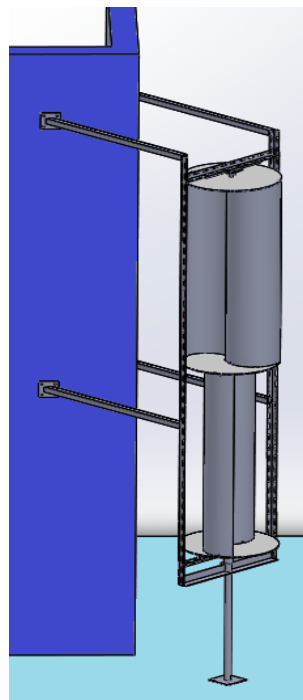




UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico



TRABAJO FINAL DEL

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica

REALIZADO POR

Carlos Diago Vidal

TUTORIZADO POR

Tutor: Enrique J. Bernabeu Soler

Cotutor: Carlos Ricolfe Viala

FECHA: Valencia, septiembre, 2019

Índice

Tabla de ilustraciones.....	3
Resumen.....	5
Palabras clave.....	5
Introducción	6
Objetivos	8
Método.....	9
Fase 1 – Leyes físicas de la energía eólica y teoría de aerogeneradores	10
1.1 - Energías renovables, energía eólica y minieólica.....	10
1.2 - Tipos de aerogeneradores y principios de funcionamiento	11
1.3 - Potencia y energía cinética del viento, Ley de Betz	15
1.4 - Tipos de máquinas eléctricas y generación de potencia eléctrica.....	22
1.5 - Rendimiento total del aerogenerador	28
1.6 - Eficiencia y rentabilidad previsible de una instalación eólica, factor de capacidad ...	30
Fase 2 – Velocidad media anual del viento, Distribución de Weibull	31
2.1 - Velocidad media anual del viento (Península Ibérica y resto del mundo).....	31
2.2 - Distribución de Weibull y densidad de potencia eólica por superficie	36
Fase 3 – Cálculos previos de potencia mecánica y eléctrica, velocidad y par mecánico	42
Fase 4 – Diseño del primer prototipo mediante Solidworks.....	45
Fase 5 – Impresión en 3D y montaje del primer prototipo.....	50
Fase 6 – Diseño del segundo prototipo (Solidworks) y análisis de esfuerzos mecánicos	51
Fase 7 – Elección del generador y del circuito electrónico para la adaptación del voltaje	57
Fase 8 – Inventario de materiales, costes de producción y estudio de viabilidad económica	63
8.1 - Inventario de materiales necesarios y costes de adquisición	63
8.2 - Costes de producción y factura por el trabajo realizado	64
8.3 - Estudio de viabilidad económica.....	65
Fase 9 – Montaje del segundo prototipo	67
Resultados técnicos.....	68
Resultados económicos.....	69
Posibilidades de optimización del producto en futuros trabajos	70
Bibliografía y fuentes.....	71
Conclusiones	72
Pliego de condiciones.....	73
Anexos.....	79

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 - Aerogeneradores de energía minieólica en el ámbito doméstico	10
Ilustración 2 - Uso de energía minieólica combinada con paneles solares.....	11
Ilustración 3 - Ejemplos de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT).....	12
Ilustración 4 - Tipos de aerogeneradores de eje vertical (VAWT)	13
Ilustración 5 - Principio de funcionamiento del rotor Savonius.....	13
Ilustración 6 - Principio de funcionamiento del rotor Darrieus	14
Ilustración 7 - Aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius.....	15
Ilustración 8 - Velocidad específica de un rotor (TSR)	17
Ilustración 9 - Coeficientes de potencia en función de la velocidad específica del viento	18
Ilustración 10 - Diferentes tipos de rotores Savonius	19
Ilustración 11 - Coeficientes de potencia de diferentes rotores Savonius en función de la velocidad específica	19
Ilustración 12 - Coeficiente de par de diferentes rotores Savonius en función del ángulo de giro	21
Ilustración 13 - Motor/Generador de corriente continua (dinamo).....	22
Ilustración 14 - Generación de corriente continua con un generador de corriente alterna y rectificación.....	23
Ilustración 15 - Motor/Generador de corriente alterna (alternador).....	23
Ilustración 16 - Generación de corriente alterna, rectificación e inversión a 50 Hz para la red eléctrica	24
Ilustración 17 - Rectificador de onda completa	25
Ilustración 18 - Gráfica de par-velocidad en un motor/generador de corriente continua	26
Ilustración 19 - Rotor Savonius con dos pisos	28
Ilustración 20 - Vista desde arriba de un rotor Savonius	29
Ilustración 21 - Mapa eólico de la Península Ibérica, velocidad del viento	32
Ilustración 22 - Mapa eólico de Europa y Asia, velocidad del viento.....	33
Ilustración 23 - Mapa eólico de África, velocidad del viento	34
Ilustración 24 – Mapa eólico de Norteamérica, velocidad del viento	34
Ilustración 25 – Mapa eólico de Sudamérica, velocidad del viento.....	35
Ilustración 26 - Mapa eólico de Oceanía, velocidad del viento	35
Ilustración 27 - Distribución de Weibull para la velocidad media de 4 m/s	37
Ilustración 28 - Distribución de Weibull para la velocidad media de 5 m/s	37
Ilustración 29 - Distribución de Weibull (Matlab) para la velocidad media de 4 m/s.....	38
Ilustración 30 - Distribución de Weibull (Matlab) para la velocidad media de 5 m/s.....	38
Ilustración 31 - Curva de Velocidad del viento - Potencia por m ²	39
Ilustración 32 - Densidad de potencia por m ² para una velocidad media del viento de 4 m/s ..	40
Ilustración 33 - Densidad de potencia por m ² para una velocidad media del viento de 5 m/s ..	40
Ilustración 34 - Vistas desde arriba (izquierda) y abajo (derecha) del primer prototipo.....	46
Ilustración 35 - Rotor del primer prototipo.....	47
Ilustración 36 - Estator del primer prototipo	48
Ilustración 37 - Sujeción de los rodamientos	49
Ilustración 38 - Imagen real del primer prototipo montado.....	50
Ilustración 39 - Diseño del segundo prototipo instalado en una pared.....	51
Ilustración 40 - Capa límite de un flujo de viento sobre una superficie plana.....	52
Ilustración 41 - Segundo prototipo instalado en una esquina	53

Ilustración 42 - Análisis de deformaciones mediante elementos finitos	55
Ilustración 43 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (altura del cilindro)	56
Ilustración 44 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (orificio de 12 mm)	56
Ilustración 45 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (orificio de 6 mm)	57
Ilustración 46 - Convertidor (o elevador) "Boost" de voltaje con corriente continua (DC)	60
Ilustración 47 - Esquema simplificado del funcionamiento del elevador "Boost"	60
Ilustración 48 - Esquema simplificado del circuito electrónico de adaptación de voltaje a 5 V. 61	
Ilustración 49 - Fotografía real del circuito electrónico implementado para adaptar el voltaje 62	
Ilustración 50 - Montaje real del segundo prototipo en una terraza	67

Resumen

Este trabajo consta del diseño e impresión 3D de un prototipo de aerogenerador Savonius, así como de la implementación de un generador y un circuito electrónico que permite almacenar la electricidad generada en una batería.

Además, se ha llevado a cabo el montaje de un segundo aerogenerador basándose en el primer prototipo, pero aumentando considerablemente el tamaño de éste, alcanzando el segundo aerogenerador una altura de aproximadamente 2 m y una potencia media mayor.

Para finalizar, se ha realizado un estudio de los esfuerzos mecánicos en las partes críticas de la estructura, una estimación de la potencia media y la energía anual generada y un estudio de costes y viabilidad económica del producto tomando como referencia el segundo aerogenerador y teniendo en cuenta las restricciones que conlleva su uso e instalación en casas.

Palabras clave

Energías renovables, energía minieólica, aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, aerogenerador de baja potencia, aerogenerador de bajo coste, generación descentralizada de electricidad para uso doméstico.

Introducción

El propósito de este trabajo es diseñar un aerogenerador que pueda ser instalado y utilizado en balcones y azoteas de casas o bloques de pisos para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica y almacenar dicha electricidad en una batería. Esta carga eléctrica almacenada puede ser utilizada posteriormente para diversas aplicaciones que demanden una baja potencia eléctrica, tales como recargar las baterías de móviles, ordenadores portátiles, baterías recargables de baja tensión e iluminar una parte del hogar.

Este proyecto tiene como pretensión poder ofrecer un aerogenerador de bajo coste para el usuario, seguro y poco ruidoso para ser instalado en casas y zonas urbanas y que pueda ser, junto con las placas solares, una alternativa más con la que crear una combinación de tecnologías ("*mix*") de generación descentralizada de electricidad directamente en el lugar donde se va a consumir dicha energía eléctrica, es decir, en el ámbito doméstico, evitando así las pérdidas que existen en el transporte de electricidad desde las centrales hasta los centros urbanos y reduciendo ligeramente la cantidad de energía producida en las centrales eléctricas convencionales. Dado que estas centrales suelen requerir la combustión de carbón o gas natural cuando las energías renovables no alcanzan la demanda de energía diaria, la producción descentralizada de una parte de la energía requerida por la población con energía eólica (y/o solar) reduce las emisiones de CO₂ y contribuye así a reducir el ritmo actual del calentamiento global.

Además, teniendo en cuenta las previsiones del crecimiento de la población mundial en las próximas décadas, la demanda de energía eléctrica aumentará proporcionalmente a este crecimiento de la población, con lo que la oferta de energía eléctrica generada diariamente debería crecer para sostener dicha demanda. Si, por una parte, la oferta de energía generada debe aumentar y, por otra parte, la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ deben reducirse para frenar el cambio climático, la solución propuesta actualmente ante tal escenario es sustituir la combustión de carbón y gas natural por centrales nucleares y energías renovables. Dado que la energía nuclear tiene las desventajas de generar residuos que deben ser almacenados y vigilados, con el coste económico que conlleva, junto con su riesgo de accidente nuclear, su demostrada contaminación incluso en ausencia de accidentes, la falta de aceptación social y las tensiones geopolíticas que se derivan tanto de la obtención del uranio, que es un elemento limitado en la naturaleza, como de la constante sospecha de su enriquecimiento para uso militar, las energías renovables están llamadas a ser el pilar principal que sostenga la demanda de energía mundial, tanto por su carácter sostenible y respetuoso con el medio ambiente como por su creciente eficiencia y competitividad en el mercado eléctrico. Este proyecto pretende contribuir en el campo de las energías renovables, concretamente, la minieólica, que engloba a los aerogeneradores de menor potencia, ofreciendo un producto funcional y económicamente viable para uso doméstico.

Dado que la red eléctrica es accesible hoy en día a prácticamente el 100% de la población en los países más desarrollados del mundo según los datos del Banco Mundial, este tipo de generador de bajo coste y baja potencia que se ha diseñado en este proyecto cobra especial importancia para aquellos países menos desarrollados, especialmente en el continente africano y, concretamente, en prácticamente todos los países al sur del Sáhara, donde la red eléctrica abastece en la actualidad de media solamente al 40% de la población. Por este motivo, los pequeños aerogeneradores y las placas solares instaladas en casas, aldeas y pueblos son un medio de facilitar la iluminación y el uso de herramientas que requieran electricidad durante los años futuros en los que dicha red eléctrica siga sin estar totalmente construida y sin alcanzar a la totalidad de la población. De este modo, se evitaría la combustión de queroseno para iluminar las casas, una práctica muy extendida en estos países y vigente actualmente, pero que es contaminante y perjudicial para la salud por la mala calidad del aire que se respira en las habitaciones iluminadas de esta manera.

En cuanto a los países más desarrollados, aún existen zonas rurales con baja densidad de población donde tampoco hay acceso a la red eléctrica, por lo que la generación y uso de la energía eléctrica mediante energía solar o eólica de forma independiente a la red y a las centrales de generación puede mejorar la calidad de vida en las zonas rurales y contribuir a frenar la despoblación en dichas zonas.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el diseño completo (mecánico, eléctrico y electrónico) de un aerogenerador de eje vertical (de tipo Savonius) y de bajo coste para generar potencia eléctrica a baja tensión. El aerogenerador debe ser, por una parte, funcional y adecuado para generar y acumular potencia eléctrica a baja tensión, y, por otra parte, económicamente viable.

Es importante destacar que la intención de este proyecto no es conectar las cargas eléctricas (dispositivos de uso doméstico) directamente al aerogenerador, pues en tal caso sólo se podrían utilizar cuando hubiese viento con una velocidad destacable. Es preferible acumular toda la energía eléctrica producida durante el día en una batería y conectar los dispositivos a dicha batería, evitando así la necesidad de que el uso y la generación de la energía eléctrica sean simultáneas. Además, la velocidad del viento puede variar durante el día considerablemente, de forma que el mejor concepto de uso de la energía eólica en este ámbito doméstico es acumulando la energía.

Esta potencia eléctrica se almacenará en una batería recargable portátil (*Power Bank*) de 120 Ah, que es la carga eléctrica equivalente a la de 30 teléfonos móviles de última generación, y a una tensión constante de 5 V, que es el voltaje usual para cargar este tipo de baterías, así como teléfonos móviles y otros dispositivos de uso común y baja potencia. La potencia que se suele requerir para cargar un móvil en 2h oscila entre 7 y 10 W, de modo que el aerogenerador entregará una potencia media menor a éstas (3-6 W), pero lo hará durante todo el día, de forma que se podrán cargar varios móviles u otro tipo de dispositivos electrónicos con la carga almacenada durante todo el día.

Para poder cargar uno o varios dispositivos y almacenar carga eléctrica proveniente de la energía eólica al mismo tiempo, se debe utilizar una batería portátil con dos puertos para cargar dispositivos y con la posibilidad de carga y descarga simultánea. Además, es conveniente que la batería portátil tenga la habilidad de carga rápida de un dispositivo.

Entre los requisitos a cumplir del aerogenerador se encuentran los siguientes:

- Seguridad y estabilidad mecánica
- Resistencia de los materiales frente a la radiación solar, la lluvia y la humedad
- Baja emisión de ruido
- Velocidad del viento baja para que comience el arranque
- Generación de tensión continua constante y estabilizada a 5 V
- Punto de funcionamiento eficiente en la velocidad nominal

Método

El método seguido para conseguir los objetivos marcados se compone de diferentes fases desarrolladas en el siguiente orden:

1. Búsqueda de información en la literatura técnica y recopilación de las leyes físicas del ámbito mecánico, eléctrico y electrónico presentes en un aerogenerador (teoría sobre la energía eólica y aerogeneradores).
2. Búsqueda y cálculo de velocidades medias anuales del viento en base a datos oficiales. Cálculo de la distribución probabilística de las diferentes velocidades del viento mediante la distribución de Weibull y cálculo de la potencia media ponderada durante el año.
3. Cálculos previos: potencia mecánica, velocidad y par mecánico del rotor; potencia y energía media diaria eléctrica generada.
4. Diseño de un pequeño prototipo de aerogenerador de tipo Savonius mediante el programa de diseño mecánico "Solidworks".
5. Impresión en 3D del prototipo, montaje y prueba de funcionalidad, estabilidad mecánica y de velocidades de giro con y sin la carga del generador.
6. Ampliación del primer prototipo diseñado a un segundo prototipo de 2m de altura y análisis por ordenador de los esfuerzos mecánicos de la estructura.
7. Elección del generador eléctrico. Implementación de un circuito electrónico para la elevación y estabilización de la tensión para garantizar la correcta acumulación de la potencia eléctrica en la batería.
8. Realización de un inventario de piezas necesarias y cálculo del coste total de la producción del aerogenerador. Estudio de viabilidad económica del producto.
9. Compra del material necesario y montaje del segundo prototipo.

En los siguientes apartados se va a documentar todo el proceso con sus diferentes fases, destacando las informaciones más relevantes para el correcto desarrollo del proyecto. Los resultados técnicos y económicos de este trabajo están incluidos en estas fases. Las fases 2, 3, 6 y 7 contienen los resultados técnicos que permiten la producción del aerogenerador, mientras que la fase 8 contiene el análisis de costes y los resultados económicos del proyecto. Después de este apartado se sintetizarán estos resultados en un breve resumen.

Fase 1 – Leyes físicas de la energía eólica y teoría de aerogeneradores

1.1 - Energías renovables, energía eólica y minieólica

En el amplio campo de las energías renovables existen diversas formas de producir energía eléctrica. Las diferentes fuentes de energía son las siguientes: la energía solar, la energía eólica, la energía mareomotriz, la energía geotérmica, la energía solar térmica, la energía hidráulica y la energía producida mediante biomasa.

De estas energías, la que se aplica en este proyecto es la energía eólica, ya que un aerogenerador absorbe de forma mecánica la energía cinética del viento para generar electricidad.

Dentro de la energía eólica existen dos rangos de potencia diferentes:

1. El rango de potencia que cubren los aerogeneradores grandes y convencionales, que abarca desde 100 kW hasta aproximadamente 9 MW, que es la máxima potencia que se ha alcanzado hasta la fecha.
2. El rango de potencia de la energía minieólica, que incluye todas aquellas potencias inferiores a 100 kW con uso industrial o doméstico.

La energía minieólica es, por lo tanto, el sector de la energía eólica que genera menor potencia debido al reducido tamaño de los aerogeneradores en comparación a los que existen en los parques eólicos. Sin embargo, su reducido tamaño y coste permiten ser instalados en cualquier industria, zona urbana o casa y dichos aerogeneradores son susceptibles de ser convertidos en productos de fabricación y venta masiva.



Ilustración 1 - Aerogeneradores de energía minieólica en el ámbito doméstico

Para el ámbito industrial, la potencia requerida puede oscilar entre los 30 kW y los 100 kW, mientras que el rango inferior a 30 kW es más apropiado para uso doméstico.

Es común y aconsejable que la instalación de aerogeneradores de energía minieólica se combine con paneles solares, ya que, por razones climatológicas, la velocidad del viento suele ser mayor en los días nublados y menor en los días soleados, de forma que ambas tecnologías se complementan para ofrecer con mayor probabilidad y cantidad la energía eléctrica necesaria independientemente del tiempo que haga cada día.

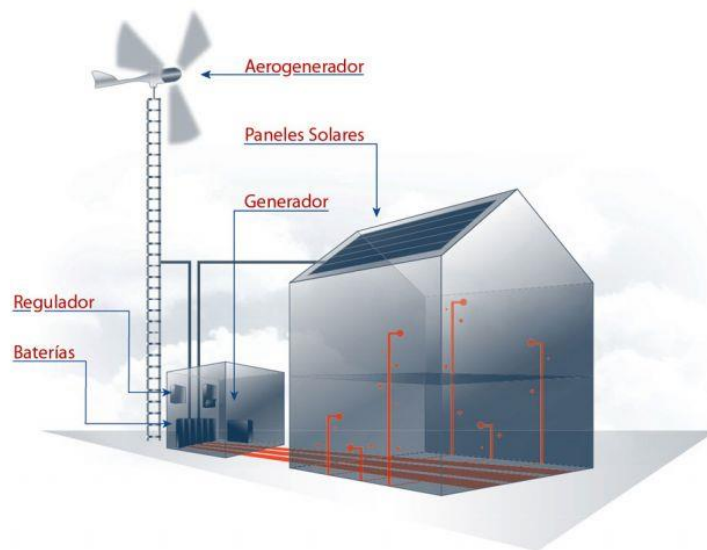


Ilustración 2 - Uso de energía minieólica combinada con paneles solares

1.2 - Tipos de aerogeneradores y principios de funcionamiento

Existen diferentes tipos de aerogeneradores con sus respectivos principios de construcción y funcionamiento.

La primera diferenciación básica se da en la orientación del eje del rotor, que puede estar colocado en posición horizontal o vertical. Los aerogeneradores más usuales y conocidos son los de eje horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*), los cuales se elevan con una torre vertical a una altura considerable, pero dejando reposar el eje del rotor en posición horizontal. Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT - *Vertical Axis Wind Turbine*), por el contrario, poseen estructuras en las que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo.

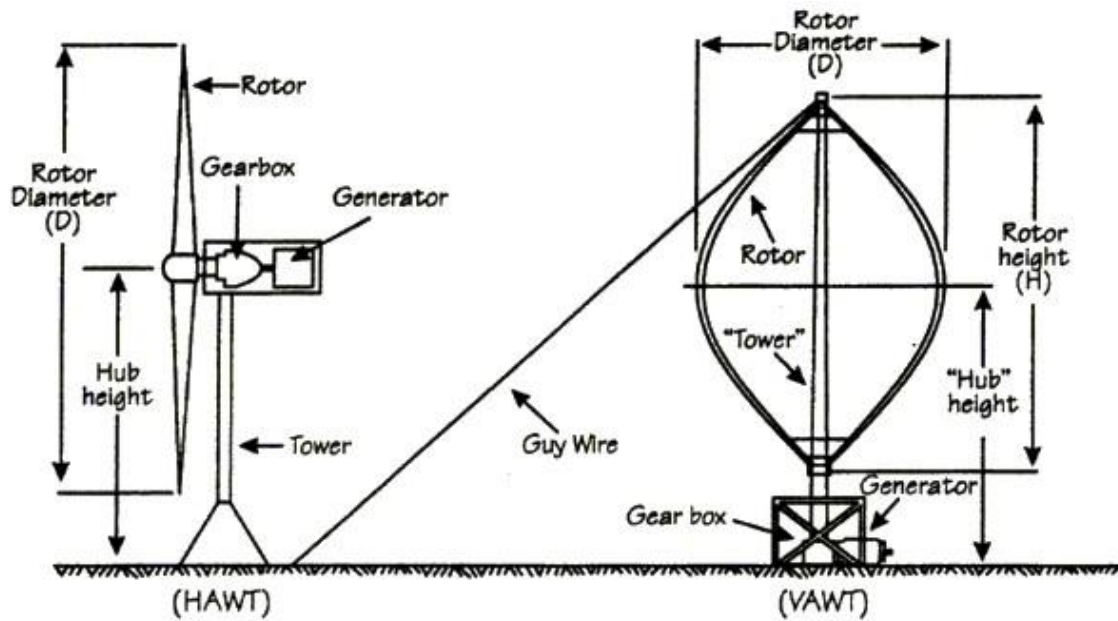


Ilustración 3 - Ejemplos de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) y vertical (VAWT)

En la siguiente tabla se pueden observar las ventajas e inconvenientes de ambos tipos de aerogeneradores:

	HAWT – Eje Horizontal	VAWT – Eje Vertical
Ventajas	Mayor eficiencia	No necesitan gran altura
	Mayores potencias alcanzables	Fácil y barata instalación y mantenimiento
	Reciben vientos con mayores velocidades debido a su gran altura	El generador y la caja de cambios puede colocarse en el suelo
	Reciben vientos en régimen laminar en grandes alturas, mejorando así su rendimiento	Bajas emisiones de ruido
		Funcionan independientemente de la orientación del viento
		Operan también a bajas velocidades del viento
Inconvenientes	Gran altura, necesidad de la torre	Menor eficiencia
	Instalación más costosa	Menores potencias alcanzables
	Emiten más ruidos molestos para la población	Reciben vientos con menores velocidades
	Necesitan orientarse hacia la dirección del viento	Reciben más viento en régimen turbulento debido a los obstáculos que encuentra el viento a bajas alturas
	Operan en un rango menor de velocidades (arranque a mayores velocidades y peligro con velocidades altas)	
	Requieren mayores sistemas de seguridad, control y frenado	

Existe una gran variedad de aerogeneradores de eje vertical, entre los cuales destacan los rotores Savonius y Darrieus, con sus respectivas variantes y diferentes diseños.

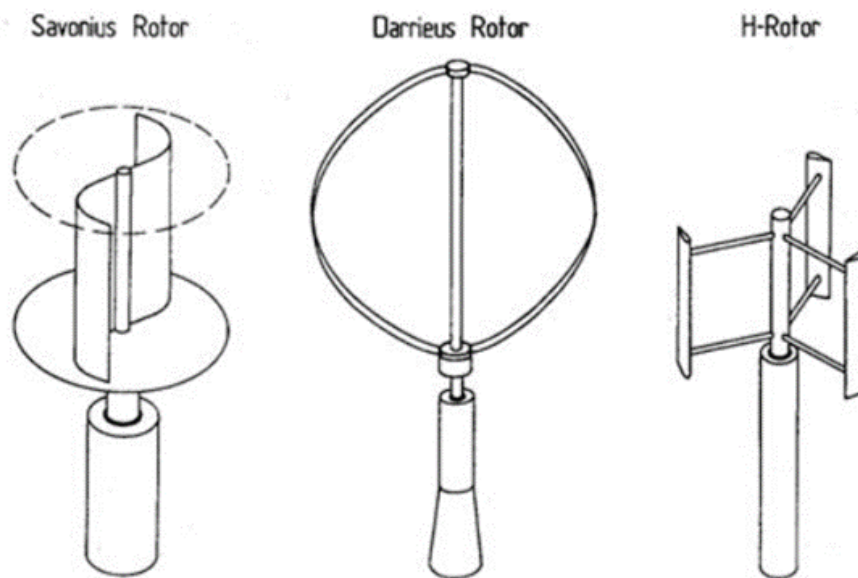


Ilustración 4 - Tipos de aerogeneradores de eje vertical (VAWT)

El rotor Savonius fue inventado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1922. Su diseño es relativamente simple y consta de dos palas verticales con un perfil curvado. Visto desde arriba, las palas forman una "S". Esta colocación de las palas y su curvatura provoca una diferencia entre la resistencia aerodinámica de cada pala, haciendo que una de ellas absorba la energía cinética del viento, mientras que la otra desvía el viento hacia los laterales. El principio básico de los rotores Savonius es la propulsión por fuerzas de arrastre ("drag"), ya que la pala que absorbe la energía cinética del viento es arrastrada (o empujada) por éste. Se pueden colocar las palas con un espaciado (o superposición) e , lo cual es un parámetro adicional del diseño del rotor y puede hacer variar su comportamiento.

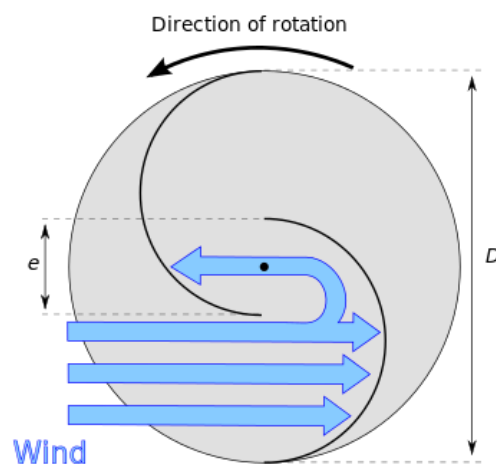


Ilustración 5 - Principio de funcionamiento del rotor Savonius

El rotor Darrieus fue inventado por el ingeniero aeronáutico francés Georges J. M. Darrieus en 1926. Este rotor se compone de dos o más palas curvadas con un perfil aerodinámico montadas en un eje vertical. El principio físico básico de este tipo de rotores es la propulsión por fuerzas de sustentación (“*lift*”), que se basan en la fuerza que aparece debido a la diferencia de presión existente entre las caras de un perfil aerodinámico.

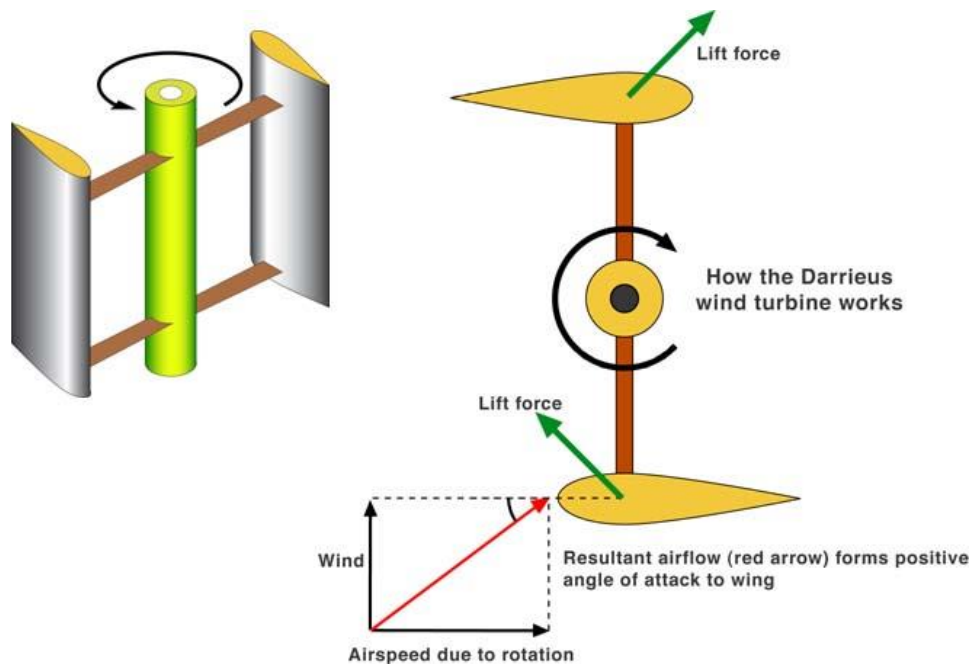


Ilustración 6 - Principio de funcionamiento del rotor Darrieus

Estos rotores tienen dificultades para arrancar automáticamente sin un impulso adicional y requieren, al igual que los aerogeneradores de eje horizontal, de mecanismos de frenado y control para evitar velocidades de giro demasiado altas y velocidades de resonancia, las cuales convierten a la estructura en potencialmente inestable y proclive a sufrir una rotura.

En la tabla expuesta a continuación se pueden comparar las ventajas de ambos tipos de aerogeneradores de eje vertical:

Ventajas: Rotor Savonius	Ventajas: Rotor Darrieus
Par de arranque mayor	Mayor eficiencia
No hay necesidad de un mecanismo adicional de arranque	Mayor potencia
Menores emisiones de ruido	
Mayor estabilidad mecánica y resistencia ante vientos fuertes	

Por estos motivos, es usual la combinación de ambos aerogeneradores para conseguir las ventajas y suplir los inconvenientes de ambos, alcanzando así una mayor eficiencia, arranques automáticos y mayor estabilidad mecánica.



Ilustración 7 - Aerogenerador híbrido Darrieus-Savonius

En este trabajo se ha optado por diseñar un rotor de tipo Savonius porque, pese a su menor eficiencia, la estabilidad mecánica, la menor emisión de ruido y la habilidad para arrancar automáticamente sin la ayuda de un motor adicional son ventajas convenientes y necesarias para su uso en el ámbito doméstico.

1.3 - Potencia y energía cinética del viento, Ley de Betz

Según las leyes de la mecánica de fluidos, el viento es un medio portador de energía cinética y sometido a una presión variable. Los gradientes en el campo de la presión atmosférica, es decir, las diferencias de presión generan flujos de masas de aire. Estos flujos de viento contienen energía cinética que puede ser absorbida por los aerogeneradores para generar electricidad.

La energía cinética de cualquier masa, siendo ésta sólida, líquida o gaseosa, es:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Aquí, m es la masa y v es la velocidad de dicha masa en movimiento. En este caso, la masa es un fluido, concretamente, aire, con lo que el flujo de dicha masa con se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$$

En esta ecuación, ρ es la densidad del fluido, A es el área a través del cual fluye la masa y v es su velocidad.

Dado que la derivada temporal de la energía (o del trabajo) es la potencia, tomando una velocidad del viento v constante, la potencia que podría entregar el viento es:

$$P_{viento} = \dot{E}_c = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}$$

Se puede deducir de esta ecuación que, cuanto mayor sea el área por la cual fluye el viento y su velocidad, mayor será la potencia extraíble del aire. Cabe destacar que, si bien la potencia crece proporcionalmente al área A , que depende del tipo y del diseño del aerogenerador, esta potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, siendo ésta, por lo tanto, la variable más destacable para la producción de energía. Por este motivo es crucial en las instalaciones de energía eólica escoger emplazamientos adecuados donde la velocidad del viento sea la más alta posible.

Sin embargo, no toda la energía cinética del viento puede ser totalmente absorbida por un rotor de un aerogenerador. Si ese fuese el caso, el viento quedaría en reposo al pasar por un aerogenerador y dicho reposo es incompatible con un flujo sostenido de viento. Es por este motivo que existe una relación óptima entre la velocidad del viento al entrar y al salir de un aerogenerador, concretamente, la velocidad de entrada (v_1) del viento en el rotor debe ser el triple que la de salida (v_2) para maximizar la potencia absorbida en el aerogenerador.

Siendo:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$$

La máxima potencia extraíble del viento es:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \approx 0.593 \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} = 0.593 \cdot P_{viento}$$

Esta ecuación es el resultado de los cálculos publicados en 1919 por el físico alemán Albert Betz, que dio nombre a la Ley de Betz. Esta ley indica que, independientemente de cuál sea el diseño de un aerogenerador, su eficiencia máxima está limitada al valor ideal del 59,3 %.

Es usual en el cálculo de la eficiencia de un aerogenerador la división de la potencia real extraíble entre la potencia del viento. A esta relación se le llama coeficiente de potencia, y se define de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_{viento}}$$

Según el límite de Betz, el coeficiente de potencia no puede superar el valor de 0,593.

Otra variable fundamental para determinar la potencia y eficiencia de un aerogenerador es la velocidad específica del viento λ , también llamada TSR (“*Tip Speed Ratio*”), y está definida como la relación entre la velocidad lineal del extremo de las palas y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{v_{pala}}{v_{viento}} = \frac{\omega_{rotor} \cdot r_{rotor}}{v_{viento}} = \frac{2\pi}{60} \cdot n_{rpm,rotor} \cdot r_{rotor}$$

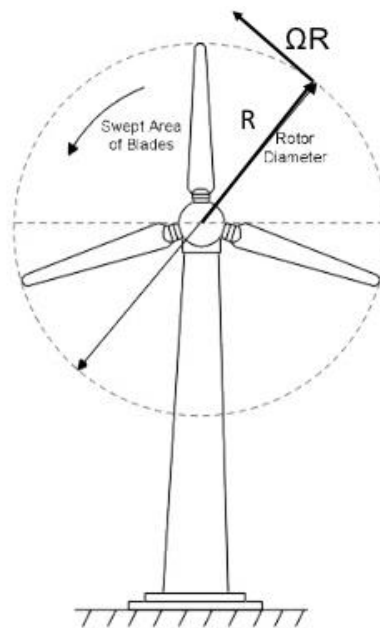


Ilustración 8 - Velocidad específica de un rotor (TSR)

Esta variable sirve para indicar la velocidad de rotación de las palas respecto a la velocidad del viento, dado que la velocidad angular del rotor no aporta la suficiente información por sí sola al no tener en cuenta la velocidad del viento que impulsa al rotor.

En la siguiente ilustración se pueden ver los coeficientes de potencia de diferentes tipos de rotores dependiendo de la velocidad específica λ del viento.

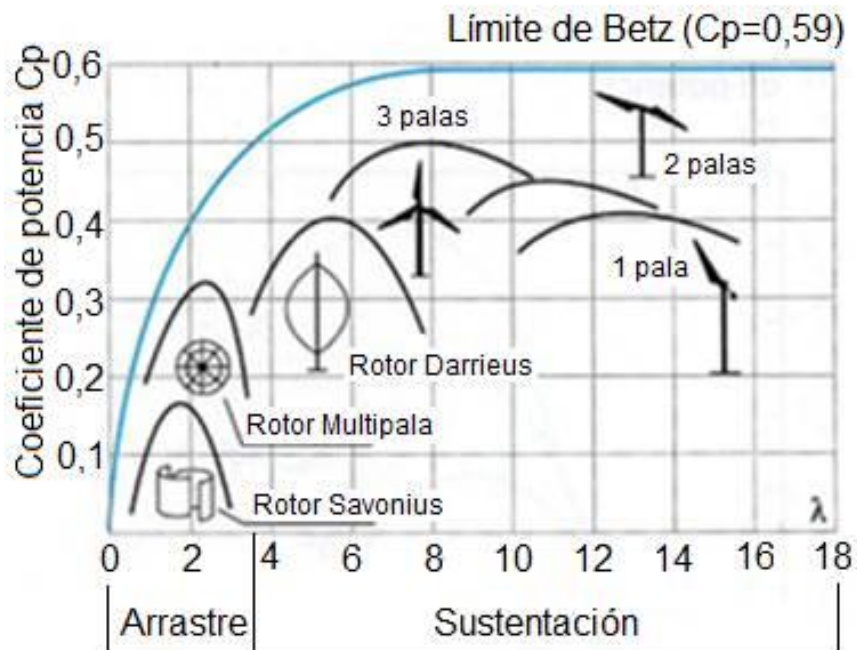


Ilustración 9 - Coeficientes de potencia en función de la velocidad específica del viento

Esta ilustración muestra que los rotores que funcionan con el principio de propulsión por fuerzas de sustentación son más eficientes y giran a velocidades mayores que las que funcionan mediante fuerzas de arrastre. Los rotores más eficientes que existen son los de eje horizontal con 3 palas, que son los más conocidos e implementados en parques eólicos.

En cuanto al rotor Savonius, es conocida su menor eficiencia respecto a otros tipos de rotores. Su mayor eficiencia varía según los estudios realizados con este tipo de rotores entre el 10% y el 30%, y esta eficiencia se alcanza con velocidades específicas entre 0,5 y 1. Estos rangos de velocidades específicas y eficiencias son muy amplios debido a que no existe un consenso firme en estos valores, ya que existen diferentes rotores Savonius (tradicional de 2 palas, con 3 palas, multipala, con 2 o más pisos de orientación angular diferente y helicoidales). Además, sus coeficientes de potencia pueden variar según el diámetro D del rotor, la altura H , la relación entre ambos y el espaciado e entre palas.

A continuación, se muestra una imagen con diferentes tipos de rotores Savonius:

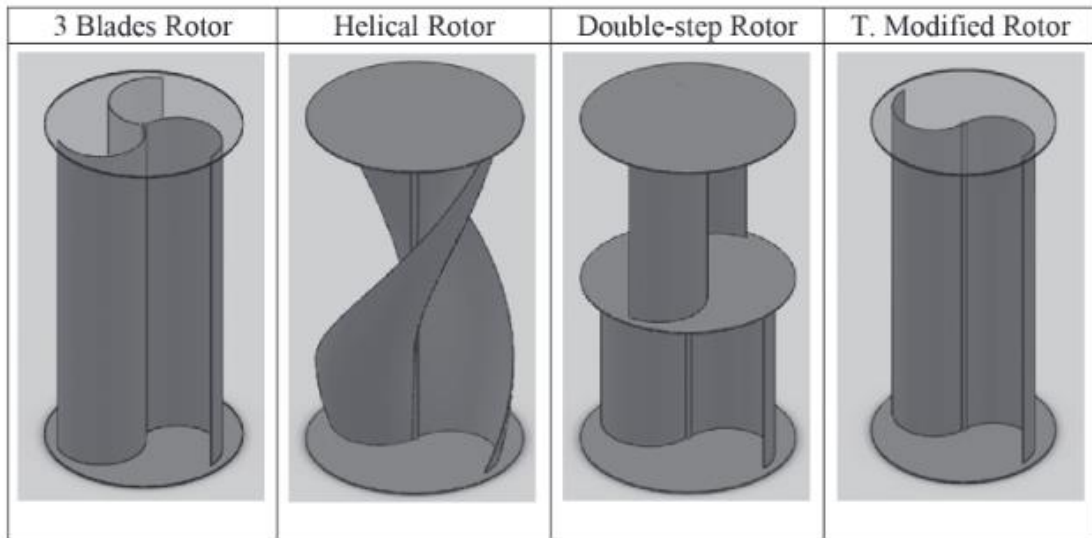


Ilustración 10 - Diferentes tipos de rotores Savonius

Según un estudio realizado con modelos computacionales de diferentes rotores Savonius (Argemiro Palencia Díaz, 2014), el coeficiente de potencia C_p dependiendo de la velocidad específica del rotor (TSR) se puede extraer de la siguiente gráfica:

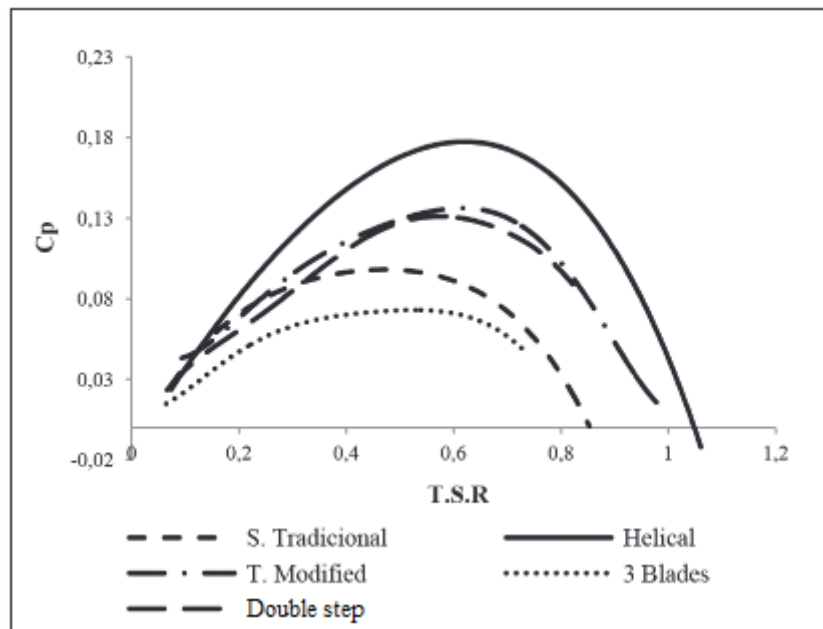


Ilustración 11 - Coeficientes de potencia de diferentes rotores Savonius en función de la velocidad específica

Se puede observar que el tipo de rotor más eficiente es el helicoidal, siendo éste el más complejo de fabricar por la forma ondulada de las palas.

El rotor con dos pisos (“*double step*”) presenta un coeficiente de potencia mayor que los rotores tradicionales de 2 y 3 palas. Este coeficiente es de 0,13 con una velocidad específica de 0,6. La ilustración anterior indica que es más recomendable para este proyecto diseñar un rotor de dos pisos que uno tradicional o uno de 3 palas.

La velocidad específica de un rotor depende de su geometría y de la carga que esté acoplada al rotor. En el caso de existir una carga conectada al rotor, como sería el caso de un generador eléctrico conectado al eje de rotación, es habitual que la velocidad específica de un rotor Savonius tradicional de 2 palas se establezca en el rango entre 0,5 y 1. Dicho de otro modo, se puede asumir que, estando el rotor bajo la influencia de una corriente de viento y en régimen estacionario, la velocidad lineal en el extremo de las palas de un rotor Savonius está acotada entre la mitad y el total de la velocidad del viento.

Si, por el contrario, un rotor Savonius no está bajo la influencia de una carga, su velocidad específica puede alcanzar valores superiores de hasta 1,5-1,7. Este hecho significa que es improbable que, en el caso de que el mecanismo de frenado del rotor fallase, la velocidad de un rotor sin carga acelerase demasiado y se originase una inestabilidad mecánica por las fuerzas centrífugas, ya que el rotor no aumentaría considerablemente su velocidad de giro.

Por último, es necesario conocer el par mecánico que existe en el arranque y en el punto de funcionamiento nominal del rotor. El coeficiente de par cuando un rotor está quieto se denomina coeficiente de par estático y suele poseer, en el caso de los rotores Savonius, un valor cercano al máximo alcanzable, que varía entre el 0,1 y el 0,3 y se da con velocidades específicas en torno a 0,3-0,6. Este hecho explica la facilidad de los rotores Savonius para generar un par de arranque considerable y su utilidad para aplicaciones que requieran un par relativamente alto.

Existe un cálculo similar al de la potencia para conocer el par máximo que se puede obtener con un aerogenerador. El valor del par máximo teórico se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$T_{viento} = \frac{\rho \cdot A \cdot r_{rotor} \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot D \cdot v^2}{4}$$

De este valor de par mecánico, un aerogenerador solamente puede extraer una fracción, de modo que a la relación entre par mecánico extraíble y par mecánico teórico que el viento puede ejercer se le llama coeficiente de par (C_m o C_T) y se expresa de la siguiente forma:

$$C_m = \frac{T_{max}}{T_{viento}}$$

En la siguiente gráfica proveniente del estudio mencionado anteriormente (Argemiro Palencia Díaz, 2014) se puede observar la variación del coeficiente de par en función del ángulo de giro momentáneo del rotor:

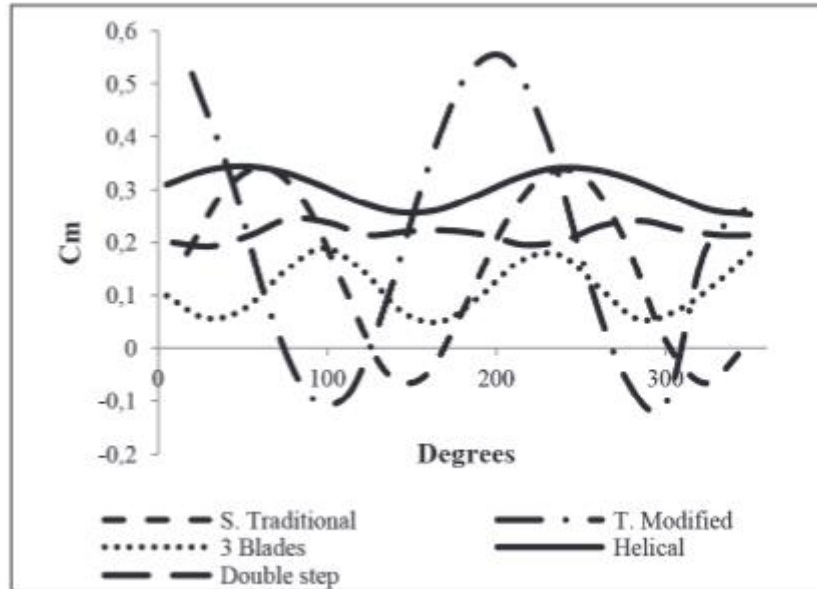


Ilustración 12 - Coeficiente de par de diferentes rotores Savonius en función del ángulo de giro

La gráfica muestra que el rotor Savonius tradicional de 2 palas y su variante modificada tienen un coeficiente de par con valores máximos mayores, pero con una oscilación senoidal mayor. Esto significa que aportan un par alto en dos instantes de tiempo concretos dentro de un periodo de revolución del rotor, pero también alcanzan en algunos momentos valores negativos. En cuanto al par, es preferible que las oscilaciones sean de menor amplitud y con el valor medio más alto posible. Este fenómeno se da en el rotor helicoidal, con un coeficiente de par en torno al 0,3. En el caso del rotor con dos palas y dos pisos (*“double step”*), el coeficiente de par medio es de 0,22 y la amplitud de la oscilación es baja, de modo que este rotor aporta un par relativamente constante, con lo que es un rotor que cuenta también con buenas características en lo que respecta al par mecánico extraíble del viento.

1.4 - Tipos de máquinas eléctricas y generación de potencia eléctrica

Para convertir la potencia mecánica extraída del viento en potencia eléctrica, es necesario acoplar al eje de rotación una máquina eléctrica actuando como generador.

Existen dos tipos básicos de máquinas eléctricas: las que generan corriente continua y las de corriente alterna.

Los generadores de corriente continua, también conocidos como dinamos, están constituidos por múltiples devanados situados en el rotor y que están sometidos a un campo magnético estático producido por imanes permanentes o por un inductor electromagnético. Este tipo de máquina eléctrica necesita conmutar los circuitos eléctricos que están conduciendo corriente en cada momento para garantizar el movimiento constante en la misma dirección. Para conseguir este propósito, estos generadores poseen escobillas que entran en contacto con un colector de delgas, de forma que se activan eléctricamente diferentes devanados en cada instante.

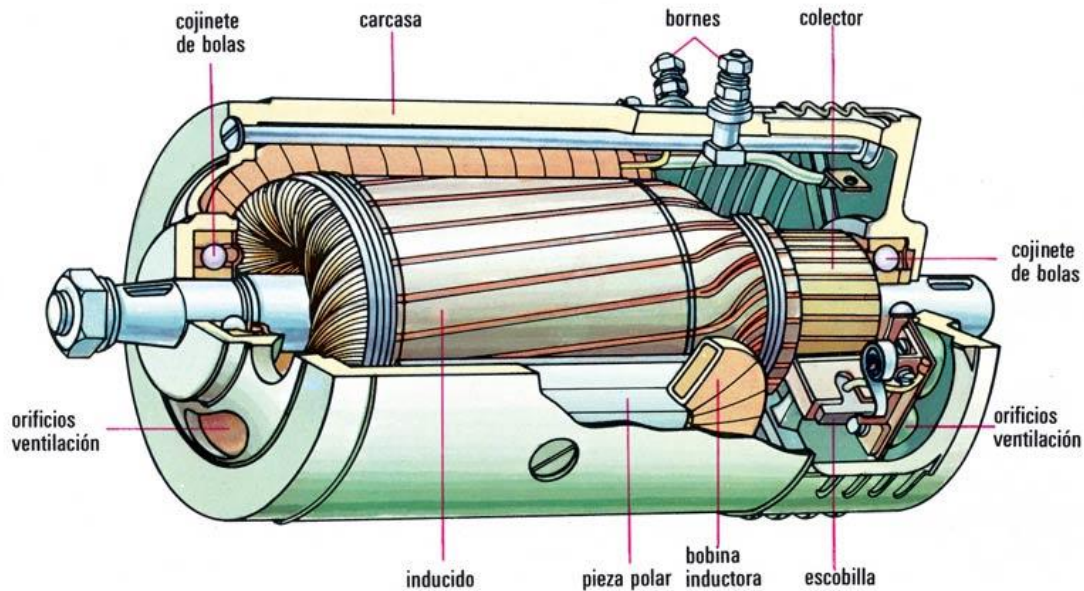


Ilustración 13 - Motor/Generador de corriente continua (dinamo)

Este tipo de generadores se pueden utilizar en aerogeneradores de poca potencia en los que se desee que la tensión de salida sea continua. El motivo por el que no se utilizan en la generación de mayores potencias es porque poseen una estructura de devanados y conexiones más compleja y porque son poco eficientes debido a las pérdidas que existen debido al rozamiento de las escobillas con las delgas. Además, este rozamiento constante desgasta las escobillas y éstas deben ser renovadas cada cierto tiempo, aumentando así los costes de mantenimiento.

Sin embargo, existe otra manera de obtener corriente continua sin necesidad de utilizar un generador DC: la generación de corriente alterna y su posterior rectificación con diodos. Esta forma de generación es más eficiente e implica menores pérdidas y mayor eficiencia.

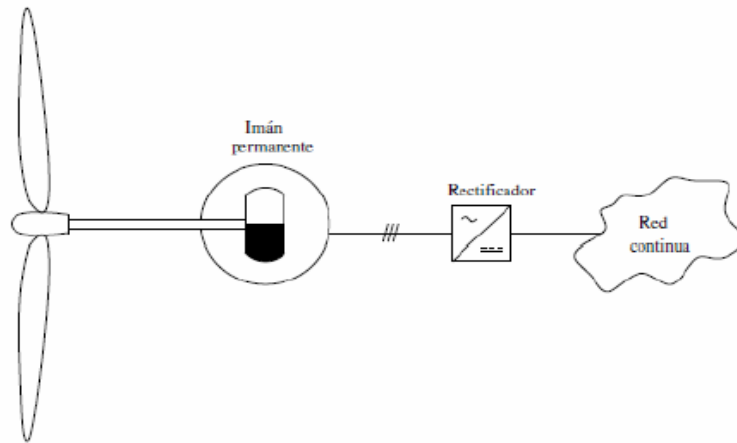


Ilustración 14 - Generación de corriente continua con un generador de corriente alterna y rectificación

En este caso, la máquina eléctrica que se utiliza es un generador de corriente alterna, también conocido comúnmente como alternador.

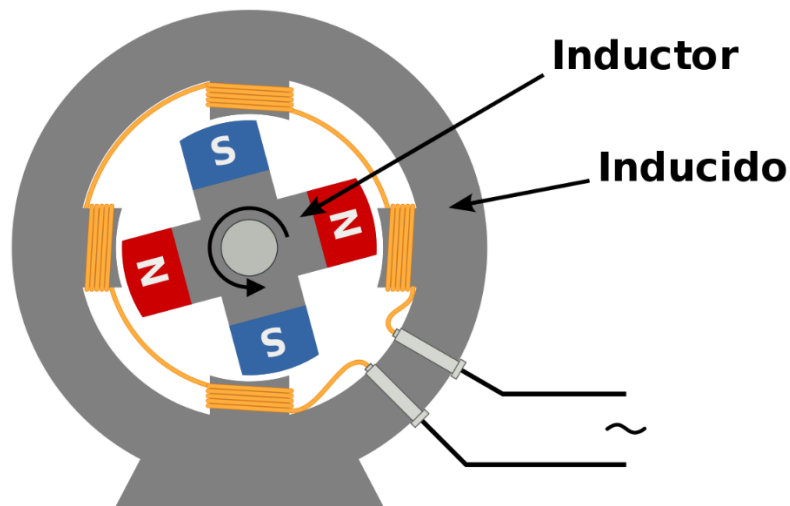


Ilustración 15 - Motor/Generador de corriente alterna (alternador)

Estas máquinas pueden funcionar en modo síncrono o asíncrono: si la velocidad de giro del rotor está sincronizada con la frecuencia de la corriente alterna, se trata de un generador síncrono, mientras que si existe un desfase de velocidades (deslizamiento) entre ambas magnitudes, el funcionamiento de la máquina eléctrica sería asíncrono.

El uso habitual de una máquina eléctrica de corriente alterna en modo asíncrono es como motor, no como generador, y el diseño más conocido es el motor “jaula de ardilla”. Sin embargo, para este proyecto interesa la generación de electricidad, por lo que el modo de funcionamiento asíncrono es descartable.

En los alternadores funcionando en modo síncrono, la relación entre la velocidad de giro del rotor n y la frecuencia f de la corriente eléctrica alterna es la siguiente:

$$\frac{n_{rpm}}{60} = \frac{f}{p}$$

En esta ecuación, p es el número de pares de polos magnéticos en el rotor. Dado que en un generador puede haber varios pares de polos, la transición entre un polo norte y el siguiente polo norte no implica un giro del rotor de 360° , sino una fracción de este ángulo. En una máquina eléctrica tetrapolar, es decir, con 4 polos o, lo que es equivalente, 2 pares de polos, un giro de 180° en el rotor ya implica un ciclo completo eléctrico en la corriente alterna.

En los aerogeneradores instalados en parques eólicos se utilizan estos generadores con un devanado trifásico, es decir, con 3 devanados desfasados entre ellos en 120° . Así se aumenta la potencia generada. Dado que la velocidad de giro del rotor de un aerogenerador no siempre se mantiene constante, se suele rectificar la corriente alterna a continua para, después, invertirla a una frecuencia constante de 50 Hz (en Europa, Asia y África) y 60 Hz (en el continente americano). La rectificación puede, además, estar controlada por tiristores para regular el voltaje generado mediante la elección de un ángulo de disparo de los tiristores determinado.

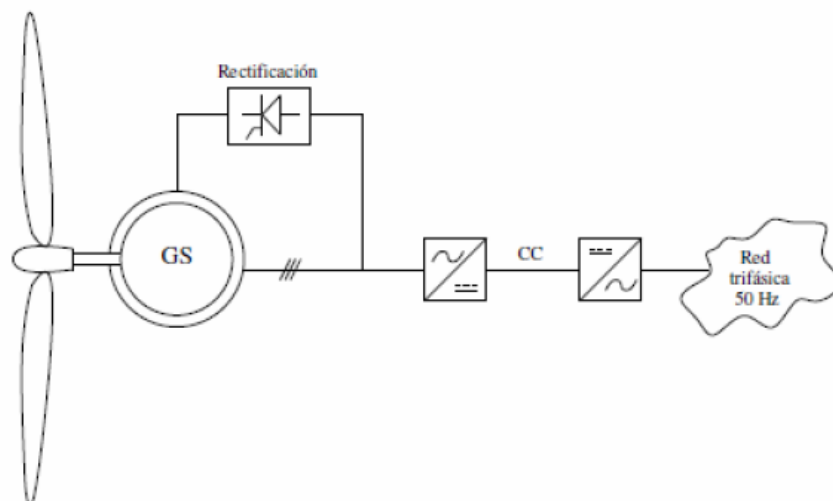


Ilustración 16 - Generación de corriente alterna, rectificación e inversión a 50 Hz para la red eléctrica

En este proyecto existe la posibilidad de utilizar un generador de corriente alterna y un rectificador de onda completa para rectificar dicha corriente con diodos y generar una corriente continua con la que cargar la batería que acumula la corriente eléctrica generada.

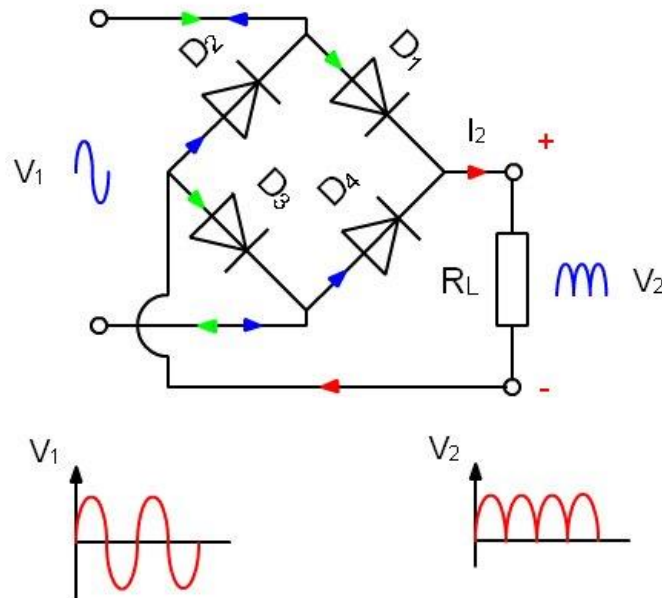


Ilustración 17 - Rectificador de onda completa

Sin embargo, se ha optado por utilizar un generador de corriente continua en este proyecto, dada la facilidad para encontrar proveedores y adquirir generadores adecuados en el mercado y también por su precio menor con respecto a los alternadores de imanes permanentes suficientemente potentes y, a la vez, compactos, ya que éstos suelen ser más caros debido al precio de los imanes.

El uso de alternadores con un inductor electromagnético se ha descartado por razones obvias, ya que sería necesario inyectar corriente previamente para generar electricidad, haciendo falta en este caso un “encoder” para determinar cuándo gira el rotor para aplicar corriente al inductor, un controlador de la inyección de corriente y un gasto de electricidad que reduciría la producción neta de potencia eléctrica del aerogenerador.

Tomando, por lo tanto, al generador de corriente continua como sistema de generación de electricidad, la tensión (o fuerza electromotriz) E inducida en este generador se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$E = V - R \cdot I = k_E \cdot \omega_{bobinas}$$

En esta ecuación, V es la tensión total existente en el circuito eléctrico del rotor bobinado, R es la resistencia interna del generador, I es la intensidad de corriente en las bobinas, $\omega_{bobinas}$ es la velocidad angular del rotor bobinado y k_E es la constante de proporcionalidad que existe entre la velocidad del rotor y la fuerza electromotriz del generador. Los valores numéricos de esta constante y de la resistencia interna del

generador suelen indicarse en los datos que aporta el fabricante. Se puede afirmar que, cuanto más rápido gire el rotor, mayor será la tensión generada. Dado que es habitual utilizar un engranaje reductor en los motores para reducir la velocidad de giro y aumentar el par mecánico entregado, en el caso de la generación de electricidad, un engranaje cumpliría la función contraria: reducir el par mecánico T y multiplicar la velocidad del rotor Savonius, de forma que el rotor bobinado del generador giraría “ i veces” más rápido que las palas, siendo i el factor de multiplicación del engranaje.

$$\omega_{bobinas} = \omega_{palas} \cdot i$$

$$T_{bobinas} = \frac{T_{palas}}{i}$$

La velocidad angular ω (en rad/s) está relacionada con la velocidad de giro n medida en revoluciones por minuto (rpm) de la siguiente manera:

$$\omega_{rad/s} = \frac{2\pi \cdot n_{rpm}}{60}$$

Por otra parte, la intensidad de corriente I es proporcional al par mecánico existente en el rotor bobinado, cumpliéndose esta relación:

$$T_{bobinas} = k_T \cdot I$$

Al combinar todas estas ecuaciones se puede deducir la expresión del par mecánico en el rotor bobinado en función de la velocidad del generador:

$$T_{bobinas} = k_T \cdot I = k_T \cdot \frac{V - k_E \cdot \omega_{bobinas}}{R} = \frac{k_T}{R} \cdot \left(V - k_E \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n_{bobinas,rpm} \right)$$

Al plasmar esta ecuación en una gráfica de par-velocidad con diferentes tensiones en el circuito eléctrico del bobinado, se obtiene la siguiente ilustración:

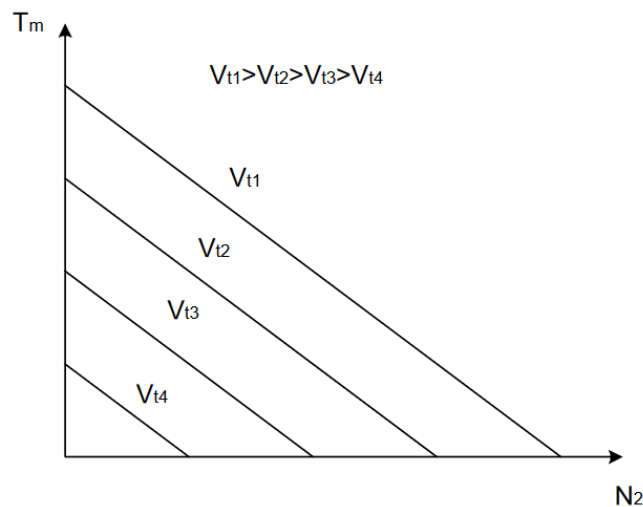


Ilustración 18 - Gráfica de par-velocidad en un motor/generador de corriente continua

El par mecánico decrece de forma lineal a medida que crece la velocidad de giro del rotor bobinado y, en el caso de querer velocidades o pares mecánicos altos, son necesarios voltajes mayores en el circuito eléctrico del generador.

Con estas ecuaciones se puede observar que es conveniente reducir el par mecánico relativamente alto del rotor Savonius y multiplicar su baja velocidad de giro para garantizar el voltaje suficiente y poder así cargar la batería. El punto de trabajo del aerogenerador oscilará, ya que la velocidad y el par mecánico dependen de la velocidad del viento que impulse al rotor. Sin embargo, se puede asumir que el rotor Savonius girará a una velocidad específica (o *TSR*) entre 0,5 y 1 debido a su comportamiento mecánico intrínseco y la velocidad específica de diseño del rotor será de 0,6 para maximizar la potencia y el par entregados.

En cuanto a la potencia mecánica en el rotor bobinado del generador de corriente continua, se puede deducir la ecuación que la describe relacionándola con las variables eléctricas del generador de la siguiente forma:

$$P_{mec}(\omega) = T(\omega) \cdot \omega = \frac{k_T}{R} \cdot (V - k_E \cdot \omega) \cdot \omega = \frac{k_T}{R} (V \cdot \omega - k_E \cdot \omega^2)$$

La potencia mecánica en función de la velocidad angular ω es, por lo tanto, una función parabólica abierta hacia abajo, con un punto de máxima potencia para la siguiente velocidad angular:

$$\frac{dP_{mec}(\omega)}{d\omega} = \frac{k_T}{R} (V - 2k_E \cdot \omega)$$

Si se iguala esta ecuación a 0, se obtiene:

$$\omega = \frac{V}{2 \cdot k_E}$$

Con esta velocidad angular, la potencia mecánica máxima en el rotor bobinado del generador es:

$$P_{mec} \left(\omega = \frac{V}{2 \cdot k_E} \right) = \frac{k_T \cdot V^2}{4 \cdot k_E \cdot R}$$

1.5 - Rendimiento total del aerogenerador

Es importante diferenciar y estudiar los efectos de las variables mecánicas, eléctricas y electrónicas del sistema del aerogenerador en conjunto para conseguir el máximo rendimiento global posible pese a las limitaciones técnicas que se derivan del uso del aerogenerador en el ámbito doméstico y de su instalación en casas, azoteas, tejados o jardines, y pese a las limitaciones económicas, ya que un requisito importante para la producción y comercialización masiva de este producto es su bajo coste.

Las limitaciones nombradas anteriormente han llevado a escoger un rotor de tipo Savonius por su seguridad, baja emisión de ruido y fácil producción y montaje, y la máquina eléctrica escogida es un generador de corriente continua, cuyo precio y disponibilidad en el mercado es mayor que en el caso de pequeños alternadores.

Partiendo de estas premisas, se puede estudiar cómo alcanzar rendimientos máximos diseñando un rotor Savonius eficiente y escogiendo el motor de corriente continua y el sistema de transmisión de potencia mecánica (y multiplicación de revoluciones) adecuados para la velocidad, el par y la potencia nominal del rotor.

Una mejora del rendimiento del rotor se consigue utilizando dos pisos diferentes en el rotor con las palas de cada piso desfasadas 90° entre ellas. De esta manera se consigue que el viento encuentre en todo momento una cara de las palas que esté orientada de forma óptima para recoger la potencia mecánica, o, dicho de otro modo, que la frecuencia con la que una de las palas presenta la cara con mayor resistencia aerodinámica sea el doble, de forma que la potencia y el par entregados por el rotor sea más constante y la velocidad del rotor no oscile tanto en torno a su velocidad específica de diseño.



Ilustración 19 - Rotor Savonius con dos pisos

Por otra parte, se ha optado por colocar dos palas en cada piso, ya que el coste de los materiales aumenta con cada pala que se instale y, además, un mayor número de palas no mejora sustancialmente su eficiencia, de hecho, puede reducirla, ya que cada pala rotando alrededor del eje posee un momento de inercia que debe ser superado por el par mecánico del rotor. Esto significa que un mayor número de palas puede reducir la velocidad de giro del rotor, alejándose así de la velocidad específica de diseño y, por lo tanto, del punto de máxima potencia extraíble.

Existe un valor óptimo para el espaciado e entre palas que maximice la potencia del rotor Savonius. Este valor debe ser una sexta parte del diámetro d de una pala. No se debe confundir este diámetro con el diámetro del rotor (D).

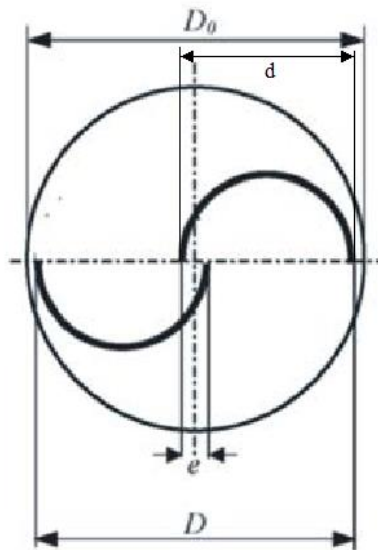


Ilustración 20 - Vista desde arriba de un rotor Savonius

En cuanto al generador de corriente continua, es importante escoger correctamente uno cuyo máximo rendimiento (indicado por el fabricante) se dé cerca de las condiciones de trabajo nominales del rotor (velocidad y par). El rendimiento usual en los motores de corriente continua es del 60%, lo cual se debe al rozamiento de las escobillas con las delgas.

Lamentablemente, si se usa un engranaje multiplicador para elevar la velocidad de giro del rotor bobinado del generador, es inevitable contar con pérdidas por rozamiento en los engranajes. El rendimiento de un engranaje tiene un valor aproximado de un 90%. Sin embargo, su función es imprescindible para garantizar un voltaje suficiente (5 V) y, así, poder cargar la batería.

Teniendo en cuenta el rendimiento mecánico del engranaje y el rendimiento eléctrico del generador, la potencia eléctrica útil será la siguiente:

$$P_{el} = P_{mec,Savonius} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{el} = P_{mec,Savonius} \cdot 0.6 \cdot 0.9 = 0.54 \cdot P_{mec,Savonius}$$

1.6 - Eficiencia y rentabilidad previsible de una instalación eólica, factor de capacidad

Existe un procedimiento usual en el campo de las energías renovables para determinar si, a priori, una instalación para generar energía es eficiente y, por lo tanto, previsiblemente rentable. Ya que, en este tipo de energías, especialmente en la eólica y en la solar, la velocidad del viento y la densidad energética de los rayos solares es altamente variable durante el tiempo (incluso durante un día concreto), la instalación posee una potencia nominal que sólo es generada durante una parte del tiempo total en el que la instalación está activa.

Esta parte del tiempo durante la cual la potencia eléctrica generada es mayor o igual a la nominal suele contabilizarse durante un año entero y a este porcentaje de tiempo se le denomina “factor de capacidad” o también “factor de carga” y “factor de planta”. Si el factor de capacidad supera el valor del 25%, una instalación eólica es eficiente y, por lo tanto, aparentemente factible en términos económicos. Esto significa que un aerogenerador que funcionase a su potencia nominal durante 6 horas al día o 3 meses al año y que, posteriormente, no generase energía, sería considerada una instalación eficiente. Sin embargo, este método es poco preciso y la potencia nominal del aerogenerador no es un valor sencillo de calcular debido a la intermitencia temporal de la energía eólica.

De todos modos, en este proyecto se llevará a cabo un cálculo más preciso de la energía y la rentabilidad al calcular la distribución temporal de potencias durante el año en base al modelo matemático conocido como distribución de Weibull, el cual se utiliza en meteorología y, especialmente, en energía eólica para predecir la variabilidad y probabilidad de que una velocidad de viento concreta se dé, siendo conocida la velocidad media anual (véase: Fase 2).

Además, la potencia obtenida mediante la energía eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, de modo que es preferible una generación de potencia con velocidades de viento altas durante un tiempo reducido que la generación con velocidades reducidas y constantes.

El siguiente ejemplo puede ayudar a visualizar el concepto. Un aerogenerador concreto genera una potencia proporcional al cubo de la velocidad del viento, cumpliendo la siguiente relación:

$$P = K \cdot v^3$$

La constante de proporcionalidad K engloba las variables geométricas de un rotor que afectan a la potencia y que se mantienen constantes si se utiliza el mismo aerogenerador en este ejemplo comparativo.

Si este aerogenerador funciona todo el día con una velocidad del viento de 5 m/s, la potencia y la energía diaria producida será la siguiente:

$$P_1 = K \cdot (5 \text{ m/s})^3 = 125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot K$$

$$E_1 = P_1 \cdot t_1 = 125 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot K \cdot 24h = 3000 \frac{\text{m}^3 \cdot h}{\text{s}^3} \cdot K$$

Si, por el contrario, el aerogenerador aporta potencia durante la mitad del día con una velocidad del viento de 10 m/s, los valores de potencia y energía producida durante ese día son:

$$P_2 = K \cdot (10 \text{ m/s})^3 = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot K$$

$$E_2 = P_2 \cdot t_2 = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot K \cdot 12h = 12000 \frac{\text{m}^3 \cdot h}{\text{s}^3} \cdot K$$

Se puede observar que una velocidad del viento doble produce una potencia 8 veces mayor y que, por lo tanto, trabajar la mitad del tiempo con una velocidad del viento doble implica generar 4 veces más energía durante el periodo de tiempo observado. Esto significa que no solamente es importante conocer la velocidad media anual del viento en la zona de la instalación eólica, sino también la distribución temporal de las diferentes velocidades del viento, prestando especial atención al tiempo en el que existen velocidades altas.

Fase 2 – Velocidad media anual del viento, Distribución de Weibull

2.1 - Velocidad media anual del viento (Península Ibérica y resto del mundo)

Para diseñar el rotor Savonius y escoger un motor de corriente continua con engranaje multiplicador adecuado, es necesario saber primero la velocidad nominal a la que girará el aerogenerador. Esta velocidad de giro dependerá del diámetro y el momento de inercia del rotor, del par de carga resistente que ejerza el generador de corriente continua y, en última instancia, de la velocidad del viento en el lugar que esté instalado el aerogenerador. Ésta es la variable principal de la cual se derivan todos los parámetros de diseño del aerogenerador.

Por este motivo se ha decidido buscar en la base de datos oficial de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) los datos de la velocidad media del viento en diferentes zonas de España durante todos los días del año 2018 y, en base a estos datos, calcular la velocidad media anual del viento en dichas zonas.

En la siguiente tabla se pueden ver las velocidades medias anuales del viento según la zona de interés:

Zona	Velocidad media anual	Velocidad máxima registrada
Valencia, Aeropuerto	4,13 m/s	20 m/s
A Coruña	3,91 m/s	22,5 m/s
Zaragoza, Aeropuerto	4,12 m/s	37,5 m/s

Se han escogido estas tres zonas de interés por los siguientes motivos: Valencia puede servir como referencia del litoral mediterráneo, mientras que las zonas con mayores velocidades de viento registradas en la Península Ibérica son la costa gallega y las zonas montañosas situadas en el centro de Aragón.

El mapa con las velocidades medias de viento en la Península Ibérica se puede ver en la siguiente ilustración:

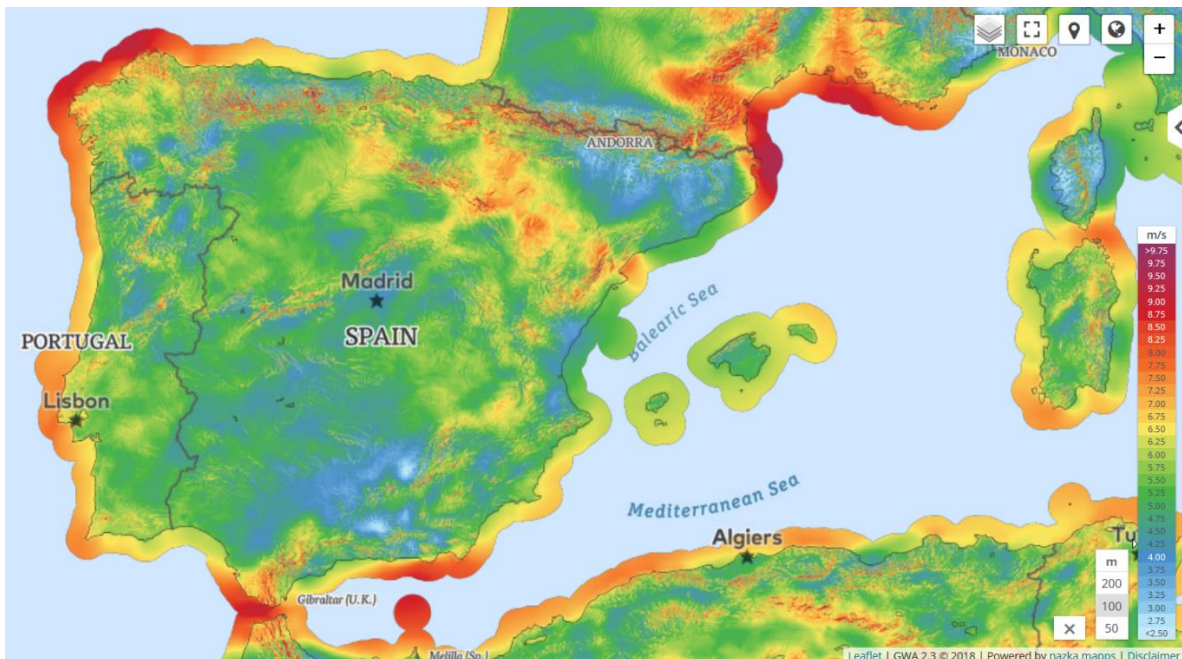


Ilustración 21 - Mapa eólico de la Península Ibérica, velocidad del viento

Esta imagen, al igual que el resto de los mapas eólicos que se exponen en esta sección, procede del “Global Wind Atlas”, un trabajo realizado por el Banco Mundial (*World Bank*) y la Universidad Técnica de Dinamarca.

Las zonas más montañosas de la Península Ibérica son, junto con las Islas Canarias y las zonas cercanas a la costa gallega y al Estrecho de Gibraltar, las que registran velocidades de viento mayores. Observando la tabla y el mapa eólico anteriores, se puede asumir que el viento tiene una velocidad media anual en la península entre 4-5 m/s.

Existen países con mayores velocidades medias anuales, lo cual puede aumentar la potencia y, por lo tanto, la rentabilidad del aerogenerador de forma considerable, ya que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento. En las próximas imágenes se muestra la distribución de la velocidad del viento en los diferentes continentes, pudiendo así comprobar qué países se beneficiarían más con la instalación de aerogeneradores.

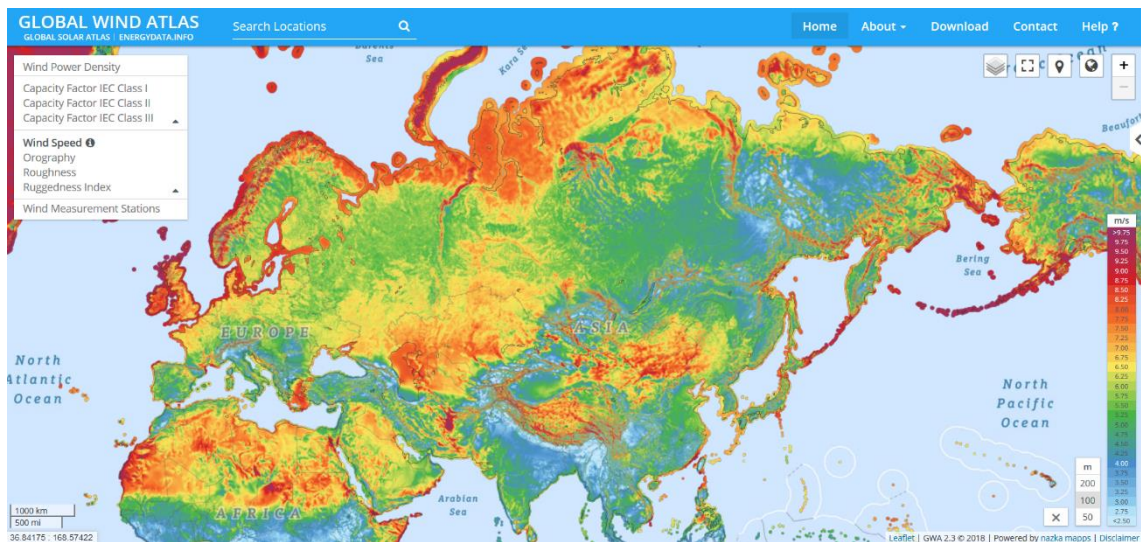


Ilustración 22 - Mapa eólico de Europa y Asia, velocidad del viento

Este mapa eólico muestra que los países con mayores velocidades de viento en Europa y Asia son los que tienen costa en el Mar del Norte (Noruega, Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, etc.), las islas y costas del Mar Egeo, la Península Arábiga, Irán, los países al este del Mar Caspio (especialmente, Kazajistán), las zonas cercanas al Himalaya, la zona de China limítrofe con Mongolia y las costas asiáticas que dan al Océano Pacífico. En muchas de estas zonas hay población viviendo en zonas rurales, montañosas o desérticas y sin acceso a la red eléctrica.

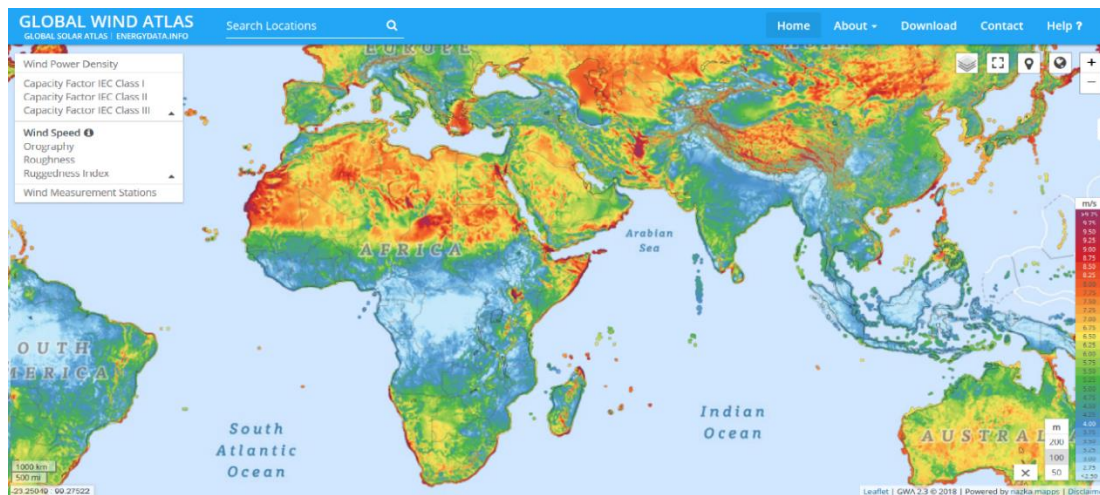


Ilustración 23 - Mapa eólico de África, velocidad del viento

En África destacan especialmente todos los países del Sáhara, especialmente la costa del Sáhara Occidental y Mauritania, el “Cuerno de África” (Somalia, Etiopía, Yibuti y Eritrea), Madagascar y los países sudafricanos (al sur del Congo). En la mayoría de estos países, la población sin acceso a la red eléctrica y en condiciones de pobreza absoluta es numerosa, por lo que son países donde se pueden necesitar más aerogeneradores y placas solares. En el caso de que exista renta disponible en estos países que no necesite ser destinada para cuestiones más prioritarias aún que la generación de energía eléctrica, éste puede ser un lugar de interés para la venta e instalación de aerogeneradores minieólicos.

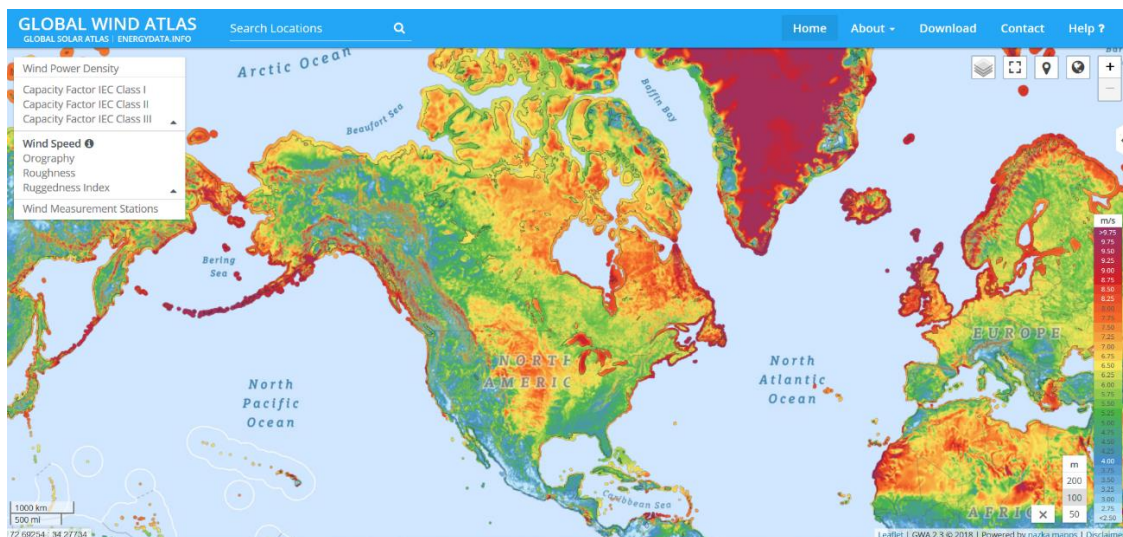


Ilustración 24 – Mapa eólico de Norteamérica, velocidad del viento

En Norteamérica destacan la zona central y la costa noreste de Estados Unidos, las costas y el noreste de Canadá y, por último, las costas en el Mar de Bering (Alaska).



Ilustración 25 – Mapa eólico de Sudamérica, velocidad del viento

En Sudamérica, la velocidad del viento crece conforme más al sur esté situada la zona. Destacan las zonas al sur de Chile y Argentina, así como el sur de la Cordillera de los Andes.

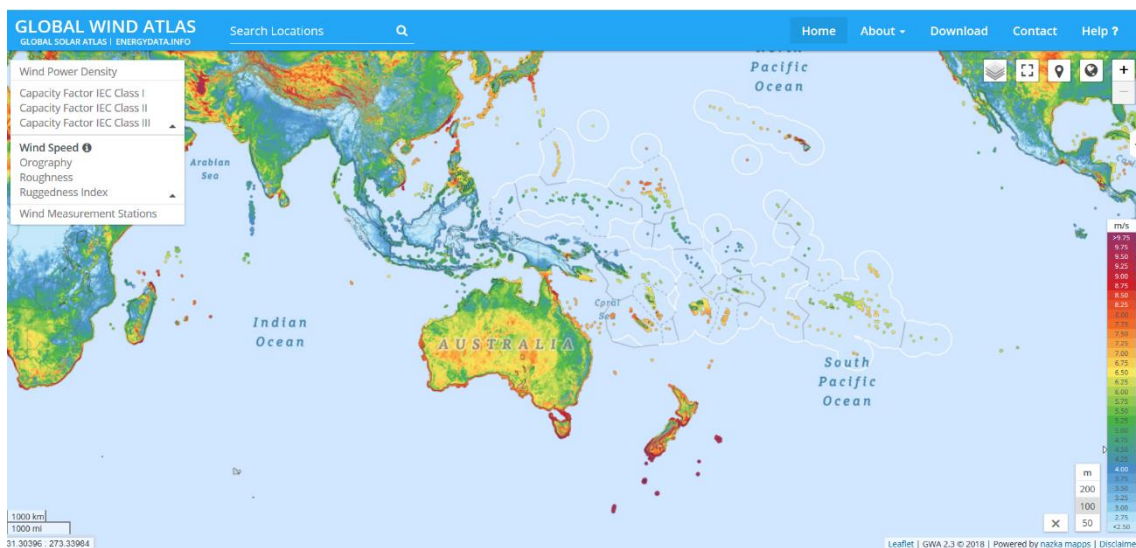


Ilustración 26 - Mapa eólico de Oceanía, velocidad del viento

En Oceanía, el potencial para construir aerogeneradores se sitúa especialmente en Australia y Nueva Zelanda, así como en las islas al sur del Océano Pacífico, las Islas Filipinas y la costa de Vietnam.

Por el contrario, Indonesia, Malasia y Papúa Nueva Guinea son países donde la instalación de aerogeneradores parece desaconsejable por sus bajas velocidades de viento.

2.2 - Distribución de Weibull y densidad de potencia eólica por superficie

En el apartado anterior se ha comprobado la velocidad media anual del viento en la Península Ibérica, que es de 4-5 m/s. Sin embargo, la velocidad media no es la indicada para calcular la potencia media que entrega el aerogenerador, ya que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento y, por este motivo, los flujos de viento con altas velocidades de viento proporcionan mucha más potencia que con las bajas, incluso si las velocidades altas se dan con poca frecuencia. Debido a este hecho, en este proyecto se ha optado por estimar la potencia dependiendo de las velocidades de viento y la frecuencia esperada con la que se dan.

Un método frecuente en la meteorología y la predicción de la velocidad del viento es el uso de la distribución de Weibull. Se trata de una distribución de probabilidad que describe con precisión la frecuencia (o probabilidad) con la que un valor concreto de la velocidad del viento se da en realidad.

La función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x, s, k) = \begin{cases} \frac{k}{s} \cdot \left(\frac{x}{s}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

En esta ecuación, x es la variable aleatoria, s es el factor de escala y k es el factor de forma. En el caso del viento, se puede utilizar la letra v (de velocidad del viento) en vez de la letra x , ya que la velocidad es la variable aleatoria que se está estudiando en este caso. Para conocer la probabilidad de que se dé una velocidad del viento concreta se utiliza un factor de escala s cercano, pero superior a la velocidad media del viento y un factor de forma $k = 2$. Una distribución de Weibull con $k = 2$ equivale a una distribución de Rayleigh de moda $\sigma = s/\sqrt{2}$.

A continuación, se muestran las distribuciones de Weibull para las velocidades medias anuales de 4 y 5 m/s, utilizando respectivamente los factores de escala s (o A según las siguientes gráficas) equivalentes de 4.51 y 5.64 m/s.

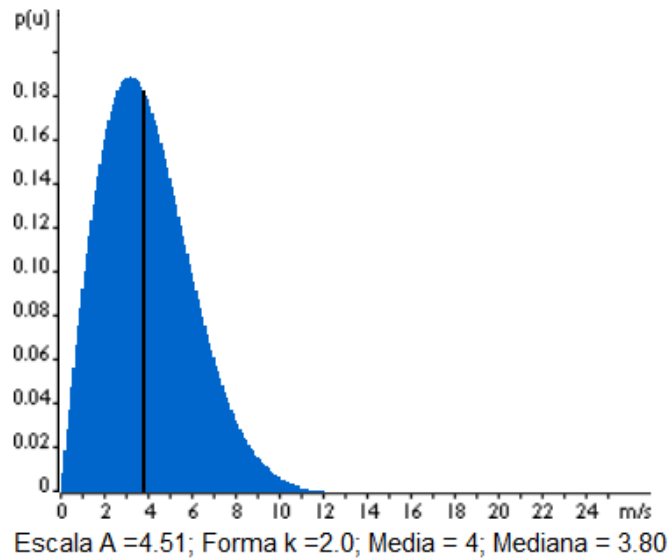


Ilustración 27 - Distribución de Weibull para la velocidad media de 4 m/s

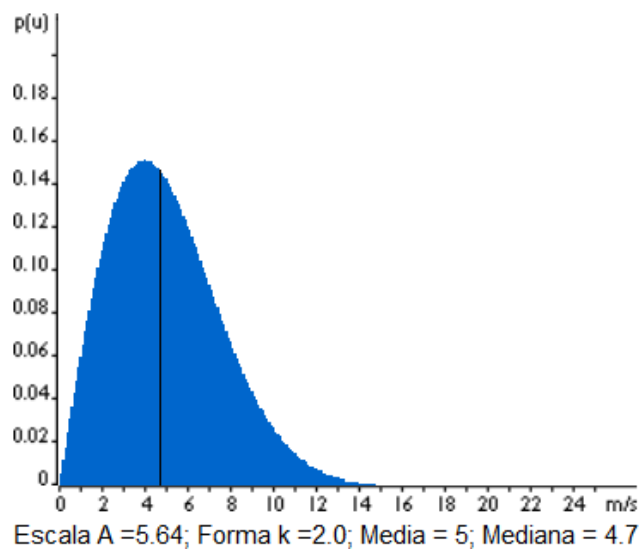


Ilustración 28 - Distribución de Weibull para la velocidad media de 5 m/s

Estas distribuciones muestran las diferentes velocidades del viento y la probabilidad previsible con la que surgen durante un año.

En este proyecto se ha escrito un código de Matlab para calcular y producir gráficas que faciliten el cálculo de la potencia real del aerogenerador en base a esta distribución de velocidades y probabilidades.

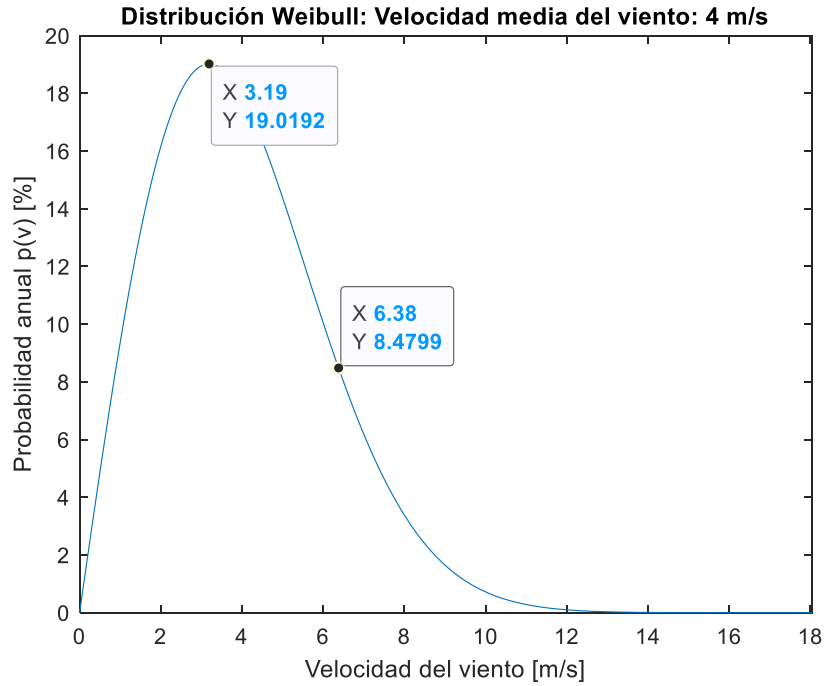


Ilustración 29 - Distribución de Weibull (Matlab) para la velocidad media de 4 m/s

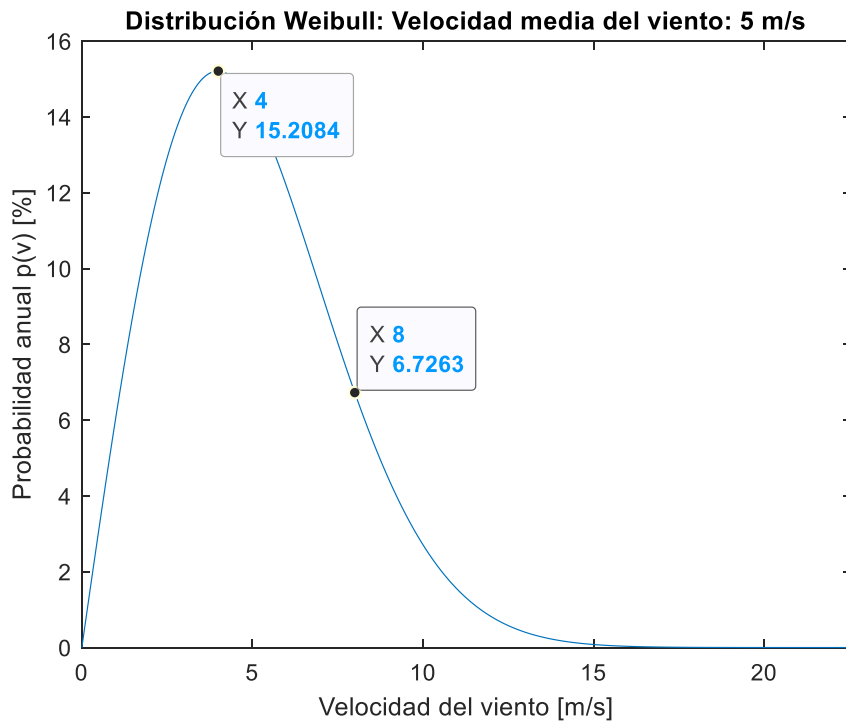


Ilustración 30 - Distribución de Weibull (Matlab) para la velocidad media de 5 m/s

Las gráficas obtenidas mediante Matlab de la distribución de la densidad de probabilidades son idénticas a las obtenidas mediante una herramienta virtual encontrada en Internet (Danish Wind Industry Association , s.f.), lo cual refuerza su validez.

Estas distribuciones de la densidad de probabilidad $p(v)$ deben multiplicarse por la curva de potencia por superficie $P_{sup}(v)$ (medida en W/m^2), generando así la curva de densidad de potencia $p(v) \cdot P_{sup}(v)$.

La ecuación de la potencia por superficie $P_{sup}(v)$ es la misma que la de la potencia del viento P , pero sin tener en cuenta el área de barrido del aerogenerador:

$$P_{sup}(v) = \frac{\rho \cdot v^3}{2}$$

La siguiente gráfica muestra la potencia mecánica por superficie de barrido del rotor que contiene el viento:

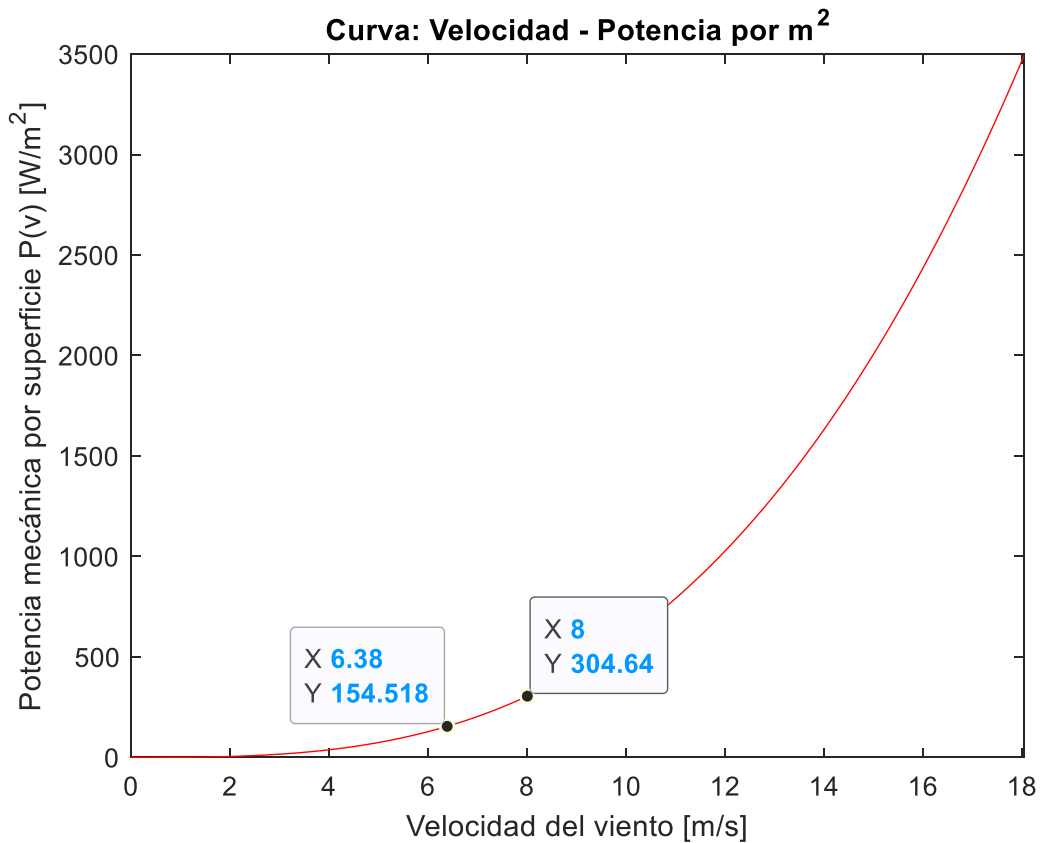


Ilustración 31 - Curva de Velocidad del viento - Potencia por m²

Al multiplicar esta curva de potencia por las distribuciones de la densidad de probabilidades de Weibull, se obtienen las curvas de densidad de potencia para 4 y 5 m/s.

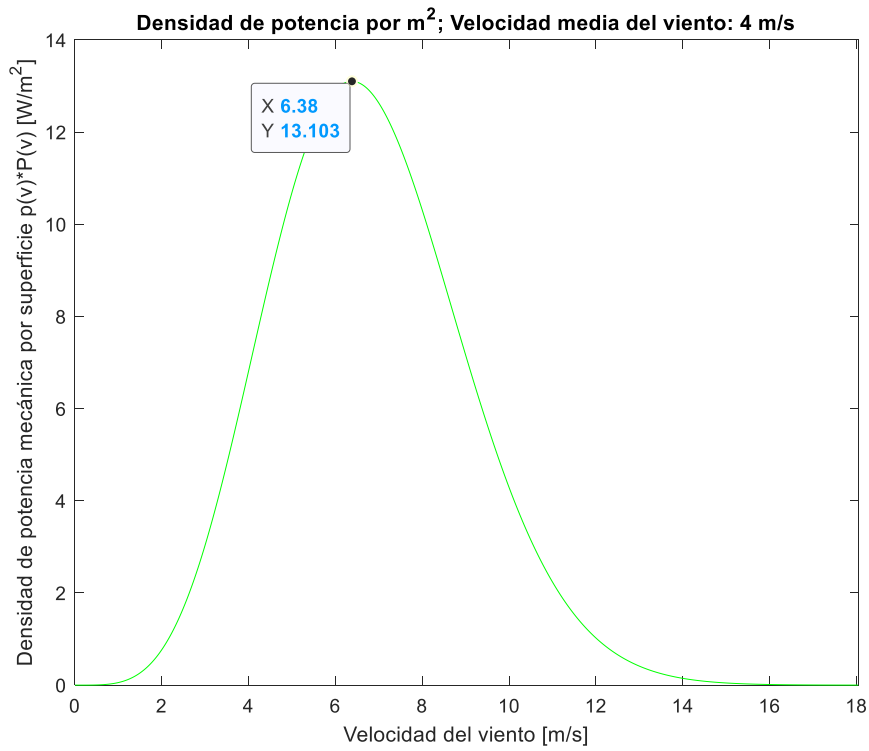


Ilustración 32 - Densidad de potencia por m² para una velocidad media del viento de 4 m/s

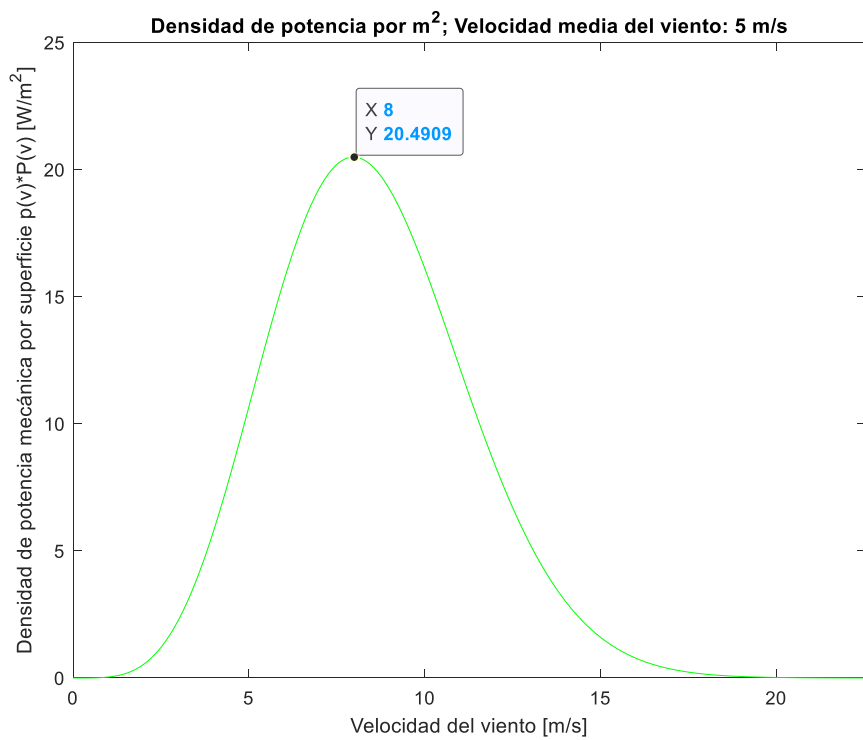


Ilustración 33 - Densidad de potencia por m² para una velocidad media del viento de 5 m/s

La integral de la curva de densidad de potencia aporta el valor real de la potencia mecánica media por superficie que contiene el viento durante el año entero.

$$P_{mec,sup,Weibull} = \int_0^{4s} p(v) \cdot P_{sup}(v) dv$$

Se puede utilizar como límite superior de la integral el valor de 4s, ya que las velocidades del viento a partir de este valor suelen tener una probabilidad y una densidad de potencia prácticamente nula.

Estos valores de potencia real suelen ser el doble de la potencia calculada simplemente con la velocidad media anual del viento. Esto significa que la potencia real estimada con la distribución de Weibull es aproximadamente el doble de la que se habría calculado con la velocidad media anual. Este hecho indica la importancia de este procedimiento, pues sin él se habría estimado la mitad de potencia generada de la que realmente se puede generar, duplicándose así erróneamente el tiempo de amortización del producto.

Después de calcular la potencia media por m² ponderada con la distribución de Weibull, se debe aplicar el coeficiente de potencia del rotor Savonius y su rendimiento total para saber qué fracción de esta potencia es la que se convertirá en potencia eléctrica útil. En la siguiente tabla se muestran los valores de las diferentes potencias calculadas. La fila "SP" contiene valores sin ponderar mediante la distribución de Weibull y la fila "P", los valores ponderados, que son los correctos y los que se deben de utilizar en el cálculo de la energía y la rentabilidad del producto.

	Variable	Fórmula	Valor numérico	
			Con v = 4 m/s	Con v = 5 m/s
SP	Potencia P _{sup}	$\frac{\rho \cdot v^3}{2}$	38.09 W/m ²	74.37 W/m ²
	Potencia P _{Betz, sup}	0.593 · P _{sup}	22.57 W/m ²	44.07 W/m ²
	Potencia P _{mec, Savonius, sup}	0.13 · P _{sup}	4.96 W/m ²	9.67 W/m ²
	Potencia eléctrica útil P _{el, sup}	0.54 · P _{mec, Sav., sup}	2.68 W/m ²	5.21 W/m ²
P	Potencia P _{sup, Wb.}	$\int_0^{4s} p(v) \cdot P_{sup}(v) dv$	72.56 W/m ²	141.9 W/m ²
	Potencia P _{Betz, sup, Wb.}	0.593 · P _{sup, Wb.}	43.03 W/m ²	84.15 W/m ²
	Potencia P _{mec, Savonius, sup, Wb.}	0.13 · P _{sup, Wb.}	9.43 W/m ²	18.45 W/m ²
	Potencia eléctrica útil P _{el, sup, Wb.}	0.54 · P _{mec, Sav., sup, Wb.}	5.09 W/m ²	9.96 W/m ²

Fase 3 – Cálculos previos de potencia mecánica y eléctrica, velocidad y par mecánico

Después de conocer el rango de velocidades del viento medias anuales que sirven de referencia en este proyecto (4-5 m/s) y la potencia eléctrica útil por metro cuadrado ponderada anualmente, se pueden utilizar las fórmulas expuestas en las fases 1 y 2 de este trabajo para calcular los valores de las dimensiones geométricas del rotor Savonius, así como la potencia, la velocidad y el par nominal que entregará.

Dado que no ha resultado sencillo encontrar materiales para las palas con diámetros más grandes, se ha optado por utilizar tuberías de PVC cortadas por la mitad con un diámetro de 0,2 m (o 200 mm).

El espaciado e entre palas será, por lo tanto, un sexto del diámetro de las palas:

$$e = \frac{d}{6} = \frac{0.2 \text{ m}}{6} \approx 0.033 \text{ m} = 33 \text{ mm}$$

El rotor tendrá, por consiguiente, un diámetro total D del siguiente tamaño:

$$D = 2d - e = 2 \cdot 0.2 \text{ m} - 0.033 \text{ m} = 0.367 \text{ m} = 367 \text{ mm}$$

Para maximizar la potencia del aerogenerador, es recomendable escoger la máxima altura posible para el rotor. La altura de los tubos de PVC era de 3m, pero la altura máxima encontrada en el catálogo de diferentes proveedores de los perfiles de acero necesarios para sujetar la estructura era de 2m. Además, una altura de 3m podría resultar excesiva en algunas casas y balcones, de modo que se ha optado por una altura ligeramente menor a 2m, ya que una parte de la altura de los perfiles de acero es necesaria para el emplazamiento del motor y de las bases donde reposan los rodamientos. La altura H escogida es de 1,7 m, con lo que el área rectangular de barrido de una pala es:

$$A = H \cdot D = 1.7 \text{ m} \cdot 0.367 \text{ m} \approx 0.623 \text{ m}^2$$

Con estas dimensiones, la relación entre la altura y el diámetro del rotor es la siguiente:

$$\frac{H}{D} = \frac{1.7 \text{ m}}{0.367 \text{ m}} \approx 4.6$$

Conociendo la superficie de barrido del viento A (0,623 m²), la densidad ρ del aire con una temperatura de 25°C (1,19 kg/m³), y el rango de la velocidad del viento v (4-5 m/s), y asumiendo que la velocidad específica λ del rotor es 0.6, se puede calcular la potencia del viento, la potencia máxima extraíble según el límite de Betz, la potencia

nominal del rotor Savonius, el par mecánico del viento, el torque estático y dinámico extraíble del viento y la velocidad nominal del rotor. Estas variables, la fórmula con las que se calculan y sus valores numéricos se muestran en la siguiente tabla:

Variable	Fórmula	Valor numérico	
		Con $v = 4$ m/s	Con $v = 5$ m/s
Potencia eléctrica útil media P_{el} (ponderación anual)	$A \cdot P_{el,sup,Wb.}$	3.18 W	6.21 W
Potencia eléctrica momentánea $P_{el,mom.}$ (sin ponderar)	$A \cdot P_{el,sup.}$	1.67 W	3.25 W
Par T_{viento}	$\frac{\rho \cdot A \cdot D \cdot v^2}{4}$	0.593 Nm	0.927 Nm
Par $T_{dinámico,rotor}$	$0.22 \cdot T_{viento}$	0.131 Nm	0.204 Nm
Velocidad $\omega_{rotor,rad/s}$	$\frac{\lambda \cdot v}{R} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot v}{D}$	13.09 rad/s	16.36 rad/s
Velocidad $\omega_{rotor,rev/s}$	$\frac{\omega_{rotor,rad/s}}{2\pi}$	2.08 $\frac{rev}{s}$ o Hz	2.6 $\frac{rev}{s}$ o Hz
Velocidad n_{rotor}	$60 \cdot \omega_{rotor,rev/s}$	125 rpm	156 rpm

La potencia y el par calculados de esta forma son una estimación teórica previa en base a los estudios que existen acerca de los rotores Savonius. Estos estudios se basan en geometrías concretas y unos proceden de mediciones empíricas, mientras que otros son resultado de un análisis computacional. Por este motivo, los valores reales de los coeficientes de potencia y par y la influencia de la velocidad específica del rotor en ellos pueden variar dependiendo de la geometría del rotor. Esto significa que los valores de diseño expuestos en la tabla anterior sirven de orientación pese al error que pueden contener, ya que conocer la potencia, el par y la velocidad del rotor a priori y con precisión mediante cálculos es muy complicado y no existe actualmente un consenso en las fórmulas del campo de la mecánica de fluidos y la aerodinámica que pretenden calcular estas variables con precisión.

También puede resultar de interés comprobar la potencia momentánea que puede entregar un rotor de estas características dependiendo de la velocidad del viento, ya que la instalación del aerogenerador en otras zonas y países con mayores velocidades de viento aumenta su potencia y rentabilidad.

Estos valores de potencia mecánica y eléctrica útil en cada momento (sin ponderar anualmente) se muestran en las siguientes tablas:

Velocidad del viento [m/s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potencia mecánica momentánea $P_{mec,mom}$ [W]	0.05	0.4	1.3	3.09	6.03	10.4	16.5	24.7	35.1	48.2
Potencia eléctrica útil momentánea $P_{el,mom}$ [W]	0.026	0.21	0.7	1.67	3.25	5.62	8.93	13.3	19	26

Velocidad del viento [m/s]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Potencia mecánica momentánea $P_{mec,mom}$ [W]	64.2	83.3	106	132	163	197	237	281	331	386
Potencia eléctrica útil momentánea $P_{el,mom}$ [W]	34.7	45	57.2	71.4	87.9	107	128	152	179	208

En estas tablas se comprueba que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento y que, por lo tanto, instalar el aerogenerador en un lugar con altas velocidades y frecuentes flujos de viento aumenta considerablemente la potencia y la energía producida.

Para finalizar estos cálculos previos se estima la energía producida por este aerogenerador durante un año entero. La energía eléctrica producida durante un periodo de tiempo concreto se puede calcular multiplicando la potencia media (ponderada anualmente) por el tiempo.

La energía producida al año con una velocidad media del viento de 4 m/s sería:

$$E_{el} = P_{el} \cdot t = 3.18 \text{ W} \cdot 365 \text{ días} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 27.86 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

En el caso de tener una velocidad media del viento de 5 m/s, la energía producida sería la siguiente:

$$E_{el} = P_{el} \cdot t = 6.21 \text{ W} \cdot 365 \text{ días} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 54.4 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

La energía eléctrica producida por este aerogenerador durante un año, siendo éste instalado en una zona promedio de la Península Ibérica en cuanto a velocidades de viento, oscilará entre ambos valores.

Para ejemplificar la cantidad de energía que se ha calculado, se puede calcular un equivalente diario a esta energía al dividirla entre los 365 días del año y el número de cargas de teléfonos móviles de última generación que se podrían realizar al día de media.

Un teléfono móvil de última generación tiene una batería de 4000 mAh, es decir, de 4 Ah. Dado que los móviles se cargan a una tensión constante de 5V, la energía que se utiliza para cargar un móvil es de 20 Wh (o 0.02 kWh).

En la siguiente tabla se puede ver la energía anual y la equivalente diaria que se genera y el número de cargas de teléfonos móvil que se pueden realizar diariamente de media:

Variable	Fórmula	Valor numérico	
		Con $v = 4$ m/s	Con $v = 5$ m/s
Energía eléctrica útil anual E_{el}	$\frac{P_{el} \cdot 24 h \cdot 365}{1000} \frac{W}{kW}$	$27.86 \frac{kWh}{año}$	$54.4 \frac{kWh}{año}$
Energía eléctrica útil diaria equivalente $E_{el,diaria}$	$P_{el} \cdot 24 h$	$76.32 Wh/día$	$149 Wh/día$
Número de cargas diarias de teléfonos móviles	$\frac{E_{el,diaria}}{20 Wh}$	$3.8 móviles/día$	$7.5 móviles/día$

Fase 4 – Diseño del primer prototipo mediante Solidworks

Antes de abordar el diseño del generador de 1,7 m de altura, se ha decidido realizar un primer diseño de un prototipo a pequeña escala del rotor Savonius con dos palas y dos pisos. Este prototipo sirve para corroborar su estabilidad mecánica, su modo de funcionamiento bajo la influencia del viento con y sin carga y, sobre todo, este prototipo sirve como fase previa de detección de posibles errores de construcción y como modelo de exposición. Además, pese a sus reducidas dimensiones, puede utilizarse con fines mecánicos de baja potencia, ya que para fines de generación eléctrica no resultaría útil.

Las dimensiones escogidas para este primer prototipo se pueden ver en la siguiente tabla:

Variable geométrica	Valor
Pisos	2
Palas por piso	2
Altura de una pala $H/2$	165 mm
Altura total H	330 mm
Diámetro de las palas d	90 mm
Espaciado de las palas e	15 mm
Diámetro total del rotor D	165 mm
Relación altura/diámetro H/D	2

Dado que se pretende imprimir las piezas de este prototipo en impresoras 3D con la limitación de que ningún lado de las piezas supere el valor de 18 cm (180 mm), se ha escogido el valor máximo posible para la altura de una pala $H/2$ y el diámetro exterior D de los perfiles base del rotor, que ha sido de 16,5 cm para no acercarse demasiado al límite de las impresoras.

Las siguientes imágenes muestran el aspecto global de este prototipo desde arriba y desde abajo. En la primera imagen, el prototipo está instalado en una pared.

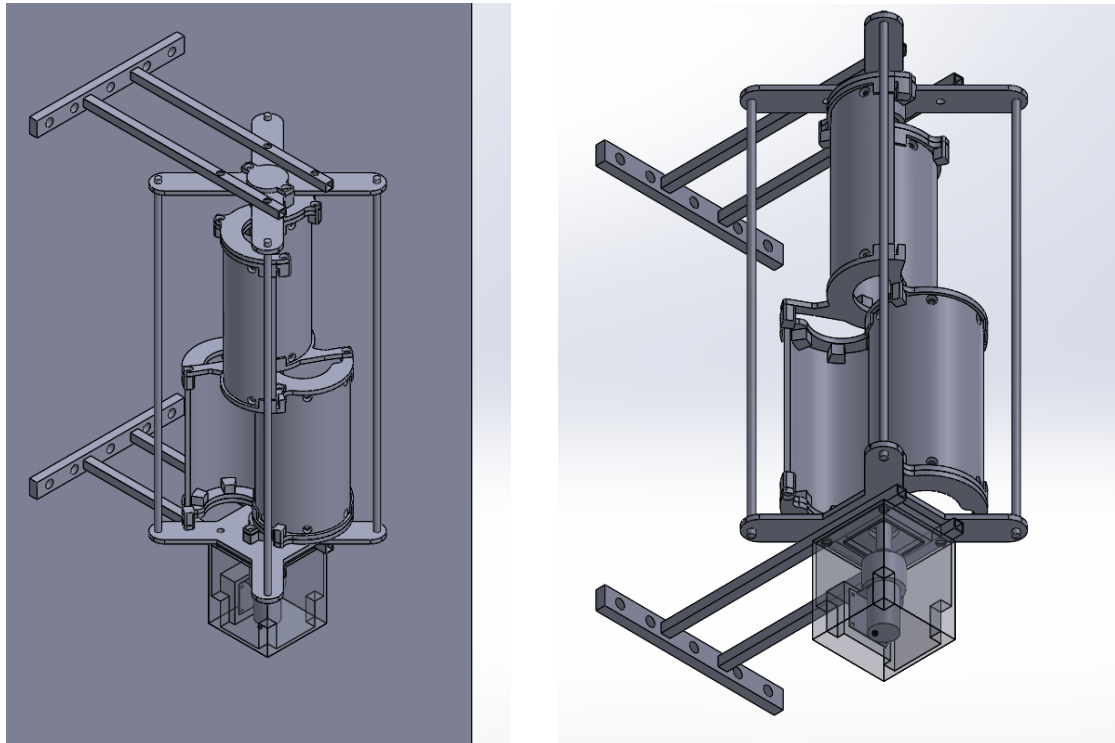


Ilustración 34 - Vistas desde arriba (izquierda) y abajo (derecha) del primer prototipo

El aerogenerador se compone de dos conjuntos de piezas: el conjunto móvil (o rotor) y el conjunto estático (o estator).

El rotor está compuesto, tal y como se ha indicado en las anteriores fases del trabajo, de dos pisos que contienen 2 palas cada uno. La orientación del par de palas inferior respecto al superior es de 90° . Es importante que la orientación de los pisos sea correcta para que ambos produzcan un giro del rotor en la misma dirección; de lo contrario, el par que se generase en un piso se contrarrestaría con el generado en el otro piso. Si están bien orientadas todas las palas, el rotor siempre tendrá a su izquierda la pala que recoge el viento (o perfil cóncavo) y, a la derecha, la pala que lo desvía (o perfil convexo). Con esta configuración, el rotor gira en sentido horario si se mira desde arriba.

En la siguiente ilustración se pueden observar las partes que componen el rotor:

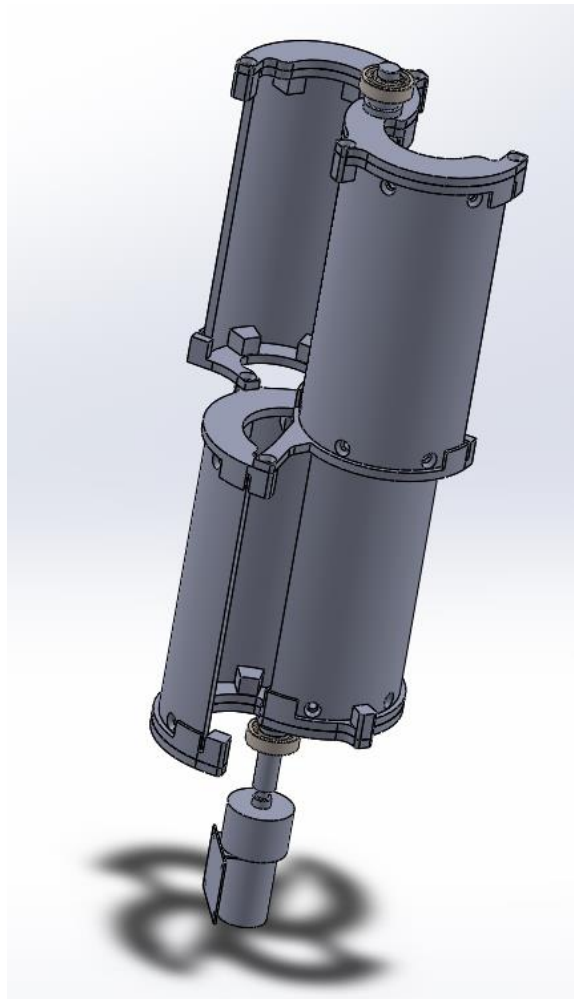


Ilustración 35 - Rotor del primer prototipo

Las cuatro palas anteriormente mencionadas están atornilladas a unos perfiles con forma de “S”. Se ha decido que los perfiles tengan esta forma sustituyendo los discos simples típicos de un rotor Savonius, de modo que el rotor tenga la solidez suficiente con menor inercia y, por lo tanto, menor resistencia a la aceleración angular.

Para atornillar las piezas entre ellas no se han utilizado tuercas, sino que se ha generado una rosca con herramientas de acero adecuadas para ello (terrajás), ya que este método era probablemente más confiable y preciso que imprimir la rosca directamente con la resolución natural de las impresoras 3D.

Existe un par de perfiles con una parte superior y otra inferior en la base, en el centro y en la parte superior del rotor. No se han diseñado los pares de perfiles juntos, ya que en la impresión 3D es conveniente que las piezas partan desde la base en su totalidad para evitar la necesidad de imprimir soportes de plástico adicionales. De esta forma, el par de perfiles se atornilla colocando juntas las bases planas de ambos.

Los perfiles extremos (en las parte superior e inferior) del rotor poseen unos pequeños cilindros que imitan los extremos de un eje. A estos extremos se acoplan los rodamientos, siendo éstos sujetos finalmente con un anillo de retención adecuado para el diámetro del “eje”.

El estator del primer prototipo tiene la siguiente forma:

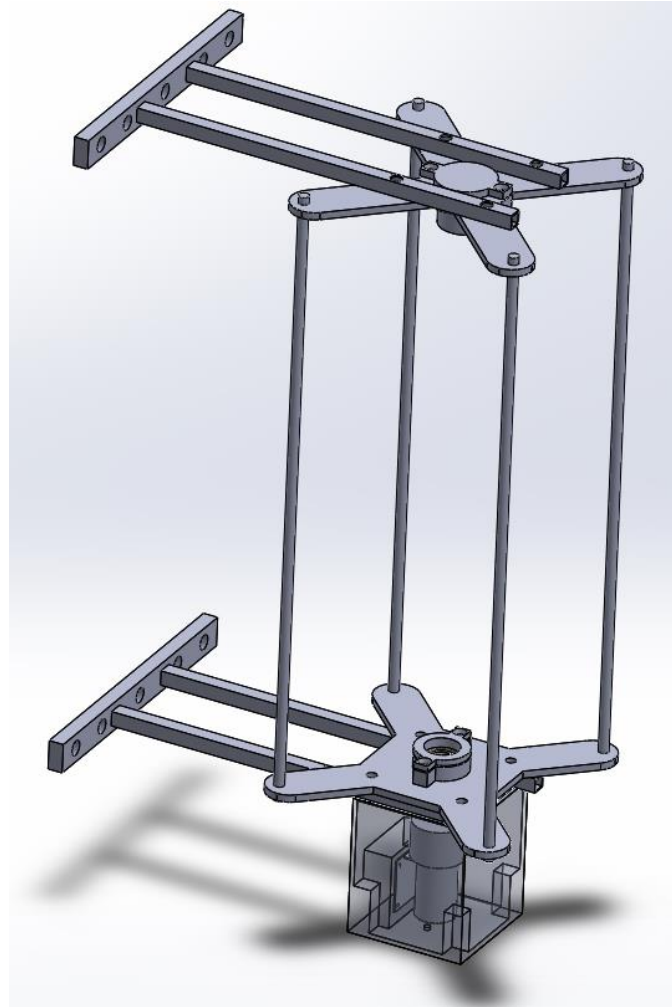


Ilustración 36 - Estator del primer prototipo

Este conjunto de piezas estará exento de movimiento y se compone de dos bases (superior e inferior) para almacenar los rodamientos. Estas bases se pueden atornillar a las estructuras de acero que colgarían de la pared. Se han incluido también unas varillas con rosca de 8 mm de diámetro que unen ambas bases y que servirían de única unión en caso de montajes horizontales desde la base sin estructuras de acero atornilladas a la pared. Además, estas varillas tienen la función secundaria de servir de delimitador visual para que las personas puedan saber en qué rango se encuentra acotado el rotor y, por lo tanto, donde no debe haber objetos que colisionen o impidan el movimiento del rotor.

El generador necesita estar atornillado en alguna pared para que solamente su eje sea móvil y el estator esté fijado en el espacio. Para realizar esta función se ha diseñado una caja (mostrada en transparente en las imágenes) que está atornillada a la base inferior del estator y que, a su vez, impide que el generador esté sometido a rayos solares, lluvia, humedad y polvo, teniendo así una función de aislante.

En la siguiente imagen se puede observar la forma en que los rodamientos están sujetos en este prototipo. El anillo interior del rodamiento está sujeto al perfil en forma de "S" correspondiente del rotor, mientras que el anillo exterior está sujetado axialmente (en la altura) por los dos lados mediante la base del estator y una pequeña pieza que presiona el lado opuesto del rodamiento. La base y la pieza deben estar atornilladas entre sí para hacer el efecto de sujeción del rodamiento.

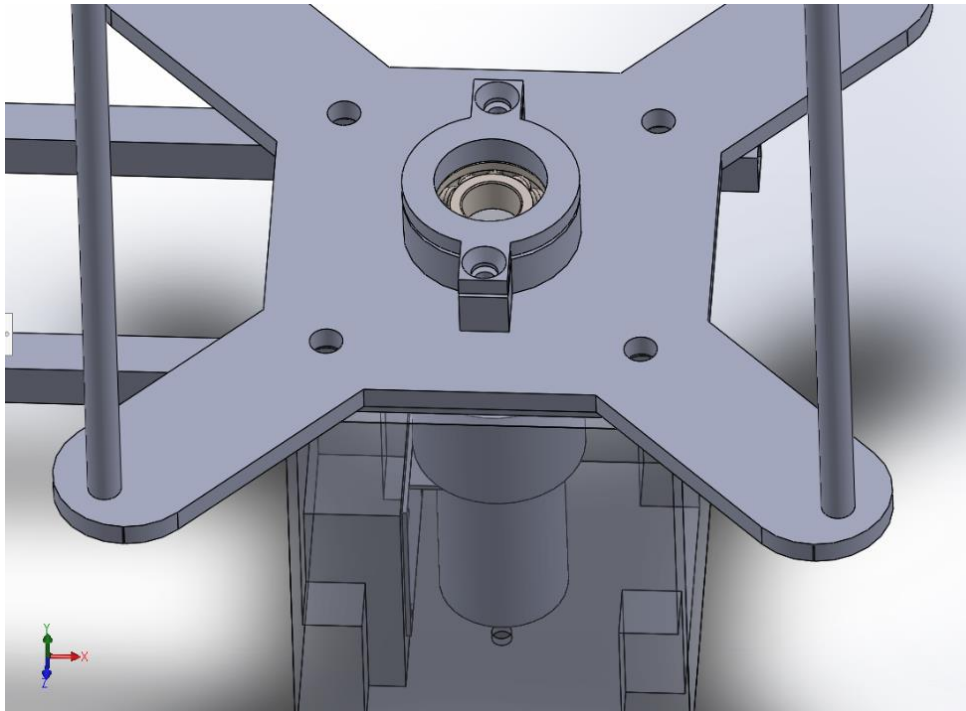


Ilustración 37 - Sujeción de los rodamientos

Fase 5 – Impresión en 3D y montaje del primer prototipo

Después de imprimir las piezas que componen el prototipo con impresoras 3D y adquirir tornillos y dos rodamientos, se ha procedido al montaje de este aerogenerador. El resultado se puede comprobar en la siguiente imagen:



Ilustración 38 - Imagen real del primer prototipo montado

Se ha colocado este prototipo bajo la influencia de un flujo de viento y su predisposición a girar sin carga es excelente, incluso con velocidades de viento muy bajas. Esto se debe a la baja inercia del rotor y a su reducido peso al estar compuesto íntegramente por plástico. Sin embargo, si se conecta el prototipo a un generador eléctrico, éste supondría una carga con un par resistente al cual el par del rotor no conseguiría superar, con lo que no arrancaría. Si se usaran generadores con un par de resistencia menor, el prototipo arrancaría y giraría, pero la tensión y la intensidad generadas serían demasiado bajas para ser de utilidad, de modo que este prototipo solamente puede tener una función práctica para tareas de índole mecánica que sean de baja potencia, no para generar electricidad con magnitudes considerables.

Fase 6 – Diseño del segundo prototipo (Solidworks) y análisis de esfuerzos mecánicos

Una vez se ha diseñado el primer prototipo y se ha comprobado su efectividad para girar bajo la influencia del viento, se ha diseñado un segundo prototipo con el tamaño suficiente (altura y diámetro) para generar una potencia eléctrica que pueda ser útil para cargar la batería portátil de 120 Ah.

Las dimensiones geométricas son las utilizadas en los cálculos previos de la fase 3 de este trabajo. En la siguiente tabla se muestran estos datos:

Variable geométrica	Valor
Pisos	2
Palas por piso	2
Altura de una pala $H/2$	850 mm
Altura total H	1700 mm
Diámetro de las palas d	200 mm
Espaciado de las palas e	33 mm
Diámetro total del rotor D	367 mm
Relación altura/diámetro H/D	4.64

La siguiente ilustración contiene el diseño del prototipo completo instalado en una pared:

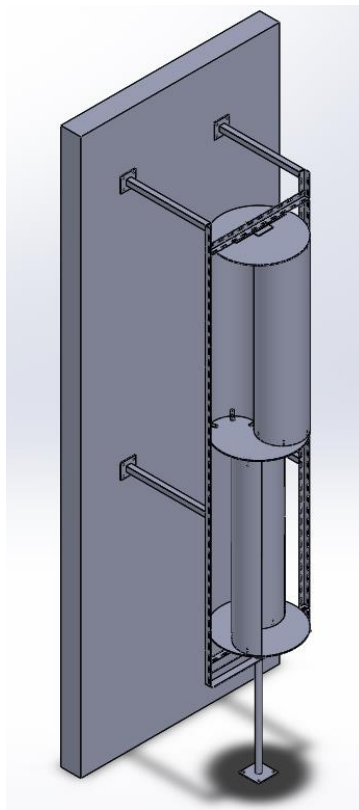


Ilustración 39 - Diseño del segundo prototipo instalado en una pared

El diseño comparte rasgos muy similares a los del primer prototipo. Las diferencias fundamentales son:

- La utilización de un disco redondo en vez de un par de perfiles en forma de "S".
- El uso de un rodamiento axial (en vez de radial) en la parte inferior del modelo para soportar mejor el peso del rotor (estimado en 4,18 kg).
- El uso de un estator formado por dos perfiles de acero verticales en vez de barras roscadas.
- El uso de un eje de acero que atraviese el rotor completo (vara de 12 mm de diámetro y 1,78 m de longitud).
- La introducción de una pata elevadora que sostenga el peso de la estructura y la eleve 0,5 m para aprovechar los vientos mayores que existen a medida que aumenta la altura (el viento a ras de suelo es siempre más lento y menos potente debido a la formación de capas límite por el rozamiento del viento con el suelo).

La importancia de este último punto se puede visualizar en la siguiente imagen, donde se muestra la formación de una capa límite un flujo de viento a velocidad constante al rozar con una superficie plana (como, por ejemplo, el suelo):

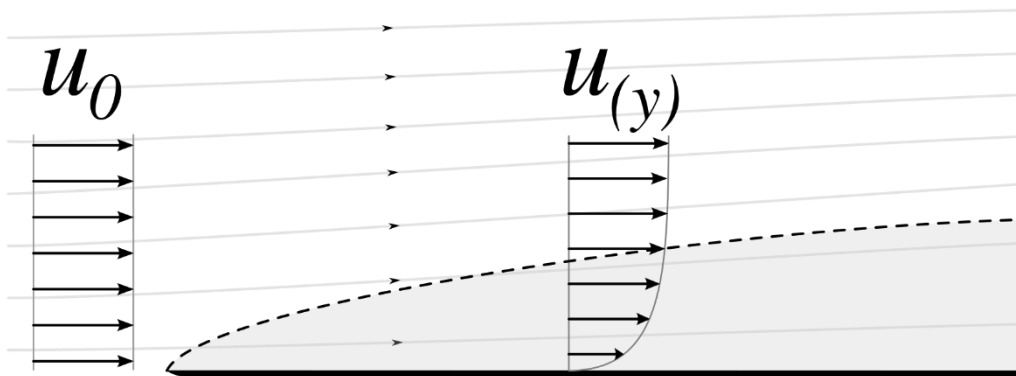


Ilustración 40 - Capa límite de un flujo de viento sobre una superficie plana

Si el prototipo está elevado 0,5 m por encima del suelo, la velocidad del viento que recibe es mayor. Si, además, el prototipo se instala en una terraza, aumenta esta velocidad y, en el caso de ser una terraza o azotea de un edificio alto, la velocidad del viento recibida es óptima y el viento puede acceder al rotor desde cualquier dirección.

Una manera de optimizar la instalación del prototipo si no se puede instalar en azoteas de edificios altos es escoger un emplazamiento en la esquina formada por dos paredes, ya que, así, el viento puede fluir hacia el rotor desde las direcciones que no provengan de la pared, es decir, el ángulo que abarca todas estas direcciones del viento es de 270° . Si el prototipo estuviese instalado en una pared plana, este ángulo sería solamente de 180° .

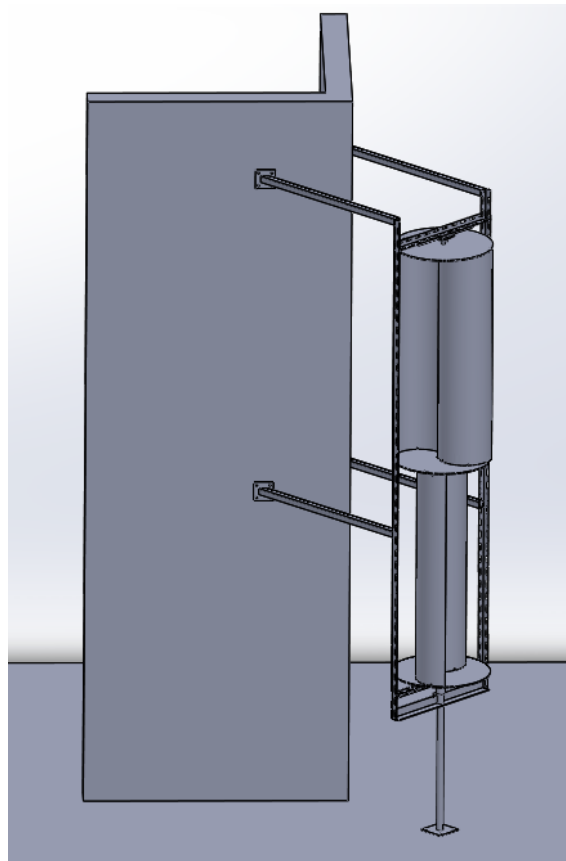


Ilustración 41 - Segundo prototipo instalado en una esquina

Los perfiles verticales de acero pueden atornillarse o soldarse a los soportes horizontales que unen la estructura con la pared.

Dado que el rotor es ligero y la estructura reposa sobre la pata elevadora y, por lo tanto, sobre el suelo, se considera que las fuerzas de gravedad provenientes del peso de las piezas no suponen un peligro ni una tensión excesiva en la estructura.

Las partes más críticas de la estructura son el eje de rotación y el acoplamiento entre el eje del rotor el eje del generador eléctrico, ya que son piezas con diámetros reducidos que soportan pares mecánicos relativamente altos.

Según las normas de diseño de un eje, el diámetro mínimo que debe tener un eje para soportar un par mecánico concreto se calcula mediante el procedimiento mostrado a continuación.

La tensión de corte debido a la torsión de un eje es la siguiente:

$$\tau_{xy} = \frac{T}{J_{xy}} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3}$$

Despejando la ecuación anterior hacia el diámetro d del eje se obtiene:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{xy}}}$$

El valor máximo admisible de la tensión de corte τ_{xy} para cualquier tipo de acero debe ser menor al valor con el que dicho acero se quebraría. El valor mínimo con el que ocurre esto al usar el tipo de acero más frágil de la gama de aceros para este tipo de usos (DIN 17 210) que existe es de aproximadamente 265 N/mm² (acero tipo C10). Para garantizar la seguridad del eje, se escoge un valor máximo admisible τ_{xy} de 200 N/mm². Este valor indica la tensión de corte máxima que se puede dar en los momentos más críticos, pero no de media.

El par mecánico máximo que se puede dar en el eje en condiciones de viento con velocidades extremas es el siguiente:

$$T_{m\acute{a}x} = C_{m,m\acute{a}x} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot D \cdot v_{m\acute{a}x}^2}{4}$$

Con un coeficiente de par máximo de 0,22 y una velocidad máxima de 40 m/s (ya que, según la fase 2 del proyecto, en Zaragoza se midió una racha de viento con una velocidad máxima de 37,5 m/s), el par máximo será el siguiente:

$$T_{m\acute{a}x} = C_{m,m\acute{a}x} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot D \cdot v_{m\acute{a}x}^2}{4} = 0.22 \cdot \frac{1.19 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.7 m \cdot 0.367 m \cdot \left(40 \frac{m}{s}\right)^2}{4}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 65.3348 Nm = 65\,334.8 Nmm$$

Por lo tanto, el diámetro mínimo que debe tener el eje del rotor es:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{xy}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 65\,334.8 Nmm}{\pi \cdot 200 N/mm^2}} = 11.85 mm$$

Este cálculo demuestra que un eje con un diámetro de 12 mm con acero de tipo C10 soportaría los vientos más críticos en la Península Ibérica. Sin embargo, si se usa aceros menos frágiles, como es el caso del acero tipo 17Cr3 ($\tau_{xy} = 520 \text{ N/mm}^2$), que es usado frecuentemente para los ejes de máquinas, la seguridad del eje estaría garantizada con un amplio margen.

En cuanto al acoplamiento entre el eje del rotor Savonius y el eje del generador de corriente continua, esta pieza es un cilindro con un diámetro de 16 mm con dos orificios, uno en cada base del cilindro. Los diámetros de estos orificios corresponden al diámetro de las dos piezas que se desea acoplar, que son 12 mm y 6 mm. Para comprobar si esta pieza soportará el par mecánico extremo utilizado en el cálculo del diámetro mínimo del eje (65,335 Nm), se ha realizado un análisis de elementos finitos mediante Solidworks.

La pieza sometida al par mecánico mencionado anteriormente se puede ver en la siguiente imagen, donde se muestra las deformaciones de la pieza al aplicar el torque desde el lado del eje del rotor y manteniendo estática la cara del eje del generador:

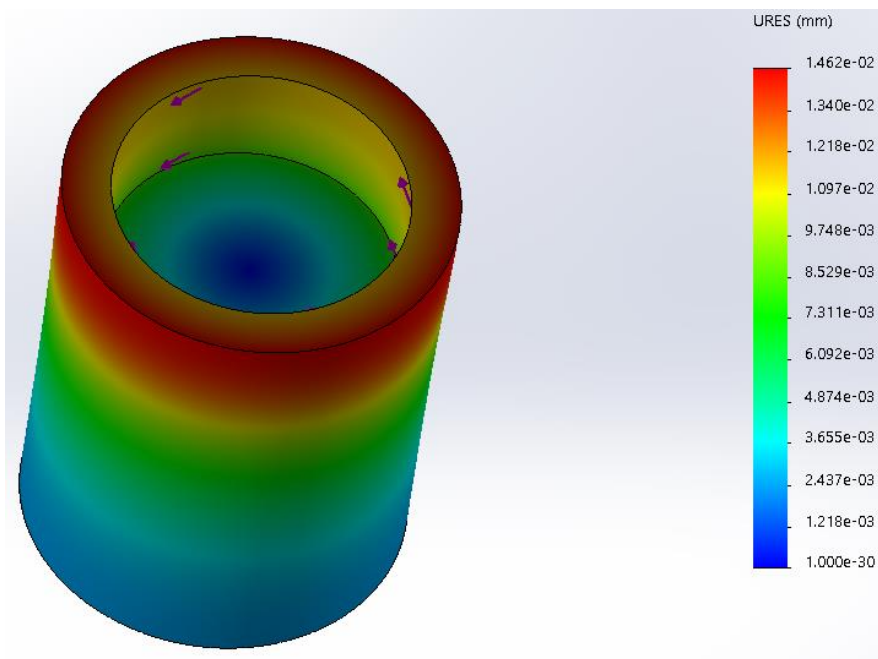


Ilustración 42 - Análisis de deformaciones mediante elementos finitos

El resultado concuerda con lo esperado, ya que la parte superior se deforma si se aplica aquí el par de torsión y se mantiene estática la parte inferior del cilindro. La máxima deformación es de 14,6 μm , lo cual es un valor aceptable.

Es importante comprobar en el análisis de tensiones que no existen partes de la pieza sometidas a una tensión excesiva que supere el límite elástico del material, ya que, si se supera este límite, se pueden dar deformaciones plásticas del material (acero).

En las siguientes imágenes se pueden ver las tensiones que aparecen en el cilindro:

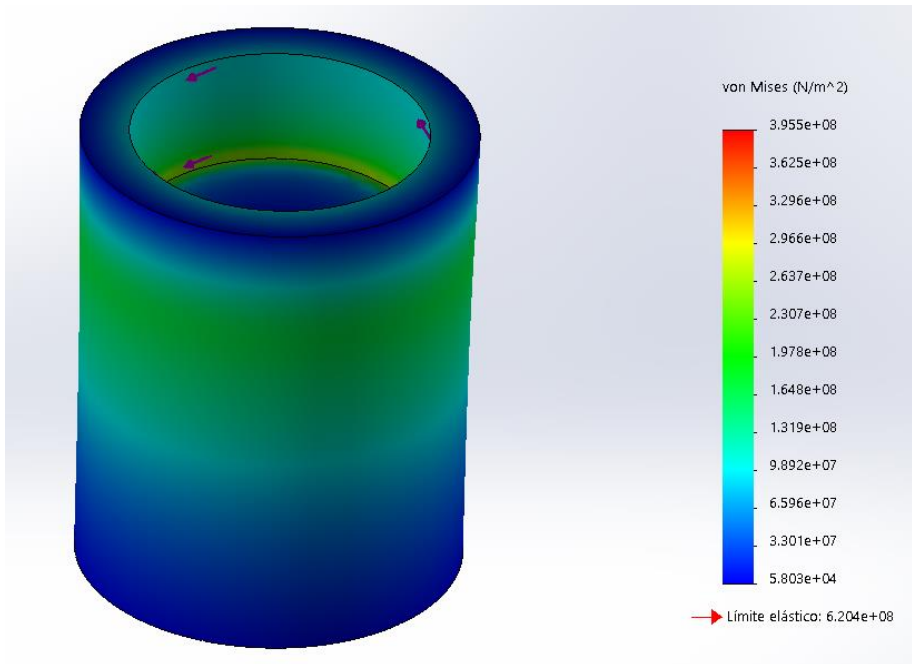


Ilustración 43 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (altura del cilindro)

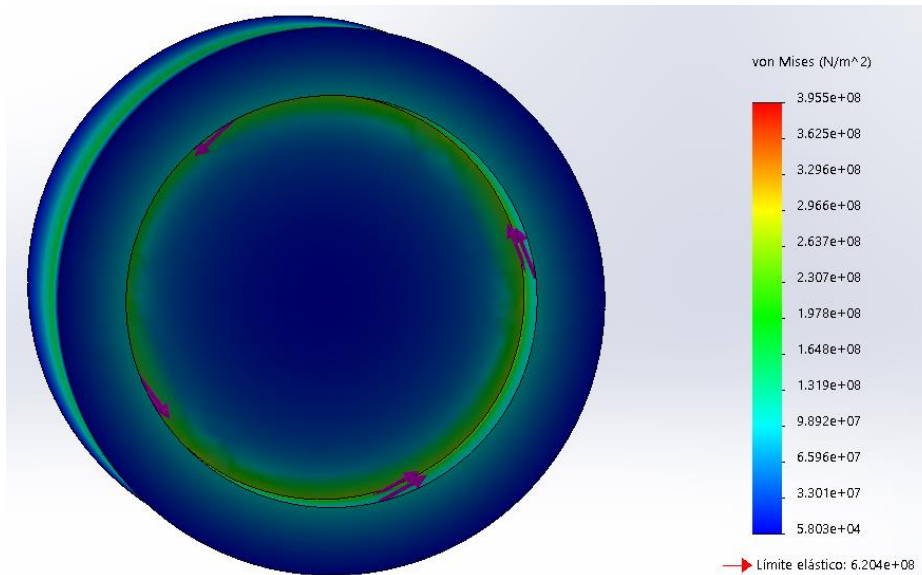


Ilustración 44 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (orificio de 12 mm)

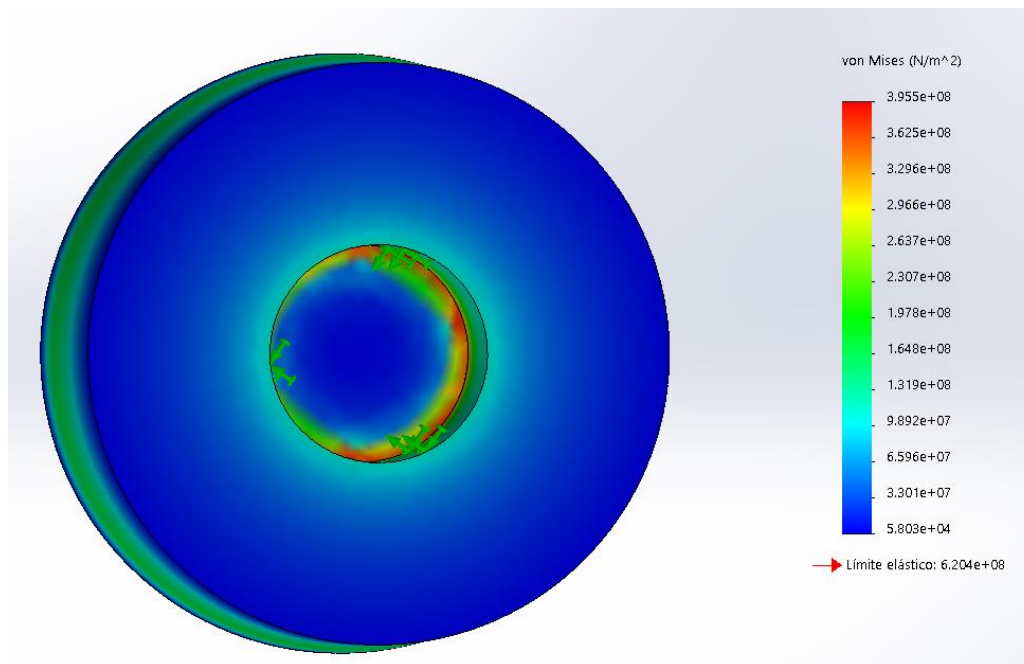


Ilustración 45 - Análisis de tensiones mediante elementos finitos (orificio de 6 mm)

Las mayores tensiones aparecen en la base del orificio con menor diámetro (6 mm), tal y como era de esperar. Sin embargo, estas tensiones son menores al límite elástico del material (acero), ya que son de aproximadamente $3.96 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, mientras que el límite es de $6.2 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Este análisis demuestra que la pieza más vulnerable del sistema mecánico es segura incluso en condiciones de viento extremas (40 m/s).

Fase 7 – Elección del generador y del circuito electrónico para la adaptación del voltaje

Para convertir la potencia mecánica del segundo prototipo diseñado en potencia eléctrica es necesario escoger un generador adecuado para esta tarea.

Después de comparar varios modelos y fabricantes, se ha optado por un motor de corriente continua (que se usará como generador) con las siguientes características fundamentales:

Parámetro	Valor
Tensión nominal	12 V
Velocidad sin carga a tensión nominal	11 000 rpm
Intensidad de corriente sin carga a tensión nominal	0.155 A
Máxima eficiencia	61.85 %
Velocidad con máxima eficiencia	9 281 rpm
Intensidad de corriente con máxima eficiencia	0.837 A
Par con máxima eficiencia	0.0064 Nm
Potencia con máxima eficiencia	6.21 W

Estas características se pueden consultar en la hoja técnica de datos (*Datasheet*) incluida en los anexos de este trabajo.

Se ha escogido este motor por su relativamente alta tensión nominal (12 V), lo cual puede concebirse como tensión alta si se compara con los 5 V que se desea generar para la aplicación de este proyecto. Los motores con mayores tensiones nominales son capaces de entregar mayor potencia con las mismas revoluciones por minuto. Visto desde el lado contrario, si estos motores se usan como generadores, una velocidad de giro baja generará una tensión mayor que otros motores con tensiones nominales menores. Esto se debe a la potencia de los imanes instalados (es decir, la intensidad del campo magnético) y al tamaño del generador.

Existen varias combinaciones de engranajes para reducir la velocidad de giro del eje del motor y aumentar el par entregado. La caja de cambios escogida para este generador tiene un factor de multiplicación de las revoluciones de 47:1. Se ha escogido esta relación para aumentar las revoluciones por minuto del rotor bobinado cerca de la velocidad de giro a máxima potencia del motor. Si aumenta la velocidad de giro del rotor bobinado, la tensión generada aumenta también de manera proporcional a esta velocidad. La constante de proporcionalidad se puede calcular de la siguiente manera:

$$k_E = \frac{V}{\omega} = \frac{60 \cdot V}{2\pi \cdot n_{rpm}} = \frac{60 \cdot 12 V}{2\pi \cdot 11\,000 rpm} = 0.010417 \frac{V}{rad/s}$$

Se puede, alternativamente, usar esta constante de proporcionalidad:

$$k_E = \frac{V}{n_{rpm}} = \frac{12 V}{11\,000 rpm} = 0.001091 \frac{V}{rpm}$$

Si la velocidad de giro del rotor Savonius con una velocidad media del viento de 4-5 m/s es de 125 – 156 rpm (véase Fase 3 del proyecto), la velocidad del rotor bobinado del generador corresponderá a estas velocidades de giro multiplicadas por 47, obteniendo así una velocidad entre 5875 y 7332 rpm.

Si bien la velocidad de giro con máxima eficiencia del motor es de 9 281 rpm según el fabricante, este valor es válido para una tensión nominal de 12 V. En esta aplicación se desea generar tensiones menores (5-6 V), que serán estabilizadas a 5 V mediante electrónica.

Según la fórmula deducida en el apartado 1.4 de este trabajo, la velocidad de giro con máxima eficiencia dependiendo de la tensión aplicada al generador de corriente continua es:

$$\omega = \frac{V}{2 \cdot k_E}$$

Esto significa si la tensión del generador se reduce, su velocidad de giro óptima se reduce proporcionalmente a esta tensión. Por este motivo, las velocidades de giro obtenidas con este generador y con un factor de multiplicación de revoluciones de 47:1 son eficientes, ya que no se pretende generar tensiones de 12 V, sino de 5-6 V.

Para este generador de corriente continua y esta relación de multiplicación de velocidades (47:1) se ha medido el par mecánico necesario para que el eje comience a girar. Esta estimación se ha realizado mediante un experimento sencillo utilizando una palanca acoplada al eje, un peso enganchado a la palanca y una rotación angular variable del generador. Al aumentar el ángulo de la palanca respecto a la vertical, el peso ejercía mayor par al aumentar la palanca efectiva. El ángulo en el cual el eje comenzaba a girar era indicativo del par necesario para mover el eje. Este par se ha estimado en 0.10634 Nm. Para el rotor Savonius, este par se puede superar cuando la velocidad del viento supera los 3.7 m/s.

La tensión que se da entre los extremos del generador de corriente continua no puede ser conectada directamente con un cable eléctrico a la batería portátil o dispositivo que se desee cargar. Es necesario adaptar esta tensión previamente mediante un circuito electrónico. Este circuito electrónico debe disponer de un elevador (o convertidor) "Boost" de tensión continua (DC), un estabilizador de voltaje a 5 V y un puerto USB para conectar el dispositivo que se necesita cargar.

La función del elevador "Boost" de tensión es elevar tensiones en circuitos de corriente continua. La entrada de tensión debe ser, como mínimo, de 2 V y la salida de tensión que aporta este convertidor puede alcanzar un máximo de 28 V. Este valor se puede ajustar con el potenciómetro que lleva incorporado este componente electrónico. En la siguiente imagen se puede ver la apariencia de un elevador "Boost" de voltaje:



Ilustración 46 - Convertidor (o elevador) "Boost" de voltaje con corriente continua (DC)

El funcionamiento de este componente se basa en la activación y desactivación de dos circuitos eléctricos diferentes mediante un MOSFET funcionando a una frecuencia elevada (1.2 MHz). El MOSFET actúa como interruptor y los circuitos implicados se pueden ver en la siguiente ilustración:

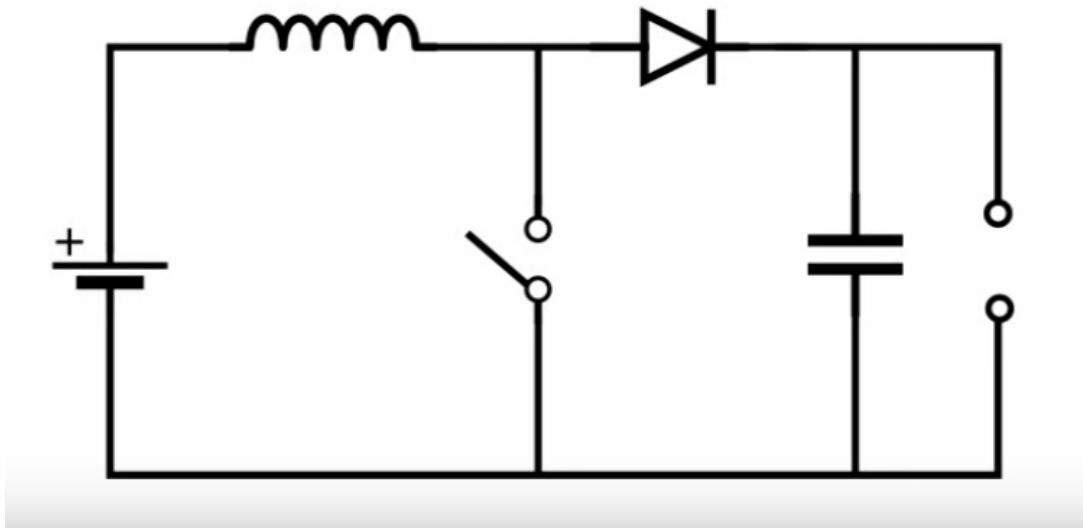


Ilustración 47 - Esquema simplificado del funcionamiento del elevador "Boost"

En un primer ciclo, el interruptor está cerrado y la corriente fluye a través de la bobina, cargándose así ésta de un campo magnético. Cuando el interruptor se abre, la bobina se descarga al fluir la corriente a través del diodo y del condensador.

Este condensador se carga a una tensión mayor a la de la fuente de voltaje, ya que ésta se suma a la tensión generada por el desvanecimiento del campo magnético acumulado en la bobina. Este campo se desvanece a medida que la corriente fluye a través del diodo y este proceso crea una tensión momentánea y variable debido a la Ley de Faraday, que relaciona el cambio del flujo magnético en la bobina con la tensión que existe en los extremos de ésta. Se puede conectar una carga eléctrica (por ejemplo, una resistencia) en paralelo al condensador, de modo que a ésta se le estaría aplicando una tensión mayor a la tensión de la fuente de voltaje inicial.

Con el elevador de voltaje se puede conseguir que la tensión que existe durante el arranque del rotor Savonius y cuando los flujos de viento son relativamente débiles para generar automáticamente 5 V sea elevada a este valor. En este proyecto se ha decidido colocar el potenciómetro del elevador de tensión de tal manera que se generen 5.2 V, asegurándose así de que se está elevando el voltaje a un valor por encima de los 5 V. Después, estos 5.2 V son estabilizados mediante el componente electrónico de estabilización de voltaje (7805) a 5 V con gran precisión.

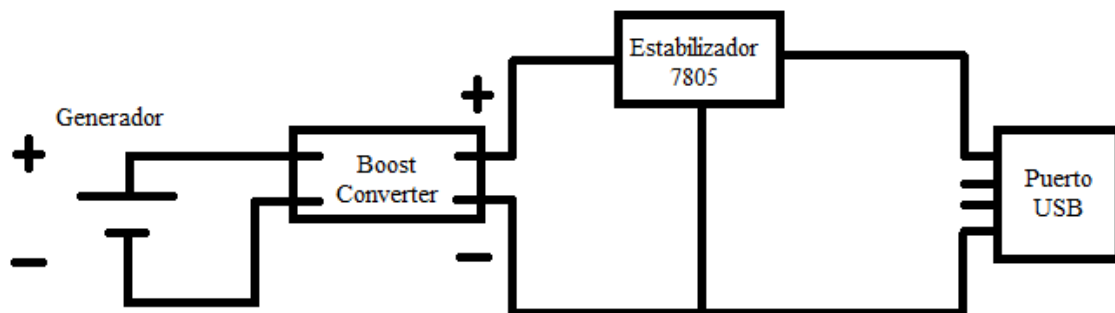


Ilustración 48 - Esquema simplificado del circuito electrónico de adaptación de voltaje a 5 V

Para finalizar, los 5 V estabilizados son conectados a los pines extremos del puerto USB, que son los que sirven para alimentar un dispositivo con tensión. Los puertos USB tienen 4 pines, pero los 2 pines centrales se usan para la transferencia de datos y son, por lo tanto, prescindibles en este proyecto.

En la siguiente ilustración se muestra una imagen real del circuito electrónico implementado:

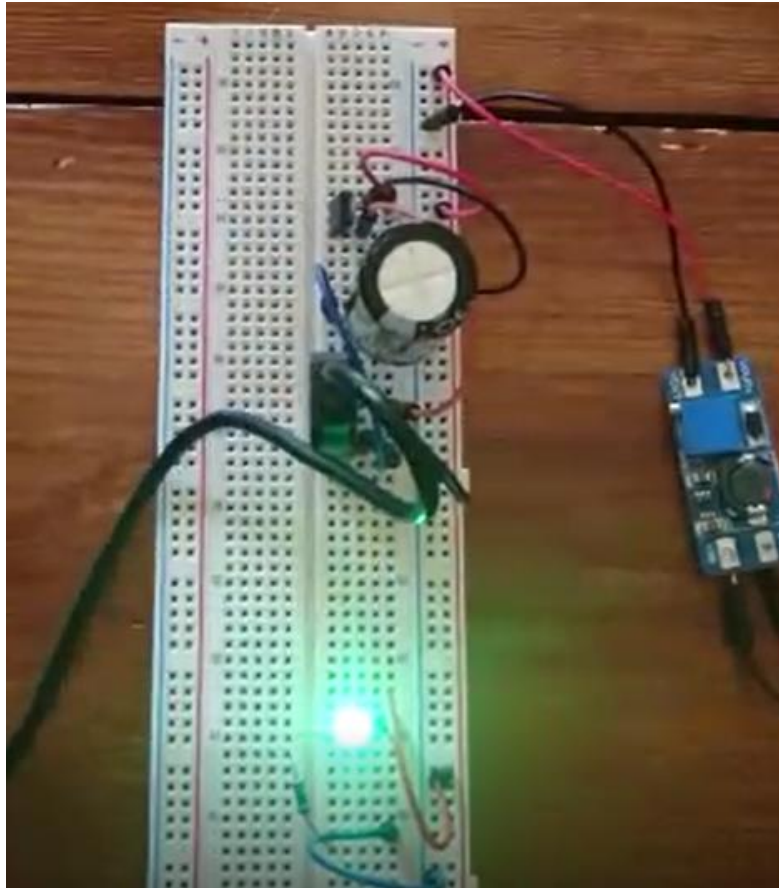


Ilustración 49 - Fotografía real del circuito electrónico implementado para adaptar el voltaje

En la imagen se puede ver un condensador electrolítico colocado en paralelo al puerto USB. Normalmente, un condensador garantiza la estabilidad del voltaje al reducir el rizado de la tensión. Sin embargo, si ya se dispone de un estabilizador de tensión 7805, el condensador es prescindible, ya que el estabilizador ya aporta una tensión constante y estable de 5 V con gran precisión (4.99 V – 5 V).

También se ha conectado un diodo LED en serie con una resistencia paralelamente a la salida del elevador de tensión para comprobar el funcionamiento del circuito y del generador. Sin embargo, este LED es también prescindible, ya que la batería portátil y los dispositivos que se carguen con el aerogenerador ya tienen normalmente luces o formas de avisar que están recibiendo tensión eléctrica y, por lo tanto, se están cargando.

Fase 8 – Inventario de materiales, costes de producción y estudio de viabilidad económica

8.1 - Inventario de materiales necesarios y costes de adquisición

En este apartado se van a mostrar las piezas necesarias para montar el segundo prototipo y su coste. El material se ha adquirido el material en España en el año 2019 y el impuesto al valor añadido (IVA) ha sido del 21%. Los precios indicados en la tabla incluyen el IVA aplicable.

Pieza	Unidades	Precio por unidad	Precio total
Rodamiento radial, d=12 mm	1	4,46 €	4,46 €
Rodamiento axial, d=12 mm	1	21,42 €	21,42 €
Anillos de retención interna, d=12 mm	1	0,06 €	0,06 €
Anillos de retención externa, D=28 mm	2	0,43 €	0,86 €
Tubo PVC, D=200mm, H=2m	1	11,60 €	11,60 €
Lámina de plástico, 50x150 cm, (discos)	1	25,99 €	25,99 €
Plancha metálica acero, grosor 3mm, 150mm x 350 mm	1	0,87 €	0,87 €
Tubo cuadrado acero 20x20 mm, 1m	4	6,35 €	25,40 €
Perfil L acero galvanizado, 2m	3	6,25 €	18,75 €
Perfil L acero, 1m	1	6,45 €	6,45 €
Tubo acero, 1m, d=24mm	1	4,59 €	4,59 €
Tornillos (d=6) con tuerca y arandela Grower	134	0,12 €	16,08 €
Vara roscada, d=8mm, L=1m	2	0,64 €	1,28 €
Tuercas, d=8mm	20	0,13 €	2,60 €
Acoplamientos "L"	24	0,40 €	9,60 €
Vara corrugada acero (eje), d=12, L=2m	1	1,70 €	1,70 €
Tubo acero d _e =16mm, d _i =14mm, L=5mm	1	0,01 €	0,01 €
Tubo acero d _e =32 mm, d _i =28mm, H=15mm	2	0,035 €	0,07 €
Cilindro acero, d=16mm, H=20mm	1	0,04 €	0,04 €
Motor DC, reducción 47:1	1	37,82 €	37,82 €
Elevador Boost de tensión DC	1	7,32 €	7,32 €
Estabilizador de voltaje a 5 V	1	0,57 €	0,57 €
Puerto USB	1	0,64 €	0,64 €
Cable eléctrico (con aislante), 5m	1	1,45 €	1,45 €
Batería portátil 120 Ah 5V	1	23,99 €	23,99 €
Precio total (IVA incluido)	-	-	223,62 €

8.2 - Costes de producción y factura por el trabajo realizado

Este producto no solamente tiene un coste por los materiales que se requieren para montarlo, sino también costes de producción, entre los que se encuentran los costes por adaptar los materiales a la geometría deseada al cortarlos, serrarlos, soldarlos (es decir, procesarlos), los costes de instalación del aerogenerador (el montaje en una casa) y los costes del diseño (retribución al ingeniero que ha diseñado el producto).

El trabajo de procesar los materiales debe hacerlo un herrero, ya que las tareas a realizar son:

- Cortar con una radial los perfiles, la vara roscada y tubos de acero
- Cortar con una radial la lámina y los tubos de plástico (PVC)
- Limar los extremos del eje (vara corrugada de acero) que se encajan en los rodamientos y los 3 lugares del eje a la altura de los discos de plástico en los que se soldarán las chavetas
- Soldar la estructura de sujeción, soldar las chavetas con el eje y éste con el tubo que se inserta en la parte inferior del eje para sostener por una cara el disco inferior y, por la otra, el rodamiento inferior

Estas tareas se pueden realizar en un tiempo estimado en 2 horas. Con el sueldo del herrero por hora de 10 €/hora, esto supone un coste de 20 €.

Por otra parte, el aerogenerador debe ser montado por un obrero, el cual cobraría 9 €/h. El tiempo de montaje se estima en 1 hora, ya que se trata principalmente de atornillar las diferentes piezas entre sí y hacer agujeros en la pared y en el suelo para insertar varas roscadas cortas que se fijarán con la extrusión de pasta fijadora y las cuales servirán para atornillar la estructura a la pared y al suelo. El coste de montaje sería, por lo tanto, de 9 €.

Para finalizar, el ingeniero que ha desarrollado este producto (el aerogenerador), ha necesitado 2 meses a jornada completa (320 h) para realizar este proyecto. Tomando por referencia un sueldo mensual neto de 1900 €/mes para un ingeniero mecánico, se estima que el sueldo por hora de éste serían 11,875 €/h, lo que implica un coste total de 3800 €. Sin embargo, este coste se pretende cubrir con cada ejemplar de este aerogenerador que sea vendido. Aplicando la regla de incrementar el precio total de cada ejemplar en 19 €, se alcanzaría esta cifra al vender 200 modelos de este aerogenerador. Si se cuenta, además, con un IRPF (Impuesto sobre la Renta de Personas Físicas) del 17%, este precio ascendería a 22,23 €. Este es el equivalente aproximado al 10% del coste de los materiales.

Este es un cálculo realizado con las perspectivas de vender unos pocos modelos al principio. Si el producto tuviera mayor demanda y se vendiesen más ejemplares, la parte del precio atribuida al ingeniero puede reducirse con el tiempo para facilitar la mayor venta de aerogeneradores y la competitividad del producto.

La suma de todos los costes de producción nombrados es:

$$\begin{aligned}
 \text{Coste total} &= C_{\text{materiales}} + C_{\text{herrero}} + C_{\text{montaje}} + C_{\text{diseño}} \\
 \text{Coste total} &= 223,62 \text{ €} + 20 \text{ €} + 9 \text{ €} + 22,23 \text{ €} = 274,85 \text{ €}
 \end{aligned}$$

8.3 - Estudio de viabilidad económica

Siendo conocido el precio total del aerogenerador (incluyendo impuestos), se puede determinar si el producto es económicamente viable.

Un primer criterio es comparar el precio de la energía actualmente en España con el precio de la energía generada por el aerogenerador. Comparando ambos valores se puede calcular el número de años que se tardaría en amortizar una instalación de este tipo en un lugar que ya disponga de acceso a la red eléctrica.

El precio actual de la energía eléctrica en España se sitúa en un rango de precios entre 0.073 €/kWh (en las “horas valle”) y 0.1874 €/kWh (en las “horas punta”). Por lo tanto, el precio medio de la electricidad es de 0.1302 €/kWh.

Dependiendo de la potencia que entregue el aerogenerador, éste generará una energía anual con un precio de mercado determinado que se estaría dejando de pagar a la distribuidora de energía eléctrica. Si se divide el coste total del aerogenerador (270,93 €) entre el coste económico de la energía producida anualmente, se obtiene los años necesarios para amortizar la instalación. En las siguientes tablas se pueden comprobar los datos técnico-económicos dependiendo de la velocidad media anual del viento en el lugar de la instalación:

Velocidad media anual del viento [m/s]	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s
Potencia media anual ponderada [W]	1,35 W	3,18 W	6,21 W	10,75 W
Energía anual [kWh]	11,8 kWh	27,9 kWh	54,4 kWh	94,2 kWh
Coste anual de la energía [€]	1,54 €	3,63 €	7,08 €	12,26 €
Años de amortización [-]	176	75	38	22

Velocidad media anual del viento [m/s]	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s
Potencia media ponderada [W]	17,08 W	25,51 W	36,33 W	49,72 W
Energía anual [kWh]	149,6 kWh	223,5 kWh	318,3 kWh	435,5 kWh
Coste anual de la energía [€]	19,48 €	29,10 €	41,44 €	56,71 €
Años de amortización [-]	14	9	7	5

Las velocidades medias del viento menores a 3 m/s no se han incluido en las tablas debido a que no generan una potencia considerable y, además, el generador escogido comienza a girar con una velocidad del viento de 3.7 m/s. Las velocidades medias anuales mayores a 10 m/s no se dan en prácticamente ningún lugar habitado del mundo (véanse los mapas eólicos en la fase 2 de este trabajo).

De las tablas anteriores se puede deducir que, si el periodo de amortización de este prototipo es de 38 a 75 años teniendo una velocidad media anual del viento de 4-5 m/s en la Península Ibérica, el producto no merece la pena comercializarse en España para competir económicamente con la energía proveniente de la red eléctrica. Si bien se trataría de energía renovable y cubriría aproximadamente entre el 1% y el 2% del consumo anual de energía de un hogar (contando con un gasto energético mensual de 200 kWh), el tiempo de amortización es demasiado largo.

Si se mejorase la eficiencia del aerogenerador en su conjunto diseñando un rotor Savonius helicoidal y utilizando un generador de corriente alterna diseñado específicamente para esta aplicación, el rendimiento del sistema mecatrónico diseñado y la potencia eléctrica generada podrían duplicarse y, pese al mayor coste de producción que esto implicaría, el aumento de la potencia eléctrica generada podría reducir los años de amortización del producto.

Sin embargo, pueden encontrarse nichos de mercado en países donde, o bien el precio del kWh sea más alto, o bien la velocidad media anual del viento sea mucho mayor. Si se combinan ambas circunstancias, el tiempo de amortización se puede reducir considerablemente. Esto se puede dar en países que reciban flujos de viento potentes y frecuentes (véase la fase 2 del proyecto) o en países donde los precios por generar electricidad sean mucho más caros que en España.

Existe otra perspectiva desde la que enfocar la venta de este producto. Ya que este aerogenerador no puede competir con el precio de la red eléctrica en España, no debe necesariamente concebirse como un producto que sustituya la energía que aporta la red, sino un producto que merezca ser instalado allí donde no llega la red. Ejemplos de este tipo de lugares son las casas y albergues en zonas montañosas (zonas de alpinismo, Pirineos), zonas rurales donde la gente practica senderismo y zonas con muy baja densidad de población donde no haya suministro eléctrico. Dado que aquí no existe la red eléctrica, no se la consideraría a ésta como un competidor y, no existiendo esta alternativa, la instalación sí sería rentable, ya que puede instalarse en casas de zonas rurales o albergues para senderistas y alpinistas y cobrar a éstos por el servicio de cargar el móvil.

Para finalizar, es probable que este tipo de aerogeneradores sean rentables si se venden a los países africanos al sur del Sahara, en los que el porcentaje de población con acceso a la red eléctrica es generalmente inferior al 40%. Este producto puede ser adquirido por particulares o gobiernos para instalarse en las zonas de este continente donde haya flujos de viento frecuentes con altas velocidades para abastecer casas y aldeas durante los años que pasen hasta que se construya y amplíe la red eléctrica. Las tareas que se pueden realizar gracias a la energía eléctrica acumulada en las baterías pueden parecer de poca relevancia en los países con sistemas avanzados de distribución eléctrica, pero entre estas tareas se encuentra el uso de teléfonos móviles, "routers" para conectarse a Internet, la radio para facilitar la comunicación de noticias y la iluminación básica durante la noche.

Fase 9 – Montaje del segundo prototipo

Para finalizar este proyecto se han adquirido los materiales necesarios para construir el aerogenerador y se ha procedido a montarlo.



Ilustración 50 - Montaje real del segundo prototipo en una terraza

Existen algunas pequeñas diferencias en este montaje comparado con el diseño del segundo prototipo. En el diseño se indica que el aerogenerador es atornillado a la pared y al suelo mediante estructuras de acero. En este caso y dado que se contaba con una barandilla larga en una terraza, se ha optado por evitar hacer agujeros en las paredes y en el suelo y sustituir la estructura de sujeción de acero por estos dos mecanismos:

1. Uso de alambres de hierro tensados y sujetos a la barandilla para garantizar la sujeción de la parte superior de la estructura. Ésta es la misma técnica que usan los barcos y las tiendas de campaña (sujeción mediante “vientos”).
2. Uso de una “garra” de sujeción entre la base del estator (sin contar la pata elevadora de 0.5 m) y la barandilla. Este tipo de “garras” se utilizan frecuentemente en la instalación de postes que sirven para sujetar antenas parabólicas.

Resultados técnicos

En este proyecto se han detallado los resultados técnicos en las fases 2, 3, 6 y 7. En este apartado se resumen dichos resultados brevemente.

La fase 2 del trabajo muestra que la velocidad media anual del viento en la Península Ibérica se ubica en el rango entre 4 y 5 m/s. En otros lugares del mundo, este valor puede llegar hasta los 9 m/s.

Por otra parte, la potencia media anual del aerogenerador no se debe calcular directamente de la velocidad media anual, ya que los vientos fuertes aportan mucha más potencia durante el año, aunque sean poco frecuentes. Con la distribución probabilística de Weibull se ha calculado la potencia media anual ponderada que entrega el viento por cada metro cuadrado de superficie que tenga el área de barrido del rotor. Partiendo de las velocidades medias anuales del viento de 4 -5 m/s, la potencia eléctrica útil por m^2 en la Península Ibérica es de 5 y 10 W/m^2 , incluyendo en el cálculo el coeficiente de potencia de este rotor Savonius (13%) y el rendimiento del generador de corriente continua (54%). La potencia ponderada anualmente es aproximadamente el doble de la potencia sin ponderar, lo cual indica la importancia de dicha ponderación probabilística.

La fase 3 del proyecto indica que la potencia media anual y ponderada de este aerogenerador oscila entre 3 y 6 W con velocidades del viento medias entre 4 y 5 m/s. La energía producida durante un año sería de 27,86 kWh y 54,4 kWh respectivamente. Estos valores suponen entre el 1% y el 2% del consumo anual de energía eléctrica de un hogar, tomando como referencia un gasto mensual de 200 kWh. El equivalente diario a estas energías anuales son 76,32 Wh/día y 149 Wh/día, lo cual equivale también a poder cargar, de media, 3.8 y 7.5 teléfonos móviles al día respectivamente.

En la fase 6 se ha determinado que las partes más críticas de la estructura del aerogenerador son el eje y el acoplamiento entre el eje y el generador eléctrico. El eje del rotor Savonius debe tener un diámetro de 12 mm para soportar el par mecánico existente con velocidades del viento máximas de 40 m/s. En cuanto al acoplamiento entre el eje y el generador, se ha realizado un análisis mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) y se ha comprobado que el par mecánico bajo estas circunstancias extremas de viento no genera tensiones que excedan el límite elástico de la pieza de acero, con lo que el acoplamiento diseñado es adecuado.

La fase 7 contiene la elección del generador de corriente continua. Se trata de un motor con una tensión nominal de 12 V usado como generador que, con un conjunto de engranajes con la relación 47:1 es capaz de convertir de forma eficiente las velocidades de giro del rotor Savonius (125 – 156 rpm) en velocidades del rotor bobinado del generador entre 5875 y 7332 rpm.

Resultados económicos

En la fase 8 de este proyecto se ha estimado el coste total de producción del aerogenerador, incluyendo el coste de adquirir los materiales (incluyendo el IVA), el coste del trabajo del herrero, el coste del tiempo de montaje realizado por un obrero y el coste adicional para retribuir al ingeniero que ha diseñado el producto.

El coste de los materiales es de 223,72 €, mientras que el trabajo del herrero duraría 2 horas y valdría 20 €, el coste de montaje sería de 9 € y duraría 1 hora y el trabajo realizado por el ingeniero habría requerido un tiempo de 320 h (2 meses a jornada completa), lo cual se puede retribuir añadiendo un coste al producto de 22,23 € (al que se aplicaría el IRPF estimado en un 17%) y vendiendo 200 modelos. De esta manera, el trabajo del ingeniero tendría un valor total de 3800 € (1900 € al mes).

El coste total de producción asciende a 274,85 € y, con este coste, el producto no es competitivo si se desea que sustituya a la energía que aporta la red eléctrica, ya que el ahorro económico anual es solamente de 3 - 7 € al año y el tiempo necesario para amortizar el producto es de 38 y 75 años respectivamente (para 5 m/s y 4 m/s de velocidad media del viento). Este hecho implica que no es un producto pensado para competir con la red eléctrica en España, sino para ser instalado en lugares sin acceso a la red eléctrica, tales como albergues y casas en zonas de alpinismo o senderismo y zonas rurales sin suministro de electricidad.

Otra posibilidad reside en encontrar nichos de mercado en países con mayores velocidades medias anuales de viento o países con costes más altos en la generación de energía eléctrica, así como también países (especialmente en los países africanos al sur del Sahara), donde la red eléctrica llega, de media, al 40% de la población. Este producto merece ser instalado especialmente en lugares donde la electricidad de la red eléctrica no está presente y, por lo tanto, no es una alternativa que compite con este producto.

Para finalizar, existen una serie de mejoras que pueden realizarse a partir de este proyecto para hacerlo más potente y rentable. Esas posibilidades de optimización se exponen en el siguiente apartado.

Posibilidades de optimización del producto en futuros trabajos

Este producto puede ser optimizado en posteriores trabajos en los siguientes puntos:

1. Diseño y fabricación de un rotor helicoidal en vez de un rotor de dos pisos con dos palas por piso ("*Double Step Rotor*"). Los rotores helicoidales tienen un coeficiente de potencia máximo del 18%, mientras que el coeficiente de potencia del aerogenerador de este proyecto es del 13%.
2. Diseño y construcción de un generador de corriente alterna específico para esta aplicación, evitando así las pérdidas por rozamiento de las escobillas en el generador de corriente continua. El rendimiento de la máquina eléctrica utilizada podría aumentar del 60% de este proyecto al 80% o 90%.

Estos dos puntos combinados ya supondrían una potencia eléctrica útil del doble de lo alcanzado en este proyecto. Con la producción de un rotor helicoidal y de un generador de corriente alterna optimizado y personalizado aumentarían los costes de producción, pero el incremento del 100% de potencia útil compensaría con toda seguridad el coste de estas mejoras.

3. Combinación del rotor Savonius con un rotor Darrieus, de modo que las velocidades alcanzadas por el rotor y su potencia aumentase. Un modelo híbrido también aumentaría los costes de producción, pero posiblemente se compensarían los costes con el aumento de potencia producida. Sin embargo, se debe tener en cuenta que un rotor Darrieus aumentaría el diámetro del rotor muy considerablemente, de modo que no sería aconsejable instalarse en lugares donde puedan transitar las personas, ya que ocuparía mucho más espacio y su giro a altas velocidades y la forma de sus perfiles podría herir a personas que se acercasen demasiado.

Estas mejoras no se han llevado a cabo en este trabajo dado el tiempo limitado con el que se ha desarrollado el proyecto y a la dificultad añadida que supone construir un rotor helicoidal y un rotor híbrido Savonius-Darrieus, cuyo comportamiento mecánico y aerodinámico es más complejo de modelar sin conocimiento de estudios de investigación que hayan tratado de describir con precisión y de forma analítica y empírica el funcionamiento de este tipo de rotores híbridos.

Bibliografía y fuentes

- Argemiro Palencia Díaz, G. J. (2014). Modelado computacional de turbina Savonius. *Revista chilena de ingeniería*, 7.
- Caíta, C. E., & Puerto Molina, L. J. (2014). Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13797/Libro.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Calbet, V. P. (s.f.). Obtenido de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1269pub.pdf>
- Curvas par - velocidad del motor de corriente continua*. (s.f.). Obtenido de <http://www.ramarecords.com/eop/Curvas%20par-velocidad%20del%20motor%20de%20corriente%20continua.pdf>
- Danish Wind Industry Association*. (s.f.). Obtenido de <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/weibull/index.htm>
- Festigkeitswerte Stahl (Valores de solidez de aceros)*. (s.f.). Obtenido de https://www.schweizer-fn.de/festigkeit/festigkeitswerte/stahl/stahl_start.php
- Global Wind Atlas*. (s.f.). Obtenido de <https://globalwindatlas.info/>
- Poll, P. D.-I. (s.f.). *Konstruktionslehre IV (Técnicas de diseño mecánico IV)*. Leibniz Universität Hannover.
- Seume, P. D.-I. (s.f.). *Strömungsmechanik I (Mecánica de Fluidos I)*. Leibniz Universität Hannover.
- Tabellenbuch Metall*. (s.f.). Europa Lehrmittel.
- Voneschen, M. F. (2009). *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*. Obtenido de http://amics21.com/laveritat/introduccion_teoría_turbinas_eolicas.pdf
- Wikipedia. (s.f.). *Aerogenerador Darrieus*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_Darrieus
- Wikipedia. (s.f.). *Betz's Law (Ley de Betz)*. Obtenido de https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
- Wikipedia. (s.f.). *Rotor Savonius*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius

Conclusiones

En este proyecto se ha realizado el diseño de un aerogenerador de tipo Savonius para uso doméstico que entrega, de media, entre 3 y 6 W de potencia y entre el 1% y el 2% del gasto energético de un hogar medio en electricidad. El equivalente a esta energía es la posibilidad de cargar entre 3,8 y 7,5 teléfonos móvil al día.

Lamentablemente, el producto no puede competir económicamente con la energía que suministra la red eléctrica en España, pero es una buena alternativa para las zonas que no están suministradas por esta red eléctrica, tales como casas y albergues en zonas de alpinismo y senderismo o zonas rurales alejadas de los puntos de suministro de la red.

Este proyecto se ha compuesto del diseño mecánico del aerogenerador y del diseño de un circuito electrónico que adapta y estabiliza la tensión a 5 V para cargar una batería portátil y/o dispositivos electrónicos que se cargan a baja tensión, tales como los teléfonos móviles. El proyecto incluye, por lo tanto, aspectos mecánicos (el aerogenerador), eléctricos (modelado y elección del generador de corriente continua), electrónicos (circuito de adaptación de voltaje) y matemáticos (cálculo de la potencia media anual ponderada mediante la distribución probabilística de Weibull). Por este motivo, se considera a este proyecto como un proyecto representativo del campo de la ingeniería mecatrónica aplicada a la generación de energía eléctrica.

Pliego de condiciones

1. Disposiciones preliminares

La legislación que sirve en este proyecto como principal punto de referencia se encuentra en el siguiente listado:

- Ley 31/1995, del 8 de noviembre, sobre la prevención de riesgos laborales (BOE nº269 del 10 de noviembre).

- Ley 54/1997, del 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.

- Real Decreto 2818/1999, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica para instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energías renovables, residuos o cogeneración.

- Real Decreto 1955/2000, del 1 de diciembre, por el cual se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

- Real Decreto 842/2002, del 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Ley 54/2003, del 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales.

- Real Decreto 436/2004, del 12 de marzo, por el cual se establece la metodología para la actuación y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

2. Disposiciones legales y normas aplicadas

En el desarrollo de este proyecto se han tenido en cuenta las siguientes disposiciones legales:

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, de 2 de agosto de 2002, e instrucciones técnicas complementarias al mismo.
- CTE-DB-HE (Ahorro de energía).
- Normas UNE de obligado cumplimiento.
- Normas UNE relativas a instalaciones eléctricas.
- Real Decreto 444/94, sobre compatibilidad electromagnética.
- Real Decreto 7/88 del Ministerio de Industria y Energía sobre exigencias de seguridad del material eléctrico.
- Real Decreto 254/95, que modifica el Real Decreto 7/88.
- Real Decreto 1627/1997, del 24 de octubre (BOE: 25/10/97), sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción. Transposición de la Directiva 92/57/UE.
- Real Decreto 463/2004 sobre producción de energía eléctrica mediante recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración.
- Ordenanza general de seguridad e higiene en el trabajo. Orden del 9 de marzo de 1971, del Ministerio de Trabajo (BOE núm. 64 y 65, 17/03/1971), (CE-BOE núm. 82, 06/03/1971).
- Disposiciones mínimas de seguridad y salud en lugares de trabajo.
- Real Decreto 486/1997, del 14 de abril, del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (BOE núm. 97, 23/04/1997).
- Real Decreto 1627/1997, del 24 de octubre del Ministerio de la Presidencia (BOE núm. 256, 25/10/1997).

Para llevar a cabo la instalación del aerogenerador en casas, la dirección facultativa se debe basar en las normas de ejecución material incluidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y en las Instrucciones Complementarias en vigor, así como en las normas concretas que detallan los puntos del Reglamento Electrotécnico publicados por la Dirección General de la Energía del Ministerio de Industria.

3. Medidas de prevención y protección

El criterio general aplicado en las medidas de prevención y protección se basa en la preferencia de las protecciones colectivas frente a las individuales. Además, se debe mantener los medios auxiliares, la maquinaria y las herramientas de trabajo en un correcto estado de conservación.

Medidas de protección colectiva

- Organización y planificación de los trabajos para evitar interferencias entre las diferentes tareas y circulaciones dentro de la obra.
- Señalización de las zonas de peligro.
- Prever el sistema de circulación de vehículos y su señalización, tanto en el interior como en el exterior de la obra.
- Inmovilización de camiones mediante falcas y/o topes durante las tareas de carga y descarga.
- Respetar las distancias de seguridad con las instalaciones existentes.
- Los elementos de las instalaciones deben estar con sus protecciones aislantes.
- Revisión periódica y mantenimiento de maquinaria y equipos de obra.
- Adecuación de soluciones de ejecución al estado real de los elementos (subsuelo, edificaciones vecinas).
- Comprobación de apuntalamientos, condiciones de estribados y pantallas de protección de zanjas.
- Utilización de pavimentos antideslizantes.
- Colocación de barandillas de protección en lugares con peligro de caída. Colocación de redes en agujeros horizontales.
- Protección de agujeros y fachadas para evitar la caída de objetos (redes, lonas).
- Uso de escaleras de mano, plataformas de trabajo y andamios.

Medidas de protección individual

- Utilización de caretas y gafas homologadas contra el polvo y la proyección de partículas.
- Utilización de calzado de seguridad.
- En todas las zonas elevadas donde no haya sistemas fijos de protección será necesario establecer puntos de anclaje seguros para poder sujetar el cinturón de seguridad homologado, la utilización del cual será obligatoria.
- Utilización de guantes homologados para evitar el contacto directo con materiales agresivos y minimizar el riesgo de cortes, pinchazos y quemaduras.
- Utilización del casco.
- Utilización de protectores auditivos homologados en ambientes excesivamente ruidosos.

- Utilización de ropa adecuada para el trabajo a realizar.
- Sistemas de sujeción permanente y de vigilancia de trabajos con peligro de intoxicación para más de un operario.

Medidas de protección a terceros

- Cierre, señalización y alumbrado de la instalación. En caso de que el cierre invada la calzada, ha de preverse un pasillo protegido para el paso de peatones. El cierre debe impedir que personas ajenas a la obra puedan entrar.
- Inmovilización de camiones mediante falcas y/o topes durante las tareas de carga y descarga.
- Adecuación de soluciones de ejecución al estado real de los elementos (subsuelo, edificaciones vecinas).

Primeros auxilios:

Se dispondrá de una lista con el contenido de material especificado en la normativa vigente. Se informará al inicio de la instalación de la situación de los diferentes centros médicos a los cuales se deberán de trasladar a los accidentados. Es conveniente disponer en la instalación y en un lugar bien visible de una lista con los teléfonos y direcciones de los centros asignados para urgencias, ambulancias, taxis, etc., para garantizar el rápido traslado de los posibles accidentados.

4. Condicionantes de materiales y equipos

Todos los materiales serán de buena calidad y provenientes de una reconocida casa comercial. Tendrán las dimensiones que indiquen los documentos del proyecto y que fije la dirección facultativa.

Los materiales serán reconocidos en obra antes de su utilización por la dirección facultativa, sin la aprobación de la cual no podrán ser empleados en la obra.

El contratista proporcionará a la dirección facultativa muestras de los materiales para su aprobación. Los ensayos y análisis que la dirección facultativa crea necesarios se realizarán en laboratorios autorizados para tal efecto.

Los accesorios, cajas, bornes, pequeños materiales y equipos serán de buena calidad y estarán igualmente exentos de defectos, tanto en la fabricación como en la calidad de los materiales.

5. Ejecución del montaje del prototipo

Las tareas de montaje del prototipo se ejecutarán de acuerdo con lo expuesto en el presente proyecto y con lo que dictamine la dirección facultativa.

El replanteamiento de las instalaciones lo ajustará el director del proyecto, marcando sobre el terreno claramente todos los puntos necesarios para la ejecución de ésta y siguiendo las indicaciones fijadas en el presente proyecto.

La instalación se construirá en su totalidad utilizando materiales y procedimientos de ejecución que garanticen las exigencias de servicio, durabilidad y mantenimiento. Se tendrán en cuenta las especificaciones dadas por los fabricantes de cada uno de los componentes.

A efectos de las especificaciones de montaje de la instalación, éstas se complementarán con la aplicación de las reglamentaciones vigentes que tengan competencia en el caso.

Es responsabilidad del suministrador comprobar que el edificio reúne las condiciones necesarias para soportar la instalación, indicándolo expresamente en la documentación.

Es responsabilidad del suministrador comprobar la calidad de los materiales, procurando que se ajusten a lo especificado en estas normas y evitar el uso de materiales incompatibles entre sí.

El suministrador será responsable de la vigilancia de sus materiales durante el almacenamiento y el montaje hasta la recepción provisional.

Se tendrá especial cuidado con los materiales frágiles y delicados como elementos electrónicos, engranajes, mecanismos, equipos de medida, etc., que tendrán que quedar debidamente protegidos.

Durante el montaje, el suministrador tendrá que retirar de la obra todos los materiales sobrantes de los trabajos efectuados con anterioridad, en particular, trozos de conductores y cables.

Así mismo, al final de la obra se tendrá que limpiar perfectamente todos los equipos (sensores, motores, circuitos impresos, instrumentos de medida, etc.) de cualquier tipo de residuo, dejándolos en perfecto estado.

La instalación de los equipos, cables, cajas, bornes y pequeños materiales permitirá su posterior acceso a las mismas a efectos de su mantenimiento, reparación o desmontaje.

Como principio general se tiene que asegurar, como mínimo, un grado de aislamiento eléctrico de tipo básico clase I, el cual afecta tanto a equipos como a materiales, exceptuando el cableado de corriente continua, que será de doble aislamiento.

La instalación incorporará todos los elementos y características necesarias para garantizar en todo momento la calidad del suministro eléctrico.

El funcionamiento de la instalación eólica no provocará averías en la red eléctrica, disminución de las condiciones de seguridad ni alteraciones superiores a las admitidas por la normativa que resulte aplicable.

Así mismo, el funcionamiento de la instalación no podrá dar origen a condiciones peligrosas de trabajo para el personal de mantenimiento y de explotación de la red de distribución. Los materiales situados en la intemperie se protegerán contra los agentes ambientales, en particular, contra el efecto de la radiación solar y la humedad.

Se incluirán todos los elementos necesarios de seguridad y protecciones propias de las personas y de la instalación eólica, asegurando la protección ante contactos directos e indirectos, cortocircuitos, sobrecargas, así como otros elementos y protecciones que resulten de la aplicación de la legislación vigente.

Por motivos de seguridad y operación de los equipos, los indicadores, etiquetas, etc. de éstos estarán en alguna de las lenguas españolas oficiales del lugar de la instalación.

Todos los elementos metálicos que no estén debidamente protegidos contra la oxidación por el fabricante serán recubiertos con dos manos de pintura antioxidante.

6. Disposiciones finales

Elección de componentes:

Todos los materiales utilizados en el montaje del prototipo corresponden a los de mejor fiabilidad de los que se encuentran en el mercado, cumpliendo al mismo tiempo todas y cada una de las condiciones de trabajo a las que están sometidas.

Comprobación del circuito:

Una vez terminado el montaje se efectuarán los siguientes controles:

- Pruebas de arranque y aceleración del aerogenerador bajo la influencia de diferentes pares mecánicos.
- Comprobación de las conexiones de alimentación de los elementos activos.

Validez del presupuesto:

El presupuesto del proyecto será válido para un periodo máximo de 30 días, después de los cuales se aplicará, sobre la totalidad de éste, el incremento o la disminución porcentual que el Estado publique en concepto de variación de precios, no pudiendo sobrepasar en ningún caso el índice de fluctuación oficial.

Términos de ejecución:

El diseño del proyecto ha requerido 2 meses, las tareas de adaptación de los materiales por parte del herrero duran 2 horas y el tiempo de montaje del aerogenerador se estima en 1 hora.

Anexos

En este apartado se adjunta el código escrito en Matlab para calcular la potencia media ponderada anualmente con la distribución probabilística de Weibull, las hojas de datos técnicos del motor de corriente continua y del elevador de voltaje “Boost” y los planos más relevantes del prototipo final.

Código de Matlab para calcular potencias ponderadas anualmente (Distribución de Weibull):

```
close all
clear all
clc

%% Datos del rotor y del aire

rho=1.19; % Densidad del aire [kg/m^3]
H=1.7; % Altura del rotor
D=0.367; % Diámetro del rotor
Cp=0.13; % Coeficiente de potencia del rotor Savonius
rend=0.54; % Rendimiento total (mecánico y eléctrico combinados)

%% Distribución de Weibull

% Para v_media=[4;5] m/s; lambda = [4.51;5.64] m/s;

% Distribución de la velocidad del viento v

v_av=4; % m/s
s=4.51; % m/s; Factor de escala de la distribución
k=2; % Factor de forma de la distribución
res=0.001; % Resolución de cálculo

v=(0:res:4*s); % Vector de velocidades
y=k/s*(v/s).^(k-1).*exp(-(v/s).^k); % Densidad de probabilidad
z=1-exp(-(v/s).^k); % Distribución de probabilidad (densidad acumulada)

% Densidad de potencia mecánica por m^2

P=0.5*rho*v.^3; % W/m^2
P_dens=P.*y; % W/m^2

% Integración de la densidad de la potencia, obtención de la potencia
% nominal por m^2

P_dens_sum=0;
for i=1:length(P_dens)
    P_dens_sum=P_dens_sum+P_dens(i)*res; % W/m^2
end
```

```

P_electrica_nominal=P_dens_sum*H*D*Cp*rend; % W; Potencia
eléctrica útil generada por
%el rotor incluyendo área de barrido, coeficiente de potencia y
rendimiento total

% Energía eléctrica anual del viento

E_electrica_anual=P_electrica_nominal*24*365/1000; % kWh/año

%% Plot

figure(1)
plot(v,100*y);
title(strjoin({'Distribución Weibull: Velocidad media del
viento:' num2str(v_av) 'm/s'}))
xlabel('Velocidad del viento [m/s]')
ylabel('Probabilidad anual p(v) [%]')
xlim([0,4*s]);

figure(2)
plot(v,P, 'r');
title('Curva: Velocidad - Potencia por m^2')
xlabel('Velocidad del viento [m/s]')
ylabel('Potencia mecánica por superficie P(v) [W/m^2]')
xlim([0,4*s]);

figure(3)
plot(v,P_dens, 'g');
title(strjoin({'Densidad de potencia por m^2; Velocidad media
del viento:' num2str(v_av) 'm/s'}))
xlabel('Velocidad del viento [m/s]')
ylabel('Densidad de potencia mecánica por superficie p(v)*P(v)
[W/m^2]')
xlim([0,4*s]);

```


**980D SERIES 35mm SINGLE RATIO METAL GEARBOX
(CENTRAL OUTPUT SHAFT)**

(RE 385 MOTOR)



Metal Gearbox cover included with this series

IMPORTANT NOTICE
Due to the wide range of applications for this product it is the users responsibility to establish the products suitability for their individual purpose(s).

RATIOS NOW AVAILABLE AS EX-STOCK ITEMS.

980D61	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 6:1
980D161	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 16:1
980D471	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 47:1
980D1561	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 156:1
980D7501	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 750:1
980D28121	(4.5v - 15v)	WITH RE 385 MOTOR. RATIO 2812:1

Designed for heavy-duty industrial and model applications this robust unit boasts a powerful high quality, five pole motor with sintered bronze bearings. The metal gearbox incorporates sleeved bearings, enabling the high torque transfer from the motor to be transmitted through the gearbox. The unit is mounted on a 1mm thick plated steel bracket.

MOTOR DATA. (RE-385)

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY						STALL TORQUE	
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	EFF	TORQUE	
			R.P.M.	A	R.P.M.	A	oz - in	g - cm	W	%	oz - in	g - cm
RE - 385	6.0 - 15.0	12v CONSTANT	11000	0.155	9281	0.837		65.3	6.21	61.85		417.6

REDUCTION TABLE. R.P.M.

SUPPLY VOLTAGE	4.5v	6.0v	9.0v	12.0v	15.0v
980D61	650	900	1300	1830	2250
980D161	210	270	500	685	950
980D471	72	108	170	204	300
980D1561	23	32	51	69	90
980D7501	4.4	6.6	11.6	14.5	18.5
980D28121	1.3	1.8	2.8	3.8	5

WEIGHT	
980D6	145g
980D161	150g
980D471	155g
980D1561	160g
980D7501	168g
980D28121	170g

GEARBOX RATINGS

RATED TOLERANCE TORQUE (g.cm)		MAX MOMENTARY TOLERANCE TORQUE
6:1	1000	3000
16:1	2000	6000
47:1	3000	9000
156:1	6000	18000
750:1	6000	18000
2812:1	6000	18000

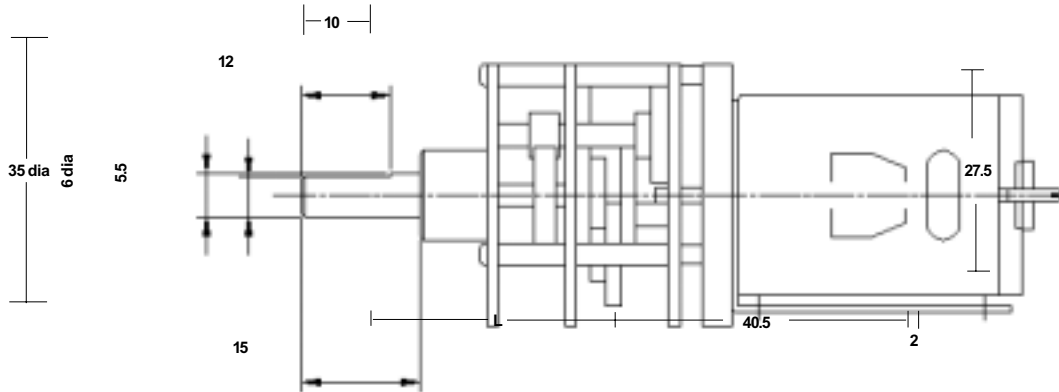
NOTE: To establish Torque Rating in nM, divide g.cm by 10,197.0

24 volt versions are available for this range of motor-gearboxes. Performance data is similar to 12 volt versions. This version also has an extended 10mm rear shaft to accommodate motor encoders. When ordering please use 12v version part number suffixed with 24V. I.E. 950D111 will be 950D11124V

**980D SERIES 35mm SINGLE RATIO METAL GEARBOX
(CENTRAL OUTPUT SHAFT)**

(RE 385 MOTOR)

GEARBOX DIMENSIONS



GEARBOX REF.	L
980D61 (6:1)	14.8
980D161 (16:1)	17.5
980D471 (47:1)	20.1
980D1561 (156:1)	22.6
980D7501 (750:1)	27.5
980D28121(2812:1)	30.0

FOR ACCESSORIES TO FIT THIS SERIES GEARBOX, REFER TO 919D SERIES PAGE.

RATED TOLERANCE TORQUE	
980D61 (6:1)	1000 gf.cm
980D161 (16:1)	2000 gf.cm
980D471 (47:1)	3000 gf.cm
980D1561 (156:1)	6000 gf.cm
980D7501 (750:1)	6000 gf.cm
980D28121(2812:1)	6000 gf.cm

Subject to minimum order quantities of 250 units, the following ratios are also available with a six week lead-time. The physical dimensions of these other gearboxes may vary from the data as illustrated above. Details of individual gearboxes are available upon request.

Gearbox 6:1 with 385 motor
 Gearbox 31:1 with 385 motor
 Gearbox 63:1 with 385 motor
 Gearbox 104:1 with 385 motor
 Gearbox 169:1 with 385 motor
 Gearbox 250:1 with 385 motor
 Gearbox 422:1 with 385 motor
 Gearbox 625:1 with 385 motor
 Gearbox 1875:1 with 385 motor

Gearbox 16:1 with 385 motor
 Gearbox 38:1 with 385 motor
 Gearbox 69:1 with 385 motor
 Gearbox 113:1 with 385 motor
 Gearbox 188:1 with 385 motor
 Gearbox 281:1 with 385 motor
 Gearbox 438:1 with 385 motor
 Gearbox 750:1 with 385 motor
 Gearbox 2813:1 with 385 motor

Gearbox 19:1 with 385 motor
 Gearbox 47:1 with 385 motor
 Gearbox 75:1 with 385 motor
 Gearbox 125:1 with 385 motor
 Gearbox 219:1 with 385 motor
 Gearbox 312:1 with 385 motor
 Gearbox 469:1 with 385 motor
 Gearbox 938:1 with 385 motor
 Gearbox 3750:1 with 385 motor

Gearbox 21:1 with 385 motor
 Gearbox 56:1 with 385 motor
 Gearbox 94:1 with 385 motor
 Gearbox 156:1 with 385 motor
 Gearbox 234:1 with 385 motor
 Gearbox 375:1 with 385 motor
 Gearbox 563:1 with 385 motor
 Gearbox 1250:1 with 385 motor
 Gearbox 5625:1 with 385 motor



FEATURES

- Integrated 80mΩ Power MOSFET
- 2V to 24V Input Voltage
- 1.2MHz Fixed Switching Frequency
- Internal 4A Switch Current Limit
- Adjustable Output Voltage
- Internal Compensation
- Up to 28V Output Voltage
- Automatic Pulse Frequency Modulation Mode at Light Loads
- up to 93% Efficiency
- Available in a 6-Pin SOT23-6 Package

APPLICATIONS

- Battery-Powered Equipment
- Set-Top Boxed
- LCD Bias Supply
- DSL and Cable Modems and Routers
- Networking cards powered from PCI or PCI express slots

GENERAL DESCRIPTION

The MT3608 is a constant frequency, 6-pin SOT23 current mode step-up converter intended for small, low power applications. The MT3608 switches at 1.2MHz and allows the use of tiny, low cost capacitors and inductors 2mm or less in height. Internal soft-start results in small inrush current and extends battery life.

The MT3608 features automatic shifting to pulse frequency modulation mode at light loads. The MT3608 includes under-voltage lockout, current limiting, and thermal overload protection to prevent damage in the event of an output overload. The MT3608 is available in a small 6-pin SOT-23 package.

TYPICAL APPLICATION

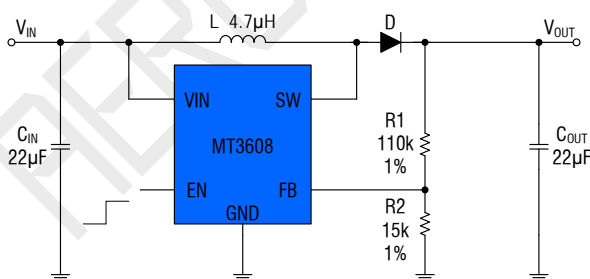
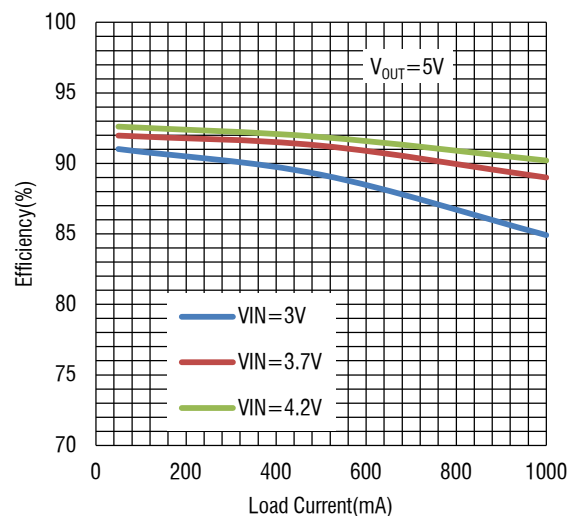


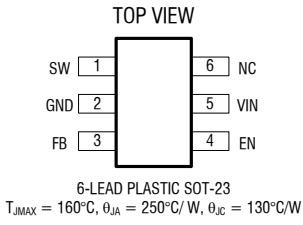
Figure 1. Basic Application Circuit



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

VIN, EN voltages.....	-0.3V to 26V	Junction Temperature(Note2).....	160°C
FB Voltages.....	-0.3V to 6V	Operating Temperature Range.....	-40°C to 85°C
SW Voltage.....	-0.3V to 30V	Lead Temperature(Soldering, 10s).....	300°C
Power Dissipation.....	0.6W	Storage Temperature Range.....	-65°C to 150°C
Thermal Resistance θ_{JC}	130°C/W	ESD HBM(Human Body Mode).....	2kV
Thermal Resistance θ_{JA}	250°C/W	ESD MM(Machine Mode).....	200V

PACKAGE/ORDER INFORMATION

	Order Part Number	Package	Top Marking
	MT3608	SOT23-6	B628DC

PIN DESCRIPTION

Pin Name	Pin Number	Description
SW	1	Power Switch Output. SW is the drain of the internal MOSFET switch. Connect the power inductor and output rectifier to SW. SW can swing between GND and 28V.
GND	2	Ground Pin
FB	3	Feedback Input. The FB voltage is 0.6V. Connect a resistor divider to FB.
EN	4	Regulator On/Off Control Input. A high input at EN turns on the converter, and a low input turns it off. When not used, connect EN to the input supply for automatic startup.
VIN	5	Input Supply Pin. Must be locally bypassed.
NC	6	No Connect

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 3)

($V_{IN}=V_{EN}=5V, T_A = 25^{\circ}C$, unless otherwise noted.)

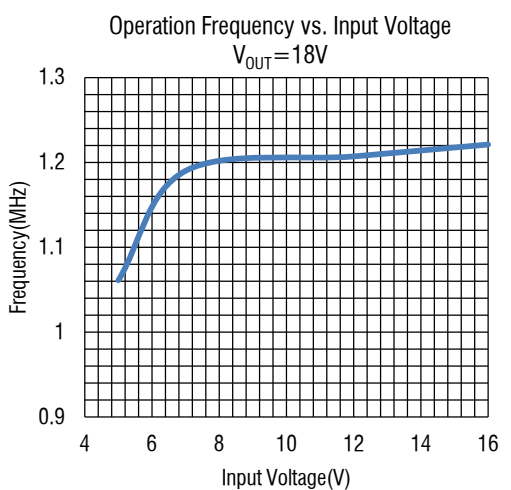
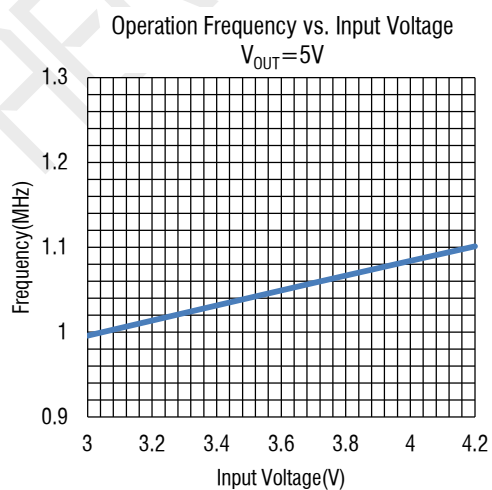
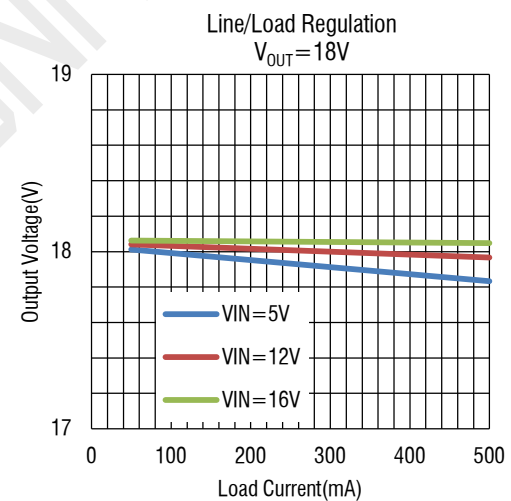
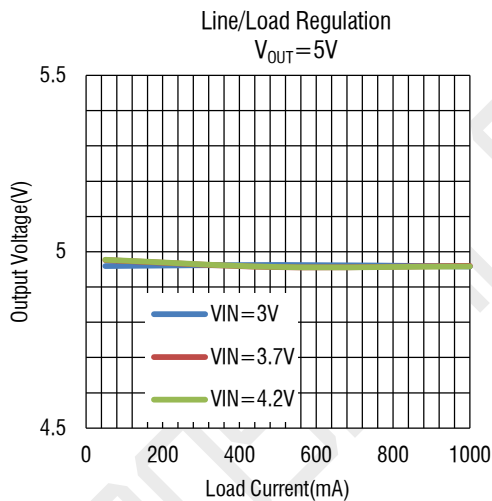
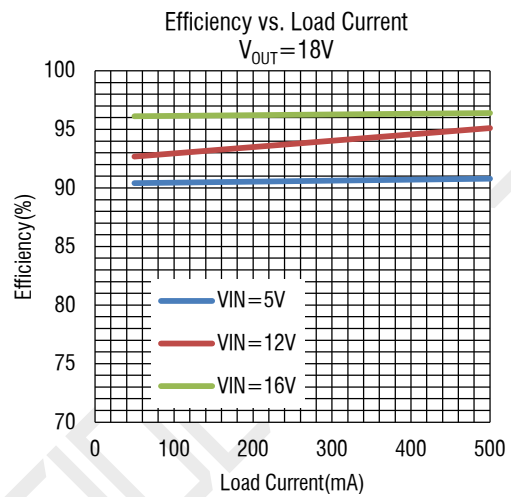
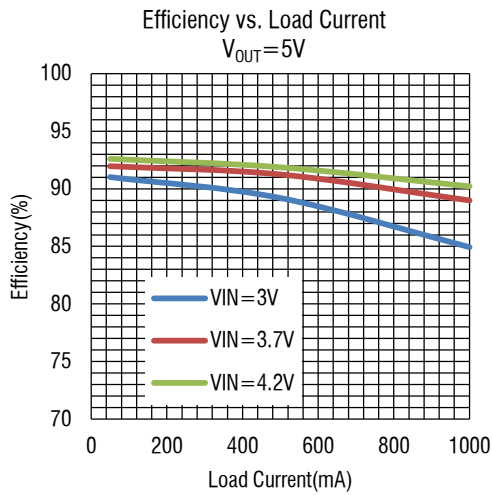
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Operating Input Voltage		2		24	V
Under Voltage Lockout				1.98	V
Under Voltage Lockout Hysteresis			100		mV
Current (Shutdown)	$V_{EN} = 0V$		0.1	1	μA
Quiescent Current (PFM)	$V_{FB} = 0.7V$, No switch		100	200	μA
Quiescent Current (PWM)	$V_{FB} = 0.5V$, switch		1.6	2.2	mA
Switching Frequency			1.2		MHz
Maximum Duty Cycle	$V_{FB} = 0V$	90			%
EN Input High Voltage		1.5			V
EN Input Low Voltage				0.4	V
FB Voltage		0.588	0.6	0.612	V
FB Input Bias Current	$V_{FB} = 0.6V$	-50	-10		nA
SW On Resistance			80	150	m Ω
SW Current Limit	$V_{IN} = 5V$, Duty cycle=50%		4		A
SW Leakage	$V_{SW} = 20V$			1	μA
Thermal Shutdown			155		$^{\circ}C$

Note 1: Absolute Maximum Ratings are those values beyond which the life of a device may be impaired.

Note 2: T_J is calculated from the ambient temperature T_A and power dissipation P_D according to the following formula: $T_J = T_A + (P_D) \times (250^{\circ}C/W)$.

Note 3: 100% production test at $25^{\circ}C$. Specifications over the temperature range are guaranteed by design and characterization.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

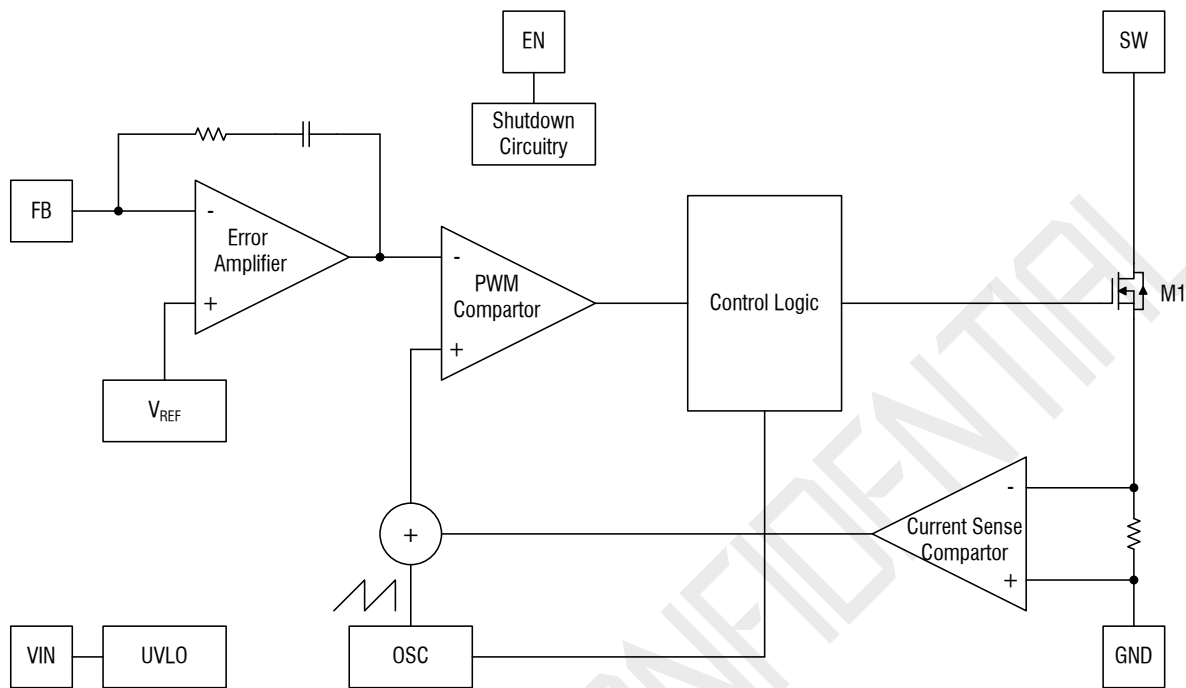


Figure 2. MT3608 Block Diagram

FUNCTIONAL DESCRIPTION

The MT3608 uses a fixed frequency, peak current mode boost regulator architecture to regulate voltage at the feedback pin. The operation of the MT3608 can be understood by referring to the block diagram of Figure 2. At the start of each oscillator cycle the MOSFET is turned on through the control circuitry. To prevent sub-harmonic oscillations at duty cycles greater than 50 percent, a stabilizing ramp is added to the output of the current sense amplifier and the result is fed into the negative input of the PWM comparator. When this voltage equals the output voltage of the error amplifier the power

MOSFET is turned off. The voltage at the output of the error amplifier is an amplified version of the difference between the 0.6V bandgap reference voltage and the feedback voltage. In this way the peak current level keeps the output in regulation. If the feedback voltage starts to drop, the output of the error amplifier increases. These results in more current to flow through the power MOSFET, thus increasing the power delivered to the output. The MT3608 has internal soft start to limit the amount of input current at startup and to also limit the amount of overshoot on the output.

APPLICATIONS INFORMATION

Setting the Output Voltage

The internal reference V_{REF} is 0.6V (Typical). The output voltage is divided by a resistor divider, R_1 and R_2 to the FB pin. The output voltage is given by

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Inductor Selection

The recommended values of inductor are 4.7 to 22 μ H. Small size and better efficiency are the major concerns for portable device, such as MT3608 used for mobile phone. The inductor should have low core loss at 1.2MHz and low DCR for better efficiency. To avoid inductor saturation current rating should be considered.

Capacitor Selection

Input and output ceramic capacitors of 22 μ F are recommended for MT3608 applications. For better voltage filtering, ceramic capacitors with low ESR are recommended. X5R and X7R types are suitable because of their wider voltage and temperature ranges.

Diode Selection

Schottky diode is a good choice for MT3608 because of its low forward voltage drop and fast reverse recovery. Using Schottky diode can get better efficiency. The high speed rectification is also a good characteristic of Schottky diode for high switching frequency. Current rating of the diode must meet the root mean square of the peak current and output average current multiplication as following

$$I_D(RMS) \approx \sqrt{I_{OUT} \times I_{PEAK}}$$

The diode's reverse breakdown voltage should be larger than the output voltage.

Layout Consideration

For best performance of the MT3608, the following guidelines must be strictly followed.

- Input and Output capacitors should be placed close to the IC and connected to ground plane to reduce noise coupling.
- The GND should be connected to a strong ground plane for heat sinking and noise protection.
- Keep the main current traces as possible as short and wide.
- SW node of DC-DC converter is with high frequency voltage swing. It should be kept at a small area.
- Place the feedback components as close as possible to the IC and keep away from the noisy devices.

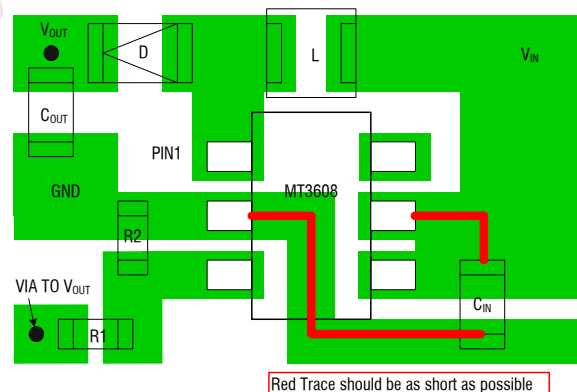
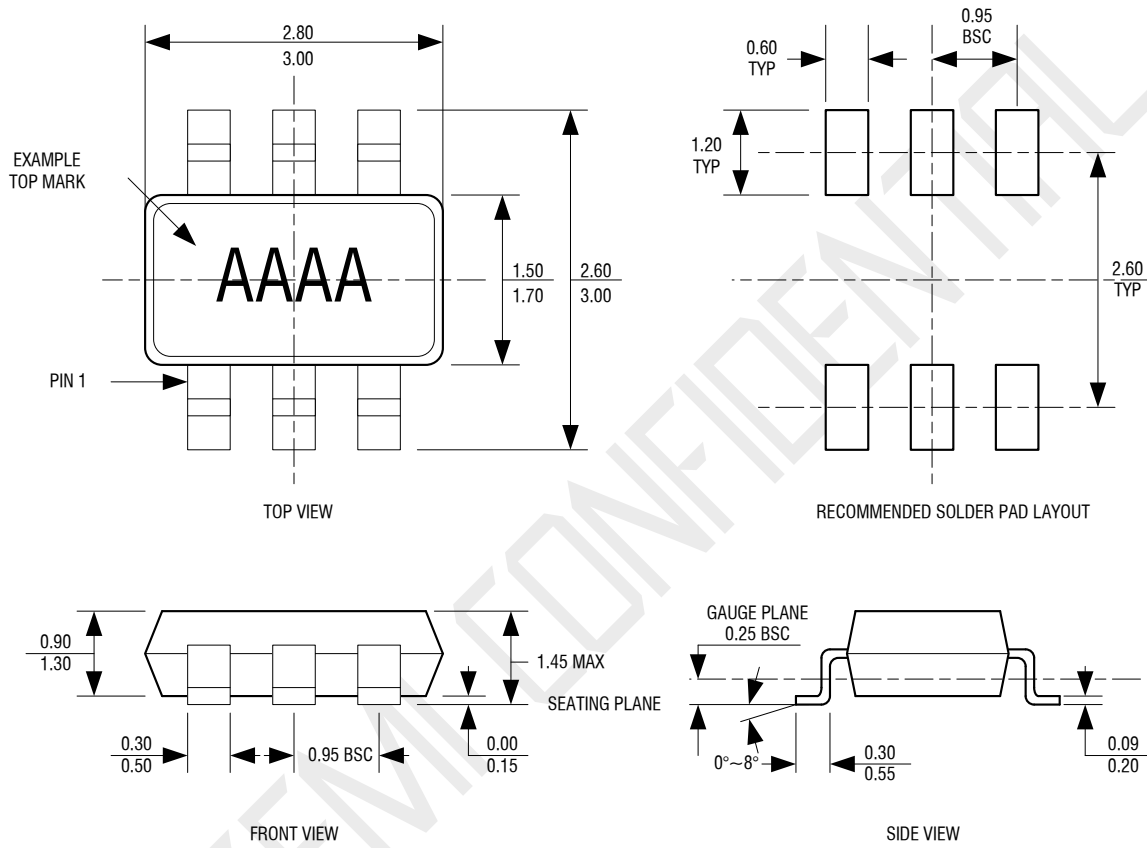


Figure 3. MT3608 Suggested Layout

PACKAGE DESCRIPTION

SOT23-6



- NOTE:
1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
 2. DRAWING NOT TO SCALE.
 3. DIMENSIONS ARE INCLUSIVE OF PLATING.
 4. DIMENSIONS ARE EXCLUSIVE OF MOLD FLASH AND METAL BURR.

IMPORTANT NOTICE

Xi'an Aerosemi Technology Co.,Ltd reserve the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services.

Xi'an Aerosemi Technology Co.,Ltd is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

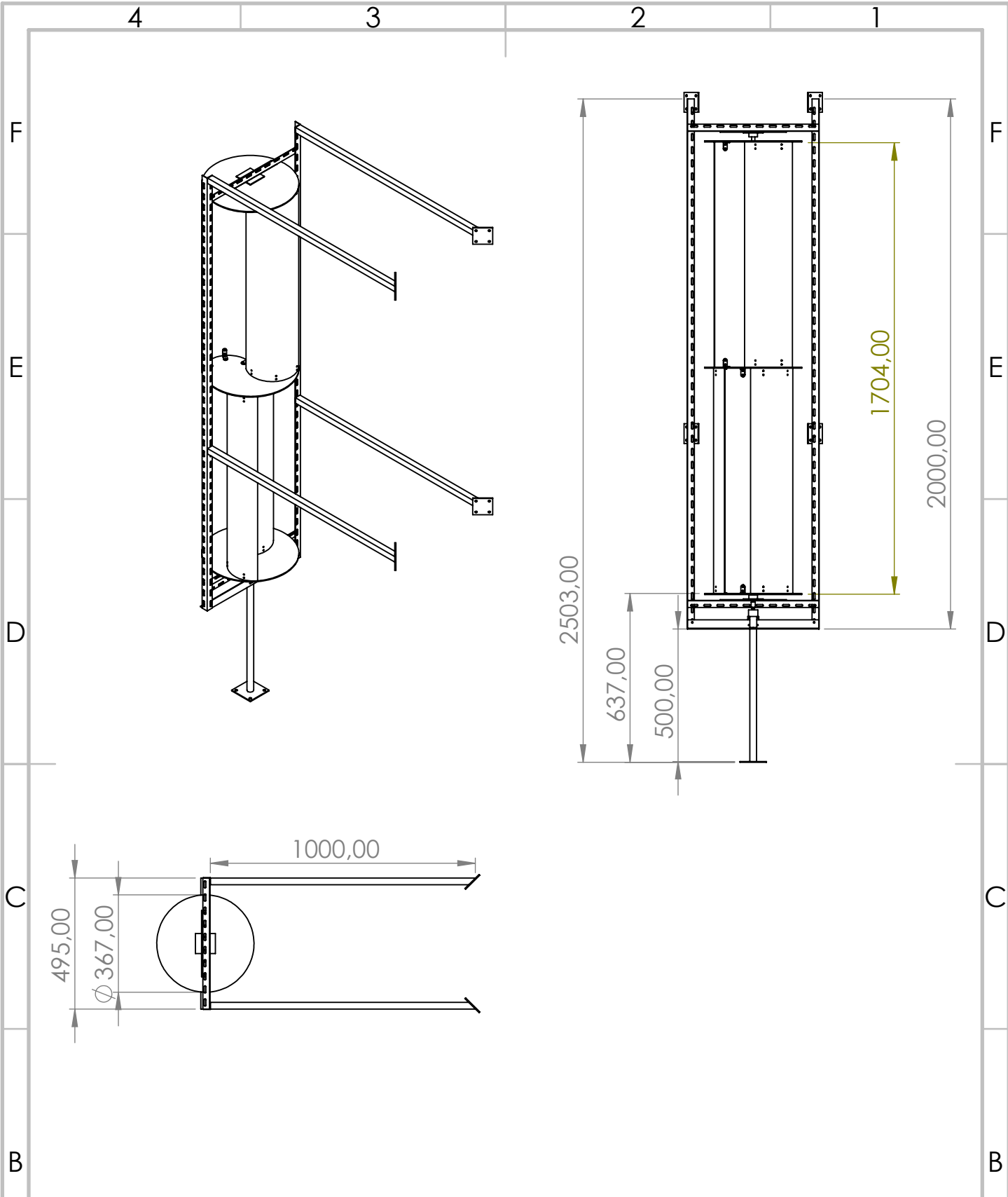
Xi'an Aerosemi Technology Co.,Ltd does not assume any responsibility for use of any its products for any particular purpose, nor does Xi'an Aerosemi Technology Co.,Ltd assume any liability arising out of the application or use of any its products or circuits.

Copyright © 2011, Xi'an Aerosemi Technology Co.,Ltd

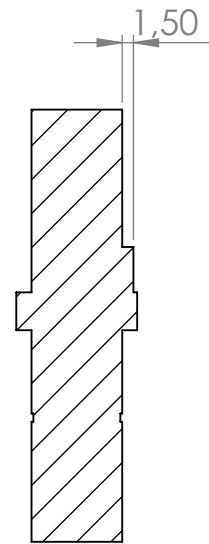
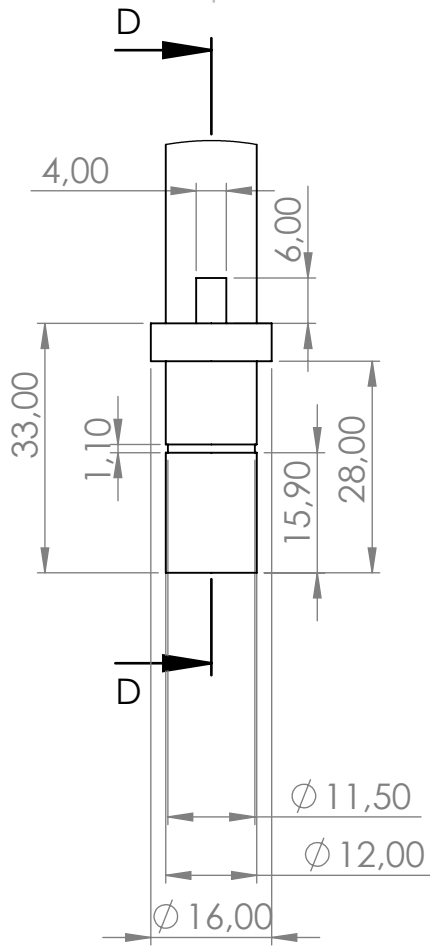
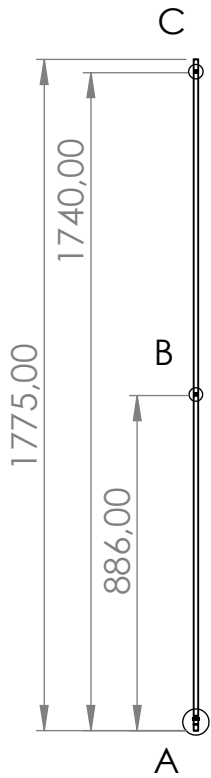
Tel: 0755-82879616 021-50871055 029-88868021

[Http://www.aerosemi.com](http://www.aerosemi.com)

E-Mail: sales@aerosemi.com

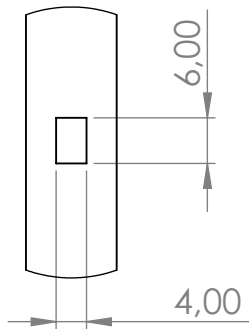


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO: <h1>Ensamblaje</h1>			
DIBUJ.		FABR.		CALID.		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
VERIF.						PESO:		ESCALA:1:20	
APROB.								HOJA 1 DE 1	
A4									

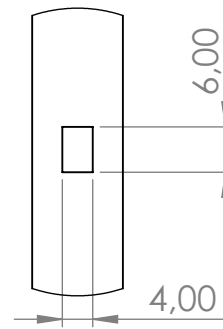


SECCIÓN D-D
ESCALA 1 : 1

DETALLE A
ESCALA 1 : 1



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



DETALLE C
ESCALA 1 : 1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Eje

MATERIAL:

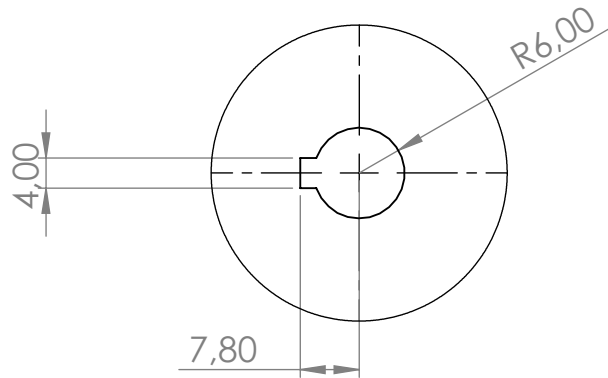
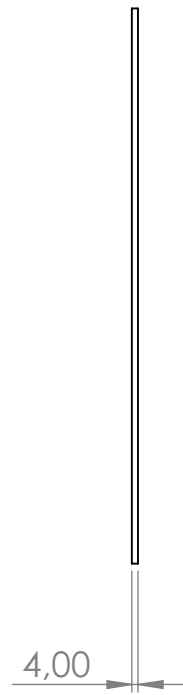
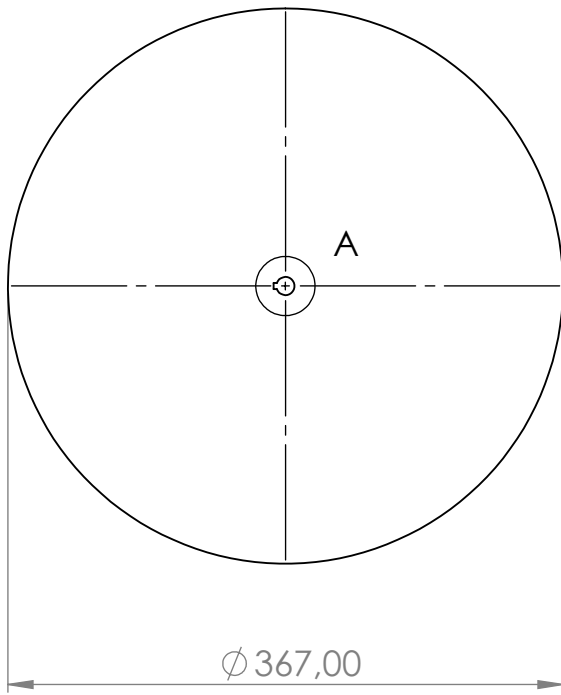
N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

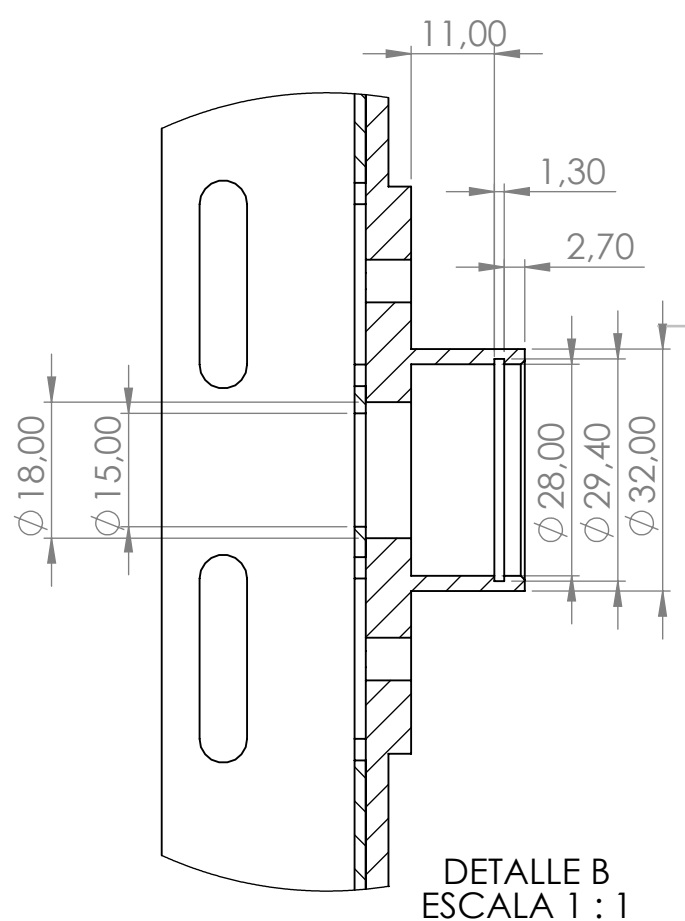
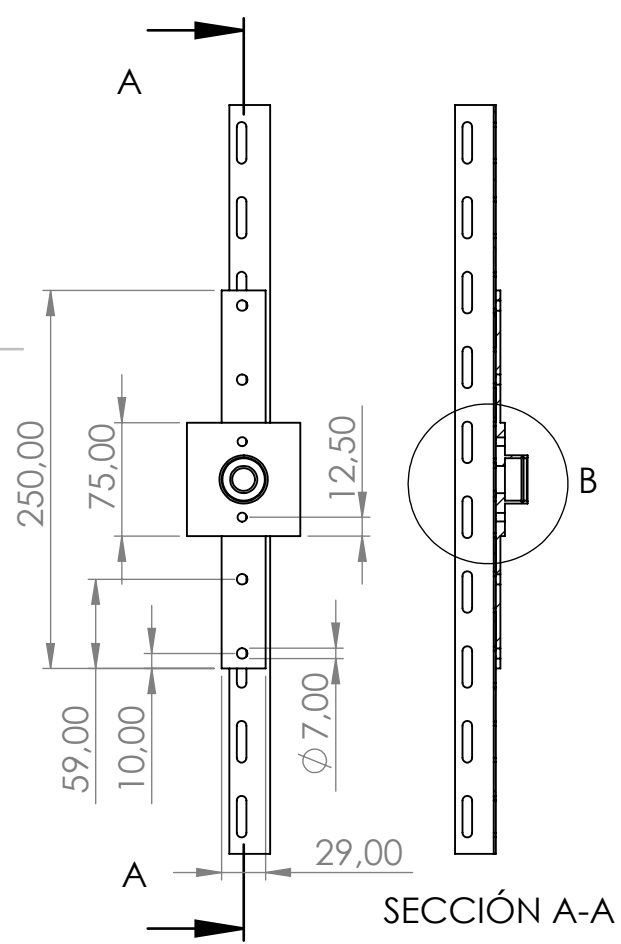
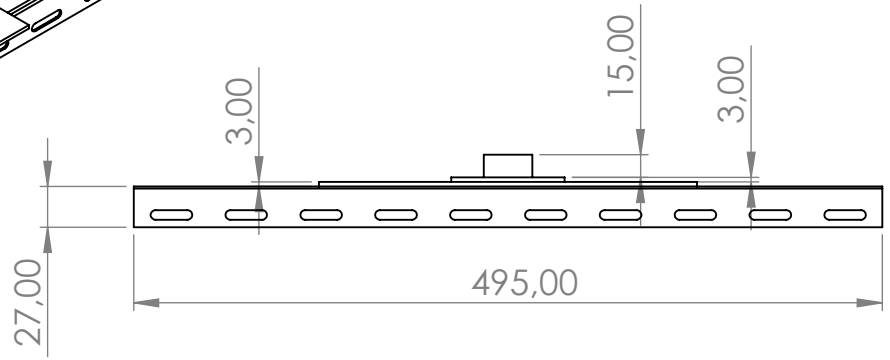
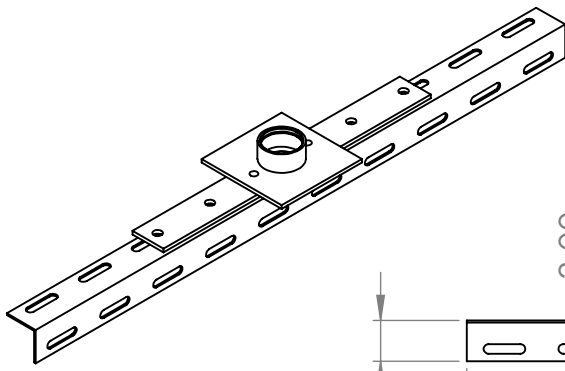
ESCALA:1:20

HOJA 1 DE 1



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO: <h1>Disco</h1>	
DIBUJ.				N.º DE DIBUJO	
VERIF.				A4	
APROB.				ESCALA: 1:10	
FABR.				HOJA 1 DE 1	
CALID.			MATERIAL:		
			PESO:		



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>DIBUJ.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>VERIF.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>APROB.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FABR.</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>CALID.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA		DIBUJ.				VERIF.				APROB.				FABR.				CALID.				TÍTULO: <h1>Base inferior</h1>		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																												
DIBUJ.																														
VERIF.																														
APROB.																														
FABR.																														
CALID.																														
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO		A4																								
PESO:				ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1																								