

Trabajo de Fin de Grado

Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño de un aerogenerador doméstico

MEMORIA

Autor: Miguel-Scott Francisco Urcelay
Director: Víctor Albert Barbera
Convocatoria: 06 2019



Escuela Técnica Superior
De Ingeniería Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto trata sobre el diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 0,8 kW de potencia nominal destinado al uso doméstico, en el que se fija como objetivo principal que produzca más de la mitad de la energía consumida por una vivienda en la localidad de Portbou.

Actualmente en el mercado existen muchos tipos de soluciones para un gran número de aplicaciones. El proyecto se plantea para encontrar un diseño sencillo y eficaz del tren de potencia de un aerogenerador de eje horizontal, con el fin de reducir el mantenimiento y los costes asociados al mismo. Además, se ha verificado la rentabilidad económica del proyecto y el impacto ambiental que conllevaría la instalación de un aerogenerador de características similares.

Primero, se ha realizado el estudio energético de una vivienda para conocer cuánta energía deberá producir el aerogenerador a diseñar. Este estudio determinará las dimensiones que tendrán el rotor y las palas. Tras el análisis, se ha escogido un diámetro de rotor de 2 m y se ha hecho un estudio de qué configuraciones debe adoptar el sistema de transmisión para ser lo más óptimo posible en base a los objetivos marcados.

Finalmente, los resultados obtenidos en el estudio energético muestran que el aerogenerador produce un 58 % de la energía consumida bajo las condiciones explicadas con un pay-back de 3,2 años. El presupuesto total del aerogenerador es de 1562,08 € con una estimación de ahorro anual de 525,60 €. Se estima que se reducen las emisiones de CO₂ equivalente en 1224 kg, generando un impacto ambiental favorable.

Sumario

SUMARIO	4
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivos del proyecto	7
1.2. Alcance del proyecto	7
2. ANTECEDENTES	8
3. ESTUDIO DE MERCADO	9
4. NORMATIVA APLICABLE	12
5. ESTUDIO EÓLICO Y ENERGÉTICO	14
5.1. Lugar de emplazamiento	14
5.2. Distribución del viento.....	15
5.3. Estudio energético vivienda.....	15
6. DISEÑO DE AEROGENERADOR	17
6.1. Análisis funcional	17
6.2. Análisis de alternativas	19
6.2.1. Tipo de torre	19
6.2.2. Sistema de orientación	20
6.2.3. Sistema de regulación	21
6.2.4. Tipo de alternador.....	22
6.3. Descripción del diseño.....	25
6.3.1. Palas.....	25
6.3.2. Eje principal y acople con generador.....	26
6.3.3. Rodamientos eje principal	27
6.3.4. Freno mecánico	28
6.3.5. Generador	29
6.3.6. Regulador de potencia.....	31
6.3.7. Sistema de orientación	31
6.3.8. Torre	32
7. IMPACTO AMBIENTAL	34
8. VIABILIDAD TÉCNICA Y SOCIAL	35
9. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	36

CONCLUSIONES	37
AGRADECIMIENTOS	39
BIBLIOGRAFÍA	40
Referencias bibliográficas	40
Bibliografía complementaria	40

1. Introducción

1.1. Objetivos del proyecto

Con este proyecto se trata de diseñar un aerogenerador doméstico de eje horizontal con el fin de reducir considerablemente la factura eléctrica de una vivienda. Por ello, se fijará como primer objetivo que el aerogenerador proporcione, como mínimo, un 51% de la energía diaria consumida por una vivienda en la localidad de Portbou, es decir, más de la mitad del consumo diario.

Como segundo objetivo, se busca que el usuario final de la máquina realice las mínimas tareas de mantenimiento posibles. Se considerará mantenimiento tanto las acciones correctivas como las preventivas.

Finalmente, entre todas las distintas configuraciones que puede adaptar el tren de potencia de un aerogenerador, se trata de hallar la configuración más sencilla, con el fin de disminuir el mantenimiento y reducir el riesgo de avería. Además, se cree que siguiendo este criterio se puede facilitar el proceso de fabricación, montaje y cualquier tipo de mantenimiento que pueda requerir el aerogenerador.

1.2. Alcance del proyecto

En este capítulo se trata de definir el alcance del proyecto, es decir, hasta dónde engloba la fase de diseño. Al tratarse de un trabajo académico, sólo se puede realizar un diseño parcial del aerogenerador ya sea por tiempo o por falta de conocimientos.

Entre los diversos sistemas del que se compone el aerogenerador, se trabajará en el diseño del tren de potencia. Pese a que el diseño se centra en definir el sistema de transmisión, también se definirán, de manera aproximada, otros elementos del aerogenerador, como por ejemplo las dimensiones del rotor, la altura de la torre o las dimensiones de las palas. Hay algunos aspectos del proyecto que quedan fuera del alcance mencionado, como realizar los planos o los esquemas eléctricos de la instalación.

2. Antecedentes

En este capítulo se trata de realizar un breve repaso histórico de la evolución que ha tenido y la importancia que ha ido teniendo la minieólica en las últimas décadas.

Los primeros aerogeneradores de baja potencia se empiezan a usar hacia los años 30 para la carga de baterías. Su uso era muy habitual en granjas y en zonas aisladas de la civilización. Después de casi desaparecer con la aparición de la electrificación rural, su mayor desarrollo se produce durante la crisis del petróleo, en los años 70. A nivel europeo aparecen múltiples fabricantes como Aerowatt, WES o Gazelle [1] .

Hoy en día, la minieólica es una solución al autoconsumo eléctrico. Las grandes ventajas que presenta la minieólica es la capacidad de generar energía próxima al punto consumo, reduciendo pérdidas de transporte y abriendo la posibilidad de subministrar electricidad en zonas aisladas. Al tener un bajo coste de mantenimiento y una fiabilidad elevada, además de un impacto ambiental favorable, es un sector que cada vez se está desarrollando más. Tanto es así, que se puede encontrar en muchos entornos totalmente distintos, desde una instalación agrícola hasta en el sector industrial.



Ilustración 1: Primera instalación eólica que supera 1 MW en 1941 (Fuente: energy.kth.se)

3. Estudio de mercado

La potencia eólica instalada en España aumentó el pasado 2018 en 392 MW, según datos de la Asociación Empresarial Eólica (AEE). En total, son 23.484 MW los que sitúan a España como el segundo país europeo con mayor potencia instalada [2].



Ilustración 2: Evolución anual y acumulada de la potencia instalada en España

Según un estudio [3] realizado en 2015 por Global Small Wind Power, se espera que el mercado de la minieólica registre un CAGR¹ del 13,2% hasta el 2022. Este aumento se cree que es debido al aumento de la demanda energética y de las preocupaciones sobre los impactos ambientales sobre los actuales métodos de obtención de energía.

El mercado de la minieólica se divide según el tipo, el tipo de instalación, aplicación y geografía. Según el tipo encontramos aerogeneradores de eje horizontal o vertical. Los aerogeneradores se pueden instalar en la red o desconectados de la red. Des del punto de vista de aplicaciones, el mercado se segmenta en domésticas, comerciales o industrias de

¹ Tasa de crecimiento anual compuesto

pequeña escala.

En este estudio se trata de averiguar qué soluciones han optado por escoger las grandes marcas de los aerogeneradores para resolver un problema similar al que se plantea en este proyecto.

Para empezar, uno de los fabricantes más clásicos es Bornay. Tiene una amplia gama de generadores como el Bornay Wind 13+. Se trata de un aerogenerador horizontal bipala de casi 3 m de diámetro, con un sistema de control por regulador electrónico y otro pasivo por inclinación que se orienta a través de una veleta en la cola. El alternador consiste en un generador trifásico de imanes permanentes y una potencia nominal de 1,5 kW. Entre sus diversas aplicaciones, destaca la electrificación rural y la conexión a red. En cuanto a la velocidad de viento, presenta un rango de funcionamiento entre 2 y 30 m/s, siendo los 12 m/s su velocidad nominal.



Ilustración 3: Aerogenerador Bornay 13+

Asimismo, se hallan en el mercado otro tipo de aerogeneradores de baja potencia, como es el caso del Aerogenerador GE-10. Mantiene varias similitudes con el modelo de Bornay, como por ejemplo el tipo de generador, el sistema de orientación o sus aplicaciones. Sin embargo, el rotor de este aerogenerador se constituye por tres palas de 2,8 m de diámetro. Tiene una potencia nominal de 1 kW, que se produce a una velocidad de 9 m/s.



Ilustración 4: Aerogenerador Layer GE-10

Estos dos aerogeneradores destacan, entre otras cosas, su baja necesidad de mantenimiento y su alta fiabilidad frente las averías. Dependiendo de la aplicación de cada aerogenerador, será necesario adaptarlo a la instalación eléctrica.

4. Normativa aplicable

Los aerogeneradores están sujetos al marcaje CE, en aplicación del Real Decreto 1644/2008, de 10/10/2008. En concreto, hace referencia a requerimientos de seguridad, por lo que no entra en requerimientos técnicos de diseño. De hecho, estos requerimientos técnicos no se encuentran en la legislación, sino en las normas técnicas. Las normas técnicas, tal y como indica su nombre, tienen carácter voluntario siempre que no se referencie en un texto legal como norma de obligado cumplimiento. De hecho, para el diseño de este proyecto no existe ninguna norma técnica de obligado cumplimiento².

Sin embargo, se decide aplicar la norma UNE-EN 61400-2:2015 (18/03/2015). *Parte 2: aerogeneradores pequeños*. Para la aplicación de este documento son indispensables los documentos citados a continuación [4]:

- IEC 60038:2009, Tensiones normalizadas de IEC.
- IEC 60204-1:2005, Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales.
- IEC 60364-5-54, Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 5-54: Selección e instalación de los equipos eléctricos. Puesta a tierra y conductores de protección.
- IEC 60721-2-1, Clasificación de las condiciones ambientales. Parte 2-1: Condiciones ambientales presentes en la naturaleza. Temperatura y humedad.
- IEC 61400-11, Aerogeneradores. Parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico.
- IEC 61400-12-1:2005, Aerogeneradores. Parte 12-1: Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad.
- IEC/TS 61400-13, Aerogeneradores. Parte 13: Medida de cargas mecánicas.
- IEC 61400-14:2005, Aerogeneradores. Parte 14: Declaración del nivel de potencia sonora aparente y valores de tonalidad.
- IEC/TS 61400-23:2001, Aerogeneradores. Parte 23: Ensayos estructurales de palas a escala real.
- IEC 61643-11:2011, Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias

² Información contrastada con EIC (Enginyers Industrials de Catalunya)

de baja tensión. Parte 11: Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias conectados a sistemas eléctricos de baja tensión. Requisitos y métodos de ensayo.

- ISO/IEC 17025, Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
- ISO 2394:1998, Principios generales de fiabilidad de las estructuras.

5. Estudio eólico y energético

5.1. Lugar de emplazamiento

El lugar de emplazamiento y con el que se harán los cálculos es Portbou. Según los datos del pueblo del Alt Empordà³ es el que tiene el registro más elevado en Cataluña en cuanto a velocidad media anual, de 6,9 m/s. Estos datos provienen de la estación meteorológica de Portbou que se localiza en el mapa a continuación (círculo rojo):

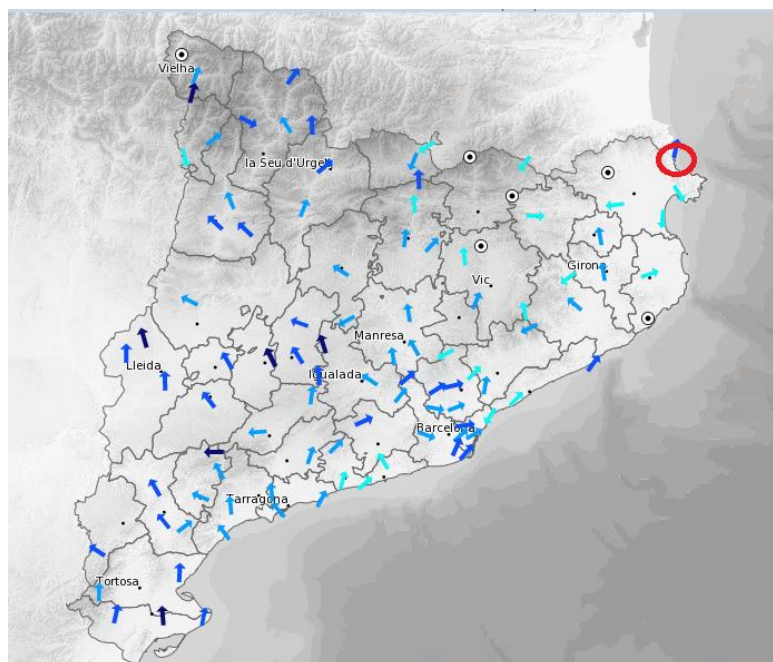


Ilustración 5: Localización estación meteorológica de Portbou (fuente: MeteoCat)

El criterio fundamental para la instalación de un aerogenerador es que la velocidad media anual sea aceptable debido a que, si la velocidad fuera muy baja, no se podría generar energía de manera eficiente. En la siguiente tabla, se muestra la velocidad media anual para la localidad de Portbou en los últimos 5 años. Para el cálculo de la velocidad media se tienen en cuenta todos los meses del año.

³ Datos de MeteoCat

Año	Velocidad media anual [m/s]
2014	6,6
2015	7
2016	7
2017	7,2
2018	6,9

Tabla 1: Evolución velocidad media anual Portbou

5.2. Distribución del viento

Para el cálculo de la distribución del viento diaria, se ha usado la distribución de Rayleigh:

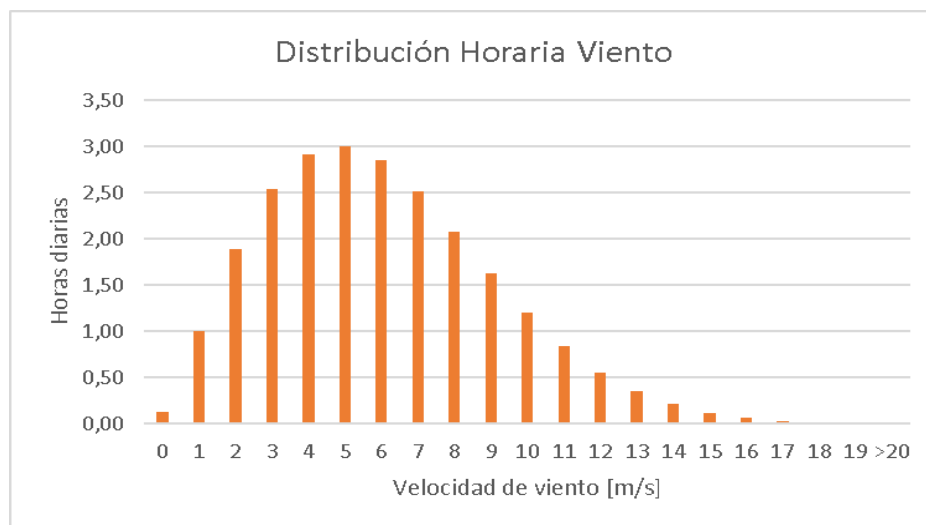


Ilustración 6: Distribución diaria de velocidades del viento

5.3. Estudio energético vivienda

En este subcapítulo se realiza un breve estudio de la demanda energética de una vivienda con el objetivo de conocer qué energía debe producir el aerogenerador para satisfacer los objetivos propuestos en este proyecto. Este apartado tiene una gran importancia porque a partir de este estudio se determinará la energía a producir y las dimensiones del aerogenerador.

	Potencia [kW]	Horas de consumo / día	Energía [kWh]
Frigorífico A+++	0,15	24	3,6
Lavadora	1,50	0,3	0,45
Lavavajillas	1,50	0,3	0,45
Horno	1,50	0,2	0,3
Aire acondicionado	1,00	1,5	1,5
TV	0,15	2	0,3
Calefacción	1,50	2	3,0
Vitrocerámica	1,00	0,5	0,5
Microondas	0,30	0,1	0,03
Iluminación	0,70	3	2,1
Pequeños electrodomésticos	0,75	2	1,5
Total	10,0		13,7
FS	0,40		
Total real	4,0		

Tabla 2: Estudio energético vivienda

Para empezar, se hace un listado de los aparatos que consumen energía en una vivienda junto con su potencia. En segundo lugar, se estiman las horas diarias que el dispositivo está en funcionamiento. En tercer lugar, se multiplica la potencia y horas diarias de uso para cada dispositivo. Finalmente se realiza el sumatorio total para aproximar la energía consumida en un día por la vivienda. Para el cálculo de la potencia total instalada se realiza un sumatorio de todas las potencias de los dispositivos y se multiplica por un factor de simultaneidad de 0,4.

En conclusión, la potencia total instalada teniendo en cuenta el factor de simultaneidad es de 4 kW y la energía total consumida en un día es de 13,7 kWh.

6. Diseño de aerogenerador

6.1. Análisis funcional

En las ilustraciones que se muestran a continuación se realiza un árbol de funciones del aerogenerador como herramienta de diseño. En el apéndice se muestra un listado de estas funciones.

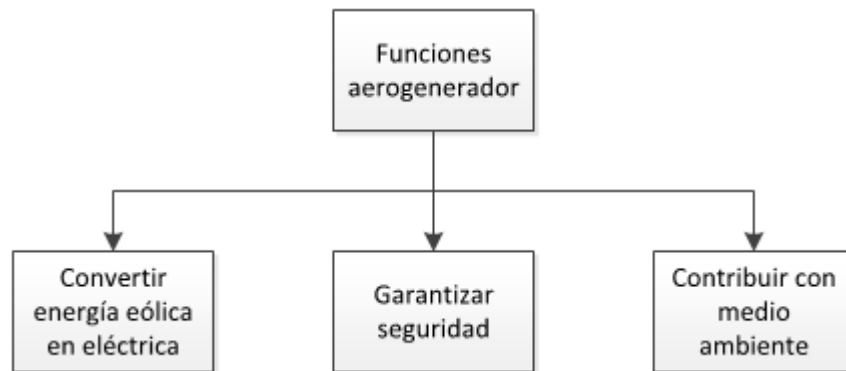


Ilustración 7: Análisis de funciones



Ilustración 8: Análisis de funciones 2

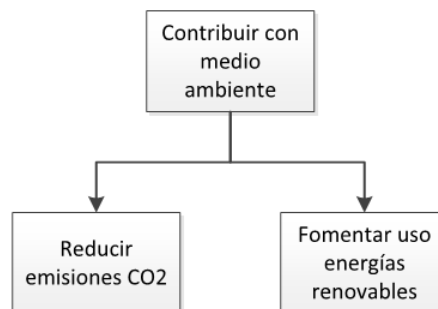


Ilustración 9: Análisis de funciones 3

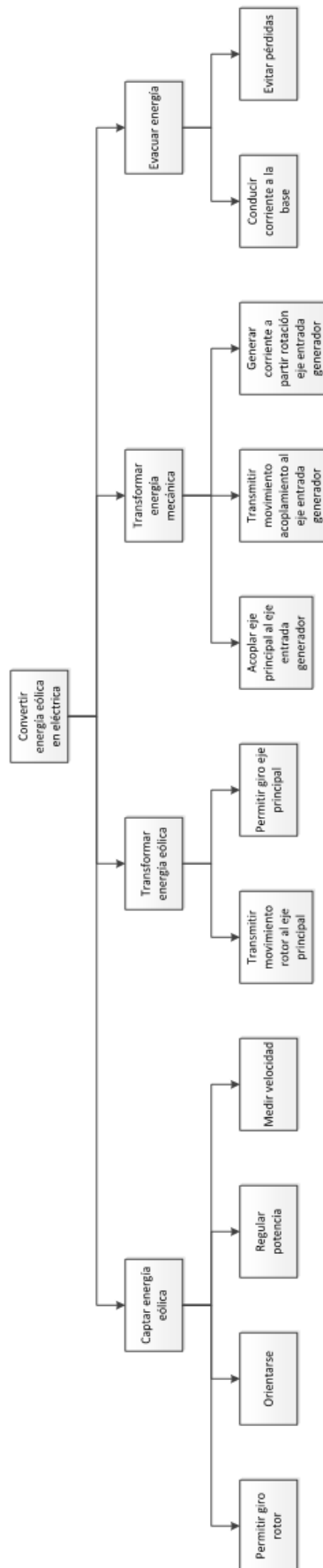


Ilustración 10: Análisis de funciones 4

6.2. Análisis de alternativas

6.2.1. Tipo de torre

El objetivo en este análisis de alternativas es averiguar qué tipo de torre se adapta mejor al proyecto. Teniendo en cuenta la mayoría de soluciones que se adoptan para la eólica, se analizarán la torre de celosía, tubular y de mástil tensado como posibles candidatos. Las siguientes ilustraciones muestran cada una de las alternativas:

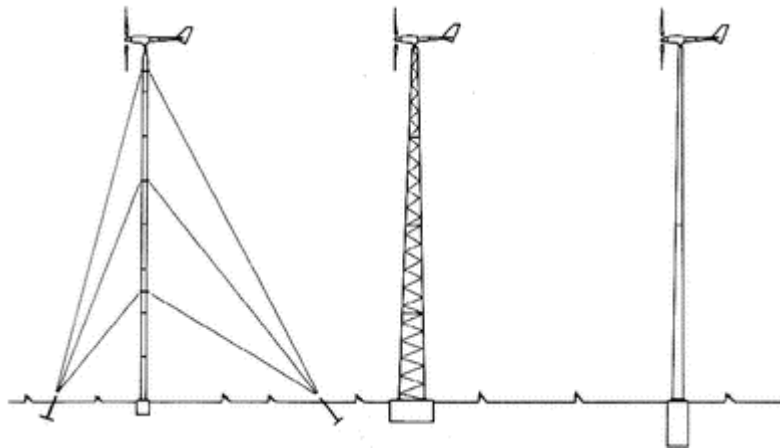


Ilustración 11: : Torre de mástil tensado, de celosía y tubular (izquierda a derecha)

Para empezar, la primera alternativa son las torres de celosía. Se construyen mediante perfiles de acero soldados. Se suelen usar principalmente en la minieólica, debido a su bajo coste. Requieren una cantidad de material mucho menor que la torre tubular sin sustentación adicional manteniendo la misma rigidez. Uno de los puntos desfavorables de este tipo de torre es que deben ser revisadas periódicamente para verificar la correcta sujeción entre los segmentos de acero.

Como segunda alternativa se encuentran las torres de mástil tensado sostenidas por cables tensores. Suele ser otra solución muy común para los aerogeneradores de baja potencia. Al igual que las torres de celosía, su principal ventaja es el ahorro de peso y coste. Como desventajas, este tipo de torres son más inseguras que las de celosía y requieren de más espacio para su instalación.

La tercera alternativa son las torres tubulares. Esta opción se descarta debido a que se usan en los aerogeneradores de potencias elevadas y a su elevado coste.

Finalmente, se decide escoger la torre de mástil tensado como alternativa final debido a su coste y su mayor viabilidad teniendo en cuenta las condiciones y objetivos del proyecto.

6.2.2. Sistema de orientación

El sistema de orientación tiene la función de orientar la góndola y el rotor en dirección perpendicular a la del viento, con el objetivo de aprovechar la máxima energía posible. Esta orientación se puede llevar a cabo de dos maneras, con un sistema pasivo o con un sistema activo de orientación. En este análisis de alternativas se analizará un mecanismo de orientación mediante timón de cola (pasivo) y otro mediante servomotores (activo).

El sistema de timón de cola es un mecanismo pasivo de orientación que se usa principalmente para aerogeneradores de tamaño pequeño. Está constituido por una superficie plana que se sitúa en la cola del aerogenerador. Cuando se produce un error de orientación, es decir, que el rotor no está perpendicular al viento, el viento ejerce una fuerza tal sobre la superficie provocando un giro hacia la dirección del viento. Una de las ventajas es que se orienta de manera automática sin necesidad de implementar ningún sistema electrónico de control.



Ilustración 12: Orientación mediante timón de cola

Como segunda alternativa se analiza la orientación mediante un sistema activo. Este mecanismo de orientación se consigue mediante servomotores controlados electrónicamente. Este sistema suele ser común para aerogeneradores de un tamaño y potencia elevados. El servomotor recibe información de la dirección del viento mediante una veleta. Cuando se produce el error de orientación, el servomotor actúa sobre la góndola para corregir la posición. En la ilustración se pueden observar cuatro servomotores que se sitúan encima de la corona de giro. Esta alternativa se usa en la eólica de potencias elevadas debido a que se obtiene una mayor precisión en cuanto a la orientación del rotor respecto al timón de cola, aunque también tiene un coste mucho más elevado.

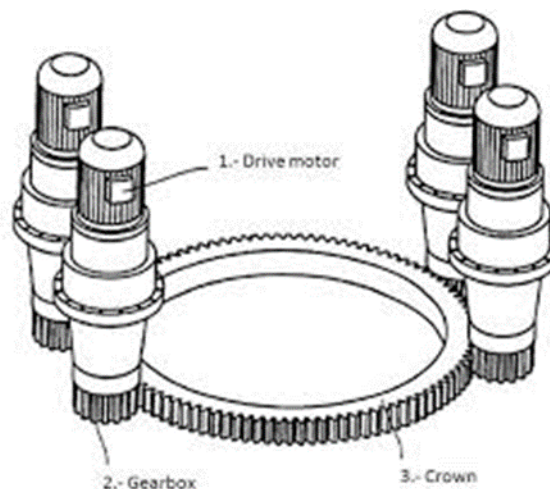


Ilustración 13: Servomotores actuando sobre corona de giro

Finalmente se decide escoger el sistema de orientación mediante timón de cola debido a su mayor viabilidad además de ser un sistema pasivo.

6.2.3. Sistema de regulación

Generalmente, para los aerogeneradores de una potencia baja los sistemas de regulación son útiles en el control del exceso de potencia, es decir, regula la potencia del aerogenerador para evitar velocidades de giro superiores a la nominal que puedan poner en peligro la turbina. Estos sistemas de control se pueden clasificar en activos o pasivos. La regulación pasiva trata de diseñar el sistema de una manera específica para no necesitar sistemas de control adicionales. La regulación activa interviene directamente sobre la propia turbina sin necesidad de crear un diseño específico. Se estudiarán dos posibles alternativas:

Regulación mediante sistema de cambio de paso de palas (activo)

Este sistema de regulación activo cambia el ángulo de incidencia de las palas regulando la energía que capta del viento. Cambiando el ángulo de paso se puede aprovechar el recurso eólico para velocidades de viento elevadas e incluso puede frenar el rotor si la situación así lo requiere. Este sistema se usa principalmente en las máquinas eólicas de potencia elevada.

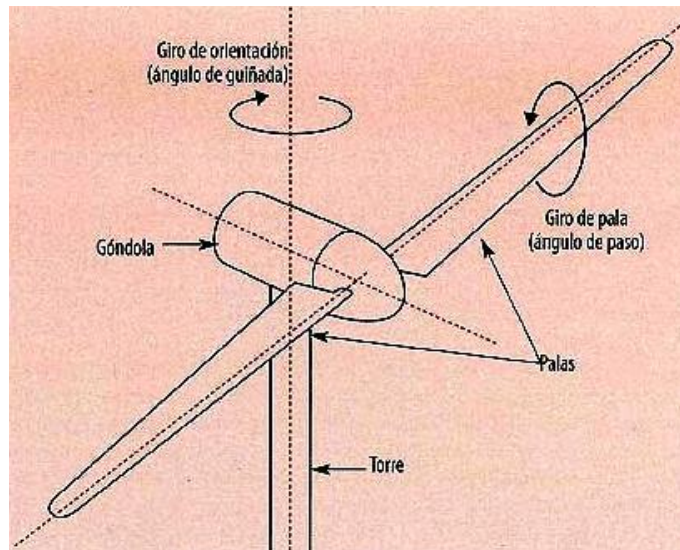


Ilustración 14: Sistema cambio de ángulo de paso de pala (Fuente: estrucplan)

Regulación mediante paleta auxiliar (pasivo)

Cuando la velocidad del viento aumenta, la fuerza de empuje del viento sobre la veleta secundaria provoca que el rotor gire, se pliegue y se desoriente, y con ello su velocidad de rotación disminuye. Si la velocidad del viento continúa incrementándose, el momento provocado por la veleta secundaria ubica al rotor paralelo al viento (posición bandera), por lo que se anula su velocidad de rotación, es decir, ocurre el frenado del rotor [5].

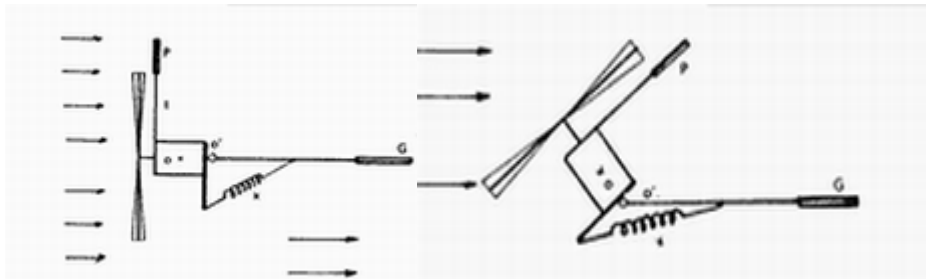


Ilustración 15: Sistema regulación mediante paleta auxiliar (Fuente: monografías.com)

En conclusión, se escoge el sistema pasivo de regulación siguiendo los objetivos marcados. Además, se escoge al ser un sistema expuesto a un menor número de averías.

6.2.4. Tipo de alternador

En los generadores se busca que tengan una duración muy elevada con un mantenimiento mínimo. Existe una gran variedad de generadores, por lo que se debe escoger adecuadamente según el diseño del aerogenerador. Entre ellos encontramos los dínamos y los alternadores. Los dínamos son un tipo de generador que producen corriente continua, a

no tienen, es decir, necesita de menos mantenimiento. Además, permite la posibilidad de prescindir de una caja multiplicadora entre el eje principal y el eje de entrada del generador. Prescindir de una caja multiplicadora aporta unas ventajas muy parecidas al caso anterior: reduce considerablemente el mantenimiento.

Una de las principales ventajas del generador de inducción doblemente alimentado respecto el anterior es que necesita un convertidor de electrónica de potencia es de un 25% de la nominal. Esto hace que el coste se reduzca considerablemente siendo una alternativa más llamativa. Como desventaja respecto a los de imanes permanentes, es que las labores de mantenimiento aumentan en el caso de escoger el generador de inducción doblemente alimentado.

Para acabar con la comparativa, en el caso de conectar el aerogenerador de forma directa a red el generador doblemente alimentado es mucho más sensible a las anomalías que puede sufrir la red. En el caso de imanes permanentes, no se ven influenciados [6].

Finalmente se opta por escoger el alternador de imanes permanentes debido a que sus ventajas tienen un mayor peso respecto al generador de inducción doblemente alimentado, siguiendo los objetivos marcados al inicio del proyecto.

6.3. Descripción del diseño

6.3.1. Palas

Las palas es uno de los elementos más importantes del aerogenerador. Son las responsables de captar la energía eólica el viento y transformarla en energía mecánica.

Tal y como se explica en el capítulo 1.2, el diseño de las palas no entra dentro del alcance de este proyecto. Sin embargo, se ha escogido un perfil para las mismas y se han calculado las dimensiones aproximadas que deberían tener estas palas.

Para empezar, el radio de las palas se aproxima a la mitad del diámetro del rotor. Este diámetro viene dado por la energía que deben captar las palas y la velocidad de diseño del aerogenerador. Como que la velocidad no es constante, habrá que calcular la energía que captan las palas siguiendo la distribución horaria calculada en el capítulo 5. Por una parte, tenemos la potencia y por otra la cantidad de horas que el aerogenerador funcionará a esa velocidad. Se calcula la potencia para cada velocidad y la energía que puede producir el aerogenerador para cada diámetro. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados finales:

Diámetro Rotor [m]	Energía producida [kWh/día]	Energía consumida [kWh/día]	% Respecto consumida
2	8,0	13,7	59%

Tabla 3: Energía producida vs consumida

Tal y como se ha fijado en los objetivos del proyecto, el aerogenerador produce más del 51% de la energía consumida por la vivienda. Una vez escogido el diámetro del rotor se fija el radio de las palas en 1 m, siguiendo la aproximación anunciada al inicio del capítulo.

En cuanto al estudio de las dimensiones de la pala, se ha escogido un perfil FX60-126. Los cálculos para estas se encuentran en el anexo. En la siguiente tabla se ven las dimensiones aproximadas que deberían tener las palas:

r [m]	L (cuerda) [cm]	alabeo [°]	ángulo incidencia [°]
0,0			6,8
0,3	13,4	11,2	
0,8	7,6	0,2	
1,0	5,7	-0,8	

Tabla 4: Dimensiones aproximadas del perfil de la pala

Además del dimensionamiento del perfil de la pala, se debe calcular la velocidad específica de diseño y el coeficiente de potencia. Como se verá más adelante, la velocidad específica final del diseño es de 6. El coeficiente de potencia se obtiene con el siguiente gráfico:

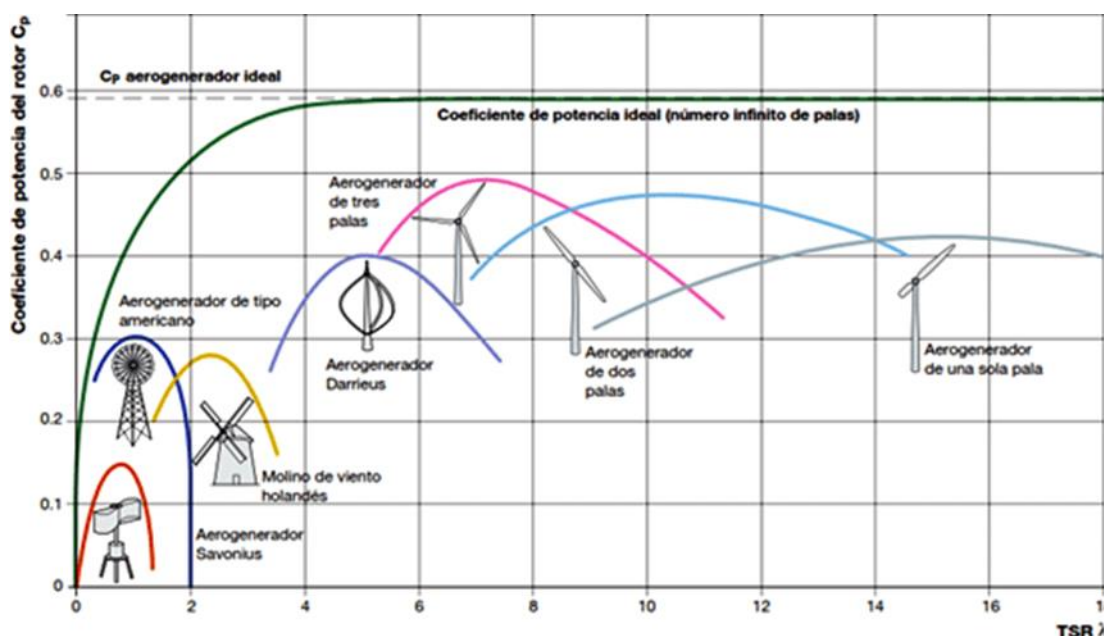


Ilustración 18: Gráfica coeficiente de potencia

Al tratarse de un aerogenerador de tripala y una velocidad específica de 6, el coeficiente de potencia tiene un valor de 0,45.

6.3.2. Eje principal y acople con generador

El eje principal también se suele denominar como eje de baja velocidad. En este caso, como se verá más adelante, el diseño de la transmisión no incluye una caja multiplicadora. Por tanto, su objetivo será el de transmitir la potencia del rotor hasta al generador. Se ha

escogido un eje de sección circular de 30 mm de diámetro y 300 mm de longitud.

El material seleccionado para la construcción del eje es el SAE 1045, uno de los materiales más utilizados para la construcción de ejes. Se trata de un acero de medio carbono, con buena maquinabilidad y un coste moderado.

Una vez dimensionado el eje se debe tener en cuenta cómo transmite el movimiento al eje de entrada del generador. Existen varias soluciones, aunque en este caso se cree más conveniente el uso de un acoplamiento. Este sistema de transmisión absorbe las vibraciones en la unión entre elementos además de asegurar la transmisión del movimiento. Se escoge un acople de banda entera, en concreto el Serie E: Acople "EUROFLEX" 30 NORMAL-NORMAL. En la siguiente ilustración se muestra el dibujo del acoplamiento:

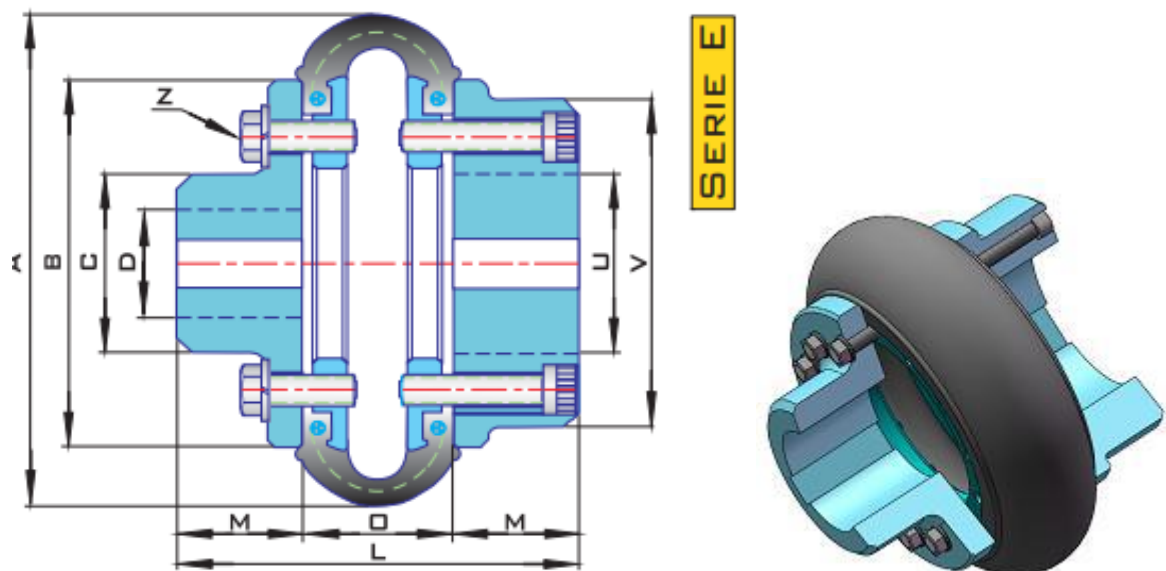


Ilustración 19: Acople "EUROFLEX" 30 NORMAL-NORMAL (Fuente: Tecnometal)

En el anexo se pueden encontrar las dimensiones del acople y la justificación de cálculos correspondiente

6.3.3. Rodamientos eje principal

Los rodamientos, al igual que el eje, cumplen una función imprescindible en cuanto al sistema de transmisión del aerogenerador. Se usan principalmente para transferir el movimiento y las fuerzas del eje. En este diseño se escogen dos rodamientos rígidos de bolas: 16006 y W 61706. Este tipo de rodamientos son muy versátiles y son aptos para velocidades elevadas. Además, son capaces de soportar cargas axiales y radiales en

ambos sentidos. Uno de las grandes ventajas del uso de este tipo de rodamientos es que requieren de un mantenimiento mínimo.

En la imagen mostrada a continuación se muestra un rodamiento rígido de bolas:

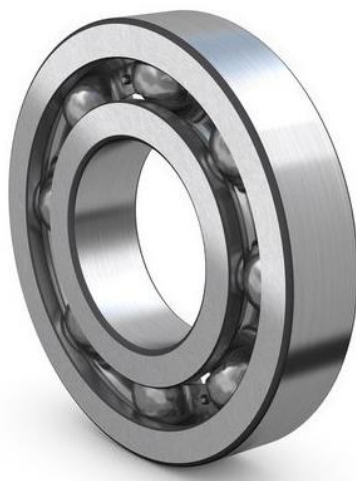


Ilustración 20: Rodamiento rígido de bolas (Fuente: SKF)

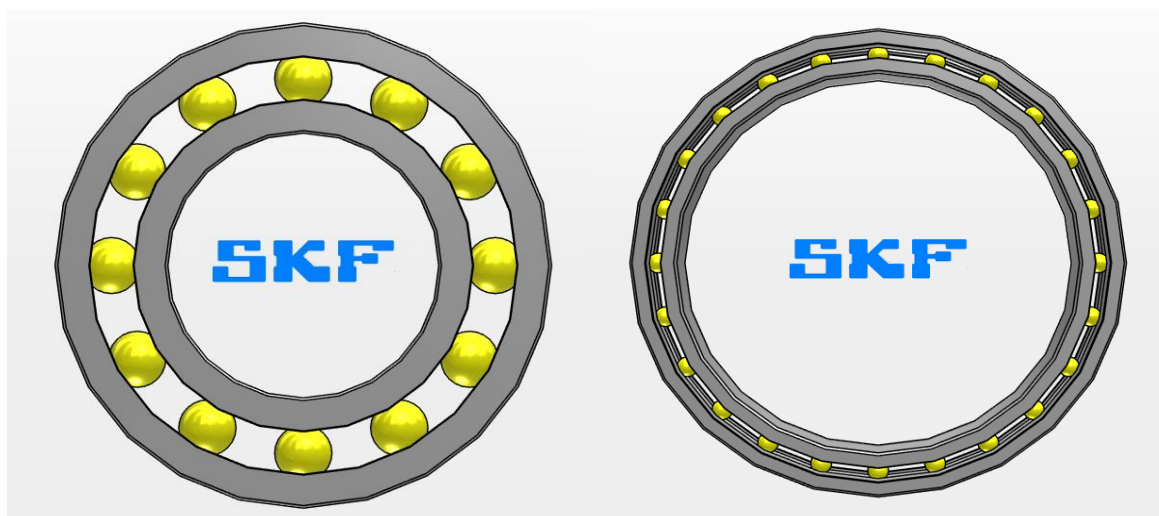


Ilustración 21: Imagen 3D de los rodamientos 16006 (izquierda) y W 61706 (derecha)

6.3.4. Freno mecánico

El freno forma parte del sistema de seguridad del aerogenerador, actúa cuando se alcanza la velocidad máxima permitida por el diseño, cuando la temperatura alcanza un valor crítico... Como se explica en el diseño funcional del aerogenerador, este debe garantizar su seguridad contemplando todos los casos posibles.

Haciendo referencia a nuestro diseño, se incluye un freno mecánico de disco que actuará

sobre el eje principal en casos de vientos fuertes. Es decir, cuando se transmite la potencia a una velocidad tal que pueda poner en riesgo la integridad de la máquina o del propio usuario. La velocidad máxima de rotación del diseño la marca el generador, que se sitúa en torno a los 1.000 rpm. Para el control de la velocidad, se instala un sistema electrónico que en función de la lectura de velocidad el freno actuará o no.



Ilustración 22: Disco de freno para aerogeneradores (Fuente: mayr)

6.3.5. Generador

El generador es la pieza clave del sistema generador de la turbina. Debe transformar la energía mecánica que recibe en el eje de entrada en energía eléctrica. Tal y como se ha explicado en el capítulo 5 se escoge un alternador de imanes permanentes, en concreto uno del fabricante FuturEnergy.

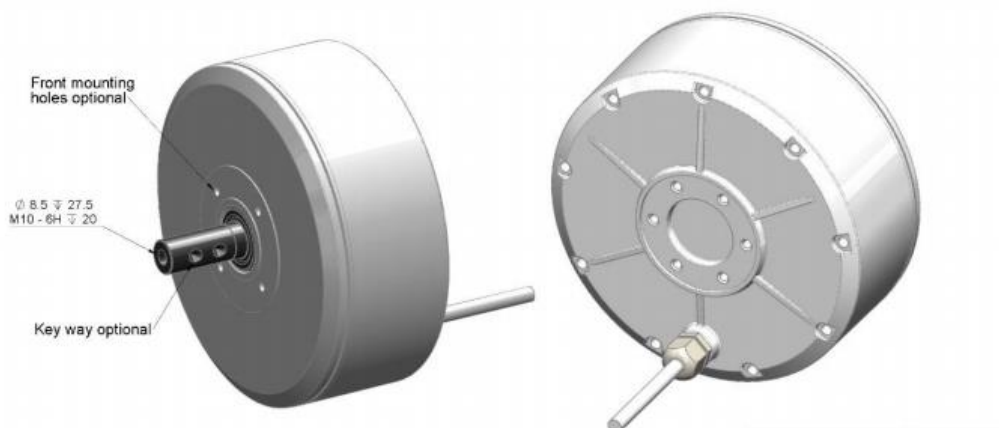


Ilustración 23: Generador PMG FuturEnergy (Fuente: FuturEnergy)

Uno de los factores por el que se escoge este modelo de generador es que no requiere la implementación de una multiplicadora en el diseño de la transmisión. Esto es debido a que la velocidad a la que el alternador produce la potencia nominal es la misma a la que gira cuando la velocidad del viento es la nominal, es decir, el eje principal no necesita aumentar su velocidad de rotación para transmitir la potencia nominal al alternador. En la siguiente gráfica se puede observar que el alternador entrega 800W para una velocidad de 575 rpm, que es la velocidad a la que el rotor gira cuando el viento alcanza valores de 10 m/s [7].

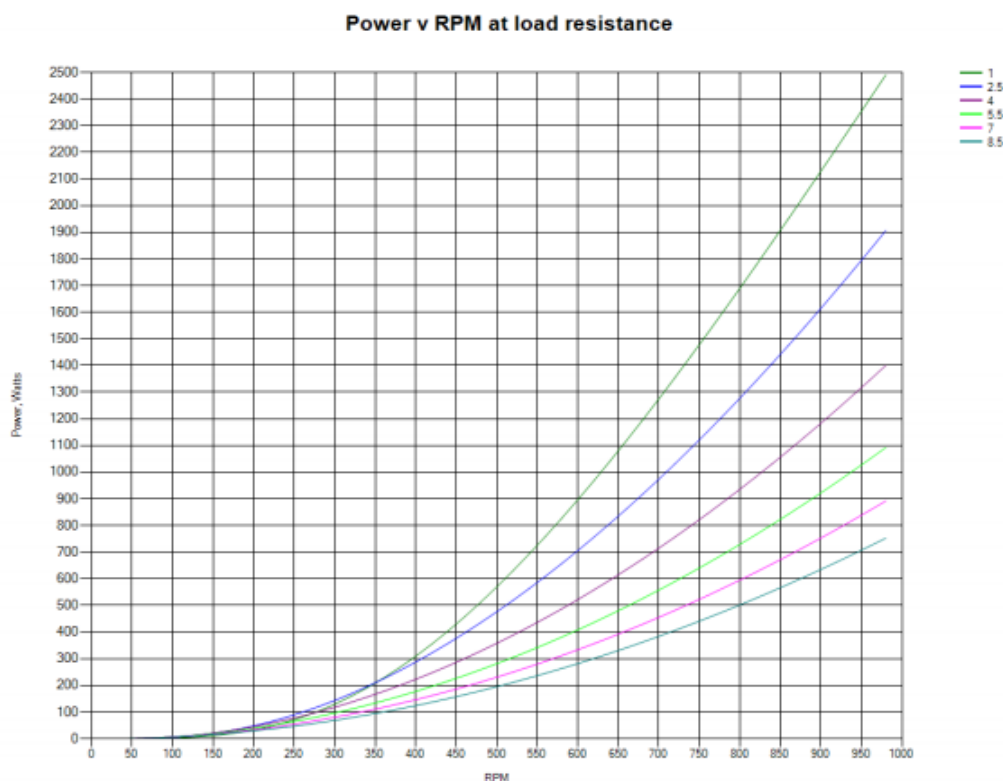


Ilustración 24: Curva de potencia del alternador escogido

6.3.6. Regulador de potencia

Como se ha comentado en el capítulo de selección de alternativas, el sistema de regulación que se cree más eficiente para el proyecto es un sistema pasivo mediante paleta secundaria o auxiliar. Este sistema se cree especialmente útil porque permite aprovechar energía a un intervalo de velocidades mayor. Esto ocurre porque la fuerza que hace el viento sobre la paleta secundaria aumenta a medida que la velocidad se incrementa, reduciendo el área proyectada del rotor y por tanto la energía que se capta.

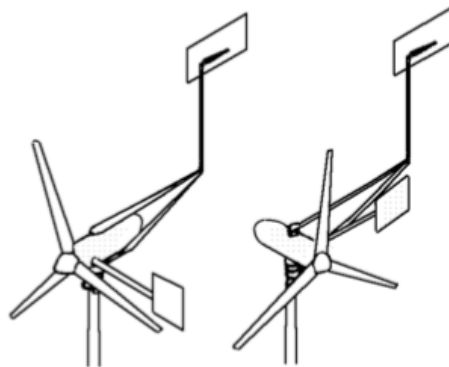


Ilustración 25: Veleta auxiliar (Fuente: pfernandezdiez.es)

Para implementar este sistema se deben tener en cuenta varios factores, como por ejemplo el área de la paleta secundaria, que se aproxima como el 25% de la veleta de orientación. Este sistema debe adoptar sistema amortiguador que procure que el rotor vuelva a la posición de inicio una vez el viento disminuya.

El sistema cumple con otra función además de regular la potencia para vientos fuertes (velocidad mayor a 30 m/s), se puede usar como freno aerodinámico para vientos extremos colocando el rotor en posición paralela al viento.

6.3.7. Sistema de orientación

El aerogenerador se orientará mediante un sistema pasivo de orientación, mediante un timón situado en la cola de la máquina. Al tratarse de un sistema pasivo, el viento será quien ejerza la fuerza tal para orientar el aerogenerador. Las dimensiones de la cola y de la veleta son críticas para la correcta orientación del aerogenerador. En el caso de un dimensionado ineficiente, se dejará de aprovechar toda la energía posible debido a una caída de la velocidad del rotor. En la ilustración a continuación se observa un esquema de un aerogenerador de eje horizontal.

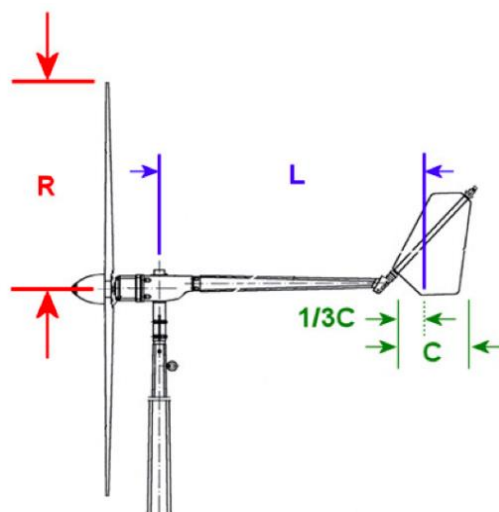


Ilustración 26: Esquema y cotas cola aerogenerador (Fuente: WindyNation)

Donde:

- R: radio rotor
- L: longitud de la cola
- C: longitud de la veleta

Según un estudio de WindyNation [8], la longitud de la cola y el área de la veleta se pueden estimar en función del área de barrido del rotor. En concreto, se estima que el área de la veleta debe ser igual o superior a un 5% del área de barrido del rotor y que la longitud de la cola debería tener una longitud del 60% del diámetro del rotor.

Diámetro rotor [m]	Área barrido [m ²]	Área veleta [m ²]	Longitud de la cola [m]
2,0	3,1	0,2	1,2

Tabla 5: Estimación de las dimensiones de la cola del aerogenerador y de la veleta

6.3.8. Torre

La góndola y el rotor se soportarán mediante una torre de mástil tensado. La torre de un aerogenerador cumple varias funciones esenciales para la eficiencia o la seguridad de la máquina. La torre debe garantizar la altura necesaria al rotor para captar energía eólica y soportar las cargas a las que está sometida. Como se ha anunciado, la torre no entra dentro del alcance del proyecto por lo que no se realizará un diseño concreto de la misma. En cambio, sí que se estima la altura media debe ser alrededor de los 10 m. Se deben verificar condiciones básicas como que no se produzca pandeo o que no conduzca la

energía que se transforma en la góndola.



Ilustración 27: Torre de mástil tensado (Fuente: Xunzel)

Esta ilustración muestra una aproximación de la torre escogida para el diseño del proyecto. Como se puede observar, se tensa mediante unos tensores que se colocan a lo largo de la torre. Con esto se asegura que la torre se mantiene recta incluso en casos de velocidades elevadas de viento.

7. Impacto ambiental

Generalmente, el impacto ambiental de la energía eólica es positivo, y es que al usar la energía renovable se dejan de necesitar otro tipo de energías que tienen una emisión de sustancias contaminantes importantes.

El impacto ambiental del proyecto debe analizarse desde dos puntos de vista distintos, es decir, el impacto directo e indirecto. El impacto directo hace referencia a la instalación del aerogenerador y a las alteraciones del medio que eso conlleva. En cambio, el impacto indirecto se basa en los efectos que tiene el aprovechamiento del recurso eólico sustituyendo otros métodos de obtención de energía.

Para empezar, se analiza el impacto directo. Instalar un aerogenerador implica alterar el terreno donde se instalará, la vegetación y la fauna del entorno. Cuanto mayor sea el tamaño de este, más afectará. Generalmente el impacto directo es negativo debido a que se altera el ecosistema. Una de las mayores afecciones se puede ver en el caso de la avifauna. Cuando un ave cruza el área de barrido del rotor, puede producirse un accidente en caso de colisión. En referencia al proyecto, el área de barrido es muy pequeña en relación a las grandes máquinas eólicas, por lo que es bastante improbable que este hecho suceda.

En segundo caso se analiza el impacto indirecto. Cuando se aprovecha el recurso eólico para producir energía, no se contribuye al efecto invernadero ni a la emisión de sustancias contaminantes a la atmosfera. Debe tenerse en cuenta el proceso de fabricación de la máquina para tratar de reducir al máximo los residuos generados o reutilizarlos. Pese a eso, es claramente positivo el uso de energías renovables por lo que se considera totalmente justificada la viabilidad medioambiental del proyecto.

Finalmente, se calcula que el total de emisiones anuales que se dejan de producir con la instalación de este proyecto es de 1124 kg de CO₂ equivalente, teniendo en cuenta que la energía producida anual es de 2920 kWh y el factor de emisión tiene un valor de 0,385 kg CO₂ equivalente / kWh [9].

8. Viabilidad técnica y social

La viabilidad técnica consiste en averiguar la posibilidad real de instalar un aerogenerador en una vivienda y verificar que el sistema sea capaz de soportar tal instalación. Dicha instalación requiere de una batería para almacenar la energía eólica que se produce cuando no se necesite, es decir, aprovecha la energía eólica en su totalidad siempre y cuando el sistema lo permita. La implementación de la minieólica destaca por su sencillez y fácil instalación, por lo que es altamente improbable que genere cualquier tipo de problemática. Además, dentro de la viabilidad técnica entra el mantenimiento de dicha máquina, ya que sería inviable que el usuario tuviera que realizar o contratar tareas de mantenimiento entre períodos cortos. La clave para que un proyecto de este tipo sea viable técnicamente es que sea de fácil implementación y que las labores de mantenimiento sean mínimas.

En este proyecto se ha fijado como objetivo reducir al máximo las labores de mantenimiento para reducir el riesgo de averías y de mantenimientos preventivos, por lo que queda más que justificada la viabilidad técnica del proyecto. Otro factor que decanta la balanza hacia la viabilidad técnica del proyecto es el aumento considerable que está teniendo el recurso eólico, tal y como se ha explicado en el capítulo de estudio de mercado.

El impacto social de instalar un aerogenerador de pequeña potencia mantiene grandes similitudes con el impacto de un aerogenerador de potencia mayor. Entre estos elementos, se puede denotar el impacto visual o el ruido. De hecho, uno de los efectos más molestos para el usuario es el ruido que puede realizar un aerogenerador cuando está en funcionamiento, principalmente causado por la caja multiplicadora. La minieólica tiene un impacto social muy favorable porque ofrece la posibilidad de suministrar energía eléctrica en zonas aisladas donde la electrificación es muy difícil o inviable.

En referencia al aerogenerador diseñado, el tipo de transmisión escogida se suele denominar off-gear, es decir, que no incorpora multiplicadora. Además de las múltiples ventajas que tiene no usar una multiplicadora, no usarla conlleva a reducir el ruido considerablemente cuando está en funcionamiento. El impacto visual es inevitable para cualquier tamaño de aerogenerador, aunque no es el mismo el de un aerogenerador de 10 m de altura que otro de 40 m.

En conclusión, la viabilidad social se ve afectada por la subjetividad del usuario. Generalmente el aprovechamiento del recurso eólico y el desarrollo sostenible genera una total aceptación por la sociedad y una gran satisfacción al usuario debido a la mayor concienciación que hay sobre los efectos positivos que este tipo de máquinas genera.

9. Estudio de viabilidad económica

En el estudio de viabilidad económica deben tenerse en cuenta varios factores como la inversión inicial, que será el presupuesto del aerogenerador, los gastos y los beneficios obtenidos durante cada año. Para ello se ha realizado la siguiente tabla donde se puede ver en la primera columna el concepto y en las demás columnas el valor de cada concepto por año.

Concepto / Período [años]	0	1	2	3	4	5	6
Inversión [€]	1562,08	0	0	0	0	0	0
Gastos [€]	1562,08	30	30	30	30	30	30
Beneficio [€]	0	525,6	525,6	525,6	525,6	525,6	525,6
Flujo anual [€]	-1562,08	495,6	495,6	495,6	495,6	495,6	495,6
Flujo acumulado [€]	-1562,08	-1066,48	-570,88	-75,28	420,32	915,92	1411,52

Tabla 6: Evolución anual flujo económico

La inversión inicial se calcula como el presupuesto del aerogenerador, que tiene un coste total de 1562,08 €. Los costes anuales de gastos se estiman como gastos de mantenimiento. El beneficio procede del cálculo de la energía anual producida y el precio unitario del kWh.

Ahorro anual [€]	Energía anual producida [kWh]	Precio energía [€/kWh]
525,6	2920	0,18

Tabla 7: Beneficios anuales aerogenerador

Una vez obtenidos los flujos anuales y acumulados, se calcula el VAN, TIR a 6 años y el pay-back:

VAN	TIR	Pay-back
539,93 €	11%	3,2 años

Tabla 8: VAN, TIR y Pay-back

Como se puede observar, se ha obtenido un VAN y un TIR mayores que 0 por tanto la rentabilidad económica es favorable. Además, se obtiene un período de pay-back de 3,2 años.

Conclusiones

- Se cumple el objetivo principal del proyecto debido a que se ha estimado que el aerogenerador produce un 58 % de la energía total consumida por la vivienda, bajo las condiciones de una localidad de Portbou, superando el 51 % marcado como objetivo principal con un factor de carga de 41,7%.
- Con la instalación del proyecto se estima que se consigue una producción anual de 2920 kWh. Esta producción energética supone un ahorro de más de 500 €, teniendo en cuenta que los costes de mantenimiento se han reducido hasta los 30 € anuales.
- Se ha comprobado la viabilidad técnica de instalar un aerogenerador en la localidad de Portbou debido al alto recurso eólico del que se dispone
- El período de pay-back se estima en 3,2 años y se comprueba la rentabilidad económica del proyecto obteniendo un VAN y TIR a 6 años positivos.
- Además de la rentabilidad económica del proyecto, el impacto ambiental de realizar dicho proyecto es totalmente favorable, reduciendo un total de 1124 kg de CO₂ equivalente en las emisiones anuales de la vivienda.
- Como proyectos futuros, se contempla el estudio del perfil de las palas, la instalación del proyecto o incluso el diseño de la torre y el soporte.

Agradecimientos

Primero, querría agradecer de una manera especial a mi familia, a María y a toda la gente de mi entorno más cercano que me han brindado su apoyo durante la realización del proyecto.

Agradecer la inestimable ayuda de mi tutor, Víctor Albert, que me aconsejó y dirigió a lo largo de todo el diseño.

Finalmente, agradecer a Arnau y Lucía que me han introducido y formado en el mundo de la energía eólica.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Redacción Re_Magazine, “Energía minieólica para autoconsumo doméstico | Re_Magazine.” [Online]. Available: <https://re-magazine.saunierduval.es/2019-02-17/energia-minieolica-para-autoconsumo>. [Accessed: 14-Jun-2019].
- [2] S. Fernández, “El resurgir de la eólica en España: se instalaron 392 nuevos megavatios en 2019 | DiarioRenovables | Energías renovables. Eólica, solar, fotovoltaica, baterías, movilidad sostenible,” 2019.
- [3] Sumiran Satsangi and Eswara Prasad, “Small Wind Power Market Size, Opportunity and Industry Analysis -2022,” 2017. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/small-wind-power-market>. [Accessed: 14-Jun-2019].
- [4] B. Standards, “En61400-2-2006,” vol. 3, 2006.
- [5] P. Fernández Díez, “III . - Cargas, orientación y regulación,” pp. 41–60.
- [6] U. de Sevilla, “4 Sistemas de generación 4.1 Introducción.”
- [7] FuturEnergy, “Specification Futureenergy, 24V 1kW Permanent Magnet Generator.”
- [8] WindyNation, “Sizing Your Wind Turbine Tail,” 2010.
- [9] C. Zaragoza, “calculoemisiones.” .

Bibliografía complementaria

- P. Fernández Díez, “IV.- *Parámetros de diseño*,” pp. 61–88.
- C. De Madrid, “*Guía sobre Tecnología Minieólica*,” 2012.
- “LAYER ELECTRONICS S.R.L.” <https://www.layer.it/es/category/energias-renovables/eolico-es/>.
- “Bornay.” <https://www.bornay.com/es>.