



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
AEROGENERADOR DE
LABORATORIO Y CONTROL
MEDIANTE ARDUINO**

Alumno: Jesús Alfonso Cabello Martos

Tutor: *Prof. D. David Vera Candeas*

Depto.: Ingeniería Eléctrica

Septiembre, 2023

Resumen

En la actualidad, la búsqueda de fuentes de energía sostenible se ha vuelto imperativa. En este contexto, la energía eólica emerge como una solución prometedora al aprovechar la fuerza del viento para generar electricidad. Los aerogeneradores, al demostrar ser alternativas limpias y renovables a las fuentes tradicionales de energía, adquieren un rol crucial en este escenario.

Este proyecto se centra en la caracterización de un aerogenerador de laboratorio con el propósito de explorar y comprender los fundamentos de la generación de energía eólica. Para lograr este objetivo, se construirá un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, seleccionado cuidadosamente tras un análisis exhaustivo de diversas variantes.

La implementación de tecnologías como el software de diseño y la impresión 3D, junto con la medición y monitoreo de los parámetros clave del aerogenerador a través de sensores y programación con Arduino, constituyen pilares fundamentales del proyecto. Estos datos desempeñarán un papel vital en la evaluación de la eficiencia y el rendimiento del sistema en función de las cambiantes condiciones del viento.

En resumen, el presente trabajo destaca el potencial de la energía eólica mediante un enfoque didáctico y práctico que fusiona diseño, tecnología y experimentación. Esta combinación pone de manifiesto la función esencial que la energía eólica puede desempeñar en un futuro energético sostenible.

Palabras clave: energía eólica, generación eléctrica, aerogenerador, diseño, Arduino.

Abstract

Currently, the search for sustainable energy sources has become imperative. In this context, wind energy emerges as a promising solution by harnessing the force of the wind to generate electricity. Wind turbines, by proving to be clean and renewable alternatives to traditional energy sources, play a crucial role in this scenario.

This project focuses on the characterization of a laboratory wind turbine with the purpose of exploring and understanding the fundamentals of wind power generation. To achieve this goal, a three-blade horizontal axis wind turbine will be built, carefully selected after an exhaustive analysis of various variants.

The implementation of technologies such as design software and 3D printing, together with the measurement and monitoring of the wind turbine's key parameters through sensors and Arduino programming, constitute fundamental pillars of the project. This data will play a vital role in evaluating the efficiency and performance of the system based on changing wind conditions.

In summary, the present work highlights the potential of wind energy through a didactic and practical approach that fuses design, technology and experimentation. This combination highlights the essential role that wind power can play in a sustainable energy future.

Keywords: wind energy, electricity generation, wind turbine, design, Arduino.

Índice de contenidos

1. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	9
1.1. Motivación.....	9
1.2. Objetivos	9
2. INTRODUCCIÓN.....	11
2.1. Contexto	11
2.2. Estado del arte	11
2.2.1. Energía eólica	11
2.2.2. Aerogeneradores	11
2.2.3. Clasificación de aerogeneradores	12
2.2.4. Comparación entre HAWT y VAWT	15
2.2.5. Selección del modelo de aerogenerador	16
2.2.6. Partes de un aerogenerador.....	17
2.2.7. Otras consideraciones sobre los HAWT	21
2.2.8. Regulación y control.....	22
2.2.9. Velocidad de rotación.....	22
2.2.10. Potencia eólica disponible	22
2.2.11. Potencia extraída máxima teórica. Límite de Betz	23
2.2.12. Medición de las magnitudes del viento	24
2.2.13. Control del aerogenerador	24
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Diseño del prototipo	26
3.1.1. Rotor	26
3.1.2. Góndola	29
3.1.3. Sensores.....	31
3.1.4. Sistema de balizamiento	32
3.1.5. Torre	33
3.1.6. Elementos adicionales	33

3.2. Construcción del prototipo	33
3.3. Aparatos de medida	39
3.4. Adquisición de datos	41
3.4.1. Arduino Uno	41
3.4.2. Sensor de efecto Hall	43
3.4.3. Sensor fotointerruptor.....	44
3.4.4. Tensión de salida	44
3.4.5. Pantalla OLED	45
3.5. ¿Qué son las interrupciones?	45
3.6. Procedimientos matemáticos	46
3.7. Esquema eléctrico, conexiones y programa de control	49
3.7.1. Esquema eléctrico.....	49
4. RESULTADOS	51
4.1. Análisis de datos del aerogenerador	51
4.2. Conclusión sobre los resultados	53
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	54
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXO A. Código Arduino.....	59

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características técnicas del regulador.</i>	40
<i>Tabla 2. Características técnicas del ventilador.</i>	41
<i>Tabla 3. Valores de funcionamiento por debajo de la potencia nominal.</i>	51
<i>Tabla 4. Valores de funcionamiento para potencia nominal.</i>	52
<i>Tabla 5. Valores de funcionamiento por encima de la potencia nominal.</i>	52

Índice de figuras

Figura 1. Diferencia entre turbina de eje vertical y horizontal [4].	12
Figura 2. Aerogenerador Savonius de palas rectas (izda.) y helicoidales (dcha.) [9].	13
Figura 3. Diferentes tipos de rotor Darrieus [10].	14
Figura 4. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para distintas turbinas eólicas [13].	16
Figura 5. Componentes de un aerogenerador [14].	17
Figura 6. Vista interior de la torre [15].	17
Figura 7. Vista interior de la góndola [1].	18
Figura 8. Vista del rotor [17].	19
Figura 9. Disposición del rotor con relación a la dirección del viento [19].	21
Figura 10. Configuración de palas mediante UltiMaker Cura.	27
Figura 11. Función “espejo” para invertir la posición del modelo.	27
Figura 12. Rodamiento de pala.	28
Figura 13. Buje.	28
Figura 14. Partes delantera y trasera del cono.	29
Figura 15. Carcasas superior e inferior.	29
Figura 16. Bastidor.	30
Figura 17. Generador.	30
Figura 18. Conjunto multiplicadora.	31
Figura 19. Soporte del anemómetro y veleta.	31
Figura 20. Cabeza del anemómetro y cazoleta.	32
Figura 21. Veleta y eje de la veleta.	32
Figura 22. Objeto a detectar.	33
Figura 23. Introducción de la varilla en el buje.	34
Figura 24. Montaje del rotor.	34
Figura 25. Montaje del rotor finalizado.	34
Figura 26. Montaje del fotointerruptor.	35

Figura 27. Montaje del generador.	35
Figura 28. Montaje del anemómetro y veleta.	36
Figura 29. Conjunto anemómetro-veleta finalizado.	36
Figura 30. Montaje sensor Hall.	36
Figura 31. Montaje del eje.....	37
Figura 32. Montaje de la carcasa superior.	37
Figura 33. Montaje de la torre.	38
Figura 34. Montaje del aerogenerador finalizado.	38
Figura 35. Dimensiones del prototipo.....	39
Figura 36. Anemómetro AN300.....	39
Figura 37. Regulador de velocidad.....	40
Figura 38. Ventilador.....	40
Figura 39. Multímetro digital.	41
Figura 40. Placa Arduino Uno R3.....	42
Figura 41. Disposición pines Arduino Uno.....	42
Figura 42. Sensor Hall.	43
Figura 43. Sensor fotointerruptor.....	44
Figura 44. Conexión de la pantalla OLED a la placa Arduino Uno.....	45
Figura 45. Circuito eléctrico.....	49
Figura 46. Vista interior y exterior del aerogenerador.....	50
Figura 47. Conexión a Arduino y placa de pruebas.	50
Figura 48. Curva de potencia.	53

1. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Motivación

El origen de este proyecto, centrado en la caracterización de un aerogenerador de laboratorio, emerge de la confluencia de experiencias profesionales, pasiones personales y aspiraciones académicas. De ahí mi motivación para embarcarme en este proyecto y dar vida a una idea que unifica mi trayectoria como ingeniero y mi aprecio por la innovación tecnológica.

Mi experiencia como técnico de puesta en marcha y mantenimiento en aerogeneradores ha sido un pilar fundamental en la generación de esta iniciativa. La interacción directa con estos sistemas me ha brindado una visión profunda de su funcionamiento, sus desafíos y su relevancia en el panorama energético. La oportunidad de aplicar mi experiencia práctica para crear un prototipo de aerogenerador de laboratorio que pueda contribuir al conocimiento en este campo es una fuente de inspiración constante.

Además, mi formación en robótica me proporcionó las habilidades necesarias para programar y controlar el aerogenerador, elevando su funcionalidad y versatilidad. Este cruce de conocimientos técnicos y habilidades de programación es esencial para el éxito del proyecto.

En definitiva, el desafío de diseñar mis propios prototipos es un objetivo que me estimula con el fin de ver materializadas mis ideas. La posibilidad de aplicar los conceptos aprendidos a lo largo de mi trayectoria profesional y educativa para crear una herramienta útil y significativa en el ámbito de la energía renovable es un motivante poderoso. Este proyecto no solo representa una oportunidad para aprender y crecer como ingeniero, sino también una forma de contribuir al avance tecnológico y al conocimiento colectivo.

1.2. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar, construir y controlar un prototipo funcional de aerogenerador eléctrico que permita ilustrar sus partes principales y su funcionamiento con el fin de mejorar la comprensión de la tecnología eólica en entornos educativos y formativos.

Objetivos específicos

- Conocer los distintos tipos de aerogeneradores y sus características principales con el propósito de seleccionar el modelo más apropiado para el diseño del prototipo.
- Identificar las variables más importantes que influyen en el funcionamiento del aerogenerador, mejorando así el dimensionamiento de los componentes hardware para asegurar el rendimiento óptimo del sistema de control.
- Desarrollar un software que permita el control y la adquisición de datos, facilitando así el análisis de resultados y la identificación de futuras mejoras.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Contexto

En la búsqueda constante de soluciones energéticas más sostenibles y eficientes, la energía eólica se ha destacado como una respuesta prometedora a los desafíos actuales en la generación de electricidad. Los aerogeneradores, que transforman la fuerza del viento en energía eléctrica utilizable, desempeñan un papel fundamental en esta transición hacia fuentes de energía limpias y renovables.

Aprovechando la inmensa y constante reserva de energía cinética en la atmósfera terrestre, la energía eólica se ha convertido en un pilar esencial en la transición hacia una matriz energética más sostenible. La capacidad para diseñar y optimizar dispositivos que conviertan el movimiento del viento en electricidad ha llevado a avances significativos en este ámbito.

En tal escenario, es crucial comprender el papel de los aerogeneradores en la generación de energía limpia y renovable. Aprovechando la energía cinética del viento de manera eficiente, estos dispositivos contribuyen significativamente a reducir emisiones y suministrar electricidad globalmente. Al explorar los fundamentos y el potencial de los aerogeneradores, nos adentramos en una visión prometedora de un futuro energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. [1]

2.2.2. Aerogeneradores

Un aerogenerador es una máquina formada principalmente por una turbina eólica y un generador eléctrico. La turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es transformada en energía eléctrica por el generador. [2]

2.2.3. Clasificación de aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios. Según su principio de funcionamiento están los que se basan en la fuerza de arrastre o resistencia (drag) y los que se basan en la fuerza de sustentación (lift). Al primer grupo pertenecen los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius y los aeromotores multipala de eje horizontal empleados para el bombeo de agua, que tienen una pequeña velocidad específica y un elevado par de arranque. Los basados en la fuerza de sustentación tienen una velocidad específica mayor y un par de arranque menor, como los aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice (bipala y tripala) y los de eje vertical tipo Darrieus, destinados principalmente a la producción eléctrica [3].

De acuerdo a su eje de rotación, principalmente podemos encontrar dos tipos de aerogeneradores: de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) cuyo eje de rotación es paralelo a la dirección del viento y de eje vertical o VAWT, (Vertical Axis Wind Turbine) donde su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento [4].

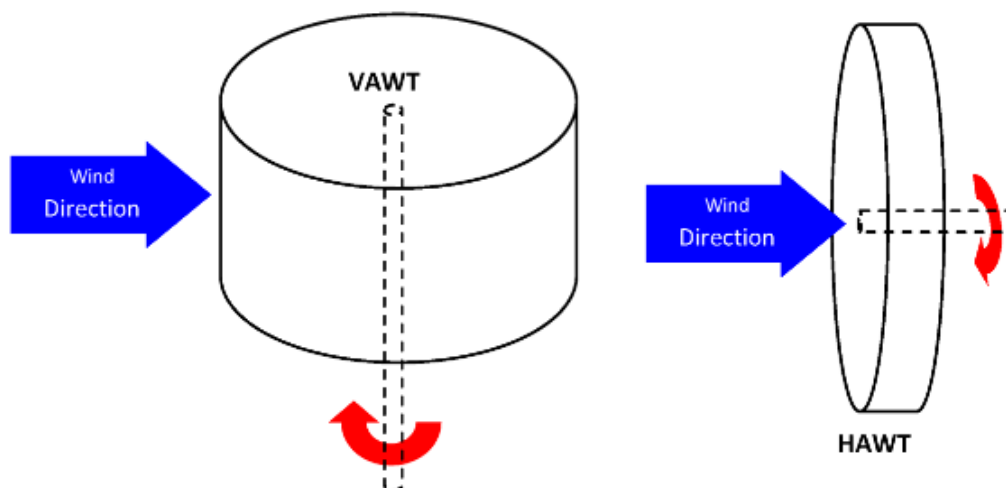


Figura 1. Diferencia entre turbina de eje vertical y horizontal [4].

Otras clasificaciones pueden realizarse en función de:

- La velocidad específica de la turbina (λ) o TSR (tip speed ratio): es la relación entre la velocidad lineal del extremo de la pala (u) y la velocidad nominal del viento (v). La velocidad nominal del viento es aquella para la cual la turbina alcanza su potencia nominal. En base a este criterio se clasifican en lentos, intermedios y rápidos. Los aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice, bipalas o tripalas, se consideran rápidos y los multipalas, lentos o intermedios, dependiendo del número de palas [3].

- El sistema de control de potencia utilizado: control pasivo por pérdida aerodinámica (stall controlled) y control activo por variación del ángulo de paso (pitch controlled) [5].
- La velocidad de rotación: rotores de velocidad fija o FSWT (Fixed-speed Wind Turbine) y variable o VSWT (Variable-speed Wind Turbine). La turbina de velocidad variable puede producir mayor cantidad de energía en un mayor rango de velocidades de viento [6].

- **Aerogeneradores de eje vertical**

Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos cuyo eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento. Sus principales ventajas son que tienen una mejor accesibilidad lo que facilita las tareas de mantenimiento y no requieren sistemas de orientación ni mecanismos de cambio de paso. Sin embargo, necesitan sistemas exteriores de arranque en algunos modelos y tienen menor eficiencia [7].

Existen dos tipos principales de aerogeneradores de eje vertical: los Savonius y los Darrieus basados en la fuerza de arrastre y sustentación respectivamente [8].

Aerogenerador con rotor Savonius

El rotor Savonius está formado por dos semicilindros huecos cuyos ejes están desplazados entre sí lo que facilita el cambio de dirección del flujo. Así, además de la acción de las fuerzas de origen aerodinámico se aprovecha la variación de la cantidad de movimiento del fluido. Aunque el rotor Savonius no es eficiente en la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire, su bajo coste y fácil construcción lo hacen útil para ciertas aplicaciones mecánicas como el bombeo de agua [3] [7]. Su diseño puede mejorarse ampliando el número de palas e incluso haciéndolas con forma helicoidal.



Figura 2. Aerogenerador Savonius de palas rectas (izda.) y helicoidales (dcha.) [9].

Aerogenerador con rotor Darrieus

El rotor Darrieus está formado por un conjunto de álabes que pueden girar alrededor de un eje vertical. El momento de giro del rotor se debe a las fuerzas aerodinámicas que se desarrollan en los álabes. Su par de arranque es pequeño y en la práctica requiere un arranque auxiliar. Algunos prototipos combinan un rotor Savonius con un Darrieus, de forma que el primero facilita el arranque del segundo. Este tipo de rotor es más adecuado para la producción eléctrica que el Savonius [3]. El rotor Darrieus puede ser subdividido en tres clases [10].

- Darrieus

Los álabes están unidos al eje vertical adoptando el modelo de curva troposkein, aunque puede utilizarse también la curva catenaria. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en las turbinas de eje horizontal y permite mayores velocidades que las del rotor Savonius [7].

- Giromill o H-Darrieus

Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales que pueden salir por los extremos de la pala o desde la parte central [3]. Las configuraciones constructivas más comunes son aquellas basadas en 3 palas, donde pueden poseer un ángulo de ataque fijo o variable. Otra configuración es el tipo H-Darrieus, variando de 2 a 6 palas, cuya proyección lateral toma la forma de una H [11].

- Darrieus helicoidal

Los rotores Darrieus de palas helicoidales son una variante del de palas rectas pero captan mejor el viento debido a la curvatura que presenta la pala [12].

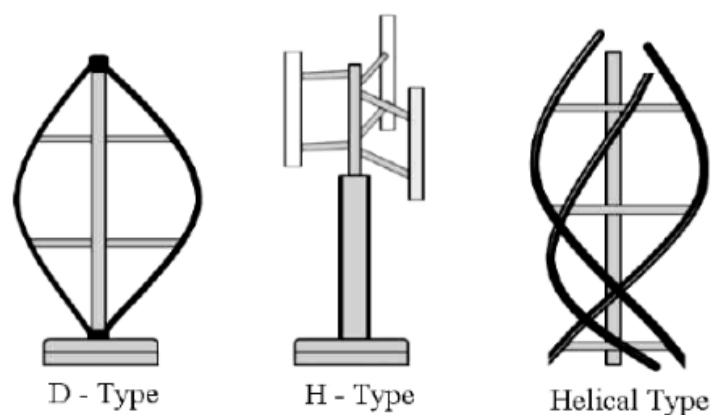


Figura 3. Diferentes tipos de rotor Darrieus [10].

- **Aerogeneradores de eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal son aquellos cuyo eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. A diferencia de los aerogeneradores de eje vertical, éstos tienen la capacidad de autoarranque, así como un mecanismo de orientación. Estos aerogeneradores son altamente dependientes de la dirección del viento y por lo tanto son operados generalmente a alturas más elevadas que los aerogeneradores de eje vertical [8].

Según la velocidad de giro, los aerogeneradores de eje horizontal se clasifican en [3]:

- Generadores lentos: los generadores multipala tienen normalmente entre 6 y 24 palas. Poseen una baja velocidad específica (λ) y un elevado par de arranque. Su uso más común es para accionar una bomba de agua.
- Generadores rápidos: tienen dos o tres palas, siendo los más habituales los tripala, aunque existen modelos con una sola. Presentan una velocidad específica (λ) más alta y tienen un par de arranque pequeño. Son los más empleados para generación eléctrica, a través de su acoplamiento con un alternador y su gama de potencias es muy amplia.
- Generadores de velocidad intermedia: tienen entre 3 y 6 palas y sus prestaciones están comprendidas entre las de los dos casos anteriores. Generalmente son de pequeña potencia y su principal aplicación es en equipos autónomos para producción de electricidad.

2.2.4. Comparación entre HAWT y VAWT

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal frente a los de eje vertical son [3]:

- Presentan unas características de par y velocidad más adecuadas para la producción eléctrica.
- Permiten barrer mayores superficies con el consiguiente aumento de potencia.
- Aprovechan mejor la velocidad del viento por su mayor elevación respecto al suelo.
- Tienen mayor coeficiente de potencia (C_p). Como puede observarse en la figura 4 el rotor de 3 palas es el modelo que muestra un mayor valor del coeficiente de potencia.

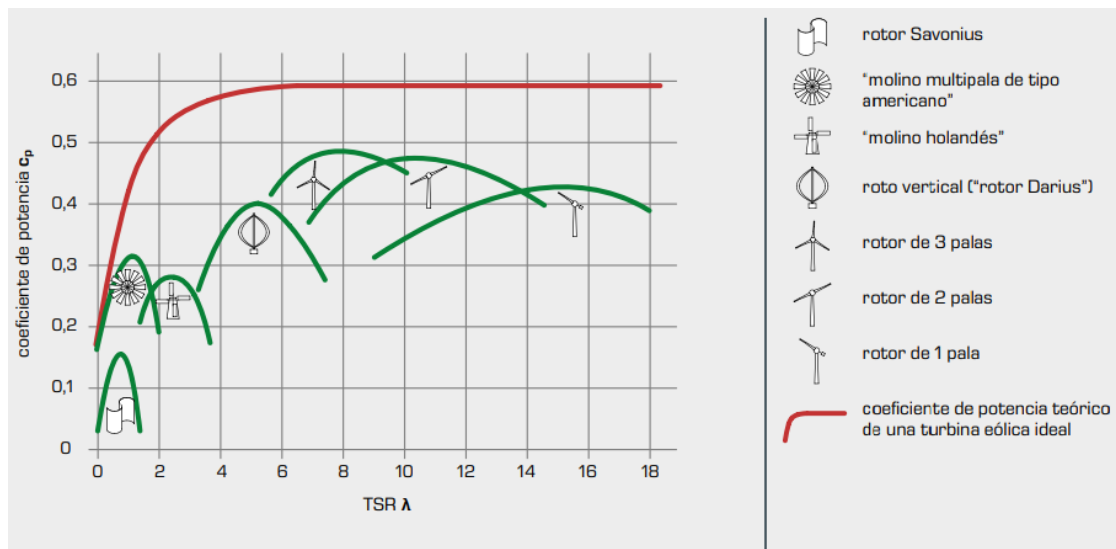


Figura 4. Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica para distintas turbinas eólicas [13].

Por otra parte, los aerogeneradores de eje vertical presentan como ventajas frente a los de eje horizontal las siguientes:

- Poseen una simetría vertical por lo que no precisan sistemas de orientación.
- Tienen una mejor accesibilidad por su menor altura respecto al suelo facilitando las tareas de mantenimiento.
- No necesitan mecanismos de cambio de paso.

2.2.5. Selección del modelo de aerogenerador

Una vez comparados los distintos tipos de aerogeneradores resulta evidente que por motivos de eficiencia energética y rendimiento la mayoría de las turbinas eólicas utilizadas para la producción eléctrica sean de eje horizontal. De hecho, actualmente los aerogeneradores más empleados son del tipo de rotor tripala a barlovento con sistema de orientación activo y torre tubular, dominando la regulación por un sistema de cambio de paso independiente en cada pala (pitch). Además se ha incrementado la utilización de rotores de velocidad variable para maximizar la potencia producida en todo momento, así como el uso de generadores asíncronos doblemente alimentados y generadores síncronos multipolo.

Por todo lo anterior, optaremos por diseñar y construir un prototipo basado en los modelos de aerogeneradores que habitualmente se emplean en los parques eólicos.

2.2.6. Partes de un aerogenerador

Los elementos principales de un aerogenerador están representados en la figura 5:

1. Base y cimientos; 2. Celda de media tensión; 3. Torre; 4. Escalera interior de acceso a góndola; 5. Sistema de orientación (yaw). 6. Góndola o nacelle; 7. Generador eléctrico; 8. Anemómetro y veleta; 9. Freno para fijación del rotor; 10. Caja multiplicadora (gearbox); 11. Palas; 12. Punto de inserción de la pala en el buje; y 13. Cono o nariz.

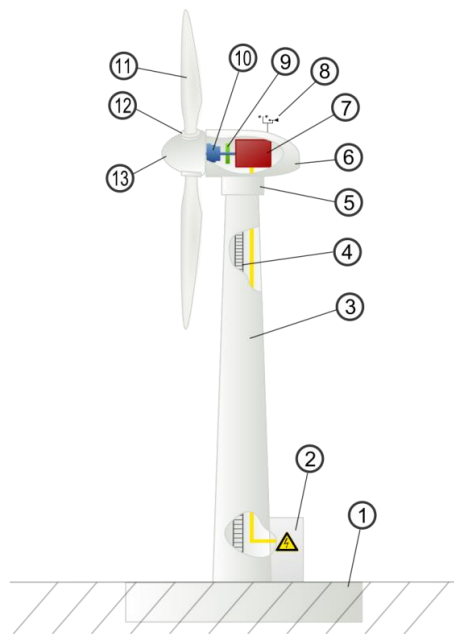


Figura 5. Componentes de un aerogenerador [14].

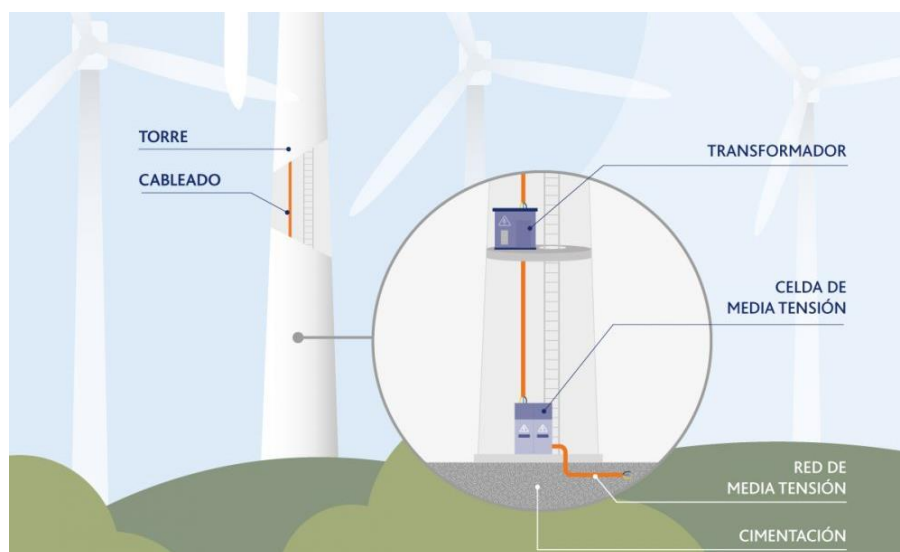


Figura 6. Vista interior de la torre [15].

▪ Góndola

La góndola es el cubículo situado en la parte superior de la torre y donde se ubican los componentes principales del aerogenerador como la multiplicadora, el generador, el sistema de orientación, etc. El personal de mantenimiento puede acceder a la góndola a través del interior de la torre [16].

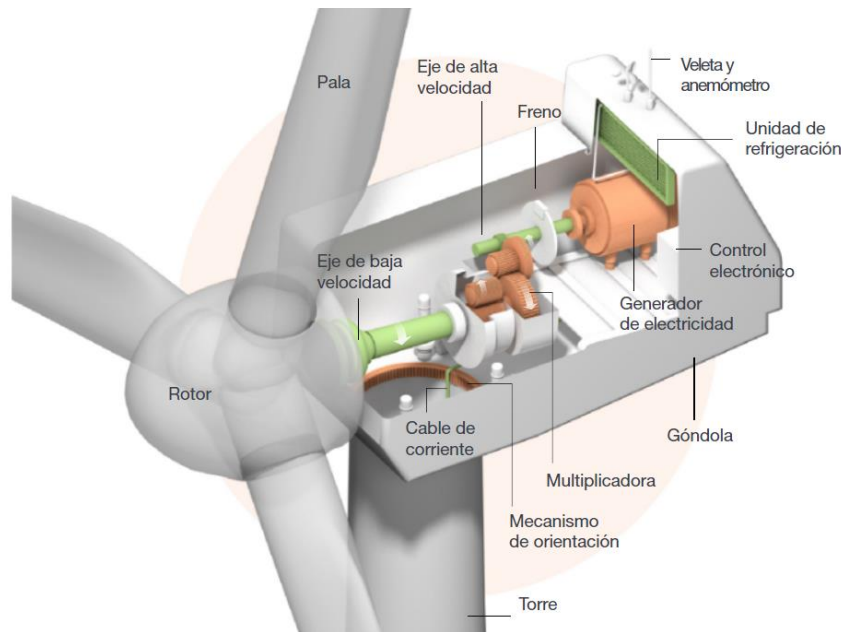


Figura 7. Vista interior de la góndola [1].

- Carcasa: es la cubierta que protege los componentes que se encuentran en la góndola frente a los agentes meteorológicos y condiciones ambientales externas [17].
- Eje principal: se encarga de transmitir el par motor que provoca el viento sobre el rotor hasta la multiplicadora [17].
- Multiplicadora: transmite la potencia del eje principal al generador. La caja de engranajes es un multiplicador para aumentar la velocidad desde unas decenas de revoluciones por minuto (rpm) a valores entre 1.000 y 1.500 rpm requeridos por el generador eléctrico [3].
- Sistema de orientación: el sistema yaw permite que la góndola gire alrededor del eje de la torre. Se activa mediante el sistema de control, que recibe la información del anemómetro y veleta ubicados en la parte superior de la góndola. Ésta gira sobre una corona dentada accionada por motores eléctricos para orientarse en la posición más óptima [17].
- Sistema de freno: el freno principal del aerogenerador es de tipo aerodinámico por puesta en bandera de las palas (las palas giran 90 grados alrededor de su eje

longitudinal). Respecto al freno mecánico, está compuesto por un freno de disco hidráulicamente activado que se monta a la salida del eje de alta velocidad de la multiplicadora. Este freno mecánico sirve como soporte al freno aerodinámico y también se utiliza para inmovilizar el rotor por seguridad [17].

- **Generador:** transforma la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica. El generador empleado puede ser síncrono de imanes permanentes (multipolo) o asíncrono (inducción) con rotor en jaula de ardilla o rotor devanado doblemente alimentado. El generador multipolo puede prescindir de multiplicadora por lo que estos sistemas también reciben el nombre de “transmisión directa” [3].
- **Transformador:** transfiere la energía producida por el aerogenerador hacia una subestación, desde donde se distribuye a la red eléctrica [18]. El transformador puede ubicarse dentro o fuera de la torre, e incluso en la góndola.

▪ **Rotor**

El rotor convierte la energía cinética del viento en energía cinética de rotación en su eje. Está compuesto por las palas, el buje y el cono.

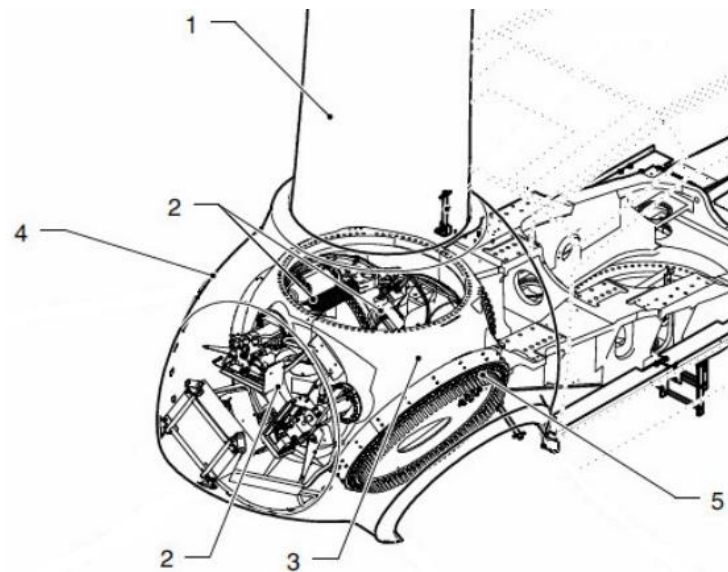


Figura 8. Vista del rotor [17].

1. Pala; 2. Sistema de cambio de paso; 3. Buje; 4. Cono; y 5. Rodamiento de pala.

- **Palas:** tienen un diseño aerodinámico y se construyen con materiales ligeros y resistentes como fibra de vidrio con resinas epóxicas o fibra de carbono. Los

rodamientos de la pala son el interfaz entre la pala y el buje y permiten el movimiento de cambio de paso [3].

- Buje: es el elemento al cual se unen las palas y transmite la potencia eólica captada por el rotor al eje principal [3].
- Cono: es la cubierta metálica con forma cónica que se encara al viento y lo desvía hacia el tren motor. Tiene forma aerodinámica para impedir la formación de turbulencias [3]. Además protege el buje y los rodamientos de pala del ambiente [17].

▪ **Torre**

La góndola se sustenta sobre una torre formada por varias secciones de acero o de hormigón, unidas por medio de bridas atornilladas. Las torres de celosía no se utilizan en grandes aerogeneradores.

Como ventajas de las torres de acero tubular respecto a las de celosía caben destacar: mayor seguridad para equipos y personas, buen comportamiento dinámico frente a vibraciones, mejor aspecto estético, facilidad de montaje y escaso mantenimiento. Como inconvenientes, un mayor coste y mayor dificultad de fabricación y transporte que las de celosía [3].

▪ **Sensores**

Los aerogeneradores están equipados con diversos sensores que pueden recoger señales externas como la velocidad y dirección de viento o encargarse de registrar parámetros del funcionamiento de los aerogeneradores como son temperaturas de los componentes, posición de palas, etc. Toda la información se registra y analiza en tiempo real por el sistema de control [17].

▪ **Sistema de control**

El sistema de control procesa constantemente los parámetros internos y el estado de los sensores y a partir de ellos envía las órdenes de control y mando que afectan básicamente a operaciones como la regulación de potencia y del cambio de paso, orientación del rotor, proceso de conexión y desconexión de red, arranques y paros del aerogenerador, etc. Los controladores electrónicos pueden estar constituidos por microprocesadores o por controladores lógicos programables (PLC's) [3].

2.2.7. Otras consideraciones sobre los HAWT

- Con relación al número de palas

Los rotores de los HAWT pueden tener una, dos o tres palas aunque el más empleado en la actualidad es el tripala que consta de 3 palas colocadas formando 120 grados entre sí [3]. Presenta como principal ventaja una velocidad de giro más suave y uniforme debido a su momento de inercia, limitando los esfuerzos sobre la estructura. Asimismo, giran a menor velocidad que el mono y el bipala, disminuyendo el efecto de la fuerza centrífuga, el nivel de vibraciones y la producción de ruido [3].

- Con relación a la altura del buje respecto al suelo

Conviene situar el rotor a la mayor altura posible ya que la velocidad del viento aumenta y es más uniforme. De esta forma disminuye la diferencia de velocidades entre los extremos superior e inferior del rotor y las palas se ven sometidas a una menor diferencia de esfuerzos sobre el plano de giro del rotor. Además, se reducen las turbulencias que se originan en las zonas más cercanas al suelo [3].

- Con relación a la disposición de rotor respecto al viento

Existen dos tipos de disposición: rotor a barlovento y rotor a sotavento. Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento pero se requiere un rotor más rígido y más alejado de la torre para evitar el contacto de las palas con ésta debido a su flexión. También es necesario un mecanismo de orientación hacia el viento. Los sistemas de orientación pueden ser activos, los cuales incorporan sensores de dirección y servomotores que permiten posicionar el rotor perpendicularmente a la dirección del viento, o pasivos, que utilizan básicamente el sistema de una aleta estabilizadora o una hélice auxiliar [3].

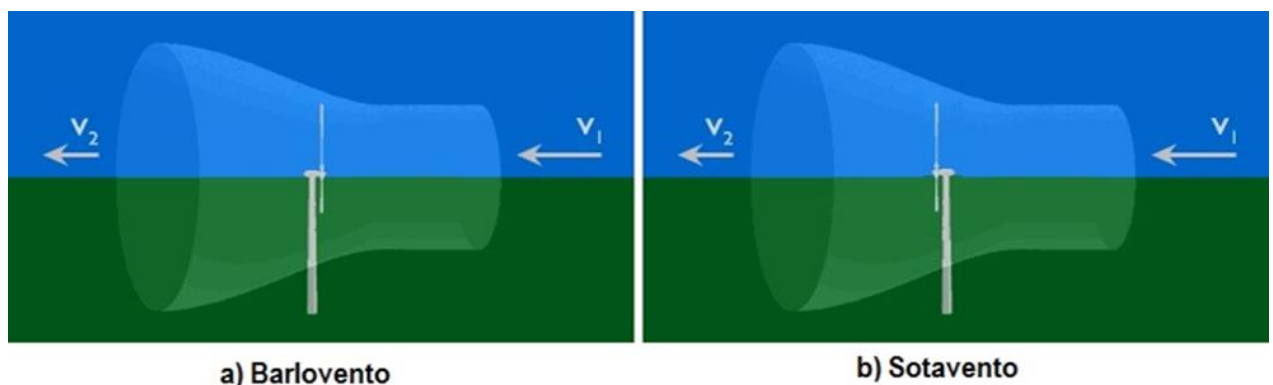


Figura 9. Disposición del rotor con relación a la dirección del viento [19].

2.2.8. Regulación y control

La regulación y control se utiliza para regular la potencia del rotor, controlar su velocidad de rotación y detener el rotor, evitando posibles daños cuando la velocidad del viento alcance niveles extremadamente altos.

Los sistemas más empleados para la regulación y control de potencia son: control pasivo de pérdida aerodinámica (stall controlled) y control activo por ángulo de paso variable (pitch controlled).

En el sistema pasivo por pérdida aerodinámica (stall controlled) la pala permanece unida al buje en un ángulo fijo. La regulación se consigue por un perfil de la pala que ha sido diseñado para asegurar que a medida que aumente la velocidad del viento la pala pierda sustentación gradualmente [5].

En el sistema activo de paso variable (pitch controlled) el control se realiza de manera que, para velocidades de viento inferiores a la nominal se ajusta el ángulo para extraer del viento la máxima potencia y por encima de esa velocidad se realiza el ajuste para mantener constante la potencia captada al viento. El sistema mide continuamente la velocidad del viento, enviando las órdenes de control para que las palas del rotor giren sobre su eje longitudinal y así varíe el ángulo de paso de la pala y en consecuencia la fuerza aerodinámica de sustentación. A pesar de que este tipo de regulación implica mayor coste y mantenimiento, permite optimizar la extracción de energía, operar con rotores a velocidad variable y aporta mayor seguridad frente a vientos intensos [3].

2.2.9. Velocidad de rotación

El comportamiento de los aerogeneradores respecto a su velocidad de rotación está directamente relacionado con el tipo de generador eléctrico empleado. Los diferentes sistemas de regulación junto a los diversos tipos de generadores permiten concebir múltiples configuraciones de aerogeneradores [3]. Las turbinas de velocidad variable pueden producir mayor cantidad de energía en un mayor rango de velocidades de viento y adaptarse mejor a las exigencias de la red [6].

2.2.10. Potencia eólica disponible

Una masa de aire (m) con velocidad (v) posee una energía cinética (E_c) dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

El caudal másico de aire (m) de densidad (ρ) que fluye con velocidad (v) a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección del flujo, es:

$$m = \rho Av$$

La potencia disponible del caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

donde:

- P_d es la potencia disponible en vatios (W).
- ρ es la densidad del aire en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).
- A es el área expuesta perpendicularmente al flujo de viento en metros cuadrados (m^2).
- v es la velocidad del viento en metros por segundo (m/s).

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría obtener del viento si se pudiera extraer del mismo toda su energía cinética. La potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área expuesta perpendicularmente al flujo de viento y al cubo de su velocidad [3].

2.2.11. Potencia extraída máxima teórica. Límite de Betz

La ley de Betz establece que no se puede convertir más del 59,3 % de la energía cinética del viento en energía mecánica usando un aerogenerador. En términos matemáticos, esto se traduce en que el coeficiente de potencia máximo teórico que se puede obtener es de $16/27 \approx 0,593$.

Debido al avance en el diseño aerodinámico y estructural de las palas, se alcanzan valores muy elevados, del orden del 50%, cercanos al límite de Betz. También ha mejorado el rendimiento global de conversión de energía mecánica captada por el rotor de la turbina a energía eléctrica y que incluye básicamente las pérdidas mecánicas de rozamiento por transmisiones y las pérdidas del generador eléctrico. El valor máximo de este rendimiento se sitúa en el entorno del 95%, por lo que aproximadamente un gran aerogenerador en condiciones óptimas de rendimiento máximo puede llegar a convertir en energía eléctrica aproximadamente el 45% de la energía cinética del viento que incide sobre el rotor de la turbina eólica [3].

2.2.12. Medición de las magnitudes del viento

El anemómetro y la veleta son dos componentes esenciales de un aerogenerador que se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento respectivamente.

Los anemómetros más empleados son del tipo cazoletas y los ultrasónicos:

- Anemómetro de cazoletas: consiste en tres o cuatro cazoletas cónicas o semiesféricas dispuestas de manera simétrica alrededor de un eje vertical. Las cazoletas giran alrededor del eje debido a que la fuerza que ejerce el viento es mayor en la cara cóncava que en la convexa. La velocidad de giro es proporcional a la velocidad del viento. El anemómetro va dotado de un transductor que convierte la velocidad de giro del sensor en una señal mecánica o eléctrica que permita ser registrada. El anemómetro de tres cazoletas es el más utilizado [3].
- Anemómetro ultrasónico: este tipo de anemómetros utilizan ondas ultrasónicas para medir tanto la velocidad como la dirección del viento. Tienen múltiples pares de sensores ultrasónicos que miden las diferencias de tiempo de vuelo entre los pulsos de sonido enviados en diferentes direcciones [20]. Son más sofisticados y precisos que los anemómetros de cazoleta pero suelen ser más costosos.

Para detectar la dirección del viento se emplea una veleta que consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y que puede girar libremente por acción del viento cuando éste cambia de dirección [3].

La colocación de los sensores (anemómetro y veleta) suele ser en la parte posterior de la góndola (popa) del aerogenerador. Los datos que proporcionan son fundamentales para el funcionamiento seguro y eficiente del aerogenerador, ya que permiten ajustar el ángulo de las palas y optimizar la generación de energía [3].

2.2.13. Control del aerogenerador

La velocidad de giro del aerogenerador y el ángulo de paso de las palas se modifican en cada instante dependiendo de la velocidad de viento que llega a la máquina. El sistema de control se encarga de elegir los valores adecuados de estas variables [21].

Atendiendo a la velocidad de viento se pueden establecer cuatro fases:

1. Viento bajo, con el generador desconectado de la red.

Cuando la velocidad del viento es inferior a la velocidad de arranque de la máquina pero próxima a ésta, el sistema de control coloca las palas a un ángulo de paso cercano

a 45° , que proporciona un par de arranque suficientemente alto. A medida que la velocidad de viento aumenta, la velocidad de rotación del rotor también aumenta, y el ángulo de paso se hace disminuir hasta que se alcanzan las condiciones adecuadas para que el generador se conecte.

2. Viento medio, con el generador conectado, pero sin llegar a generar potencia nominal.

A velocidades de viento por encima de la velocidad de arranque y por debajo de la velocidad nominal el sistema de control elige la velocidad de rotación y el ángulo de paso que proporcionan la máxima potencia para cada velocidad de viento.

3. Viento alto, el generador produce potencia nominal.

Cuando la velocidad de viento es superior a la nominal, la energía contenida en el viento es suficiente para producir potencia nominal, y el ángulo de paso se incrementa para regular la potencia a su valor nominal.

4. Viento muy alto, el generador está desconectado y la turbina parada.

Si la velocidad del viento es superior a la velocidad de parada, el generador se desconecta y el sistema de control lleva las palas a la posición de bandera (cercana a 90°) hasta que la velocidad de viento desciende por debajo de la velocidad de re-arranque y la máquina reanuda la generación de potencia.

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño del prototipo

En este apartado se detallarán las partes principales que componen el aerogenerador de laboratorio. Para las piezas que han requerido diseño se ha empleado software como AutoCAD y CATIA. Otros modelos se han obtenido de plataformas que cuentan con bancos de archivos para impresión 3D como Thingiverse. Una vez elaborados los diseños se ha empleado el software UltiMaker Cura para laminar los modelos 3D. Por último, las piezas se han fabricado con la impresora 3D Creality Ender 3 y el material empleado para ello ha sido el plástico PLA (ácido poliláctico).

3.1.1. Rotor

El rotor que se ha diseñado para el aerogenerador se compone de las palas, el buje y el cono.

- Palas

El modelo de palas utilizado ha sido descargado de la plataforma Thingiverse. Si bien las palas presentan un diseño similar al de los aerogeneradores actuales, se han realizado una serie de modificaciones con el programa de impresión para adaptarlo a nuestro prototipo.

Por una parte, como puede observarse en la figura 10, la pala era demasiado pequeña (modelo de la izquierda) por lo que se escaló para obtener una pala de mayor envergadura. En un principio la escala se ajustó de manera uniforme atendiendo principalmente al eje Z, al 135 %, con motivo de aprovechar al máximo la altura de la impresora 3D (modelo del centro). Viendo que la pala quedaba demasiado delgada, se optó por incrementar un poco más los ejes X e Y, al 180 %, para que tuviese mayor superficie de captación de aire (modelo de la derecha).

Por otro lado, como se aprecia en la figura 11, el perfil aerodinámico de la pala estaba invertido de manera que el rotor no giraría adecuadamente una vez que el aire comenzara a incidir sobre las palas. Esto se solucionó utilizando la función “espejo” del programa de impresión.

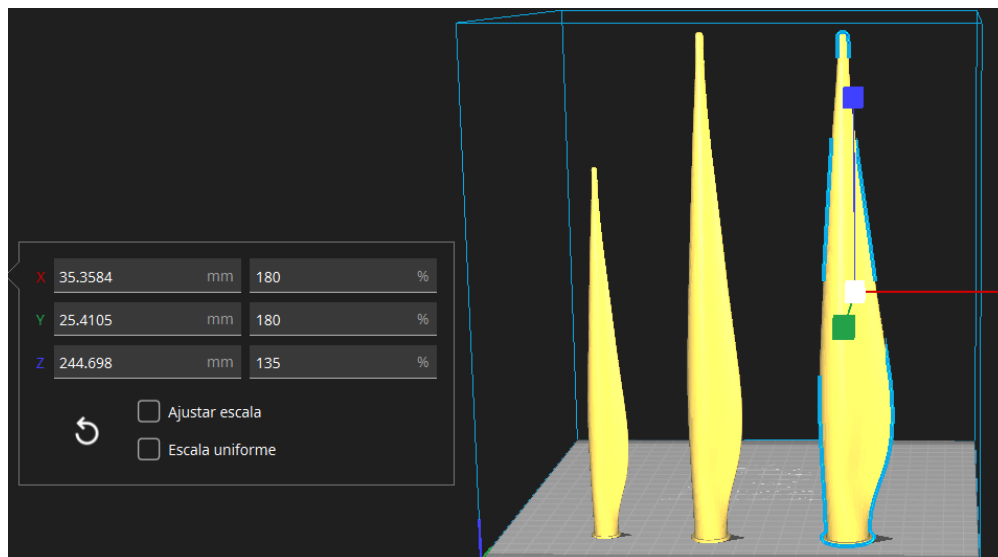


Figura 10. Configuración de palas mediante UltiMaker Cura.

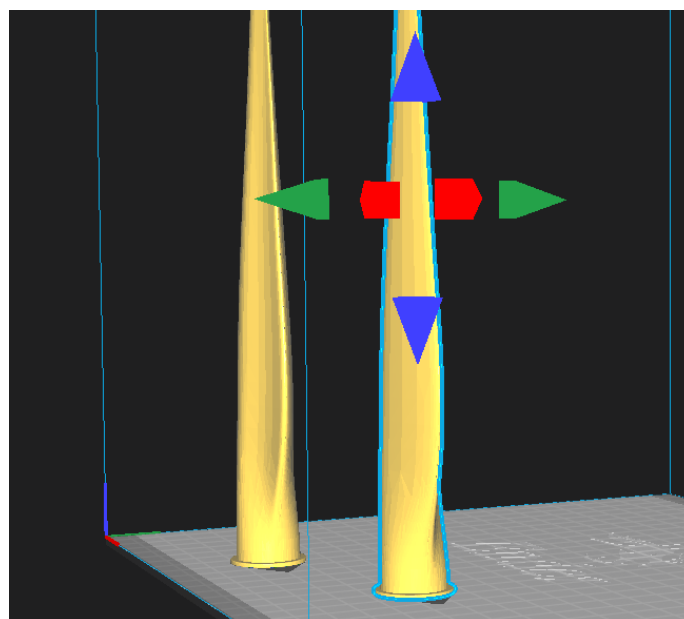


Figura 11. Función “espejo” para invertir la posición del modelo.

Respecto al cono, el buje y el rodamiento de pala, se ha utilizado el programa AutoCAD para realizar sus diseños.

- Rodamiento de pala

Para permitir que la pala gire sobre sí misma se han diseñado unos cilindros de manera que un extremo de los mismos se pegue a la base de las palas y el otro extremo

se inserte en los alojamientos del buje. De esta forma se puede variar el ángulo de paso de cada pala de manera independiente haciendo girar manualmente los cilindros. Éstos poseen también un resalte que se quedará alojado en el interior del cono para evitar que las palas puedan salir despedidas cuando el aerogenerador se encuentre en funcionamiento.

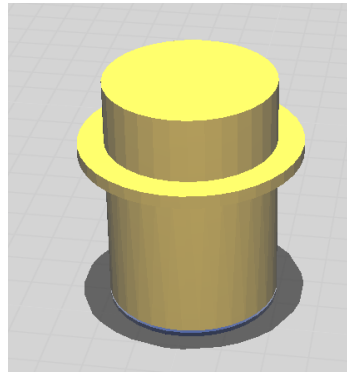


Figura 12. Rodamiento de pala.

- Buje

El buje consta de tres alojamientos con una separación angular de 120 grados entre ellos ya que se trata de un aerogenerador de tres palas y también tiene un orificio por donde se introducirá el eje del aerogenerador hasta una determinada profundidad.

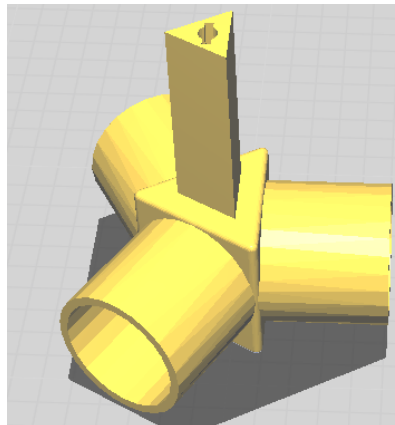


Figura 13. Buje.

- Cono

El cono se ha diseñado en dos partes para que rodee completamente los rodamientos de pala. La parte delantera cuenta con un alojamiento para insertar el buje y un tetón que se utilizará para centrar la unión buje-cono.

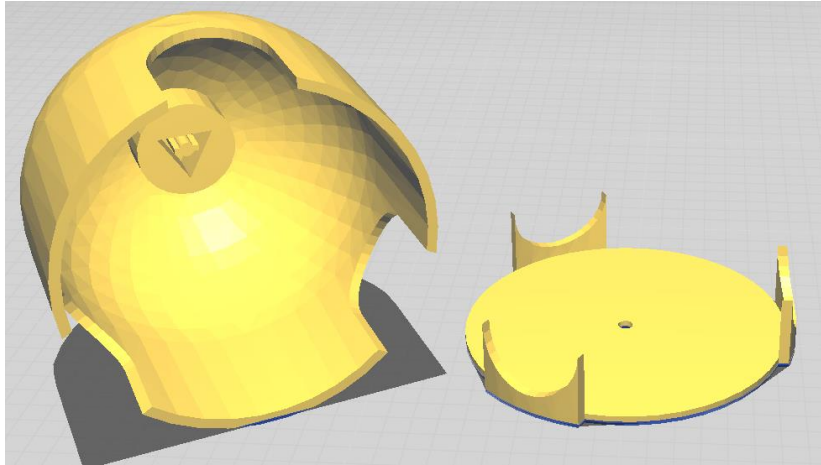


Figura 14. Partes delantera y trasera del cono.

3.1.2. Góndola

La góndola se compone de la carcasa, el bastidor, la multiplicadora y el generador. Para diseñar la carcasa se ha utilizado el programa CATIA, para el bastidor el programa AutoCAD y para la multiplicadora se ha utilizado la plataforma con archivos 3D.

- Carcasa

La carcasa que se ha diseñado tiene dos partes. La inferior será la que permita que se introduzca el eje que está acoplado al rotor y la que contenga el resto de componentes del aerogenerador y la superior se utilizará para cubrir o mostrar el interior de la góndola.

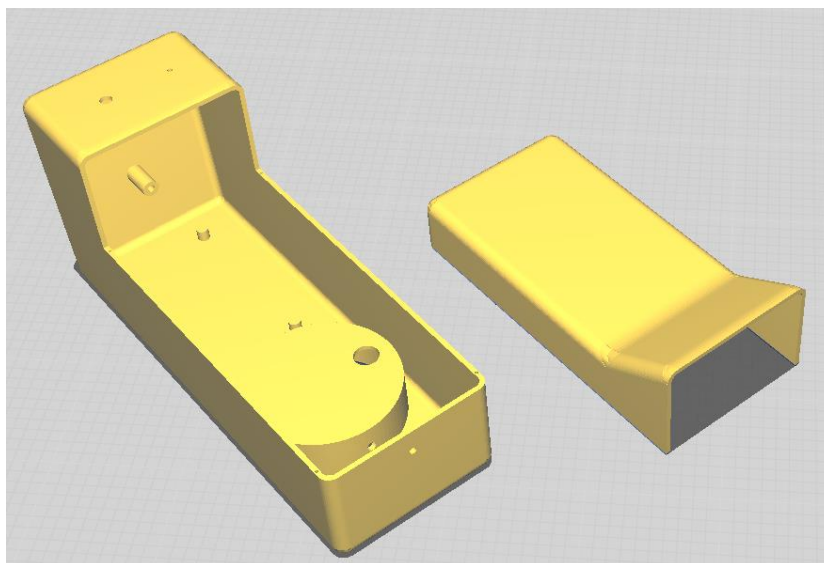


Figura 15. Carcasas superior e inferior.

- Bastidor

El bastidor se utilizará para sujetar el motor y como guía para que el eje del aerogenerador vaya lo más recto posible.

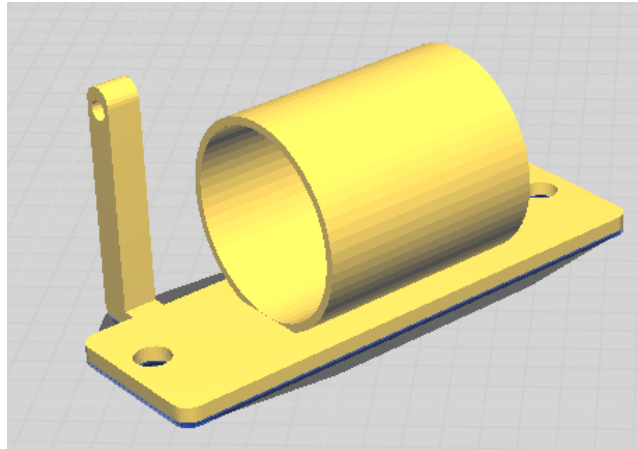


Figura 16. Bastidor.

- Generador

Como generador se empleará un pequeño motor de corriente continua. El motor irá alojado en el bastidor y la conexión con el eje principal se realizará a través de la multiplicadora.



Figura 17. Generador.

- Multiplicadora

La multiplicadora consistirá en dos engranajes de manera que la relación entre los mismos sea de 2:1. Para ello el engranaje conductor (solidario al eje principal) tiene el doble de dientes que el engranaje conducido (solidario al eje del motor). Es decir, el engranaje de entrada tendrá 20 dientes y el de salida 10 dientes. Cada vez que el

engranaje conductor gire una vez, el engranaje conducido girará dos veces. Con esta combinación, la velocidad de salida será el doble que la de entrada.

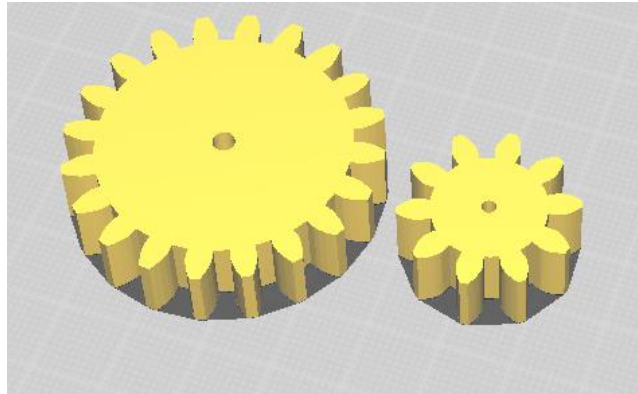


Figura 18. Conjunto multiplicadora.

3.1.3. Sensores

Los sensores utilizados en el prototipo serán el anemómetro y la veleta, para registrar la velocidad y dirección del viento respectivamente, ambos diseñados con AutoCAD.

- Soporte del anemómetro y veleta

Debido al reducido tamaño del prototipo se ha tenido que diseñar un soporte con dos torres para instalar el anemómetro y la veleta sin que colisionen entre ellos. Las torres tienen en su parte superior un hueco donde se insertarán unos pequeños rodamientos, modelo 687-ZZ, que permitirán el giro de los sensores.

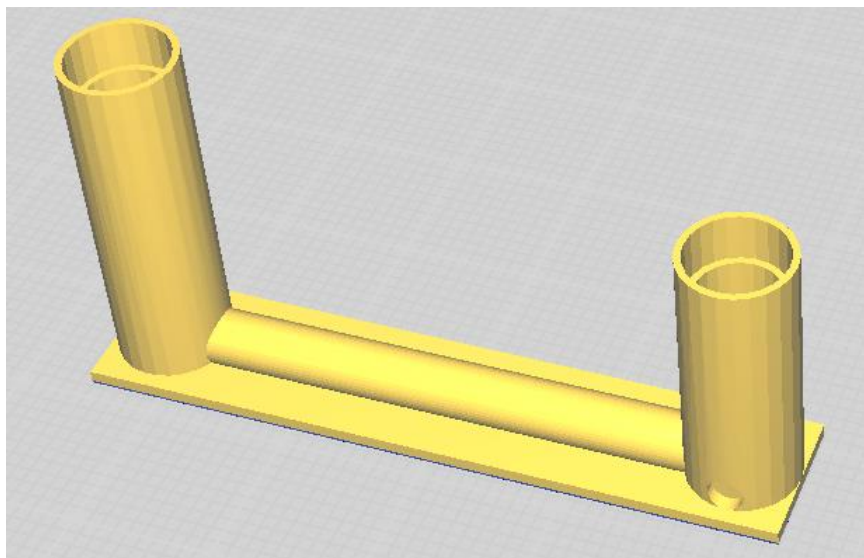


Figura 19. Soporte del anemómetro y veleta.

- Anemómetro

El tipo de anemómetro que se ha diseñado ha sido el de tres cazoletas. La cabeza del anemómetro tiene un orificio donde insertar un pequeño imán que se utilizará cuando se registre la velocidad del viento mediante un sensor Hall. Respecto a las cazoletas, se han descargado del banco de archivos y se han escalado para que se ajusten a la cabeza del anemómetro.

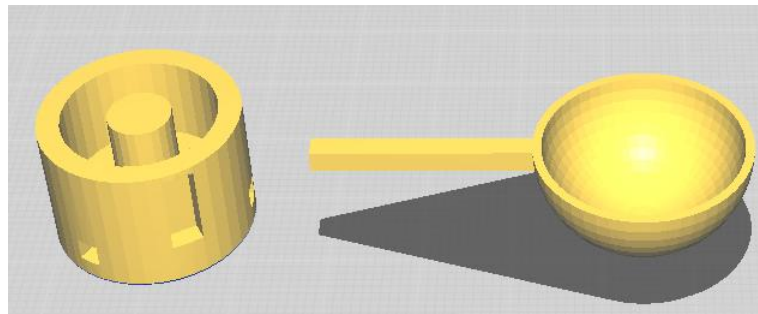


Figura 20. Cabeza del anemómetro y cazoleta.

- Veleta y eje de la veleta

La dirección del viento será indicada por una veleta y la unión entre ésta y el rodamiento acoplado en la torre se realizará a través del eje.

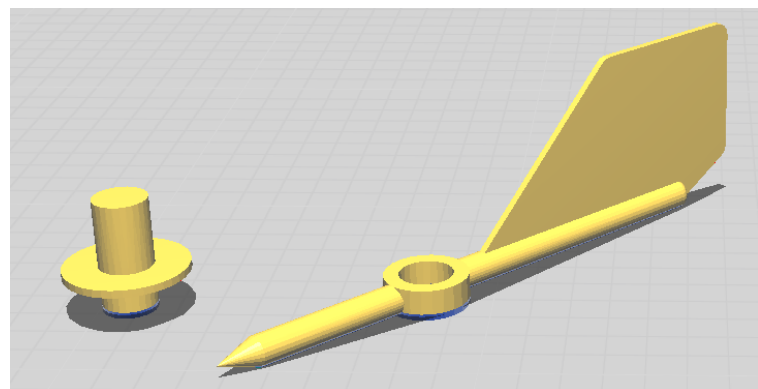


Figura 21. Veleta y eje de la veleta.

3.1.4. Sistema de balizamiento

Para mayor caracterización del aerogenerador se ha optado por integrar una baliza de señalización empleando un led.

La función de un sistema de balizamiento es señalar la posición del aerogenerador de acuerdo a la normativa de navegación aérea correspondiente [17].

3.1.5. Torre

Como torre de sustentación se ha reciclado un tubo de cartón para textiles y se ha pintado con spray de color blanco.

3.1.6. Elementos adicionales

Como eje del aerogenerador se ha utilizado una varilla metálica de 3 milímetros de diámetro y para evitar que ésta se desplace hacia delante se ha empleado una pequeña junta de goma.

Por otra parte, para activar el fotosensor que incorpora el aerogenerador con el fin de detectar las revoluciones del rotor, se ha diseñado una pequeña pieza con AutoCAD.

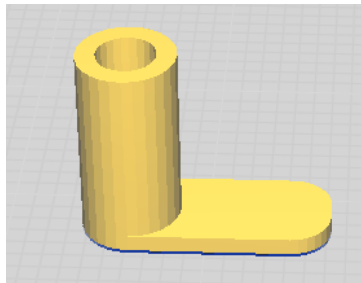


Figura 22. Objeto a detectar.

3.2. Construcción del prototipo

En esta sección se detallará paso a paso cómo se ha realizado el montaje del aerogenerador. Se asegurará que las piezas queden correctamente ensambladas y alineadas para asegurar el correcto funcionamiento del aerogenerador.

- Montaje del rotor:
 1. Insertar la varilla por el orificio del buje hasta que haga tope.
 2. Pegar los cilindros a las bases de las palas.
 3. Colocar los cilindros en el buje.
 4. Acoplar el buje en la parte delantera del cono.
 5. Introducir la parte trasera del cono por el eje hasta encajar con la parte delantera del cono.



Figura 23. *Introducción de la varilla en el buje.*

En la figura 24 puede observarse la varilla insertada en el orificio del buje, los cilindros que están pegados a las bases de las palas colocados en sus alojamientos y el buje acoplado en la parte delantera del cono.



Figura 24. *Montaje del rotor.*



Figura 25. *Montaje del rotor finalizado.*

- Montaje del fotointerruptor:
 1. Taladrar la carcasa inferior de la góndola para sujetar el sensor.
 2. Atornillar el sensor.



Figura 26. Montaje del fotointerruptor.

- Montaje del generador:
 1. Introducir el motor en el bastidor.
 2. Colocar el engranaje conducido en el motor.
 3. Acoplar el bastidor en la carcasa inferior de la góndola.



Figura 27. Montaje del generador.

- Montaje del anemómetro y la veleta:
 1. Embutir los rodamientos en el soporte anemómetro-veleta.
 2. Atornillar el soporte a la carcasa inferior de la góndola.
 3. Acoplar las cazoletas e imán en la cabeza del anemómetro.
 4. Colocar la cabeza del anemómetro en la torre más baja del soporte.
 5. Insertar el eje de la veleta en la veleta.
 6. Colocar la veleta en la torre más alta del soporte.

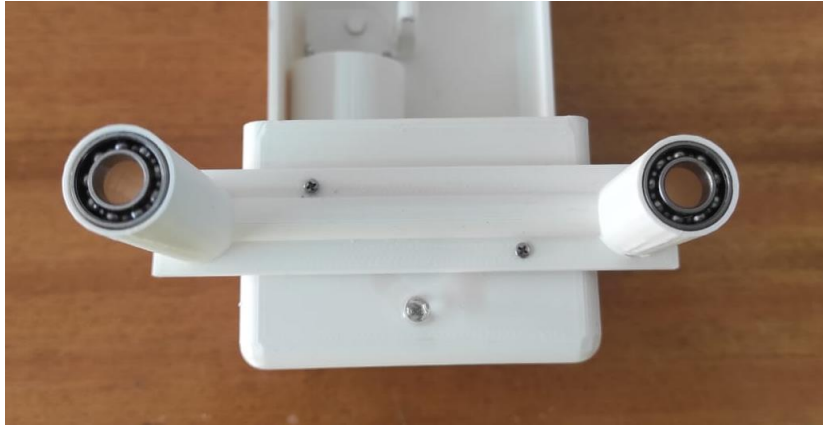


Figura 28. Montaje del anemómetro y veleta.



Figura 29. Conjunto anemómetro-veleta finalizado.

- Montaje del sensor Hall:
 1. Situar el sensor en una posición que detecte el imán.
 2. Embridar el sensor a la torre del soporte.



Figura 30. Montaje sensor Hall.

- Montaje del eje en la góndola:

1. Introducir el eje en la carcasa inferior de la góndola.
2. Acoplar junta de goma en el eje para evitar que se desplace hacia delante.
3. Insertar pieza que activa el fotointerruptor y situarla a la altura del sensor.
4. Colocar el engranaje conductor en el eje y situarlo a la altura del engranaje conducido.

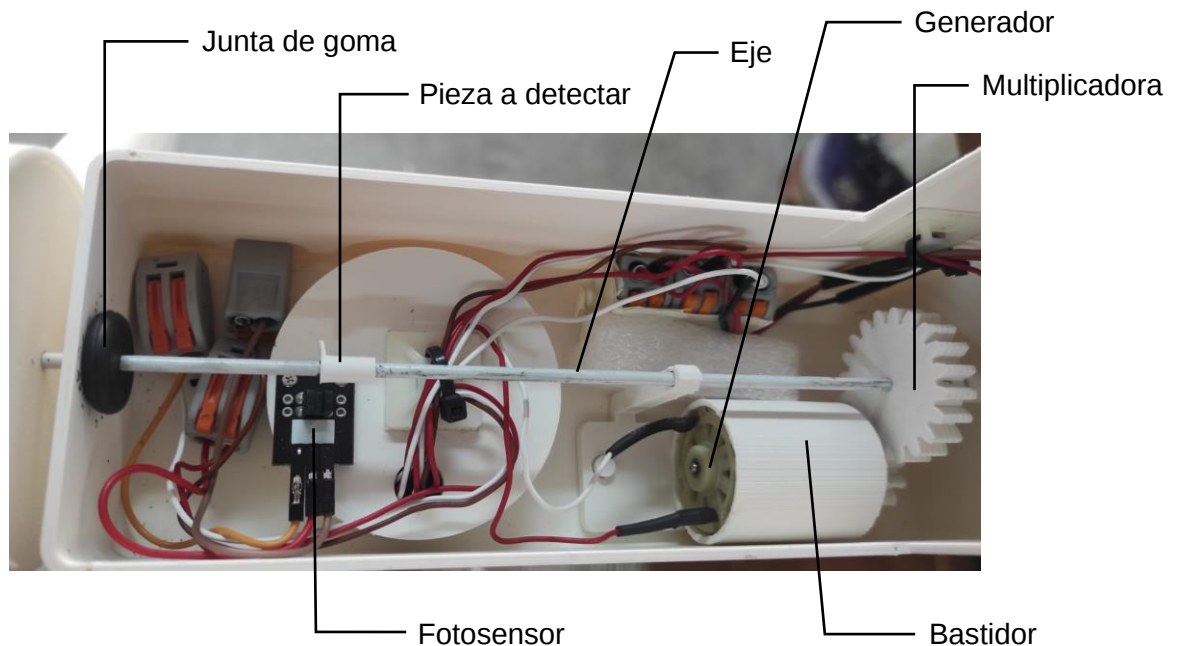


Figura 31. Montaje del eje.

- Montaje de la carcasa superior de la góndola:

1. Introducir puntas metálicas en los orificios de la carcasa superior.
2. Acoplar la carcasa superior sobre la inferior.



Figura 32. Montaje de la carcasa superior.

- Montaje de la torre:
 1. Introducir tubo de cartón en el alojamiento destinado para ello en la carcasa inferior de la góndola.
 2. Meter un pasador por el orificio para evitar que la torre se mueva en caso de tener holgura.

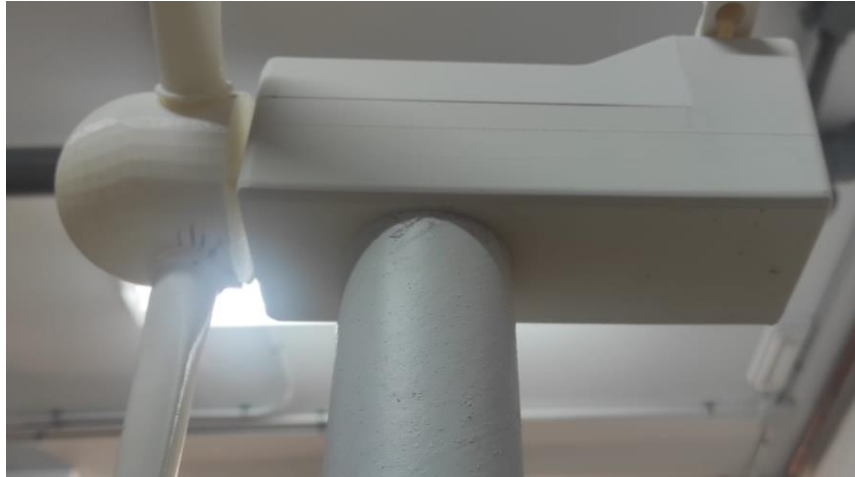


Figura 33. Montaje de la torre.



Figura 34. Montaje del aerogenerador finalizado.

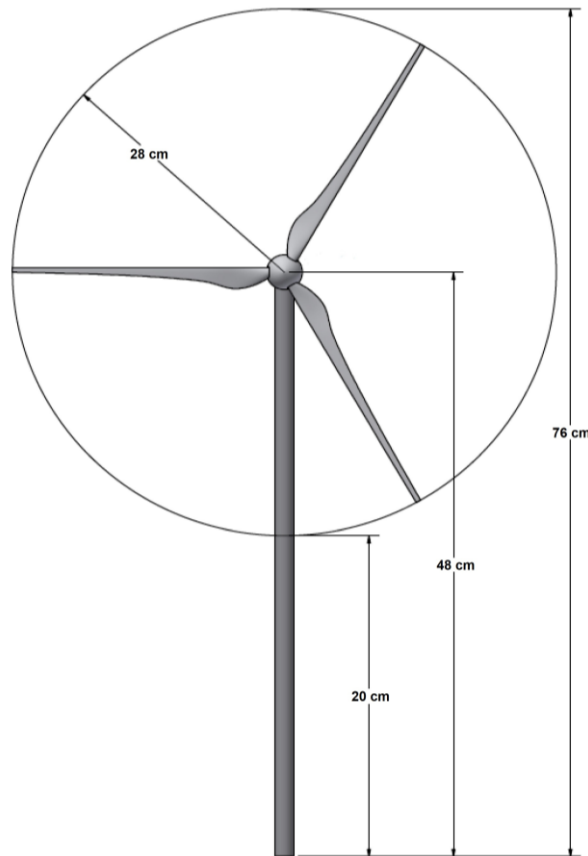


Figura 35. Dimensiones del prototipo.

3.3. Aparatos de medida

Los aparatos de medida que se utilizarán para realizar las pruebas con el prototipo serán:

- Un anemómetro manual modelo AN300 para registrar la velocidad del viento. De esta forma se podrá comprobar si el anemómetro del aerogenerador está registrando los datos correctamente.



Figura 36. Anemómetro AN300.

- Un regulador de velocidad electrónico de alta potencia SCR para controlar la velocidad del ventilador.

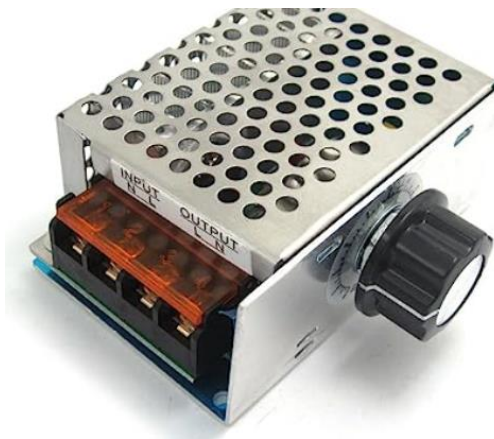


Figura 37. Regulador de velocidad.

Ficha técnica:

MARCA	ARCELI
VOLTAJE DE FUNCIONAMIENTO	AC 220 V
POTENCIA MÁXIMA	4000 W (carga resistiva conectada)
REGULACIÓN DE VOLTAJE	Inicio de 10 V, 10 V - 220 V

Tabla 1. Características técnicas del regulador.

- Un ventilador industrial portátil para hacer que el aerogenerador gire.



Figura 38. Ventilador.

Ficha técnica:

MARCA	DOCTOR-SAN
MODELO	Jetstream 7035
FRECUENCIA	50 Hz
TENSIÓN	230 V
POTENCIA	750 W

Tabla 2. Características técnicas del ventilador.

- Un multímetro digital para comprobar la tensión entregada por el generador.



Figura 39. Multímetro digital.

3.4. Adquisición de datos

El registro de los parámetros que determinan el funcionamiento del aerogenerador se llevará a cabo mediante la placa Arduino Uno. Para ello se utilizará un sensor magnético Hall para registrar las revoluciones del anemómetro y un sensor fotointerruptor para registrar las revoluciones del rotor. La tensión producida por el motor eléctrico que actúa como generador se obtendrá directamente leyendo el valor proporcionado por la entrada analógica de Arduino. Todos los datos se mostrarán a través de una pantalla OLED.

3.4.1. Arduino Uno

El Arduino Uno es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P y desarrollado por Arduino.cc. La placa está equipada con

conjuntos de pines de E/S digitales y analógicas que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos. La placa tiene 14 pines digitales, 6 pines analógicos y programables con el Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) a través de un cable USB tipo B. Puede ser alimentado por el cable USB o por una batería externa de 9 voltios, aunque acepta voltajes entre 7 y 20 voltios.



Figura 40. Placa Arduino Uno R3.

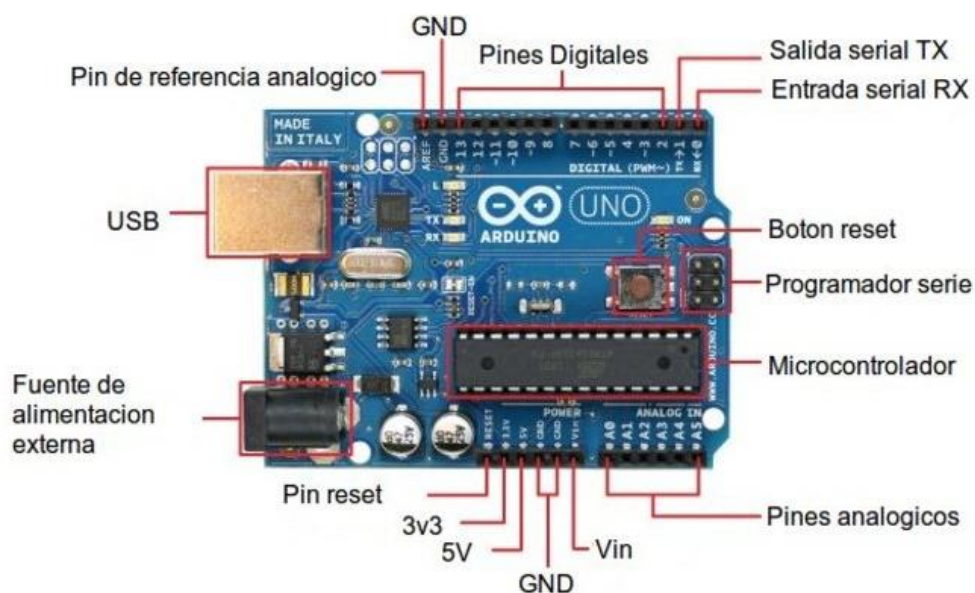


Figura 41. Disposición pines Arduino Uno.

Características técnicas de Arduino Uno:

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltaje de operación: 5V

- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de entrada (límite): 6-20V
- Pines de E/S digitales: 14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente continua por pin de E/S: 40 mA
- Corriente continua en el pin 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Frecuencia de reloj: 16 MHz

3.4.2. Sensor de efecto Hall

Un sensor de efecto Hall es un dispositivo que produce un voltaje eléctrico cuando está situado en un campo magnético. Su funcionamiento se basa en la fuerza que los campos magnéticos ejercen sobre las cargas en movimiento.

El módulo KY-003 es un dispositivo que integra un sensor de efecto Hall, una resistencia de 680Ω y un led. El sensor de efecto Hall con salida digital proporciona un valor alto de tensión en presencia de un campo magnético o bajo si no existe. No pueden utilizarse para la medición de campos magnéticos al igual que los analógicos, solo para detectar su presencia. Cuando el sensor se activa, el circuito interno del módulo envía una señal al led para que se encienda. Esto proporciona una forma rápida y fácil de visualizar si el sensor ha detectado o no un campo magnético.

Este sensor se utilizará para calcular la velocidad de giro del anemómetro cada vez que el sensor detecte el imán alojado en su cabeza. El sensor KY-003 tiene tres terminales: VCC, GND y señal.



Figura 42. Sensor Hall.

3.4.3. Sensor fotointerruptor

El sensor fotointerruptor KY-010 es un fotosensor, es decir, un módulo de barrera de luz que combina dos partes: transmisión y recepción. De un lado tiene el emisor y enfrente un receptor de forma que cuando se interrumpe la luz infrarroja envía una señal. En la parte trasera hay dos resistencias de 10k Ω y 33 Ω .

Este sensor se utilizará para detectar la velocidad de giro del eje del rotor cuando interrumpa la luz infrarroja. El sensor KY-003 tiene tres terminales: VCC, GND y señal.



Figura 43. Sensor fotointerruptor.

3.4.4. Tensión de salida

La tensión de salida producida por el generador será variable ya que depende directamente de la velocidad a la que gire el rotor. Este voltaje se medirá conectando el motor a la entrada analógica de Arduino.

No obstante, podrían experimentarse problemas en la lectura debido a las fluctuaciones de tensión y al ruido eléctrico. Para ello emplearemos un condensador (1 μ F) que actúe como filtro, eliminando el ruido del motor y ayudando a estabilizar la señal que se lee en el pin analógico.

Al circuito también se añadirá un diodo volante conectado en antiparalelo con el motor. Es importante tener en cuenta los problemas que causan los motores de C.C. al tener inductancias para su funcionamiento. A medida que el motor va girando, aumenta la energía y se queda almacenada en las bobinas del motor. Si se elimina la alimentación en un momento determinado, esa energía se disipa a través de las escobillas en forma de pico inverso de tensión, y eso podría provocar daños en la alimentación. Por eso se ponen estos diodos de protección, ya que si se genera una corriente, ésta pasará por el diodo inverso, que absorberá la corriente generada.

3.4.5. Pantalla OLED

Una pantalla OLED (Diodo Orgánico de Emisión de Luz, por sus siglas en inglés) es un tipo de pantalla que utiliza diodos emisores de luz orgánicos para generar imágenes y emitir luz. Las pantallas OLED destacan por su gran contraste, mínimo consumo de energía y buena calidad de imagen. El display oled 0.96" SPI SSD1306 posee una resolución de 128*64 píxeles, permitiendo controlar cada píxel individualmente y mostrar tanto texto como gráficos. Además por ser de tipo OLED no necesita de retroiluminación (Backlight) como los LCD, lo que hace que su consumo de energía sea mucho menor y aumenta su contraste.

La conexión es sencilla. Simplemente alimentamos el módulo desde Arduino utilizando GND y 5V y conectamos el pin SDA y SCL de Arduino con los pines correspondientes del sensor.

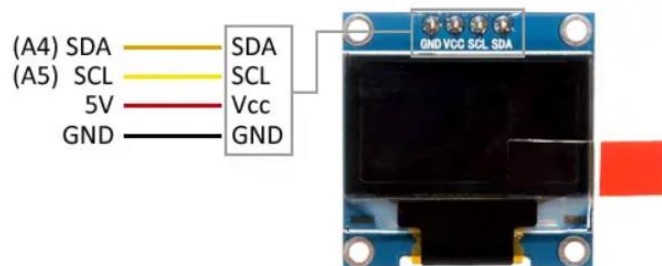


Figura 44. Conexión de la pantalla OLED a la placa Arduino Uno.

3.5. ¿Qué son las interrupciones?

Una ISR (Interrupt Service Routine) es una función específica que se ejecuta cuando se produce una interrupción en un microcontrolador. Cuando ocurre una interrupción, el microcontrolador suspende temporalmente la ejecución del programa principal y salta a la ISR correspondiente para manejar el evento que generó la interrupción.

La ISR es la encargada de realizar las acciones necesarias en respuesta a la interrupción. Puede ser utilizada para leer datos de sensores, actualizar variables, realizar cálculos, enviar señales, entre otras tareas específicas.

En Arduino, se utiliza la función `attachInterrupt()` para asociar una ISR a un evento de interrupción. Esta función toma como parámetros el número de pin, la función ISR y el modo de interrupción (por ejemplo, cambio de estado, flanco ascendente o flanco descendente).

Es importante tener en cuenta que las ISRs deben ser breves y eficientes, ya que se ejecutan en un momento crítico y pueden afectar el rendimiento general del programa. Además, es necesario considerar el manejo adecuado de las interrupciones para evitar conflictos y problemas de sincronización en el código. Dos ISR no pueden ejecutarse de forma simultánea. En caso de dispararse otra interrupción mientras se ejecuta una ISR, la función ISR se ejecuta una a continuación de otra.

Las variables que sean compartidas por el programa principal y la función de interrupción deben ser declaradas como “volatile”, dado que una variable volátil tiene la característica de que debe ser consultada antes de ser usada, porque pudo modificarse por algún flujo diferente en la programación del Arduino, que es exactamente lo que ocurre cuando se modifica dentro de una ISR.

Arduino dispone de dos tipos de eventos en los que definir interrupciones. Por un lado tenemos las interrupciones de timers. Por otro lado, tenemos las interrupciones de hardware, que responden a eventos ocurridos en ciertos pines físicos.

Dentro de las interrupciones de hardware, Arduino es capaz de detectar los siguientes eventos:

- RISING, ocurre en el flanco de subida de LOW a HIGH.
- FALLING, ocurre en el flanco de bajada de HIGH a LOW.
- CHANGING, ocurre cuando el pin cambia de estado (rising + falling).
- LOW, se ejecuta continuamente mientras está en estado LOW.

Arduino Uno dispone de dos interrupciones, 0 y 1, asociados a los pines digitales 2 y 3.

3.6. Procedimientos matemáticos

- CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR

Código

```
unsigned int vueltasRotor = contadorRotor;  
  
unsigned long rpmRotor = (vueltasRotor * MILISEGUNDOS_POR_MINUTO) /  
TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS;
```

“vueltasRotor” es una variable que almacena el número de vueltas que ha dado el rotor del aerogenerador desde la última vez que se realizó un cálculo.

“rpmRotor” se calcula dividiendo el número de vueltas (vueltasRotor) por el tiempo transcurrido entre los cálculos (TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS), y luego multiplicando por la cantidad de minutos en un milisegundo (MILISEGUNDOS_POR_MINUTO). Esto proporciona la velocidad en revoluciones por minuto (RPM) a la que está girando el rotor.

- CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Código:

```
unsigned int vueltasAnemo = contadorAnemo;  
  
unsigned long rpmAnemo = (vueltasAnemo * MILISEGUNDOS_POR_MINUTO) /  
TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS;  
  
float velocidadMS = (rpmAnemo * DIAMETRO_ANEMOMETRO * PI) / 60;
```

“vueltasAnemo” almacena el número de vueltas que ha registrado el anemómetro (medidor de velocidad del viento) desde el último cálculo.

“rpmAnemo” se calcula de manera similar a “rpmRotor”, dividiendo el número de vueltas (vueltasAnemo) por el tiempo transcurrido entre cálculos (TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS), y luego multiplicando por la cantidad de minutos en un milisegundo (MILISEGUNDOS_POR_MINUTO). Esto proporciona la velocidad en revoluciones por minuto (RPM) a la que está girando el anemómetro.

“velocidadMS” se calcula multiplicando “rpmAnemo” por el diámetro del anemómetro (DIAMETRO_ANEMOMETRO), luego multiplicando por Pi (PI), y finalmente dividiendo por 60 para convertir de RPM a revoluciones por segundo. Esto proporciona la velocidad del viento en metros por segundo (m/s).

Los valores de las constantes que se usan en los cálculos son las siguientes:

- TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS: 1000 (es el tiempo en milisegundos que se espera entre cada cálculo. Como el valor es 1000, significa que se calcula la velocidad cada segundo).
- MILISEGUNDOS_POR_MINUTO: 60000 (la cantidad de milisegundos en un minuto).
- DIAMETRO_ANEMOMETRO: 0.16 (el diámetro de la circunferencia del anemómetro en metros).
- PI: 3.14159265 (el valor de Pi).

Estos cálculos se basan en la relación entre la cantidad de vueltas de los componentes (rotor y anemómetro) y el tiempo transcurrido, lo que permite estimar las velocidades del rotor y del viento en función de las vueltas registradas y el tiempo entre cálculos.

- CÁLCULO DE LA POTENCIA MÁXIMA EXTRAÍDA

Código:

```
float area = PI * RADIO_PALAS * RADIO_PALAS;  
  
float potenciaMaxima = 0.5 * LIMITE_BETZ * DENSIDAD_AIRE * area * velocidadMS  
* velocidadMS * velocidadMS * FACTOR_POTENCIA;
```

“area”: calcula el área barrida por las palas del aerogenerador utilizando la fórmula del área de un círculo: π (Pi) multiplicado por el radio de las palas al cuadrado (RADIO_PALAS). “RADIO_PALAS” es 0.25 metros.

“potenciaMaxima”: calcula la potencia máxima que podría extraer el aerogenerador. Utiliza la fórmula de la potencia del viento en un aerogenerador, que se basa en el límite de Betz (LIMITE_BETZ), que tiene un valor de 0.59, la densidad del aire (DENSIDAD_AIRE), que es aproximadamente 1.225 kg/m³ a 15°C al nivel del mar, el área de barrido (area) calculada en el punto anterior y la velocidad del viento al cubo (velocidadMS elevada a la tercera potencia). Multiplica todo esto por el factor de conversión de vatios a milivatios (FACTOR_POTENCIA), que es 1000. Este cálculo proporciona la potencia máxima en milivatios (mW) que el aerogenerador podría generar bajo las condiciones ideales.

- CÁLCULO DE LA TENSIÓN GENERADA

Código:

```
int valorAnalogico = analogRead(PIN_ALTERNADOR);  
  
float tension_mV = (valorAnalogico * 1100.0) / 1023.0;
```

“valorAnalogico”: toma una lectura analógica del pin al que está conectado el alternador (PIN_ALTERNADOR) y devuelve un valor digital entre 0 y 1023. El valor 0 representa 0 voltios y el valor 1023 representa la referencia de voltaje que se está

“tension_mV”: calcula la tensión generada en milivoltios (mV) a partir del valor analógico. Se multiplica el valor analógico leído por 1100.0 y luego se divide por 1023.0 para realizar la conversión a milivoltios (mV). Esto se hace para escalar el valor de 0-1023 a una escala de 0-1100 mV, que es el rango de voltaje que se está midiendo en el pin “PIN_ALTERNADOR”.

3.7. Esquema eléctrico, conexiones y programa de control

3.7.1. Esquema eléctrico

49

El cableado de los sensores (Hall y fotointerruptor), del led y del generador irá desde el interior de la góndola hasta la placa de pruebas atravesando el interior de la torre.

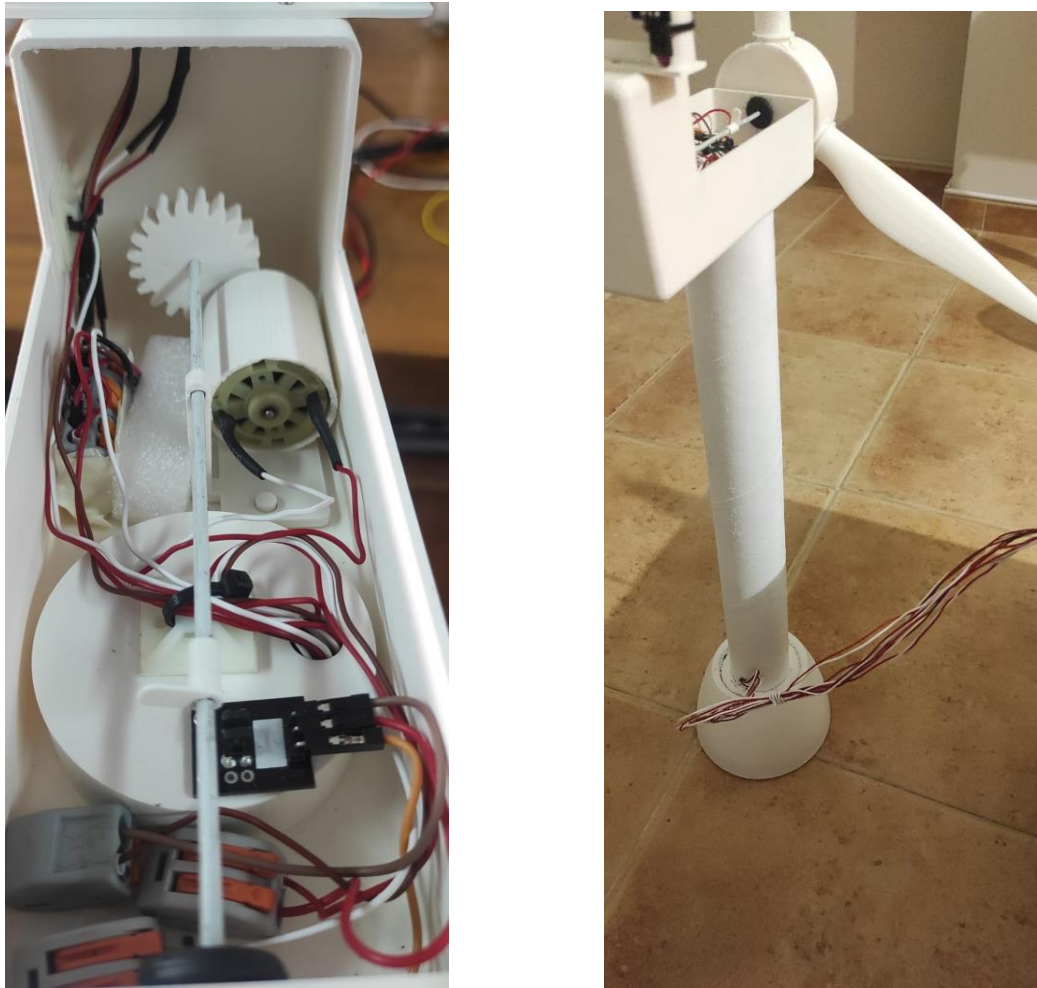


Figura 46. Vista interior y exterior del aerogenerador.

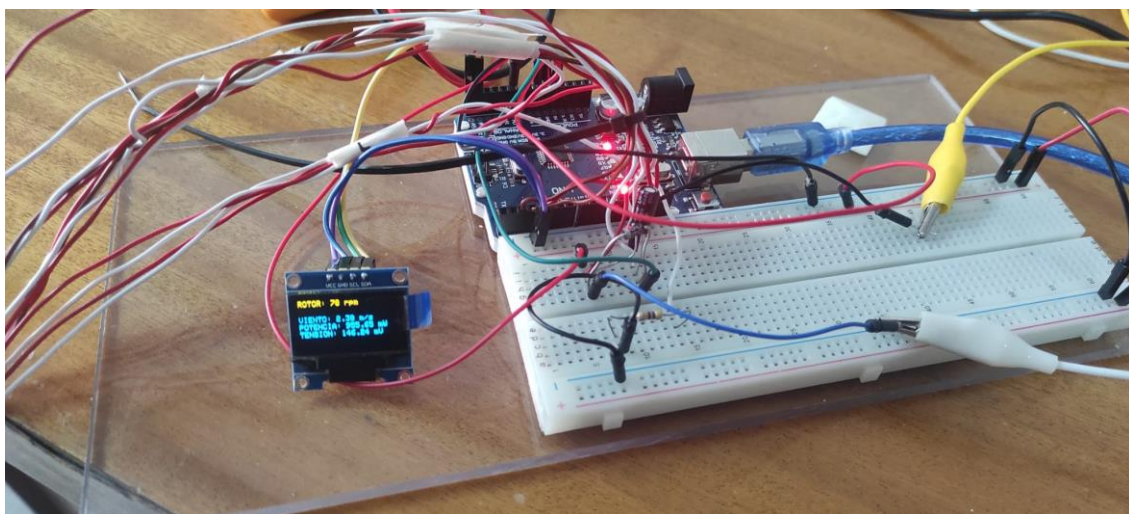


Figura 47. Conexión a Arduino y placa de pruebas.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de datos del aerogenerador

En esta sección se analizan los resultados obtenidos del aerogenerador en diferentes condiciones de velocidad del viento y ángulos de las palas. El objetivo es comprender cómo el aerogenerador se adapta para maximizar la generación de energía y evitar daños en situaciones de viento variable.

En relación con la velocidad del viento, se ha tomado como referencia las lecturas proporcionadas por el anemómetro manual en la salida del ventilador. Esto se debe a que las mediciones del anemómetro del aerogenerador son menores debido a su distancia del ventilador. Sin embargo, al colocar el anemómetro manual a la misma distancia que el anemómetro del aerogenerador, las lecturas se aproximan.

También se observa una diferencia en los valores de tensión registrados por el multímetro y la entrada analógica aunque no resultan significativas.

TABLAS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para cuatro situaciones específicas:

- **Situación 1: Velocidad de viento baja**

Con viento bajo (4,5 m/s), el ángulo de las palas se ajusta a un ángulo próximo a 45° para asegurar un par de arranque suficiente y poner el aerogenerador en movimiento. Con esta velocidad de viento, si las palas estuvieran en posición de máxima captación, el aerogenerador no giraría ya que el par de arranque sería menor.

- **Situación 2: Velocidad de viento media**

Velocidad anemómetro manual (m/s)	Velocidad anemómetro (m/s)	Ángulo palas (grados)	Tensión (mV)	Tensión multímetro (mV)	Potencia máxima (mW)	RPM
6	2	Variable	100	140	550	120

Tabla 3. Valores de funcionamiento por debajo de la potencia nominal.

A medida que aumenta la velocidad de viento se ajusta el ángulo de las palas para adaptarse y comenzar a generar energía.

- **Situación 3: Velocidad de viento alta**

Velocidad anemómetro manual (m/s)	Velocidad anemómetro (m/s)	Ángulo palas (grados)	Tensión (mV)	Tensión multímetro (mV)	Potencia máxima (mW)	RPM
9	3,5	0	200	240	3070	205

Tabla 4. Valores de funcionamiento para potencia nominal.

A una velocidad de viento de 9 m/s y un ángulo de palas de 0°, el aerogenerador alcanza su potencia nominal. En este punto, el ángulo de las palas (máxima captación) y la velocidad del viento son ideales para lograr la máxima eficiencia y generación de energía.

- **Situación 4: Velocidad de viento muy alta**

Velocidad anemómetro manual (m/s)	Velocidad anemómetro (m/s)	Ángulo palas (grados)	Tensión (mV)	Tensión multímetro (mV)	Potencia máxima (mW)	RPM
11	4,5	0	280	280	5665	250
11	4,5	Variable	200	240	3070	205

Tabla 5. Valores de funcionamiento por encima de la potencia nominal.

A velocidades más altas, el aerogenerador supera su potencia nominal. Para evitar daños, se ajusta el ángulo de las palas para permitir que parte del viento escape. Esto reduce la carga sobre el sistema y lo mantiene funcionando a su potencia nominal.

Como se puede apreciar en la tabla 5, los valores de la primera fila indican un funcionamiento sin regulación, mientras que los valores de la segunda fila corresponden a un funcionamiento con regulación del ángulo de paso.

Si la velocidad del viento es excesiva, se colocan las palas en posición de bandera (cercana a 90°) de forma que el aerogenerador permanezca parado hasta que la velocidad de viento baje.

Potencia del aerogenerador

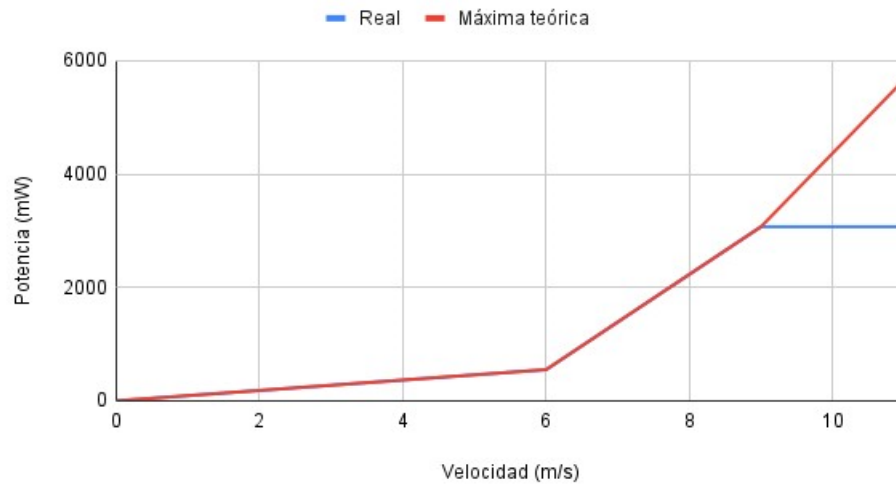


Figura 48. Curva de potencia.

4.2. Conclusión sobre los resultados

Estos resultados demuestran la adaptabilidad del aerogenerador a diferentes condiciones de viento y la importancia de ajustar el ángulo de las palas para optimizar la generación de energía y proteger el sistema. La capacidad del aerogenerador para variar su ángulo de paso según la velocidad del viento le permite operar eficientemente en diversas circunstancias, lo que contribuye a su durabilidad y eficacia en la producción de energía.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el desarrollo de este trabajo final de grado se ha abordado el diseño y construcción de un aerogenerador de laboratorio controlado mediante Arduino, con un enfoque en la generación de energía eólica a pequeña escala, logrando varios objetivos significativos:

- Selección y diseño del prototipo: se realizó una clasificación exhaustiva de los aerogeneradores en base a diversos criterios, considerando las ventajas e inconvenientes de diferentes tipos. La elección de un aerogenerador de eje horizontal de tres palas se fundamentó en su eficiencia y simplicidad. La utilización de software de diseño como AutoCAD y CATIA junto con la impresión 3D de componentes en PLA permitió materializar el diseño de manera efectiva.
- Sistema de generación y control: la implementación de un pequeño motor de juguete como generador y la utilización de engranajes para multiplicar la velocidad de rotación permitió convertir la energía cinética del rotor en energía eléctrica. La elección de Arduino Uno como controlador y la programación de sensores utilizando Arduino IDE demostraron ser eficaces para medir la velocidad del viento y del rotor, así como la tensión generada por el motor.
- Medición y visualización de datos: la integración de sensores para medir tanto la velocidad del rotor como la velocidad del viento ha conferido a la maqueta la capacidad de replicar condiciones de operación realistas. La incorporación de una pantalla OLED para mostrar los datos de manera visual proporcionó una forma efectiva de monitorear y analizar parámetros del aerogenerador en tiempo real.
- Cálculos teóricos de potencia: a través del cálculo de la energía eólica disponible y la consideración del límite de Betz se logró estimar la potencia extraída máxima teórica, lo que permitió tener una referencia de la eficiencia alcanzable en condiciones ideales.

Aunque este trabajo ha alcanzado resultados sólidos, existen varias líneas de investigación y desarrollo que pueden ser consideradas para futuras iteraciones y mejoras:

- Optimización del diseño: explorar la optimización del diseño aerodinámico de las palas y otros componentes del aerogenerador (incorporación de un sistema de orientación y sistema pitch mecánicos) para mejorar la eficiencia y el rendimiento en diferentes condiciones de viento.
- Mejora de la eficiencia del generador: investigar alternativas para mejorar la eficiencia del generador, explorando diferentes tipos de motores y sistemas de

transmisión que puedan aumentar la producción de energía a partir del movimiento de las palas.

- Control avanzado: desarrollar algoritmos de control más sofisticados para adaptar automáticamente el ángulo de las palas (pitch) y optimizar la generación de energía según las variaciones en la velocidad del viento.
- Experimentación en diferentes entornos: probar el aerogenerador en diferentes entornos y condiciones de viento para evaluar su desempeño en situaciones prácticas y variadas.
- Investigación de nuevas tecnologías: mantenerse al tanto de las últimas innovaciones en energía eólica a pequeña escala, como nuevos tipos de sensores, materiales de construcción y técnicas de generación y almacenamiento de energía, con el objetivo de mejorar y actualizar el diseño del aerogenerador en el futuro.

En resumen, este proyecto no solo ha demostrado la viabilidad de construir y controlar un aerogenerador de laboratorio mediante Arduino, sino que también ha abierto la puerta a un conjunto de posibilidades para futuras investigaciones y mejoras en la generación de energía eólica a pequeña escala. Mediante futuras mejoras y expansiones, esta maqueta podría continuar siendo una herramienta valiosa para la educación en energías renovables y la experimentación práctica en los campos de la electrónica y la automatización.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Iberdrola. (2023). *Energía eólica*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>
2. Ramírez, R. G., Parra, M. S., y González, R. H. (2012). Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistema del control de aerogeneradores. *Boletín IIE, Abril-Junio-2012*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50387756/divulga-libre.pdf?1479443429=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DInvestigacion_desarrollo_e_innovacion_te.pdf&Expires=1693856373&Signature=Cl6Vz8jbCirC0nmdyXwiqNvoi3HipEUbt7lcTF8kr7t3PdQLE4ebH2qIBia~DYbNR6YzA-eJlb3bFHpJeyODZbkEvd5UqI91K-N00zfiFAk2q8RUA9xksmmKfGGelgOJzpKFzf3qr8J2pz0KKErrgEiTOVC8EFv7UnWtle-j4~LNpumWXQnT7LfsnJUeWLqyrDfOmcuNjh64vRHCFiHwmmd2Mu9TprNPpYL3Mr6kkgbNMQ6P81dt-iSSKAINy7L4bGHG2C00ug~GnOS8XVhiPxLXkWHQRyUTxVmdj6i5t2jl7R9qPnDJmyzkm~JsodzqfMFaieBPixyGpdKzCZWP07Q__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
3. Villarubia, M. (2012). *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo.
4. Schubel, P. J., y Crossley, R. J. (2012, septiembre). Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9), 3425-3449. <https://doi.org/10.3390/en5093425>
5. DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. (s/f). *Control de potencia en aerogeneradores*. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/powerreg.htm>
6. Molina, A., Ponce, P., y Soriano, L. (2018). *Diferentes tipos de aerogeneradores*. <https://repositorio.tec.mx/ortec/handle/11285/632714?locale-attribute=es>
7. Renovetec. (2010). *Tipos de aerogeneradores*. <http://www.renovetec.com/articulos/tiposaerogeneradores.html>
8. Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrāja, V., y Krishna, V. H. (2016, abril). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371. https://www.researchgate.net/publication/288918068_A_review_on_small_scale_wind_turbines
9. Ricci, R., Vitali, D., y Montelpare, S. (2015, diciembre). An innovative wind-solar hybrid street light: development and early testing of a prototype. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(4), 420-429. <https://academic.oup.com/ijlct/article/10/4/420/2363561?login=false>

10. Das, A., y Talapatra, P. K. (2016, junio). Modelling and analysis of a mini vertical axis wind turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(6), 184-194.
https://www.researchgate.net/publication/313893605_Modelling_and_Analysis_of_a_Mini_Vertical_Axis_Wind_Turbine
11. Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., y Sempértegui-Tapia, D. F. (2022, julio). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL (Monografía). *Revista Investigación y Desarrollo*, 22(1).
<https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
12. Mendoza-Cerón, N., y Rodríguez-Castillo, M. E. (2017, junio). Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 1(2), 34-41.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria_Mecanica/vol1num2/ECORFAN_Revista%20_de%20_Ingenier%C3%ADa_Mec%C3%A1nica_V1_N2.pdf#page=41
13. Gunt.de. (s.f.). *Diseño de la turbina eólica*.
https://www.gunt.de/images/download/windturbines_spanish.pdf
14. Wikipedia. (2023). *Aerogenerador*.
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aerogenerador&oldid=153156503>
15. Velatia. (2022, noviembre). *Parque eólico terrestre, ¿cómo funciona?*
<https://www.velatia.com/es/blog/sabes-como-funciona-un-parque-eolico-terrestre/>
16. DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. (s/f). *Componentes de un aerogenerador*.
<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/comp/index.htm>
17. Gamesa Eólica. (s.f.). *Manual de características generales*.
<https://docplayer.es/8249203-Manual-de-caracteristicas-generales.html>
18. G2Wind. (2023). *Qué es un aerogenerador*. <https://g2wind.com/que-es-un-aerogenerador/>
19. Renovetec. (s.f.). *Clasificación de los aerogeneradores*.
<http://www.mantenimientodeaerogeneradores.com/index.php/clasificacion-de-aerogeneradores>
20. Anemometros Online. (s.f.). *Anemómetro ultrasónico*.
<https://anemometros.online/anemometro-ultrasonico/>

21. Gamesa Eólica. (s.f.). *Drawings and Specifications of Gamesa Eolica Wind Turbines*. <https://vdocument.in/exhibit-11r-drawings-and-specifications-of-gamesa-11r-drawings-and-specifications.html?page=1>

ANEXO A. Código Arduino.

```
//*****

//***** LIBRERÍAS ****

//*****

#include <Wire.h> // Librería para bus I2C (Inter-Integrated Circuit).
#include <Adafruit_GFX.h> // Librería para pantallas gráficas
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Librería para controlador SSD1306

//*****

//***** PANTALLA ****

//*****

#define DISPLAY_WIDTH 128 // Ancho de la pantalla en píxeles
#define DISPLAY_HEIGHT 64 // Alto de la pantalla en píxeles

#define OLED_RESET 4 // Pin de reset necesario por la librería pero no usado
Adafruit_SSD1306 oled(DISPLAY_WIDTH, DISPLAY_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
// Crear objeto para la pantalla oled

//*****

//***** CONSTANTES ****

//*****

const unsigned long TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS = 1000;
const unsigned long MILISEGUNDOS_POR_MINUTO = 60000;
const unsigned long TIEMPO_SEMANA_MS = 604800000;

const float RADIO_PALAS = 0.25; // Radio de las palas del aerogenerador en metros
const float DENSIDAD_AIRE = 1.225; //Densidad del aire en kg/m³ (Valor estándar a 15°C al nivel del mar)
const float LIMITE_BETZ = 0.59; // Límite de Betz (máxima eficiencia teórica del aerogenerador)
const float DIAMETRO_ANEMOMETRO = 0.16; // Diámetro de la circunferencia del anemómetro en metros
const float FACTOR_POTENCIA = 1000; // Factor de conversión de W a mW

//*****
```

```
//***** VARIABLES *****
```

```
//*****
```

```
volatile unsigned int contadorRotor = 0; // Contador RPM rotor
```

```
volatile unsigned int contadorAnemo = 0; // Contador RPM anemo
```

```
unsigned long tiempoAnterior = 0; // Tiempo anterior para el cálculo de RPM
```

```
unsigned long ledTimer = 0; // Temporizador para el LED
```

```
//*****
```

```
//***** PINES *****
```

```
//*****
```

```
const int PIN_LED = 4; // Led conectado en pin digital 13
```

```
const int PIN_FOTOINTERRUPTOR = 2; // Fotosensor conectado en pin digital 2
```

```
const int PIN_SENSOR_HALL = 3; // Sensor Hall conectado en pin digital 3
```

```
const int PIN_ALTERNADOR = A0; // Pin analógico para leer la tensión generada por el  
alternador
```

```
//*****
```

```
//**** C O N F I G *****
```

```
//*****
```

```
//Reseteo del arduino
```

```
void (* funcReset)(void)=0;
```

```
//*****
```

```
//***** SETUP *****
```

```
//*****
```

```
void setup() {
```

```
    analogReference(INTERNAL); // Cambiar la referencia de tensión a 1.1V
```

```
    Serial.begin(9600); // Iniciar la comunicación serial
```

```
    Wire.begin(); // Inicializa bus I2C
```

```
    oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // Inicializa pantalla con direccion 0x3C
```

```
    pinMode(PIN_LED, OUTPUT); // Configura el pin del LED como salida
```

```
    pinMode(PIN_FOTOINTERRUPTOR, INPUT); // Configurar el pin del fotointerruptor  
    como entrada
```

```

pinMode(PIN_SENSOR_HALL, INPUT); // Configura el pin del Sensor Hall como
entrada

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_FOTOINTERRUPTOR),    contarVueltasRotor,
RISING); // Habilitar la interrupción en el pin del fotointerruptor
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_SENSOR_HALL),        contarVueltasAnemo,
RISING); // Habilitar interrupción en el pin del Sensor Hall
}

//*****
//***** LOOP *****
//*****

void loop() {
    unsigned long tiempoActual = millis();
    if(tiempoActual >= TIEMPO_SEMANA_MS){
        funcReset(); //Reseteo semanal para evitar el desbordamiento de la variable del
temporizador
    }

    parpadearLED(); // Llama a la función para parpadear el LED

    // Calcular las RPM cada 1 segundos
    if (tiempoActual - tiempoAnterior >= TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS) {

        //Obtener los contadores actuales de vueltas
        unsigned int vueltasRotor = contadorRotor;
        unsigned int vueltasAnemo = contadorAnemo;

        // Reiniciar los contadores
        contadorRotor = 0;
        contadorAnemo = 0;

        // Calcular las RPM del rotor y del anemómetro
        unsigned long rpmRotor = (vueltasRotor * MILISEGUNDOS_POR_MINUTO) /
TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS; // RPM a las que gira el rotor del aerogenerador
        unsigned long rpmAnemo = (vueltasAnemo * MILISEGUNDOS_POR_MINUTO) /
TIEMPO_ENTRE_CALCULOS_MS; // RPM a las que gira el anemómetro
    }
}

```

```

// Calcular la velocidad del viento en m/s
float velocidadMS = (rpmAnemo * DIAMETRO_ANEMOMETRO * PI)/60;

// Calcular la potencia
float area = PI * RADIO_PALAS * RADIO_PALAS; // Área barrida por las palas
float potenciaMaxima = 0.5 * LIMITE_BETZ * DENSIDAD_AIRE * area * velocidadMS *
velocidadMS * velocidadMS * FACTOR_POTENCIA;

// Leer la tensión
int valorAnalogico = analogRead(PIN_ALTERNADOR);
float tension_mV = (valorAnalogico * 1100.0) / 1023.0;

// Mostrar las RPM, velocidad, potencia y tensión por el puerto serie
Serial.print("RPM: "); Serial.println(rpmRotor);
Serial.print("M/S: "); Serial.println(velocidadMS);
Serial.print("mW: "); Serial.println(potenciaMaxima);
Serial.print("mV: "); Serial.println(tension_mV);

// Mostrar las RPM, velocidad, potencia y tensión en la pantalla OLED
mostrarDatosEnOLED(rpmRotor, velocidadMS, potenciaMaxima, tension_mV);

tiempoAnterior = tiempoActual; // Actualizar el tiempo anterior
}

}

//*****
//**** INTERRUPCIONES ****
//*****

// Función de interrupción para contar las vueltas del rotor
void contarVueltasRotor() {
    contadorRotor++;
}

// Función de interrupción para contar las vueltas del anemo
void contarVueltasAnemo() {
    contadorAnemo++;
}

```

```

}

//*****
//**** FUNCIONES ****
//*****

// Función para hacer parpadear el LED

void parpadearLED() {
    if (millis() - ledTimer >= 2000) {
        ledTimer = millis(); // Reiniciar el temporizador para el siguiente parpadeo
        digitalWrite(PIN_LED, !digitalRead(PIN_LED)); // Invertir el estado del LED
    }
}

//Función para mostrar los datos en la pantalla OLED

void mostrarDatosEnOLED(unsigned long rpmRotor, float velocidadMS, float
potenciaMaxima, float tension_mV) {
    oled.clearDisplay(); // Limpia pantalla
    oled.setTextColor(WHITE); // Establece color al único disponible (pantalla monocromo)
    oled.setTextSize(1); // Establece tamaño de texto en 1

    oled.setCursor(0, 0); // Ubica cursor en inicio de coordenadas 0,0
    oled.print("ROTOR: "); oled.print(rpmRotor); oled.print(" rpm"); // Escribe en pantalla el
    texto

    oled.setCursor(0, 20); // Ubica cursor en coordenadas 0,20
    oled.print("VIENTO: "); oled.print(velocidadMS); oled.print(" m/s"); // Escribe en pantalla
    el texto

    oled.setCursor(0, 30); // Ubica cursor en coordenadas 0,30
    oled.print("POTENCIA: "); oled.print(potenciaMaxima); oled.print(" mW"); // Escribe en
    pantalla el texto

    oled.setCursor(0, 40); // Ubica cursor en coordenadas 0,40
    oled.print("TENSION: "); oled.print(tension_mV); oled.print(" mV"); // Escribe en pantalla
    el texto

```

```
oled.display(); // Muestra en pantalla todo lo establecido anteriormente  
}
```