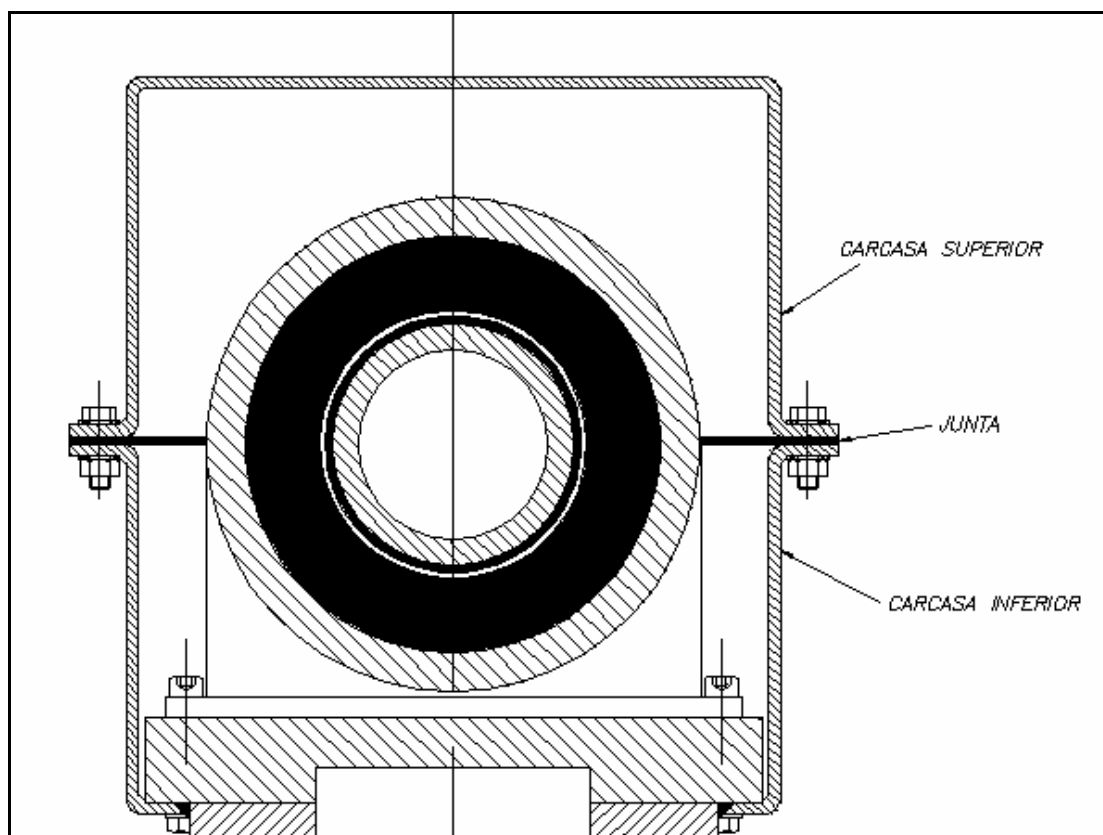


Fig. 5.8. Detalle de una sección frontal de la góndola

Sobre la base se mecanizan alojamientos para los soportes de los rodamientos y éstos se fijan a la misma mediante soldadura para asegurar una correcta alineación y no tener problemas una vez se monte el eje. Una vez soldados se mecanizan los alojamientos de los rodamientos. Hay que considerar que las soldaduras sufrirán esfuerzos a flexión debido a la componente axial que soporta el rodamiento fijo, por este motivo se comprueban las soldaduras en el Apartado 7 del Anexo 1.



Sobre la base se mecanizan alojamientos también para las patas del alternador teniendo en cuenta que las patas y los soportes deben quedar totalmente paralelos para evitar problemas de desalineación entre rotor y estator. También se mecaniza un alojamiento para colocar el eje vertical y otro para colocar el soporte del dispositivo de orientación. El acabado superficial de estos alojamientos ha de ser fino para evitar problemas en el montaje de alineamiento entre rotor y estator.

La góndola se cierra para evitar que entre la suciedad mediante dos carcasas, la carcasa inferior que se fija a la base y la superior que fija a la inferior, ambas mediante tornillos. La carcasa inferior se podría unir a la base por soldadura pero entonces no se podría desmontar, por esto se han escogido tornillos. Entre la unión de las dos carcasas se intercala una junta para mantener lo más estanco posible el interior de la góndola.

El tipo de material para realizar la carcasa ha de ser el adecuado para embutir chapa al mismo tiempo el material de la base ha de poseer buena soldabilidad por lo que selecciona Acero St 37 para ambos componentes.

5.4. Unión torre - góndola

La góndola o bastidor debe poder girar libremente respecto de la torre, por ello hay que diseñar una unión que permita este movimiento de rotación. La unión se realiza mediante un eje vertical acoplado a la base mediante un soporte con rodamientos.

La unión se divide en dos piezas, una es el eje y otra pieza que hace de botón entre la base y el eje y se unen a ellos mediante soldadura. Esta última pieza da más estabilidad a la unión y se realizan dos piezas separadas para evitar mecanizar el eje más de lo necesario, por lo que es una solución más barata ya que se desperdicia menos material.

Una elemento a tener en cuenta de cara a diseñar está unión es el cable del alternador. Una posible alternativa sería instalar una unión por anillos rozantes para que el cable no sufriera en caso de que la góndola girará siempre en el mismo sentido, pero el coste que supone lo hace inviable. Así pues, la alternativa que se elige consiste en pasar el cable a



través del eje. Se considera que el cable es suficientemente largo en caso de que siempre girará hacia el mismo sentido no habría problema. Hay que tener en cuenta que el cable que sale del alternador es de Poliuretano material con buena resistencia y rigidez mecánica. Para no haber de mecanizar un agujero para poder pasar el cable se compra ya un eje hueco, de esta manera se ahorra dinero en mecanizar todo el agujero.

5.4.1. Rodamientos

Para aerogeneradores de gran potencia se utilizan coronas de rodamientos, pero esta solución es cara para la aplicación objeto de estudio. Por eso se seleccionan rodamientos de contacto angular del Catálogo SKF ya que pueden soportar carga combinada (axial y radial).

Hay dos tipos disposiciones para este tipo de rodamientos en ejes:

- La disposición en "X" es una mala disposición para aguantar carga radiales sobre el eje
- La disposición en "O" se utilizan para ejes cortos y permite soportar cargas radiales además de ser una disposición que da al árbol más estabilidad. Por este motivo se selecciona la disposición en O.

Igual que en el caso del eje horizontal uno de los rodamientos está fijo (soporta carga axial y radial) y por lo tanto está fijado al eje mediante una arandela de segura y una tuerca entallada y el otro esta libre (solo soporta la fuerza radial).

Los dos rodamientos tienen el anillo interior giratorio y el anillo exterior fijo y debido a que la disposición de la carga es giratoria para el anillo interior se diseña juego y el anillo exterior se diseña con interferencia.

La unión queda totalmente cerrada por lo que se montan dos engrasadores, uno para cada rodamiento. El tipo de grasa que se utiliza consiste en una grase base de aceite mineral (ver Fig. 5.9). Para evitar que la grasa se salga de la zona de trabajo de los rodamientos se monta un anillo Nilon fijado en el interior del rodamiento fijo.



Los rodamientos sólo se comprueban estáticamente (ver Apartado 10 del Anexo 1) ya que no es necesario calcular a fatiga, la góndola normalmente gira despacio.

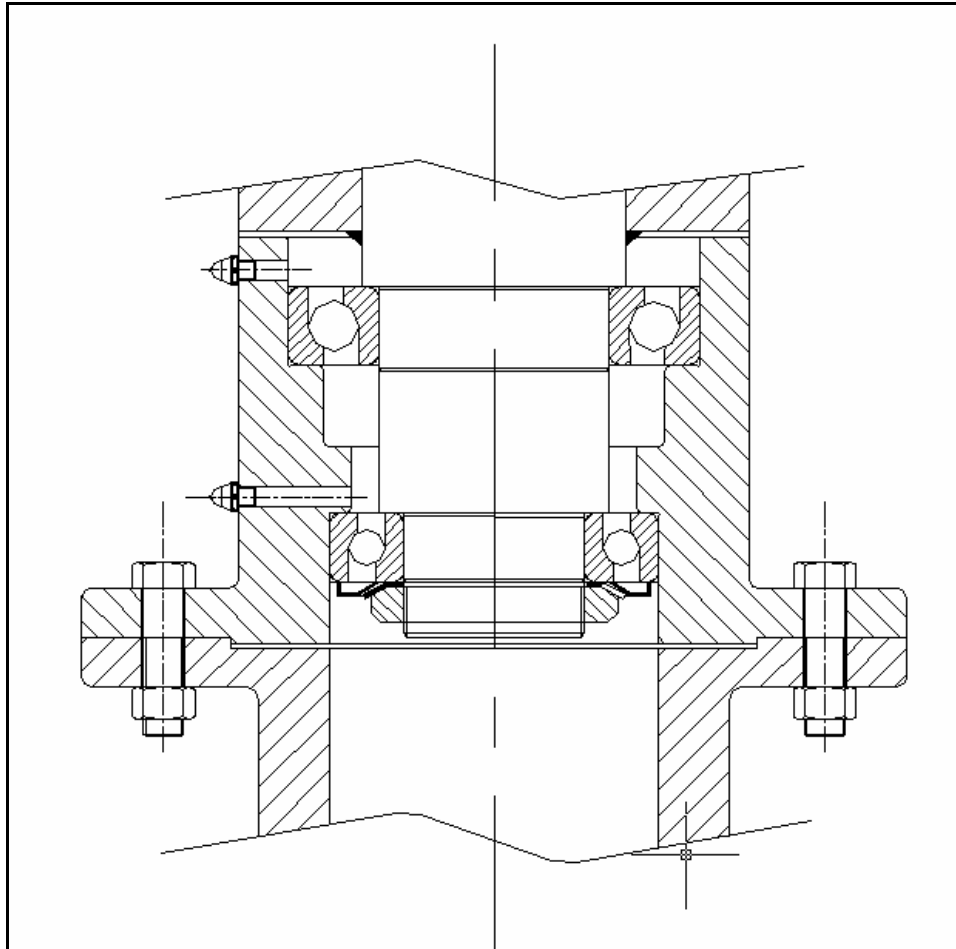


Fig. 5.9. Detalle unión torre-góndola

5.4.2. Eje vertical

Sobre el eje vertical (partiendo de un eje hueco) se montan los rodamientos (ver los ajustes en el Apartado 11 del Anexo 1) que permiten hacer girar la góndola y el material que se selecciona para el eje es Acero St 42 igual que en el caso del eje horizontal. Esta unión gira muy lentamente y con menor frecuencia que el eje horizontal por eso no se calcula el eje a fatiga.



5.4.3. Soporte rodamientos

El soporte de los rodamientos del eje vertical sirve de unión entre la góndola y la torre y se une a esta última mediante tornillos y tuercas. El estado superficial de las zonas donde se alojen los anillos exteriores de los rodamientos debe ser fino tal y como se explica en el Apartado 11 del Anexo 1. El material que se escoge para esta pieza es Acero St 34 adecuado para la mecanización a la que se le debe someter.

5.5. Generador

El generador es una de las partes más importantes de los aerogeneradores cuya misión es transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.

Se utilizan los generadores de corriente continua (dínamos) en algunos aerogeneradores de pocos vatios (entre 100 y 5000 W), pero normalmente se incorporan generadores de alterna síncronos (alternadores), debido a su mayor rendimiento, aunque luego hay que instalar un elemento rectificador que permita utilizar corriente continua para almacenar la energía en baterías y a la salida de éstas un ondulator para poder pasar la corriente continua a alterna. En el caso de aerogeneradores de más de 10 kW de potencia se usan indistintamente generadores síncronos y asíncronos.

Para esta aplicación dado que la potencia requerida es baja se instalará un generador de alterna síncrono.

Dentro de los alternadores hay varias alternativas a tener en cuenta.

ALTERNADORES

- Ventajas: son baratos y generalmente se presentan armados.
- Desventajas: se han diseñado para trabajar a altas velocidades que son imposibles lograr con corrientes de viento, por lo que se es necesario el uso de multiplicadores lo cual implica pérdida de potencia debido a la fricción y ser una solución más cara. Requieren un mantenimiento frecuente.



ALTERNADORE DE IMANES PERMANENTES

- Ventajas: son baratos, eficientes y tienen una enorme capacidad de producción y su construcción puede ser muy robusta. Este tipo de alternadores son los más potentes a todas sus velocidades, tanto bajas como altas. No requiere mantenimiento debido a la total ausencia de piezas en rozamiento. A igual potencia es más una ligero y económico comparándolo con otro tipo de alternadores.
- Desventajas. Su construcción puede ser muy complicada. Requiere cierto maquinado.

MOTOR DE INDUCCIÓN TRABANADO COMO ALTERNADOR

- Ventajas. Son baratos y relativamente sencillos de convertir. Poseen buena eficiencia a baja velocidad
- Desventajas: la capacidad de generación la limita la resistencia interna, son ineficientes a altas velocidades y requieren cierto maquinado.

De cara a optimizar interesa un alternador que aproveche toda la potencia posible eólica a en un rango muy amplio de funcionamiento y que genere poco mantenimiento. Además ha de ser lo más ligero posible.

Siguiendo estos tres criterios se selecciona un alternador de imanes permanentes ya que a pesar de que los alternadores clásicos son baratos es necesario instalar un multiplicador entre el alternador y el rotor lo que implica pérdida de potencia (unidos mediante acoplamiento) además de requerir un mantenimiento frecuente, lo cual encarece la solución. Con respecto a los motores de inducción trabajando como alternadores no se tienen en cuenta para la elección ya que sólo poseen buenas eficiencias a bajas velocidades.

Se selecciona del catálogo ALXION los alternadores 145 STK ya que la potencia que suministra es necesaria para la aplicación. El resto de alternadores del catálogo son demasiado potentes, por lo que se descartan. Además este tipo de alternadores son los



que tienen el peso más bajo. En la Fig. 5.10 se muestra un gráfico donde se ve para cada tipo de alternador de esta gama la potencia generada en función de la velocidad de giro.

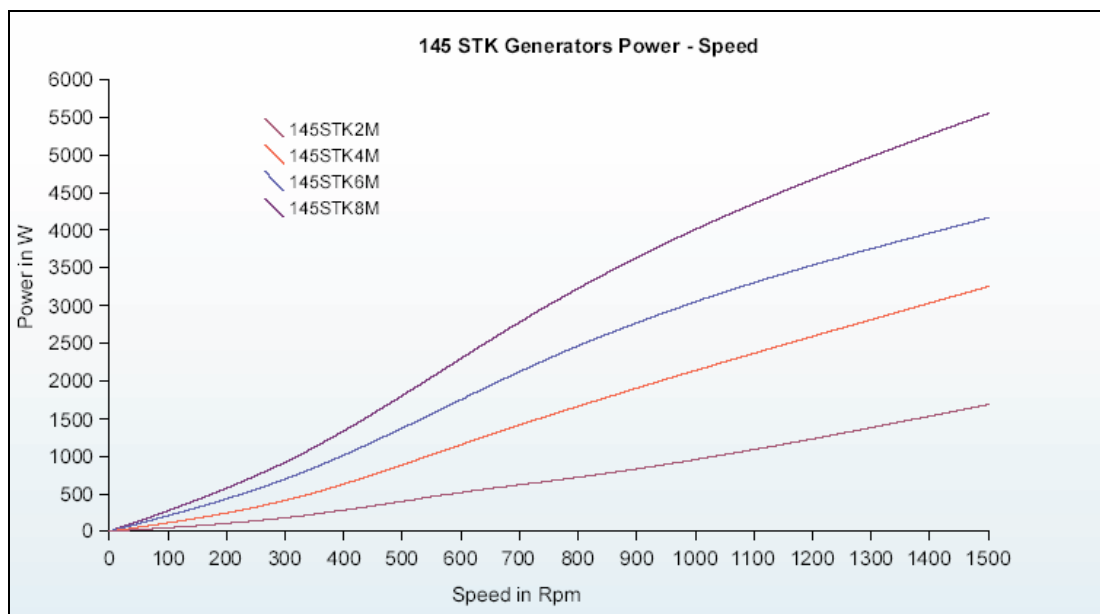


Fig. 5.10. Potencia (W)- Velocidad Alternador (min^{-1}) [5]

En la Tabla 5.1 se muestran las potencias que son capaces de dar considerando la velocidad media del viento de la ubicación que se traduce a 390 min^{-1} tal y como se comentó en el Capítulo 4.

Alternador	Potencia a v_m (W)
145 STK2M	250
145 STK4M	600
145 STK6M	1100
145 STK8M	1350

Tabla 5.1. Potencia de los alternadores

La potencia nominal que hay cubrir son 1057,6 W por lo que selecciona el 145 STK 6M.



5.6. Sistema de frenado

Cuando los vientos son demasiado fuertes es necesario que el aerogenerador esté provisto de un sistema que permita disminuir las tensiones mecánicas de las palas. Hay varias alternativas para poder frenar el aerogenerador.

- Frenos electromagnéticos: no son idóneos dado que necesitan corriente para poder trabajar cosa que complica el diseño del aerogenerador.
- Freno aerodinámico por palas: este tipo de freno se utiliza normalmente para aerogeneradores de gran potencia. Cuando la velocidad del viento es muy elevada las palas giran sobre su eje, lo cual implica pérdida de sustentación y al mismo tiempo provoca una disminución del rendimiento aerodinámico que hace que el rotor gire más lento.
- Freno aerodinámico mediante torres abatibles (ver Fig. 5.11) : la torre bascula respecto al suelo que permite realizar maniobras de abatimiento (si la velocidad del viento es muy elevada, en este caso actuaría como freno) y maniobras de elevación. Para realizar estas maniobras es necesario atirantar la torre mediante cables laterales para guiar la trayectoria de bajada y cables en los otros dos lados para subir o bajarla. La unión de los cables al suelo se realiza mediante tensores, los cuales permiten regular la tensión de cada cable.

Los dos cables laterales se han de colocar en el mismo plano horizontal que el pie del soporte de la torre y se deben alinear con el eje de basculamiento de dicho pie. Uno de los cables se enrolla a un cabrestante mecánico accionado manualmente.



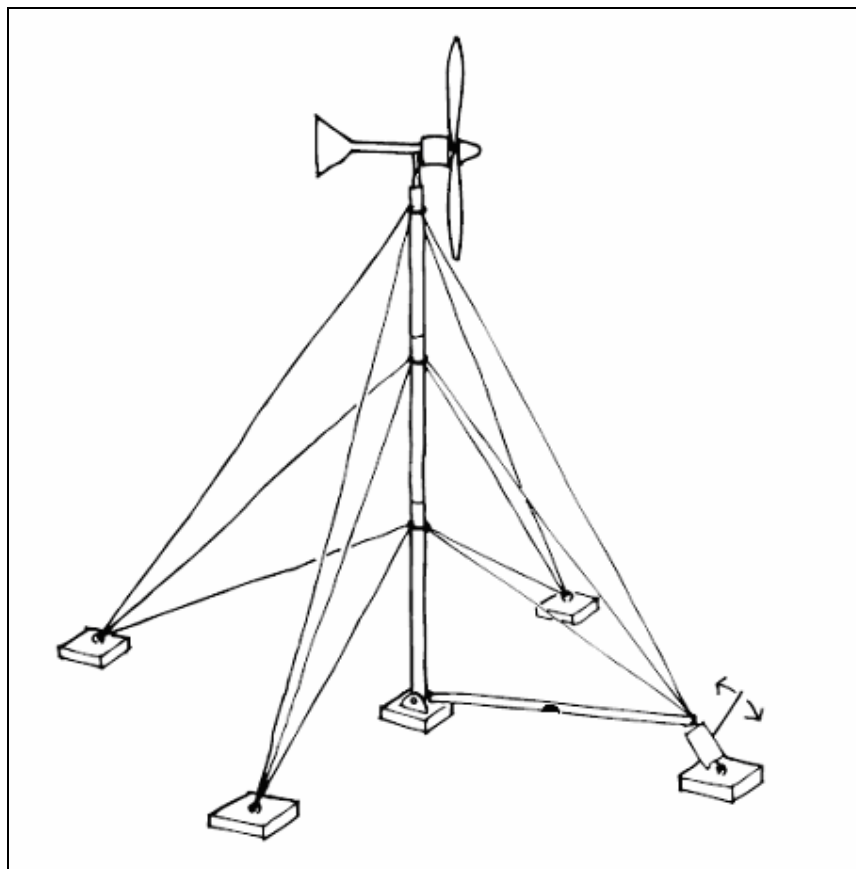


Fig. 5.11. Sistema de frenado mediante torre abatible [6]

En caso de vientos fuertes la fuerza del viento hace que el cable se desenrolle hasta llegar a una situación de equilibrio (ver Fig. 5.12), en la que la superficie de barrido de las palas, se encuentra inclinada respecto al viento, lo cual implica pérdida en el rendimiento de palas y por lo tanto, disminuye la velocidad de giro de éstas. La elevación del conjunto se realiza manualmente.

De todas las alternativas expuestas se selecciona el sistema de frenado mediante torre abatible.



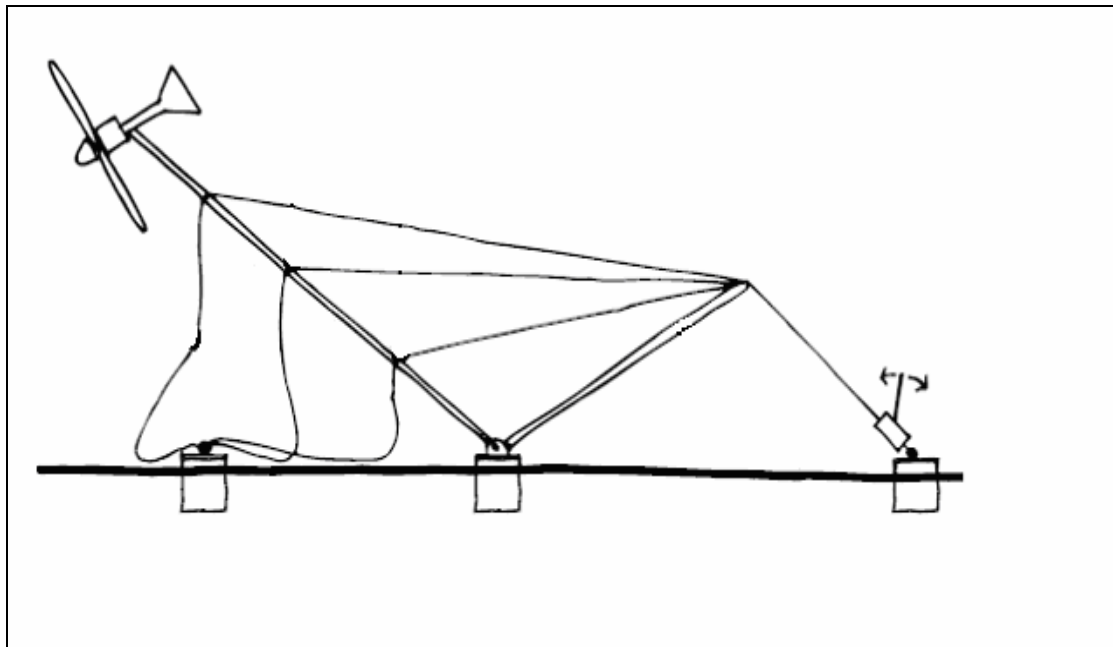


Fig. 5.12. Posición de frenado para torres abatibles [6]

5.7. Palas

Según sea el tipo de unión u anclaje de las palas con el buje existen dos posibles soluciones.

Una de ellas son las palas de paso variable, las cuales admiten rotación controlada sobre su eje a través de unos rodamientos. Esta solución precisa de un equipo de control de paso electrónico. El controlador electrónico comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza valores demasiado altos, el controlador envía ordenes al mecanismo de cambio de ángulo de paso, que hace girar las palas ligeramente. Este sistema precisa de una ingeniería muy desarrollada para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado.

Las palas de paso fijo no admiten rotación sobre su eje, realizándose el control de potencia mediante un diseño de pérdida aerodinámica de las palas. Esto se consigue torsionando la pala a lo largo de su eje, es decir, aumentando el ángulo de ataque del



perfil de la pala a lo largo de su eje. Gracias a esto, la pala pierde sustentación de forma gradual y se evita que se transmita un par excesivo sobre el rotor. Este tipo de solución es la más adoptada en aerogeneradores de baja potencia ya que comparada con las palas de paso variable, en esta se evitan instalar partes móviles del rotor y un complejo sistema de control, que aumentan los costes considerablemente.

Finalmente se seleccionan palas de paso fijo debido a su mayor simplicidad y su menor coste.

El material utilizado para las palas debe responder a frecuentes variaciones en la velocidad del viento y a ráfagas de vientos fuertes. Por ello el material de las palas debe ser:

- Ligero
- Perfectamente homogéneo
- Indeformable
- Resistente a la fatiga mecánica
- Resistente a la erosión y a la corrosión
- De coste bajo para que el aerogenerador sea en cuanto a precio competitivo

Para estas solicitaciones hay varias alternativas:

- Madera: sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien a la fatiga
- Metales: se emplean aleaciones ligeras de aluminio con silicio o con magnesio ya que con estos materiales se obtienen costes muy bajos si se producen en grandes series. Una de las desventajas es que el aluminio resiste mal a la fatiga, lo cual limita su empleo.
- Materiales sintéticos, resinas, fibras y plásticos: destacan por su bajo peso, insensibilidad a la corrosión y su buena resistencia a la fatiga pero el coste es más elevado que en los casos anteriores.



Para esta aplicación se selecciona la madera como material de las palas, ya que cumple con las solicitaciones y el coste es más bajo que otro tipo de material.

Como ya se comentó en el alcance del proyecto no se diseñan las palas pero sí que se estudian en el Apartado 1 del Anexo 1 los parámetros básicos de la forma de las palas: se selecciona un perfil NACA 4412 y estudiando los ángulos de ataque, sustentación e inclinación de varias secciones se perfilan las palas.

En el mismo anexo se hace una estimación de su rendimiento aerodinámico y se calculan los esfuerzos que soportan (ver Apartado 2 del Anexo 1).

5.8. Torre

La torre es elemento que sustenta todo el aerogenerador. Existen varias soluciones posibles para el diseño de la torre dependiendo del tamaño del aerogenerador.

Para grandes aerogeneradores se tratan de torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 m y acopladas con bridas en los extremos (ver Fig. 5.13).



Fig. 5.13. Torres tubulares de acero [1]

Otra alternativa son las torres de celosía (ver Fig. 5.14) que son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de este tipo de torres es su coste, ya que sólo requiere la mitad de material que una torre tubular con la misma rigidez. Pero debido a su apariencia visual este tipo de torres han ido desapareciendo.





Fig. 5.14. Torre de celosía [1]

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas con cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y por tanto de coste (ver Fig. 5.15).



Fig. 5.15. Torres de mástil [1]

Además de las soluciones que se han comentado existen soluciones de torres híbridas. Estas son torres realizadas con diferentes combinaciones de las mencionadas como la



que se puede observar en la Fig 5.16 de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada.



Fig. 5.16. Torres híbridas [1]

Debido a que la potencia a generar es baja y considerando las dimensiones y peso del aerogenerador se aplicará la alternativa de torre de mástil además de ser la solución adecuada para instalar el sistema de frenado que ya se ha comentado anteriormente.





6. Montaje

Primero de todo se mecanizan los alojamientos de los soportes de los rodamientos, las patas del alternador y el soporte para la veleta y se realizan los agujeros para los tornillos en la base. Se colocan los soportes de los rodamientos del eje horizontal, se sueldan y entonces se pasa a mecanizar los alojamientos de los rodamientos. Como ya se comentó, se realiza de esta manera para evitar desalineaciones del eje con el estator del alternador. Se montan sobre la base el eje vertical y la pieza que hace unión entre la base y el eje. Se suelda el eje a esta pieza y la pieza sobre la base y se muela la soldadura. Sobre el eje vertical se coloca el primer rodamiento y se monta ya el soporte de los rodamientos de este eje. Posteriormente se coloca el segundo rodamiento y se fija mediante una arandela de seguridad y una tuerca entallada. Se aprovecha entonces para montar los engrasadores. El siguiente paso es collar el alternador a la base pasando el cable por el agujero de la base y el eje vertical. Antes de montar el eje horizontal hay que montar sobre él, el rotor del alternador y el botón que al cual se colla (unido al eje con interferencia). Se aloja el rodamiento fijo sobre su soporte y se acopla el eje horizontal entre los soportes de los rodamientos y el alternador. Se monta entonces el rodamiento libre y el casquillo que hace presión sobre éste, la chaveta del eje y el buje. Para acabar de tener el eje montando con los dispositivos de fijación de los rodamientos se coloca la pieza que hace presión contra el buje, el tornillo y se fija el rodamiento fijo con una arandela de seguridad y una tuerca entallada. Una vez montado el eje se puede montar ya la veleta a la góndola, se colla la veleta a su eje y éste al soporte que al mismo tiempo va collado a la base. A continuación se coloca la carcasa inferior que va collada a la base, se monta sobre ésta la junta y se cierra con la carcasa superior. Finalmente se coloca el embellecedor sobre el buje.





7. Mantenimiento

Dentro de las tareas de mantenimiento se debe distinguir entre mantenimiento preventivo o planificado y el correctivo o no planeado como respuestas a problemas descubiertos por el usuario.

En este capítulo se habla de mantenimiento preventivo. Dentro de las tareas de mantenimiento se deben realizar inspecciones anuales de:

- Inspección y ajuste de tuercas
- Inspección de las palas
- Inspección de los ejes
- Inspección del alternador
- Engrasar los rodamientos del soporte de la góndola
- Inspección de las conexiones eléctricas





8. Análisis económico

En este capítulo se estudian todos los aspectos económicos del proyecto para ver si el proyecto es viable desde el punto de vista económico. Primero de todo se estima el presupuesto del proyecto y a partir de éste se estudia la rentabilidad de la inversión y el período de retorno de la inversión.

8.1. Presupuesto del proyecto

En la Tabla 8.1 se muestra una estimación de la inversión del proyecto. La tabla hace diferencias entre los componentes comprados y fabricados. En el precio de los componentes fabricados se incluye el precio de los materiales utilizados y el coste de la mano de obra.

COMPONENTES COMPRADOS	PRECIO (€)
Alternador	300
Batería	250
Inversor	185
Rectificador	185
Rodamiento rígido de bolas de contacto angular 7211 B	40
Rodamiento rígido de bolas de contacto angular 7214 B	40
2 Rodamientos rígidos de bolas	45
2 Engrasadores	20
Otros: tornillos, tuercas, arandelas, junta ...	35
COMPONENTES FABRICADOS	PRECIO (€)
Góndola	900
Palas	200
Torre	300
TOTAL PRESUPUESTO	2.500 €

Tabla 8.1. Presupuesto del proyecto



8.2. Estudio de rentabilidad

8.2.1. Cálculo del coste de generación de energía

En este subapartado se determina el precio del kW·h generado por el aerogenerador de baja potencia y así comparándolo con el precio del kW·h suministrado por las compañías eléctricas se podrá asegurar si el proyecto es rentable o no económicamente hablando.

Sabiendo que la inversión inicial es de 2500 € tal y como se explicó en el apartado 8.1 se pasará ahora a calcular la tasa interna de rentabilidad que indica la viabilidad del proyecto. La tasa interna de rentabilidad depende del tipo de interés aplicado r y de los años de vida útil de la instalación n . En la Ec. 8.1 se muestra la fórmula para calcular el TIR.

$$TIR = \frac{r}{\left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)} \quad (\text{Ec. 8.1})$$

La tasa de interés aplicada r es el tipo de interés medio del dinero en el momento del estudio. Este parámetro hace que los gastos financieros asociados a la inversión varíen de forma que el precio de la energía generada sea mayor o menor. En cuanto a la vida útil de la planta n es el tiempo estimado de funcionamiento de la instalación. Así pues estimando una r de 0,07 y una n de 15 años de en la Ec. 8.2 se muestra TIR para el proyecto.

$$TIR = \frac{r}{\left(1 - \frac{1}{(1+r)^n}\right)} = \frac{0,07}{\left(1 - \frac{1}{(1+0,07)^{15}}\right)} = 0,1098 \quad (\text{Ec. 8.2})$$

Así la fórmula que fija el coste de capital C_c por kW·h generado [3] (ver Ec. 8.3) será función de la inversión inicial I , de la tasa interna de rentabilidad TIR, de la potencia de la instalación P y del parámetro denominado factor de capacidad FC, el cual representa el cociente entre la energía producida anualmente en kW·h y la que podría producir si el aerogenerador funcionase continuamente.



$$C_c = \left(\frac{I}{P}\right) \cdot \left(\frac{TIR}{FC \cdot 8760}\right) \quad (\text{Ec. 8.3})$$

En la Ec. 8.3 el producto de numerador $I \cdot TIR$ representa el coste de capital por año y el producto de los denominadores representa la producción anual de energía 10,5 h/día a la velocidad ponderada el factor de capacidad FC [3] se muestra en la Ec. 8.4.

$$FC = \frac{h_{\text{funcionamiento}}}{h_{\text{año}}} = \frac{10,5 \text{ h/día} \cdot 365}{24 \text{ h/día} \cdot 365} = 0,44 \quad (\text{Ec. 8.4})$$

En Ec. 8.5 se calcula el coste del capital.

$$C_c = \left(\frac{I}{P}\right) \cdot \left(\frac{TIR}{FC \cdot 8760}\right) = \left(\frac{2500}{1056,6}\right) \cdot \left(\frac{0,1098}{0,4375 \cdot 8760}\right) = 0,067 \text{ €/kW}\cdot\text{h} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

Finalmente, el coste de generación de cada $\text{kW}\cdot\text{h}$ viene dado por la suma de los costes de capital más los de operación y mantenimiento. Dentro de los costes anuales de operación y mantenimiento se pueden incluir reposiciones pero para simplificar se supone que estos costes suponen alrededor del 2% de la inversión inicial. En la Ec. 8.6 se especifica el cálculo de los costes de operación y mantenimiento.

$$C_{om} = \frac{0,02 \cdot I}{P \cdot FC \cdot 8760} = \frac{0,02 \cdot 2500}{1,058 \cdot 0,4375 \cdot 8760} = 0,012 \text{ €/kW}\cdot\text{h} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

Así pues los costes de generación de electricidad (Ec. 8.7) son la suma de los costes de capital (Ec. 8.5) más los costes de operación y mantenimiento (Ec. 8.6).

$$\text{Precio/kW}\cdot\text{h} = C_c + C_{om} = 0,079 \text{ €/kW}\cdot\text{h} \quad (\text{Ec.8.7})$$

Teniendo en cuenta que el precio de compra, establecido por ley está alrededor de 0,1 €/kW·h se deduce que el coste de generar 1 kW·h mediante energía eólica es más barato.

8.2.2. Cálculo del período de retorno de la inversión

El período de retorno de la inversión es el tiempo que transcurre hasta que se amortiza la inversión. Para ello hay que estudiar el movimiento de fondos durante los primeros años de explotación de la instalación. El movimiento de fondos es la diferencia entre gastos e ingresos que genera la inversión.



Los gastos de la instalación son:

- Inversión inicial
- Gastos de operación y mantenimiento

Los ingresos que genera la instalación son:

- Ahorro de consumo de electricidad

De los gastos de la instalación se conoce la inversión inicial. En cambio los gastos de operación y mantenimiento son desconocidos. Como en Ec. 8.6 se supondrán un 2% de la inversión inicial (para simplificar los gastos de operación y mantenimiento se suponen gastos fijos e invariables por tiempo). Así pues en resumen los gastos de la instalación son:

$$\text{Gastos} = C_{om} = 0,02I = 0,02 \cdot 2500 = 50\text{€} \quad (\text{Ec. 8.8})$$

El ahorro de consumo de electricidad se calcula con la factura de electricidad anual que se debería pagar a la compañía eléctrica si se utilizase el servicio que ofrecen. La facturación básica se compone de dos términos:

- Término de facturación de potencia; es el producto de la potencia a facturar, PF (kW), por el precio de la potencia t_p (euros/kW·mes), por el número de meses N.
- Término de facturación de energía; es el producto de la energía consumida, EC (kW·h) por el precio del término de la energía t_e (euros/kW·h).

A estos dos términos hay que sumarle el alquiler así como el IVA (16% sobre el total de la factura). En la Tabla 8.2 se muestra el formato de la factura de electricidad.



POTENCIA	$PF \cdot t_p \cdot N$
ENERGÍA	$EC \cdot t_e$
ALQUILER	$0,72 \cdot N$
TOTAL	$PF \cdot t_p \cdot N + EC \cdot t_e + 0,72 \cdot N$
IVA	16%
TOTAL FACTURA	$1,16 \cdot (PF \cdot t_p \cdot N + EC \cdot t_e + 0,72 \cdot N)$

Tabla 8.2. Formato de factura

Los términos t_p y t_e vienen clasificados en función de la tensión a la que se realiza el suministro y la potencia contratada con la compañía. En este caso el suministro corresponde a un valor inferior a 1000 V (Baja tensión) y a una potencia contratada de 4,4 kW (valor que se toma a la vista de los resultados del estudio eléctrico realizado en el Capítulo 4). Entonces según esto las tarifas son:

$$-t_p = 1,69 \text{ euros/kW} \cdot \text{mes}$$

$$-t_e = 0,10 \text{ euros/kW} \cdot \text{h}$$

Para calcular la factura anual de energía es necesario calcular la energía consumida EC por año. De la Ec. 4.6 se conoce la energía consumida media diaria y como ya se supuso en el Capítulo 4 que la demanda de energía eléctrica es constante durante todo el año en la Ec. 8.9 se detalla la energía consumida anual.

$$EC = E_{\text{media}} \cdot 365 = 10095 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}} \cdot 365 \text{ días} = 3684,68 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{año} \quad (\text{Ec. 8.9})$$

En la Ec. 8.10 se muestra el ahorro de consumo de energía eléctrica, que no es más que el total de la factura.

$$\text{Ahorro} = 1,16 \cdot (4,4 \cdot 1,69 \cdot 12 + 3685,68 \cdot 0,1 + 0,72 \cdot 12) = 541,07 \text{ euros/año} \quad (\text{Ec. 8.10})$$

En resumen sabiendo el coste de la inversión inicial, los costes de operación y mantenimiento y los ingresos que se generan (ahorro de consumo de energía eléctrica) se puede calcular el período de retorno de la inversión. En la Tabla 8.3 se detalla el movimiento de fondos anualmente, donde se observa que el periodo de retorno (PAY-BACK) es de 4,1 años.



CONCEPTO	HORIZONTE					
	0	1	2	3	4	5
Inversión	2500					
Costes	50	50	50	50	50	50
Total pagos	2550	50	50	50	50	50
Total cobros	541,07	541,07	541,07	541,07	541,07	541,07
Movimiento de fondos	-2008,93	491,07	491,07	491,07	491,07	491,07
Mov.de fondos acumulado	-2008,93	-1517,86	-1026,79	-535,72	-44,65	446,42

Tabla 8.3. Movimiento de fondos del proyecto



9. Análisis ambiental

El análisis ambiental tiene como objetivo identificar, describir y valorar los efectos previsibles que el proyecto en sí puede provocar sobre los recursos naturales y el medio ambiente. Para ello se evaluarán los posibles impactos en todas las fases del proyecto.

9.1. Fase de planificación y diseño

Desde la fase de concepción del aerogenerador se han de tener en cuenta ciertos aspectos que pueden causar efectos importantes durante la fase de explotación u operación. Uno de los efectos negativos que producen los aerogeneradores consiste en el ruido que hacen cuando están en funcionamiento, por eso, se tienen que buscar diseños de palas y elementos mecánicos de transmisión que no produzcan mucho ruido.

Dentro de esta fase, se ha de buscar un emplazamiento óptimo tal que no genere un impacto visual ni un impacto derivado de las sombras que produce el aerogenerador así como que respete la avifauna existente en la zona. Es obvio que obtener un impacto nulo es imposible, así pues se buscarán emplazamientos donde éste sea mínimo.

9.2. Fase de construcción

Durante la fase de construcción existe un impacto considerable sobre la flora de la zona donde se vaya a instalar debido a movimientos de tierra, cimentaciones, accesos, caminos, etc. En el caso de un aerogenerador de baja potencia las consecuencias de su instalación serán mínimas aún así es conveniente una vez realizada la instalación dejar el terreno lo más parecido posible al entorno natural.

9.3. Fase de operación

La fase de operación es una de las más importantes en cuanto a impacto medio ambiental se refiere ya que se tienen que considerar diversos aspectos, tales como la avifauna, el impacto visual, el impacto derivado del ruido y el impacto de la sombra que produce el aerogenerador.



9.3.1. Avifauna

En referencia a los efectos sobre la avifauna, existen casos puntuales de colisiones de aves con turbinas eólicas. Aún así debe tenerse en cuenta las rutas de migración y zonas peculiares con alto número de especies sensibles o en peligro de extinción. De todas formas al tratarse de un aerogenerador de tamaño pequeño los efectos sobre las aves son mínimos.

9.3.2. Impacto Visual

Respecto al impacto visual, cabe destacar la dificultad de evaluación del mismo, ya que si es verdad que los aerogeneradores atraen la atención, no es menos cierto que la reacción que provoca en los observadores es subjetiva y difícil de cuantificar.

9.3.3. Impacto derivado del ruido

El impacto derivado del ruido que hacen los aerogeneradores durante su funcionamiento puede dividirse en dos tipos en función de la naturaleza de su fuente: ruido mecánico procedente del generador, caja multiplicadores y elementos de transmisión y ruido aerodinámico producido por el movimiento de las palas.

El primero se puede reducir mejorando los diseños. En cambio el segundo depende del número de palas, de las formas de las mismas y de las turbulencias locales. Al aumentar la velocidad del viento, aumenta la velocidad de rotación y por tanto el ruido se intensifica, por lo que se recomienda diseños en los que la velocidad del rotor no sea excesiva.

A pesar de estas recomendaciones de cara a disminuir este efecto, es importante asegurar que el aerogenerador no supere los límites permisibles de ruido.

9.3.4. Impacto derivado de las sombras

Los aerogeneradores, al igual que el resto de estructuras altas, proyectan sombra en las áreas vecinas cuando el Sol esta visible. Si existen personas que vivan cerca de la turbina pueden verse molestados si las palas del rotor cortan la luz solar, causando un efecto de parpadeo cuando el rotor está en movimiento. Si se conoce la zona donde el potencial efecto de parpadeo va a tener un determinado tamaño, se es capaz de situar las turbinas de forma que se evite cualquier molestia para los vecinos.



Conclusiones

- El coste de generación de 1 kW·h es menor comparándolo con el que ofrecen las compañías eléctricas. De hecho la energía eólica (parques eólicos) puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón, las centrales de combustible e incluso con la energía nuclear.
- El rendimiento de la instalación es bajo. El rendimiento de la aplicación depende del rendimiento de las palas y del rendimiento del alternador. Básicamente el rendimiento de las instalaciones eólicas es bajo por el proceso de transformar la energía eólica en mecánica (rendimiento de las palas). Por eso se instalan baterías para poder almacenar energía eléctrica, para poder en todo momento suministrar la energía que demanda la casa. En caso de que el viento no sople lo suficiente durante varios días, se pueden instalar sistemas híbridos, es decir, sistemas de generación de energía eléctrica compuestos por aerogeneradores y otro sistema como por ejemplo grupos electrógenos, placas fotovoltaicas, etc.
- Gracias al tipo de alternador seleccionado, los costes de mantenimiento se reducen, se simplifica el diseño y se evita la pérdida de potencia generada por el elemento multiplicador.
- El período de retorno de la inversión es de 4 años por lo que 11 años de la vida del aerogenerador se generarán beneficios (ahorro de la factura mensual de la electricidad y ahorro que representa realizar la instalación eléctrica).
- La energía eólica no produce ningún contaminante que incida sobre el medio ambiente. El generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone un procedimiento muy favorable por ser limpio. De cada kW·h generado mediante energía eólica en lugar de carbón se evita generar:
 - 0,60 kg de CO₂
 - 1,33 gr de SO₂



- 1,67 gr de NO_x

lo que supone un ahorro en costes generados por daños medioambientales.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] [<http://www.windpower.org>, Febrero 2004]
- [2] LE GOURIERES D., *Energía Eólica: Teoría, Concepción y Cálculo Práctico de las Instalaciones*. Ed. Masson. Barcelona, 1982.
- [3] CASTRO GIL M., *Energía Eólica*. Ed. Progensa. Sevilla, 1997.
- [4] [<http://www.meteocat.com/anuaris>, Junio 2004]
- [5] Catálogo Alternadores ALXION
- [6] [<http://www.greenhouse.gov.au/yourhome/technical/fs48.htm>, Febrero 2005]

Bibliografía complementaria

- [<http://www.asdfhost.com/members/eolica/AeroG150.htm>, Junio 2004]
- [<http://www.leiger.com/Montaje%20de%20un%20aerogenerador.html>, Junio 2004]
- [<http://www.ibersolar.com>, Junio 2004]
- [<http://www.cecua.es/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>, Junio 2004]
- [<http://www.cecua.es/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>, Junio 2004]
- [<http://www.miliarium.com/Proyectos>, Septiembre 2004]
- [<http://www.personales.ya.com/universal/TermoWeb/>, Septiembre 2004]
- BOIX O., SAINZ L., CÓRCOLES F. y SUELVES F.J. *Tecnología Eléctrica*. Ed. Ceysa. Barcelona, 2002.
- BIGORDÀ J. i FENOLLOSA J., *La fatiga dels elements mecànics*. Edicions UPC. Barcelona, 1997.
- RIBA ROMEVA C., *Construcció Soldada*. CPDA. Barcelona, 1998.
- FENOLLOSA CORAL, J., *Unions Cargolades*. Edicions UPC. Barcelona, 2000
- FENOLLOSA, J. y MARTÍNEZ J., *CM1: Fallada, Unions Hertz*. CPDA., Barcelona 2002.
- FENOLLOSA, J. y MARTÍNEZ J., *CM2: Rodaments*. CPDA, Barcelona 2002.
- PARDO A. y SANZ L.A., *Metrología y Verificación I*. CPDA, Barcelona 1999.
- NIEMANN G., *Tratado Teórico-Práctico de Elementos de Máquinas, Volumen I*.



- RIBA ROMEVA C., Disseny de Màquines II. Estructura Constructiva. Edicions UPC. Barcelona, 1994.
- RIBA ROMEVA C., Disseny de Màquines IV. Selecció de materials 1 i 2. Edicions UPC. Barcelona, 1997.
- RIBA ROMEVA C., *Selecció de motors i transmissions en el projecte mecànic*. CPDA. Barcelona, 1999.
- FENOLLOSA J. i MARTÍNEZ J., *Tecnologia de Màquines*. CPDA. Barcelona, 2001.
- CHEVALIER A., *Dibujo Industrial*. Editorial Limusa. Méjico D.F., 2000.
- FERNÁNDEZ J.A. y CORZOS L., *Comentarios a las Normas UNE de Dibujo*.
- BAUTISTA J., COMPANYS R., RUA C., MATEO M. e IBÁÑEZ J.M. Organización Industrial. CPDA-ESTEIB. Barcelona, 2001.

