

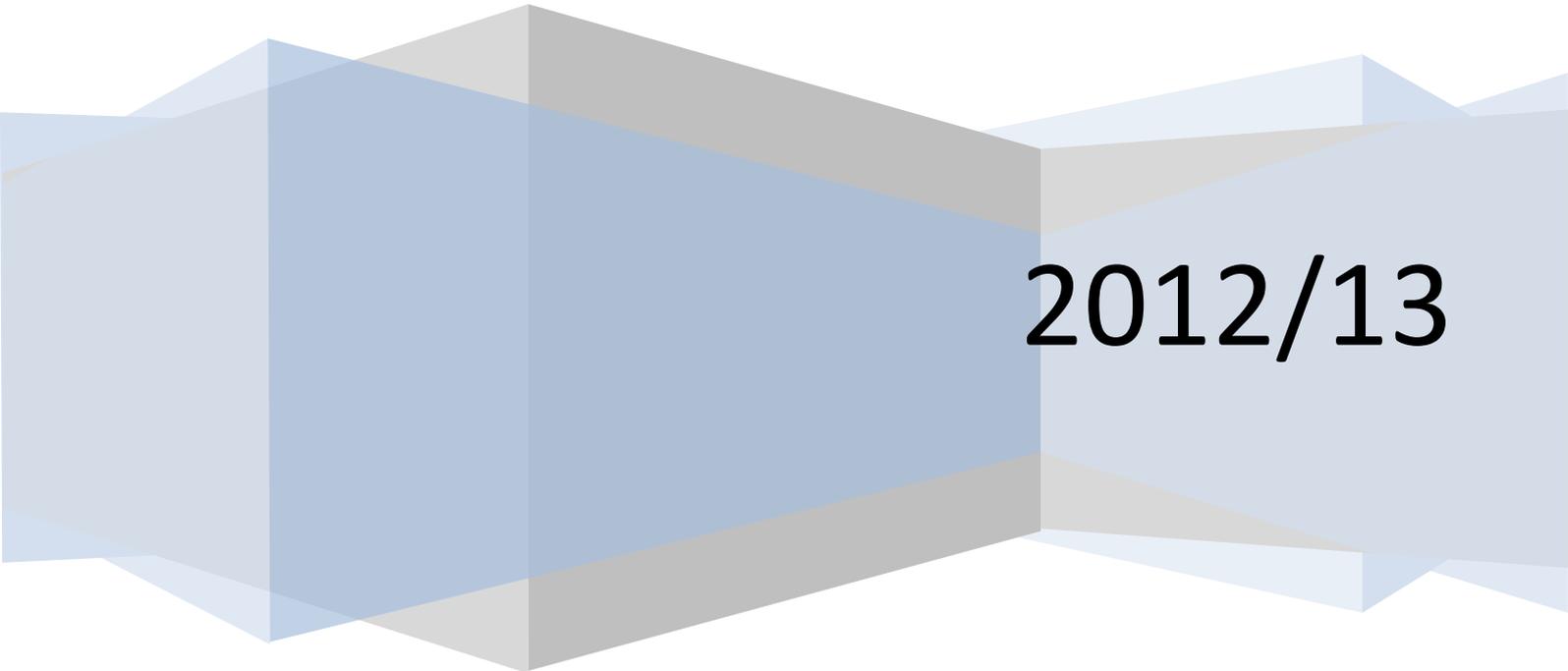
Universidad Carlos III de Madrid

# Diseño de un aerogenerador para uso particular

Proyecto Fin de Grado

Álvaro Lucas San Román

Tutor: José Luís Pérez Díaz



2012/13

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
1- MEMORIA.....	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 2: SISTEMAS EÓLICOS.....	7
2.1 HISTORIA DEL USO DEL VIENTO .....	7
2.2 ¿QUÉ ES UN AEROGENERADOR? .....	13
2.3 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES .....	15
2.4 RENDIMIENTO .....	23
CAPÍTULO 3: EL PROTOTIPO .....	27
3.1 LOCALIZACIÓN.....	27
3.2 PARTES .....	30
3.3 FUNCIONAMIENTO.....	44
3.4 CÁLCULOS.....	50
3.5 COMPARACIÓN CON PRODUCTOS SIMILARES.....	55
CAPÍTULO 4: CONCLUSIÓN.....	60
CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA.....	62
2- PLIEGO DE CONDICIONES.....	64
1-Pliego de condiciones administrativas.....	65
2- Pliego de condiciones técnicas.....	66
Mantenimiento .....	66
Seguridad.....	67
3- NORMATIVA.....	68
4- PRESUPUESTO.....	73
5-PLANOS.....	74
1-Plano soporte .....	76

2-Plano cilindro central .....	77
3-Plano eje de unión .....	78
4-Plano aleta .....	79
5-Plano conjunto .....	80



# 1. MEMORIA

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Este proyecto se redacta para la obtención del título de Grado en Ingeniería Mecánica. Su objetivo es diseñar un aerogenerador seguro para uso doméstico, determinar si es económicamente viable y compararlo con otros productos en el mercado.

Con este fin se buscará una opción en la producción de la energía eléctrica y, de este modo, cubrir y mejorar las necesidades de los poblados o áreas que no cuenten con este servicio, así como una fuente secundaria de energía eléctrica para casas-habitaciones en zonas urbanas, empresas, etc.

Los programas usados para los dibujos y simulación de elementos finitos serán el Solid Edge ST4 y el Abaqus versión académica.

Cabe destacar que el alcance de este proyecto de fin de grado se circunscribe únicamente al diseño aerodinámico del aerogenerador así como una resistencia a un máximo de viento. Se dejará para proyectos futuros el diseño de la transmisión de potencia y de componentes eléctricos (baterías, inversores, generador) que formarían el conjunto del aerogenerador.

## CAPÍTULO 2: SISTEMAS EÓLICOS.

En este apartado se abordará desde la evolución del viento y su aprovechamiento hasta su uso en la actualidad, métodos de obtención de energía mediante aerogeneradores de distintos tipos así como su clasificación en función de distintos parámetros.

### 2.1 HISTORIA DEL USO DEL VIENTO

El viento es una fuente de energía limpia, gratuita e inagotable. Ha sido ocupada desde hace siglos para navegar, mover molinos, moler trigo o bombear agua.

Ya en las civilizaciones sumerias o egipcias, el viento estaba presente no solo en la vida real, sino en toda clase de historias, leyendas o mitos. Las culturas más antiguas aprovechaban su fuerza para desplazarse mediante el uso de velas en los barcos. De todos es sabido la importancia del comercio en Egipto, por ejemplo, donde tuvo un gran apogeo el comercio fluvial que se desarrollaba en el río Nilo.

Los griegos asociaban el viento junto a los otros elementos que dieron origen al mundo, fuego y agua, al uso de los dioses. Sus leyendas consideraban que las fuerzas de la naturaleza no podían ser controladas por el hombre, por lo que hubo cierto desinterés a la hora de aprovecharse de él.

Sin embargo, en las culturas orientales esto no sucedía y de allí viene la primera noticia del uso del viento mediante un molino. Viene de la civilización Persa en el 7 d.C. con un molino de eje vertical usado para la molienda y el bombeo de agua tal como se ve en la figura 1.



Figura 1: Molino Persa.

Posteriormente, en el siglo IX los hermanos Banu Musa citan a los molinos en el "Libro de los Ingenieros Mecánicos". También los geógrafos árabes Al-Tabri y Al-Masudi mencionan que los molinos son utilizados con una doble función, como molinos harineros y como molinos de agua. El mecanismo de estos molinos constaba de un eje vertical, al igual que los molinos hidráulicos usados en Italia. Los autores árabes explican que comenzaron a construir molinos, gracias a las explicaciones que traían los esclavos de Oriente. La importancia del invento y la utilización por parte de los árabes hace que sean ellos los introductores del invento en España. Los ingenieros islámicos también son los creadores de los molinos de eje horizontal por la necesidad de adaptar las máquinas de eje vertical al bombeo del agua, debido a que este sistema no necesita variar la fuerza motriz con engranajes. Estos molinos a vela siguen la estela de las conquistas que realiza el Islam, por todo el Mediterráneo, y por el Este hasta la India y la China. Su principal ocupación era moler la caña de azúcar. Pero las culturas islámicas no son las únicas que conocen los molinos, parece ser, que los chinos, en el año 1655, según documenta Wowles, utilizaban unos molinos de viento con ejes verticales que se parecen a los hidráulicos. Algunos historiadores sostienen, entre ellos el español Julio Caro Baroja, que estos aparatos, que reciben el nombre de panémonas y se usaban para bombear el agua en las salinas, son el precedente de los molinos persas.

Pero fue a partir de la Revolución Industrial cuando el molino comienza a coger importancia. En esta época se empieza a usar de forma masiva el vapor y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz; además de la aparición de la electricidad. Por este consumo indiscriminado se produce un aumento de la contaminación y empiezan a aparecer las ideas de ahorro (el viento es gratis) y la limpieza del planeta.

En la segunda mitad del siglo XIX aparece el primer molino propiamente dicho, el denominado "multipala americano". Fue creado por Charles Brush en los años 1886-1887. se trataba de una turbina eólica de 12 kW, cuya energía se almacenaba en 12 baterías. Esta turbina funcionó durante 20 años, y era un gigante de 17 metros de altura y 144 palas, como se puede ver en la figura 2.

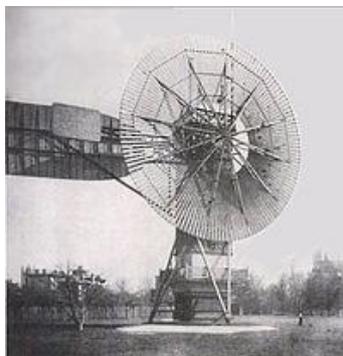


Figura 2: Primer aerogenerador

Aunque no el primero, decisivo es el trabajo de Paul la Cour de Dinamarca quien diseñó un túnel de viento para realizar primeros pruebas científicas. El descubrió que pocas y delgadas alas son más eficiente para generar electricidad y así es considerado padre de los aerogeneradores modernos (figura 3). En 1891 construyó su primer aerogenerador para la luz de una escuela, pero, en vez de cargar baterías, produjo hidrógeno para almacenar la energía. En los años 20 y 30 del último siglo se realizó una serie de importantes investigaciones y desarrollos. Albert Betz, profesor de la Universidad de Göttingen (Alemania), estableció en 1929, con su trabajo teórico, la Ley de Betz, comprobando que el máximo que se puede ganar de la energía eólica disponible es de 59.3% (actualmente, las turbinas más modernas y eficientes superan ligeramente el 50%).



Figura 3: Molino de Paul la Cour

Siguiendo la idea de Paul la Cour se empiezan a desarrollar aerogeneradores con una pala y contrapeso, dos palas, tres palas y cuatro palas. Actualmente predominan los molinos tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas americanos, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación como los alternadores eléctricos. Adicionalmente los estudios aerodinámicos revelaron que el tripala es el compromiso adecuado en cuanto a precio y estabilidad en la rotación del rotor.

Posteriormente, en 1922, el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius crea la turbina eléctrica Savonius (ver figura 4). Las Savonius son una de las turbinas más simples. Aerodinámicamente, son dispositivos de arrastre o resistencia que constan de dos o tres palas. Mirando el rotor desde arriba, las palas forman la figura de una S. Debido a la curvatura, las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que a favor de él. Esta diferencia causa que la turbina Savonius gire. Como es un artefacto de arrastre, la Savonius extrae mucho menos de la fuerza del viento que las turbinas de sustentación con similar tamaño. Por otro lado, no necesitan orientarse en la dirección del viento, soportan mejor las turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja velocidad. Es una de las turbinas más económicas y más fáciles de usar. Las turbinas Savonius son usadas cuando el costo resulta más importante que la eficiencia. Por ejemplo, la mayoría de los anemómetros

son turbinas Savonius (o de un diseño derivado), porque la eficiencia es completamente irrelevante para aquella aplicación. Savonius mucho más grandes han sido usadas para generar electricidad en boyas de aguas profundas, las cuales necesitan pequeñas cantidades de potencia y requieren poquísimos mantenimientos. La aplicación más común de la turbina Savonius es el ventilador Flettner el cual es comúnmente visto en los techos de furgonetas y buses usado como dispositivo de enfriamiento. El ventilador fue creado por el ingeniero alemán Anton Flettner.

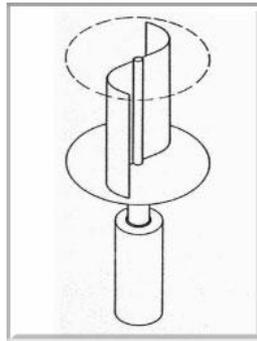


Figura 4: Aerogenerador Savonius

Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, este modelo es el más popular de los aerogeneradores de eje vertical. Nace por la necesidad de evitar la construcción de hélices sofisticadas como las que se utilizan en los aerogeneradores de eje horizontal. Permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, pero no alcanza a las de un rotor de eje horizontal.

El rotor Darrieus consta de unas finas palas con forma de ala de avión simétricas, que están unidas al eje solo por los dos extremos, con una curva especial diseñada para un máximo rendimiento entre las dos uniones del eje. El modelo de curva más utilizado es el denominado Troposkien, aunque también se utiliza la catenaria.

Como los otros aerogeneradores de eje vertical, el Darrieus no necesita de un sistema de orientación. Esta característica de captación omnidireccional le permite ser instalado en cualquier terreno sin necesidad de levantar altas torres, lo cual se traduce en un ahorro de costes sustancial. Al poseer una forma parecida a una cuerda para saltar, hace que los alerones del Darrieus experimenten una fuerte fuerza centrífuga. Al trabajar en pura tensión hace que los alerones sean simples y económicos.

Este rotor presenta el problema que no puede arrancar por sí mismo, teniendo que emplearse un sistema de arranque secundario, aunque una vez en marcha es capaz de mantenerse gracias a la aerodinámica de sus palas. Muchas veces se aplica al diseño de este aerogenerador, rotores Savonius para facilitar su partida. La otra forma es usar un sistema eléctrico para la partida. Usualmente se ocupa un generador de inducción conectado a la red. Una vez que el Darrieus se encuentra en velocidad de operación empieza a otorgar potencia.

Como resumen, se puede decir que este tipo de generador es simple, robusto y barato respecto a los otros tipos utilizados en generación eólica.

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



Figura 5: Aerogenerador Darrieus

Entre la segunda mitad de los siglos XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento. El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial y la utilización masiva del vapor y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz por su económico costo.

Fue entre las guerras mundiales cuando aparecieron, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas, sin embargo, a este tipo de generadores no se les prestó interés hasta la primera crisis del petróleo.

Con la crisis del petróleo se vio la necesidad de reducir la dependencia de los recursos no renovables, lo que estimuló el estudio de fuentes de energía alternativas como la energía eólica. Agencias gubernamentales como la NASA en Estados Unidos, se dedican al desarrollo de grandes turbinas de viento, las aplicaciones de las modernas tecnologías, y en especial de las desarrolladas para la aviación, ha dado como resultado la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas muy perfeccionadas; también se crearon mapas eólicos que permitieron cuantificar el potencial eólico disponible y se procedió a la agrupación de estos aerogeneradores en parques eólicos para suministrar la energía generada por ellos a una red eléctrica.

En años recientes, la energía eólica ha aumentado en países como Alemania, Dinamarca, España, el Reino Unido y Holanda, gracias a los incentivos establecidos por la Unión Europea.

La evolución de la potencia eólica instalada en España ha tenido un crecimiento vertiginoso, en el 2007 España ha liderado junto con EEUU y Alemania la instalación a nivel mundial (10433 MW para los tres países). Ello impulsó al gobierno español a aumentar la meta de potencia eólica que se quería tener instalada en el 2010, que de 13.000 MW ha pasado a 20155 MW. Esto coloca a España como el segundo país europeo con un objetivo tan alto. Desde finales de 1997 con 200 MW instalados, el mercado eólico español ha tenido un crecimiento anual del 30%. En el año 2007 se alcanzaron más de 15.000 MW instalados, cubriéndose el 9,5% de la demanda eléctrica con eólica. La eólica fue la cuarta tecnología del sistema por delante de la gran hidráulica suponiendo casi el 85% de la potencia instalada de energías renovables.

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables en la que se dispone de una amplia tecnología, gracias a ello, su explotación es competitiva con las fuentes de energía tradicionales. En resumen, las ventajas y desventajas de la energía eólica son las siguientes:

### Ventajas

- Fuente de energía segura y renovable que ahorra el uso de combustibles fósiles y diversifica el suministro energético.
- La instalación es fácil de desmontar y recuperar rápidamente la zona natural utilizada.
- El tiempo de construcción es rápido.
- Beneficio económico para los municipios afectados.
- Instalaciones compatibles con otros usos del suelo.
- Limita la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, no genera residuos líquidos o sólidos.
- No utiliza agua.

### Desventajas

- Incapacidad de asegurar un suministro de energía regular o permanente debido a la gran variabilidad y fluctuación tanto en la velocidad como en la dirección del viento.
- Impacto visual ya que cambia el paisaje.
- Impacto sobre la fauna y la flora (migración y nidificación).

- Impacto sonoro por generación de un ruido de baja frecuencia de bajo nivel sonoro, pero constante.
- Puede producir interferencia electromagnética.

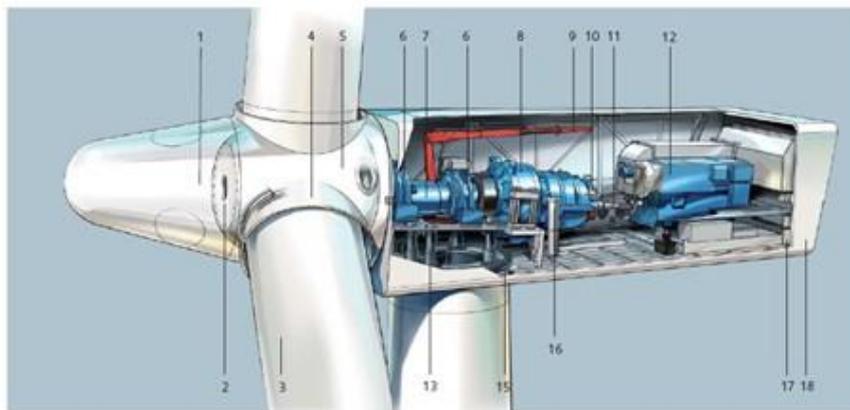
Su impacto medio ambiental se produce a escala local, lo que hace que la energía eólica reciba un alto nivel de aceptación social.

## 2.2 ¿QUÉ ES UN AEROGENERADOR?

Un generador eólico es una máquina capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Según el uso que se le dará a esa energía mecánica, se pueden dividir en dos tipos: los aerogeneradores que utilizan esa energía mecánica para el accionamiento de un generador eléctrico y así generar electricidad, o los aeromotores que utilizan directamente esa energía mecánica para el accionamiento de una máquina. La generación de energía eléctrica es el uso de la energía eólica más importante hoy en día.

En un aerogenerador se producen varios cambios de energía: la energía cinética del viento que se convierte a energía mecánica por medio del rotor, y la energía mecánica que se convierte en energía eléctrica por medio del generador.

Los principales componentes en los que está dividido un aerogenerador son los siguientes:



1 Rotor	10 Freno a disco
2 Soporte de rotor	11 Acoplamiento
3 Aspa	12 Generador
4 Rulemán de ángulo de incidencia	13 Engranaje de dirección
5 Eje de rotor	14 Torre
6 Rodamiento principal	15 Aro de dirección
7 Eje principal	16 Filtro de aceite
8 Caja de velocidades	17 Ventilador del generador
9 Grúa de mantenimiento	18 Góndola

Figura 6: Partes aerogenerador

Rotor: Su función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, son el conjunto de componentes del aerogenerador que giran fuera de la góndola. Está compuesto por las palas, el buje y la nariz.

Palas: son el elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico capturan la energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje al que están conectadas.

Buje: es el elemento de unión entre las palas y el sistema de rotación, ya que este está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador

Cono o nariz: es la cubierta metálica con forma cónica que se encara al viento, y lo desvía hacia el tren motor. Debe tener la forma aerodinámica adecuada para impedir la formación de turbulencias.

Eje de baja velocidad: Es el encargado de conectar el buje del rotor con la multiplicadora y transmitir la energía captada por las palas.

Multiplicadora: Debido a que la velocidad a la que gira el rotor es mucho menor a la que necesita el generador para producir electricidad, se necesita de una multiplicadora, para aumentar la velocidad a la que gira el rotor y así lograr el accionamiento del generador.

La multiplicadora conecta el eje de baja velocidad del rotor con el eje de alta velocidad del generador. Con ella se consigue la conversión entre potencia de alto par torsor, que se obtiene del rotor girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que se utiliza en el generador, se caracteriza por su relación de transformación, definida como la relación entre la velocidad de giro del eje de entrada (lado del rotor) y la del eje de salida (lado del generador eléctrico).

Eje de alta velocidad: Es el encargado del accionamiento del generador eléctrico.

Generador eléctrico: Su función es convertir la energía mecánica de rotación que le entrega la multiplicadora, en energía eléctrica. El generador eléctrico de un aerogenerador tiene que trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes debido a las variaciones en la velocidad del viento.

Góndola: La góndola encierra en su interior la multiplicadora, el generador eléctrico y los sistemas auxiliares del aerogenerador y dispone de una cubierta de protección y de insonorización de los componentes de la máquina. También incorpora las aberturas necesarias para lograr una ventilación efectiva del multiplicador y del generador.

Sistema de regulación y control: Este sistema tiene como función, mantener la velocidad de rotación constante y regular, y limitar la potencia eólica aprovechada o recuperada por el rotor.

Cuando la velocidad del viento es menor a la de conexión o mayor a la de desconexión, el sistema de control frena el aerogenerador como medio para prevenir daños. Para lograr esto, el aerogenerador cuenta con dos tipos de frenos, el freno aerodinámico y el freno mecánico. El primero, frena el aerogenerador por medio del giro del ángulo de las palas,

gracias a esto el aerogenerador se detiene de forma suave y segura en unas pocas vueltas, cuando se aplica este freno, el aerogenerador queda en estado de libre giro pero no detenido completamente.

El freno mecánico es un freno de disco situado en el eje de alta velocidad del multiplicador, éste, frena completamente el aerogenerador, se usa en caso de emergencia (fallo del freno aerodinámico) o durante las tareas de mantenimiento, para inmovilización por seguridad.

Sistema de orientación: Este sistema tiene como función orientar el rotor de forma que quede colocado de forma perpendicular a la dirección del viento y así presente siempre la mayor superficie de captación.

Anemómetro: Se utiliza para medir la velocidad del viento

Veleta: Se utiliza para medir la dirección del viento

Sistema hidráulico: Proporciona la potencia hidráulica para los accionamientos del aerogenerador (Palas,...).

Torre: Es la encargada de soportar la góndola y el rotor. Cuanto más alta sea la torre mayor cantidad de energía podrá obtenerse, ya que la velocidad del viento aumenta con la altura respecto al nivel del suelo.

Cimentación: Plataforma de alta resistencia sobre la cual se dispone el conjunto del aerogenerador.

Como se puede observar en la figura 6, esta descripción es válida para un aerogenerador de eje horizontal. Un aerogenerador de eje vertical es mucho más simple y como el propósito de este proyecto es el diseño de uno de ellos, las partes y componentes se explicarán más adelante.

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES

La clasificación de las máquinas eólicas puede realizarse atendiendo a los siguientes aspectos:

- Usos.
- Potencias.
- Número de palas.
- Velocidades de trabajo.
- Disposición del eje del rotor

### 2.3.1 USOS

Esta clasificación de las máquinas eólicas tiene en cuenta el tipo de trabajo que se va a realizar con ella. Este trabajo puede ser bombeo de agua, generación de energía eléctrica, molienda de granos.

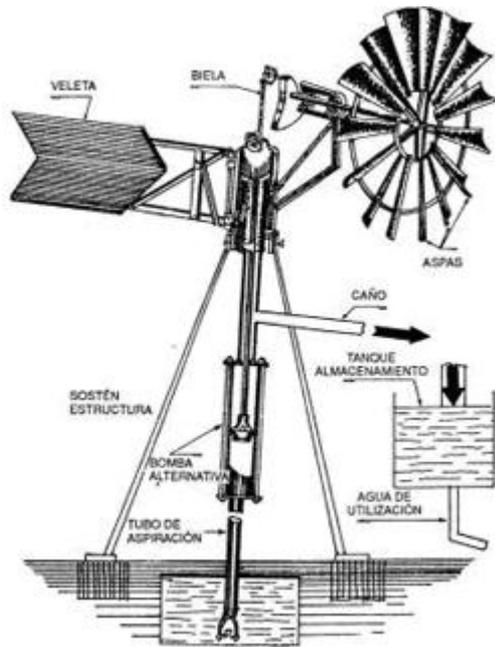


Figura 7: a) Aerogenerador para bombeo de agua. b) Molino para molienda de grano

### 2.3.2 POTENCIAS

#### - Microturbinas (<3kW):

Suelen ser utilizadas en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento. El generador eléctrico que normalmente utilizan es de imanes permanentes, y no suelen contar con caja multiplicadora entre el eje del rotor del aerogenerador y el generador eléctrico.

Habitualmente se trata de máquinas de eje horizontal con tres palas y diámetros pequeños (entre 1 y 5 metros) que trabajan a velocidades de rotación elevadas y generalmente variables. La electricidad que producen está en forma de corriente alterna de frecuencia variable, por lo que ésta es rectificadora, almacenada en baterías y posteriormente se

convierte de nuevo en alterna pero de frecuencia constante mediante un inversor. Finalmente un transformador es el que se encarga de subir la tensión a la que requiera el servicio.

Ejemplo: máquinas eólicas que se encargan de accionar bombas hidráulicas para la extracción de agua de los pozos.

### - Pequeños aerogeneradores (<50kW):

También suelen ser utilizados en sistemas aislados para generar electricidad que posteriormente servirá para cargar unas baterías de almacenamiento, es decir, cubren una demanda similar a la del grupo anterior, pero teniendo una mayor potencia. Además, también suelen utilizarse para formar sistemas híbridos, es decir, sistemas que combinan la energía eólica con otro tipo de energía como puede ser solar, hidráulica, diesel,...

Si la potencia es hasta 10kW el tipo de generador eléctrico sigue siendo de imanes permanentes y sin hacer uso de caja multiplicadora. Sin embargo, para una gama de potencias más alta se introducen cajas de engranajes entre el eje del rotor y el del generador, ya que el generador eléctrico funciona a unas velocidades mucho mayores que las del rotor del aerogenerador.

Ejemplo: máquinas eólicas que se encargan de la iluminación de granjas de animales.

### - Grandes aerogeneradores (<850kW):

En este caso, la producción de electricidad ya se inyecta a la red. Suelen ser aerogeneradores rápidos de eje horizontal que cuentan normalmente con tres palas. Sus potencias suelen estar comprendidas entre 200 y 850 kW y sus diámetros entre 25 y 55 metros. Cuentan con cajas de engranajes para aumentar la velocidad y así poder accionar el generador eléctrico y sus palas suelen contar con un sistema de regulación (ya sea activo o pasivo) mediante el que se controla la potencia del rotor en función de la velocidad del viento.

Ejemplo: parques eólicos cuando éstos se encuentran en terrenos complejos.

### - Aerogeneradores multimegawat (1-3MW):

La electricidad que producen también se inyecta a la red. Son similares a los anteriores en cuanto a cajas de engranajes y sistemas de regulación, sin embargo sus diámetros son mucho mayores (entre 50 y 90 metros) y su altura suele estar entre 60 y 100 metros.

Ejemplo: parques eólicos offshore.

### 2.3.3 POR NÚMERO DE PALAS

#### - Hélices de una pala:

La utilización de una turbina eólica monopala aumenta la velocidad de rotación del rotor y por tanto reduce las masas y costos de los demás elementos como el multiplicador y el generador eléctrico. Además, económicamente hablando, el costo es muy pequeño ya que la fabricación es sencilla y la cantidad de materiales también, por el hecho de contar sólo con una pala.

Sin embargo, estas turbinas requieren un contrapeso para que se compense la única pala, y además, el desequilibrio aerodinámico en este modelo es muy grande y causa problemas de fatiga. Otra desventaja es que la velocidad en punta de pala al ser muy alta provoca mucho ruido aerodinámico. Si comparamos este rotor con los rotores tripalas vemos que la velocidad en punta de pala es dos veces mayor en los monopala, por lo que el nivel sonoro resultante es bastante elevado.



Figura 8: Aerogenerador de una pala

#### - Hélices de dos palas:

El costo del rotor es menor que en uno tripala, sin embargo, debido a los fluctuantes esfuerzos dinámicos que se originan con esta configuración se requieren dispositivos especiales para disminuir el estado de carga, lo que eleva finalmente el costo global de la máquina, perdiéndose la ventaja económica respecto a la tripala. Además, en cuanto a

vibraciones, los bipala son más sensibles que los tripala, ya que tienen mayores velocidades en punta de pala.

Además, igual que ocurría en los monopala, los bipala poseen la posibilidad de fijarse al cubo del rotor mediante un dispositivo de oscilación, efecto denominado teetering, una especie de bisagra que permite compensar los esfuerzos que provoca la variación del perfil de velocidad del viento con la altura, lográndose un patrón de esfuerzos externos algo más plano a lo largo del área barrida por la pala. Otras ventajas se dan en la fabricación, ya que si es de poca potencia y con sistema de control Stahl, su fabricación se puede hacer en un único bloque.



Figura 9: Aerogenerador de dos palas

### - Hélices de tres palas:

Una de las razones principales para la utilización de tres palas es el momento debido a Coriolis constante, casi nulo, del rotor respecto a los movimientos operacionales alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con tres o más palas tienen esta propiedad favorable, por lo que no induce ninguna carga sobre la estructura. Debido a éste fenómeno lo que acontece es una simplificación estructural y reducción en los costos de fabricación.

La característica fundamental de esta configuración es su mayor suavidad de funcionamiento respecto a las anteriores. Los rotores de tres palas tienen velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala, constituyendo una gran ventaja respecto a los monopalas y bipalas debido a la reducción en el nivel de ruido que esto conlleva.

Asimismo, de manera diferente a las hélices mono y bipalas, las de tres palas gozan de una gran aceptación pública en cuanto al impacto visual que ocasionan.



Figura 10: Aerogenerador de tres palas

**- Hélices multipalas:**

Los rotores multipala, tipo americano, tienen por uso casi excluyente el bombeo de agua. Su elevada fuerza de arranque y su relativo bajo costo los hace muy aptos para accionar bombas de pistón. Se estima que en el mundo existen más de 1.000.000 de molinos de este tipo en operación.



Figura 11: Aerogenerador multipala

### **2.3.4 POR VELOCIDAD DE TRABAJO**

#### **- Máquinas eólicas rápidas:**

En este caso, el número de palas suele ser pequeño y como su potencia por unidad de peso es mayor y además son más ligeros, se pueden construir con radios mucho mayores y situar el buje a alturas también mayores, aprovechando de esta forma el aumento de la velocidad del viento con la altura. Actualmente se construyen rotores de hasta 90 metros de diámetro, alcanzando su potencia nominal los 300kW.

Requieren mayores velocidades de viento para su arranque que las eólicas lentas (necesitan 4-5m/s frente a los 2-3m/s que necesitan las lentas), alcanzan su potencia nominal a velocidades de viento entre 12 y 15 m/s y a partir de 25-30m/s se produce la parada del rotor para evitar daños en la máquina. El valor máximo del coeficiente de potencia  $C_p$  está en torno al 0,4 y se da para valores de velocidad específica entre 7 y 10 m/s (valores mayores que en el caso de las eólicas lentas).

Además, como tienen un menor número de palas, es más fácil incorporar mecanismos de control de variación de ángulos de ataque con respecto a la dirección del viento, para así proteger mejor el equipo.

#### **- Máquinas eólicas lentas:**

Normalmente cuenta con un elevado número de palas (entre 12 y 24) y su sistema de orientación se da mediante un timón-veleta que hace que el plano de la hélice esté siempre situado perpendicular al viento. Su diámetro es menor que en las máquinas eólicas rápidas (entre 1 y 3 metros), ya que éste está limitado por el peso del rotor y para que arranquen necesitan velocidades de viento entre 2-3m/s.

Sus aplicaciones son sobre todo en instalaciones de extracción y bombeo de agua.

### **2.3.5 POR LA COLOCACIÓN DEL EJE DE ROTACIÓN**

#### **- Aerogeneradores de eje horizontal:**

Este tipo de aerogeneradores son los más comunes y los más eficientes en temas de conversión. Esta conversión se realiza mediante dispositivos ubicados en la misma torre, como es el caso de las turbinas eólicas destinadas a la producción de electricidad, donde el generador eléctrico está localizado en la cúpula.

Las denominas máquinas rápidas, con palas de perfil aerodinámico y casi exclusivamente empleadas para la generación de electricidad, tiene rotores de 1 a 3 palas que

pueden estar ubicados a popa (*sotavento*) o a proa (*barlovento*) de la cúpula. Los rotores con palas a sotavento no requieren de sistemas de orientación pues las fuerzas en juego tienden a orientarlo naturalmente, aunque en máquinas de gran tamaño se prefiere emplearlos para evitar los "cabeceos" que someterían las palas a vibraciones perjudiciales.

En el caso de palas a barlovento los sistemas de orientación son imprescindibles, por ello se utilizan colas de orientación en el caso de pequeños aerogeneradores o servomecanismos de orientación en el caso de los grandes.



Figura 12: Distintos modelos de aerogenerador horizontal.

### - Aerogeneradores de eje vertical:

Este tipo de aerogeneradores tiene la ventaja de que no necesitan sistemas de orientación. Esto es una gran ventaja, ya que no habría que diseñar ni fabricar estos mecanismos tan complejos de direccionamiento y se eliminarían los esfuerzos a los que se ven sometidas las palas ante los cambios de orientación del rotor. Así, por su disposición, hacen posible la colocación de los sistemas de conversión en el suelo, eliminando de esta forma pesadas cargas en las torres, algo que no se puede evitar en los de eje horizontal.

Dentro de los aerogeneradores de eje vertical existen dos diseños básicos de los cuales ya se ha hablado: Savonius y Darrieus. Este proyecto está centrado en el rotor Savonius, debido a su sencillez en cuanto a técnicas de fabricación y a su bajo costo, aunque todo ello afecte a su eficiencia, haciendo que ésta no sea muy elevada. Este tipo de rotores suelen utilizarse en aplicaciones donde se requieren pequeñas potencias. En cuanto a los rotores Darrieus cada vez se están desarrollando más para la generación de electricidad, llegando incluso a competir con los de eje horizontal de palas aerodinámicas. Tienen un par de arranque nulo y entregan potencias altas por unidad de peso del rotor y por unidad de costo. La combinación de estos dos diseños de rotores ha dado lugar a un diseño de rotor Savonius con las palas torsionadas, para aumentar así su par de arranque.



Figura 13: Rotor Savonius con palas torsionadas.

## 2.4 RENDIMIENTO

Al igual que todas las máquinas existentes, los aerogeneradores tienen un rendimiento. Se diferencian de, por ejemplo, un frigorífico en que este está recibiendo siempre la misma corriente eléctrica, por lo que no varía mucho aunque cambien cosas a su alrededor. En cambio, un aerogenerador, al igual que una placa solar, varía dependiendo del estado climatológico, no es lo mismo un día nublado y sin viento que un día soleado con un viento de 60 Km/h.

### 2.4.1 TEOREMA DE BETZ

El Teorema de Betz es de mucha importancia para las máquinas eólicas, se puede decir que es tan importante para las máquinas eólicas como lo es el Teorema de Carnot para las máquinas térmicas. La teoría de Betz, supone que una vena fluida en una corriente no perturbada delante de una turbina eólica posee una velocidad  $v_1$ , y que en el infinito, aguas abajo de la misma, posee una velocidad  $v_2$ .

Vamos a suponer que la energía eólica se puede recuperar y transformar mediante un aerogenerador. La pala se supone inmersa en una corriente de aire de velocidad  $v$  que, aguas abajo, posee una velocidad  $v_2$  no nula, lo que asegura que no es posible la transformación y recuperación de toda la energía del viento en otra forma de energía.

Se supondrá que aguas arriba de la pala, el aire que circula por el tubo de corriente, posee una velocidad  $v_1$  en la sección transversal ficticia A1, que es la velocidad del viento sin perturbar, mientras que la velocidad  $v_2$  se corresponde con otra sección transversal ficticia A2

aguas abajo de la zona en que se encuentra la pala. En el plano que contiene la pala, la sección transversal batida por la misma sería un disco imaginario de sección  $A$ , siendo  $v$  la velocidad útil del viento en la misma.

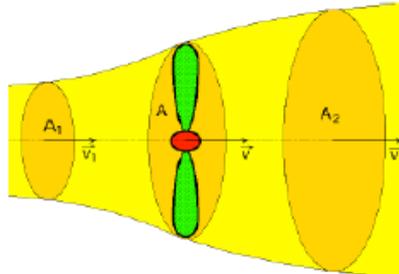


Figura 14: Esquema del movimiento del aire a través de un conducto

La pala se supone como un disco de diámetro  $d$  que capta la energía del aire en movimiento que llega a él. Si el disco fuese capaz de captar toda la energía cinética del viento, aguas abajo del mismo el aire estaría en reposo y, por lo tanto, la velocidad sería  $v_2 = 0$ .

Suponiendo que el gasto másico  $G$  de aire que circula por el tubo es constante, se puede poner:

$$G = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \rho \cdot A \cdot v$$

La variación de la energía cinética del viento en la unidad de tiempo es de la forma:

$$\Delta E_{cinética} = E_{c1} - E_{c2} = \frac{G}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho \cdot A \cdot v}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

La fuerza "F" ejercida por el viento en la unidad de tiempo  $\Delta t = 1$  sobre el área ficticia "A" barrida por la pala es igual a la variación de la cantidad de movimiento del aire que atraviesa; el trabajo generado por esta "F" en la unidad de tiempo es la potencia  $N_{útil}$  de la forma:

$$N_{útil} = F \cdot v = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2)$$

Que es igual a la variación de la energía cinética del aire en el mismo tiempo, pudiéndose poner:

$$N_{útil} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)}{4} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \rightarrow v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Si se hace el cambio  $v_2 = b \cdot v_1$  con  $(0 < b < 1)$ , resulta que:

$$N_{útil} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)}{4} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{4} \cdot (1 + b) \cdot (1 - b^2)$$

El máximo valor de  $N_{\text{útil}}$  se obtiene haciendo  $\frac{dN_{\text{útil}}}{db} = 0$ , resultando:

$$(1 - b^2) + (1 + b) \cdot (-2 \cdot b) = 0; (1 + b) \cdot (1 - 3 \cdot b) = 0$$

Cuyas soluciones son:

$$\left\{ \begin{array}{l} b = -1, \text{ que no cumple con la condición dada de } 0 < b < 1 \\ b = \frac{1}{3} = \frac{v_2}{v_1}; v_1 = 3 \cdot v_2 \end{array} \right.$$

Que permite hallar la potencia máxima suministrada por el rotor de valor:

$$N_{\text{útil}} = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{4} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{8 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}{27} = 0.37 \cdot A \cdot v_1^3$$

Que se conoce como *ecuación de Betz*, y en la que se ha tomado como densidad media del aire  $1.25 \text{ Kg/m}^3$

De todo esto se deduce que la potencia máxima teórica es proporcional al diámetro  $D$  del círculo de barrido por la pala y al cubo de la velocidad nominal del viento  $v_1$ .

Como la potencia del viento aguas arriba de la pala viene dada por la expresión:

$$N_{\text{disponible viento}} = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{2} = 0.625 \cdot A \cdot v_1^3$$

Y el rendimiento máximo aerodinámico es:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{N_{\text{útil max}}}{N_{\text{viento}}} = \frac{0.37 \cdot A \cdot v_1^3}{0.625 \cdot A \cdot v_1^3} = 0.592 = \boxed{59.2\%}$$

Para poder comparar los distintos tipos de aerogeneradores se miraría en la figura 15, donde se sitúan los distintos modelos con sus rendimientos a distintos TSR. El TSR o velocidad tangencial es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto de la turbina. También puede denominarse como velocidad específica:

$$TSR = \frac{r_{\text{aerogenerador}} \cdot \omega_{\text{aerogenerador}}}{v_{\text{viento}}}$$

Donde:

- $r_{\text{aerogenerador}}$  : radio del aerogenerador en metros
- $\omega_{\text{aerogenerador}}$  : velocidad angular de la turbina en rad/s
- $v_{\text{viento}}$  : velocidad del viento en m/s

Los aerogeneradores de eje horizontal y los de tipo Darrius tienen la particularidad de alcanzar una velocidad rotacional muy elevada y esto hace que la variable  $\omega$  se desligue de la velocidad del viento  $v$ , inclusive, que la supere en su componente tangencial. Por esto logran  $TSR > 1$ . Para otros aerogeneradores de eje vertical es difícil lograr una velocidad rotacional independiente y superior a la que impone el viento. Pero esto no implica que se puedan lograr buenos rendimientos aerodinámicos con bajos TSR. Por ejemplo, en el caso del Savonius, mejorando la estructura y la aerodinámica de las palas podrían alcanzarse mayores rendimientos para bajos TSR. Justamente esto es una de las metas que pretende alcanzar este proyecto.

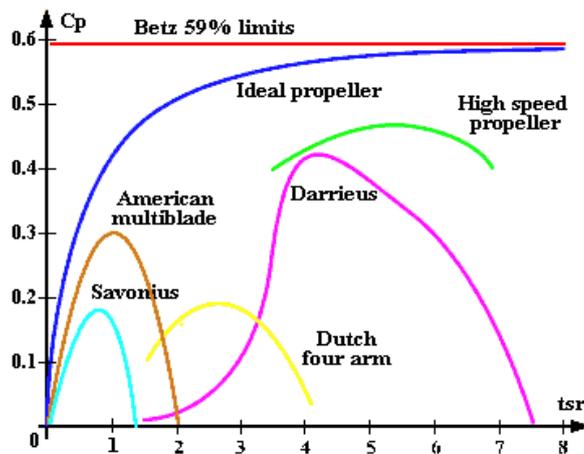


Figura 15: Rendimiento aerogeneradores

En la siguiente tabla se muestran distintos valores de rendimientos máximos para cada tipo de aerogenerador:

Tipo aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Complejidad constructiva	Rendimiento	Robustez (%)
<b>Eje horizontal</b>					
Moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0.2-0.35	5-10
Altas RPM	Alta	Muy bajo	De precisión	0.3-0.45	<5
<b>Eje vertical</b>					
Panemono	Baja	Medio	En bruto	>0.1	50
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0.15	100
Darrius	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.25-0.35	10-20
Geometría variable	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.2-0.35	15-40

Tabla 1: Rendimiento

## CAPÍTULO 3: EL PROTOTIPO

Los aerogeneradores de eje vertical no son muy comunes ya que tienen una eficiencia menor que los de eje horizontal. Sin embargo, en el caso de electrificación rural se busca más la sencillez tanto en diseño, fabricación, montaje y mantenimiento, que la eficiencia.

El hecho de diseñar un aerogenerador Savonius se debe a que dentro de los aerogeneradores de eje vertical se trata del más sencillo en fabricación e instalación. Así, necesita un mantenimiento mínimo, tiene un coste bajo, consigue arrancar con poco viento y no necesita de un sistema de orientación del viento, ya que funciona con vientos de cualquier dirección.

Sin embargo, también tiene inconvenientes como el hecho de que gira a una velocidad muy pequeña, por lo que a veces necesitará de sistemas de transmisión. No obstante el mayor inconveniente que tiene es que su rendimiento también es de los más bajos en cuanto a aerogeneradores se refiere.

### 3.1 LOCALIZACIÓN

El prototipo diseñado es un pequeño aerogenerador tipo Savonius cuya función sería suministrar energía eléctrica a una casa. Por ello, tendría que tener una serie de características específicas:

- Facilidad de instalación y desinstalación ya que se colocaría en una azotea o tejado
- Poco peso para que la estructura que lo soporte no se derrumbe
- Que reciba viento suficiente, es decir, que no haya edificios más altos que la posición del aerogenerador u obstáculos que dificulten la recepción del viento.
- Fácil acceso para mantenimiento
- Bajo coste.
- Bajos niveles de ruido

Mirando el mapa de España en distintos días del año y distintas estaciones se puede ver que hay lugares donde la velocidad del viento es baja y por tanto no compensa tanto poner

aerogeneradores (Madrid, por ejemplo, con edificios tan altos habría que colocarlo en sitios muy particulares como en las Cuatro Torres Business Area, lo que con un solo aparato no sería suficiente para la cantidad de electricidad que se necesita); o lugares como Galicia o Baleares donde la velocidad aumenta considerablemente según puede verse en la figura 16.

Como se puede observar en la leyenda, las velocidades del viento en el centro de la península son más bien bajas, del orden de 4-5 m/s mientras que en la costa, por ejemplo en Cádiz, la velocidad media anual es de 7-8 m/s.

Debido a la dificultad de realizar un diseño como debiera hacerse, es decir, construcción a tamaño real con los materiales reales y meterlo en un túnel de viento para simularlo y así saber los valores exactos necesarios como, por ejemplo, la velocidad de giro máxima del aerogenerador sin posibilidad de romperse, se ha elegido una ciudad entremedias de Cádiz y Madrid, que es Zaragoza.



Figura 16: Mapa eólico de España para velocidades medias anuales a 30 metros de altura.

Realizando un estudio de vientos más específico de la ciudad de Zaragoza se obtiene la figura 17, en donde se pueden ver los valores de velocidades de vientos desde el 15/04/2012 hasta el 15/04/2013.

### Histórico de predicciones para Zaragoza

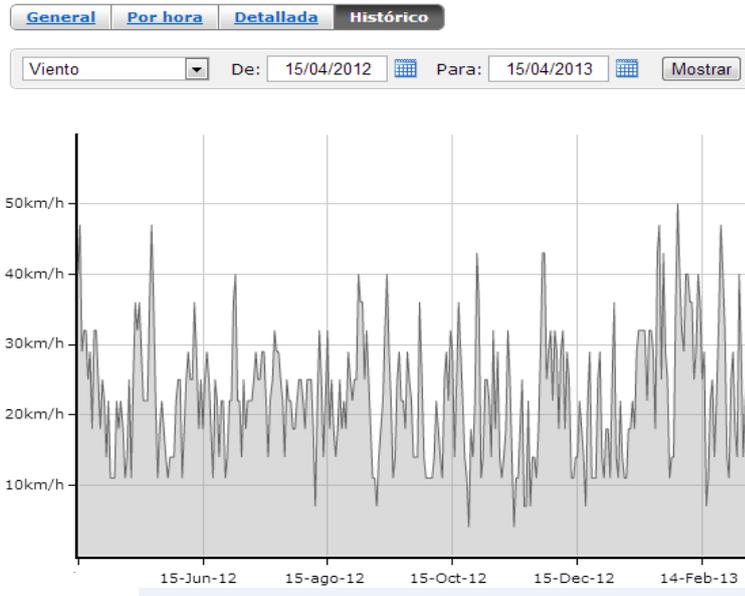


Figura 17: Velocidades vientos Zaragoza

Como se puede observar la media de velocidades ronda por el valor de los 20 km/h.

Y ahora viene la pregunta, ¿por qué hace tanto aire si es una zona interior? La respuesta viene por la existencia del llamado Cierzo. El cierzo o mistral es un viento frío y seco de componente noroeste que se origina por la diferencia de presión entre el mar Cantábrico y el Mediterráneo. Sopla con fuerza en el valle del Ebro, Aragón y Navarra cuando se originan borrascas en el Mediterráneo y anticiclones en el Cantábrico. Suele darse con más frecuencia en invierno y primavera, llegando a producirse ráfagas de más de 100 km/h.

Para la localización exacta del aerogenerador valdría cualquier casa bien en la ciudad de Zaragoza siempre que se cumplan las características mencionadas anteriormente o en las afueras, bien en algún pueblo o casa aislada.

## 3.2 PARTES

### 3.2.1 EL SOPORTE

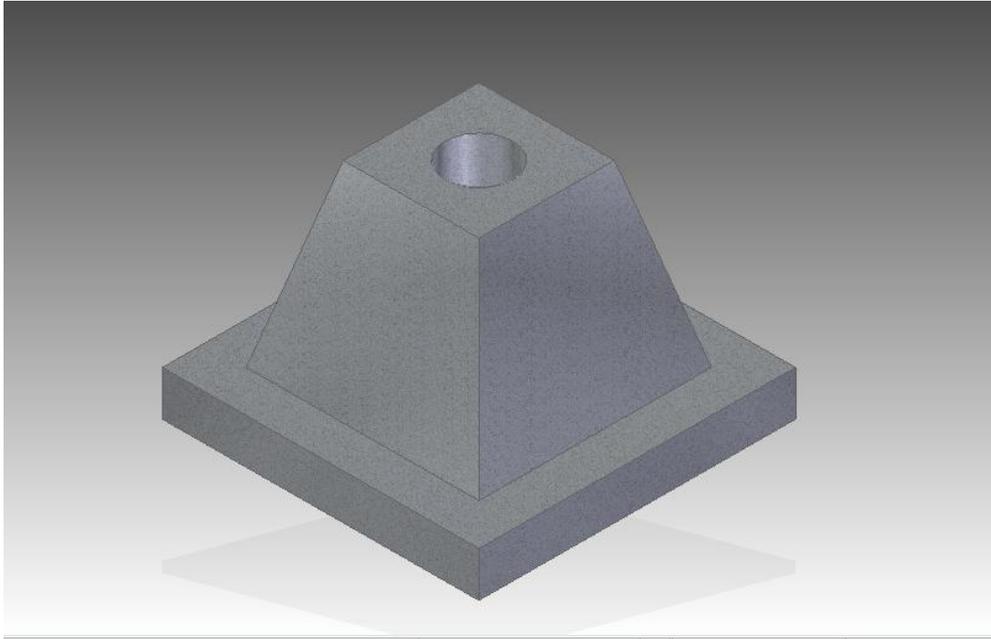


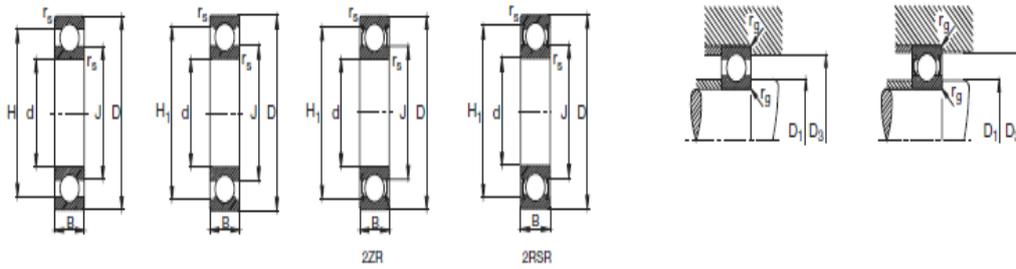
Figura 18: el soporte

Esta primera pieza es el soporte. En él es donde se apoya el eje central del aerogenerador y en el cual girará todo el aerogenerador, siendo esta la parte fija apoyada contra el suelo. En el interior habrá dos rodamientos que facilitarán el giro del eje central.

Para la elección de los rodamientos se consultará el catálogo WL 41 520/3 SB. El primero de ellos, el que se situará en la parte de arriba del cilindro interior, será el 6317.2ZR como se puede ver en la figura 19:

Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera

Los rodamientos pueden alcanzar una duración de vida ilimitada, si  $C_p/P_0 \geq 8$ , ver Pág.41.



Eje	Dimensiones							Peso $m_p$ kg	Capacidad de carga		Velocidad límite $n$ $min^{-1}$	Velocidad de referencia	Denominación abreviada Rodamiento FAG	Medidas auxiliares		
	d	D	B	$r_s$ mm	H $m_p$	$H_1$ $m_p$	J $m_p$		dyn. C	stat. $C_0$				$D_1$ mm	$D_2$ mm	$r_g$ mm
86	85	130	14	0,6	113,8		101,6	0,666	34	33,5	12000	5000	18017	88,2	126,8	0,6
	85	130	22	1,1	116		99,6	0,916	49	43	11000	6700	6017	91	124	1
	85	130	22	1,1	116		119,2	0,939	49	43	4800	6700	6017.2ZR	91	124	1
	85	150	28	2	129,6		106,6	1,67	83	64	10000	6000	6217	96	139	2
	85	150	28	2	129,6		133,6	1,91	83	64	4300	6000	6217.2ZR	96	139	2
	85	180	41	3	151,6		114,4	4,25	132	96,5	8000	6300	6317	99	166	2,5
	85	180	41	3	151,6		154,9	4,33	132	96,5	3400	6300	6317.2ZR	99	166	2,5
	85	210	52	4	173		122,9	9,58	173	137	7000	5600	6417M	105	190	3

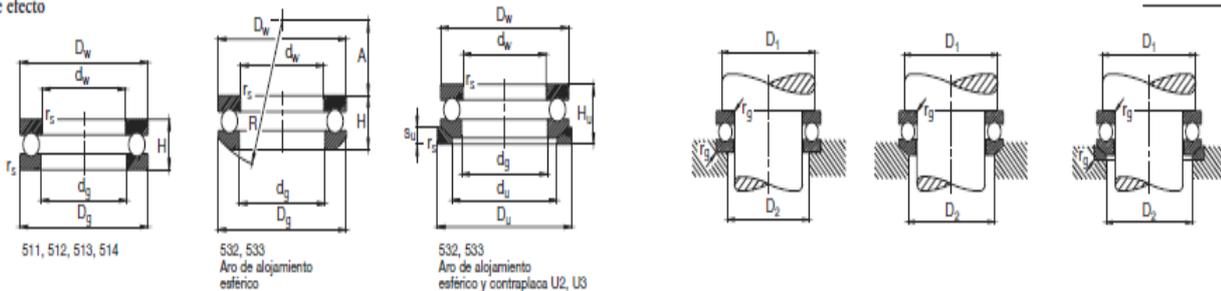
Figura 19: Primer rodamiento

El segundo de los rodamientos será el que está situado en la parte de abajo del cilindro interior, que será el que aguante el peso del resto del aerogenerador y que más facilidad tendrá que dar al giro. En el mismo catálogo que se ha usado para el primer rodamiento se encuentra el 53317:

Rodamientos FAG axiales de bolas de simple efecto

de simple efecto

Los rodamientos pueden alcanzar una duración de vida ilimitada, si  $C_p/P_0 \geq 8$ , ver Pág.41.



Eje	Dimensiones													Peso $m_p$ kg	Capacidad de carga		Coeficiente de carga mínimo M	Velocidad límite $n$ $min^{-1}$	Denominación abreviada		Medidas auxiliares		
	$d_w$	$d_g$	$D_w$	$D_g$	H	$r_s$ mm	R	A	$d_u$	$D_u$	$s_u$	$H_u$	Roda- miento		Contra- placa	$D_1$ mm			$D_2$ mm	$r_g$ mm			
86	85	87	110	110	19	1							0,605	45,5	150	0,12	3200	51117		100	95	1	
	85	88	125	125	31	1							1,21	98	250	0,38	2200	51217		109	101	1	
	85	88	125	125	33,1	1	100	52	105	130	11	37	1,22	98	250	0,38	2200	53217	U217	109	105	1	
	85	88	150	150	49	1,5							3,48	188	415	1,1	1700	51317		124	111	1,5	
	85	88	150	150	53,1	1,5	112	43	115	155	17,5	58	3,51	188	415	1,1	1700	53317	U317	124	115	1,5	
	85	88	177	180	72	2,1							9,79	290	680	2,8	1300	51417FP		142	123	2,1	

Figura 20: Rodamiento 2

Los planos del soporte se pueden ver en la figura 21.

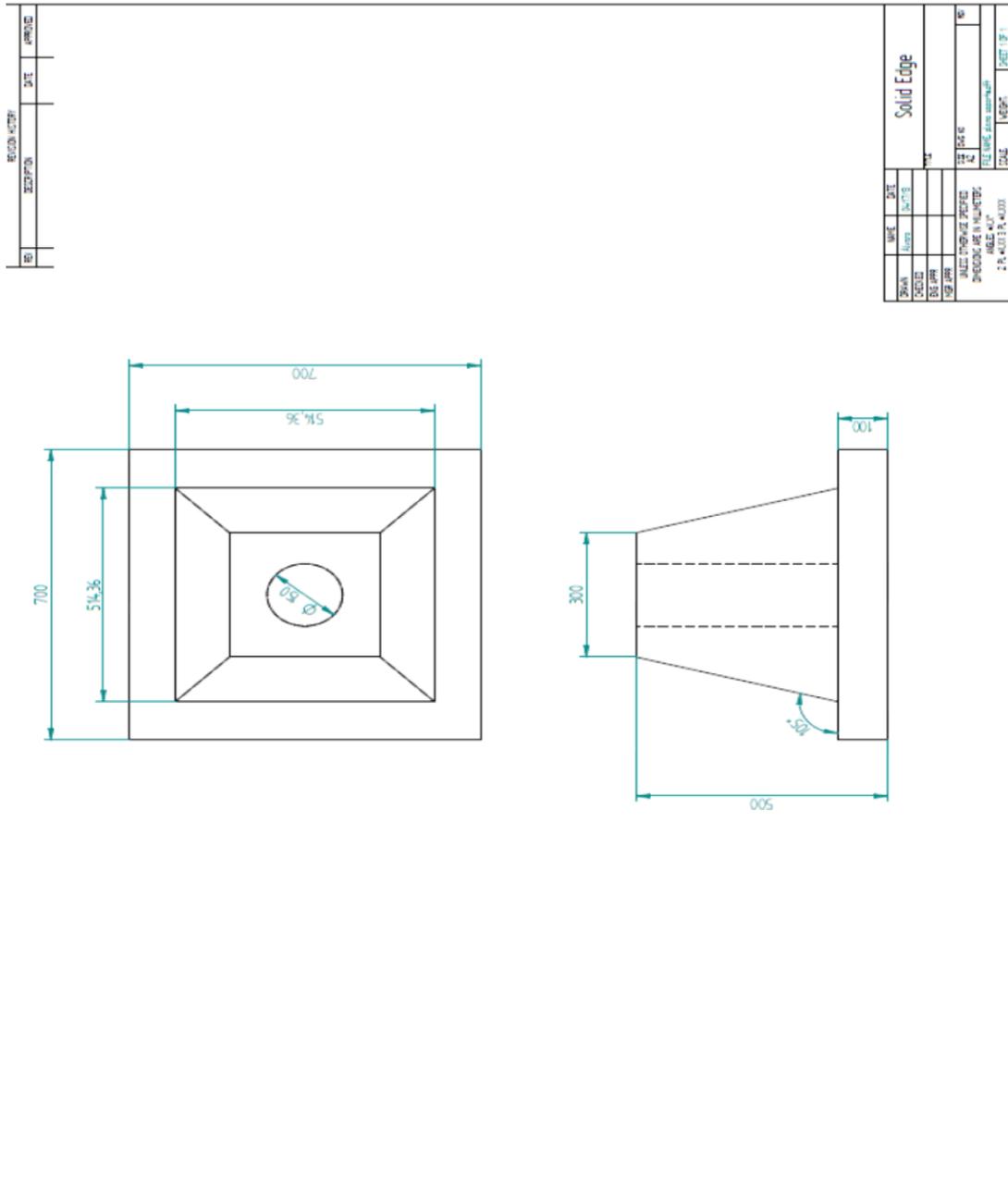


Figura 21: Plano soporte

Al ser un elemento de sujeción y apoyo, el material del que debe estar formado tiene que ser duro, pesado, con alta resistencia tanto a fatiga como a variaciones de temperaturas y que no sea corrosivo. El material seleccionado será el acero que tiene una densidad de  $7850 \text{ Kg/m}^3$ .

### 3.2.2 EL CILINDRO CENTRAL



Figura 22: Cilindro central

Este es el eje central del aerogenerador que va situado en el soporte unido a los rodamientos. Esta parte es la que gira, en sentido antihorario, solidariamente con las palas. Como se puede apreciar en la figura 22, tiene un pequeño agujero en cada cuarto del cilindro (cuatro en total) que será donde se sitúen unos pequeños cilindros que actuarán como unión de las palas. La forma "extraña" que se aprecia en el alzado es parte del diseño que se explicará en el apartado 3.3.

Este cilindro central será de un material parecido al soporte pero con menos peso, aunque resistente a fatiga, a corrosión y a variaciones de temperatura. El material será acero con una densidad de  $7850 \text{ Kg/m}^3$ .

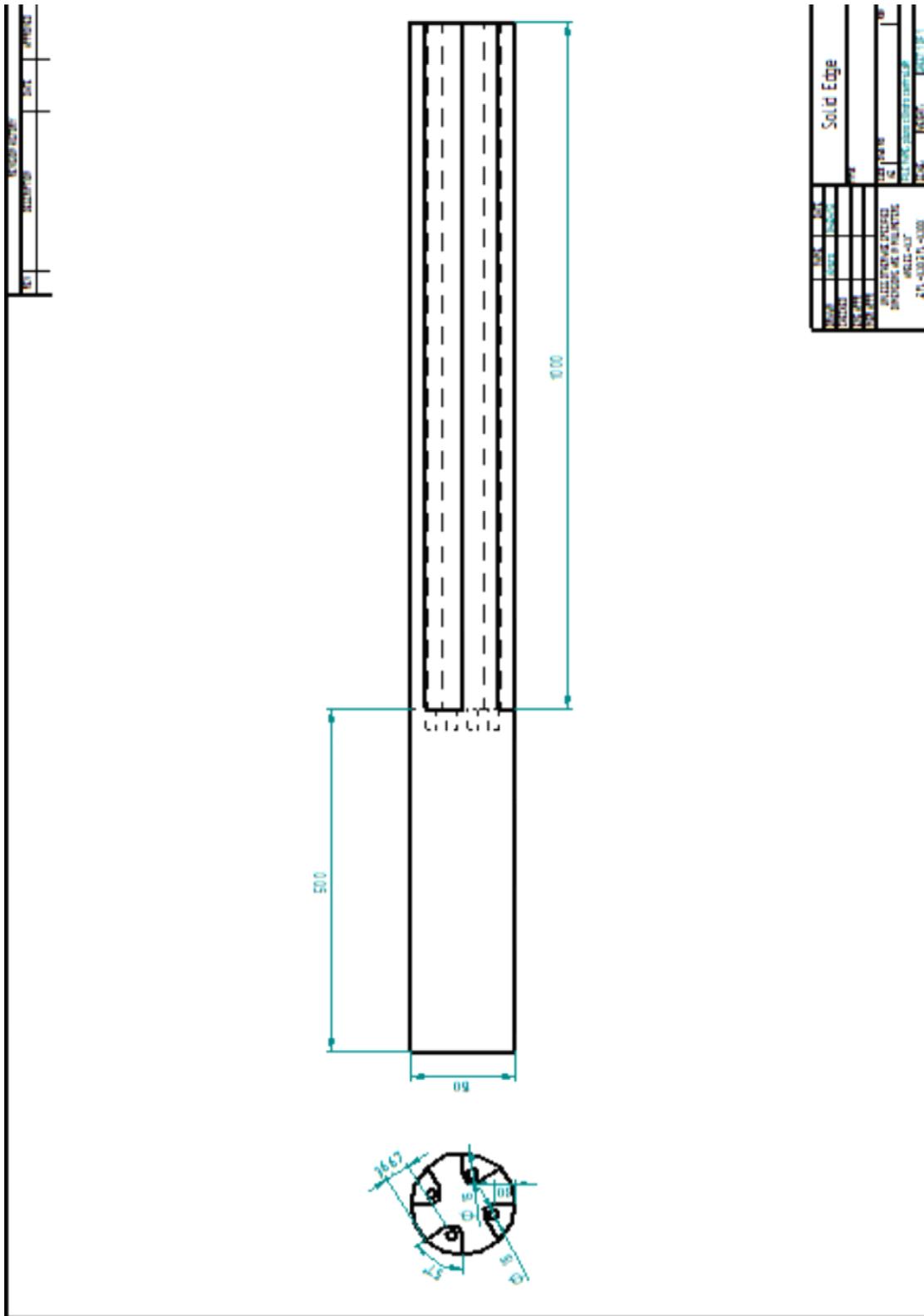


Figura 23: Plano eje central.

### 3.2.3. EJE UNIÓN



Figura 24: eje unión

Este elemento es muy sencillo. Es un cilindro que se une al eje central en los agujeros que hay en los cuatro cuartos del cilindro y que actúa como la bisagra de una puerta con la respectiva pala.

Por la función que tiene, el material del que está hecho tiene que ser resistente al desgaste y a la corrosión, por lo que será el acero con una densidad de  $7850 \text{ Kg/m}^3$ .



### 3.2.4 PALAS

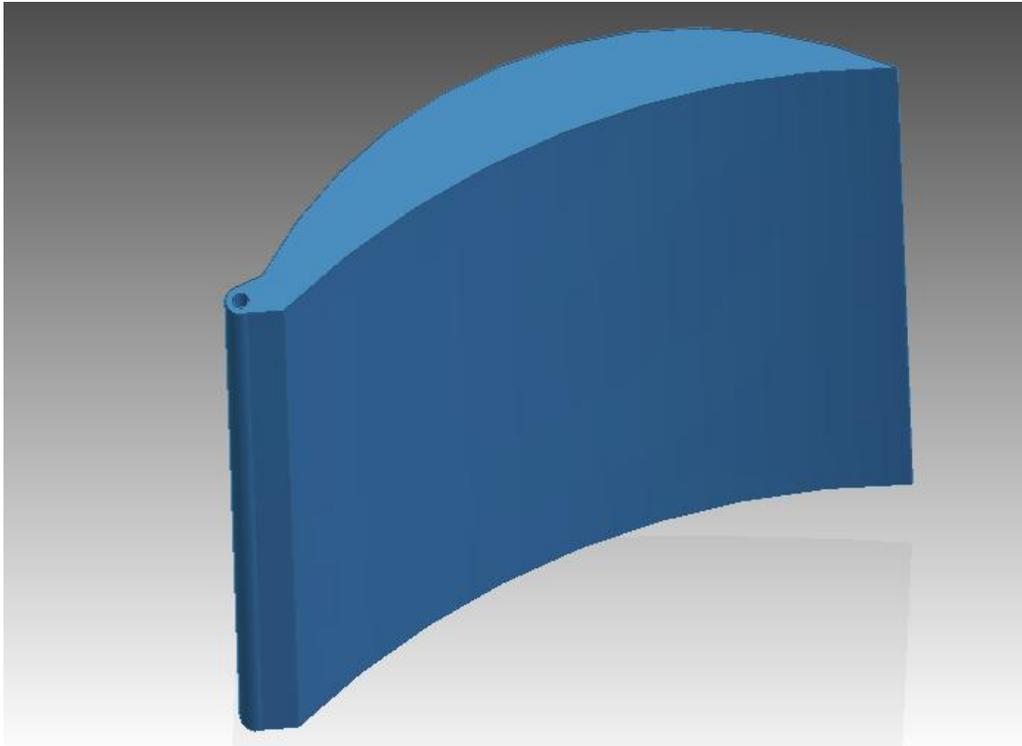


Figura 26: Palas

Esta es la parte más importante del diseño del aerogenerador ya que son las palas las que reciben el viento y lo transforman en movimiento. El diseño es fundamental y después de muchos ensayos, la figura 26 es la solución.

Para el diseño de las palas se ha tenido en cuenta que el coeficiente de potencia del aerogenerador depende en gran medida de la forma que tengan éstas. En el caso de los aerogeneradores Savonius más sencillos, las palas consisten en unas cazoletas de forma semicilíndrica hueca. Sin embargo, y como se estudiará más detenidamente en el siguiente capítulo, mediante esta forma el coeficiente de potencia del aerogenerador es muy bajo y por tanto, la potencia que se puede extraer de él es pequeña.



El material del que están hechas las palas tiene que ser ligero ya que toda la estructura tiene que soportar el peso, pero resistente ya que existen vientos a distintas velocidades (algunos pueden ser muy potentes y tienen que resistirlo) así como la fuerza centrífuga que se genera al girar. El material que cumple estos requisitos es el aluminio. Para realizar este estudio se simuló las palas en el programa ABAQUS.

Las figuras que se ven a continuación son algunos de los pasos realizados para la simulación de las palas. En la figura 28, se puede observar, una vez realizado el diseño de la pala, el mallado de la misma. Cabe destacar que no se puede tener un *mesh* más pequeño y, por tanto, más aproximado debido a la licencia académica del programa.

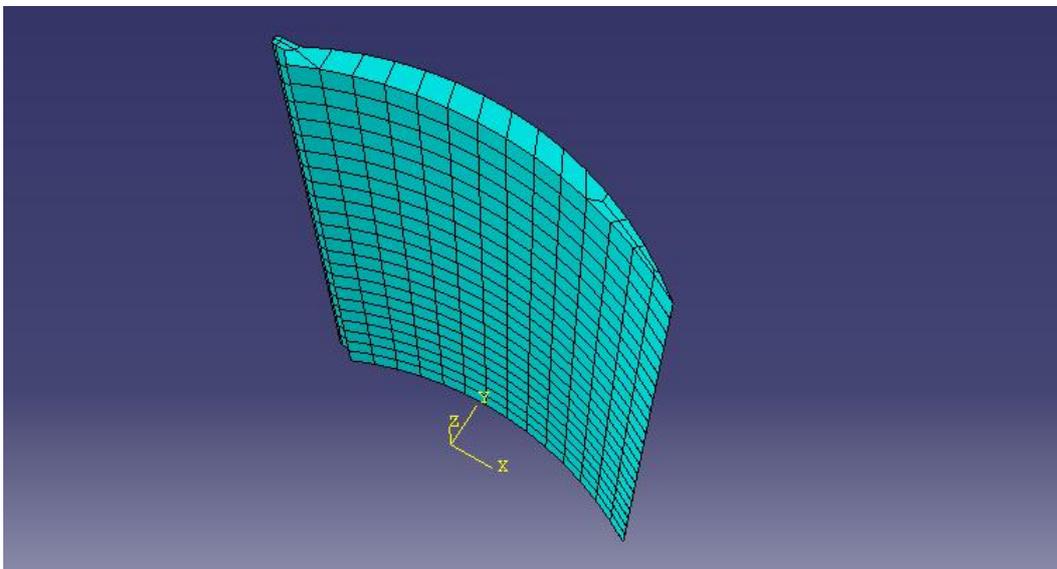


Figura 28: Mallado de la pala

Posteriormente, en la figura 29 se observa la distribución de cargas: empotramiento, fuerza del viento y fuerza centrífuga.

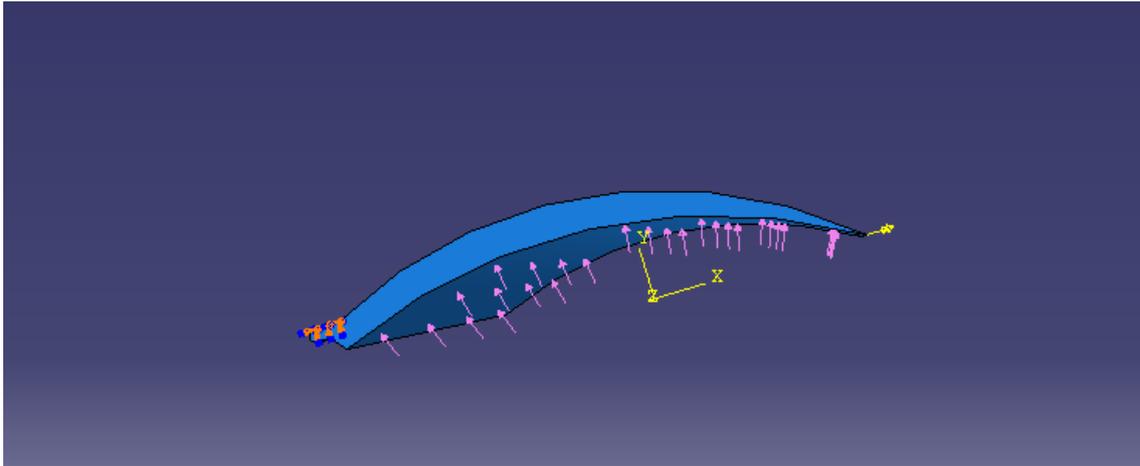


Figura 29: Distribución de cargas

Los valores de las fuerzas que se han puesto para realizar la simulación son los siguientes:

- **Fuerza del viento:**

El viento, al chocar contra las palas, genera una fuerza que viene dada por la expresión:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Siendo:

$$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

$v$  = velocidad del viento.

Los cálculos se van a realizar para las condiciones más desfavorables. Volviendo a la figura X de las velocidades de viento en Zaragoza se observa que la velocidad mayor obtenida durante el último año es de algo más de 50 km/h, por lo que se considerará una velocidad de viento de 100 km/h (28 m/s) para realizar el cálculo. Cabe señalar que esta no será una velocidad constante, sino más bien una ráfaga de viento puntual y que el aerogenerador tiene que soportar.

Así, la presión ejercida por el viento será:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 28^2 \rightarrow \boxed{P_{viento} = 480 \text{ Pa}}$$

- **Fuerza centrífuga:**

La fuerza centrífuga se debe a la rotación del equipo y es la que tiende a alejar las palas del eje de rotación. Tiene la siguiente forma:

$$F_c = m \cdot R \cdot \omega^2$$

Siendo:

$m$  = masa de la pala

$R$  = radio del rotor

$\omega$  = velocidad de giro del rotor

La masa se calcula con la siguiente expresión:

$$m = \rho \cdot V$$

Teniendo:

$\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$  que es la densidad del aluminio

$V = \text{volumen de la pala} = 0.02 \text{ m}^3$  (valor sacado directamente de ABAQUS)

Por lo que la masa de la pala es:

$$m = \rho \cdot V = 2700 \cdot 0.02 = 53 \text{ kg}$$

Para determinar la velocidad a la que gira el rotor hay que fijarse en la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v}$$

Donde:

$\lambda$  = valor de velocidad específica. Para los aerogeneradores Savonius tiene un valor de 0.8.

$\omega$  = velocidad angular medida en rd/s

$R$  = Radio del rotor en m (0.62227 m como se observa en los planos)

$v$  = velocidad del viento en m/s

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \rightarrow \omega = \frac{\lambda \cdot v}{R} = \frac{0.8 \cdot 20}{0.62227} = 27.72 \text{ rd/s}$$

Por tanto la fuerza centrífuga es:

$$F_c = m \cdot R \cdot \omega^2 = 53 \cdot 0.62227 \cdot 27.72 \rightarrow \boxed{F_c = 914 \text{ N}}$$

Por tanto, con todos los datos obtenidos e introducidos en el programa llegamos a la figura 30.

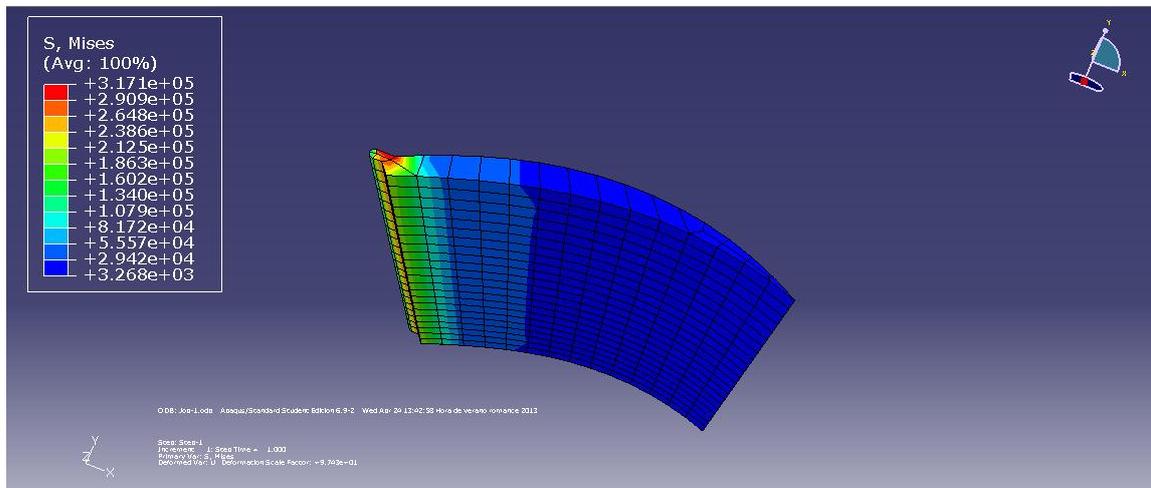


Figura 30: Valores finales obtenidos de tensión

Comparando el valor máximo obtenido de la tensión de Von Mises ( $3.17 \cdot 10^5$  Pa) es muy inferior al valor del límite elástico del aluminio ( $7 \cdot 10^{10}$  Pa) por lo que se llega a la conclusión de que este material es el adecuado para la pala ya que hay margen de seguridad en caso de haber vientos más fuertes de los previstos.

Por último, en la figura 31 se observa que los niveles de deformación de la pala son, como máximo, de dos milímetro en el extremo de la pala, donde se produce una mayor fuerza centrífuga, mientras que en el resto de la superficie no hay problemas de deformaciones.

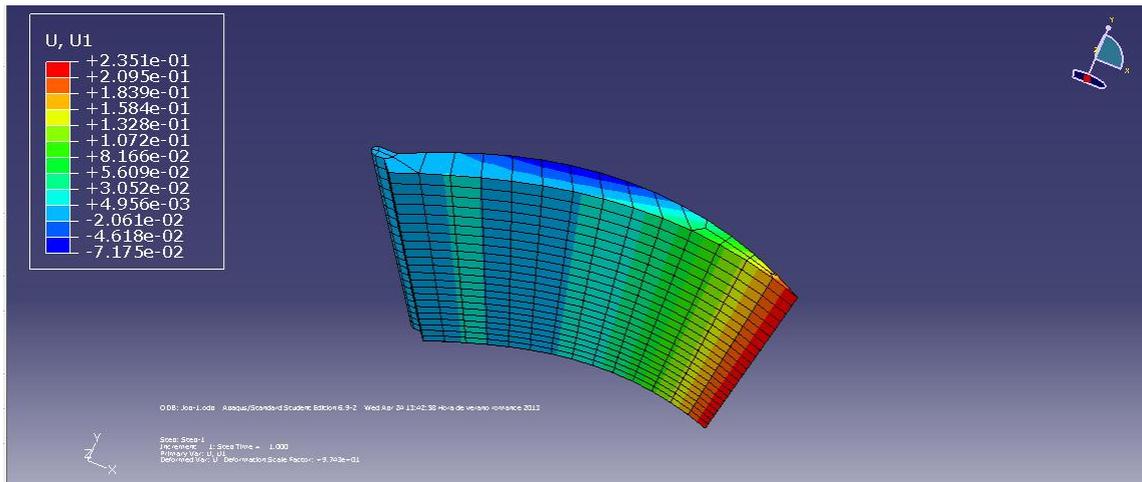


Figura 31: Deformación de la pala

### 3.3 FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se abordará el tema del funcionamiento del aerogenerador. Como cualquier molino del tipo Savonius, el funcionamiento es muy sencillo pero este diseño tiene una peculiaridad.

Como ya se ha visto anteriormente, en la gráfica del rendimiento (figura 15) el generador Savonius es, de todos los tipos de aerogeneradores, el que menos rendimiento tiene. Por ello, en numerosos proyectos se ha intentado aumentar dicho rendimiento obteniéndose escasa mejoría.

Una vez montado, el aerogenerador tendrá una vista como la que se muestra en la figura 32:

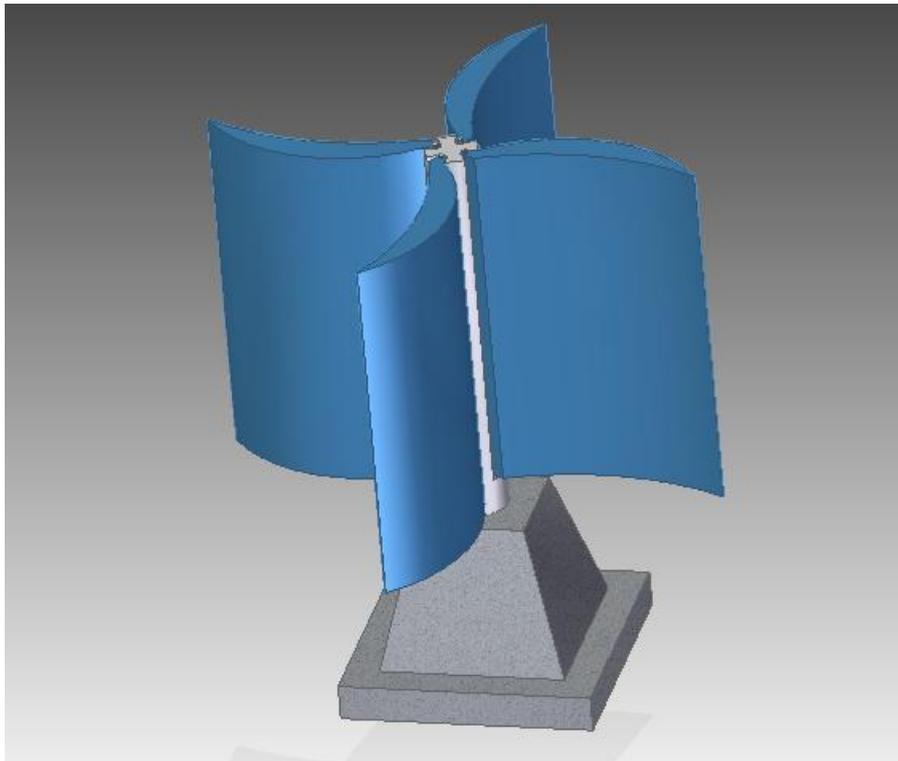


Figura 32: Prototipo

En caso de tener palas fijas, como se observa en la figura 33, el viento golpea de la misma manera la pala 1 como la 3, produciéndose una cierta resistencia al movimiento propia del viento. Aunque es cierto que se movería por la forma de cuchara que tienen las aspas, la velocidad de giro no sería muy alta, además de que la velocidad máxima de giro es menor que si no existiese ese aire en la pala 3.

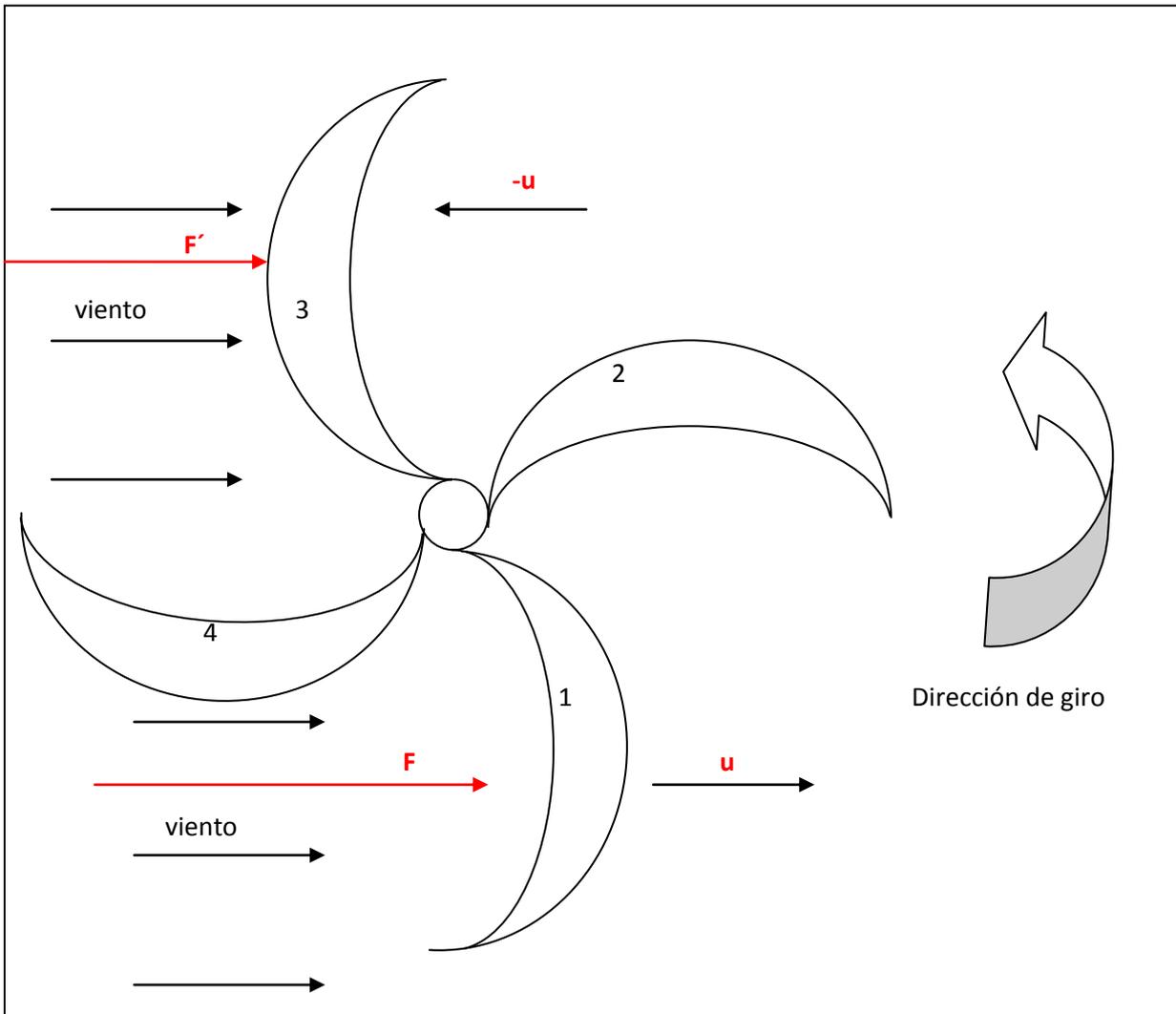


Figura 33: Acción del viento sobre el rotor con palas fijas

Análiticamente se puede observar de la siguiente manera. Un aerogenerador Savonius se trata de un aerogenerador de arrastre, es decir, su funcionamiento se basa en la distinta fuerza aerodinámica que ejerce un flujo de aire sobre objetos de diferente forma. La fuerza aerodinámica que ejerce una corriente de aire sobre un objeto es:

$$F = C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \omega^2$$

Donde:

$C$  = coeficiente aerodinámico

$\rho$  = densidad

$A$  = Área transversal

$\omega$  = velocidad relativa del aire respecto al objeto

Suponiendo las fuerzas  $F$  y  $F'$  que se ven en las partes cóncavas y convexas de la figura X llegamos a las siguientes expresiones:

$$\left. \begin{aligned} F &= C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - u)^2 \\ F' &= C' \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v + u)^2 \end{aligned} \right\} P = F - F' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u \cdot [C \cdot (v - u)^2 - C' \cdot (v + u)^2] \rightarrow$$

$$\rightarrow u_m = \frac{v \cdot [2a \pm (4a^2 - 3b^2)^{0.5}]}{3b}$$

Donde:

$u$ : velocidad lineal de las cazoletas ( $u = \Omega R$ )

$v$ : velocidad absoluta del viento

$v - u$ : velocidad relativa del viento en la cazoleta superior

$v + u$ : velocidad relativa del viento en la cazoleta inferior

$a = C + C'$

$b = C - C'$

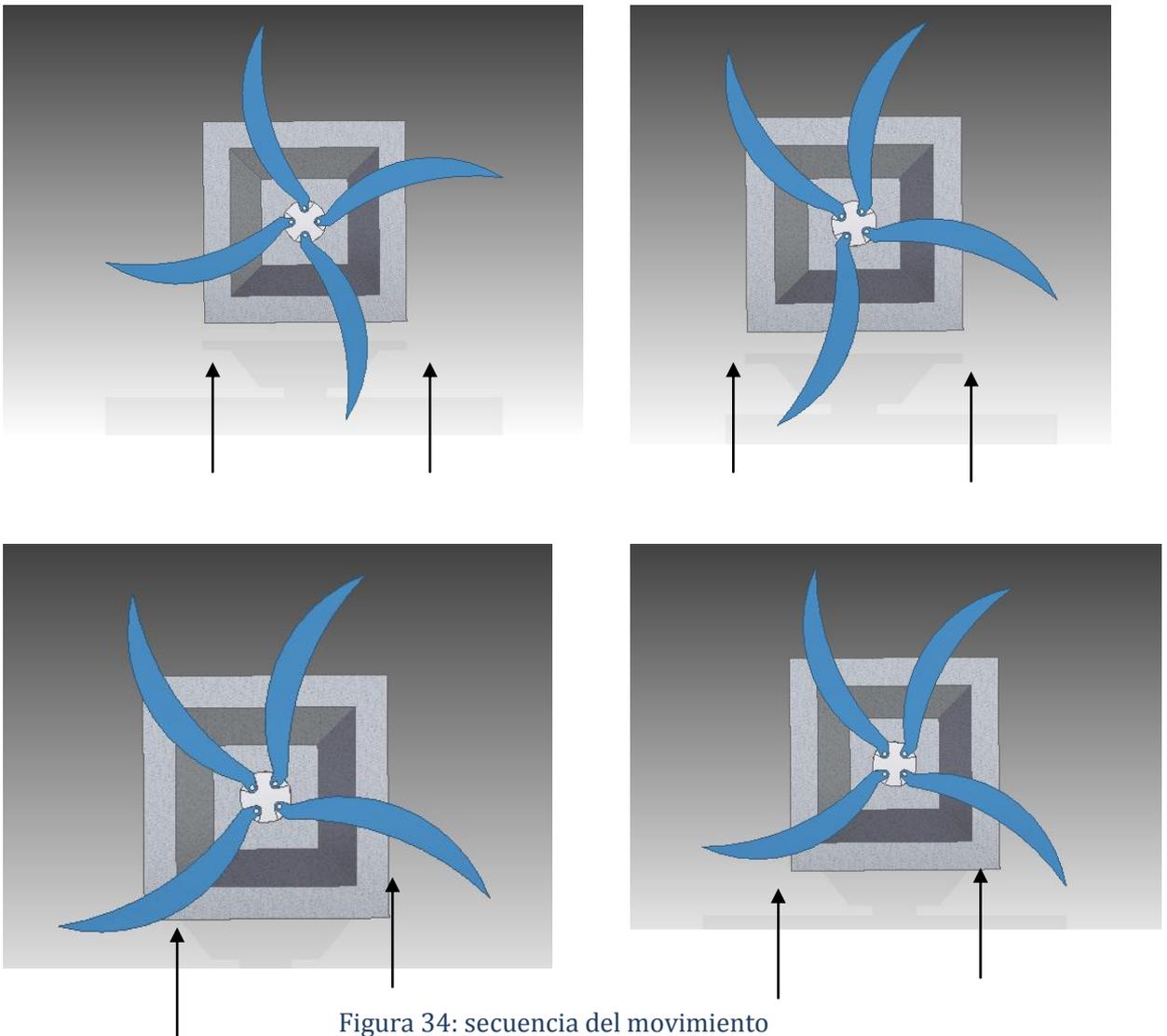
Por desarrollos teóricos y comprobaciones empíricas se sabe que los valores de  $C$  y  $C'$  para palas con forma de semicircunferencia tienen un valor de 2.3 y 1.2 respectivamente.

Por lo que la potencia quedaría:

$$P_{m\acute{a}x} = 0.074 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3\right)$$

En esta expresión se observa que el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es muy pequeño, por lo que sería necesaria un área muy grande para conseguir la potencia deseada por el aerogenerador.

Ya que esto es inviable, se ha diseñado el prototipo para aumentar ese  $C_p$  y se puede observar en la siguiente secuencia de imágenes:



Según se aprecia en la figura 34 de la secuencia del movimiento, la pala de la derecha recibe el aire de manera normal, como cualquier aerogenerador tipo Savonius, pero la aleta que está a la izquierda tiene un movimiento en dirección horaria reduciéndose el contacto con el aire y siendo más aerodinámico ocurriendo lo que se puede observar en la figura 35:

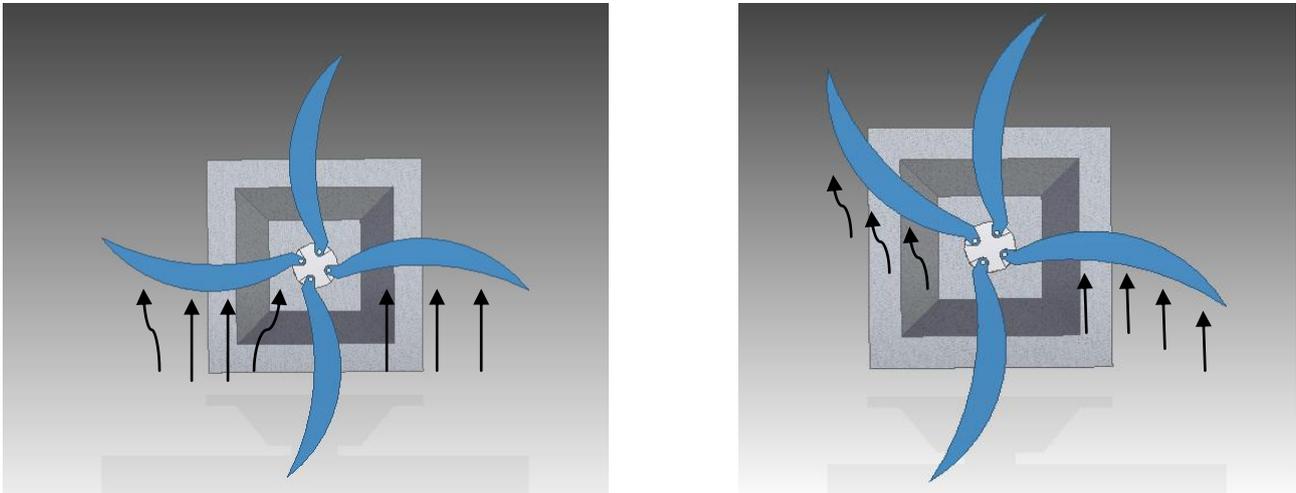


Figura 35: diferencia de comportamiento de las palas

Se puede ver que la superficie de contacto del aire con la pala convexa es muchísimo menor en el caso del prototipo (derecha) que en el caso de un Savonius normal (izquierda). Aunque es cierto que al seguir girando, en la figura de la derecha, la pala convexa se colocará en la misma posición que la pala de la figura de la izquierda, el aerogenerador habrá adquirido una inercia previa reduciendo así el efecto freno del aire tal y como sucede en un Savonius clásico.

Este razonamiento se puede comprobar al resolver en las fórmulas mencionadas anteriormente calculando así el valor del coeficiente aerodinámico:

$$P = F - F' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u \cdot [C \cdot (v - u)^2 - C' \cdot (v + u)^2] \rightarrow$$

$$\rightarrow u_m = \frac{v \cdot [2a \pm (4a^2 - 3b^2)^{0.5}]}{3b}$$

Y con valores de  $C = 2.3$  como en un caso normal, y aproximando un valor de  $C'$  (ya que no se puede cuantificar sin simularlo en un túnel de viento hay que suponerse uno) de 0.8 (el valor supuesto es menor que el 1.2 real pero siendo un valor razonable) se tendría:

$$P_{m\acute{a}x} = 0.2075 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \right)$$

Por tanto se comprueba que para este prototipo con este diseño se aumenta considerablemente el valor del coeficiente aerodinámico, por lo que es válido.

También se puede añadir que este diseño de palas movibles es considerado un elemento de seguridad ya que, en caso de estar funcionando, si alguien al realizar el mantenimiento mete una mano o un animal se mete entre las palas, estas se moverán reduciendo el impacto recibido en más de la mitad del que hubiera podido producirse en un caso normal.

### 3.4 CÁLCULOS

Una vez explicadas las partes del aerogenerador y su funcionamiento se va a explicar y a cuantificar (y por tanto, a comprobar) si el aerogenerador puede funcionar correctamente produciendo una cierta electricidad y compararlo con un presupuesto aproximado para averiguar si es o no viable, y más importante, si es económico o no su construcción para su puesta en el mercado.

#### 3.4.1 POTENCIA

Como ya se ha explicado anteriormente, la potencia máxima que produce el viento es:

$$P_{m\acute{a}x} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \right)$$

Sin embargo, hay que considerar una serie de parámetros que tiene un aerogenerador cualquiera para que la potencia máxima que produce sea la máxima del viento. Entre ellos está, primeramente, el valor del coeficiente aerodinámico calculado en el apartado anterior; además de los rendimientos de todas las partes eléctricas que hay que añadir al aerogenerador, que no se abordan en este proyecto, además de la multiplicadora. Sabiendo que la media de rendimientos eléctricos son del 90%, y de un 60% para la multiplicadora:

$$P_{m\acute{a}x} = 0.2075 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \right) \cdot \eta$$

Siendo:

$\eta$  = Rendimiento eléctrico y mecánico.

Con todo esto, se realiza una tabla con distintas velocidades de viento, velocidades de giro y potencia del rotor en Wh:

Velocidad viento en km/h	Velocidad viento en m/s	Velocidad giro en rpm	Potencia rotor en W	Potencia rotor en Wh diarios	Potencia rotor Wh anuales
5	1.4	34.4	0.17	4.16	1 520
10	2.8	68.8	1.4	33.33	12 166
20	5.6	137.6	11.11	266.7	97 333
30	8.33	204.53	36.6	877	320 355
40	11.11	272.8	86.8	2082	760 045
50	13.9	341	170	4078	1 188 475

Tabla 2: Cálculos aerogenerador.

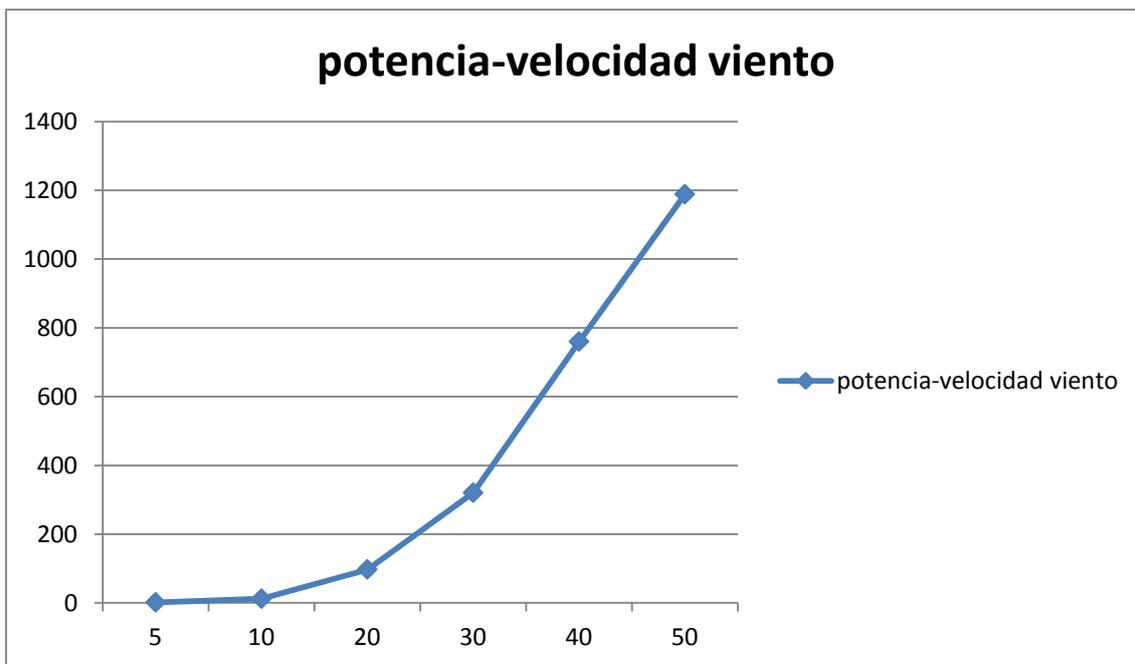


Figura 33: evolución de la potencia respecto a la velocidad del viento

Haciendo un estudio de la necesidad eléctrica de una vivienda en España se llega a que se consume anualmente 10290 kWh de media de los cuales:

- Calefacción: media anual de 5.172 kWh
- Electrodomésticos: 1.924 kWh
- Agua caliente: 1.877 kWh
- Cocina: 737 kWh
- Iluminación: 410 kWh
- Aire acondicionado: 170 kWh

Siendo los siguientes los aparatos que más consumen:

- Frigorífico: 662 kWh al año
- Congelador: 563 kWh
- Televisión: 263 kWh
- Lavadora: 255 kWh
- Secadora: 255 kWh
- Lavavajillas: 246 kWh

Considerando que el precio de la luz está a 0.181126 €/kWh una vivienda gasta alrededor de 1863.8 € anuales (aquí no se añaden los precios de mantenimiento de contadores y cosas así).

Con el prototipo diseñado y a una velocidad de viento media de 25 km/h se tiene una potencia del rotor de 150 kWh anuales, lo que supondría un ahorro de:  $150 \cdot 0.181126 = 27€$  al año.

### 3.4.2 PAR DE VUELCO

El par de vuelco es el momento que se produce en el soporte y que evita que, en caso de parada del aerogenerador, la fuerza del viento lo derribe. Para ello, se puede aproximar la estructura a:

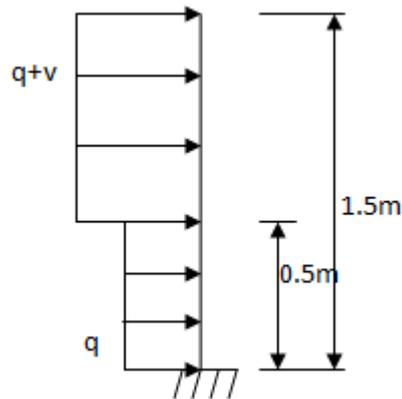


Figura 34: esquema estructura

Siendo:

$q$ : Fuerza del viento en el cilindro central

$v$ : fuerza del viento sobre las aletas

Ya que se ha estado usando la velocidad del viento límite para todos los cálculos de 60 km/h, para calcular el par de vuelco se mantendrá ese valor máximo de velocidad del viento.

Para  $v=60$  km/h,  $\rho=1.225$  kg/m<sup>3</sup>  $\rightarrow F_{viento} = 177$  N/m<sup>2</sup>; por lo que:

$$q = 177 \frac{N}{m^2} \cdot 0.15 \text{ m} = 26.55 \text{ N/m}$$

$$v = 177 \frac{N}{m^2} \cdot (2 \cdot 0.62227) = 220.3 \text{ N/m}$$

Por tanto:

$$\sum M = 0 \rightarrow 26.55 \cdot 0.5 \cdot 0.25 + 246.8 \cdot 1 \cdot 1 - M = 0 \rightarrow \boxed{M = 250.12 \text{ N} \cdot \text{m}}$$

Siendo el diagrama de esfuerzos:

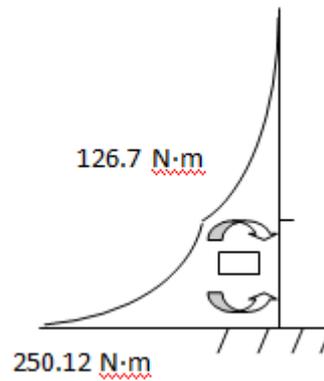


Figura 35: Diagrama de momentos flectores de la estructura

El momento del soporte será:

$$M_s = d_{horizontal\ al\ CDG} \cdot P_{soporte} \cdot g = 0.35 \cdot 80 \cdot 9.8 = 274.4\ N \cdot m$$

Por tanto, se llega a la conclusión que para un peso del soporte de 80kg el aerogenerador no volcaría en caso de parada y de un excesivo nivel de viento. Aún así, por cuestión de seguridad, a la hora de instalarlo el operario pondrá cuatro tornillos pasantes para unirlo a la superficie donde se sitúe para en caso de tener más viento del considerado, no hubiese ningún problema.

### 3.5 COMPARACIÓN CON PRODUCTOS SIMILARES

Actualmente existen un montón de aerogeneradores tanto de eje vertical como de eje horizontal con distintas formas que generan distintas energías y a distintos precios.

Los productos que se van a estudiar son:

- Jinfan Jfvc - 2kw. Precio desde 4200€



Figura 36: Jfvc

diámetro de la rueda de viento	2.4
material de las láminas	frp
cuchillas de número	5
longitud de las hojas	2160mm
hojas de ancho	450mm
rpm	50r/min
velocidad del viento nominal	10-11m/s
start velocidad del viento	2.5m/s
de trabajo de la velocidad del viento	3-25m/s
la supervivencia de la velocidad del viento	40m/s
el generador o el estilo	3 - fase de ca pmg
la protección generador	ip54
material de generador	De hierro fundido/de aluminio
ratde de energía	2kw
la potencia máxima	2.5kw

Tabla 3: Datos Jfvc

- Bee 800. Precio 744 €



Figura 37: Bee 800

**Especificaciones técnicas**

Número de hélices	5
Diametro	1,75 mts
Material	Nylon inyectado
Dirección de rotación	Horario
Sistemas de control	1) Regulador electrónico

**Especificaciones eléctricas**

Alternador	Trifásico de imanes permanentes
Imanes	Neodimio
Potencia nominal	800 W
Voltaje	12, 24, 48 v
RPM	@ 500
Regulador	12v 70Amp. 24v 35 Amp. 48v 18 Amp.

**Velocidad de viento**

Para arranque	3,5 m/s
Para potencia nominal	12 m/s
Máxima velocidad de viento	60 m/s

**Especificaciones físicas**

Peso aerogenerador	29 kg
Peso regulador	8 kg
Embalaje Dimensiones - peso	76 x 50 x 46 cm 0.17 m3 - 40,5 Kg

Garantía	3 años
----------	--------

Tabla 4: especificaciones Bee 800

- Aerogenerador 600w eddy. Precio 4458.85€



Figura 38: eddy

**Descripción Física**

Tamaño Aerogenerador	1.38mx1.6m
Altura del Mástil	7m estándar, otras alturas disponibles
Area de barrido	1.47 m <sup>2</sup>
Peso Neto	81.6 kg

**Información del Sistema**

Conexión a la Red Eléctrica	N/A
Sistema de Freno	Protección electrónica de máxima velocidad (MPPT)

**Generador**

Tipo	Imán Permanente
Temperatura	-40C a 115C (-40F a 230F)
Sistema de Transmisión	Transmisión Directa

**Rendimiento**

Velocidad de Arranque	3.5 m/s (8 mph)
Velocidad de Parada	32 m/s (71.5 mph)
Velocidad de Viento Nominal	12 m/s (27 mph)
Velocidad del Viento Máxima	55 m/s (112 mph)
Ruido a 3 mts con viento de 7 < 40 DB	m/s
Ruido a 3 mts con viento de 7 < 43 DB	a 10 m/s
Ruido a 3 mts con viento de < 47 DB	10-13 m/s

**Palas**

Composición de las Palas	Fibra de Vidrio
Revoluciones por minuto	200 rpm

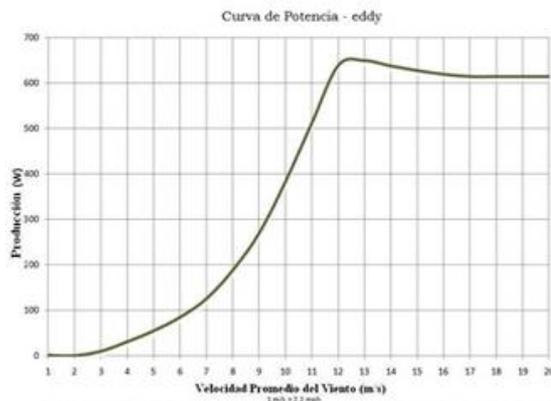


Figura 39: Potencia eddy

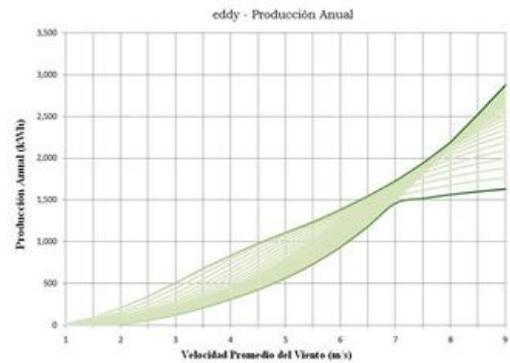


Figura 40: Producción anual eddy

Después de haber realizado un estudio de los productos que hay en el mercado se han escogido los modelos comparables al prototipo planteado en este proyecto pero eligiendo un aerogenerador de cada tipo: dos horizontales, uno multipala y otro tripala, y un vertical tipo Darreius.

Una vez hecha la comparación se observan los siguientes resultados:

- Por la forma y estructura los de eje horizontal tienen un mayor rendimiento y producen más energía con menores velocidades de viento. Por ello, el precio es mucho menor.
- Los de eje horizontal necesitan un mástil para aumentar la altura del aerogenerador y así conseguir mayores velocidades de viento mientras que para uno de eje vertical no es necesario.
- El peso es mucho menor en los productos ya existentes ya que el material necesario para su construcción es mucho menor.
- Mejor y más barato mantenimiento en los casos de eje vertical.
- Comparando el eddy con el prototipo (ambos de eje vertical) se observa que en cuestión de potencia, el Darreius produce mucha más electricidad que el prototipo. Esto se debe fundamentalmente a que el rendimiento de este tipo de aerogeneradores es bastante mayor, como ya se vio en la figura 15. En cambio, el precio también es mucho mayor, quizás excesivo si lo comparamos junto al aumento de la potencia producida.
- Pese a todo, las potencias de todos los aerogeneradores en el mercado y del prototipo expuesto en este proyecto, el tiempo de amortización es alto.

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIÓN

El viento es una energía libre, gratis, limpia e infinita. Por ello, es una buena solución el emplearlo para el bien de distintas maneras como es el sacar agua de los pozos o generar electricidad.

Año a año, e incluso mes a mes, el precio de la luz sube sin que el ciudadano de a pie pueda hacer nada y, como ya se ha visto, es una gran cantidad de dinero al año que se gasta.

Por todo ello, una solución es la del uso del viento para crear electricidad, y de ahí el desarrollo de los aerogeneradores. Pero no solo el desarrollo de los aerogeneradores gigantescos que se observan por las carreteras sino pequeñas turbinas que permitan generar una cierta cantidad de energía que disminuya el coste anual.

Así se han diseñado, desarrollado y salido al mercado distintos productos de todos los tipos imaginables con tal de generar una cantidad razonable de electricidad por un bajo coste, dando un resultado de inviabilidad ya que el precio de los materiales y objetos usados para el diseño y construcción son elevados para la cantidad de energía recibida. Como ya se vio anteriormente y se observa en la figura 15, el rendimiento de los aerogeneradores es muy bajo, por lo que no se puede aprovechar el máximo de la energía que ofrece el viento y, para obtener el máximo, el coste aumenta.

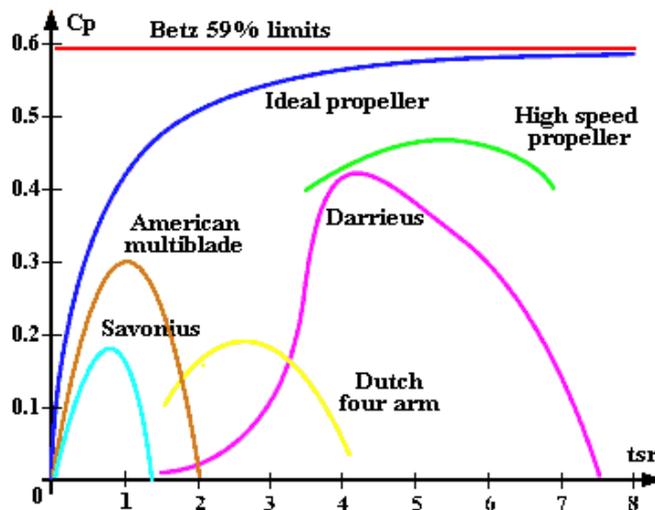


Figura 15: rendimiento de los aerogeneradores

Debido a esto, se ha desarrollado un aerogenerador tipo Savonius que es el más sencillo de mantener (barato) y de construir, y que no depende de la dirección del viento. Es cierto que su rendimiento es bajo, pero por ello se puede intentar subir.

El prototipo diseñado tiene un rendimiento del 20.75%, más alto que el máximo de un Savonius (línea azul de la gráfica) que es debido al uso de 4 palas en vez de 3 así como el movimiento de la pala a contracorriente que disminuye el efecto de frenado producido por el viento. Así mismo, es un producto ligero y no muy caro en comparación con la media de aerogeneradores para uso doméstico que hay en el mercado.

Sin embargo, después de realizar este proyecto se llega a una conclusión muy determinante. El uso de aerogeneradores, así como las placas solares, son un medio para obtención de electricidad muy fácil de usar, mantener, nada perjudicial para el medio ambiente pero excesivamente caro. Que el rendimiento máximo a obtener sea de un 59% es demasiado poco y se pierde mucha energía de la que ofrece el viento. Además, aunque no sea muy caro (unos mil o dos mil euros para una vida de 15 o 20 años es un precio razonable) es un precio excesivo si se compara con lo que uno se puede ahorrar al año en la factura de la luz. Por ello, la conclusión final es que de momento no es un producto viable para ahorrar.

## CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA

- <http://www.monografias.com/trabajos94/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2.shtml>
  - <http://www.monografias.com/trabajos94/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill2/estudio-diseno-aerodinamico-aerogeneradores-verticales-tipo-giromill22.shtml>
  - <http://patentados.com/invento/aerogenerador-de-eje-vertical.html>
  - <http://www.motiva.fi/>
  - <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2012/01/como-instalar-en-casa-una-miniturbina-eolica.html>
  - <http://renovablesdelsur.es/detalle/kits-solares-y-eolicos/kits-de-conexion-a-red/aerogenerador-3000w---torre-12-mts---inversor-conexion-a-red/405/406>
  - <http://es.scribd.com/doc/24930827/Aerogenerador-casero>
  - <http://deltavolt.pe/eolica>
  - <http://www.emagister.com/curso-energia-eolica/energia-historia-energia-eolica-anos-80>
  - [http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius)
  - [http://www.amics21.com/laveritat/generador\\_savonius.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/generador_savonius.pdf)
  - <http://www.eltiempo.es/zaragoza.html?v=historico>
  - <http://www.bornay.com/eolica/es/aerogeneradores/4/modelos/17/bee-800/5/specs>
  - <http://www.merkasol.com/Aerogenerador-de-eje-vertical-600w-eddy>
- Tesis doctoral: MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A MÁQUINAS SOMETIDAS A VELOCIDAD Y CARGA VARIABLES MEDIANTE ANÁLISIS DE ÓRDENES. Luisa Fernanda Villa Montoya (2011).
- Proyecto: DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL. Lorena Arbeloa Sola y Jesús Zurita Gabasa. (2012).
- PROYECTO DE UN PARQUE EÓLICO. Alberto Molinero Benítez (2009).

-Proyecto: CARGADOR DE BATERÍAS PARA AEROGENERADOR SAVONIUS HELICOIDAL. Vicente Pichardo Calbet (2010).

-Proyecto: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL. Juan Cristóbal Antezana Núñez (2004)

- GUÍA TÉCNICA DE APLICACIÓN PARA INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES: TECNOLOGÍAS EÓLICAS. La consejería de industria, comercio y nuevas tecnologías, viceconsejería de industria y nuevas tecnologías, dirección general de industria y energía del gobierno de Canarias.

- AEROGENERADORES DE POTENCIA INFERIOR A 100 kW. María José Cuesta Santianes, Marta Pérez Martínez y Juan Antonio Cabrera Jiménez (2008). Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

# 2. PLIEGO DE CONDICIONES

## 1-Pliego de condiciones administrativas.

Las instalaciones se efectuarán por empresas que ofrezcan suficiente garantía a juicio del Director Facultativo de la obra, a tal efecto, se considerará la lista de referencia de obras análogas, realizadas por las citadas empresas.

Los operarios pertenecientes a las empresas instaladoras deberán estar inscritos en la seguridad Social, siendo de absoluta responsabilidad de la empresa contratista cuantos accidentes puedan ocurrir a sus operarios. La empresa contratista dispondrá del correspondiente Estudio de Seguridad y Salud correspondiente a la obra adjudicada.

Los materiales utilizados en la instalación serán de garantía probada, y el instalador se verá obligado a presentar cuantos certificados de los fabricantes de los mismos, solicite la Dirección de Obra.

La empresa adjudicataria de las instalaciones deberá disponer de la correspondiente autorización expedida por la Delegación del Ministerio de Medio Ambiente, que le autorice para este cometido

Cuantas modificaciones se efectúen sobre lo expresado en el presente proyecto, o en plan de obra a sugerencia de los contratistas, podrá hacerse previa autorización por escrito de Director Técnico de las Obras.

Cualquier anomalía que en la realización de las obras se observara por la Dirección Facultativa se hará constar en Acta suscrita en el momento de la visita, o remitida posteriormente por correo certificado al contratista. Si transcurrido el plazo que en dicha Acta se fije para subsanar las deficiencias no se ha efectuado su corrección, la Dirección Facultativa propondrá la retirada del contratista correspondiente, quien se hará responsable de los perjuicios a que hubiere lugar.

El inicio del funcionamiento de lo presentado en el presente proyecto no podrá iniciar su funcionamiento hasta que se cumplan los siguientes requisitos:

- Se extienda el correspondiente certificado de finalización de instalación por la Dirección de Obras
- Se extienda el correspondiente Dictamen de Autorización de Puesta en Marcha por la Dirección Provincial de la Consejería de Industria y Energía.

Los plazos de ejecución de las obras y los importes de las mismas serán contratados por la propiedad y las empresas instaladoras adjudicatarias mediante los correspondientes contratos donde se indicarán las penalizaciones y demás condiciones que de común acuerdo se establezcan.

## 2- Pliego de condiciones técnicas

Antes de su empleo en obra, todos los materiales serán reconocidos por la Dirección Facultativa o personas en que delegue pudiéndose exigir las pruebas y ensayos que se consideren necesarios. Los gastos ocasionados con tal motivo serán cuenta del contratista. El contratista estará obligado a retirar inmediatamente de la obra los materiales que sean rechazados por la Dirección como consecuencia del reconocimiento.

Antes de comenzar las obras se efectuará el replanteo por el contratista bajo las órdenes del Técnico Director de las Obras. El contratista deberá aportar el material y personal necesario para la ejecución de la operación citada.

No podrá el contratista hacer por si alteración alguna en las partes del Proyecto sin autorización escrita del Técnico Director y tendrá la obligación de deshacer toda clase de cambios que no se ajusten a lo establecido en este proyecto.

Se realizarán pruebas días antes de la puesta en servicio para comprobar que tanto funcionamiento como instalación eléctrica funciona perfectamente. Cualquier anomalía que pudiera presentarse durante estas pruebas deberá ser corregida en el plazo más breve posible, siendo a cargo del contratista los gastos que de ello pudiera derivarse.

Cada año se hará un mantenimiento de seguridad del presente proyecto por el instalador autorizado o Técnico competente según corresponda. Se comprobará el funcionamiento de los rodamientos, las uniones, la multiplicadora y toda la parte eléctrica. Así mismo se limpiará y se comprobará que las palas están en perfecto estado, cambiándola por otra nueva con las mismas condiciones en el caso de fallo incorregible.

### Mantenimiento

El objetivo de este apartado del proyecto es determinar métodos de mantenimiento del equipo para lograr un correcto funcionamiento del mismo. Hay que señalar que no se sabe exactamente donde se va a situar el aerogenerador, se ha intentado que tanto la fabricación como el montaje del equipo sean lo más sencillos posibles para así evitar reparaciones de mucha dificultad. Por ello, gracias a la sencillez del aerogenerador no se va a llevar a cabo un mantenimiento predictivo, pues la reparación de las piezas en caso de fallo es muy rápida, y por tanto solamente se tendrán en cuenta el mantenimiento preventivo y el correctivo.

- Mantenimiento preventivo:

Mantenimiento de las partes más sencillas del aerogenerador como son los rodamientos y la lubricación de los mismos y todas las uniones que hay para evitar que algo

grave pueda pasar; así como un mantenimiento de toda la instalación eléctrica que, aunque no se aborde en este proyecto, tiene que estar presente para generar electricidad.

- Mantenimiento correctivo:

Este es el mantenimiento que se lleva a cabo una vez que ya se ha producido el fallo en el sistema. Por ello, es recomendable realizar un buen mantenimiento preventivo para no tener que llegar a la realización de este mantenimiento. Aun llevando a cabo un mantenimiento preventivo correcto, al estar funcionando el aerogenerador en condiciones externas difíciles de controlar, se producirán comúnmente fallos de este tipo. En estos casos se realizará lo siguiente:

- Mantenimiento pequeño correctivo: se da cuando se producen pequeñas averías que provocan el cambio de pequeños componentes del sistema.

- Mantenimiento grande correctivo: se da cuando las averías ya son mayores y necesitan el cambio de algún componente importante del sistema como las palas, el generador eléctrico, el eje,...

### Seguridad

Se trata de un factor imprescindible para que el equipo no esté expuesto a factores externos que puedan afectar a su funcionamiento llegando incluso a destruirlo.

Un aspecto importante es la atracción de rayos en tormentas eléctricas. Debido a la ubicación de estos equipos hay bastantes posibilidades de que el equipo atraiga a rayos. Por ello, se debe instalar y dimensionar de forma adecuada un sistema de puesta a tierra así como un buen pararrayos.

Los pararrayos suelen estar formados por un mástil metálico, bien de acero inoxidable, de aluminio o de cobre, y consta de un cabezal que se encuentra unido a tierra mediante un cable conductor que suele ser de cobre. La puesta a tierra se realiza mediante picas hincadas en el terreno o mediante placas conductoras también enterradas. El pararrayos en principio protege una zona teórica en forma cónica con vértice en el cabezal. Por ello, esta zona dependerá de la forma de este cabezal. Mediante un elemento así, se consigue reducir los daños que un rayo puede llegar a provocar sobre los elementos del equipo instalado.

# 3-NORMATIVA

La instalación de un aerogenerador en una casa se tiene que hacer siguiendo una serie de normas creadas por los gobiernos de estado y de cada comunidad. Como el diseño del prototipo se realiza para colocarlo en Zaragoza, algunas leyes son las propias de la Comunidad Autónoma de Aragón e, incluso, de la propia provincia de Zaragoza, que serán distintas a las leyes de, por ejemplo, Cádiz.

La primera norma a seguir es la de diseño de aerogeneradores de baja potencia. La **UNE-EN61400-2** de Octubre del 2007 que atañe tanto para la parte eléctrica como la mecánica, sistemas de seguridad, mantenimiento y condiciones a las que debe someterse cualquier aerogenerador. Pero no sólo esta es la válida, esta norma debe utilizarse conjuntamente con las normas siguientes:

- RD 661/2007
- IEC 60034-1 *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento*
- IEC 60034-2 *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2: Métodos para la determinación de las pérdidas y del rendimiento de las maquinas rotativas a partir de los ensayos. (Excepción las máquinas para vehículos de tracción).*
- IEC 60034-5 *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 5: Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (Código IP). Clasificación.*
- IEC 60034-8 *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 8: Marcas de los bornes y sentido de giro.*
- IEC 60038:1983 *Tensiones normalizadas IEC.*  
Modificación 1 (1994)  
Modificación 2 (1997)
- IEC 60204-1 *Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales.*
- IEC 60364-5-54 *Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 5-54: Selección y montaje de equipos eléctricos. Disposiciones de puesta a tierra, conductores de protección y conductores de conexión de protección.*
- IEC 60721-2-1 *Clasificación de las condiciones ambientales. Parte 2-1: Condiciones ambientales presentes en la naturaleza. Temperatura y humedad.*
- IEC 61400-1 *Aerogeneradores. Parte 1: Requisitos de diseño.*
- IEC 61400-12-1 *Aerogeneradores. Parte 12-1: Ensayo de curva de potencia.*
- IEC 61400-13 *Aerogeneradores. Parte 13: Medida de cargas mecánicas.*

- IEC 61400-23 *Aerogeneradores. Parte 23: Ensayo estructural de las palas del rotor a escala real.*
- IEC 61643-1 *Dispositivos de protección contra sobretensiones baja tensión. Requisitos de funcionamiento y métodos de ensayo.*
- ISO/IEC 17025:2005 *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.*
- ISO 2394 *Principios generales sobre la fiabilidad de las estructuras.*

Para el tema de seguridad del aerogenerador así como las características de sus especificaciones técnicas y condiciones de viento viene dada por la norma IEC 61400-1 *Modelado del viento en condiciones normales.*

Una vez diseñado el aerogenerador hay que respetar las leyes medioambientales, ruidos, ...

La primera que hay que tener en cuenta es la ley de autoconsumo. Publicado en el BOE, el Real Decreto 1699/2011 del 18 de noviembre regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. Este decreto establece las condiciones administrativas, contractuales, económicas y técnicas básicas para la conexión a las redes de distribución de energía eléctrica de las instalaciones de producción de energía eléctrica.

El siguiente punto a mirar es el efecto medioambiental. Al igual que los aparatos de aire acondicionado, los aerogeneradores se instalan en el exterior produciendo un cambio en la fachada del edificio así como molestias visuales o para los animales (pájaros) que puedan pasar cerca y que suponga un peligro para ellos. Al no estar muy desarrollada la energía eólica en el ámbito doméstico no hay una ley, ordenanza, decreto,..., que sirva para el problema medioambiental de un aerogenerador. Sin embargo, hay una serie de ordenanzas municipales que se utilizan para la instalación de un aerogenerador en un edificio:

- Ordenanza reguladora de licencias urbanísticas de obras menores y elementos auxiliares
- Ordenanza municipal de instalaciones de telecomunicación por transmisión-recepción de ondas radioeléctricas en el término municipal de Zaragoza
- Ordenanza de la ciudad de Zaragoza sobre protección del espacio urbano.

Por último, está el problema del ruido. Los aerogeneradores no producen un alto nivel de decibelios pero sí un ruido constante que puede llegar a molestar. En el caso del prototipo que se presenta en este proyecto no se ha podido cuantificar el nivel de decibelios debido a la

inaccesibilidad para construirlo y probarlo en un túnel de viento, pero eso no quiere decir que no lo haya. Para ello está la ordenanza para protección de ruidos y vibraciones del término municipal de Zaragoza en la que se detalla en nivel de decibelios máximos permitidos.

# 4. PRESUPUESTO

<b>Partes comerciales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Importe</b>
Soporte (acero)	1,00x80kg	1,88	150,40
Rodamiento 6317.2ZR	1,00	218,00	218,00
Rodamiento 53317	1,00	234,00	234,00
Eje central (acero)	1,00x60kg	1,88	112,80
Cilindro unión (acero)	4,00x1kg	1,88	7,52
Pala (aluminio)	4,00x27kg	1,00	108,00
Tornillo sujeción	4,00	20,00	80,00
<b>Total piezas:</b>			<b>910,72</b>

<b>Partes específicas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Importe</b>
Soporte	1,00	20,00	20,00
Eje central	1,00	35,00	35,00
Tornillo sujeción	4,00	50,00	200,00
Fresa soporte	1,00	45,00	45,00
Fresa eje central	1,00	20,00	20,00
Fresa pala	1,00	30,00	30,00
Mano de obra mecánico	1,00x8h	15,00	120,00
Mano de obra electricista	1,00x8h	15,00	120,00
Equilibrado	1,00	70,00	70,00
<b>Total mecanizado:</b>			<b>660,00</b>

Seguridad e higiene	Cantidad	Precio	Importe
Casco de seguridad	2,00	2,52	5,04
Gafas antipolvo	2,00	2,00	4,00
Protector auditivo	2,00	16,40	32,80
Par guantes de lona	2,00	3,05	6,10
Par botas seguridad	2,00	11,55	23,10
Mono de trabajo	2,00	18,40	36,80
Señalización	10,00	6,00	60,00
<b>Total seguridad e higiene</b>			<b>167,84</b>

	Importe en €
<b>Total piezas</b>	910,72
<b>Total mecanizado</b>	660,00
<b>Total seguridad e higiene</b>	167,84
<b>IMPORTE TOTAL</b>	<b>1738,56</b>

Asciende el presente presupuesto a la figurada cantidad de: MIL SETECIENTOS TREINTA Y OCHO CON CINCUENTA Y SEIS EUROS

# 5- PLANOS







4-Plano aleta

