



GRADO EN MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

DISEÑO MECÁNICO DE UN AEROGENERADOR EÓLICO

DOCUMENTO 2 : MEMORIA

DATOS DEL ALUMNO

NOMBRE: RICARDO

APELLIDOS: RUIZ NIETO

FDO.:

FECHA: 10-09-2015

DATOS DEL DIRECTOR

NOMBRE: ERIK

APELLIDOS: MACHO MIER

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA:

ÍNDICE

2. MEMORIA	1
2.1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN	1
2.2. OBJETO DEL PROYECTO	1
2.3. ALCANCE DEL PROYECTO	1
2.4. ANTECEDENTES	2
2.4.1. Evolución de la energía eólica	2
2.4.2. Energía eólica. El viento	6
2.4.3. Impacto medioambiental y acústico	8
2.4.4. Costes de la energía eólica	10
2.4.5. Tipos de aerogeneradores	11
2.4.5.1. Aerogeneradores de eje vertical VAWT	11
2.4.5.2. Aerogeneradores de eje horizontal HAWT	15
2.4.6. Descripción de los componentes de un aerogenerador	22
2.4.6.1. Palas	24
2.4.6.2. Buje	31
2.4.6.3. Nariz	32
2.4.6.4. Góndola	32

2.4.6.5. Multiplicadora	33
2.4.6.6. Sistema de freno	37
2.4.6.7. Alternador	40
2.4.6.8. Sistema de refrigeración	43
2.4.6.9. Estructura	45
2.4.6.10. Sistema de giro	47
2.4.6.11. Sistema de control	51
2.4.6.12. Torre	57
2.4.6.13. Cimentación	67
2.4.7. Control de la potencia del aerogenerador	75
2.5. NORMAS Y REFERENCIAS	78
2.5.1. Disposiciones legales y normas aplicadas	78
2.5.2. Bibliografía	79
2.5.3. Programas de cálculo	80
2.5.4. Otras referencias	81
2.6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	82
2.7. REQUISITOS DE DISEÑO	92
2.8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	93

2.9. RESULTADOS FINALES	95
2.9.1. Potencia y dimensiones de la máquina eólica	95
2.9.2. Sistema para el cambio de paso de las palas	97
2.9.3. Eje de baja velocidad	99
2.9.4. Caja multiplicadora	101
2.9.5. Sistema de freno	108
2.9.6. Alternador	109
2.9.7. Sistema de orientación	110
2.9.8. Chasis y torre	113
2.10. ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS	113

2. MEMORIA

2.1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN

Título del proyecto	Diseño mecánico de un aerogenerador eólico
Autor del proyecto	Ricardo Ruiz Nieto. Ingeniero mecánico.

2.2. OBJETO DEL PROYECTO

A lo largo de los años el planeta se está viendo evocado a un continuo aumento de su temperatura debido al cambio climático producido por el uso del petróleo como principal medio energético. Es por ello que la ingeniería debe de buscar sistemas alternativos. Uno de ellos es la energía obtenida del viento, teniendo en los generadores eólicos a su mayor representante.

El objeto de este trabajo es realizar el diseño mecánico de los componentes que se encuentran en el interior de la góndola de un generador eólico de eje horizontal. Dicho aerogenerador de estudio será el modelo tipo que podrá implantarse en un parque eólico.

Este proyecto se desarrollará de acuerdo a la norma UNE 157001 aprobada el 28 de febrero de 2002 (B.O.E. nº 99 de 25 de abril), al tratarse de un proyecto de diseño, una vez finalizada su redacción de acuerdo a norma se dará por finalizado, dejando el proyecto de construcción en manos de otro técnico.

2.3. ALCANCE DEL PROYECTO

Para este proyecto se han impuesto unas condiciones iniciales que vienen determinadas por el cliente, la producción energética se produce a partir de 3 m/s considerándose que la turbina se encuentra inactiva para valores inferiores a esa velocidad del viento. El funcionamiento nominal se produce con 15 m/s y la parada con 25 m/s de velocidad del viento.

El aerogenerador eólico debe de producir 500 KW para el rango de velocidades descrito. El resto de condiciones iniciales necesarias para la elaboración del proyecto quedan a la elección del diseñador.

Además de dimensionar y calcular los componentes mecánicos que transmiten el movimiento desde el rotor al alternador (ejes, rodamientos, multiplicadora) se diseñará el mejor sistema que permita a la pala del aerogenerador girar sobre su eje longitudinal y a la góndola girar sobre la torre, siendo estos dos sistemas mecánicos independientes.

Otros dos componentes estructurales importantes que también se dimensionarán son la torre del aerogenerador a la que se le aplicará el estudio necesario desde el punto de vista de la resistencia de materiales para que su integridad estructural no se vea mermada, independientemente de las condiciones climáticas a las que se vea expuesto el aerogenerador y el chasis de apoyo de los componentes de la góndola.

No será objeto de estudio el sistema eléctrico y sus componentes, ni el sistema de control que permita al aerogenerador un correcto control autónomo. Tampoco serán objeto de estudio las palas del aerogenerador y las deformaciones que estas puedan sufrir debido a las cargas a las que se vean expuestas, aunque sí se dimensionará el tamaño mínimo para la obtención de la potencia eólica necesaria.

Debido a que no se conoce el emplazamiento del aerogenerador no se prevé el cálculo de la cimentación acorde a la normativa.

2.4. ANTECEDENTES

2.4.1. Evolución de la energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía eléctrica renovable, es decir, es un método de generación de energía eléctrica virtualmente inagotable y lo que es más importante, se trata de un método no contaminante en su proceso de producción. Esto es lo que ha provocado el auge de parques eólicos y una continua evolución en la mejora de los aerogeneradores para optimizar el proceso de producción.

La energía eólica mundial instalada ha ido creciendo hasta situarse en la actualidad en más de 369,6 GW, según datos de Global Wind Energy Council (GWEC).

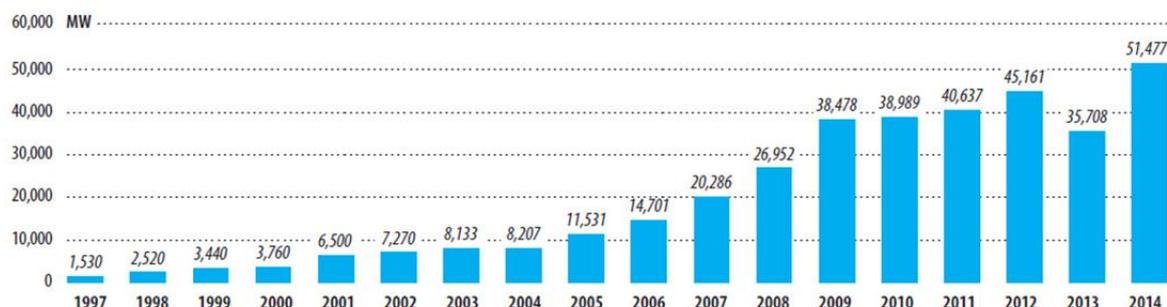


Figura 1. Potencia eólica anual instalada en el mundo por años 1997 - 2014

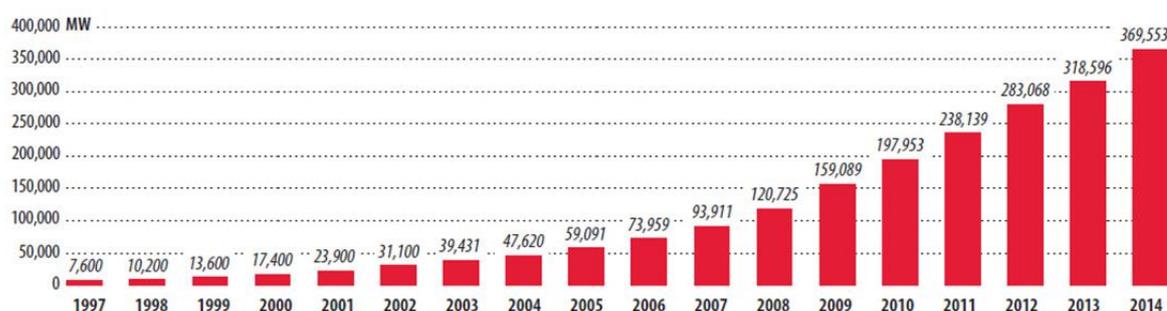


Figura 2. Potencia eólica instalada acumulada desde 1997 a 2014 a nivel mundial

A finales de 2014 cinco países tenían más de 20.000 MW de capacidad instalada: China (114.604 MW), EE.UU. (65.879 MW), Alemania (39.165 MW), España (22.987 MW) y la India (22.465 MW).

El futuro es complejo en varias regiones. En 2015 la legislación europea hace prever un buen año y sus objetivos para 2020 garantizan un grado de estabilidad; se esperan subidas en la productividad en Canadá y EE.UU. China continuará fuerte con un ligero incremento en instalaciones y se espera que los mercados emergentes de África y América Latina sigan creciendo. La incertidumbre política y cambios de gobiernos es lo único que podría causar una recesión.

España con 22.987 MW se sitúa en cuarto lugar en cuanto a potencia eólica instalada. La instalación de parques eólicos fue en aumento hasta alcanzar en 2007 su máximo histórico debido a una política de subvenciones. Los problemas económicos del país han provocado la disminución de esas subvenciones provocando, a su vez, una

disminución de instalaciones nuevas, siendo el 2014 el peor en lo que a energía eólica se refiere.

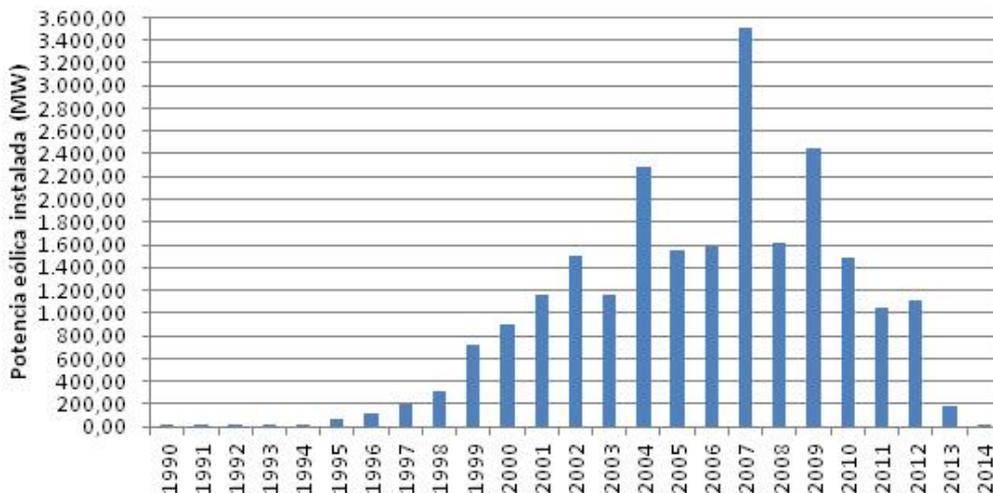


Figura 3. Evolución de la potencia eólica instalada en España

El 29 de enero de 2015 a las 19:27 se produjo 17.553 MW siendo este el máximo histórico de producción instantánea, un 2,9% superior al anterior. Esto equivale a más del doble de potencia de generación de las seis centrales nucleares existentes en el país. Además ese mismo día se produjo el máximo horario con 17.436 MWh. La eólica fue la segunda tecnología en producción eléctrica en 2014, con una producción de 51.138 GWh y una cobertura del 20,4% de la demanda eléctrica.

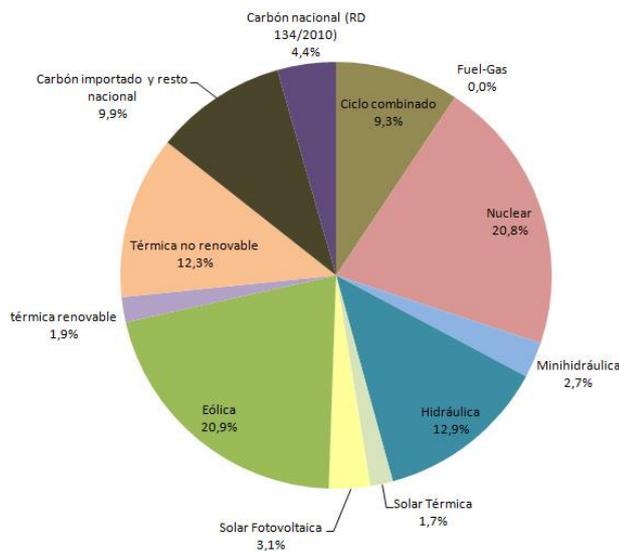


Figura 4. Cobertura demanda energía eléctrica

En cuanto al futuro se espera un incremento de la potencia eólica instalada, ya que el gobierno español ha reconocido que necesita una mayor producción eléctrica por parte de las eólicas y ha anunciado subastas, pero la inseguridad jurídica del anterior modelo provoca que las empresas se encuentren en una postura reacia a la inversión.

Desde el punto de vista de las construcciones el futuro apunta a los emplazamientos offshore con ello se evita el problema de los grandes espacios necesarios para construir un parque eólico y la imposibilidad de encontrarlos en tierra. Además se evitan la conflictividad medioambiental y se aprovechan regímenes de viento más elevados y regulares, es por ello que en muchos países del norte de Europa se está apostando por este tipo de construcción.

En cuanto a la tecnología se está desarrollando un nuevo modelo de generador offshore denominado Aerogenerador X. Presenta una estructura en “V” que tiene la ventaja de aprovechar el viento desde cualquier posición sin necesidad de orientarse, así como concentrar el peso en su base en lugar de en la góndola como ocurre en los aerogeneradores de eje horizontal. Una de las mayores ventajas es que las palas no se encuentran en rotación como las de los aerogeneradores convencionales, lo que permite diseñar estas en materiales más livianos para una misma potencia.

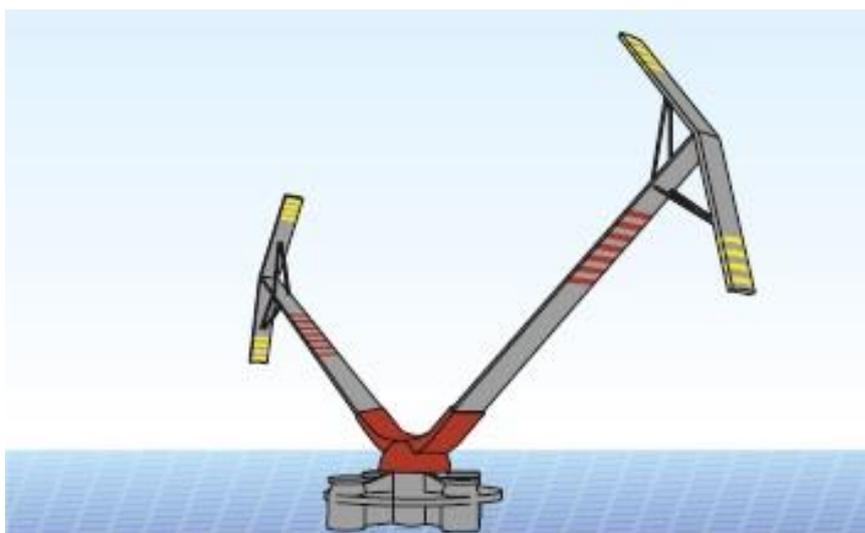


Figura 5. Aerogenerador X

2.4.2. Energía eólica. El viento

La tierra recibe 174 petavatios de radiación solar, aproximadamente el 30% regresa al espacio mientras que las nubes, los océanos y las masas terrestres absorben la restante. Esta absorción de radiación solar provoca un calentamiento de la masa terrestre, dicho calentamiento no es homogéneo en toda la superficie sino que las zonas a 0° de latitud se encuentran más calientes que las del resto del globo.

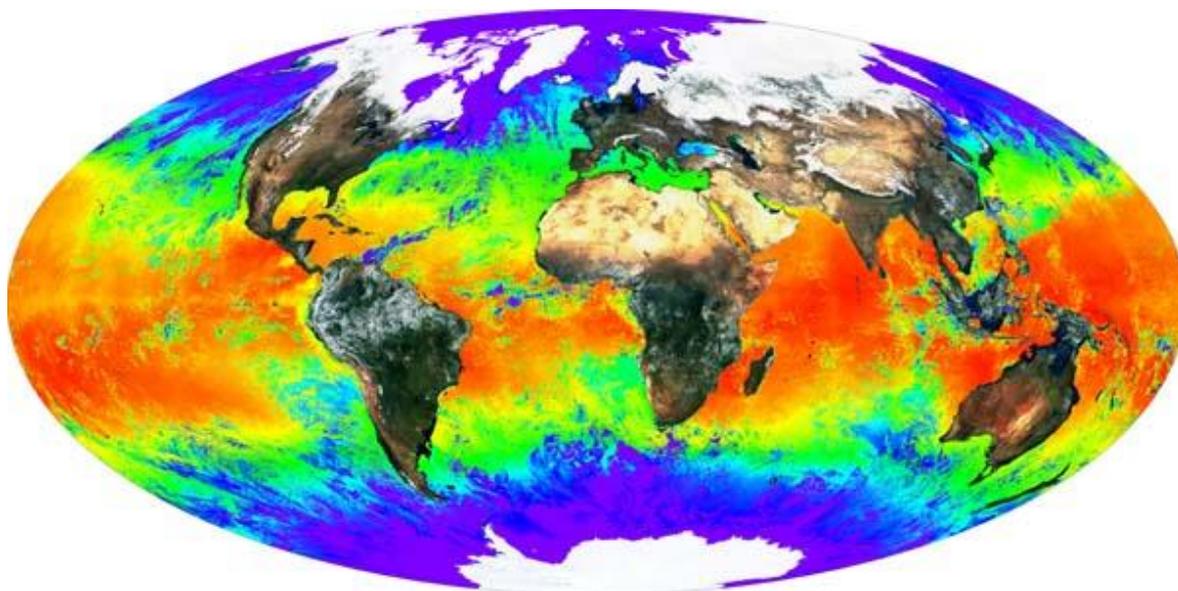


Figura 6. Temperatura de la superficie terrestre

Esta diferencia de temperatura provoca que el viento ascienda desde el ecuador hacia los polos y vuelva a descender cuando se enfría, ya que el aire se desplaza desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión. La rotación de la tierra genera que el viento sople en la dirección paralela a las isóbaras en las latitudes medias y altas, en sentido contrario a las agujas del reloj en las zonas ciclónicas y directo en las anticiclónicas. En el hemisferio sur los sentidos son contrarios a los mencionados.

Además hay que tener en cuenta que el agua y la tierra se calientan a diferentes velocidades, durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar provocando una baja presión relativa que favorece la entrada de aire del mar. Durante la noche sucede el fenómeno contrario.

Todas estas variaciones de la temperatura y por consiguiente de la presión son las

que originan las corrientes de aire, siendo de gran importancia su comprensión y conocimiento a la hora de elegir el mejor emplazamiento para un parque eólico.

La dirección del viento se designa por la dirección desde donde sopla el viento, proporcionada por la veleta, la velocidad de este se mide con el anemómetro estableciéndose una escala llamada “escala de Beaufort” que clasifica el viento en función de su velocidad.

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

Figura 7. Tabla de viento de Beaufort

Esta clasificación establece los valores de viento sobre la superficie de la tierra, pero la velocidad del viento aumenta con la altura así hay que aplicar el siguiente factor de corrección:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

Dónde:

V = velocidad del viento a la altura H

H = altura del rotor

V_0 = velocidad de referencia del viento

H_0 = altura de referencia (generalmente 10 metros)

α = Rugosidad del terreno colindante al aerogenerador.

Como se ha explicado, el viento variará dependiendo de su emplazamiento ya sea junto al mar, en la montaña o en una ladera, a lo que habrá que añadir la rugosidad del terreno para caracterizar el viento tanto en dirección como en velocidad, lo que se traducirá en rendimiento del aerogenerador en cuanto a tiempo de producción se refiere, por ello será de vital importancia un buen estudio de viabilidad del emplazamiento para el posible emplazamiento del parque eólico.

2.4.3. Impacto medioambiental y acústico

El impacto medioambiental es el mayor de los problemas para este tipo de instalaciones. Los mejores emplazamientos en lo que a velocidad del viento se refiere se encuentran en las cimas y las pendientes de relieves montañosos donde los parques eólicos son visibles desde largas distancias lo que no suele ser tolerable por los ciudadanos de la zona.

Otro problema medioambiental muy criticado por las asociaciones a favor de los animales, es el hecho de que el parque eólico se encuentre emplazado en las rutas migratorias de las aves. La gran altura de las torres eólicas actuales provoca que las aspas en movimiento se encuentren situadas a la altura de vuelo de muchas especies y esto provoca que las aves colisionen contra ellas matando aves de estas especies que en muchas ocasiones se encuentran en peligro de extinción. Es por ello que actualmente se encuentra en desarrollo un nuevo tipo de aerogenerador sin palas.

Otro problema a tener en cuenta es el ruido que generan los aerogeneradores ya sea por ruido aerodinámico o mecánico de los alternadores a plena producción a lo que hay que sumar el ruido en general de las instalaciones de los parques eólicos que disponen de grandes instalaciones para la conversión de la energía y su distribución a la red eléctrica.

En realidad este problema no es tan relevante como se piensa, ya que en ocasiones el ruido provocado por las ráfagas de viento genera la misma intensidad de ruido que el que se puede apreciar a unos cientos de metros de las instalaciones, pero se le atribuye a estas como las causantes de dicho nivel de ruido por una incomprensión de los hechos.

Otro factor por el que el ruido no es relevante se basa en estudios acústicos, tal y como puede apreciarse en la figura 8 los trabajadores de mantenimiento que trabajan dentro de la instalación estarán expuestos a la misma contaminación acústica que la que se puedan encontrar en un entorno doméstico.

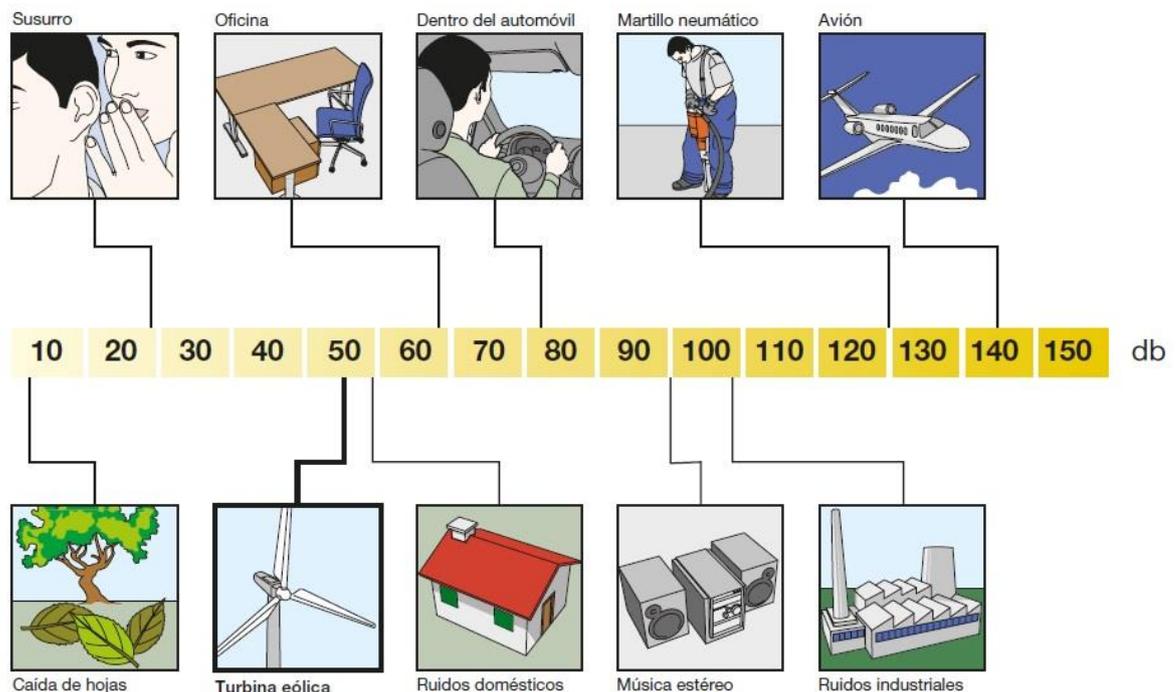


Figura 8. Nivel acústico

En general a una distancia de entre 400 y 500 metros de las turbinas los efectos sonoros son prácticamente despreciables.

2.4.4. Costes de la energía eólica

La energía eólica cuando se genera en parques eólicos se puede considerar como una energía muy eficiente en cuanto a costes y retorno de la inversión se refiere. Como se aprecia en la Figura 9 el coste de inversión y producción (incluyendo costes de mantenimiento y de personal) se pueden comparar a los de una central de carbón.

Costes de la energía		
Tipo de instalación	Coste de inversión €/kWh	Coste de la energía generada €/kWh
Instalación eólica multimegavatio	1000 - 2200	0,04 - 0,08
Central térmica de carbón	1000 - 1350	0,05 - 0,09
Central térmica de gas	500 - 700	0,03 - 0,04

Figura 9. Costes de la energía

Además la energía eólica tiene unos costos de externalidades que no se cuantifican en el precio de mercado y no son atribuibles al productor ni al consumidor, sino que recaen en la sociedad, inferiores a otros medios de producción eléctrica tal y como se aprecia en la Figura 10.

Costes de las externalidades								
Fuente	Carbón	Petróleo	Gas	Nuclear	FV	Biomasa	Hidroeléctrica	Eólica
€/kWh	20 - 15	3 - 11	1 - 3	0,2 - 0,7	0,6	0,08 - 0,3	0,3 - 1	0,05 - 0,25

Figura 10. Costes de las externalidades

Por último y más importante por cada kWh generado por la energía eólica no se emiten a la atmosfera emisiones contaminantes tal y como puede verse en la ilustración 11 donde otros medios de producción emiten contaminantes de efecto invernadero.

Tipo de sustancia	kg/kWh
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,675
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	0,0015
Dióxido de azufre (SO ₂)	0,0014

Figura 11. Contaminantes por cada kWh

2.4.5. Tipos de aerogeneradores

En función de la orientación del eje de giro de la máquina eólica se encuentran dos grandes grupos:

- Aerogeneradores de eje vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)
- Aerogeneradores de eje horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)

Mientras que los aerogeneradores VAWT representan el 1% del total de aerogeneradores instalados, los aerogeneradores HAWT son los más extendidos con un 99% del total instalado. A su vez dentro de los aerogeneradores de eje horizontal la opción más utilizada es la configuración tripala.

2.4.5.1. Aerogeneradores de eje vertical VAWT

Un aerogenerador de eje vertical es básicamente una turbina eólica en la cual el eje del rotor se encuentra situado en posición vertical, lo que le permite generar energía eléctrica sin importar la dirección desde donde viene el viento.

Son turbinas muy simples y de coste bajo. Son tecnologías abundantemente utilizadas a nivel global y sus principales aplicaciones están orientadas a: sistemas simples de refrigeración, bombeo de agua, carga de baterías... donde se da más importancia al costo que a la eficacia.

Una de las principales ventajas de los aerogeneradores de eje vertical es que no necesitan un sistema de orientación al ser este omnidireccional, además la gran mayoría de los componentes mecánicos y de mayor masa como son el generador, la multiplicadora y el sistema de refrigeración van instalados a ras de suelo, dotando al aerogenerador de una mayor estabilidad al descender el centro de gravedad, también proporciona una facilidad para su mantenimiento y a su vez disminuyen los costes de montaje. En algunos modelos el eje del rotor alcanza gran altura por lo que se debe de arriostrar para evitar problemas inerciales

Sus desventajas son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de

puesta en marcha de algunos modelos debido a su elevado par de arranque, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesario desmontar toda la maquinaria del aerogenerador.

Los aerogeneradores más utilizados de eje vertical son los de tipo Savonius, tipo Darrieus y los de tipo Panémona.

Savonius:

Fue inventado por Sigurd J. Savonius en 1922. Formados por palas con forma de medio cilindro cortado longitudinalmente y posicionados respecto al eje de giro del aerogenerador de tal forma que la incidencia del viento sobre la parte cóncava de estos provoca un par de giro, mientras que la parte convexa ofrece una menor resistencia de giro.

Savonius-Rotor

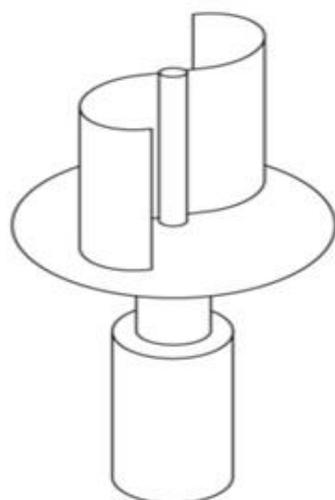


Figura 12. Rotor Savonius

Se trata de una de las turbinas más simples, por su geometría soporta bien las turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja intensidad, pero en un rango limitado. Como sus palas no pueden rotar sobre su eje longitudinal se hace necesario un sistema de frenado mecánico secundario, además de una estructura robusta para soportar grandes intensidades de viento en caso de que fuera necesario ya que disponen de una gran superficie expuesta al viento.

Las turbinas Savonius son utilizadas cuando el costo resulta más importante que la eficiencia. Por ejemplo, la mayoría de los anemómetros son turbinas Savonius, o de un diseño derivado.

Su velocidad de rotación no es muy elevada en comparación con otros tipos de aerogeneradores lo que las clasifica como aerogeneradores “lentos”. Este tipo de aerogeneradores de eje vertical es el más usado en áreas rurales, son utilizados para demandas de poca potencia oscilando esta entre 0,1 y 5 kW. Necesitan de un control de velocidad adecuado para mantener unos valores óptimos de eficiencia entre el 15 y 25%.

Darrieus:

Llamado así por Georges Darrieus, ingeniero francés quien lo diseñó en 1931. Consiste en dos o tres arcos que giran alrededor de un eje. Emplean la sustentación de las palas ya que la superficie de esta presenta un perfil de ala capaz de generar una distribución de presiones a lo largo de la pala. Están caracterizadas por el débil par de arranque y velocidad de rotación elevada lo que las designa como aerogeneradores “rápidos”. Tiene eficiencias de 20 a 35% y potencias asociadas de 5 a 4000 kW.

Son turbinas compuestas por dos palas en forma de hojas delgadas y con perfil alar, unidas al eje en los extremos con una curva diseñada para perfeccionar el rendimiento. No requieren sistema de direccionamiento y comienzan a funcionar con velocidades de viento de 2 m/s.

Estos rotores generalmente sólo se utilizan como generadores conectados a la red eléctrica, ya que no pueden arrancar por sí mismos. Presentan una mayor eficacia que otros aerogeneradores de eje vertical debido al hecho de tener un perfil aerodinámico en sus palas lo que provoca unas menores pérdidas por fricción.

Es muy eficiente para vientos de componente vertical lo que le hace adecuado para emplazamientos con elevada pendiente como en colinas, actualmente se está instalando en tejados de edificios para aprovechar el “efecto esquina”.

En la figura 13 puede observarse distintos rotores Darrieus en función del tipo de pala utilizada.

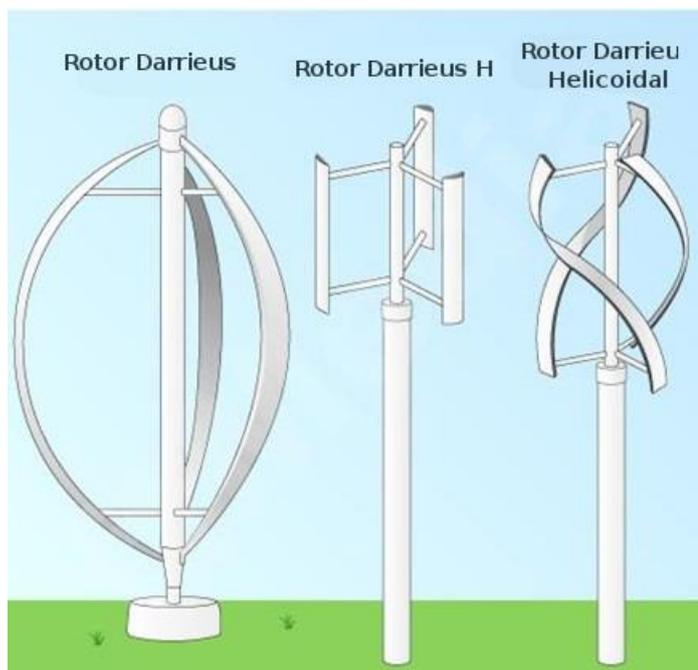


Figura 13. Rotor Darrieus

Como se ha explicado el par de arranque es prácticamente nulo en este tipo de aerogeneradores por lo que necesitan de un dispositivo auxiliar de arranque, es por ello por lo que son más utilizados los aerogeneradores mixtos Darrieus-Savonius donde el aerogenerador Savonius está diseñado para proporcionar el par de arranque necesario de la maquina eólica. En la figura 14 puede apreciarse este tipo de aerogenerador.



Figura 14. Rotor mixto Darrieus-Savonius

Panémona:

Fue patentada por Darrieus el año 1927 y su estructura recuerda a los rotores Savonius. Consiste en unas palas paralelas al eje de giro del rotor con forma de medio cilindro en corte longitudinal, separadas de este por un brazo rígido. A diferencia de los rotores Savonius las palas se encuentran separadas del eje de giro como se ha comentado, lo que provoca un mayor par que en estos y a su vez que se puedan obtener mayores potencias de entre 10 kW a 1000 kW.



Figura 15. Rotor Panémona

A diferencia de los rotores Darrieus su pala no presenta un perfil aerodinámico por lo que su rendimiento es menor del orden del 15 al 25%.

2.4.5.2. Aerogeneradores de eje horizontal HAWT

Los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) se construyen con un rotor tipo hélice con el eje dispuesto en posición horizontal, su propósito es transformar el movimiento lineal del viento en un movimiento rotatorio que se encargará de impulsar el alternador para producir energía eléctrica.

Este tipo de aerogeneradores tiene que orientarse con la dirección del viento de

forma que el eje de giro del rotor se encuentre situado paralelamente a la dirección del viento.

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen una mayor eficiencia energética debido en parte a la utilización de perfiles alares en sus palas y alcanzan mayores velocidades de rotación, por lo que necesitan cajas de engranajes con menor relación de multiplicación de giro. Además debido a la construcción elevada sobre una torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura.



Figura 16. Aerogenerador tripala

Los aerogeneradores de eje horizontal pueden ser clasificados como aerogeneradores “lentos” o “rápidos”, según sea la velocidad tangencial en la punta de la pala, definida a través de su velocidad específica.

Se clasifican como aerogeneradores “lentos” los que tienen una velocidad específica entre 2 y 5. Se definen porque su velocidad de rotación es baja, por lo que tienen un gran número de palas, entre 12 y 14, que revisten casi toda la superficie del rotor. Tienen un elevado par de arranque, por lo cual pueden ponerse en marcha con velocidades de viento muy bajas. Su velocidad de rotación hace que sean poco útiles para producir

energía eléctrica, por lo tanto se usan básicamente para el bombeo de agua.

Los aerogeneradores “rápidos” poseen una velocidad específica de valor entre 8 y 10, su velocidad de rotación es elevada y el número de palas reducido (dos, tres o cuatro). Su par de arranque es menor y precisan que el viento tenga mayor velocidad para arrancarlas, o bien colocar algún medio auxiliar. Son más ligeras, resisten esfuerzos menores y su conexión a la red eléctrica es más estable. Son las máquinas eólicas fabricadas específicamente para la producción de energía eléctrica.

Los modelos de eje horizontal pueden subdividirse, a su vez: por la orientación del rotor respecto a la dirección del viento y por el número de palas empleado.

Por la posición del rotor con respecto al viento:

Orientados a barlovento

Se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante. Se obtiene un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria denominada sotavento, ya que no presenta interferencias aerodinámicas con la torre. Necesita un mecanismo mecánico capaz de orientar la máquina hacia el viento, en aerogeneradores de reducidas dimensiones se puede conseguir la orientación por medio de una aleta direccional situada en la góndola en la posición opuesta al rotor. Es actualmente el diseño más utilizado para los aerogeneradores.

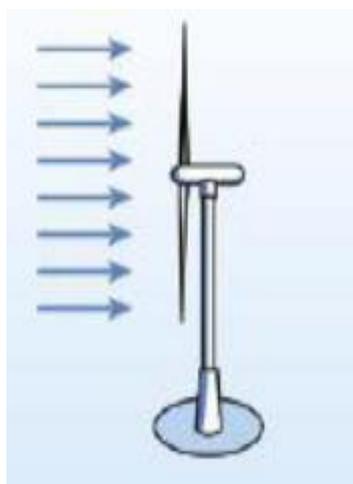


Figura 17. Rotor a barlovento

Por otro lado, cada vez que las palas del rotor pasen cerca de la torre, la potencia que posee el viento, y que estas captan, cae sensiblemente debido a lo que se conoce como turbulencia de torre, es por ello que en los aerogeneradores de elevada potencia para minimizar en parte dicha turbulencia el rotor presenta un pequeño ángulo respecto a la torre, a este ángulo se le conoce como ángulo de tilt.

Las principales desventajas de este tipo de rotor son:

- 1) Necesita un rotor más rígido, situado a cierta distancia de la torre, de otro modo existe el riesgo de interferencia con la misma debido a los esfuerzos que tienden a flexionar las palas en dirección a la torre. Esto aumenta considerablemente el costo de las mismas porque requerirá mejores propiedades mecánicas y materiales.
- 2) Requiere un sistema para la orientación del rotor que lo mantenga enfrentando al viento ya que no son capaces de orientarse automáticamente. Tales sistemas pueden ser:
 - *Activos*. Con sensores de dirección y accionamientos motorizados que guíen al rotor automáticamente hacia la dirección del viento.
 - *Pasivos*. Son los que utilizan una aleta estabilizadora.

Orientados a sotavento

Se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante.

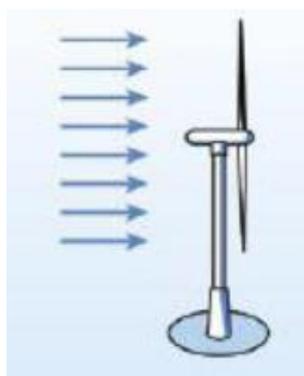


Figura 18. Rotor a sotavento

La estructura de la torre y la góndola disminuyen el aprovechamiento del viento por el rotor. En este caso es el viento el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de orientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad.

Otra importante ventaja es que las palas están construidas con materiales de mayor flexibilidad que en el caso de los aerogeneradores orientados a barlovento ya que no existe posibilidad de interferencia de estos con el rotor.

La disminución del peso debido a la fabricación de palas menos rígidas implica que las cargas dinámicas sean de menor magnitud ya que a altas velocidades de viento, por ejemplo durante ráfagas, las palas pueden empezar a curvarse (flexión en flap) aliviando en parte a la torre y a toda la estructura de soporte.

La desventaja más importante es la fluctuación de la potencia del viento debido a lo que se conoce como sombra de torre. Esto trae aparejado mayores cargas de fatiga sobre la turbina y las palas que en un sistema a barlovento.

Por el número de palas:

Tripala

Es el más empleado en la actualidad, consiste en tres palas colocadas formando un ángulo de 120° entre sí.



Figura 19. Aerogenerador tripala

Un mayor número de palas aumenta el coste y peso del aerogenerador, por lo que no se utilizan diseños de mayor número de palas para generadores de energía de forma comercial, aunque sí para fines mecánicos como bombeo de agua, etc.

Una de las muchas razones para la utilización de 3 palas en la hélice es el momento de coriolis constante, casi nulo, del rotor respecto a los movimientos operacionales alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con 3 o más palas tienen esta propiedad favorable. Por consiguiente no induce ninguna carga sobre la estructura debido a éste fenómeno lo que se traduce en una simplificación estructural y reducción en los costos de fabricación.

Bipala

Los aerogeneradores bipala tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo presentan la desventaja de necesitar de una mayor velocidad de giro para generar la misma energía de salida.



Ilustración 20. Aerogenerador bipala

Este rotor puede ser montado en el suelo y ser izado hasta la góndola como una pieza única lo que hace más sencilla su instalación. Debido a la variación de la velocidad del viento con la altura y que el rotor solo dispone de dos palas se generan en el rotor mayores inestabilidades que en los rotores tripala.

En E.E.U.U. este tipo de construcción está más extendida que en Europa donde es más fácil encontrar rotores tripala.

Monopala

Estos diseños no están muy extendidos comercialmente, porque además de una mayor velocidad de giro, y de los problemas de ruido y de intrusión visual, necesitan un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor. Por supuesto esto anula el ahorro de peso comparado con un diseño bipala.



Figura 21. Rotor monopala

Los aerogeneradores con una y dos palas requieren un diseño más complejo, con un rotor basculante. El rotor tiene que estar preparado para inclinarse, con el fin de evitar fuertes sacudidas en la turbina cada vez que una de las palas pasa por la torre. Por ello puede precisar de amortiguadores adicionales que impidan que las palas del rotor choquen contra la torre.

Multipala

Las turbinas multipala todavía conservan algún parecido con los antiguos molinos multipala que se usaban para bombear agua de los pozos.

Los nuevos modelos son cada vez más estéticos sin perder eficiencia, como el de la figura 22, denominado Wind Dancer, una turbina eólica de uso residencial de 8 aspas que ofrece un buen rendimiento, especialmente para lugares con vientos sin mucha fuerza, y es además virtualmente silenciosa.



Figura 22. Rotor multipala

Estos aerogeneradores se caracterizan por giran a bajas velocidades y ofrecer un gran par. Se emplean en aplicaciones que requieren mucho par como por ejemplo la extracción de agua a través de aerobombas.

2.4.6. Descripción de los componentes de un aerogenerador

Los principales componentes que constituyen un aerogenerador de eje horizontal se pueden observar en la ilustración 23, son:

1. Pala
2. Soporte de la pala
3. Mecanismo del ángulo de paso
4. Buje
5. Cubierta o nariz

6. Soporte del eje de alta
7. Eje de alta
8. Luces de señalización
9. Multiplicadora
10. Dispositivos hidráulicos de refrigeración
11. Freno mecánico
12. Alternador
13. Convertidor de potencia y dispositivos eléctricos de control y protección
14. Transformador
15. Anemómetro
16. Estructura soporte de la góndola
17. Torre de soporte
18. Mecanismo de orientación

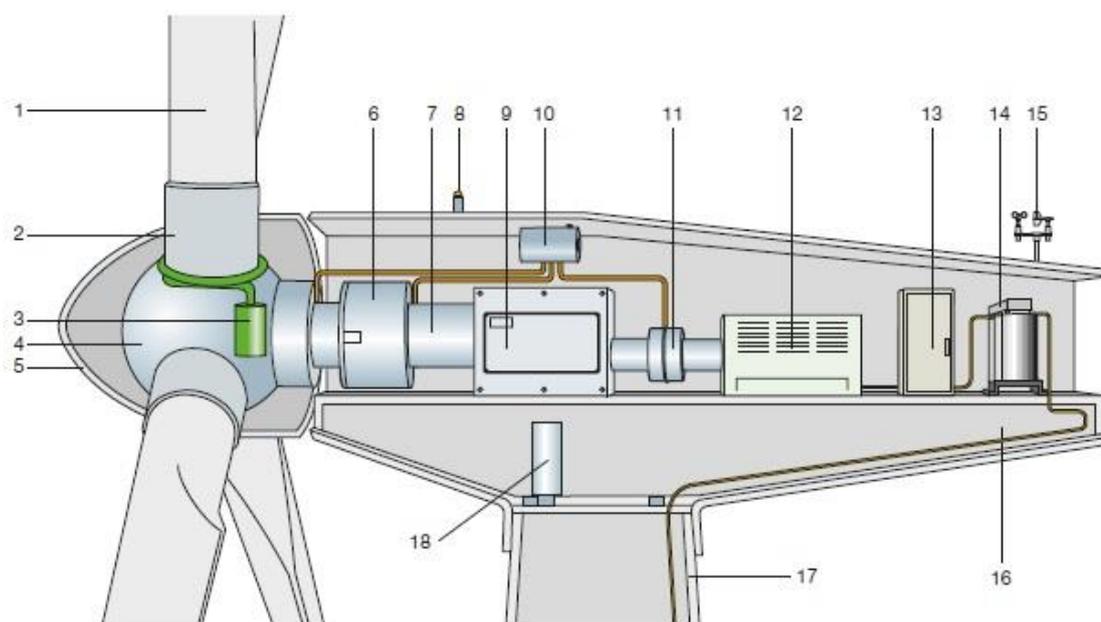


Figura 23. Componentes de un aerogenerador

El convertidor y el transformador pueden ubicarse en la góndola lo que hace compensar el peso del rotor o pueden situarse en la parte baja de la torre lo que reduce el tamaño y peso de la góndola.

En cuanto a términos de costes la proporción del coste de cada componente en proporción con el coste total se puede observar en la figura 24.

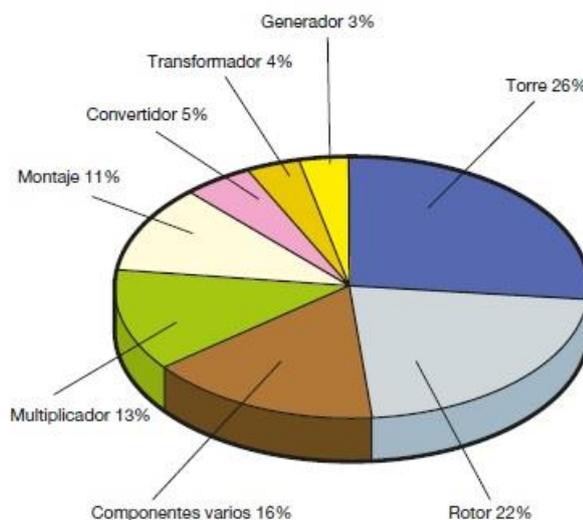


Figura 24. Coste de los componentes

2.4.6.1. Palas

Las palas del aerogenerador son la parte más importantes, ya que son las encargadas de recoger la energía del viento y convertir junto con el eje el movimiento lineal del viento en un movimiento de rotación. Esta energía es transmitida al buje, del buje pasa a un sistema de transmisión mecánica donde la velocidad de rotación es multiplicada y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica. El diseño de las palas es muy parecido al del ala de un avión

Las palas están elaboradas de un material compuesto de matriz polimérica (poliéster) con un refuerzo de fibras de vidrio o carbono para dar mayor resistencia. Se busca una gran resistencia estructural y a la fatiga, ya que estarán expuestos a inclemencias climáticas, fuertes vientos y en los casos de aerogeneradores offshore a un alto grado de salinidad. Pueden medir en el rango desde un metro hasta 52 metros y van conectados al buje del rotor o al rodamiento de giro en caso de disponer de un sistema de control de paso, a su vez este rodamiento va unido al buje.

El proceso de fabricación de las palas es laborioso, especialmente por los tamaños con los que se trabaja tal y como puede apreciarse en la figura 25.



Figura 25. Fabricación de una pala

Proceso de fabricación:

El proceso de fabricación de las palas generalmente sigue las siguientes etapas:

1. Fabricación de la viga

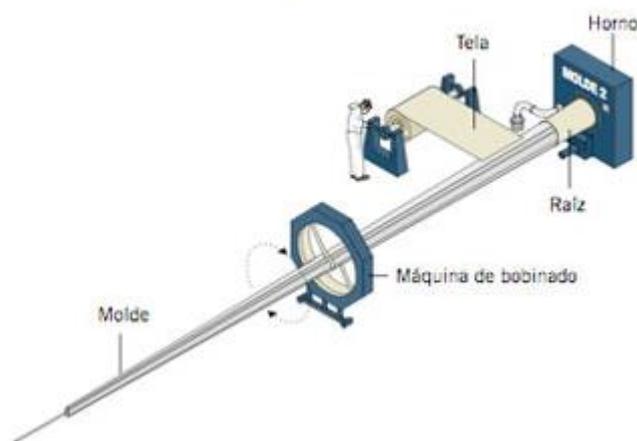


Figura 26.

La base se compone de materiales formados por fibra de carbono y fibra de vidrio, que previamente han sido impregnados con resina epoxy, se parten distintas telas que se ubican en un molde y a continuación se someten a un proceso de curado.

2. Fabricación de las conchas

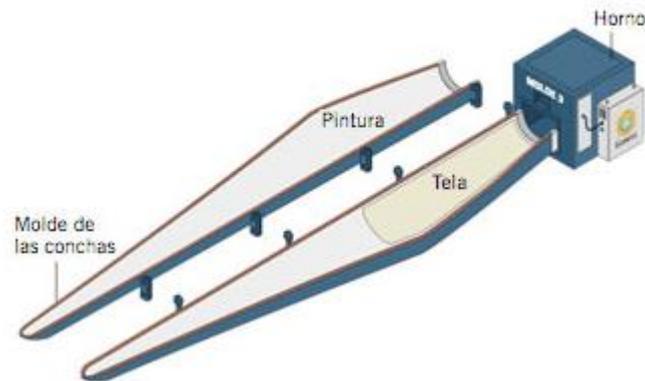


Figura 27.

Después de aplicar una capa de pintura que ofrecerá protección a la pala, la fibra de vidrio es utilizada para la elaboración de las conchas, siguiendo el mismo proceso de fabricación que la viga.

3. Ensamblaje

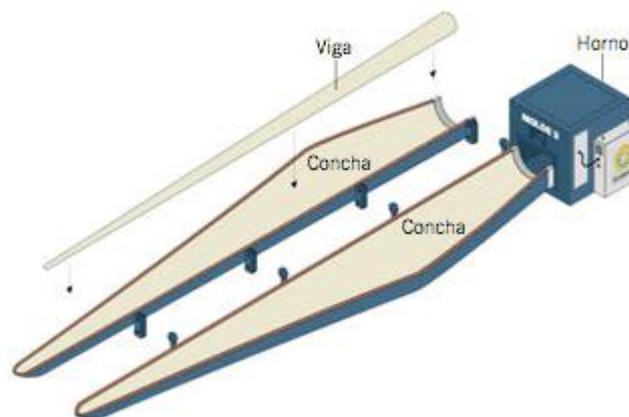


Figura 28.

Cuando se tienen las dos conchas una vez endurecidas, se procede al ensamblaje y pegado de la viga entre las dos conchas.

4. Curado

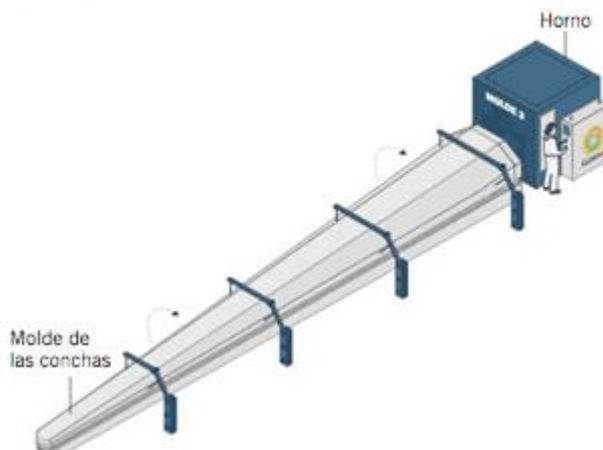


Figura 29.

El conjunto encajado pasa de nuevo por el horno hasta integrar una unidad compacta.

5. Desbarbado y pulido

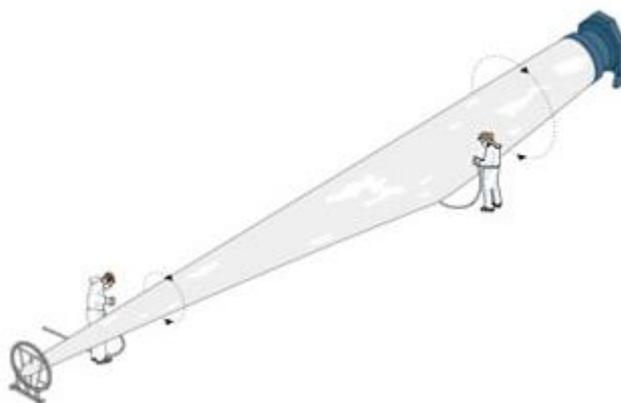


Figura 30.

Se desmolda el conjunto que constituye la pala, se pasa a la zona de acabado, donde se terminarán los bordes de ataque y salida de la pala, y se realizará una última revisión de ésta.

Las cualidades mecánicas que debe de cumplir la pala son:

- 1) Resistencia a fatiga (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).

- 2) Tener una resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida.
- 3) Peso bajo.
- 4) Resistencia a agentes medioambientales (erosión, corrosión) han ido incrementándose en los últimos 20 años.
- 5) Rigidez.

Ensayos a los que son sometidas las palas:

Test estático

Las palas son sometidas a cargas estáticas extremas durante un tiempo predeterminado (10-15s), para probar su resistencia a la rotura: son flexionadas en dos direcciones (flapwise y edgewise).

Test dinámico

Se somete a la pala a oscilaciones proporcionadas con su frecuencia natural: cinco millones de ciclos respecto de los dos ejes principales. Recurriendo a un ciclo próximo a la frecuencia natural de la pala en cada dirección. La frecuencia natural es aquella con la que la pala oscilará de una parte a otra, si se la empuja en una determinada dirección y se la suelta. Las frecuencias naturales son diferentes en la dirección de flap y en la dirección periférica, la pala tiende a ser mucho más rígida en esta última, por lo que tiene una frecuencia natural más alta para la flexión periférica.

Mientras se comprueba con una cámara de infrarrojos de alta resolución para verificar si hay pequeñas roturas en el laminado de la pala y se registran las medidas de deformación procedentes de galgas extensométricas colocadas sobre la superficie de la pala.

Test de rotura

Cuando se ha realizado un cambio significativo en el diseño de la pala o se usa un nuevo material, se realiza además un test de rotura, que no es más que llevar el test estático

al caso extremo, aplicando una carga estática creciente en valor hasta lograr que la pala fragmente, realizando los análisis posteriores de la superficie de fractura.

Inspección con infrarrojos (Termografía)

Se utiliza para dejar ver un aumento significativo del calor local en la pala. Esto puede indicar que:

- 1) Existe un área con humedecimiento estructural.
- 2) Un área de laminación o un área que se está moviendo hacia el punto de rotura de las fibras.

Material de fabricación de las palas:

Los materiales más utilizados en la fabricación de las palas son:

Aleaciones de acero y de aluminio, tienen los inconvenientes de peso y de fatiga del metal, respectivamente, son en la actualidad utilizadas sólo en aerogeneradores muy pequeños.

Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster, utilizado para la mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores (dificultad de localizar el c.d.g).

Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy ("GRP"), en forma de láminas previamente impregnadas. Son palas más ligeras, con mayor flexibilidad, menor deformación bajo temperaturas extremas y con una excelente resistencia a la absorción de agua.

Fibra de carbono o aramidas (Kevlar 29 o Kevlar 49), como material de refuerzo en tiras por sus buenas propiedades mecánicas. Tiene una alta resistencia específica y son palas muy ligeras. Estas palas son muy caras para grandes aerogeneradores.

Mixtos fibra de vidrio-fibra de carbono.

Materiales compuestos de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy, aún no se han introducido en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en ese área.

Perfil alar:

En los modernos aerogeneradores el perfil transversal de las palas tiene una geometría capaz de generar una distribución de presiones tal que genere sustentación en una de sus caras, a esto se le conoce como perfil alar.

Los perfiles pueden ser más finos o gruesos, simétricos o no, e incluso el perfil puede ir variando a lo largo del eje longitudinal del ala dependiendo de las características que se quieran obtener.

Los perfiles alares en aerogeneradores fueron obtenidos de la aviación donde se encuentran normalizados, en el caso de los rotores eólicos lo más usual es encontrar perfiles NACA llamados así porque fueron normalizados por el National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica), en la ilustración 31 se muestran algunos tipos de perfiles.

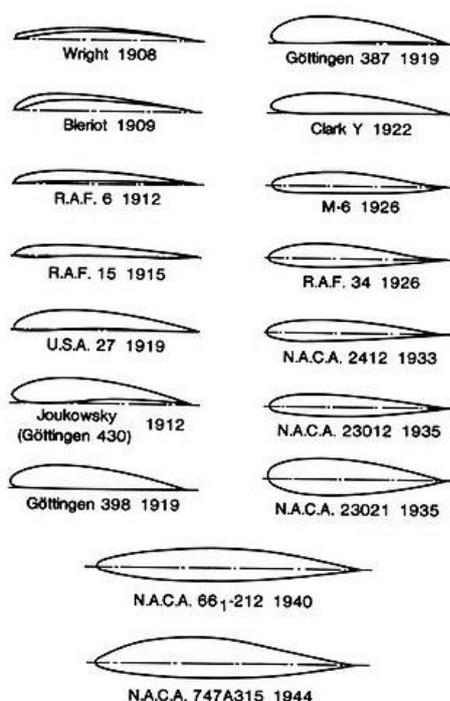


Figura 31. Tipos de Perfil alar

La principal ventaja que presenta el uso de este tipo de perfiles, es la menor oposición que genera el flujo del viento al desplazamiento del ala, esto repercute en una mayor eficacia de la turbina.

2.4.6.2. Buje

Es la pieza de unión entre las palas y el eje principal o de baja velocidad, y por lo tanto el trasmisor de la fuerza del viento al interior de la góndola. En función de si el rotor está compuesto por dos o tres palas pueden presentarse dos tipos de buje:

Rígido:

Utilizado en aerogeneradores de tres palas compuesto de una estructura metálica hueca que típicamente se construye con base en una fundición de acero nodular. Permite un acoplamiento firme de las palas a través de pernos roscados o espigas metálicas embebidas en el material de las palas.

Se incluyen grupos hidráulicos encargados de accionar los frenos aerodinámicos de punta de pala (palas de paso fijo) o los mecanismos de giro de palas (paso variable). Se acopla rígidamente con el eje principal del aerogenerador.

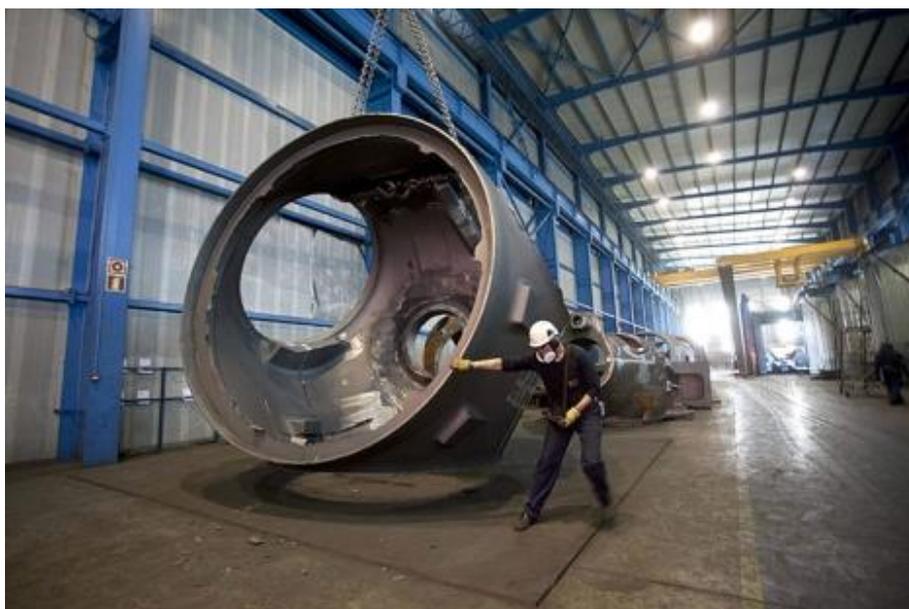


Figura 32. Buje de la firma Agurain

Basculante:

Utilizados en aerogeneradores de dos palas. Permite un ligero movimiento de las palas en una dirección perpendicular al plano del rotor (permite un desplazamiento angular de $2,5^\circ$ respecto al plano normal del eje de rotación). Esto Ayuda a reducir las cargas dinámicas.

El buje está instalado en la parte frontal del aerogenerador acoplado al eje de baja velocidad, es el único elemento exterior que gira. Habitualmente se fabrica con acero fundido.

2.4.6.3. Nariz

Es un elemento de carenado en forma parabolóide que se monta como cubierta frontal. Sirve para desviar el viento hacia el tren motor y mejorar la ventilación en el interior, también para eliminar las turbulencias indeseables en el centro frontal del rotor y para mejorar el aspecto estético.



Figura 33. Nariz del rotor

2.4.6.4. Góndola

La góndola es un cubículo que se puede considerar la sala de máquinas del aerogenerador. Puede girar en torno a la torre para poner a la turbina de cara al viento. Se encuentra acoplada a la torre por una corona dentada para permitir la orientación del rotor al viento. El rotor y las palas están unidas por el eje principal o de baja velocidad que

traslada la fuerza del viento a la multiplicadora y a través de esta al alternador continuamente. En su parte exterior lleva colocado un anemómetro y una veleta conectados a los sistemas de control del aerogenerador, y unos respiraderos para garantizar la refrigeración del alternador. Se fabrican en acero forjado y placas de fibra de vidrio.

La góndola del aerogenerador protege a todos los componentes mecánicos, de las inclemencias del tiempo, a la vez que aísla acústicamente el ruido generado por la máquina eólica.

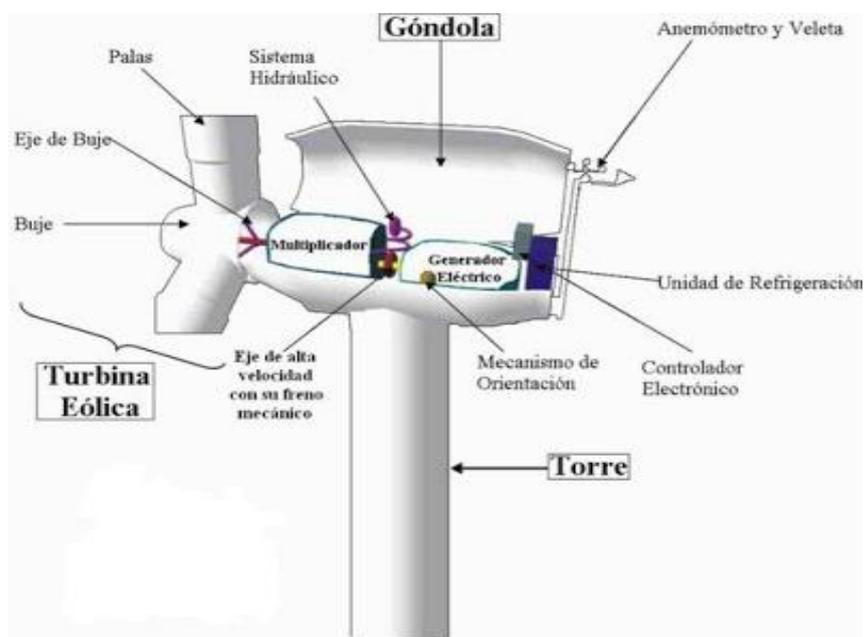


Figura 34. Esquema de la góndola

Dentro de ella se encuentran: el eje de baja velocidad, la multiplicadora, el sistema de freno, el eje de alta velocidad, el generador, el sistema de sujeción o chasis, el sistema de orientación, el sistema de refrigeración y en algunos casos el transformador eléctrico.

2.4.6.5. Multiplicadora

El tren de potencia está compuesto por el eje lento, el soporte principal de dicho eje, la multiplicadora de velocidades y el acoplamiento. Su objetivo es transmitir la potencia mecánica generada por el rotor al generador eléctrico en las condiciones adecuadas para la generación de electricidad.

La multiplicadora tiene en la entrada el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a la salida gire en torno a 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad.

El eje principal es una pieza tubular de acero macizo de gran diámetro, unido al rotor y que gira a velocidades de entre 22 y 75 r.p.m., según el modelo de aerogenerador y las condiciones de operación. Sin embargo un alternador estándar de generación eléctrica requiere velocidades de giro de entorno a las 1500 r.p.m., por lo que es necesaria una caja multiplicadora que amplifique la velocidad de giro transmitida.



Figura 35. Caja multiplicadora de ejes paralelos

En el diseño de una caja de engranes para aerogeneradores se busca:

- Una relación óptima entre su capacidad de carga, su tamaño y su peso.
- Operar con una eficiencia alta y emitir poco ruido.
- Tamaño compacto.
- Las cajas de engranes deben ser fiables y fáciles de mantener.

Los engranajes son los componentes responsables de la transmisión de par y velocidad entre etapas, así como multiplicar la velocidad etapa a etapa.

Para el diseño de las cajas multiplicadoras los engranajes utilizados pueden ser de dos tipos: engranajes rectos o helicoidales.

Los engranajes rectos se utilizan en cajas multiplicadoras de ejes paralelos y presentan una relación de multiplicación máxima en cada etapa de 1:5. Los engranajes helicoidales tienen un diseño más sofisticado que los engranajes rectos y se suelen emplear en cajas multiplicadoras de tipo planetario, aunque si las fuerzas a transmitir son de elevado valor también se pueden encontrar presentes en las cajas multiplicadoras de ejes paralelos. La relación de multiplicación en cada etapa en las cajas multiplicadoras de ejes planetarios puede ser como máximo de 1:12.

Generalmente, las cajas multiplicadoras de ejes paralelos son más sencillas de diseño y por lo tanto más baratas que los diseños planetarios. No obstante, ante igualdad en la relación de transmisión y en la potencia transferida los diseños con ejes planetarios son más resistentes y menos pesados, lo que hace que ésta opción sea la más utilizada en las máquinas de gran potencia.

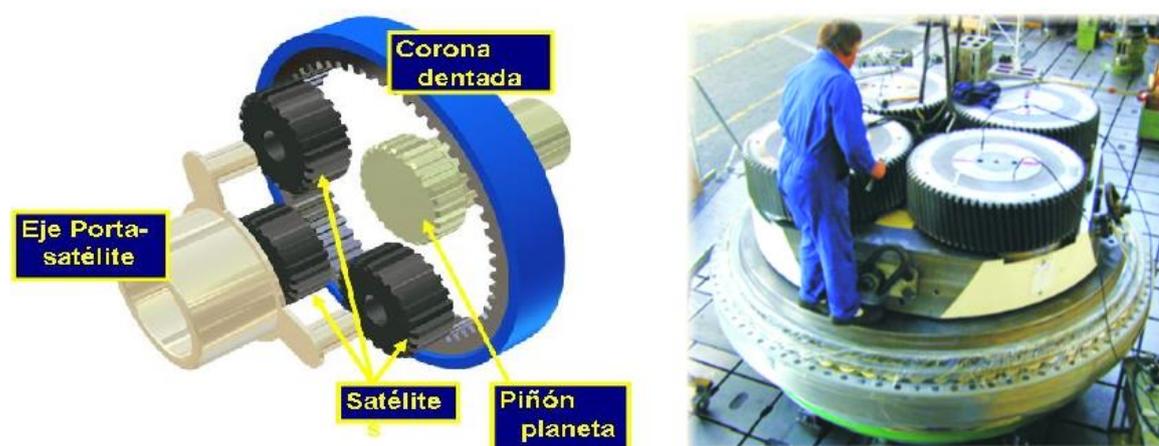


Figura 36. Caja multiplicadora de ejes planetarios

Actualmente los diseños de cajas multiplicadoras que incorporan los aerogeneradores se realizan de forma concreta para esta aplicación. Los nuevos diseños de este componente contienen parte de los apoyos del eje de baja velocidad en su propia estructura. Las principales ventajas que presenta este diseño son por una parte su reducido peso y su facilidad de ensamblaje con otros elementos del tren de potencia durante el período de montaje.

Otros diseños utilizan, al menos una etapa de engranajes rectos para conseguir que los ejes de la caja multiplicadora no estén alineados. Esta configuración se emplea en la

actualidad en máquinas de paso variable donde es posible utilizar un eje de baja velocidad hueco a través del cual se conecta un vástago movido por un pistón hidráulico para modificar el ángulo de paso de las palas.

Lubricación de la caja multiplicadora:

Para el correcto funcionamiento de la multiplicadora esta debe estar siempre perfectamente lubricada ya que está formada por engranajes metálicos que al estar en movimiento soportando grandes esfuerzos, tienden a calentarse debido al rozamiento y a degradarse, por lo que sin una correcta lubricación su vida útil se vería reducida de forma drástica pudiendo provocar graves problemas.

El sistema de lubricación dispone de una bomba que:

- Puede estar dentro o fuera de la multiplicadora.
- Recircula el aceite y lo distribuye por los conductos internos.
- Lubrica los engranajes por salpicadura.

Se debe conservar el aceite en buen estado para ello ha de ser filtrado y refrigerado o calentado para que no pierda propiedades.

- a) Sistema de filtrado en línea: los filtros de aceite están situados en el circuito de refrigeración. Mejoran la calidad del aceite. Evitan daños mayores a la multiplicadora. Mediante este sistema se pueden detectar problemas de contaminación.
- b) Sistema de filtrado fuera de línea: el filtro offline está instalado de apoyo al circuito de filtrado y refrigeración. El filtro offline es un circuito cerrado con su propia bomba y filtro. La filtración es continua incluso con el aerogenerador parado. Este sistema tiene mayor poder de filtrado y se obtiene una gran calidad de filtrado. De esta manera se alarga la vida de la multiplicadora y mejora la calidad del aceite.
- c) Sistema de caldeo: la multiplicadora está equipada con elementos de calefacción, debido a que la viscosidad del aceite puede ser muy alta a bajas temperaturas. Por lo tanto, el aceite con alta viscosidad es difícil de

recircular y puede causar daños a la bomba. La resistencia calienta el aceite y baja la viscosidad a un nivel que es posible la recirculación del aceite.

- d) Sistema de refrigeración: la multiplicadora está equipada con sistemas de refrigeración para el aceite encargados de mantener la temperatura en sus valores correctos para evitar que este pierda propiedades y deje de trabajar en las condiciones correctas.

Actualmente, las empresas punteras en el sector de los aerogeneradores están desarrollando múltiples tecnologías con el fin de prescindir de las cajas multiplicadoras (el generador multipolo es la más importante de ellas), en la figura 37 se puede observar un prototipo.

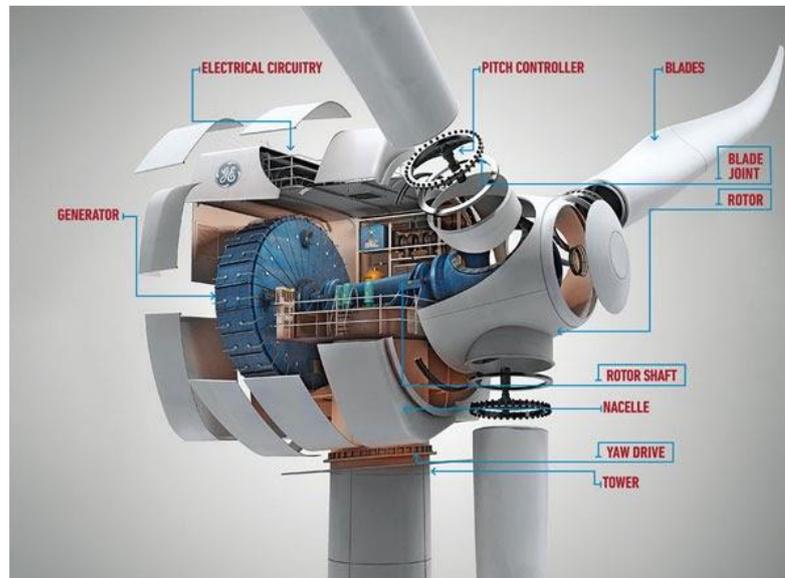


Figura 37. Aerogenerador con alternador multipolo

El fin de eliminar las cajas multiplicadoras es reducir los componentes mecánicos, con ello se minimizan las pérdidas por fricción obteniendo mayores rendimientos, además de una considerable disminución de peso.

2.4.6.6. Sistema de freno

La instalación de aerogeneradores requiere la dotación de importantes medidas de seguridad que aseguren la integridad de personas y bienes a lo largo de la vida útil de la máquina. Para ello resulta necesario examinar la velocidad del aerogenerador en todo

momento, evitando sobrepasar sus límites mecánicos.

Algunos aerogeneradores incorporan frenos aerodinámicos mediante el control de paso en las palas, mientras que otros necesitan de un sistema mecánico de frenado que limite la velocidad de giro.

Todos los aerogeneradores incorporen o no un sistema de frenado activo necesitan de un método independiente de frenado que permita la detención del aerogenerador en cualquier momento o circunstancia (reparación, pérdida de red, motivos de seguridad, etc.).

Sistema de freno aerodinámico:

El sistema de frenado primario o principal de la mayoría de aerogeneradores es el sistema de frenado aerodinámico, que consiste en:

- Girar las palas del rotor unos 90 grados alrededor del eje longitudinal, lo que se conoce como posición de bandera; solo en caso de las turbinas de regulación por cambio en el ángulo de paso. Este sistema además de cómo freno sirve para el control de la potencia del aerogenerador.
- Girar la punta de las palas del rotor 90 grados.



Figura 38. Detalle de la punta de la pala

Estos sistemas suelen estar accionados mediante resortes con el fin de que, incluso en caso de fallo de suministro eléctrico, sigan funcionando, y son automáticamente activados si el sistema hidráulico de la turbina pierde presión. Una vez que la situación de peligro ha pasado el sistema hidráulico de la turbina devuelve las palas, o la punta de las

palas, a su posición original.

La experiencia demuestra que los sistemas de freno aerodinámico son extremadamente seguros. Frenarán la turbina en cuestión de un par de vueltas como mucho. Además, ofrecen una forma muy suave de frenar la turbina, sin ningún esfuerzo, desgaste o rotura importante en la torre ni en la maquinaria.

Así pues, la forma habitual de frenar una turbina moderna (por cualquier razón) es la de utilizar el sistema de freno aerodinámico.

Sistema de freno mecánico:

El freno mecánico es utilizado como sistema de apoyo del sistema de freno aerodinámico o como freno de estacionamiento, una vez que la turbina ha sido parada, en el caso de una turbina de regulación por pérdida aerodinámica.

Las turbinas de regulación por cambio del ángulo de paso no suelen necesitar activar el freno mecánico (excepto en trabajos de mantenimiento), dado que el rotor apenas si puede moverse cuando las palas del rotor están giradas 90 grados.

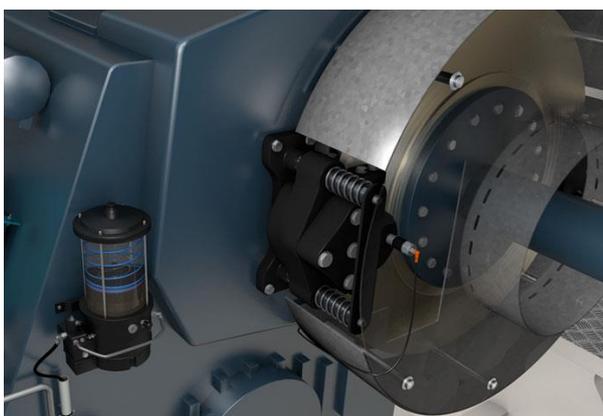


Figura 39. Freno mecánico

En los aerogenerador con caja multiplicadora el freno mecánico se coloca en el eje de alta velocidad ya que el par motor es relativamente bajo en él lo que repercute en un sistema de frenado menos voluminoso, lo que mejorará el peso y los problemas de temperatura.

2.4.6.7. Alternador

El generador se ubica en la parte trasera de la góndola. A su lado se localiza el armario de contactores del generador y el módulo de tiristores. Este último se encarga del arranque y acoplamiento suave del generador a la red así como de la conmutación entre generadores. También se localiza en la góndola el módulo de compensación de reactiva.

El generador o alternador convierte la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. Existen tres tipos de generadores: generador asíncrono de jaula de ardilla, generador asíncrono de rotor bobinado y generador síncrono.

Los generadores asíncronos son motores de inducción que se utilizan de forma contraria, haciéndolos girar a una velocidad mayor que su velocidad de sincronismo. Cuando a un motor de inducción, interconectado a la red eléctrica, se le hace girar por encima de su velocidad de sincronismo, aplicando un par motriz en su eje de rotación, la potencia mecánica aplicada se convierte en energía eléctrica.

Generador asíncrono de jaula de ardilla:

Los del tipo jaula de ardilla son los más utilizados debido a su bajo coste. Otra principal ventaja es que requieren poco mantenimiento, ya que son robustos. Este tipo de generadores se pueden conectar de forma directa (a través de protecciones y medios de desconexión adecuados) a la línea eléctrica a la que entregarán energía.

El generador de jaula de ardilla consta de un rotor formado por una serie de conductores metálicos (habitualmente de aluminio) dispuestos de forma paralela unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos, esto es lo que forma la llamada jaula de ardilla por su similitud gráfica con una jaula de ardilla.

Esta 'jaula' se rellena de material, normalmente chapa apilada. De este modo, se obtiene un sistema n-fásico de conductores (siendo n el número de conductores) situado en el interior del campo magnético giratorio creado por el estator, por lo tanto tenemos un sistema físico muy eficaz, simple, y muy robusto (básicamente, sin necesidad de mantenimiento).

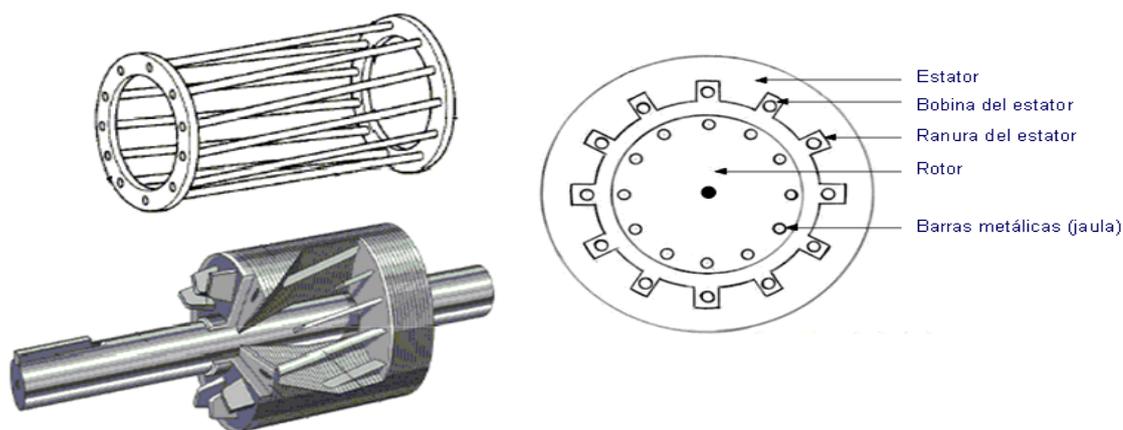


Figura 40. Generador de jaula de ardilla

Una desventaja de estos generadores es que necesitan tomar potencia reactiva de la línea eléctrica a la cual están conectados, lo cual origina un factor de potencia bajo que debe mejorarse mediante baterías de condensadores.

En la actualidad, cerca del 95 % de los aerogeneradores comerciales son sistemas de velocidad constante con generadores eléctricos asíncronos.

Generador asíncrono de rotor bobinado:

El generador de rotor bobinado tiene un rotor compuesto por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta manera se obtiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, de un número determinado de polos y en movimiento. Este rotor es mucho más complejo de fabricar y conservar que el de jaula de ardilla, pero admite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados. Esto tiene como ventajas:

- Permite inyectar y extraer energía del rotor.
- Al inyectar diferentes frecuencias al rotor se consigue poder generar a velocidades muy diferentes de la de sincronismo.
- Al permitir la extracción de energía del rotor, se consigue generar hasta un 10% de la energía producida.

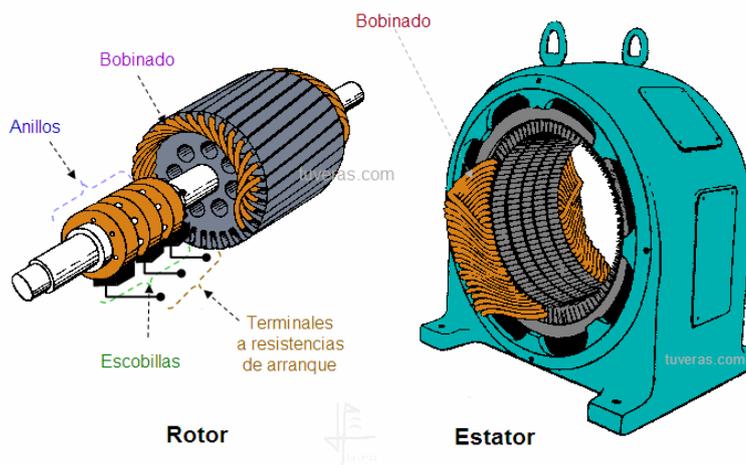


Figura 41. Generador asíncrono de rotor bobinado

Generador síncrono:

Los generadores síncronos no son muy adecuados para integrarlos en aerogeneradores de velocidad constante porque al conectarlo directamente a la línea eléctrica resultan un sistema excesivamente rígido en cuanto a su relación par-velocidad.

Como principales desventajas se podrían numerar las siguientes:

- Originan cargas dinámicas importantes que exigen en su construcción la utilización de estructuras robustas, provocando un incremento de peso.
- Los rotores trabajan con una eficacia menor a la que han sido diseñados.

Debido a estas desventajas se produjo el desarrollo de los llamados sistemas de velocidad variable, ya que para estos sistemas la velocidad de operación no está limitada por la frecuencia de la línea eléctrica.

En los generadores de velocidad variable las principales características consisten en que el generador eléctrico no se conecta directamente a la línea eléctrica, para que la velocidad de rotación del rotor siga a la velocidad del viento. De esta forma, las cargas dinámicas se reducen y la eficiencia aumenta.

Como consecuencia se produce electricidad de frecuencia variable, que hace necesario su conversión a la frecuencia de red para poder trasladar la energía producida a

una línea eléctrica convencional. Para convertir la frecuencia se utiliza un transformador electrónico de potencia que se completa con un rectificador (para convertir la corriente alterna en corriente continua) y un inversor (para convertir la corriente continua en corriente alterna). Esta configuración se conoce como CA-CC-CA.

2.4.6.8. Sistema de refrigeración

Las infraestructuras de aerogeneradores en zonas donde el clima alcanza altas temperaturas y/o elevados porcentajes de humedad muestran la dificultad de conseguir que estos aerogeneradores trabajen en condiciones nominales, no pudiendo trabajar a máxima capacidad.

Una de las causas principales de este inconveniente reside en las propias limitaciones que marcan los componentes internos de los aerogeneradores situados en la góndola del aerogenerador frente a la temperatura, como es el caso de la multiplicadora y el generador.

No sólo la temperatura externa produce una elevada temperatura en el interior de la góndola del aerogenerador, también los propios equipos generan calor debido a su funcionamiento, que debe ser eliminado, para poder obtener un rendimiento óptimo de la instalación. A altas temperaturas los sistemas de disipación de calor por ventilación resultan escasos.

Uno de los nuevos sistemas de refrigeración de aerogeneradores patentado por Gamesa Innovation & Technology S.L se basa en el enfriamiento del interior de la góndola del aerogenerador desde el interior de la torre y está formado de un sistema de producción de agua refrigerada, garantizando el funcionamiento del aerogenerador en condiciones nominales cuando la temperatura y/o la humedad exceda los límites marcados por los componentes del propio aerogenerador, así como un resultando poco invasivo en el interior del propio aerogenerador, de esta forma, se evita el rediseño de componentes y sistemas existentes, así como la redistribución del espacio interior para su alojamiento.

Este sistema se basa en el enfriamiento del interior de la góndola del aerogenerador desde el interior de la torre y para ello consta de un sistema de producción de agua

refrigerada, situado en el exterior del aerogenerador, acoplado mediante tuberías frigoríficas a un grupo hidráulico para acumulación y bombeo del agua refrigerada que se impulsa por medio de tuberías hasta una unidad terminal, formada de una batería de intercambio térmico y un ventilador, que se sitúa lo más próxima posible a la góndola del aerogenerador y en la cual se enfría el aire del interior de la torre y se impulsa enfriado al interior de la góndola.

El equipo consta también de un sistema de deshumidificación que garantiza que la humedad relativa en el interior de la torre no supere un valor predeterminado, por ejemplo un 75%, el cual pudiera provocar corrosión y/o derivaciones y cortocircuitos, y que no sea desmesuradamente bajo, por ejemplo inferior al 30%, para impedir la aparición de problemas por acumulación de electricidad estática.

El funcionamiento del equipo es regularizado por un sistema de control que monitoriza continuamente la temperatura y/o humedad existentes, de manera que en función de la temperatura existente en el interior de la torre, si ésta excede una temperatura de consigna prefijada, el sistema activa el equipo. Por otro lado, siempre que se exceda una temperatura exterior fijada, el equipo arrancará para conservar la reserva del depósito de agua fría, y así poder abastecer agua de forma instantánea a la temperatura adecuada cuando se supere la temperatura interior de consigna.

El sistema de producción de agua refrigerada está compuesto por un condensador, situada en el exterior de la torre, y un grupo hidráulico formado esencialmente por un intercambiador térmico, un depósito de inercia, un vaso de expansión, y una bomba, todo bajo la plataforma inferior de acceso al aerogenerador.

El agua enfriada se bombea a través de unas tuberías hidráulicas que se sitúan en el interior de la torre, acopladas entre el grupo hidráulico y la unidad terminal ubicada en la plataforma de la torre más próxima a la góndola del aerogenerador, donde a través de unas baterías de intercambio térmico aire-agua a la que llegan las tuberías hidráulicas, el aire del interior de la góndola será enfriado y empujado mediante un ventilador hacia el interior de la góndola.

Se prevé que el sistema sea reversible, de manera que también trabaje en ambientes con climas fríos originando agua caliente en lugar de fría, invirtiendo el ciclo de funcionamiento.

2.4.6.9. Estructura

El chasis principal (góndola o nacelle) es una estructura metálica donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, las mordazas del freno y, en su caso, las unidades hidráulicas. También puede ir acoplado el transformador, que suele tener la función de contrapeso del rotor.

El proceso de ensamblaje de los componentes de la góndola consta de las siguientes etapas:

1. Ensamblaje del bastidor

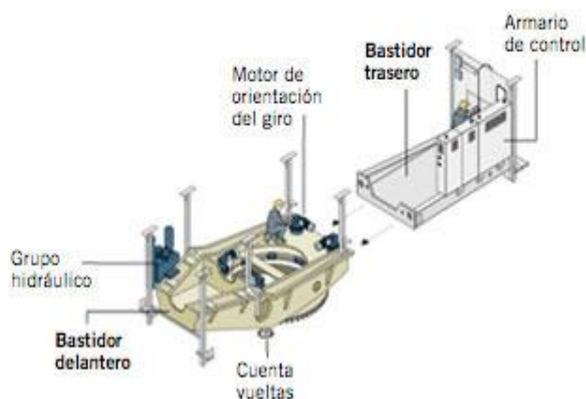


Figura 42.

Acoplado el sistema de giro con sus motores de orientación, columnas y grupo hidráulico, y superado el test de giro, se acopla el conjunto con el bastidor trasero. Posteriormente, se colocan las vigas raíl, el polipasto de servicio y se cablea el armario de control.

2. Ensamblaje de la multiplicadora

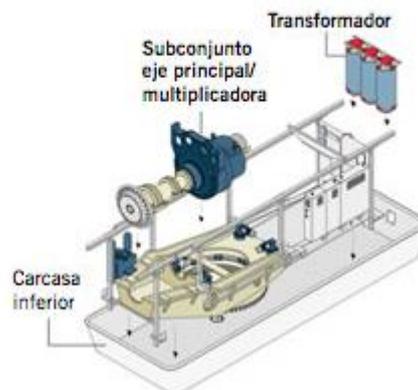


Figura 43.

Se instala el conjunto de la nacelle dentro de la carcasa inferior y se acoplan el transformador de potencia y el subconjunto eje principal/multiplicadora.

3. Ensamblaje del generador

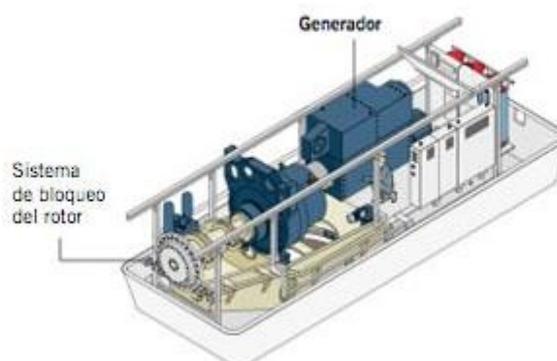


Figura 44.

El proceso continúa con el ensamblaje y alineado del generador y la conexión eléctrica de todos los componentes al armario de control. Una vez conectados, se somete a la nacelle a una completa comprobación final, representando su funcionamiento en el parque eólico.

4. Ensamblaje de la carcasa

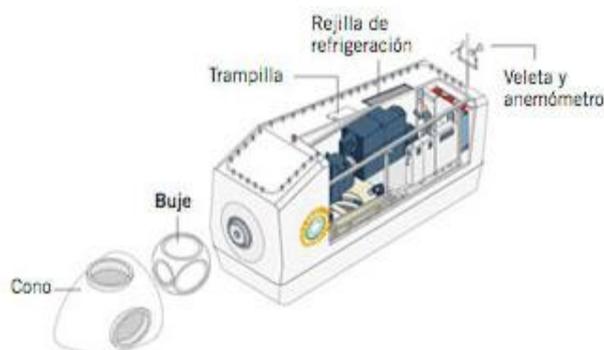


Figura 45.

Aprobado con éxito el test de comprobación de la nacelle, se acopla la carcasa superior, y la nacelle está lista para ser enviada al parque eólico que corresponda.

La dimensión y el peso del chasis principal dependerán de las cargas que deba soportar, al igual que su diseño que obedecerá a la geometría, masa y volumen del conjunto. Solapado a este chasis va colocada una cubierta cuyo propósito es salvaguardar los componentes del sistema contra los efectos del medio ambiente.

2.4.6.10. Sistema de giro

Los métodos de control en un aerogenerador tienen dos importantes funciones, el primero es el aprovechamiento máximo de la fuerza del viento mediante la orientación del rotor, el segundo es la protección del aerogenerador ante velocidades de viento que podrían dañar la instalación.

Para la orientación el aerogenerador cuenta con aparatos anemométricos y de veletas para la medida de la dirección del viento instalados sobre la góndola. Los datos almacenados pasan al ordenador de control, que según un algoritmo determinado, decidirá como deberá mover la góndola gracias al sistema de corona dentada y motor de giro instalados en la base de la góndola en su unión con la torre.

Es preciso aclarar que el control sobre la orientación del rotor no se realiza a tiempo real, si no que el algoritmo, con los datos almacenados, debe ser capaz de garantizar que realmente el viento ha variado de dirección de forma estable, antes de que se produzca el

giro de la góndola, ya que en caso contrario daría lugar a un movimiento errático del sistema que reduciría su eficiencia.

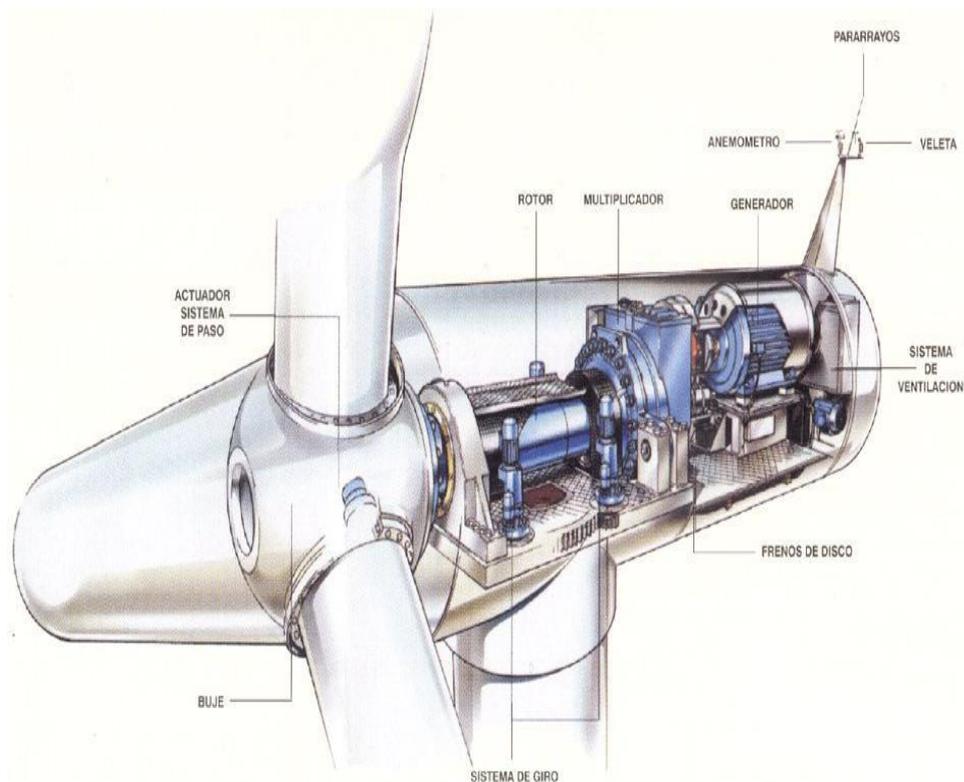


Figura 46. Nacelle

Los principales instrumentos para la obtención de la velocidad y la dirección del viento son, para la velocidad el anemómetro rotativo de cubeta o anemómetro de hélice, y para la dirección del viento, se utiliza una tradicional veleta industrial, de paletas o paletas separadas.

Anemómetro:

Tanto el anemómetro rotativo de cubeta como el anemómetro de hélice constan de dos subconjuntos; el sensor y el transductor. El sensor es el dispositivo que rota por acción de la fuerza del viento y el transductor es el que genera la señal que se grabará.

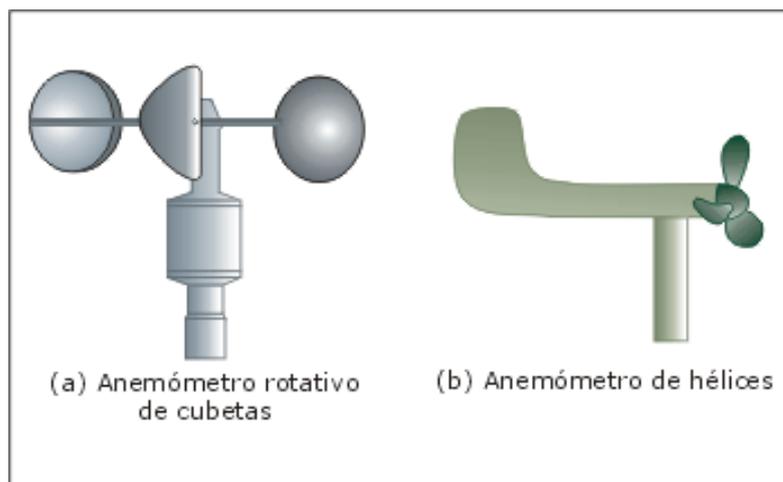


Figura 47. Anemómetros

Anemómetros rotativos de cubetas

Generalmente el anemómetro rotativo de cubetas está formado por tres cubetas cónicas o hemisféricas montadas simétricamente respecto a un eje vertical de rotación.

Sus cubetas (cazoletas o copelas) se unen al eje por medio de un brazo de manera perpendicular, deben estar posicionadas a un ángulo equidistante de 120° en relación al eje. Esta disposición inducirá un giro sobre el eje y por tanto un número de revoluciones por segundo que se podrán registrar de forma electrónica. La forma de las cubetas provoca un rozamiento muy pequeño con respecto al viento para evitar pérdidas

Anemómetros con hélices o con montura fija

Habitualmente el anemómetro con hélices está compuesto de una hélice de dos, tres o cuatro paletas radiales que rotan sobre un eje de giro horizontal frente al viento. Existen varios anemómetros de hélice que emplean moldes ligeros de plástico o de espuma de poliestireno para que las paletas de la hélice debido a su menor masa necesiten bajas velocidades de viento al inicio.

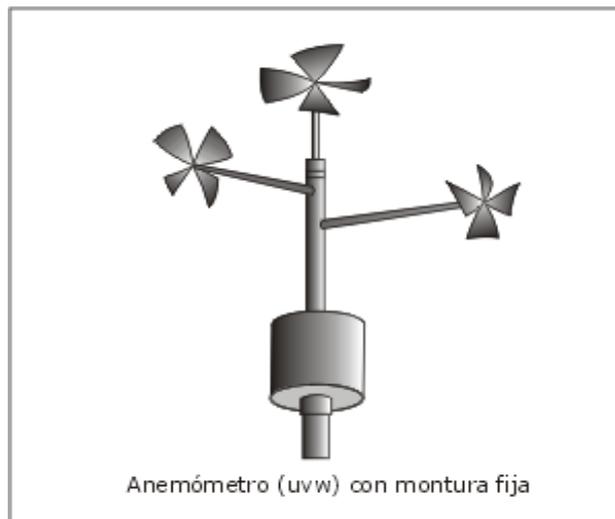


Figura 48. Anemómetro con montura fija

Para determinar la velocidad y la dirección del viento horizontal se usan hélices dispuestas de forma ortogonal. Para determinar la componente vertical del viento, se puede emplear una tercera hélice con una montura fija que gira sobre un eje vertical.

Veleta:

La veleta es un aparato para comprobar la dirección del viento. Una pequeña veleta acoplada en la capota del aerogenerador, detecta la dirección del viento y remite una señal al sistema de control que ubica el rotor de frente al viento.



Figura 49. Veleta

La veleta de cola y el sistema de protección contra vientos fuertes en los rotores

eólicos de eje horizontal, cumplen tres funciones:

- a) Como un sistema de orientación: para bajas y medias velocidades del viento, cuando el aerogenerador está en operación, la veleta mantiene el rotor de frente al viento. Mientras más tiempo permanezca posicionado frente al viento, más energía produce el aerogenerador.
- b) Como un sistema de regulación de velocidad: a altas velocidades del viento, el «mecanismo de protección contra vientos fuertes» provoca que el rotor salga de la posición de frente al viento, es decir, lo desorienta. La velocidad de rotación y la potencia entregada disminuyen, por lo que protege al rotor de un embalamiento.
- c) Como un sistema de frenado: si la velocidad del viento sigue aumentando accionará los mecanismos de detención del rotor.

2.4.6.11. Sistema de control

El sistema de control será diferente en función del tamaño del aerogenerador. Para pequeñas máquinas, el control será simple y normalmente pasivo, por el contrario, para grandes máquinas (media y alta potencia), será más complejo debido a los múltiples parámetros a medir y el aumento de precisión requerido, pero constituirá un coste, que aunque alto, es pequeño en comparación con el coste total del sistema.

Los controles pasivos hacen sus medidas de la manera más simple posible y se valen del sistema para actuar, mientras que los sistemas de control activos utilizan sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos o combinaciones de los anteriores para alcanzar su propósito.

Los objetivos principales de un sistema de control son los siguientes:

- a) Conseguir que la turbina funcione en armonía con el viento (orientación, control de potencia, etc.).
- b) Obtener un funcionamiento automático del aerogenerador.
- c) Proteger al sistema (sobrevelocidades, vibraciones, sobrecalentamientos, enrollamientos de los cables de interconexión).

- d) Decidir la conexión/desconexión del generador y realizar correctamente los arranques y paradas del aerogenerador.
- e) Señalizar posibles averías o funcionamientos incorrectos disminuyendo los costes de mantenimiento.
- f) Maximizar el rendimiento del sistema.
- g) Aumentar la vida útil del aerogenerador (minimizando las cargas imprevistas que se puedan presentar).

Estas señales (velocidad del viento, orientación, velocidad del rotor, ángulo de paso, temperatura del generador, tensión y corriente de salida, etc) se expresarán mediante transductores que deberán ser enormemente fiables y precisos, ya que toda la estrategia de control puede ser inútil si las medidas son erróneas. Por ejemplo, se deberán preservar los elementos electrónicos y el cableado contra posibles descargas de origen atmosférico o contra interferencias electromagnéticas que puedan producirse.

Existen múltiples métodos y estrategias de control de aerogeneradores, casi tantos como tipos de máquinas, aquí se expondrá una visión general de los sistemas más utilizados en la actualidad.

Actualmente los sistemas de control se basan en microprocesadores, especialmente desarrollados para su uso en el control de aerogeneradores. Estos sistemas de control permiten integrar de forma eficiente todos los subsistemas que actúan en la correcta operación del aerogenerador, permitiendo además modificaciones de programas por el usuario, centralizar las comunicaciones y recogidas de datos, telecontrol de varios aerogeneradores en el caso de parques eólicos, interconexión con centrales meteorológicas, etc.

El control suele estar realizado mediante un PLC (Control con Lógica Programable) formado por uno o más microprocesadores que componen la unidad central de proceso, una etapa de memoria donde está el programa de control, un dispositivo de visualización y una etapa con entradas/salidas con sus relativos convertidores, por el cual el sistema de control se comunica con los sistemas que se desea gobernar.

Los dispositivos PLC pueden disponer de la posibilidad de enchufar una etapa de

comunicación mediante la cual el sistema de control se puede conectar a un equipo de programación, para introducir o modificar el programa de control.

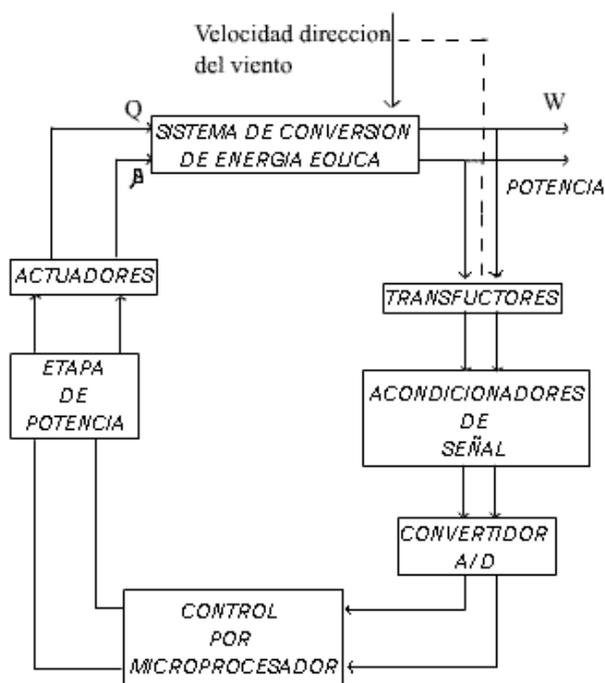


Figura 50. Esquema de actuación de un PLC

Los sistemas de control están integrados principalmente por tres etapas:

- 1) Etapa de entrada de control: Esta fase se encarga de conducir las señales procedentes de los sensores dispuestos por toda la máquina hasta el control central para procesarse rápidamente y enviar las órdenes de mando adecuadas en cada momento a los dispositivos de actuación.
- 2) Etapa de señales de alarma: Esta fase se encarga de almacenar las señales correspondientes a situaciones anómalas o de mal función en sistemas vitales, estableciendo con prioridad absoluta por encima de cualquier otra orden la parada de emergencia del aerogenerador, hasta que desaparezca la causa que originó la emergencia. Se suelen programar distintos niveles de alarmas como son las alarmas de parada de máquina, las cuales obligan a inspeccionar la máquina y puesta en operación manual. Otras alarmas permiten a la maquina conectarse automáticamente cuando desaparece la causa de la alarma. Otras solo informan de una anomalía pero sin parar la máquina.

- 3) Etapa de salida de control: Esta fase transmite las señales eléctricas de ejecución de las instrucciones que recibe del sistema central de control, accionando los actuadores correspondiente.

Una de las funciones más importantes del sistema de control y que repercute en la integridad de la máquina eólica es la conexión y desconexión a red.

Conexión a Red:

El paso de conexión de un aerogenerador a la red eléctrica será diferente según sea el tipo de máquina, el tamaño, la potencia generada por el alternador..., así máquinas eólicas de paso fijo seguirán una estrategia y los aerogeneradores que disponen de sistemas de cambio de paso seguirán otra.

Todos los sistemas intentarán realizar la operación lo más suave posible para evitar puntas de par, lo menos complejo posible y las menos veces posibles. Para conseguirlo se deberán implementar sensores de medida apropiados a los parámetros que se miden (detectar el límite de vueltas del rotor antes de superar el deslizamiento máximo debe ser un proceso muy preciso) y deberán seleccionar valores apropiados de esos parámetros para que el control tome decisiones correctas evitando así múltiples conexiones y desconexiones lo que repercutiría en una pérdida de vida útil de los elementos de la máquina, caja multiplicadora, ejes, rotor, generador etc.

Aerogeneradores con paso fijo

Una vez que el control ha comprobado todas las variables necesarias y no ha descubierto ninguna anomalía, esperará a que se supere el límite mínimo de velocidad de viento para empezar a generar. Si se cumple esta condición activa el sistema de orientación, una vez orientado libera el freno. El aerogenerador está ya preparado para efectuar la conexión a red.

El aerogenerador comenzará a girar hasta alcanzar una velocidad mínima de rotación del eje de alta, momento en el cual se activará el sistema de arranque gradualmente para que se produzca una conexión suave, sin esfuerzos mecánicos ni

sobrecorrientes de conexión. Una vez efectuada la conexión el sistema de control puentea el sistema de arranque.

En el caso de una desconexión por pequeñas variaciones a bajas velocidades de viento, el sistema de control se conectará en cuando las revoluciones superen mínimamente la velocidad de rotación nominal sin pasar por el proceso de arranque suave para evitar fluctuaciones.

Aerogeneradores de paso variable

El sistema mide la velocidad de viento constantemente. Si durante pocos minutos se detecta una velocidad de viento suficiente para el funcionamiento del aerogenerador, se inicia el proceso de arranque automático.

Para ello se alinea la góndola en la dirección del viento y las palas del rotor se colocan en posición de funcionamiento (mínimo ángulo). Para ello se absorbe durante un corto plazo una pequeña potencia de la red. Al alcanzar el límite inferior de revoluciones el aerogenerador comienza a inyectar potencia a la red. En éste sistema no existen las corrientes de conexión clásicas.

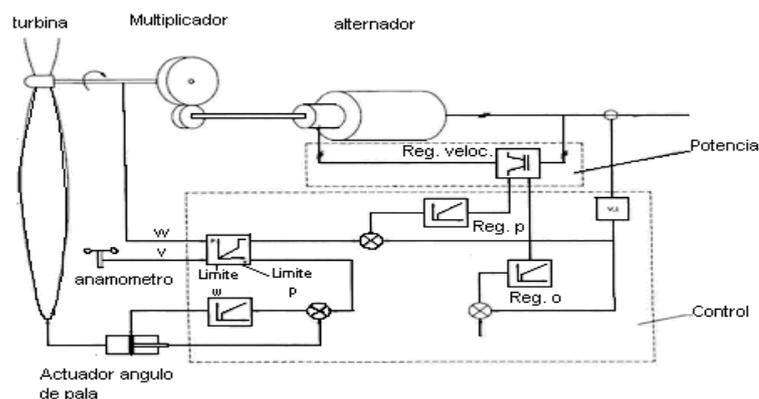


Figura 51. Sistema de control para generador paso variable

Desconexión de Red:

El sistema de control está continuamente supervisando las revoluciones del rotor de alta velocidad, si las revoluciones se reducen por debajo de un valor mínimo, se desconecta la compensación de reactiva y a continuación el aerogenerador de la red.

Aerogeneradores con paso fijo

En el caso de que se alcance el límite superior de revoluciones, se deberá actuar con el freno de emergencia mediante aerofrenos en el primer momento hasta bajar un número de revoluciones suficiente, pero sin desconectar de la red al aerogenerador, con el fin de no perder el par resistente del alternador y evitar embalamientos. El aerogenerador se podrá desconectar de la red cuando la velocidad de giro del rotor sea como máximo la de sincronismo. Por último y ya a bajas revoluciones se puede aplicar el freno eléctrico para efectuar la parada total.

Aerogeneradores de paso variable

Por encima de la velocidad nominal se mantienen las revoluciones del rotor, mediante la regulación del ángulo de paso de las palas. Para parar la máquina ya sea de forma manual o por control, se aumenta el ángulo de las palas y con ello se reduce la superficie de incidencia efectiva de las mismas, hasta que el aerogenerador reduce su velocidad hasta casi la parada total. Existen sistemas de paso variable con unidades totalmente independientes entre sí pero que actúan siempre sincrónicamente, en este tipo de sistemas se prevé que si falla en el proceso de parada una de las unidades, las otras dos son suficientes para cambiando el ángulo de paso frenar la máquina.

Un problema en los aerogeneradores son las paradas por pérdida de red o salida de los límites de operación. En éste caso los sistemas de paso fijo deben actuar con los aerofrenos, en el caso de paso variable deben colocar inmediatamente las palas en posición de bandera. El efecto de la caída de tensión debido a la espontánea apertura del contactor se puede evitar mediante grandes condensadores conectados en paralelo con la red.

Pero el mayor problema es la pérdida del control de frecuencia. La regulación de frecuencia solo es válida cuando se está conectado a red, ya que el generador está generalmente libre de cambiar la frecuencia mediante el cambio de velocidad del rotor. El sistema de control deberá detectar rápidamente cualquier situación de éste tipo. En el caso de sistemas de velocidad variable, la desconexión de la red es inmediata, en cuando se ha superado algún límite de red.

2.4.6.12. Torre

La preferencia en el mercado eólico es construir turbinas eólicas cada vez más potentes. Dado que el aumento de la potencia trae aparejado el aumento del diámetro del rotor, esta preferencia sobrelleva al rediseño de muchos de los componentes mecánicos y estructurales del aerogenerador.

En las torres se demanda mayor altura y capacidad portante. El aumento de tamaño de la estructura aumenta los costos de la misma y la complejidad de su traslado, montaje y mantenimiento.

El desarrollo de turbinas cada vez más potentes generó sucesivos incrementos en los tamaños del aerogenerador y el rotor, y por lo tanto en las cargas que debían soportar las torres. Así las innovaciones tecnológicas que permitían extraer mayor potencia de las máquinas, se fueron desarrollando en diseños estructurales para torres cada vez más grandes. En los últimos 30 años, los aerogeneradores han cuadruplicado su tamaño.

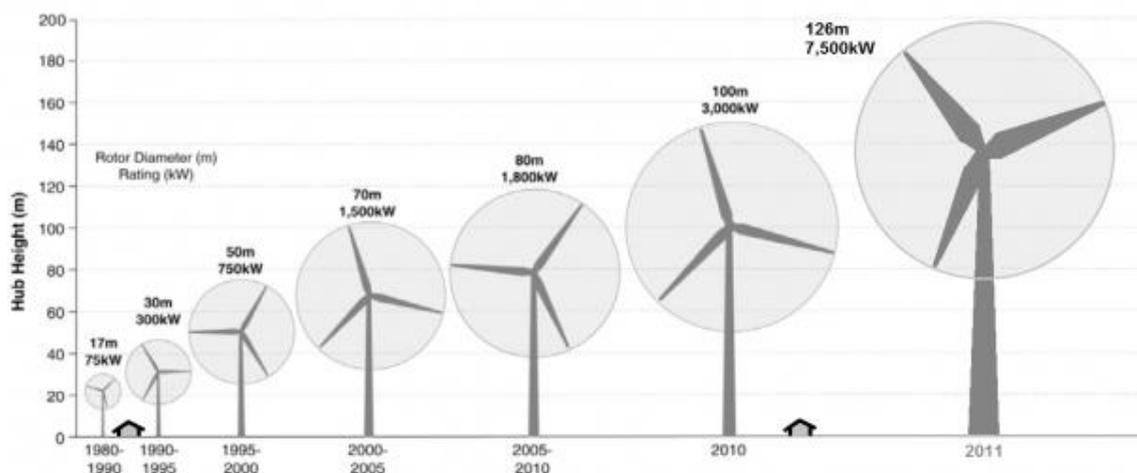


Figura 52. Evolución del tamaño de los aerogeneradores

Además de ser el elemento estructural que transfiere a la cimentación las cargas de la góndola y el rotor, la torre es la parte más visible del aerogenerador, por lo que no debe despreciarse su estética. Por estos motivos es fundamental seleccionar la geometría y el material más conveniente a cada caso.

Para instruir la distinta respuesta estructural que puede obtenerse dependiendo de los distintos materiales de las torres, en la figura 53 se presentan los resultados de un estudio realizado en Alemania sobre la turbina experimental WKA-60. Se observa la variación en las frecuencias naturales.

Turbina eólica Rotor: 3 palas Diámetro :60m Velocidad del rotor: 23 r.p.m Peso en el extremo superior: 180t Altura del buje: 50m Altura de la torre: 46,6m	CILINDRICA	CINDRICA CON BASE CONICA	CONICA	CONICA CON RUEDAS	RETICULADA	PREFABRICADA PRETENSADA	REFORZADA	PRETENSADA
Frecuencia del primer modo de flexión.	0,567	0,577	0,570	0,551	0,60	0,65	0,941	0,947
Múltiplo de la velocidad nominal del rotor.	148	151	149	144	157	170	245	247
Diámetro superior	35	35	35	25	35	35	35	35
Diámetro inferior	35	7,1	44	25	116	35	84	55
Espesor de la pared	55/15 Variable por tramos	25/15 Variable por tramos	30/15 Variable por tramos	20/15 Variable por tramos	16/10	520/250 Variable por tramos	300	300
Peso								
Torre	150	120	111	40	110	465	485	477
Equipamiento	22	225	228	20	225	21	225	225
Total	172	1425	1338	60 + riendas	Ca. 120	485	507,5	499,5

Figura 53. Frecuencias naturales para distintos tipos de torres

A continuación se describen los tipos existentes, sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

Torres de Celosía:

Son realizadas utilizando perfiles de acero soldado. Este tipo de torre resulta favorable para el tamaño de rotor de aerogeneradores de baja potencia, por lo que fueron muy utilizadas en la década de los 80. A medida que se fueron levantando rotores de mayores diámetros, cayeron en desuso, dando lugar a las torres tubulares de acero. Uno de los motivos fue el impacto visual de las torres de celosía, que se aumentaba al crecer las torres en tamaño y se hacía muy evidente cuando se instalaban varias turbinas juntas.



Figura 54. Torre en celosía

En cuanto a las cualidades estructurales y tecnológicas de las torres de celosía para aerogeneradores multimegavatio, la principal desventaja radica en la complejidad de su ensamblaje y posterior montaje. Estructuralmente hablando, los nudos son idóneos para la corrosión y las diagonales son muy sensitivas a las cargas de viento. Se distribuyen para mini-eólica y para instalaciones aisladas, dado que su costo es bastante menor que el de las torres tubulares.

Este tipo de torres en celosía necesitan un emplazamiento extra para la instalación de los equipos de suelo como sistemas de control o equipos eléctricos. El acceso a la góndola se efectúa por las escalerillas exteriores de baja protección frente a fuertes vientos y condiciones climáticas desfavorables. No se utilizan en zonas geográficas septentrionales o para generadores de gran potencia.

Torres con tensores:

Los tensores se utilizan en aerogeneradores de baja potencia, para dar rigidez a torres de gran esbeltez, dando como consecuencia un conjunto estructural liviano y económico.

Permiten tumbar la torre para bajar el aerogenerador a nivel del suelo, y efectuar tareas de mantenimiento. Este tipo de torre es fácil de montar y puede instalarse tanto en terrenos planos como irregulares, aunque es preferible su utilización en zonas llanas. Tienen la desventaja de inutilizar el espacio alrededor del mástil, por lo que su emplazamiento más apropiado es en zonas aisladas.



Figura 55. Torre con tensores

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre. Finalmente, este tipo de torres es más propenso a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.

Torres tubulares de acero:

Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular que procuran en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. Precisan una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y necesitan un menor mantenimiento que las torres de celosía. Son las más utilizadas en equipos de generación de energía.

Las torres se construyen con diámetro y espesor creciente hacia la base, con el fin de alcanzar mayor rigidez en esta y al mismo tiempo ahorrar material. Algunas poseen todos sus tramos tronco-cónicos y otras combinan tramos cilíndricos y cónicos.



Figura 56. Torre tubulares

Las limitaciones para el transporte y las posibilidades estructurales y económicas del acero delimitan la altura de estas torres a 80 m, por lo que en general son utilizadas para aerogeneradores de potencia hasta 3MW.

El proceso constructivo de este tipo de torres consta de las siguientes etapas:

1. Recepción y control de calidad de planchas de acero

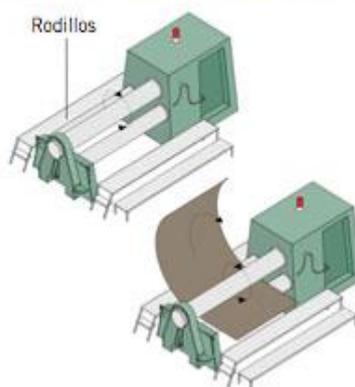


Figura 57.

Los cilindros que componen la torre de un aerogenerador parten de unas láminas de

chapa oxicortada e imprimada.

2. Curvado

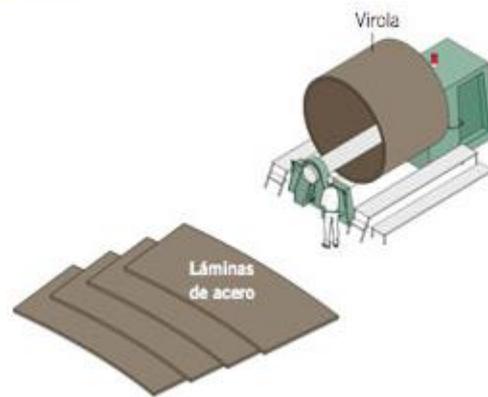


Figura 58.

Estas láminas son metidas en una máquina con tres grandes rodillos que van conformando las virolas.

3. Soldado

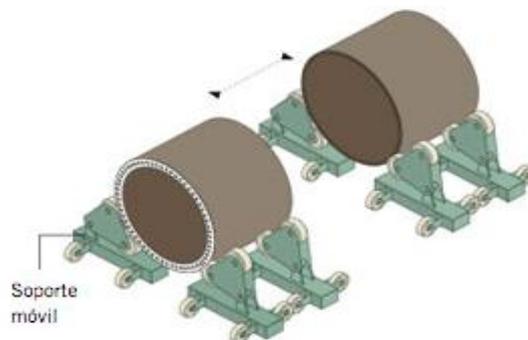


Figura 59.

Las virolas se sueldan por arco sumergido hasta crear secciones de diferente longitud.

4. Granallado, pintado y secado

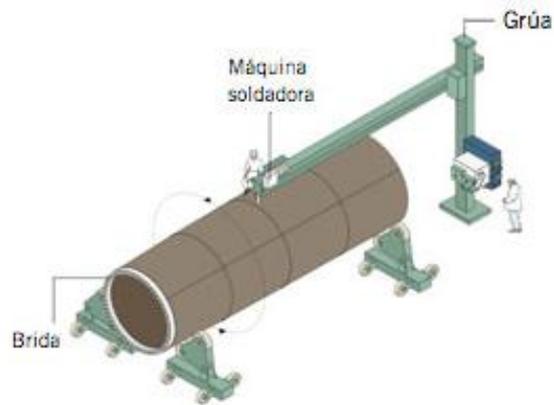


Figura 60.

La estructura se introduce en el túnel de pintado y secado. Concluida la torre en chapa, se realiza el tratamiento superficial, que radica en un granallado con doble acero y un recubrimiento de tres capas de pintura, obteniendo una protección C-5.

5. Ensamblaje de elementos auxiliares

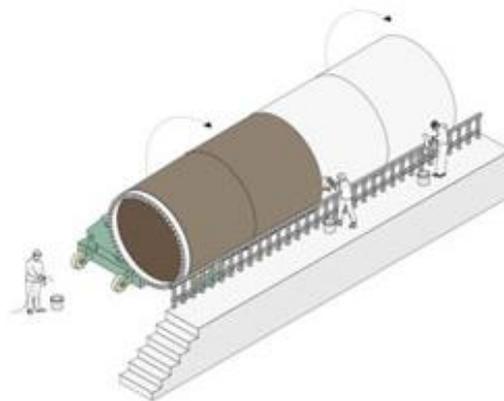


Figura 61.

Una vez la torre está seca, se procede al montaje de todos los elementos de servicio, tales como plataformas y escaleras.

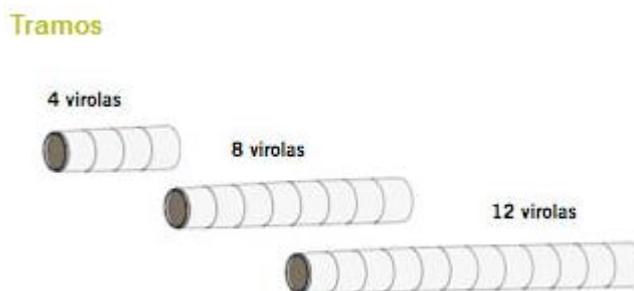


Figura 62.

Dependiendo del modelo y de la altura requerida (de 14 a 29 metros), los tramos pueden estar formados por un número de virolas que va de 4 a 12.

Torres de hormigón:

El diseño de estas permite alcanzar alturas mayores que las torres de acero; carecen de resonancia y su balanceo es mucho menor por lo que son más estables.

Las torres de hormigón no se fabrican de una sola pieza sino en segmentos de diferentes tamaños. Los tramos con mayor diámetro se dividen en dos o tres secciones para facilitar su traslado. Para unir los tramos entre sí se emplea una junta de resina epoxi. Posteriormente los tramos se tensan mediante tirantes de acero que discurren desde el extremo superior hasta la base.

Sus ventajas son:

- 1) La libertad de geometría.
- 2) Mayor control de su frecuencia natural y respuesta dinámica.
- 3) La amortiguación del ruido.
- 4) Su gran durabilidad.
- 5) El poco mantenimiento necesario.

En relación a torres metálicas equivalentes, las construidas en hormigón al tener mayor peso son más estables, por lo tanto necesitan menor inversión en las cimentaciones para igualdad de tamaño y además reducen las sollicitaciones de fatiga en la estructura, favoreciendo una mayor vida útil de la misma.

Cuando las dimensiones de la estructura impiden el traslado de los segmentos prefabricados, se recurre al hormigonado “in situ”. Éste modo más artesanal, cuenta con mayores incertidumbres constructivas y tiempos de realización. La eficacia de la estructura depende de la tecnología de los encofrados y las condiciones meteorológicas que influyen más que cuando se emplea hormigones prefabricados. Habitualmente sólo se hormigona “in situ” la parte inferior de la torre, dado que no es una opción económicamente favorable.

La desventaja que puede mostrar el hormigón es el debilitamiento y disminución de rigidez debido a desviaciones de temperatura. Estas cargas térmicas conviene incluirse en el cálculo estructural.



Figura 63. Torre de hormigón prefabricado

Las torres de hormigón aún están en etapa experimental y siguen estudiándose sus propiedades resistentes, pueden compararse con las chimeneas industriales de gran altura, que han sido bien estudiadas.

Torres híbridas de hormigón y acero:

Los productores de turbinas multimegavatio se encuentran a la exploración de soluciones estructurales factibles para obtener alturas de buje del orden de los 150 metros. Por este motivo varias empresas fabricantes de torres están experimentando distintas

opciones de torres híbridas, tipología que al momento parece ser la más favorable para el caso.

Consisten en un tramo inferior de hormigón al que se ajusta una estructura metálica. La combinación de materiales logra dureza en la base de la torre y más flexibilidad en la parte superior. Habitualmente se recurren a hormigones premoldeados de alta resistencia y secciones tubulares de acero. La sección transversal puede ser de distintas formas: cilíndrica, triangular, octogonal o en forma de cruz.

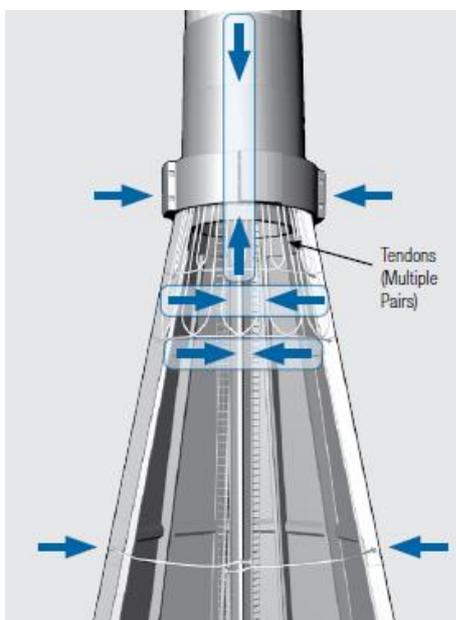


Figura 64. Base de una torre híbrida

Estas torres híbridas permiten alcanzar longitudes mayores a 100m y logran frecuencias naturales que evitan la resonancia con la frecuencia del viento.

Este diseño, además de su eficiencia estructural, facilita el transporte, agiliza el montaje y es visualmente agradable. Para la parte superior de acero, se utilizan torres metálicas de fabricación estándar.

Los inconvenientes de estas torres híbridas son:

- 1) Aprovechan la tecnología actual, pero de nuevo conservan sus inconvenientes, dejando de aprovechar las ventajas del hormigón como material durable, dúctil y libre de mantenimiento.

- 2) El pretensado se realiza en campo: lo que aumenta la complejidad de la ejecución y el aumento de plazos.
- 3) Dependen de la logística y suministro de ambas tecnologías.
- 4) No resulta ventajosa económicamente hablando.

2.4.6.13. Cimentación

Se distinguen dos grandes tipos de cimentación dependiendo de la ubicación del aerogenerador: cimentación onshore (sistemas ubicados físicamente en tierra firme) y cimentación offshore (sistemas ubicadas físicamente mar adentro).

Cimentación onshore:

La cantidad y nivel de detalle de la investigación geotécnica para el estudio de las condiciones de cimentación dependerá de las características de los aerogeneradores y su emplazamiento. A partir de estudios “in situ” y de laboratorio, la información geotécnica imprescindible puede resumirse de la siguiente manera:

- 1) Descripción del perfil del suelo, mediante la identificación de las diferentes capas y/o niveles geotécnicos en profundidad.
- 2) La posición del nivel freático.
- 3) Propiedades de identificación y clasificación de los suelos, mediante análisis granulométrico, índices de Atterberg, humedad natural, pesos específicos, etc.
- 4) Las propiedades resistentes del suelo en condiciones drenadas y no drenadas (ángulo de rozamiento, cohesión).
- 5) Las propiedades de deformación, en términos de sus módulos de deformación en condiciones estáticas y dinámicas.
- 6) Las características sísmicas del emplazamiento, a partir de la caracterización de las acciones sísmicas en cuanto a magnitud y aceleración de cálculo, y caracterización de la respuesta sísmica de los suelos.
- 7) Evaluación del potencial de licuación.

Una de las partes esenciales de un aerogenerador es la forma en que la torre se

sujeta al terreno. La elección del tipo de cimiento dependerá principalmente de la ubicación del aerogenerador y las condiciones del terreno. Según la European Wind Energy Association (2013), la cimentación supone aproximadamente el 6,5% del coste total para proyectos onshore y el 34% para proyectos offshore, lo que justifica una optimización de este tipo de estructuras. Actualmente, se construyen la mayoría de las turbinas eólicas en tierra, en suelos firmes y rígidos, pero la tendencia actual es la construcción de aerogeneradores offshore.

El cálculo de la cimentación dependerá de las cargas producidas por el rotor eólico en diferentes circunstancias de operación, por esto la tecnología del aerogenerador juega un papel fundamental.

La forma más frecuente de cimentar un aerogenerador es una zapata de hormigón. Las cimentaciones sobre losas de hormigón podrían dejar de ser apropiadas, pues grandes dimensiones provocan asentamientos diferenciales inadmisibles. La altura de las torres puede variar mucho, entre 40 y 130 m. Cuanta más alta sea la torre, mayor velocidad de viento, y por tanto, mayor generación de esfuerzos sobre la cimentación.



Figura 65. Hormigonado de la cimentación

Los aerogeneradores se sitúan en áreas con buenas condiciones de viento pero que, en la mayoría de ocasiones, se encuentran en terrenos inhóspitos o con malas condiciones de acceso, lo que dificulta la realización de las cimentaciones de estas estructuras. Para anclar estas torres habitualmente se utilizan cimentaciones o zapatas que sujetan la

estructura al terreno mediante gravedad, o bien mediante pilotes realizados sobre terrenos poco firmes.

Se pretende garantizar la estabilidad de la estructura y certificar una transmisión de cargas al terreno con la adecuada intensidad para que este no colapse. En muchos casos los terrenos no permiten dicho anclaje, por lo que es habitual el uso de zapatas masivas realizadas con hormigón armado. Sin embargo, las geometrías empleadas en planta son muy diversas. Se utilizan soluciones con planta poligonal, circular e incluso cruciforme, siendo esta última un caso muy aislado. Se ha probado que la cimentación superficial con geometría en planta circular es la que mejores resultados promete a nivel estructural y económico.

Las ventajas de la prefabricación de la cimentación son evidentes, reduciéndose también la cantidad de material necesario respecto a cimentaciones ejecutadas “in situ”. La prefabricación disminuye los problemas de hormigonado in situ de grandes volúmenes, que no sólo crean problemas importantes cuando los accesos se encuentran alejados de las plantas de fabricación de hormigón e incrementan considerablemente el calor de hidratación en el fraguado del hormigón, sino que las temperaturas extremas pueden reducir el número de días de trabajo efectivo.

Asimismo, teniendo en cuenta que la vida útil de un aerogenerador puede ser de 20 a 25 años, la prefabricación hace más fácil la fase de desmantelamiento de las instalaciones.

Una vez la cimentación entre en carga, por un lado, deberá asegurar la estabilidad del aerogenerador impidiendo su vuelco y deslizamiento a causa de las acciones horizontales. Y por otro lado, la reacción del terreno cuando se le transmiten las cargas, creará una distribución de presiones bajo la zapata, que ocasionará esfuerzos de flexión y corte en el hormigón, siendo necesaria la colocación de barras de acero.

Un correcto acondicionamiento del terreno donde se va a posicionar la cimentación es de vital importancia, así algunos métodos de acondicionamiento del suelo son:

Realizar una precarga, compactación, o vibración

Empleando este método se puede alcanzar la fijación del terreno y reducir así futuros asentamientos. Otros métodos de mejora del terreno consisten en dejar caer al terreno pesos desde cierta altura, o introducir vibradores que reorganicen las partículas que conforman el suelo.

Realizar infiltraciones al terreno con lechada de cemento

Inyectando nuevos materiales al suelo, normalmente, lechadas de cemento. De esta manera se modifica la permeabilidad del terreno y por consiguiente el flujo de agua, además se incrementa su capacidad portante.

Mediante el jet-grouting

El Jet-Grouting es una tecnología que utiliza la inyección radial de fluidos, a muy alta velocidad, para erosionar el terreno, sustituyendo parcialmente el material erosionado y mezclándolo con un agente de cementación para formar un nuevo material denominado lechada. Al introducir este material fresco en el terreno, además de contribuir por sí mismo a la mejora de las propiedades geomecánicas y físicas de la zona inyectada una vez haya fraguado, consigue confinar el terreno circundante de forma significativa.

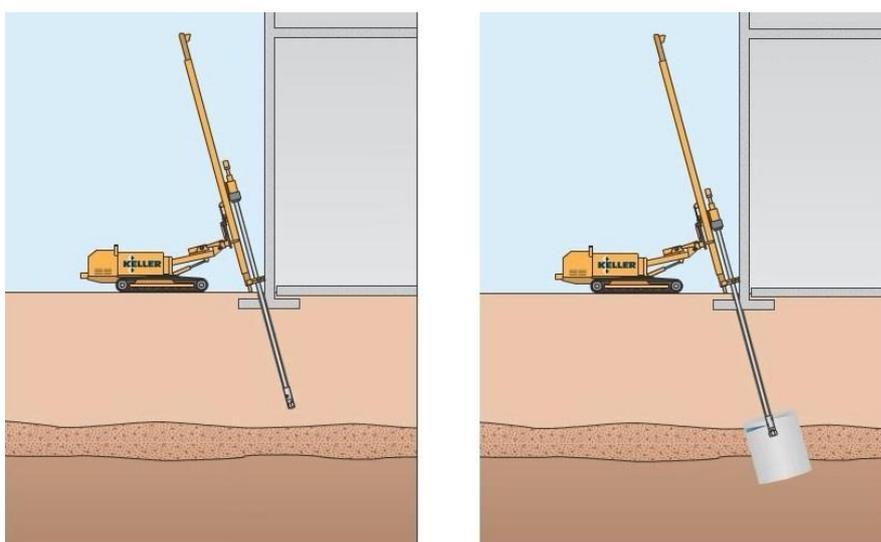


Figura 66. Mediante el jet-grouting

Para su ejecución se requiere de una máquina perforadora con una tubería de perforación en su extremo, monitor con toberas de inyección y bombas de alta presión que deben suministrar constantemente grandes volúmenes de lechada.

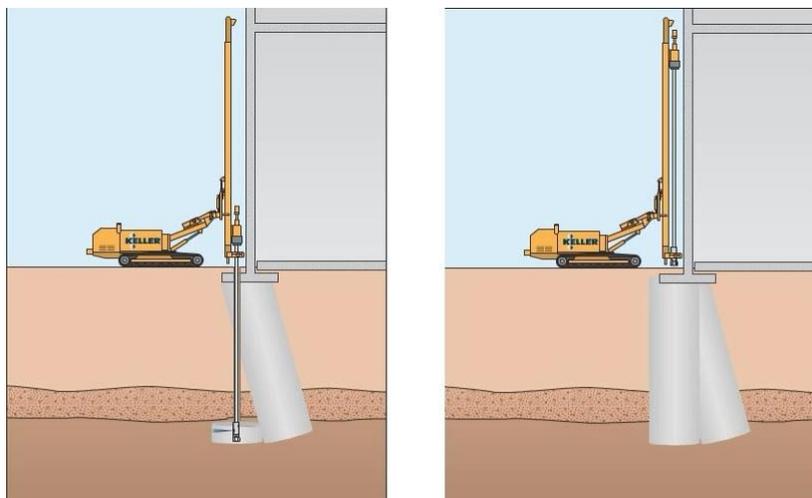


Figura 67. Mediante el jet-grouting

Cimentación offshore:

En un primer momento los parques estaban ubicados en tierra (onshore) por su simplificación en todos los aspectos, ya sean constructivos, de gestión..., pero debido al impacto medioambiental, a la limitación de espacio y al estudio de mejores condiciones climáticas, se inició la construcción de parques marinos (offshore).

Las principales ventajas que los parques marinos suponen son: la posibilidad de construir con mayores dimensiones, ya que no hay limitaciones para el transporte por mar (en tierra se depende de los radios de curvatura de las carreteras, o de la altura en los túneles) y la mayor estabilidad del viento en el mar, debido a la escasa rugosidad que presenta la superficie del agua en comparación con el terreno firme por sus montañas, árboles o edificios.

Sin embargo, los parques offshore presentan algunos inconvenientes. Por una parte, emplazar correctamente los elementos y posteriormente fijarlos al fondo marino es altamente difícil, ya que requiere técnicas de construcción y emplazamiento muy costosas. Por otra parte, las tareas de inspección y mantenimiento pueden verse dificultadas por la limitada accesibilidad que el medio marino conlleva. Además se podría afirmar que las

condiciones extremas que pueden ocurrir en el mar superan las peores expectativas en tierra.

Se pueden diferenciar los siguientes tipos de cimentaciones offshore: por gravedad, monopilote, trípode, tripilote, jacket y flotante. Cada una de estas variantes de subestructura marina está pensada para determinados rangos de profundidad del fondo marino, tal y como se explica a continuación.

Por gravedad

Este método de cimentación tiene por objetivo contrarrestar el efecto de las mareas u otras fuerzas sobre la torre por medio de un peso de enorme magnitud situado en la base del aerogenerador.

Con este sistema de cimentación no hay que penetrar el suelo para poder implantar esta subestructura. No obstante, el peso necesario para contrarrestar los componentes sobre la torre aumenta en gran medida según aumenta la profundidad. Por dicha razón la cimentación por gravedad está limitada a profundidades de menos de 20 metros.



Figura 68. Cimentación por gravedad

Monopilote

Para profundidades de entre 15 y 30 metros, puede que la solución óptima sea el monopilote. Consiste en “clavar” exactamente un pilote en el fondo marino, a unos 10

metros bajo el suelo, sobre el cual se ubicarán los módulos de la torre.

Este sistema proporciona mucha estabilidad al aerogenerador, pero para torres de gran altura se generarían esfuerzos enormes de flexión en la base de la misma. Por ello, cuando la cota superior prevista es demasiado elevada este método tiende a ser descartado.



Figura 69. Cimentación por monopilote

Trípode

Para profundidades superiores a 30 metros, sería necesario reforzar la base de la torre. Para ello surge la solución denominada como “trípode”, que es, una subestructura consistente en tres “patas” que actúan como pilotes que se reparten los esfuerzos y sobre dicho trípode se colocaría la torre.



Figura 70. Cimentación por trípode

Tripilote

Con el mismo concepto que el trípode, este tipo de subestructura persigue mejorar el modelo de cimentación por monopilote para profundidades del entorno de los 50 metros. Consiste en colocar tres pilotes paralelos que se unen en la base de la torre. Aportan mucha estabilidad pero demandan una gran cantidad de acero. Sin embargo, la unión con la torre resulta más sencilla que la del sistema trípode.



Figura 71. Cimentación por tripilote

Jacket

Obtenida de la ingeniería petrolífera, este sistema consiste en unas subestructuras más ligeras, de 4 columnas interconectadas en forma de celosía, que sería útil en casos en los que la implantación del trípode resultase inviable. Admite mayores profundidades y prueba de ello son las instalaciones de extracción de crudo que hay en el mar.



Figura 72. Cimentación por jacket

Flotantes

Se trata del sistema más novedoso para hacer frente a profundidades mayores a 100 metros, donde alguna de las anteriores posibilidades encarecería mucho la implantación del aerogenerador. Consiste en hacer flotar el aerogenerador equilibrando el empuje sobre la torre y el peso del material. Así quedan contrarrestados los balanceos y el hundimiento de la torre. No obstante para que el aerogenerador no flote a la deriva, se fija su situación por medio de unos cables que hace las veces de tensores anclados al fondo marino.



Figura 73. Cimentación flotante

2.4.7. Control de la potencia del aerogenerador

Cuando el viento ha superado la velocidad nominal de trabajo, en la que se consigue la máxima potencia producida por el equipo, existen dos métodos de control, para evitar que puedan producirse daños y mantener la potencia desarrollada por el rotor lo más estable posible. Estos métodos son mediante el control activo por cambio de paso del ángulo de las palas y por el control pasivo por desprendimiento de flujo o pérdida.

Control activo por cambio de paso del ángulo de las palas:

Mediante un dispositivo mecánico las palas giran el perfil enfrentado al viento modificando su aerodinámica, de este modo mantiene constante la rotaciones del rotor y así se mantiene constante la entrega de potencia. Es el método más caro pero también es el que ofrece un mayor control.

El ángulo de paso de la pala (β) se define como el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico de la pala y el plano de rotación del rotor. Si se varía el ángulo de paso, el ángulo con el que el viento incide sobre el perfil variará, por lo que también lo harán las fuerzas de resistencia y sustentación, encargadas de generar la potencia producida.

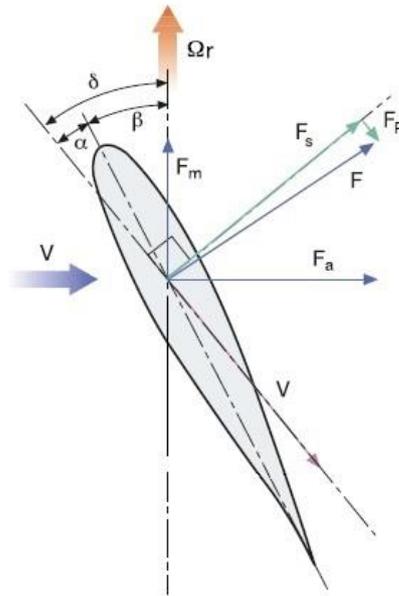


Figura 74. Diagrama de fuerzas en un perfil alar

La variación de las fuerzas de resistencia y sustentación modifican la velocidad angular del rotor, y a su vez la velocidad relativa también cambia, lo que nuevamente modifica tanto al ángulo de ataque como al número de Reynolds, y como consecuencia, esto modifica el valor de los coeficientes de sustentación y resistencia.

Existen otros factores que modifican la respuesta dinámica del rotor: en la práctica, la velocidad del viento cambia constantemente, además de que en el comportamiento dinámico, las características del rotor pueden ser modificadas debido a la flexión de las palas, a la inercia del rotor, a la respuesta de flujo alrededor de la pala, a la falta de alineación del rotor al viento y por la suciedad que se adhiere a las palas.

La variación del ángulo de paso de las palas consiste en hacerlas girar sobre su eje longitudinal. Los mecanismos de giro se encuentran situados en la raíz de la pala. El cambio del ángulo de paso puede ser de forma independientemente como de todo del grupo

de palas.

La fuerza para realizar el movimiento de rotación del cambio del ángulo de paso puede darse a través de mecanismos impulsados por dispositivos hidráulicos o eléctricos:

- Los mecanismos eléctricos son sistemas individuales montados en la raíz de la pala. Básicamente, este tipo de sistemas está integrado por un motorreductor acoplado a una corona dentada con un rodamiento en la base de la pala
- Los mecanismos hidráulicos son dispositivos centralizados y usualmente se montan sobre el chasis principal. Su funcionamiento modifica simultáneamente el paso de todas las palas. Estos sistemas se construyen con una unidad hidráulica y un servomotor que mueve linealmente una barra actuadora que pasa hasta el cubo del rotor.

Control pasivo por desprendimiento de flujo o pérdida:

En este caso las palas no poseen ningún tipo de mecanismo de variación del ángulo ofrecido al viento, si no que permanecen fijas al rotor en todo momento. Las palas con este mecanismo de control se crean de tal manera que para velocidades exageradas de viento se producen turbulencias en la parte de la pala de baja presión, por lo que la diferencia de presiones entre un lado y otro de la pala disminuye.

Es decir, pasado un mínimo de velocidad del viento, este reduce la fracción de energía transmitida al movimiento de las palas por las turbulencias producidas, rebajando la velocidad de giro del rotor. Este procedimiento de control es mucho más económico, pero menos exacto y eficiente que el activo, por lo que este sistema se utiliza solo en aerogeneradores de pequeña potencia.

En este tipo de sistemas a medida que aumenta la velocidad del viento también lo hace la velocidad relativa produciéndose al mismo tiempo una variación del ángulo de ataque. En función de la geometría del perfil alar, existe un valor de la velocidad del viento para el cual el ángulo de ataque es tal que el coeficiente de sustentación alcanza su máximo valor.

A partir de ese punto, el coeficiente de sustentación comienza a disminuir, mientras que el coeficiente de resistencia empieza a crecer rápidamente. Esto hace disminuir la potencia del rotor de manera natural, pues el flujo en la cara “aguas abajo” de las palas comienza a desprenderse creando un vórtices y a su vez una resistencia al giro del rotor.

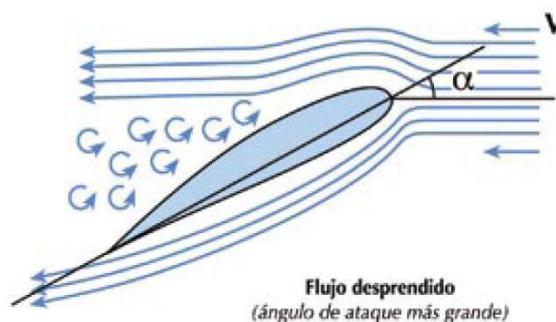


Figura 75. Desprendimiento de flujo

Para unas mismas condiciones de funcionamiento los aerogeneradores que se controlan por desprendimiento de flujo producen menos energía que aquellos en los que la regulación de potencia se realiza modificando el ángulo de paso de las palas. La diferencia se estima del 3 a 5 %.

En la búsqueda de una mayor eficiencia, limitando el gasto, dio lugar a otra configuración que consiste en el control activo por desprendimiento de flujo, variando el ángulo de paso en sentido negativo se consigue incrementar el ángulo de ataque y así controlar el desprendimiento de flujo. Para ello también se utilizan mecanismo de giro, pero con un rango de trabajo menor y por consiguiente los mecanismos son más baratos.

2.5. NORMAS Y REFERENCIAS

2.5.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Norma UNE 157001/2002 titulada “Criterios generales para la elaboración de proyectos”

Norma UNE 50132:94 titulada “Numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos”

Norma UNE-1.027-76 para el plegado de planos.

Norma UNE-1.026-83 para las dimensiones del cajetín.

Norma UNE-1.036 para las escalas adoptadas.

Norma UNE-EN 61400-1/2006 Aerogeneradores. Parte 1: requisitos de diseño.

Norma UNE-EN 61400-1:2006/A1 Aerogeneradores. Parte 1: requisitos de diseño (anexo).

Norma UNE-EN 61400-2/2007 Aerogeneradores. Parte 2: requisitos de diseño para pequeños aerogeneradores.

Norma UNE-EN 61400-12-1/2007 Aerogeneradores. Parte 12-1: medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad.

Norma DIN 6885 para las dimensiones de las chavetas.

Normas UNE 18033 y UNE 18004 para la terminología relativa a ruedas dentadas.

Norma DIN 471 para las características en anillos de seguridad.

Documento básico seguridad estructural en acero.

2.5.2. Bibliografía

Diseño de máquinas eólicas de pequeña potencia. Mario A. Rosado. PROGNSA, Sevilla, 1991.

Guía del instalador de energía eólica: fundamentos de eólica, aerogeneradores, instalaciones, mantenimiento. Tomás Perales Benito. Creaciones Copyright, Las Rozas, Madrid 2010.

Energía eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones. D. Le Gourières. Masson, Barcelona 1983.

Principios de conversión de la energía eólica. Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas. CIEMAT, Madrid 1997.

Diseño de máquinas. Mikel Abasolo Bilbao, Santiago Navalpotro Cuenca, Ederne Iriondo Plaza. 1ª Edición, UPV – EHU 2015.

Diseño en ingeniería mecánica. Joseph Edward Shigley, Charles R. Mischke. McGraw-Hill, México 1990.

Mecánica de materiales. James M. Gere, Stephen P. Timoshenko. Cuarta edición, México PWS, 1997.

Normalización básica, dibujo técnico. E. Zorrilla, J. Muniozguren. Escuela superior de ingenieros industriales y de ingenieros de telecomunicación.

2.5.3. Programas de cálculo

Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la estructura se ha utilizado:

- Cespla

Los planos de los diseños obtenidos se han realizado con:

- Solid Edge ST6
- Autocad 2016

Para la redacción de los proyectos se ha utilizado:

- Microsoft Office Professional Plus 2010

2.5.4. Otras referencias

http://es.wikipedia.org/wiki/Energía_eólica_en_España

http://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera_terrestre

<http://new.abb.com/es>

<http://www.gwec.net/>

<http://www.vestas.com/>

<http://www.aeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>

<http://www.xatakaciencia.com/>

<http://www.economiadelaenergia.com/2011/05/energia-eolica-como-se-para-un-aerogenerador/>

<http://www.moog.com/markets/energy/wind-turbines/>

<http://www.sotaventogalicia.com/>

<http://www.gamesacorp.com/es/>

<http://www.nautilus.es/escalas-de-viento-y-oleaje>

<http://opex-energy.com/index.html>

<http://www.nrel.gov/>

http://es.wikipedia.org/wiki/Energía_solar

<http://www.skf.com/group/splash/index.html>

<http://www.timken.com/en-us/Pages/Home.aspx>

<http://www.rossimotorreductores.es/index.php/es/>

<http://www.roteisa.es/>

<http://www.emersonindustrial.com/en-US/powertransmissionsolutions/brands/jaure/Pages/jaure.aspx>

<http://www.opac.net/>

<http://www.svendborg-brakes.com/>

http://www.marellimotori.com/default.asp?*p=131

<http://www.otia.com.ar/otia/index.htm>

<http://www.rationalstock.es/>

2.6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

A	Área, área barrida por el rotor
a	Distancia entre ejes
A_p	Área de las palas
A_b	Área de una pala
B	Anchura del rodamiento
b	Longitud del diente del engranaje, anchura de la chaveta
C	Capacidad de carga básica dinámica
$C.S.$	Coefficiente de seguridad

C_d	Coeficiente de dimensiones y geometría
C_p	Coeficiente de potencia
C_Q	Coeficiente de par
C_s	Coeficiente de acabado superficial
C_t	Coeficiente de trabajo
C_x	Coeficiente de resistencia
C_z	Coeficiente de sustentación
c	Anchura del disco de freno
D	Diámetro del rotor, diámetro del eje
DL	Cargas permanentes sobre la torre
$D.P.$	Diametral pitch
D_L	Diámetro de rodadura del rodamiento
d	Diámetro interior del rodamiento, diámetro pequeño del eje
E	Eficacia de las palas, módulo de elasticidad
Ev	Evolvente
e	Factor de cálculo del rodamiento, hueco entre dientes
F	Fuerza

F_a	Fuerza axial
F_{ap}	Capacidad de carga axial del rodamiento
F_C	Fuerza centrífuga
F_e	Fuerza total en el engranaje
F_f	Fuerza de frenado
F_P	Fuerza debida al peso de la pala
F_R	Fuerza de resistencia
F_r	Fuerza radial
F_S	Fuerza de sustentación
F_M	Fuerza de tensado
F_m	Fuerza motriz de las palas
F_X	Fuerza en el eje X
F_Y	Fuerza en el eje Y
F_Z	Fuerza en el eje Z
f_s	Factor de servicio
f_{stat}	Coeficiente de seguridad estática

f_L	Proporción entre cargas reales y su proyección en la curva
f_{yd}	Resistencia de cálculo
G	Giros de vida útil del rodamiento
g	Aceleración de la gravedad: 9,81
h	Altura del diente del engranaje, altura de la chaveta
h_c	Altura de la cabeza del engranaje (Addendum)
h_f	Altura de fondo del engranaje (Deddendum)
I	Momento de inercia de un área plana
I_{LN}	Momento de inercia respecto a la línea neutra
i	Relación de transmisión
i_{\max}	Relación de transmisión máxima
J	Momento de inercia polar
K	Factor de geometría del rodamiento
K_{5000}	Presión de rodadura para 5000 horas de servicio
K_{adm}	Presión de rodadura admisible
K_f	Factor de concentración de tensiones para flexión

K_{fs}	Factor de concentración de tensiones para torsión
L	Longitud de la chaveta, vida útil de los rodamientos
L_K	Longitud pandeo
L_{10}	Vida nominal básica con una fiabilidad del 90 %
l	Longitud de la pala
M_A	Par de apriete del tornillo
M_{F_a}	Momento debido a la fuerza axial
M_{F_P}	Momento debido al peso de la pala
M_{F_X}	Momento debido a la fuerza X
M_{F_Y}	Momento debido a la fuerza Y
M_{F_Z}	Momento debido a la fuerza Z
M_K	Momento de vuelco en el rodamiento
M'_K	Momento de lectura del rodamiento
M_m	Momento medio
M_{\min}	Momento mínimo
M_{\max}	Momento máximo

M_r	Momento alterno, par de rozamiento de arranque
M_T	Momento torsor
M_X	Momento en el eje X
M_Y	Momento en el eje Y
M_Z	Momento en el eje Z
m	Módulo del engranaje, masa, pares de engranajes
m_B	Masa de la pala
N	Fuerza axial en el rodamiento
N'	Carga de lectura axial
$N_{b,Rd}$	Capacidad a pandeo
N_{cr}	Resistencia crítica por pandeo
N_{Ed}	Fuerza axial para elementos comprimidos
$N_{pl,Rd}$	Resistencia plástica de la sección
$N_{t,Rd}$	Resistencia de la sección a tracción
n	Velocidad de giro del rotor, velocidad de giro del eje
n_1	Velocidad de giro de la pala sobre su eje longitudinal

n_2	Velocidad angular a la salida del motorreductor
n_e	Velocidad de rotación del engranaje
P	Carga dinámica equivalente
P_1	Potencia a la salida del motorreductor
P_2	Potencia requerida a la salida del motorreductor
P_a	Paso angular del engranaje
P_c	Paso circunferencial del engranaje
P_{cr}	Carga crítica de pandeo
P_d	Paso diametral del engranaje
Pot	Potencia
PU	Precio unitario
p	Exponente para la vida útil del rodamiento
Q	Par desarrollado por el rotor
q	Caudal de aire, sensibilidad a la entalla
R	Radio del rotor, radio del eje, radio primitivo del engranaje
R_c	Radio de cabeza del engranaje

R_{corona}	Radio de la corona
R_f	Radio de pie o de fondo del engranaje
$R_{piñón}$	Radio del piñón
R_{cdg}	Distancia del centro de gravedad del sistema
SF	Factor de servicio combinado
SF_A	Factor de servicio de la máquina accionada
SF_D	Factor de servicio de la máquina motriz
s	Espesor del diente del engranaje
T	Par
TWL	Carga de viento sobre el rotor para el estudio de la torre
t_{cabeza}	Espesor del diente en la cabeza
$t_{primitivo}$	Espesor del diente en el radio primitivo
U	Fuerza tangencial en el engranaje
V	Velocidad del viento
V_1	Velocidad del viento aguas arriba
V_2	Velocidad del viento aguas abajo

$V_{\text{máx}}$	Velocidad del viento máxima
W	Potencia del aerogenerador
WL	Carga de viento sobre la torre
Y	Factor de forma de Lewis
Y_2	Factor de cálculo del rodamiento
y	Deflexión
Z	Número de dientes
Z_{corona}	Número de dientes de la corona
$Z_{\text{piñón}}$	Número de dientes del piñón
α	Ángulo de ataque
α_p	Ángulo de presión
α_r	Ángulo de presión real
β	Ángulo de paso
β_a	Ángulo de inclinación aparente
δ	Ángulo constructivo
ε	Grado de recubrimiento
η_1	Rendimiento del alternador

η_2	Rendimiento de la parte mecánica
η_3	Rendimiento de las palas
η_4	Rendimiento del motorreductor
θ	Pendiente
λ	Velocidad específica
$\bar{\lambda}$	Esbeltez reducida
λ_y	Esbeltez reducida en el eje y
μ	Coefficiente de rozamiento
ρ	Densidad del aire, radio de la circunferencia básica del engranaje
σ	Factor de solidez, esfuerzo normal
σ_{adm}	Tensión admisible
σ_m	Tensión media
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensión máxima
σ_r	Tensión alterna
σ_{yp}	Tensión de fluencia
τ	Esfuerzo cortante

τ_m	Tensión tangencial media
τ_r	Tensión tangencial alterna
φ	Coefficiente para las horas de servicio
ϕ_{cabeza}	Ángulo en el diámetro de cabeza
$\phi_{primitivo}$	Ángulo en el diámetro primitivo
χ_{LT}	Coefficiente de pandeo lateral
χ	Coefficiente de pandeo
ψ	Factor de guiado
ω_{corona}	Velocidad angular de la corona
ω_n	Velocidad de rotación del rotor
$\omega_{piñón}$	Velocidad angular del piñón

2.7. REQUISITOS DE DISEÑO

Las condiciones iniciales para la realización del proyecto vienen impuestas por el cliente siendo estas las que se nombran a continuación:

- Rango de funcionamiento para los siguientes valores de velocidad de viento:
 - Arranque con 3 m/s
 - Funcionamiento nominal con 15 m/s

- Parada con 25 m/s
- 500 KW de potencia generada.

El resto de condiciones quedan a la elección del diseñador.

2.8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

En cuanto a este proyecto se refiere no se efectúa ningún estudio de posible emplazamiento donde se estudie la viabilidad de la inversión así como su impacto ambiental, ya que las condiciones iniciales de velocidad de viento vienen impuestas por el cliente siendo estas: arranque para 3 m/s, funcionamiento nominal a 15 m/s y parada a 25 m/s.

Los dos tipos de aerogenerador más usuales atendiendo a la orientación del eje de giro de la máquina eólica son:

- Aerogeneradores de eje vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)
- Aerogeneradores de eje horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)

Tras un estudio de investigación de los dos tipos nombrados, se opta por el diseño de un aerogenerador de eje horizontal HAWT debido principalmente a que este tipo de aerogenerador tiene un mayor rendimiento que los de eje vertical.

Se selecciona una máquina eólica cuyo rotor se dispone a Barlovento, se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante. Se opta por este sistema porque se obtiene un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento en comparación con la opción contraria denominada sotavento, ya que no presenta interferencias aerodinámicas con la torre ni con la góndola. Necesita un mecanismo mecánico capaz de orientar la máquina hacia el viento. Actualmente es el diseño más utilizado para los aerogeneradores.

El sistema de control activo del cambio de paso de las palas que se ha diseñado,

consiste en hacerlas girar sobre su eje longitudinal variando así el área de la pala enfrentada al viento, modificando la resistencia aerodinámica de la misma, de este modo se mantiene constante la rotaciones del rotor y así se mantiene constante la entrega de potencia. Es el método más caro pero también es el que ofrece un mayor control.

Las palas están elaboradas de un material compuesto de matriz polimérica (poliéster) con un refuerzo de fibras de vidrio para dar mayor resistencia. Al emplear este material se busca una gran resistencia estructural y a la fatiga, ya que estarán expuestos a inclemencias climáticas y fuertes vientos. Son palas más ligeras, con mayor flexibilidad, menor deformación bajo temperaturas extremas y con una excelente resistencia a la absorción de agua.

Se diseña la caja multiplicadora de ejes paralelos, ya que son más sencillas en cuanto a mantenimiento y montaje, y por lo tanto más baratas que las cajas de cambios con disposición de ejes planetarios. Las principales ventajas que presenta este diseño son por una parte su reducido peso y su facilidad de ensamblaje con otros elementos del tren de potencia durante el período de montaje.

El sistema de freno utilizado en la máquina eólica es un freno de disco accionado mediante una pinza hidráulica, ya que el disco de freno se calienta menos en su funcionamiento y las pinzas de freno hidráulicas proporcionan una presión de frenado más uniforme y una mayor fuerza de frenado.

El alternador utilizado para este aerogenerador es un alternador asíncrono, ya que requieren poco mantenimiento al ser muy robustos. Este tipo de generadores se pueden conectar de forma directa (a través de protecciones y medios de desconexión adecuados) a la línea eléctrica a la que entregarán energía. No se ha elegido un generador síncrono porque no son muy adecuados para integrarlos en aerogeneradores de velocidad constante, ya que al conectarlo directamente a la línea eléctrica resultan un sistema excesivamente rígido en cuanto a su relación par-velocidad.

El sistema de orientación consiste en un sistema mecánico mediante un rodamiento dentado de grandes dimensiones y un motor reductor. Este sistema proporciona un mayor control sobre la orientación que los sistemas de veleta, siendo además este último inviable

para este tipo de máquina eólica debido a las cargas que actúan sobre ella.

El chasis de apoyo de los elementos de la góndola está formado por perfiles de acero de sección cuadrada y hueca soldados entre ellos para proporcionar una elevada resistencia a la flexión dentro del plano.

La góndola del aerogenerador se monta sobre una torre tubular tronco-cónica de acero que aporta una alta resistencia a cargas susceptibles al pandeo.

La altura del aerogenerador depende de las condiciones climáticas de la zona, así si es necesario obtener una mayor velocidad de viento para el correcto funcionamiento de la turbina, se diseñará una torre de mayor altura, y viceversa, si no se necesita tanta velocidad se diseñará una torre de menor tamaño, es por esto que los aerogeneradores presentan varias configuraciones de torre para un mismo modelo, en aerogeneradores de 500 kW la altura del buje varía entre 25 y 40 metros, para este proyecto se especifica que el buje se encuentra a 25 metros de altura.

2.9. RESULTADOS FINALES

A continuación se exponen los resultados alcanzados a lo largo de todo el proyecto haciendo referencia a los apartados y planos necesarios para una mejor comprensión de los datos obtenidos.

2.9.1. Potencia y dimensiones de la máquina eólica

Lo primero que se realiza es un cálculo de las dimensiones características mínimas para la obtención de la energía necesaria de la vena fluida de viento que incide sobre el aerogenerador. Estas dimensiones son:

- Longitud de la pala: $l = 14,58\text{ m}$
- Diámetro rotor: $D = 30,16\text{ m}$
- Área de barrido: $A = 714,41\text{ m}^2$

- Velocidad específica: $\lambda = 7$
- Coeficiente de par: $C_Q = 0,06$
- Factor de solidez: $\sigma = 0,05$
- Masa de una pala: $m_B = 474 \text{ kg}$
- Área mínima de una pala: $A_B = 11,91 \text{ m}^2$
- Velocidad de rotación: $n = 66,49 \text{ r.p.m.}$
- Par desarrollado por el rotor: $Q = 89.082,78 \text{ Nm}$

Tras obtener las dimensiones características del aerogenerador se puede obtener la curva de potencia de la máquina eólica que se muestra a continuación:

Velocidad del viento [m/s]	Potencia eléctrica generada [W]
3	4001,4
4	9484,9
5	18525,2
6	32011,6
7	50833,2
8	75879,3
9	108039,1
10	148201,8
11	197256,6
12	256092,7
13	325599,3
14	406665,7
15	500000
16	500000
17	500000
18	500000
19	500000
20	500000
21	500000
22	500000
23	500000
24	500000
25	500000

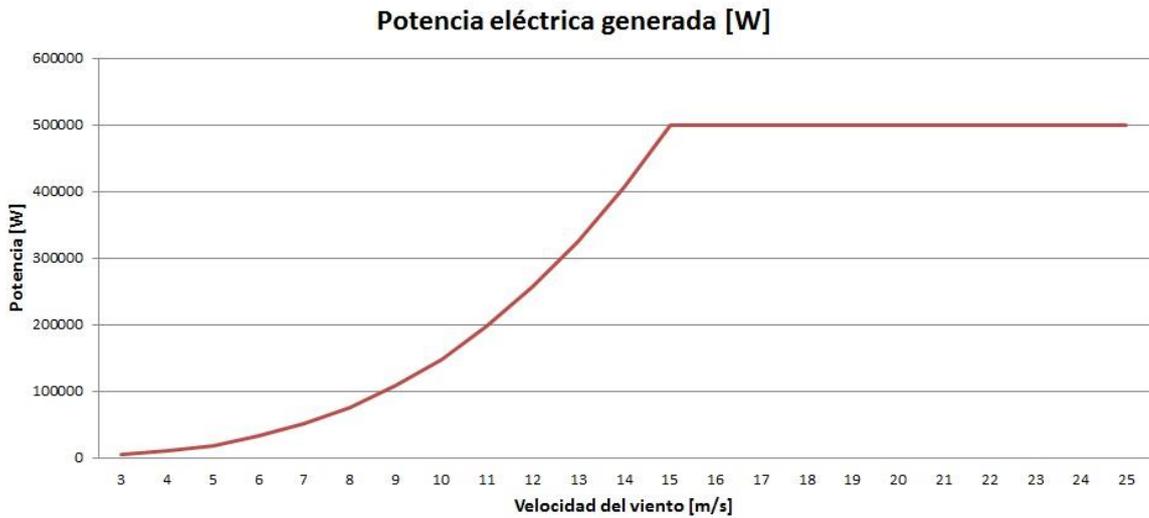


Figura 76. Curva de potencia

Se pueden consultar los apartados 3.3 y 3.4 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

2.9.2. Sistema para el cambio de paso de las palas

Tras obtener las fuerzas y los momentos en la raíz de la pala generados por la acción del viento se procede a seleccionar y diseñar los elementos necesarios que componen el sistema mecánico, estos son:

Rodamiento de giro de la empresa Rothe Erde, compuesto de un rodamiento de bolas con dentado interior de la serie KD 600 designado como 062.25.0886.800.11.1504 cuyas características geométricas se muestran a continuación:

Rodamientos con dentado interior

Número de plano	Peso	Diámetro exterior			Diámetro interior			Altura total		Diámetro círculo tallados exterior		Diámetro círculo tallados interior		Cantidad tallados por círculo		Diámetro del tallado		Medida del tornillo		Cantidad de engrasables		Diámetro		Diámetro		Altura del aro		Altura del aro		Separación abajo aros exterior/interior		Separación arriba aros exterior/interior		Diámetro primitivo		Módulo		Cantidad de dientes		Corrección perfil, según DIN 53960, Octubre 1976		Ajuste cabeza de diente		Altura del diente	
D_r [mm]	[kg]	D_o [mm]	D_i [mm]	H [mm]	L_o [mm]	L_i [mm]	n	B [mm]	M [mm]	n_1	O [mm]	U [mm]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_e [mm]	H_o [mm]	d [mm]	m [mm]	z	x · m [mm]	k · m [mm]	b [mm]	Curvas																						
062.25.0886.800.11.1504 062.25.0886.801.21.1504	111	980	752	63	944	827	36	17,5	16	4	885	887	54	54	9	9	760	8	95	-4,0	-	54	29																						
062.25.1077.890.11.1503 062.25.1077.891.21.1503	140	1169	930	63	1134	1017	36	17,5	16	6	1076	1078	54	54	9	9	940	10	94	-5,0	-	54	30																						
062.25.1180.000.11.1504 062.25.1180.001.21.1504	185	1287	1020	69	1243	1117	36	22	20	6	1179	1181	60	54	15	9	1030	10	103	-5,0	-	60	31																						

Corona dentada en material normalizado
Corona dentada en material bonificado

Figura 77. Características del rodamiento dentado

Se puede consultar el apartado 3.5.3 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

Motorreductor coaxial con motor asíncrono trifásico proporcionado por la empresa Rossi con una potencia de 0,25 kW designado como *MR 3I 6 P C 3 E – HF 71B 6 230.400 BX5/7,5* cuyas características se muestran a continuación:

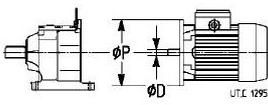
P_1 kW	n_2 min ⁻¹	M_2 N m	F_{T2} N	i	f_s		Masa Masse				
							HF kg	F0 kg			
0,25	4,43	538	9 750	201	1	MR 3I 6 - 71 B 6 BX5 14 x 160	41	44			
	4,95	482	10 000	180	1,25						
	5,68	421	10 000	157	1,5						
	6,37	375	10 000	140	1,8						
	7,09	337	10 000	125	2						
	7,99	299	10 000	111	2,24						
	8,9	268	10 000	100	2,5						
	6,92	345	9 000	201	1,5				MR 3I 6 - 71 A 4 BX5 14 x 160	40	42
	7,74	309	9 000	180	1,9						

Figura 78. Características del motorreductor

Se puede consultar el apartado 3.5.4 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

El engranaje del piñón del sistema de cambio de paso se debe de diseñar, obteniéndose las siguientes características geométricas:

Nº de dientes	19
Módulo	8 mm
Ángulo de presión	20°
Radio primitivo	76 mm
Radio de cabeza	88 mm
Radio de fondo	71,2 mm
Radio de la circunferencia básica	71,42 mm
Paso angular	18,95°

Paso circunferencial	25,13 mm
Addendum	8 mm
Deddendum	8,8 mm
Ancho o longitud del diente	54 mm
Espesor del diente	12,57 mm
Hueco entre dientes	12,57 mm

Se puede consultar el apartado 3.5.5 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos. El plano 2 muestra una representación de las características geométricas anteriormente mencionadas.

Chaveta proporcionada por la empresa Rationalstock cuyas dimensiones son:

$$\text{Ancho } (b) = 8 \text{ mm}$$

$$\text{Alto } (h) = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Largo } (L) = 22 \text{ mm}$$

Se puede consultar el apartado 3.5.6 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

2.9.3. Eje de baja velocidad

Tras obtener las fuerzas actuantes sobre el eje se diseña este en base a tensiones y en base a deflexiones en acero AISI 1045. Se pueden consultar los apartados 3.6.2 y 3.6.3 del anexo de cálculos donde se exponen los resultados obtenidos. En el plano 3 se pueden observar las características geométricas del eje calculado.

Los rodamientos seleccionados para el eje de baja velocidad son rodamientos de rodillos a rótula sobre manguitos de fijación de la empresa SKF cuyas características

geométricas se muestran a continuación:

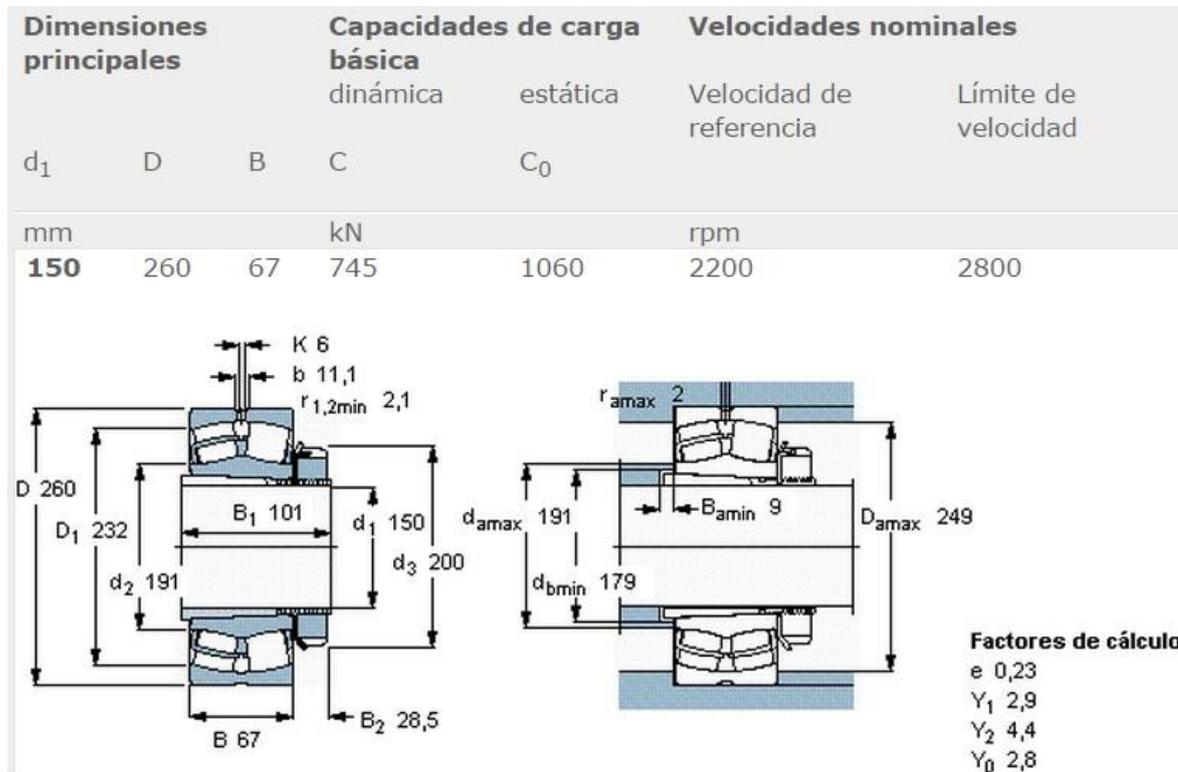


Figura 79. Características del rodamiento

Se puede consultar el apartado 3.6.4 del anexo de cálculos donde se expone con claridad el procedimiento seguido.

Para transmitir el movimiento entre el eje de baja velocidad y la caja multiplicadora se utiliza un acoplamiento de láminas Lamidisc de la empresa Jaure designado como SX –440–8 cuyas características se muestran a continuación:

Tipo de Acoplamiento SX Tamaño	PAR NOMINAL Nm.	PAR DE PICO Nm.	MAX. 1) VELOCIDAD SIN EQUILBRADO r.p.m.	MAX. 2) VELOCIDAD EQUILBRADO r.p.m.	DIMENSIONES (mm.)							5) Inercia J kgm ²	5) Peso kg.	6) Desalin. Axial ±ΔKa mm.	6) Desalin. Angular ±ΔKw deg.
					d1-d2 3) máx.	D	D1	l1-l2	DBSE min 4)	L min.	S				
325-8	37000	74000	2400	6000	156	325	219	145	254	202.0	26.0	1.199	92	4.3	0.5°
345-8	46000	92000	2200	5500	165	345	230	155	270	213.6	28.2	1.660	112	4.6	
380-8	63000	126000	2040	5100	178	380	249	170	296	232.0	32.0	2.715	150	5.0	
410-8	86000	172000	1880	4700	192	410	269	185	320	253.6	33.2	4.11	195	5.4	
440-8	110000	220000	1740	4350	206	440	289	195	334	261.2	36.4	5.54	230	5.8	
475-8	138000	276000	1680	4200	220	475	309	210	358	281.6	38.2	8.32	295	6.3	
505-8	175000	350000	1520	3800	233	505	327	230	394	310.0	42.0	12.13	374	6.7	
540-8	220000	440000	1440	3600	235	540	330	240	416	324.0	46.0	16.77	454	7.2	
570-8	259000	518000	1360	3400	250	570	350	250	450	346.8	51.6	22.02	535	7.6	

Figura 80. Características del acoplamiento

Se puede consultar el apartado 3.6.5 del anexo de cálculos donde se expone con claridad el procedimiento seguido.

La chaveta seleccionada para dicho acoplamiento esta proporcionada por la empresa Opac en acero AISI 430 cuyas dimensiones son:

$$\text{Ancho } (b) = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Alto } (h) = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Largo } (L) = 125 \text{ mm}$$

Se puede consultar el apartado 3.6.6 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

2.9.4. Caja multiplicadora

La caja multiplicadora consta de tres ejes fabricados en acero AISI 4150 y diseñados en base a tensiones y en base a deflexiones. Se pueden consultar los apartados 3.7.4.2, 3.7.4.3, 3.7.5.2, 3.7.5.3, 3.7.6.2 y 3.7.6.3 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos. En los planos 5, 6 y 7 se pueden observar las características geométricas de los ejes calculados.

Los engranajes de la caja multiplicadora se han diseñado, obteniéndose las siguientes características geométricas:

	Primer engranaje	Segundo engranaje	Tercer engranaje	Cuarto engranaje
Nº de dientes	60	12	100	22
Módulo real	12 mm	12 mm	6 mm	6 mm
Ángulo de presión real	20°	20°	20°	20°

Ángulo de presión aparente	21,17°	21,17°	21,17°	21,17°
Ángulo de inclinación aparente	20°	20°	20°	20°
Ángulo de inclinación real	18,74°	18,74°	18,74°	18,74°
Radio primitivo	383,1 mm	76,62 mm	319,25 mm	70,23 mm
Radio de cabeza	395,1 mm	88,62 mm	325,25 mm	76,23 mm
Radio de fondo	368,1 mm	61,62 mm	311,75 mm	62,73 mm
Radio de la circunferencia básica	357,24 mm	71,5 mm	297,7 mm	65,49 mm
Paso aparente	40,11 mm	40,11	20,05 mm	20,05 mm
Paso real	37,7 mm	37,7 mm	18,85 mm	18,85 mm
Módulo aparente	12,77 mm	12,77 mm	6,38 mm	6,38 mm
Addendum	12 mm	12 mm	6 mm	6 mm
Deddendum	15 mm	15 mm	7,5 mm	7,5 mm
Ancho o longitud del diente	240 mm	240 mm	120 mm	120 mm
Espesor real	18,85 mm	18,85 mm	9,42 mm	9,42 mm
Espesor aparente	20,06 mm	20,06 mm	10,02 mm	10,02 mm

Se pueden consultar los apartados 3.7.2 y 3.7.3 del anexo de cálculos donde se exponen con claridad los resultados obtenidos. Los planos 8, 9, 10 y 11 muestran una representación de las características geométricas anteriormente mencionadas.

Para la caja multiplicadora se han seleccionado varios tipos de rodamientos, se exponen a continuación los modelos y características de cada uno.

Varios tamaños de rodamientos de rodillos cónicos de la empresa Timken. Su selección se muestra en los apartados 3.7.4.4, 3.7.5.4 y 3.7.6.4 del anexo de cálculos. Las características geométricas se muestran en las siguientes figuras:

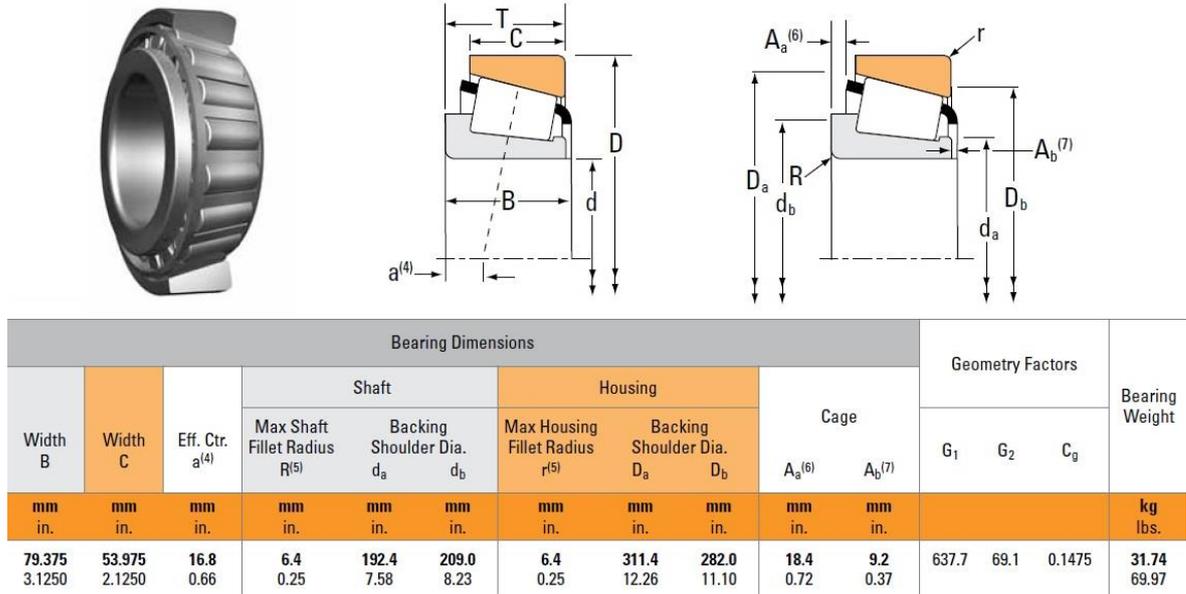


Figura 81. Características del rodamiento

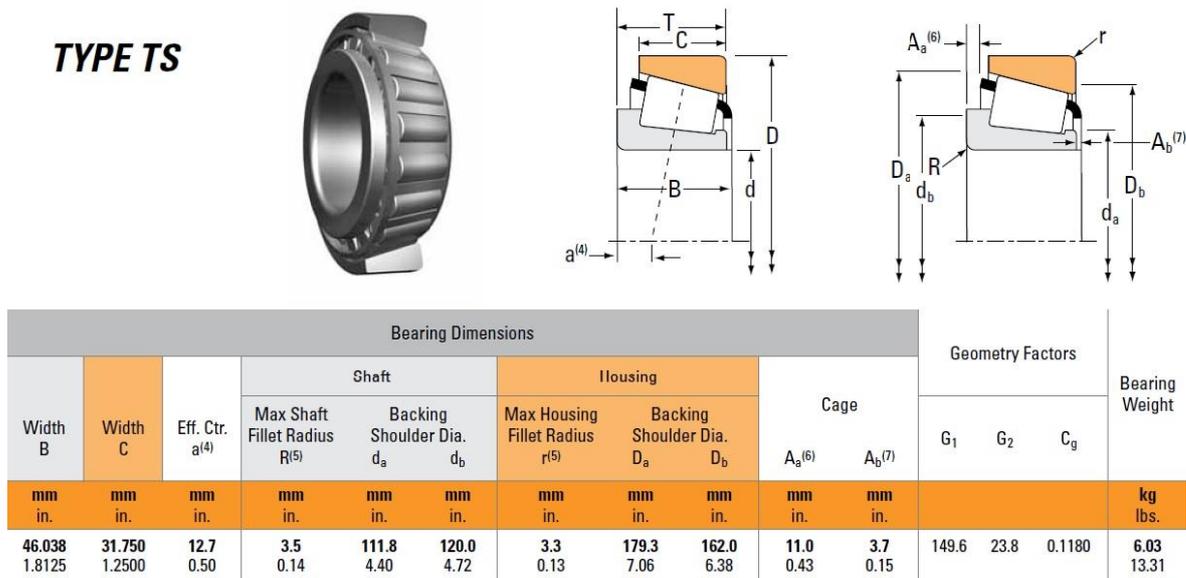
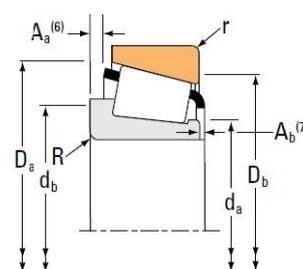
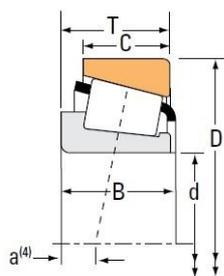


Figura 82. Características del rodamiento

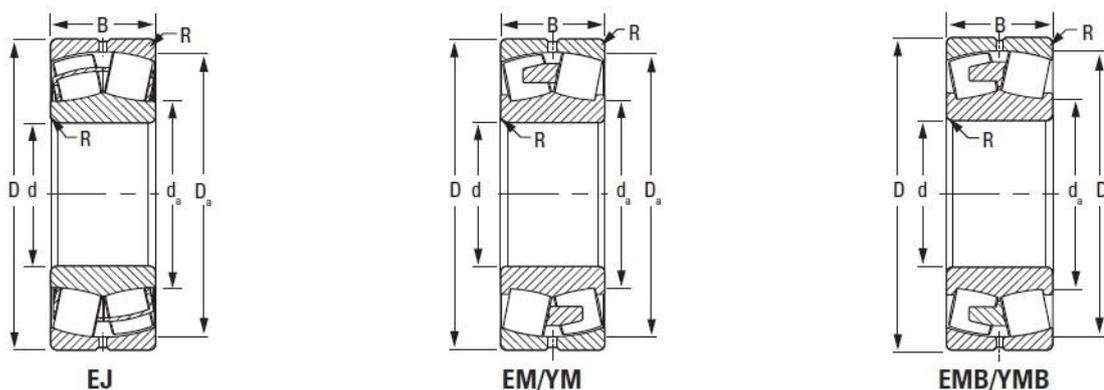
TYPE TS



Bearing Dimensions											Geometry Factors			Bearing Weight
Width B	Width C	Eff. Ctr. a ⁽⁴⁾	Shaft			Housing			Cage		G ₁	G ₂	C _g	
			Max Shaft Fillet Radius R ⁽⁵⁾	Backing Shoulder Dia. d _a	d _b	Max Housing Fillet Radius r ⁽⁵⁾	Backing Shoulder Dia. D _a	D _b	A _a ⁽⁶⁾	A _b ⁽⁷⁾				
mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.				kg lbs.
41.000 1.6142	31.000 1.2205	9.7 0.38	3.0 0.12	93.0 3.67	108.0 4.25	3.0 0.12	152.0 5.98	134.0 5.28	7.0 0.27	4.8 0.19	117.3	27.2	0.1094	4.04 8.90

Figura 83. Características del rodamiento

Además se han utilizado rodamientos de rodillos cilíndricos de la empresa Timken. Su selección se muestra en el apartado 3.7.5.4 del anexo de cálculos. Las características geométricas se muestran en la siguiente figura:



Bearing Part Number	Bearing Dimensions			Load Ratings		Cage Type	Mounting Data			Speed Reference			Weight	Geometry Factor ⁽³⁾ C _g
	Bore d	O.D. D	Width B	Dynamic C	Static C ₀		Fillet ⁽¹⁾ (Max.) R	Backing Diameter		Thermal Reference Speed ⁽⁴⁾		Limiting Speed ⁽⁵⁾		
								Shaft d _a	Housing D _a	Oil	Grease			
	mm in.	mm in.	mm in.	kN lbf.	kN lbf.		mm in.	mm in.	mm in.	RPM	RPM	RPM		
22222	110 4.3307	200 7.8740	53 2.0866	555 125000	653 147000	EM	2 0.08	133 5.2	182 7.2	3500	2900	4800	7.2 15.8	0.074
23222	110 4.3307	200 7.8740	69.8 2.7480	710 160000	887 199000	EJ	2 0.08	131 5.2	182 7.2	2300	2000	3390	9.6 21.1	0.074
23222	110 4.3307	200 7.8740	69.8 2.7480	710 160000	887 199000	EM	2 0.08	131 5.2	182 7.2	2300	2000	3100	9.6 21.1	0.074
22322	110 4.3307	240 9.4488	80 3.1496	949 213000	1050 236000	EJ	2.5 0.1	144 5.7	215 8.5	2500	2100	2890	17.8 39.2	0.079

Figura 84. Características del rodamiento

Para retener los rodamientos anteriormente nombrados se han utilizado anillos de seguridad DIN 471 de la empresa Otia, se puede consultar el método de selección en los mismos apartados que los de los rodamientos. Las características geométricas se muestran en las siguientes figuras:



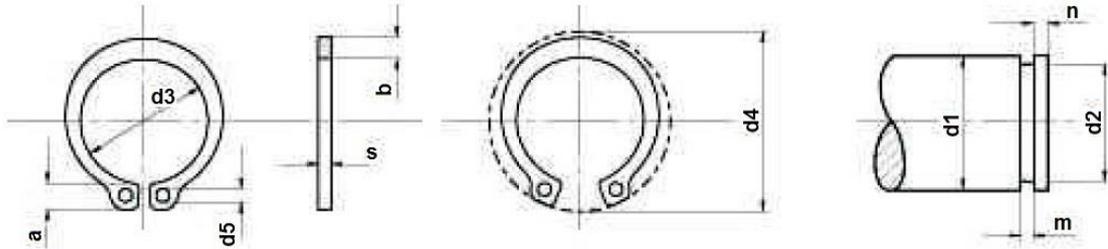
Figura 85. Características del anillo de seguridad

ANILLO DE SEGURIDAD

PARA EJES

Tipo: A

DIN 471



Med. Nom. d1	ANILLO								RANURA				Fuerza Axial KG. ≤
	s h11	a max.	b ≈	d3	Toler.	d4	d5	Peso Kgs. x 1000 Pz.	d2	Toler.	m H 13	n min.	
85			7,8	79,5		104		36,400	81,5				11400
87			7,9	81,5		106		38,740	83,5				11735
88		8,8	8	82,5		107		39,400	84,5				11900
90	3		8,2	84,5	+0,54	109	3,5	40,250	86,5	h12	3,15	5,3	12100
92		9,0	8,4	86,5	-1,30	111		43,000	88,5	+0 -0,35			12380
95		9,4	8,6	89,5		115		44,910	91,5				12800
97			8,8	91,5		116,5		45,700	93,5				13080
98		9,5		92,5		117,5		47,990	94,5				13220
100		9,6	9	94,5		121		49,000	96,5				13500

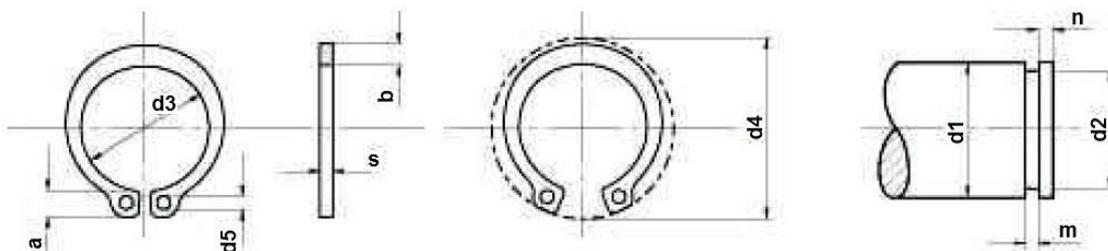
Figura 86. Características del anillo de seguridad

ANILLO DE SEGURIDAD

PARA EJES

Tipo: A

DIN 471



Med. Nom. d1	ANILLO								RANURA				Fuerza Axial KG. ≤
	s h11	a max.	b ≈	d3	Toler.	d4	d5	Peso Kgs. x 1000 Pz.	d2	Toler.	m H 13	n min.	
72		8,2	6,8	67,5		89,4		22,500	69				8300
75		8,4	7	70,5		92,8		24,600	72				8600
77		8,5	7,2	72,5		94,5		25,270	74				8800
78			7,3	73,5		96,2		26,200	75				9000
80	2,50		7,4	74,5	-1,30	98,2	3	27,300	76,5	h12 +0	2,65	5,3	10700
82		8,7	7,6	76,5		100		31,200	78,5	-0,3			11000
85			7,8	79,5		104		36,400	81,5				11400

Figura 87. Características del anillo de seguridad

Para la caja multiplicadora se seleccionan varios tamaños de chavetas de la empresa Opac fabricadas en acero AISI 430, cuyo procedimiento de selección puede consultarse en los apartados 3.7.4.5, 3.7.5.5 y 3.7.6.6 del anexo de cálculos. Las dimensiones de las chavetas son:

40 x 22 x 125 mm (Ancho x Alto x Largo)

25 x 14 x 70 mm (Ancho x Alto x Largo)

22 x 14 x 32 mm (Ancho x Alto x Largo)

22 x 14 x 18 mm (Ancho x Alto x Largo)

22 x 14 x 36 mm (Ancho x Alto x Largo)

2.9.5. Sistema de freno

Se selecciona un sistema de freno de la empresa Svendborg Brakes formado por una pinza de freno hidráulica denominada BSFI 340, cuya selección se puede consultar en el apartado 3.8.1 del anexo de cálculos. Las características de la piza de freno se muestran en la siguiente figura:

CALIPER TYPE	CLAMPING FORCE ¹⁾ [N]		BRAKING FORCE ²⁾ [N]	LOSS OF FORCE PER 1MM [%]	OPERATING PRESSURE ³⁾ MPa	BALANCING PRESSURE ¹⁾ MIN MPa	PAD SURFACE PRESSURE ⁴⁾ [N/mm ²]
	MIN	MAX					
BSFI 317	17,000	19,000	13,600	4.0	4.2	2.46	0.66 - 0.95
BSFI 318	18,000	19,500	14,400	4.0	4.2	2.61	0.67 - 0.98
BSFI 320	20,000	22,200	16,000	3.0	4.5	2.90	0.77 - 1.11
BSFI 322	22,000	24,500	17,600	3.0	5.0	3.19	0.84 - 1.23
BSFI 325	25,000	27,800	20,000	12.0	5.5	3.62	0.96 - 1.39
BSFI 330	30,000	33,100	24,000	10.0	7.0	4.35	1.14 - 1.66
BSFI 332	32,000	35,200	25,600	9.0	7.0	4.63	1.21 - 1.76
BSFI 335	35,000	38,300	28,000	8.0	7.5	5.07	1.32 - 1.92
BSFI 340	40,000	43,600	32,000	7.0	8.5	5.79	1.50 - 2.18
BSFI 345	45,000	48,800	36,000	6.0	9.5	6.52	1.68 - 2.44
BSFI 350	50,000	55,000	40,000	11.0	10.5	7.24	1.86 - 3,70
BSFI 355	55,000	59,300	44,000	10.0	12.0	7.69	2.04 - 2.97
BSFI 360	60,000	65,000	48,000	9.0	13.0	8.69	2.22 - 3.22

Figura 88. Características de la pinza de freno

El disco de freno lo proporciona la misma empresa, con las siguientes dimensiones:

$$400 \times 20 \text{ mm}$$

2.9.6. Alternador

El alternador esta suministrado por la empresa Marelli Generators, se trata de un alternador asíncrono de 50 Hz y cuatro polos. En el apartado 3.9.1 del anexo de cálculos se muestra el proceso de selección, las características del alternador se muestran a continuación:



ASYNCHRONOUS GENERATORS / LOW VOLTAGE

Type	Power [kW]	Speed [min ⁻¹]	Torque [Nm]	Efficiency [%]			Power factor			Inertia (**) [kgm ²]	Weight (**) [kg]	Max overspeed [min ⁻¹]
				4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4			
4 pole 50Hz - 1500 min⁻¹ / 400V												
C36 250 S4	55	1.535	372	92,0	92,0	90,5	0,86	0,84	0,79	0,5	275	3.000
250 M4	75	1.520	509	92,5	92,3	91,0	0,86	0,83	0,75	0,8	350	3.000
280 S4	90	1.520	608	93,0	93,0	92,0	0,88	0,86	0,79	0,9	405	3.000
280 M4	110	1.520	743	93,0	93,0	92,0	0,88	0,86	0,79	1,1	445	3.000
315 S4	132	1.520	883	93,9	94,3	94,1	0,89	0,88	0,84	1,7	570	2.750
315 MA4	160	1.520	1.067	94,2	94,5	94,1	0,88	0,87	0,81	2,1	705	2.750
315 MB4	200	1.517	1.332	94,5	94,9	94,6	0,88	0,87	0,83	2,5	750	2.750
315 MD4	250	1.517	1.656	95,0	95,3	95,0	0,90	0,88	0,83	3,1	850	2.750
315 ME4	315	1.517	2.085	95,1	95,2	95,0	0,90	0,88	0,83	3,3	930	2.750
355 LA4	315	1.509	2.089	95,4	95,3	94,5	0,89	0,87	0,82	6,6	1.150	2.750
355 LB4	400	1.510	2.637	95,9	95,8	94,8	0,90	0,89	0,85	8,0	1.260	2.750
355 LC4	450	1.508	2.965	96,1	96,0	95,3	0,89	0,87	0,86	10,3	1.450	2.750
355 LD4	550	1.508	3.620	96,2	96,0	95,4	0,89	0,87	0,81	12,0	1.670	2.750
400 LB4	620	1.509	4.086	96,0	95,8	94,9	0,89	0,88	0,86	16,0	2.110	2.750
400 LC4	700	1.508	4.607	96,2	95,9	95,0	0,90	0,89	0,84	19,0	2.280	2.750
400 LD4	750	1.508	4.936	96,2	95,9	95,0	0,90	0,89	0,84	21,0	2.450	2.750
500 LA4	800	1.507	5.280	96,0	95,7	94,8	0,89	0,88	0,86	30	3.270	2.250
500 LB4	900	1.507	5.927	96,2	95,9	95,0	0,89	0,88	0,86	35	3.580	2.250
500 LC4	1.000	1.507	6.579	96,3	96,0	95,1	0,90	0,89	0,87	40	3.850	2.250

Figura 89. Características del alternador

Para transmitir el movimiento entre el alternador y la caja multiplicadora se utiliza un acoplamiento de láminas Lamidisc de la empresa Jaure designado como SX – 278–8 cuyas características se muestran a continuación:

Tipo de Acoplamiento SX Tamaño	PAR NOMINAL Nm.	PAR DE PICO Nm.	MAX 1) VELOCIDAD SIN EQUILIBRADO r.p.m.	MAX. 2) VELOCIDAD EQUILIBRADO r.p.m.	DIMENSIONES (mm.)							5) Inercia J kgm ²	5) Peso kg.	6) Desalin. Axial ±ΔKa mm	6) Desalin. Angular ±ΔKw deg.
					d1-d2 3) máx.	D	D1	I ₁ -I ₂	DBSE min 4)	L min	S				
278-8	20000	40000	2800	7000	131	278	183	125	218	175.6	21.2	0.573	59	3.7	0.5°
302-8	30000	60000	2560	6400	145	302	201	135	234	185.2	24.4	0.878	77	4.0	
325-8	37000	74000	2400	6000	156	325	219	145	254	202.0	26.0	1.199	92	4.3	
345-8	46000	92000	2200	5500	165	345	230	155	270	213.6	28.2	1.660	112	4.6	

Figura 90. Características del acoplamiento

Se puede consultar el apartado 3.7.6.5 del anexo de cálculos donde se expone con claridad el procedimiento seguido.

La chaveta seleccionada para dicho acoplamiento esta proporcionada por la empresa Opac en acero AISI 430 cuyas dimensiones son:

$$\text{Ancho } (b) = 28 \text{ mm}$$

$$\text{Alto } (h) = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Largo } (L) = 25 \text{ mm}$$

Se puede consultar el apartado 3.9.2 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

2.9.7. Sistema de orientación

Tras obtener las fuerzas y los momentos generados por la acción del viento sobre el sistema de orientación se procede a seleccionar y diseñar los elementos necesarios que componen el sistema mecánico, estos son:

Rodamiento de giro de la empresa Rothe Erde, compuesto de un rodamiento de bolas con dentado interior de la serie KD 600 designado como 062.50.1800.001.49.1504 cuyas características geométricas se muestran a continuación:

Rodamientos con dentado interior

Número de plano	Peso	Dímetro exterior	Dímetro interior	Altura total	Dímetro círculo taladro exterior	Dímetro círculo taladro interior	Cantidad tableros por círculo	Dímetro del taladro	Medida del tornillo	Cantidad de engrasadores	Dímetro	Dímetro	Altura del aro	Altura del aro	Separación abajo aros exterior/interior	Separación arriba aros exterior/interior	Dímetro primitivo	Módulo	Cantidad de dientes	Conexión perfil, signo según SDA, 3960, Octubre 1976	Ajuste cabeza de diente	Altura del diente	Fuerza tangencial admisible normal	Fuerza tangencial admisible máxima
D_L [mm]	[kg]	D_a [mm]	D_i [mm]	H [mm]	L_e [mm]	L_i [mm]	n	B [mm]	M [mm]	n_1	O [mm]	U [mm]	H_1 [mm]	H_2 [mm]	H_a [mm]	H_b [mm]	d [mm]	m [mm]	z	x · m [mm]	k · m [mm]	b [mm]	[kN]	[kN]
062.50.1800.001.49.1504	762	1971	1554	109	1905	1695	36	33	30	9	1798	1802	100	99	10	9	1568	14	112	-7,0	-	100	128,5	257,0
062.50.2000.001.49.1504	843	2171	1764	109	2105	1895	40	33	30	8	1998	2002	100	99	10	9	1778	14	127	-7,0	-	100	128,5	257,0
062.50.2240.001.49.1504	961	2411	1984	109	2345	2135	48	33	30	8	2238	2242	100	99	10	9	2000	16	125	-8,0	-	100	146,8	293,6
062.50.2490.001.49.1504	1053	2661	2240	109	2595	2385	54	33	30	9	2488	2492	100	99	10	9	2256	16	141	-8,0	-	100	146,8	293,6
062.50.2800.001.49.1504	1205	2971	2544	109	2905	2695	60	33	30	12	2798	2802	100	99	10	9	2560	16	160	-8,0	-	100	146,8	293,6

Aros en material bonificado

Figura 91. Características del rodamiento dentado

Se puede consultar el apartado 3.10.2 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

Motorreductor coaxial con motor asíncrono trifásico proporcionado por la empresa Rossi con una potencia de 1,1 kW designado como MR 3I 7 P C 3 E – HF 90S 4 230.400 B5 / 7,3 cuyas características se muestran a continuación:

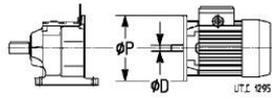
P_1 kW	n_2 min ⁻¹	M_2 Nm	F_{T2} N	i	fs		Masa Masse						
							HF kg	F0 kg					
1,1	10,2	1031	11 500	89,8	0,85	MR 3I 7	-	90 L	6	B5R	19 × 200	54	60
	10,3	1021	10 300	88,9	0,8	MR 3I 7	-	90 L	6	B5	24 × 200	54	60
	11,4	920	9 500	124	1	MR 3I 7	-	80 C	4	B5*	19 × 200	50	53
	12,6	837	10 900	113	1,06								
	14	752	12 200	101	1,18								
	15,8	667	12 500	89,8	1,32								
	14,4	731	9 750	98,4	1	MR 3I 7	-	90 S	4	B5	24 × 200	50	53
	15,9	660	12 200	88,9	1,25								
	17,1	615	12 500	82,8	1,5								
	18,8	559	12 500	75,3	1,6								
	20,9	502	12 500	67,7	1,8								
	23,6	445	12 500	60	2								
26,2	400	12 500	53,9	2,24									
31,9	330	12 500	44,4	2,8									

Figura 92. Características del motorreductor

Se puede consultar el apartado 3.10.3 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

El engranaje del piñón del sistema de orientación se debe de diseñar, obteniéndose

las siguientes características geométricas:

	Engranaje sistema orientación
Nº de dientes	23
Módulo	14 mm
Ángulo de presión	20°
Radio primitivo	161 mm
Radio de cabeza	182 mm
Radio de fondo	153,2 mm
Radio de la circunferencia básica	151,29 mm
Paso angular	15,65°
Paso circunferencial	43,98 mm
Addendum	14 mm
Deddendum	14,8 mm
Ancho o longitud del diente	100 mm
Espesor del diente	21,99 mm
Hueco entre dientes	21,99 mm

Se puede consultar el apartado 3.10.4 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos. El plano 12 muestra una representación de las características geométricas anteriormente mencionadas.

Chaveta proporcionada por la empresa Opac en acero AISI 430, cuyas dimensiones son:

$$\text{Ancho } (b) = 8 \text{ mm}$$

$$\text{Alto } (h) = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Largo } (L) = 25 \text{ mm}$$

Se puede consultar el apartado 3.10.5 del anexo de cálculos donde se expone con claridad los resultados obtenidos.

2.9.8. Chasis y torre

El chasis está formado por perfiles de acero cuadrados de $120 \times 120 \text{ mm}$ y 4 mm de espesor, soldados entre ellos formando la siguiente disposición:

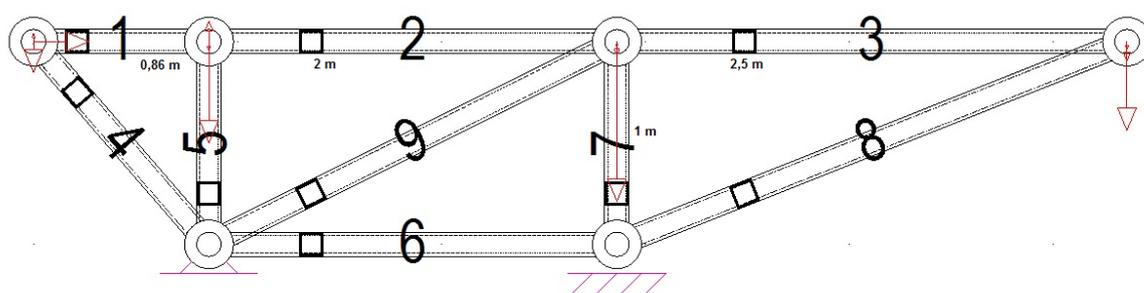


Figura 93. Chasis de apoyo

El modo de cálculo se puede consultar en el apartado 3.11 del anexo de cálculos. El plano 13 muestra la disposición geométrica de la estructura.

La torre tiene forma tubular tronco-cónica de acero AISI 1045, el procedimiento de cálculo se muestra en el apartado 3.12 del anexo de cálculos. Se pueden observar sus características geométricas en el plano 14.

2.10. ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS

El orden de los documentos es el siguiente:

- 1) Índice general
- 2) Memoria

- 3) Anexos (Cálculos)
- 4) Planos
- 5) Pliego de condiciones
- 6) Estado de las mediciones y presupuesto
- 7) Estudios con entidad propia
- 8) Resumen