



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## MEDICIÓN, TRANSMISIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE UN AEROGENERADOR VERTICAL PARA USO DOMÉSTICO

Autor: Javier Colinas Cano

Director: Juan Romeo Granados

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**Medición, transmisión y análisis de datos de un aerogenerador vertical para uso  
doméstico**

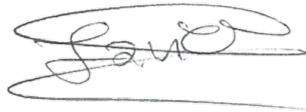
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/20 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Colinas Cano

Fecha: 18/07/2020

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**



Fdo.: Juan Romeo Granados

Fecha: 18/07/2020



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a D. Juan Romeo Granado, como director del proyecto, por ofrecerme la oportunidad de colaborar en este trabajo, aprender a su lado y por hacer de “guía” en momentos de incertidumbre; y a LaNaveMadrid.com por permitirnos el acceso a sus instalaciones y poner a nuestra disposición los recursos necesarios para facilitar la realización de este proyecto.

Asimismo, al profesor de ICAI D. Jaime Boal, por sus explicaciones indispensables sobre la transmisión de datos, su disponibilidad y capacidad para enseñar.

También quiero dedicar este agradecimiento a mis compañeros de clase: Manuel Trabado, por ayudarme a superar mis dificultades; Pablo Bobo, por compartir el material necesario; y Álvaro Fernández, por aconsejarme en el uso del *bluetooth* en el *Arduino*.

Por último, a mi familia. En especial a mi tío Raúl Cano, que como ingeniero me inició en el aprendizaje del Arduino y a mi madre, por su imprescindible ayuda en la redacción de este trabajo.



# MEDICIÓN, TRANSMISIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE UN AEROGENERADOR VERTICAL PARA USO DOMÉSTICO

**Autor: Colinas Cano, Javier.**

Director: Romeo Granados, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el desarrollo de un aerogenerador vertical para uso doméstico que ha implicado el uso de sensores para el registro de variables (*medición*), el estudio del envío de sus datos (*transmisión*) y, posteriormente, su visualización e interpretación mediante gráficas (*análisis*).

**Palabras clave:** Bluetooth, Aerogenerador, Energías renovables, Turbina Savonius, Turbina Darrieus, Arduino, Matlab, HC-05, Sensor de efecto Hall.

### 1. Introducción

La humanidad necesita la energía en la vida cotidiana; en la actualidad, objetos como, el teléfono móvil, la lavadora, la televisión, el ventilador, etc, necesitan de energía para su funcionamiento. Pero la energía no procede de una única fuente. Existen dos grandes grupos en los que se puede clasificar: las *energías no renovables* y las *energías renovables*.

Las *energías no renovables* son recursos limitados, es decir, que se extrae más cantidad del recurso de la que se llega a generar. A este grupo pertenecen: la *energía nuclear* (que proviene de la energía que se libera en las reacciones nucleares y en la desintegración de los átomos) y los *combustibles fósiles* que son el carbón, petróleo y el gas natural (en los que se aprovecha la energía que se libera al provocar la combustión del material) [1].

Por otro lado, las *energías renovables* son recursos ilimitados debido a que se aprovechan las fuerzas de la naturaleza. Al no contaminar y tener una capacidad infinita las hace mucho más ventajosas que las no renovables, aunque aún hay que seguir desarrollando estas energías para poder asegurar un futuro limpio y sin falta de recursos. Dentro de las energías renovables [2], destacan:

- *Energía solar*. Se aprovecha la energía que procede del Sol. Se clasifica en *energía solar térmica*, la cual aprovecha la energía para generar calor, y la *energía solar fotovoltaica*, que aprovecha la energía para generar electricidad.
- *Energía hidráulica*. Se usa la energía potencial de un fluido para generar electricidad.
- *Energía de biomasa*. Se utiliza la materia orgánica como fuente de energía. Se puede usar para producir energía térmica, biogás o biocombustibles como el bioetanol o el biodiesel.
- *Energía mareomotriz*. Se extrae la energía de las corrientes marinas, del movimiento de las olas y las mareas.

- **Energía geotérmica.** Se utiliza la gran cantidad de energía en forma de calor bajo la superficie de la Tierra, para producir energía eléctrica y térmica.
- **Energía eólica.** Se aprovecha la energía del viento para generar electricidad.

Esta última, la energía eólica, constituye el centro de este proyecto. La idea de aprovechar la energía del viento no es una novedad; antaño se utilizaba para moler grano en los molinos de viento o para mover los barcos por el mar. Y en la actualidad, se extrae esta energía mediante dos tipos de aerogeneradores: los **aerogeneradores horizontales (HAWT)** y los **aerogeneradores verticales (VAWT)**. La diferencia principal entre ellos radica en la dirección del eje de giro, dando lugar a sus nombres respectivos.

Los *aerogeneradores horizontales* tienen las siguientes ventajas: poseen una gran eficiencia, tienen una sencilla regulación de las palas, tienen una fácil implementación de freno aerodinámico y constituyen una tecnología desarrollada y de menor precio [3].

Los *aerogeneradores verticales*, por otro lado, presentan como ventajas que: no requieren sistema de orientación; se pueden situar en la parte inferior, el generador y la transmisión; poseen una gran estabilidad al estar su centro de gravedad más cerca del suelo y a su vez poseen infraestructuras menos robustas que las de los HAWT; no requieren altos mástiles, por lo que la altura del rotor puede ser mayor; tienen un menor impacto visual; su transmisión es simple y directa; y el área que se proyecta sobre el rotor puede ser cualquier figura plana simétrica [4].

Dentro de los aerogeneradores verticales se distinguen dos grandes familias: **las turbinas Savonius** y **las turbinas Darrieus**. Mientras que las primeras poseen un gran par de arranque, no necesitan un dispositivo auxiliar para arrancar; las segundas, son más eficientes, se comportan mejor ante vientos fuertes y tienen una mayor potencia [5].

## 2. Definición del proyecto

El principal objetivo de este proyecto es diseñar y desarrollar un aerogenerador vertical, inteligente, para uso doméstico. Se parte de un diseño elaborado por el director del proyecto, que combina las ventajas de las turbinas Savonius y de las turbinas Darrieus.

El aerogenerador diseñado, como se muestra en la Ilustración 1 se compone de cinco palas (que conforman la turbina), otras palas exteriores (que modifican el caudal del viento que entra), tres ruedas (que permiten su desplazamiento) y un soporte donde se situará el convertidor.



*Ilustración 1: Aerogenerador vertical diseñado por D. Juan Romeo.*

En este proyecto se tienen como objetivos:

1. ***Establecer sensores en el aerogenerador.*** Se necesitan obtener las variables físicas del aerogenerador. Para ello, se efectuarán mediciones de las revoluciones del aerogenerador con un sensor de efecto Hall, de la velocidad del viento con un anemómetro y de la potencia generada.
2. ***Transmitir los datos recibidos de los sensores, a través del bluetooth.*** Con el uso de los programas Arduino y Matlab se realizará la transmisión de los datos a un ordenador, clasificándolos gráficamente para poder interpretarlos más tarde.
3. ***Optimizar el diseño del aerogenerador.*** Para ello se requiere la visualización de los resultados obtenidos, es decir, que los objetivos anteriores se cumplan. A partir de ahí se ampliaría la búsqueda de nuevas funciones para implementar en el aerogenerador, por ejemplo:
  - a. El cambio del ángulo de ataque de las palas exteriores, para mayor velocidad de rotación de la turbina.
  - b. La mejora de envío de datos cambiando el bluetooth por wifi o radiofrecuencia. Con esta mejora, además, se podrá estudiar el uso o creación de una base de datos donde guardar la información obtenida por los sensores.

Una vez alcanzados estos objetivos surgieron nuevas ideas que desarrollar, pero, desafortunadamente, la pandemia mundial no lo permitió.

El equipo de trabajo ha estado formado por: D. Juan Romeo (director del proyecto) y los alumnos, D. Antonio Serda y D. Javier Colinas.



*Ilustración 2: D. Antonio Serda y D. Javier Colinas trabajando en el aerogenerador vertical.*

Las tareas de trabajo estaban claramente diferenciadas con el objeto de rentabilizar el tiempo y conseguir, así, los objetivos planteados. Mientras que D. Antonio Serda se encargaba de estudiar el comportamiento de los sensores y realizar los cálculos necesarios para obtener variables como velocidades, aceleraciones, potencia e inercia (recogido en su Trabajo Fin de Grado “*Instalación de sensores y análisis de datos de un aerogenerador vertical para uso doméstico*”), D. Javier Colinas se encargaba del estudio del envío de datos a través de bluetooth y de la recepción y visualización de las variables mencionadas anteriormente, en tiempo real.

### **3. Descripción del sistema**

Se utiliza un **Arduino UNO** [6] que recibe los datos obtenidos de los sensores para transmitirlos, vía bluetooth, gracias al módulo **HC-05** [7].

Los sensores usados son: un **sensor de efecto Hall** [8] y un **anemómetro** [9] que sirven para medir la velocidad de rotación de la turbina y del viento, respectivamente. Se usa también un imán para que el sensor de efecto Hall pueda medir el tiempo que ha pasado cuando el imán realiza una vuelta. El anemómetro, cuenta el tiempo que ha transcurrido al realizar éste una vuelta.

Esta información la recibe el Arduino y los pone en la cola de datos que tiene que enviar el módulo bluetooth.

Un ordenador ejecuta un programa desarrollado por los alumnos, en **Matlab** [10] para establecer la conexión con el módulo HC-05 y, así, empezar a recibir los datos de los

sensores. En este proyecto, se configura el dispositivo HC-05 como “esclavo”, es decir, que el dispositivo que se conecta al módulo bluetooth es aquel que debe pedirle cuándo y cuánta información debe enviarle.

El código desarrollado permite que, al mismo tiempo que se reciben los datos, se realicen los cálculos necesarios para poder visualizar, en las gráficas, las variables deseadas.

Debido a numerosos errores ya solucionados, en el código final, se reciben dos datos: los tiempos del anemómetro y los tiempos de la turbina. Los datos de la turbina se clasifican según la pala a la que pertenecen. Esto se realizó para estudiar el comportamiento de la turbina, se recibían cinco datos procedentes de cinco imanes, situados en cada una de las palas (uniformemente distribuidos) en una vuelta, frente al comportamiento de la turbina al recibir un dato de un imán (situado en una pala) en una vuelta.

A continuación, se guardaron las gráficas y los datos correspondientes a ellas, para su posterior análisis. Esta parte permitió al equipo poder corregir los errores que surgieron durante los ensayos.

#### **4. Resultados**

Tras desarrollar los códigos del Arduino y del Matlab, se realizaron numerosas pruebas para tener información sobre el comportamiento del aerogenerador.

Se consiguieron resolver varias cuestiones, aunque hay alguna que todavía se tiene que seguir analizando. Al llegar a esta última parte del trabajo, se han considerado alcanzados los objetivos, si bien no en el tiempo previsto. Este tiempo extra, con el que no se había contado, ha ido en detrimento del tiempo que se hubiera dedicado a la transmisión de datos y la visualización de éstos, o lo que es lo mismo: a la optimización.

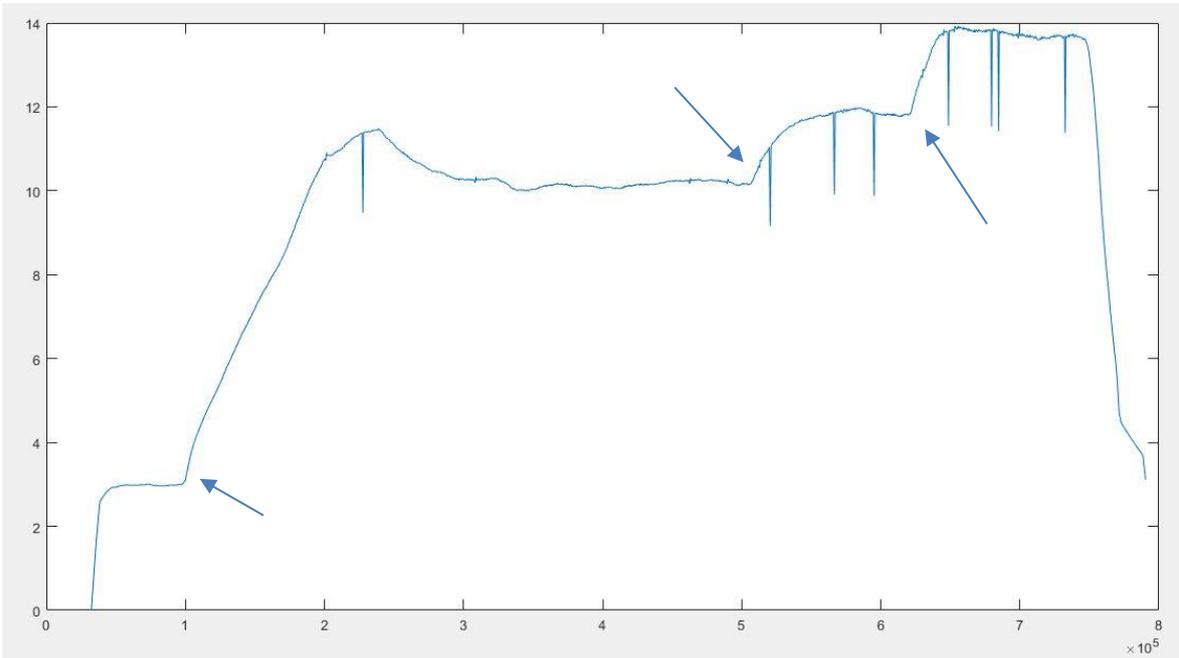
Se hicieron ensayos con un ventilador, a una distancia alejada a baja potencia, y a una distancia cercana a baja, media y alta potencia. Los resultados son los que se comentan a continuación.

En la Gráfica 1, se muestra la prueba del comportamiento del aerogenerador al ser impulsado por un ventilador alejado y a baja potencia. Hay que destacar que se observan grandes cambios en la velocidad de la turbina. Esto se produjo porque se modificaron las palas exteriores durante el ensayo para comprobar si influía el ángulo de ataque de las palas (como muestran las flechas de la gráfica adjunta). Gracias a este ensayo se comprendió la importancia de por qué se habían diseñado esas palas exteriores y, también, que el aerogenerador podía funcionar con pequeñas corrientes de aire.

Además, hay que mencionar que la frenada fue manual porque ya se poseían varias curvas de frenada de la turbina. Hay que fijarse en las bajadas de velocidad momentáneas. Este fenómeno se produce al superar cierta velocidad provocando que empiece a oscilar el aerogenerador y haciendo que el sensor de efecto Hall se salte el paso de una pala, dando lugar a una bajada de velocidad pronunciada. Exactamente, lo que pasa es que las oscilaciones impiden que los imanes adheridos a las palas pasen lo suficientemente cerca como para que el sensor de efecto Hall cuente que ha pasado una pala.

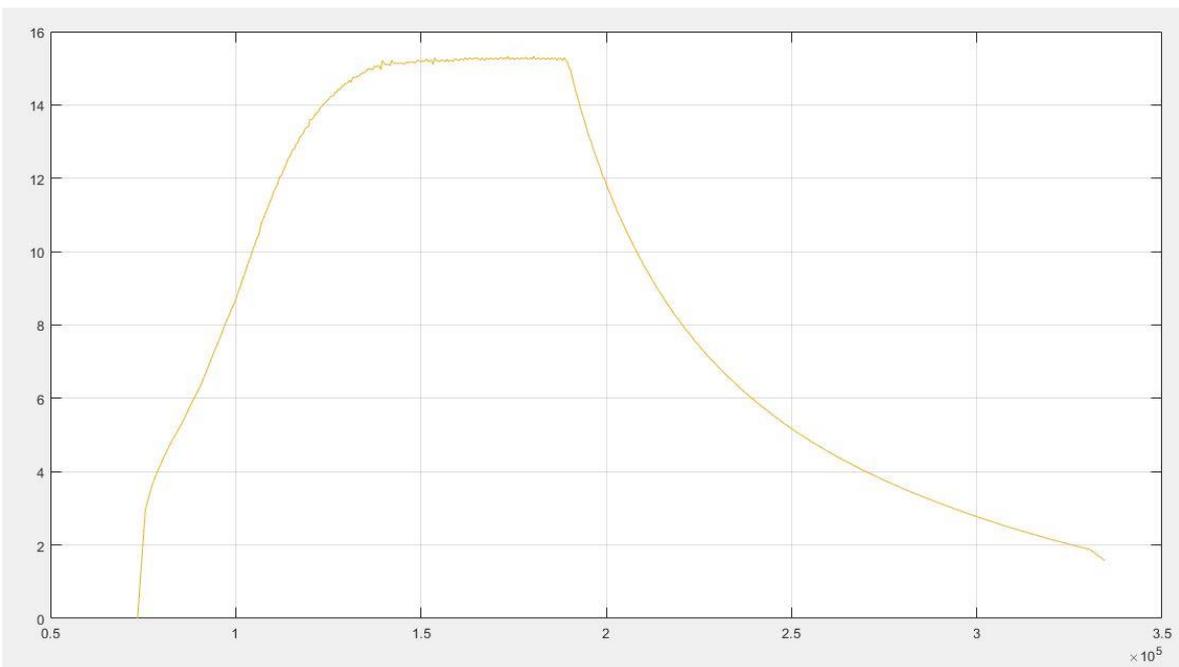
Se logró llegar a comprender, este problema, dejando un imán que contaba cuando la turbina había realizado una vuelta. Al solo registrar los datos de una sola pala la

velocidad se reduce a la mitad porque, al saltarse un dato, tarda dos vueltas en obtener el nuevo dato. Este problema descrito, se observa en la Gráfica 3.



Gráfica 1: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).

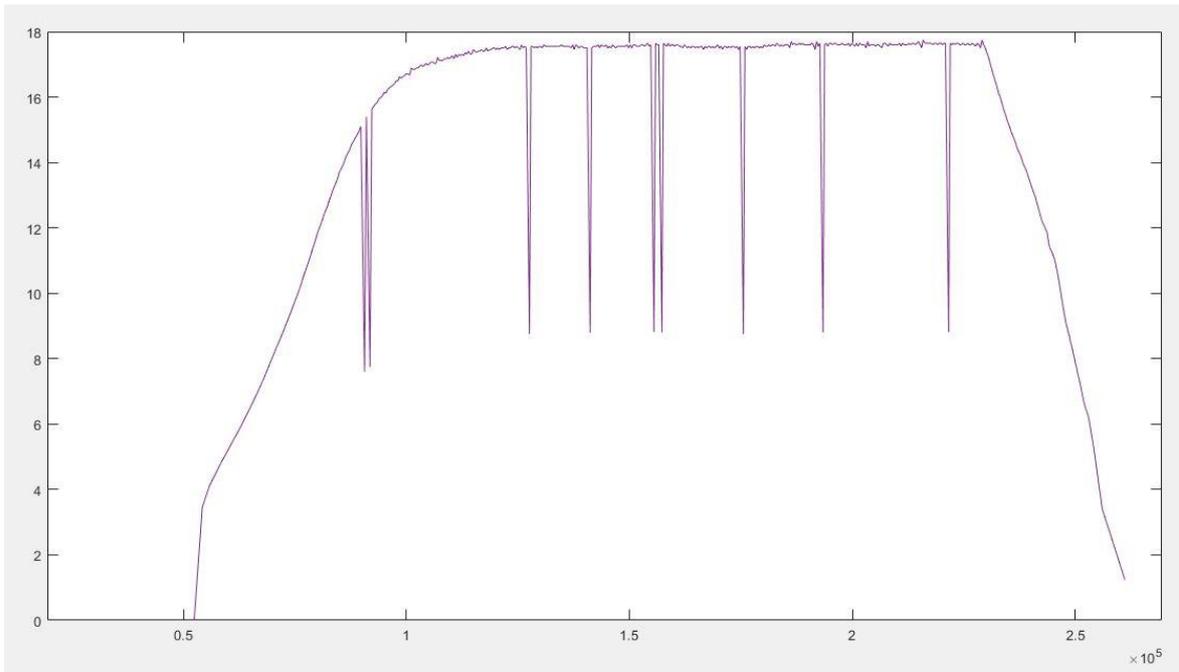
Después, la Gráfica 2 se corresponde con el ensayo del aerogenerador al situarse el ventilador cerca de éste y a baja potencia. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Esta gráfica muestra cómo deberían ser todas las demás si no se tuviese el problema de la caída de la velocidad.



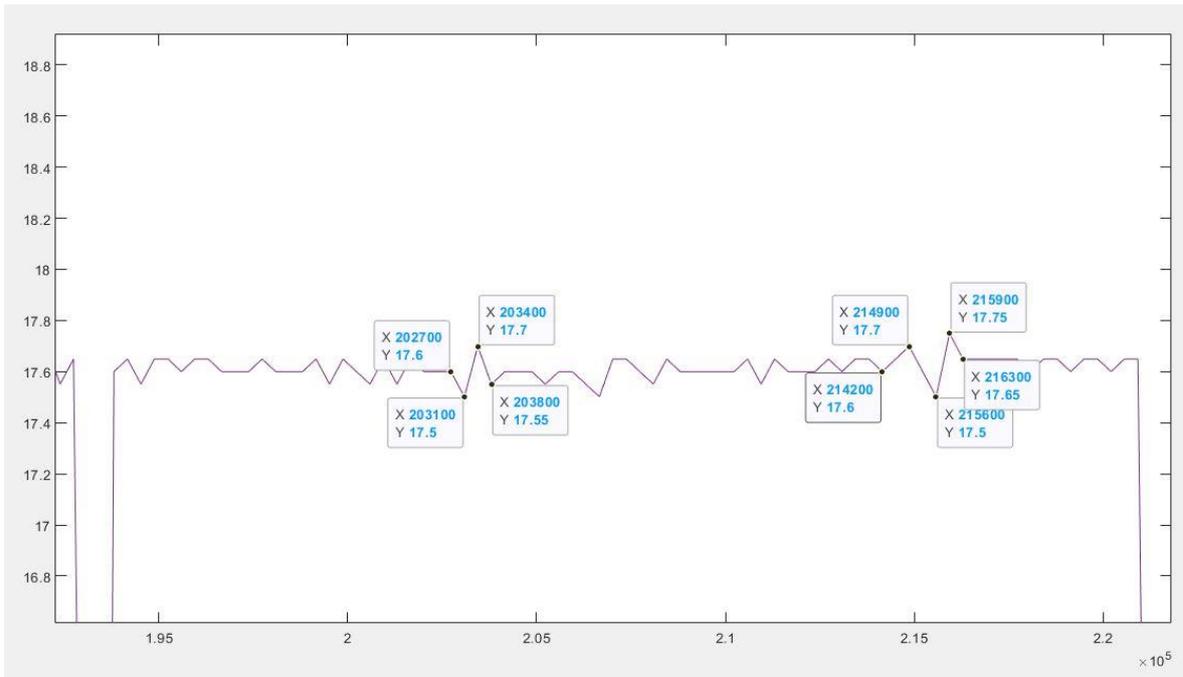
Gráfica 2: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).

A continuación, en la Gráfica 3 se visualiza un aumento en la velocidad de rotación, en comparación con la anterior gráfica, debido a que, en esta prueba, el ventilador se sitúa otra vez cerca, pero con una potencia media. Se frena, también, de forma manual y, por ello, la caída de velocidad no tiene forma exponencial (como en la anterior gráfica) sino que posee una pendiente más abrupta.

En este ensayo aparece uno de esos errores de los que no se ha sabido interpretar su procedencia. Esta gráfica se ha ampliado para poder observar este fenómeno con mayor claridad (Gráfica 4).



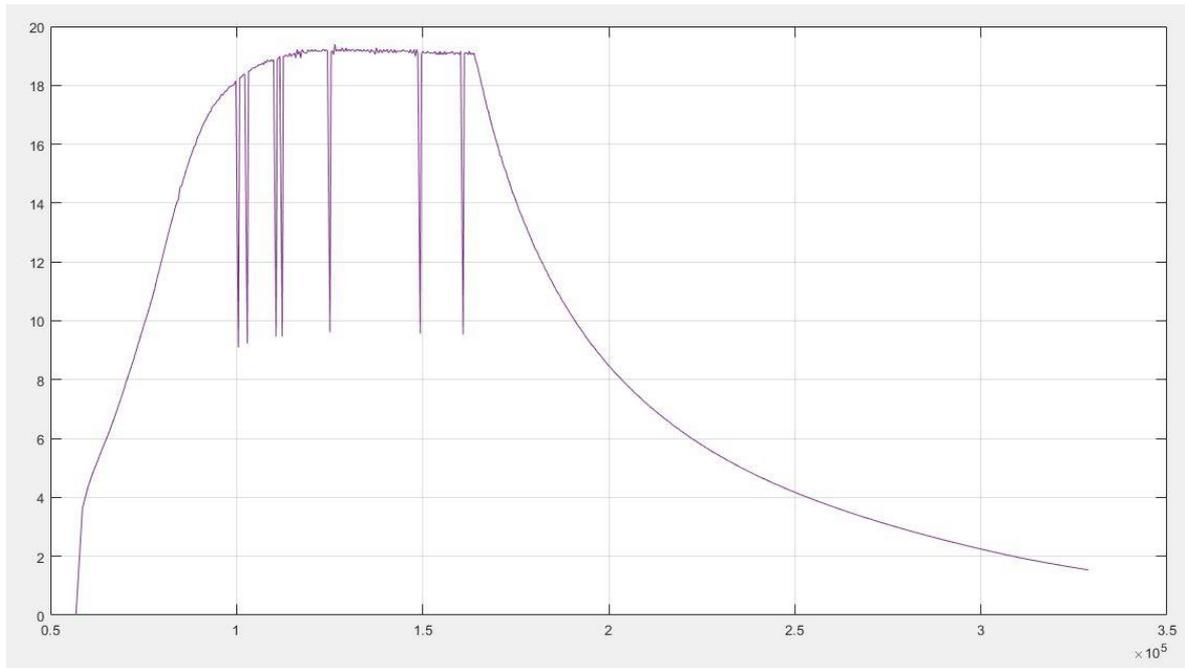
*Gráfica 3: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*



*Gráfica 4: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms) ampliada.*

Tras numerosas pruebas se ha observado que, de vez en cuando, se produce una disminución de la velocidad y, a continuación, una aceleración. Esto sería lo normal, ya que frente a un flujo de aire continuo y constante debería ser una línea continua; pero al girar la turbina, el flujo de aire no siempre está empujando las palas, sino que, a veces, el aire provoca que la turbina se frene. Este suceso no hace que se pare la turbina, ya que la fuerza que impulsa a la turbina es mayor que la que le frena, gracias a su diseño.

Por último, la Gráfica 5 muestra el comportamiento del aerogenerador al situar un ventilador cerca, a máxima potencia. Al igual que en el anterior ensayo, se visualiza un aumento de la velocidad de rotación de la turbina producida por el aumento de potencia. Con la realización de este ensayo se llegó a registrar una velocidad máxima de la turbina de 181 rpm aproximadamente.



Gráfica 5: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).

Para resumir, se cumplieron los objetivos marcados, y, por tanto, los resultados fueron satisfactorios, a pesar de las adversidades que fueron surgiendo durante el desarrollo del proyecto. No obstante, hay que mencionar que se hubiese querido desarrollar aún más el último objetivo: optimización del diseño del aerogenerador para poder explorar otras metas que se quieren desarrollar.

## 5. Conclusiones

Con la finalización de este proyecto se ha completado una etapa, pero se dejan abiertas diversas opciones que permitirán la investigación y el perfeccionamiento de los aerogeneradores verticales para el uso doméstico. Además del proyecto, en general y del producto conseguido, en particular, el equipo de trabajo ha evolucionado positivamente a lo largo de todo este tiempo, incluso, a pesar de las dificultades inesperadas asociadas a la pandemia mundial. A nivel individual, el crecimiento también ha sido notable.

Desde el comienzo, se marcaron unos objetivos que se han cumplido ampliamente, es decir:

- Respecto al objetivo “*establecer sensores en el aerogenerador para obtener las variables físicas del aerogenerador y su entorno*”, desarrollado por D. Antonio Serda, se puede determinar que, al comienzo, el equipo se centró en la obtención de dos variables (la velocidad de rotación del aerogenerador y la velocidad de rotación del anemómetro). Pero, una vez que se avanzó en el resto de los objetivos, estas dos variables pasan a un segundo plano, a la vez que la variable tiempo cobra protagonismo (sólo con la velocidad, como dato, no se puede calcular, con precisión, la potencia). Se envían los tiempos medidos al Matlab para calcular con exactitud las velocidades, aceleraciones y potencia del aerogenerador y las velocidades y aceleraciones del anemómetro.

- Respecto a otro de los objetivos, “**transmitir los datos recibidos de los sensores a través del bluetooth**”, a cargo de D. Javier Colinas, su logro favoreció que se ampliaran las metas del proyecto introduciéndose metas nuevas como que el equipo centrara sus esfuerzos en conseguir la visualización de los datos recibidos y en calcular otros datos de interés como la inercia del aerogenerador y las velocidades y aceleraciones anteriormente mencionadas.
- Un tercer objetivo: “**conseguir la optimización del aerogenerador**”, desarrollado por todos los miembros del equipo, no pudo completarse, desafortunadamente. No obstante, se realizaron importantes avances durante la visualización de los datos recibidos, como, por ejemplo:
  - La variación del ángulo de ataque de las palas exteriores, debido a que es una variable muy correlacionada con la velocidad de rotación de la turbina.
  - El funcionamiento correcto del aerogenerador, tanto con vientos fuertes como con vientos débiles.
  - Las oscilaciones que sufría el aerogenerador provocaban la mala obtención de los datos para analizar su comportamiento, pero como se muestra en las gráficas, la turbina no se ve afectada en su velocidad por estas oscilaciones.
- El objetivo principal, “**conseguir el correcto funcionamiento del aerogenerador diseñado**”, tampoco pudo completarse en su totalidad. En la actualidad, persisten una serie de errores de procedencia desconocida; es decir, no se tiene certeza de si son humanos, estructurales, de lógica o si son debidos a la pérdida de información. A pesar de ello, sí se puede afirmar que el equipo ha conseguido que el aerogenerador diseñado sea funcional.

Este proyecto puede seguir avanzando en la resolución de los problemas planteados y mediante tareas que podrían completarse, como, por ejemplo:

- **Elaboración de un sistema de frenado mecánico**, similar al que se utiliza en los ascensores. El equipo probó a desarrollar un sistema que estuviese conectado al Arduino y que frenase la turbina al superar cierto umbral; pero el servomotor, con el cual se quería frenar a la turbina, no funcionaba exactamente como se quería y se tuvo que desechar este sistema. Se propuso la investigación de este tema, pero al desarrollar la transmisión y visualización, el equipo se centró en la interpretación de los datos obtenidos.
- **El paso del bluetooth al Wi-Fi**. Esta es una de las tareas analizadas a lo largo del proyecto. Se considera necesario realizar este cambio, debido a la limitación de distancia que posee el HC-05. Pero el equipo no poseía los conocimientos para desarrollar una red Wi-Fi que pudiese solucionar los problemas que suponía el mismo. No se descarta la idea de utilizar transmisión de los datos por radiofrecuencia.
- **Diseño y desarrollo de un sistema que permita el cambio de ángulo de las palas exteriores**. Esta tarea resulta de gran importancia pues influye directamente en la potencia que se extrae de la turbina. Este sistema se requiere por dos razones: la primera, porque en caso de que no se quisiese que el aerogenerador funcionase se cerrarían las palas exteriores impidiendo la entrada del viento; y, la segunda, porque normalmente, cuando aparecen corrientes de aire superiores a las nominales y que

podrían provocar daños al aerogenerador, se regularía el ángulo de las palas para recibir la energía del viento evitando sufrir daños y, así, no desperdiciar toda esa energía, de tal manera que la corriente de aire sea similar a cuando se trabaja con condiciones nominales.

- **Creación de una aplicación o sistema que permita la conexión a través de bluetooth a la vez que la visualización de los datos recibidos.** Actualmente, se utiliza Matlab, pero sus licencias no son baratas y para cumplir con el objetivo de que el producto final sea barato se debe procurar disminuir todos los costes posibles. Se usó Matlab debido a la experiencia del equipo en su entorno de trabajo y dio muy buenos resultados al permitir cumplir con los objetivos establecidos.
- **Desarrollo de un convertidor.** Con la ayuda de la electrónica de potencia habría que diseñar un convertidor que transformara la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica y que, además, se conectara a la Red. También, se podría desarrollar un sistema que permitiera la conexión al domicilio a la vez que, a la Red, de tal manera que, si hubiera algún dispositivo de la vivienda que necesitara energía, se la entregaría el aerogenerador y lo sobrante se enviaría a la Red. En el caso de no tener nada conectado en el domicilio abastecería a la Red.

## 6. Referencias

- [1] Rinconeducativo. “FUENTES DE ENERGÍA NO RENOVABLES”. 6 de junio de 2020. <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/fuentes-de-energia-no-renovables#:~:text=Energ%C3%ADa%20no%20renovable%20se%20refiere,de%20producci%C3%B3n%20o%20extracci%C3%B3n%20viable> .
- [2] Remica. “TIPOS DE ENERGÍA: DIFERENCIAS ENTRE RENOVABLES Y NO RENOVABLES”. 6 de junio de 2020. <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/> .
- [3] David Martínez Quitana. “DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL”. Antecedentes página 27. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [4] David Martínez Quitana. “DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL”. Capítulo 3. Antecedentes. Página 28. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [5] Carlos Diago Vidal. “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA USO DOMÉSTICO”. Capítulo 1.2. Tipos de aerogeneradores y principios de funcionamiento. Página 14. 29 de junio de 2020. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf?sequence=1> .
- [6] Arduino. “ARDUINO UNO REV3”. 9 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> .

- [7] Prometec. “EL MÓDULO BLUETOOTH HC-05”. 14 de julio de 2020.  
<https://www.prometec.net/bt-hc05/> .
- [8] Arduino. “GROVE - HALL SENSOR”. 14 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/grove-hall-sensor> .
- [9] Amazon. “ANEMÓMETRO SENSOR DE VELOCIDAD VIENTO CON RJ11 PARA ESTACIÓN METEOROLÓGICA N25FR WH1080 VÁLIDO UNO MEGA”. 14 de julio de 2020. <https://www.amazon.es/Anem%C3%B3metro-Velocidad-Estaci%C3%B3n-Meteorol%C3%B3gica-Arduino/dp/B07BMVYBW9> .
- [10] Mathworks. “MATLAB”. 14 de julio de 2020.  
<https://es.mathworks.com/products/matlab.html> .

# MEASUREMENT, TRANSMISSION AND DATA ANALYSIS FROM A VERTICAL AXIS WIND TURBINE FOR DOMESTIC USE

**Author: Colinas Cano, Javier.**

Supervisor: Romeo Granados, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This project is based on the development of a vertical axis wind turbine for domestic use that has involved the use of sensors for recording variables (**measurement**), the study of sending its data (**transmission**) and lastly, the display and understanding of this data by using graphics (**analysis**).

**Keywords:** Bluetooth, Wind Turbine, Renewable Energy, Savonius Turbine, Darrieus Turbine, Arduino, Matlab, HC-05, Hall Sensor.

## 1. Introduction

Humanity needs energy for its day to day life; nowadays, items like a cellphone, a washing machine, a TV, a fan, etc, need energy to operate. But energy does not generate only from a unique source. There are two big groups where it can be classified: *non-renewable energies* and *renewable energies*.

*Non-renewable energies* are limited resources, meaning that we extract more quantity of the resource than what it generates. Inside of this group we have: *nuclear energy* (that comes from the energy generated from nuclear reactions and atoms disintegration) and *fossil fuels* that are coal, oil and natural gas (from which we make use of the energy liberated from the material combustion) [1].

On the other hand, renewable energies are unlimited resources because we harness the forces of nature. They don't pollute and have an infinite capacity that makes them much more beneficial than non-renewable energies. Although we still need to keep developing these energies to be able to ensure a cleaner future and without lack of resources. As part of renewable energies [2], we have:

- **Solar energy:** the energy used comes from the Sun. It can be classified in *thermal solar energy*, which harnesses the energy to generate heat; and the *photovoltaic solar energy*, which harnesses the energy to generate electricity.
- **Hydraulic energy:** energy is obtained from kinetic energy generated from water falling from great heights.
- **Biomass energy:** the organic matter is used as energy source. It can be used to generate thermal energy, biogas or biofuels such as bioethanol and biodiesel.
- **Tidal energy:** it is extracted from the sea currents, wave movement and tides.
- **Geothermal energy:** the great quantity of energy as heat underneath the surface of the Earth is used to generate electric and thermal energy.
- **Eolic energy:** the energy of the wind is used to generate electricity.

The last one mentioned, the eolic energy, is the main theme of this project. The idea to use the wind's energy is not a novelty; yesteryear it was used to grind maize in windmills or to transport ships on sea. Nowadays, we extract this energy using two types of wind turbines: *Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT)* and *Vertical Axis Wind Turbines (VAWT)*. The main difference between these two is on the direction of the axis rotation, giving them their respective names.

The *horizontal axis wind turbines* have the following benefits: they have great efficiency, they have a simple blade regulation, they have an easy implementation of aerodynamic brake and they are a developed and lower-priced technology [3].

The *vertical axis wind turbines*, on the other hand, have as benefits that: they don't require an orientation system; they can be located on the lower side, both generator and transmission; they possess a great stability due to the gravity center being closer to the ground and, also they possess lesser robust infrastructures than HAWT; they don't require high masts so the rotor can be bigger; they have a lesser visual impact; their transmission is simple and direct; and the area that is projected onto the rotor can be any symmetrical flat figure [4].

Inside of the vertical axis wind turbines, there are two big families: *the Savonius turbines* and *the Darrieus turbines*. While the first ones possess a great starting torque, they don't require an auxiliary device to start. The second ones are more efficient, they behave better against strong winds and have a higher power [5].

## 2. Project definition

The main purpose of this project is to design and develop a vertical axis wind turbine, smart, for domestic use. The starting point is a design elaborated by the project manager, that combines the benefits from Savonius and Darrieus turbines.

The wind turbine designed, as shown on Illustration 1 consists of five blades (that make up the turbine), other outer blades (that modify the wind's flow coming in), three wheels (that allow it's movement) and a support where the convertor will be placed.



*Illustration 1: Vertical axis wind turbine developed by Mr Juan Romeo.*

In this project, we have as targets:

1. ***To establish sensors on the wind turbine.*** We need to obtain the physical variables of the wind turbine. To be able to obtain them, we will make measurements on the wind turbine revolutions with a Hall sensor, we will also take measurements on the wind's speed with an anemometer and we will take measurements as well on the generated power.
2. ***To send the data received by the sensors through Bluetooth.*** By using Arduino and Matlab programs we will send the collected data to a computer, classifying them graphically to be able to read them later on.
3. ***To optimize the wind turbine design.*** For this, it is required the viewing of the results obtained, meaning that the previous targets are met. From that point, the search of new tasks to implement in the wind turbine will be increased, such as:
  - a. Changing the attack angle on the outer blades to get more rotation speed on the turbine.
  - b. The improvement of sending data by changing Bluetooth to Wi-Fi or radiofrequency. With this improvement, the use or creation of a data base where the information obtained is collected through the sensors could be studied.

Once we reach this targets, new ideas to develop came up but, unfortunately, the global pandemic situation did not allow us the opportunity to explore them.

The work team for this project has been formed by Mr Juan Romeo (Project manager) and students, Mr Antonio Serda and Mr Javier Colinas.



*Illustration 2: Mr Antonio Serda and Mr Javier Colinas working on the vertical axis wind turbine.*

Work tasks have been clearly differentiated with the objective of capitalizing time and get the agreed targets. While Mr Antonio Serda was in charge of studying the behavior of the sensors and make the necessary calculations to obtain variables such as speed, accelerations, power and inertia (included in his final project “*Instalación de sensores y análisis de datos de un aerogenerador vertical para uso doméstico*”), Mr Javier Colinas has been in charge of the study of sending data via bluetooth and the reception and display of the variables mentioned above, in real time.

### **3. System description**

The team used *Arduino UNO* [6] who receives data obtained from the sensors to be transferred, via Bluetooth, thanks to the *HC-05* [7] model.

The sensors used are: a *Hall sensor* [8] and an *anemometer* [9] that are used to measure the rotation speed of the turbine and the wind, respectively. It is used a magnet as well so that the Hall sensor can measure the time that the magnet takes to make a whole lap.

This data is received by the Arduino that queues them to be sent by the Bluetooth module.

A computer executes a program designed by the students, in *Matlab* [10] to establish the connection with HC-05 module and, then, begin receiving the data from the sensors. In this project, we set up the HC-05 device as “slave”, meaning that the device connected

to the Bluetooth module is the one which has to request when and how much information has to be sent.

The developed code allows that at the same time that data is being received, the calculations needed are able to be displayed, in graphics, the desired variables.

After many mistakes, already solved, on the final code we receive two data: the timing from the anemometer and the timing from the turbine. The data from the turbine is classified depending on the blade where they come from. This was done to study the behavior of the turbine, five different data from five magnets were received, located on each of the blades (evenly allocated) in a lap, against the behavior of the turbine when it receives one data from a magnet (located in a blade) in a lap.

Following this, the graphics and data applicable to them were kept for their later analysis. This part of the research allowed the team to amend the mistakes that appeared during the tests.

#### **4. Results**

After developing the codes from Arduino and Matlab, numerous tests were performed to have information about the behavior of the wind turbine.

The team could solve some issues that came up, although there are still some that need further analysis. On this last part of the project, the team considers the targets reached, even though it hasn't been on the scheduled time. This extra time, that the team didn't have in consideration at the beginning, has gone against the time that the team could have dedicated to the data transmission and the display of these, or what we could also name as: optimization.

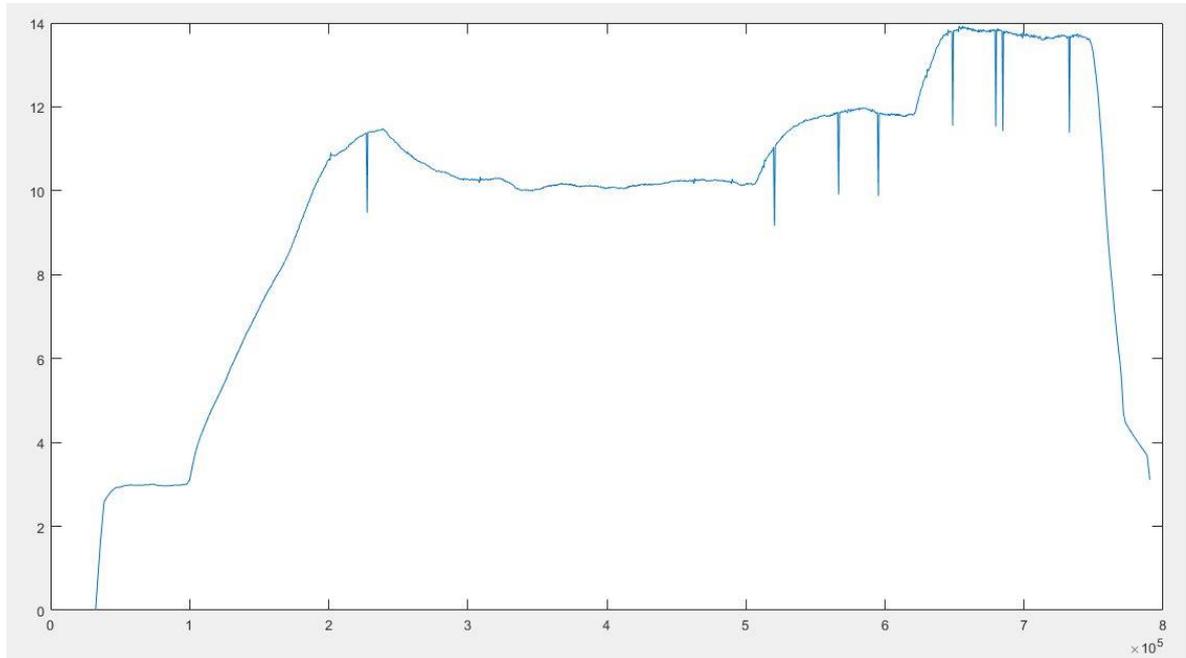
Test were run with a fan, at a remote distance on low power and also, at a closer distance on low, medium and high power. The results are the ones that are mention hereunder.

On Graphic 1 it is shown the test of the behavior of the wind turbine when it's launched with a remote fan on low power. It is needed to highlight that great changes could be monitored on the turbine's speed. This occurred because the outer blades were modified during the test to check if the attack angle of the blades would affect. Thanks to this test, it was understood the importance of why the outer blades were designed and, also that the wind turbine could operate with small air flows.

Also, the braking was done manually because some braking curves on the turbine were already obtained. Also, it is important to take a look on the momentary lowering of speed. This phenomenon takes place when surpassing certain speed, causing that the wind turbine starts to swing and making the Hall sensor skip the step on one of the blades, generating a steep drop in speed. What happens precisely is that the swings prevent that the magnets adhere to the blade pass by so close that the Hall sensor counts that one blade has passed by.

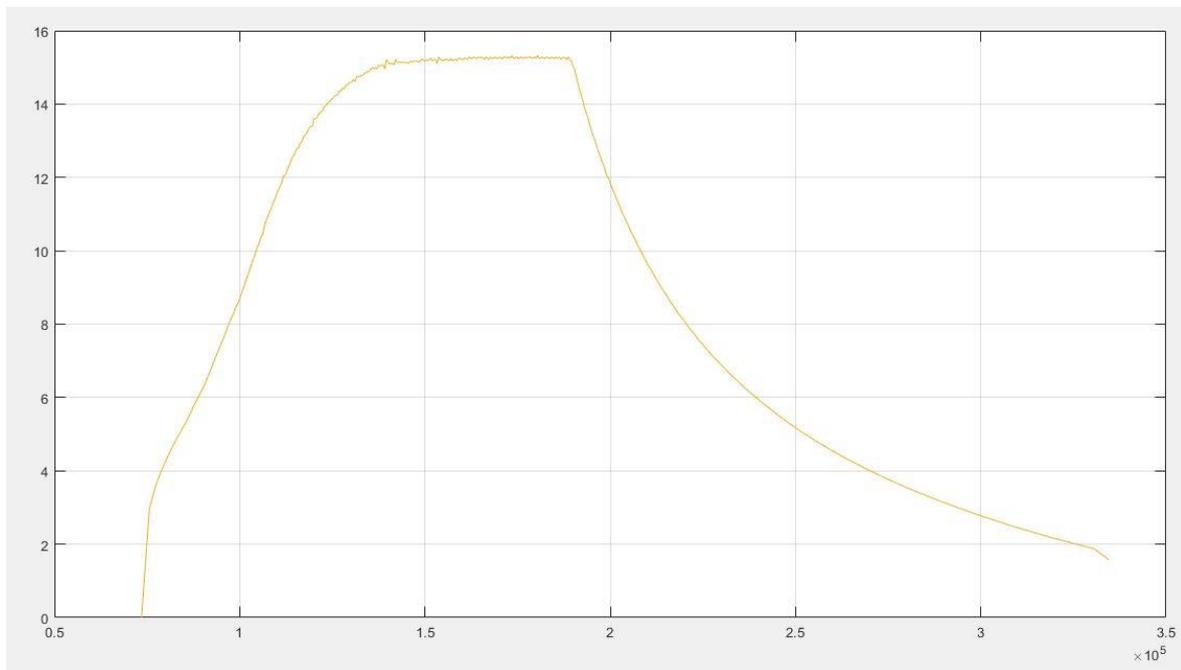
The team managed to understand this problem, leaving only one magnet to count when the turbine had made a lap. As we only register the data from one blade only, the speed

is reduced to half because, when skipping this data, it takes two laps to obtain the new data. The problem described can be observed on Graphic 3.



*Graphic 1:Speed of the turbine (rad/s) against the run time (ms).*

Afterwards, Graphic 2 matches the test with the wind turbine when a fan is located closer to it and on low power. This graphic shows how all of them should be if there wasn't an issue with the lowering of speed.

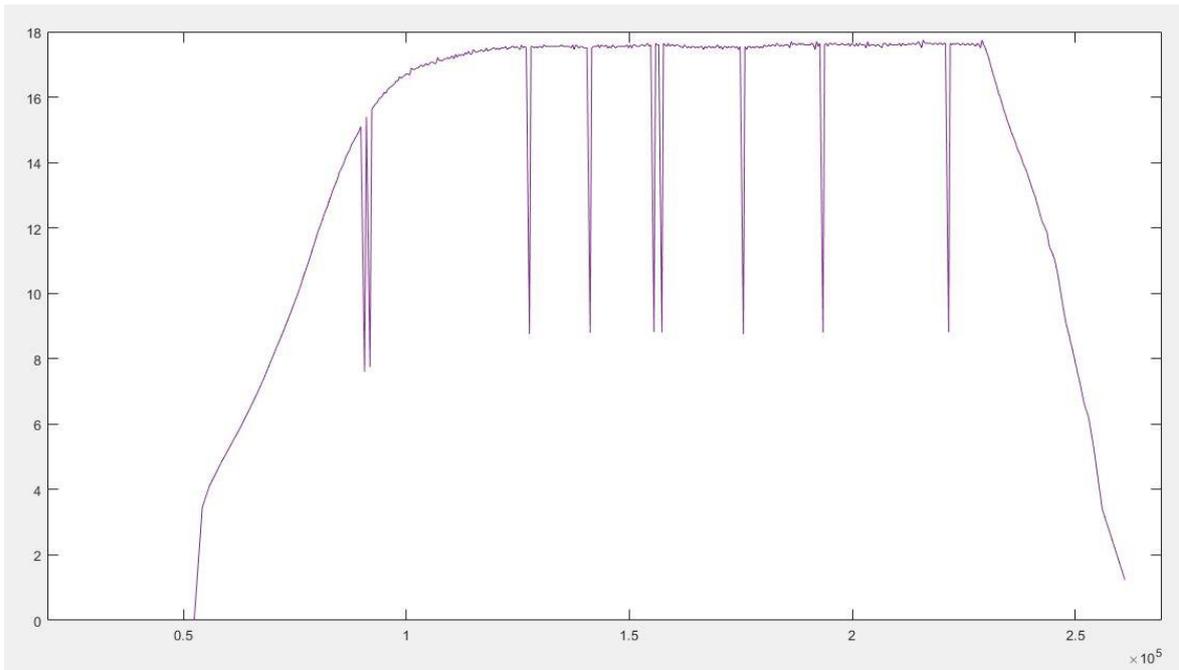


*Graphic 2:Speed of the turbine (rad/s) against the run time (ms).*

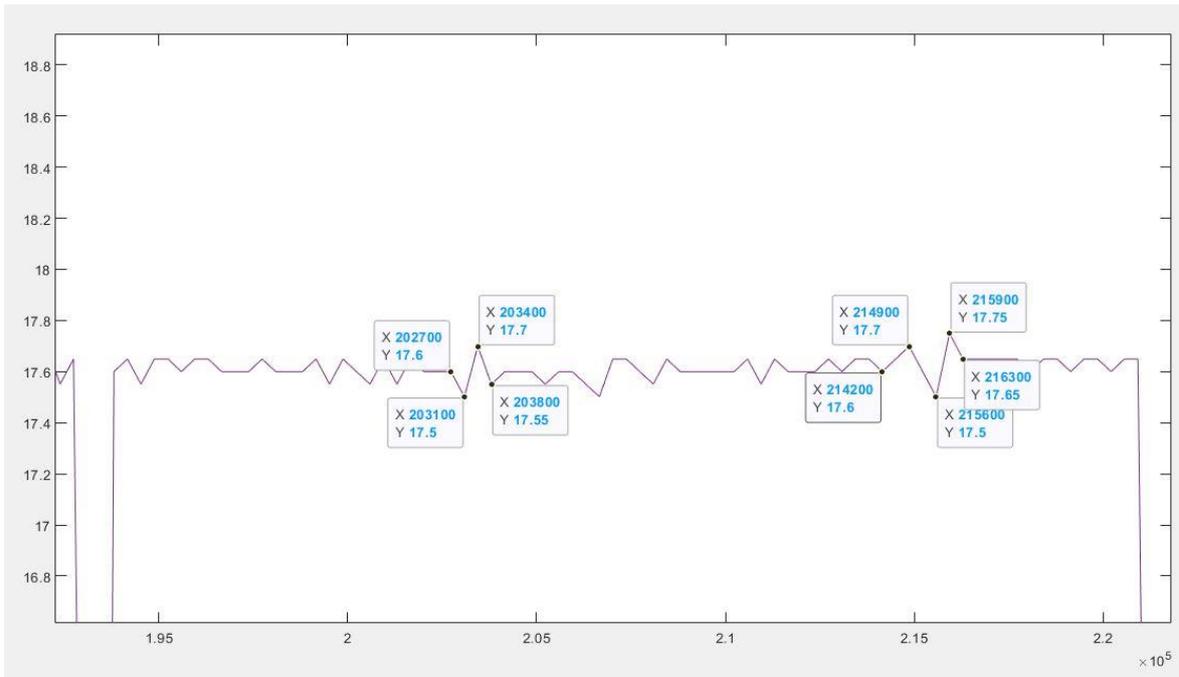
Next, on Graphic 3 we can observe an increase on the rotation speed compared to the previous graphic. This is due to that, in this test, the fan is again located closer but on

medium power. The turbine is braked, also, manually and, due to that, the lowering of speed is not exponential (like on the previous graphic) but has a steeper slope.

On this test, we have one of the biggest mistakes that we have not been able to read its origin. This graphic has been extended to be able to observe this phenomenon with more clarity (Graphic 4).



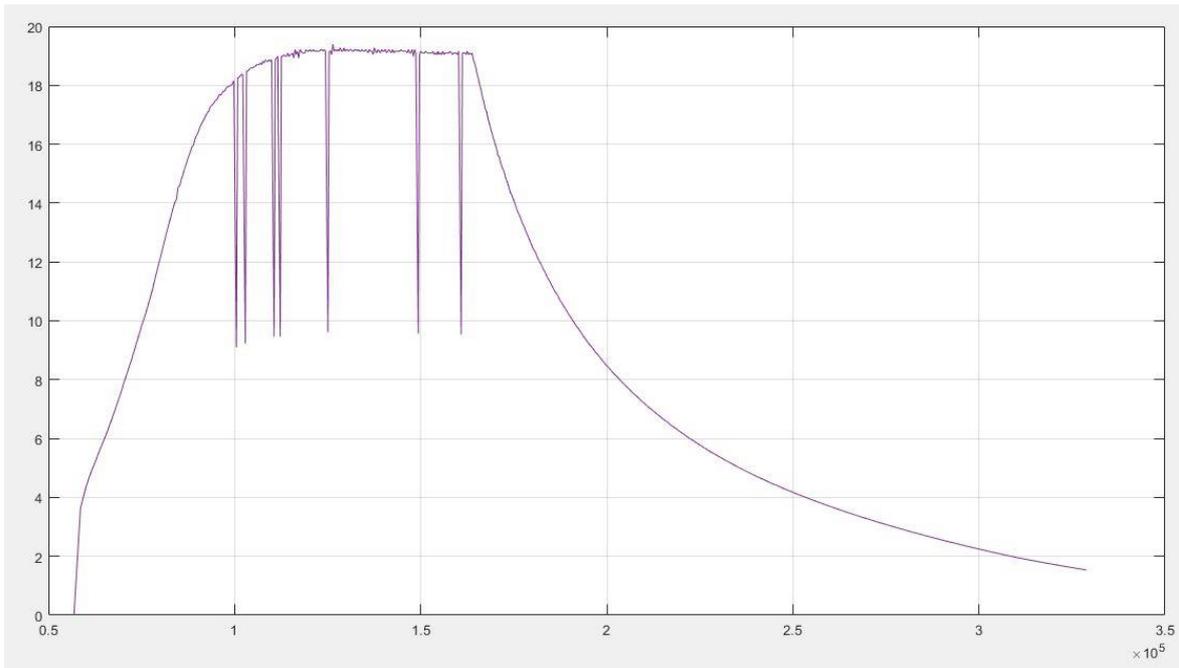
*Graphic 3: Speed of the turbine (rad/s) against the run time (ms).*



*Graphic 4: Speed of the turbine (rad/s) against the run time (ms) extended view.*

After numerous tests, it has been observed that, from time to time, a lowering on speed happens and, after it, an increase on it. This would be the usual since in front of an air flow, continuous and constant, it should be a continuous line; but when turning the turbine, the air flow is not always pushing the blades but, sometimes the air induces the turbine to brake. This event does not make the turbine stop, because the strength that pushes the turbine is bigger than the one breaking it, thanks to its design.

Lastly, on Graphic 5 it is shown the behavior of the wind turbine when a fan is located close on maximum power. Just as the previous test, it is seen an increase on the rotation speed of the turbine produced by the increase on the speed. With the making of this test it was registered the highest speed of the turbine of 181rpm approximately.



Graphic 5: Speed of the turbine (rad/s) against the run time (ms).

To summarize, the established targets were reached, and because of that, the results were satisfactory, despite the adversities that were found during the develop of this project. However, it is to be mentioned that the team would have liked to develop the last target even more: optimizing the design of the wind turbine to be able to explore other possible aims to be developed.

## 5. Conclusions

With the finalization of this project, a stage has been completed but some options are still left open. Those will allow the research and improvement of the vertical axis wind turbines for domestic use. In addition to the project in general, and of the final result in particular, the work team has evolved positively throughout all this time and, despite all the unexpected difficulties that have been associated with the global pandemic. On an individual level, the growth has been significant.

From the start, the targets set have been widely met, meaning that:

- Regarding the target “*to establish sensors on the wind turbine to obtain the physical variables of the wind turbine and its surroundings*”, developed by Mr Antonio Serda, it can be determined that, at the beginning, the team focused on obtaining two variables (the rotation speed of the wind turbine and the rotation speed of the anemometer). But, once the rest of the targets started to be developed, these two variables go into the background, at the same time that the time variable gains relevance (only with the speed as data, the power cannot be calculated with accuracy). The timings measured are sent to Matlab to calculate with more accuracy the speeds, accelerations and power of the wind turbine and the speeds and accelerations of the anemometer.
- Regarding other of the targets, “*to send the data received by the sensors through Bluetooth*”, that Mr Javier Colinas was in charge of, its success made that the aims

of the project expanded, inserting new targets such as the team focused their efforts on getting the display of the received data and calculate other data of interest such as the wind turbine's inertia and the speeds and accelerations previously mentioned.

- The third target: “*to optimize the wind turbine design*”, developed by all members of the team, could not be completed, unfortunately. However, major progress was done during the display of the received data, for example:
  - o The variation of the attack angle of the outer blades, due to it being a variable very correlated with the rotation speed of the turbine.
  - o The proper functioning of the wind turbine, with strong or soft winds.
  - o The swings that the wind turbine suffered that provoked poor data collection to analyze its behavior, but as it is shown on the graphics, the wind turbine is not affected in its speed by these swings.
- The main target, “*to obtain the proper functioning of the wind turbine designed*”, could not be fully completed. At this time, there are still a series of mistakes from an unknown source, meaning that we don't have certainty of their origin, nor if they are human, structural, from logic or if they are due to the loss of information. Despite this, it can be established that the team has succeeded on making the designed wind turbine functional.

This project can keep moving forward on the resolution of the generated issues and with tasks than can be completed, such as, for example:

- ***The development of a mechanical braking system***, similar to the one used on lifts. The team tried to develop a system that was connected to Arduino and braked the turbine when reaching certain limit. But the servomotor that was used to break the turbine, was not working as wanted and this system had to be dismissed. The research on this theme was suggested but, by developing the transmission and display, the team centered their efforts on the reading of the obtained data.
- ***From Bluetooth to Wi-Fi***. This was one of the tasks analyzed throughout the project. It is considered that this change is a need due to the distance limit that the HC-05 has. But the team did not have the knowledge necessary to develop a Wi-Fi network that could solve the issues that it had. The idea of using the data transmission by radiofrequency was not dismissed.
- ***Design and development of a system that allows the change of the outer blades angle***. This task is of great importance because it influences directly on the power that is extracted from the turbine. This system is required for two reasons: first, because if we didn't want the wind turbine to work, the outer blades would close preventing the entry of wind; and second because usually, when there are higher than usual wind flows that could cause damage to the wind turbine, the angle of the blades would be regulated to obtain the wind's energy avoiding the damage and, also, not wasting all that energy, making the air flow similar to when we are working under usual circumstances.
- ***Creation of an application or system that allows the connection between Bluetooth and the display of the received data at the same time***. Nowadays, Matlab is used but

its licenses are not cheap, and to be able to achieve that the latter product has a cheap cost we should reduce all costs when possible. Matlab was used because of the team's experience with it on their work environment and it gave great results allowing the team to reach the established targets.

- **Developing of a converter.** With the help of power electronics, we could design a convertor that transformed kinetic energy from the turbine in electric energy, and also, was connected to the Grid. Also, we could develop a system that allows connection to the home at the same time as to the Grid, making it that if there were any device on the house that needed energy, the wind turbine would give it to it and the excess of it, would be sent to the Grid. If there was nothing connected on the house, it would supply the Grid.

## 6. References

- [1] Rinconeducativo. "FUENTES DE ENERGÍA NO RENOVABLES". 6 de junio de 2020. <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/fuentes-de-energia-no-renovables#:~:text=Energ%C3%ADa%20no%20renovable%20se%20refiere,de%20produc%20ci%C3%B3n%20o%20extracci%C3%B3n%20viable> .
- [2] Remica. "TIPOS DE ENERGÍA: DIFERENCIAS ENTRE RENOVABLES Y NO RENOVABLES". 6 de junio de 2020. <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/> .
- [3] David Martínez Quitana. "DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL". Antecedentes página 27. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [4] David Martínez Quitana. "DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL". Capítulo 3. Antecedentes. Página 28. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [5] Carlos Diago Vidal. "DISEÑO DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA USO DOMÉSTICO". Capítulo 1.2. Tipos de aerogeneradores y principios de funcionamiento. Página 14. 29 de junio de 2020. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf?sequence=1> .
- [6] Arduino. "ARDUINO UNO REV3". 9 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> .
- [7] Prometec. "EL MÓDULO BLUETOOTH HC-05". 14 de julio de 2020. <https://www.prometec.net/bt-hc05/> .
- [8] Arduino. "GROVE - HALL SENSOR". 14 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/grove-hall-sensor> .

[9] Amazon. “ANEMÓMETRO SENSOR DE VELOCIDAD VIENTO CON RJ11 PARA ESTACIÓN METEOROLÓGICA N25FR WH1080 VÁLIDO UNO MEGA”. 14 de julio de 2020. <https://www.amazon.es/Anem%C3%B3metro-Velocidad-Estaci%C3%B3n-Meteorol%C3%B3gica-Arduino/dp/B07BMVYBW9> .

[10] Mathworks. “MATLAB”. 14 de julio de 2020. <https://es.mathworks.com/products/matlab.html> .

## *Índice de la memoria*

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>                    | <b>7</b>  |
| <b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1 Aerogeneradores Verticales .....                     | 18        |
| 2.2 Arduino Uno .....                                    | 22        |
| 2.3 HC-05 .....  | 23        |
| 2.4 anemómetro.....                                      | 25        |
| 2.5 Sensor de efecto Hall.....                           | 26        |
| 2.6 Smart Aerogenerador.....                             | 27        |
| <b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>           | <b>32</b> |
| <b>Capítulo 4. Definición del Trabajo.....</b>           | <b>34</b> |
| 4.1 Justificación .....                                  | 34        |
| 4.2 Objetivos.....                                       | 35        |
| 4.3 Metodología .....                                    | 36        |
| 4.3.1 Desarrollo temporal del proyecto.....              | 36        |
| 4.3.2 Descripción de los materiales utilizados.....      | 39        |
| 4.4 Objetivos para el desarrollo sostenible .....        | 40        |
| <b>Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....</b>      | <b>42</b> |
| 5.1 FASE 1.....  | 43        |
| 5.2 FASE 2.....  | 47        |
| 5.3 FASE 3.....  | 49        |
| <b>Capítulo 6. Desarrollo del sistema.....</b>           | <b>54</b> |
| 6.1 Código de arduino .....                              | 54        |
| 6.2 Código de Matlab .....                               | 56        |
| <b>Capítulo 7. Análisis de Resultados .....</b>          | <b>58</b> |
| <b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b> | <b>63</b> |
| <b>Capítulo 9. Bibliografía.....</b>                     | <b>66</b> |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <i>Capítulo 10. ANEXO I</i> ..... | <b>71</b> |
| 10.1 Código de Arduino .....      | 71        |
| 10.2 Código de matlab.....        | 75        |

## *Índice de ilustraciones*

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1:Aerogenerador vertical diseñado por D. Juan Romeo.....                                 | 11 |
| Ilustración 2:D. Antonio Serda y D. Javier Colinas trabajando en el aerogenerador vertical.<br>..... | 12 |
| Ilustración 5:Central nuclear de Cofrentes [7]. ....   | 9  |
| Ilustración 6:Mina de carbón a cielo abierto en Córdoba [8]. ....                                    | 9  |
| Ilustración 7:Plataforma petrolera Casablanca (Tarragona) [9]. ....                                  | 10 |
| Ilustración 8:Central solar fotovoltaica en España [11]. ....  | 10 |
| Ilustración 9:Central solar térmica de Sanlúcar la mayor [12]. ....                                  | 11 |
| Ilustración 10:Central hidroeléctrica de Aldeadávila (Salamanca) [13]. ....                          | 11 |
| Ilustración 11: Planta de biomasa en Curtis (Galicia) [15]. ....                                     | 12 |
| Ilustración 12:Energía mareomotriz [16]. ....  | 12 |
| Ilustración 13:Planta geotérmica [17]. ....  | 13 |
| Ilustración 14:Parque eólico en Huelva [18]. ....  | 13 |
| Ilustración 15:Evolución de la generación renovable y no renovable en España [19]. ....              | 14 |
| Ilustración 16:Turbina eólica Darrieus [23]. ....  | 18 |
| Ilustración 17:Funcionamiento de las turbinas Darrieus [24]. ....                                    | 19 |
| Ilustración 18: Rotor Savonius [26]. ....  | 20 |
| Ilustración 19: Diseño y funcionamiento de una turbina Savonius [27]. ....                           | 20 |
| Ilustración 20:Turbina Darrieus-Savonius, Taiwán [29]. ....  | 21 |
| Ilustración 21:Arduino UNO [31]. ....  | 22 |
| Ilustración 22:Placa protoboard [32]. ....   | 23 |
| Ilustración 23:Módulo bluetooth HC-05. ....  | 24 |
| Ilustración 24:Anemómetro. ....  | 25 |
| Ilustración 25:Sensor de efecto Hall. ....   | 26 |
| Ilustración 26:Smart aerogenerador.....  | 27 |
| Ilustración 27:Vista exterior de la pala. ....   | 28 |
| Ilustración 28:Vista interior de la pala. ....   | 29 |
| Ilustración 29:Vista lateral de la pala.....   | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 30:Conexiones entre los dispositivos, la protoboard y el Arduino [37]. ..... | 31 |
| Ilustración 31:Diseño final del aerogenerador.....                                       | 42 |
| Ilustración 32:Entorno de trabajo del RealTerm. ....                                     | 44 |

---

## *Índice de tablas*

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1:Ventajas e inconvenientes de los aerogeneradores de eje horizontal [20]. ..... | 15 |
| Tabla 2:Ventajas e inconvenientes de los aerogeneradores de eje vertical [21]. .....   | 16 |
| Tabla 3:Ventajas de los rotores Darrieus y Savonius [28]. .....                        | 21 |
| Tabla 4:Seguimiento del progreso del proyecto .....                                    | 39 |
| Tabla 5:Objetivos para el desarrollo sostenible en este proyecto.....                  | 41 |

## *Índice de gráficas*

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 1:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                    | 14 |
| Gráfica 2:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                    | 14 |
| Gráfica 3:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                    | 15 |
| Gráfica 4:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms) ampliada. ....            | 16 |
| Gráfica 5:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                    | 17 |
| Gráfica 6:Velocidad de la turbina (rpm) frente al tiempo transcurrido (s). .....                       | 48 |
| Gráfica 7:Velocidad de la turbina (rpm) frente al tiempo transcurrido (s) ampliado. ....               | 49 |
| Gráfica 8:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                    | 50 |
| Gráfica 9:Velocidad de la turbina (abajo) y del anemómetro (arriba) frente al tiempo transcurrido..... | 52 |
| Gráfica 10:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                   | 53 |
| Gráfica 11:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                   | 59 |
| Gráfica 12:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                   | 60 |
| Gráfica 13:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                   | 61 |
| Gráfica 14:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms) ampliado....             | 61 |
| Gráfica 15:Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms). .....                   | 62 |

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano tiene el uso de la razón es consciente que no puede estar trabajando 24 horas al día, todos los días de la semana. Necesita descansar. El cuerpo tiene limitaciones.

A lo largo de su existencia la humanidad ha ido incrementando la cantidad de inventos creados para poder cubrir estas limitaciones del cuerpo. Se puede bucear aun sin tener branquias, se puede volar aun sin poseer alas y se puede viajar más rápido que el ser vivo con mayor velocidad. Estos inventos han sido creados con la idea de mejorar la sociedad actual y que las futuras generaciones vivan mejor.

Estos descubrimientos no sólo han facilitado la vida, sino que, además, han servido de gran ayuda para poder crear nuevos inventos o entender cosas que no tenían una clara explicación. Han permitido conocer, por ejemplo, cómo era la vida en la antigüedad y saber que, mientras que en la civilización mesopotámica se descubrió la rueda hacia el 3000 a.C., en las civilizaciones mayas, aztecas ya se conocía, aunque no la usaban para el transporte [1].

Otro de los grandes descubrimientos para el ser humano ha sido la electricidad; se conoce desde la antigüedad. Existen unos textos egipcios que datan del 2750 a.C. que hablan sobre unos peces eléctricos conocidos como “atronadores del Nilo”.

Más tarde, en el 600 a.C., Tales de Mileto experimentó el fenómeno de la electricidad estática con el roce entre la lana y la piel, aunque él no sabía que era electricidad.

Después, en el 1600 William Gilbert usa la palabra latina “electricus” para definir el fenómeno que comprobó Tales de Mileto.

En 1752, Benjamin Franklin realizó su famoso experimento con una cometa, una llave y una tormenta. El pararrayos será el siguiente paso de este experimento.

A continuación, en el 1800 Alessandro Volta construyó la primera pila. Luego Michael Faraday creó la primera dinamo eléctrica que generaba corriente eléctrica de forma continua. Este invento ayudó a Thomas Edison, que creó la bombilla incandescente la cual podía lucir durante horas. Por último, Nikola Tesla fue muy reconocido por trabajos relacionados con la corriente alterna [2].

Todos estos grandes avances ayudaron a poder entender cómo funciona la electricidad, para que en la actualidad sea común hablar de ello. Además, aun no siendo conscientes, las personas utilizan la electricidad a diario: para viajar en metro, para cargar el móvil, para los electrodomésticos, etc. Pero... ¿de dónde sale esta electricidad que se consume? ¿es nuestra única fuente de energía?

Para responder a estas cuestiones se debe comenzar por comprender a qué llamamos energía y qué tipos hay. Según la fundación Endesa la energía es *“la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos. Es decir, el concepto de energía se define como la capacidad de hacer funcionar las cosas”* [3]. Hoy en día, se utilizan diferentes métodos para generar electricidad. Se pueden diferenciar dos grandes grupos: energías no renovables y energías renovables.

La palabra renovable, según la R.A.E. *“proviene del verbo renovar que se define como hacer algo de nuevo o volver a su primer estado”* [4], es decir, que se puede volver a usar o es reutilizable. La energía renovable hace alusión a aquella que se puede obtener de fuentes naturales, aparentemente inagotables debido a que se recuperan naturalmente o por la gran cantidad de energía que poseen [5]. Por su parte, las energías no renovables son finitas y no se recuperan naturalmente o no se llega a regenerar la cantidad de ese recurso natural que se llega a consumir.

Dentro de las energías no renovables existen 2 tipos de fuentes de energía [6]:

- La **energía nuclear** que proviene de las reacciones nucleares o de la desintegración de los núcleos de átomos.



*Ilustración 3: Central nuclear de Cofrentes [7].*

- Los *combustibles fósiles* que son el carbón, el petróleo y el gas natural.



*Ilustración 4: Mina de carbón a cielo abierto en Córdoba [8].*



*Ilustración 5:Plataforma petrolera Casablanca (Tarragona) [9].*

Y, dentro de las **energías renovables** se distinguen 6 tipos de fuentes [10]:

- **Solar.** Se aprovecha la radiación que transmite el Sol para producir electricidad o calor. Para generar electricidad se utilizan placas fotovoltaicas, mientras que para generar calor se concentra la radiación solar para calentar un fluido.



*Ilustración 6:Central solar fotovoltaica en España [11].*



*Ilustración 7: Central solar térmica de Sanlúcar la mayor [12].*

- **Hidráulica.** Se utiliza la energía cinética generada por la caída de agua a gran altura para generar electricidad.



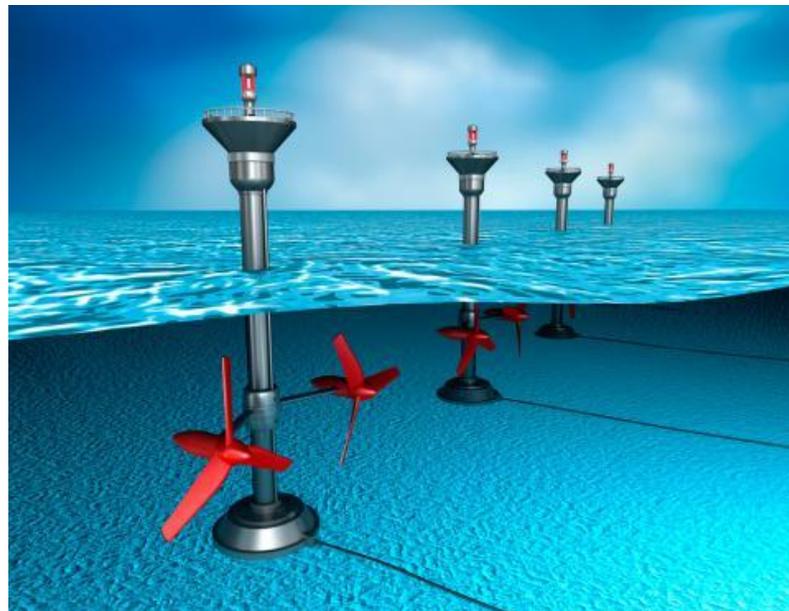
*Ilustración 8: Central hidroeléctrica de Aldeadávila (Salamanca) [13].*

- **Biomasa.** Se usa la materia orgánica como fuente de energía. Se puede usar para producir energía térmica, biogás o biocombustibles como el bioetanol o el biodiesel [14].



*Ilustración 9: Planta de biomasa en Curtis (Galicia) [15].*

- **Mareomotriz.** Se aprovechan las mareas para generar electricidad. También se aprovecha el movimiento de las olas y las corrientes marinas.



*Ilustración 10: Energía mareomotriz [16].*

- **Geotérmica.** Se utiliza la gran cantidad de energía en forma de calor bajo la superficie de la Tierra para producir energía eléctrica y térmica.



*Ilustración 11: Planta geotérmica [17].*

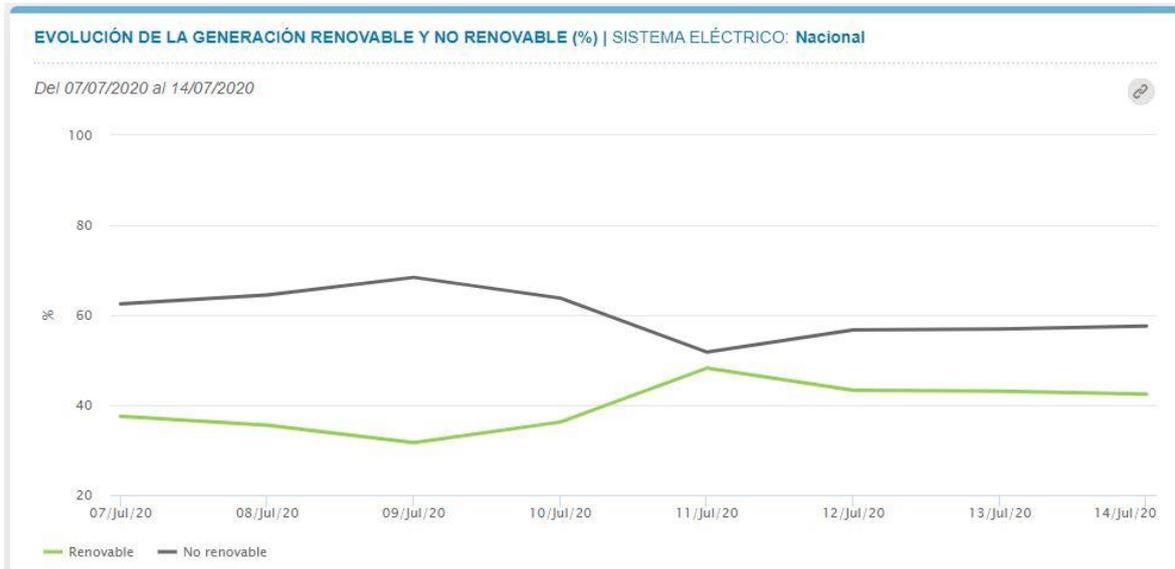
- **Eólica.** Se usa la energía cinética de las corrientes de aire para producir electricidad.



*Ilustración 12: Parque eólico en Huelva [18].*

España posee centrales de diversos tipos de las energías renovables que se acaban de mencionar, aunque las que tiene no son suficientes para poder abastecer a toda la población.

A continuación, se muestran datos recientes sobre la generación de energía eléctrica mediante el uso de energías renovables y no renovables, en España.



*Ilustración 13: Evolución de la generación renovable y no renovable en España [19].*

Por ello, hay que seguir potenciando la investigación y la construcción de centrales de energías renovables. Desde este proyecto, centrado en la energía eólica, se pretende rebajar los niveles de contaminación para producir la electricidad, mediante una infraestructura accesible para los ciudadanos y que, además, sea reciclable: son los llamados **aerogeneradores verticales** o **VAWT** (vertical axis wind turbine).

Estos aerogeneradores verticales ya se utilizan en las autopistas para aprovechar las estelas de aire generadas por los automóviles, generando electricidad. Los aerogeneradores verticales no son tan conocidos debido a que son menos eficientes que los **aerogeneradores horizontales** o **HAWT** (horizontal axis wind turbine) y porque al estar más cerca del suelo la velocidad del viento no suele ser alta. Pero, por otro lado, no necesitan que los vientos sean unidireccionales, como en los horizontales; se aprovecha el viento de cualquier dirección e intensidad.

A continuación, se muestra un par de tablas comparativas entre los HAWT y los VAWT con sus ventajas e inconvenientes.

| <b>Aerogenerador de Eje horizontal (HAWT)</b> |   |
|---|---|
| <i>Ventajas</i>                               | <i>Inconvenientes</i>   |
| Alta eficiencia.                              | Requiere palas de geometría compleja.   |
| Sencilla regulación de las palas.             | Requiere un sistema de orientación.   |
| Fácil implementación de freno aerodinámico.   | Baja estabilidad debido a su alto centro de masas, lo que provoca que la infraestructura sea mas robusta. |
| Tecnología desarrollada y de menor precio.    | El área proyectada por el rotor solo puede ser circular.  |
|   | El generador y la transmisión se sitúan en la parte de alta del aerogenerador.                            |
|   | Gran impacto visual.  |

*Tabla 1: Ventajas e inconvenientes de los aerogeneradores de eje horizontal [20].*

| <b>Aerogenerador de eje vertical (VAWT)</b>  |   |
|--|---|
| <i>Ventajas</i>  | <i>Inconvenientes</i>                                   |
| El área proyectada sobre el rotor puede ser cualquier figura plana simétrica.  | Baja eficiencia.  |
| No requiere sistema de orientación.  | Difícil regulación del generador.                       |
| La transmisión y el generador pueden situarse en la parte inferior.  | Difícil implantación de freno aerodinámico.             |
| Alta estabilidad debido a que su centro de masa se encuentra mas bajo, y, por tanto, no necesita de infraestructuras robustas. | El desarrollo en este tipo de tecnología es mucho menor |
| Transmisión mas simple y directa.  |   |
| No requiere altos mástiles, por lo que la altura del rotor puede ser mayor.  |   |
| Al funcionar cerca del suelo, no son más grandes que los HAWT, y por ello, tener un menor impacto visual.                      |   |

*Tabla 2:Ventajas e inconvenientes de los aerogeneradores de eje vertical [21].*

Si a priori todo son ventajas, ¿se podría generalizar para uso doméstico, a un precio asequible? Se tratará de dar respuesta a esta cuestión.

Este proyecto resulta altamente motivador. Su relación con la investigación e implementación de la energía eólica para su uso en las ciudades es ya un aliciente

suficientemente atractivo. El Ayuntamiento de Madrid es el primer interesado en llevarlo a cabo, proporciona, además, un espacio donde investigar y avanzar con este proyecto, así como una serie de domicilios, donde probar el producto final.

Desde este proyecto se busca contribuir al desarrollo de la ciudad del futuro, donde todo estará conectado, no habrá contaminación y todos los dispositivos electrónicos consumirán energía limpia y renovable. La finalización del proyecto, además, puede suponer que España se convierta en país pionero en el sector de la energía eólica para uso doméstico.

## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este apartado se van a recoger diferentes tecnologías, herramientas, etc. que se han utilizado en este proyecto. En algunas de ellas no se profundizará demasiado pues no constituyen el centro del mismo, aunque conviene que se tenga una idea generalizada sobre todo lo que se ha utilizado.

### *2.1 AEROGENERADORES VERTICALES*

Los aerogeneradores verticales o VAWT se pueden agrupar en dos grandes grupos:

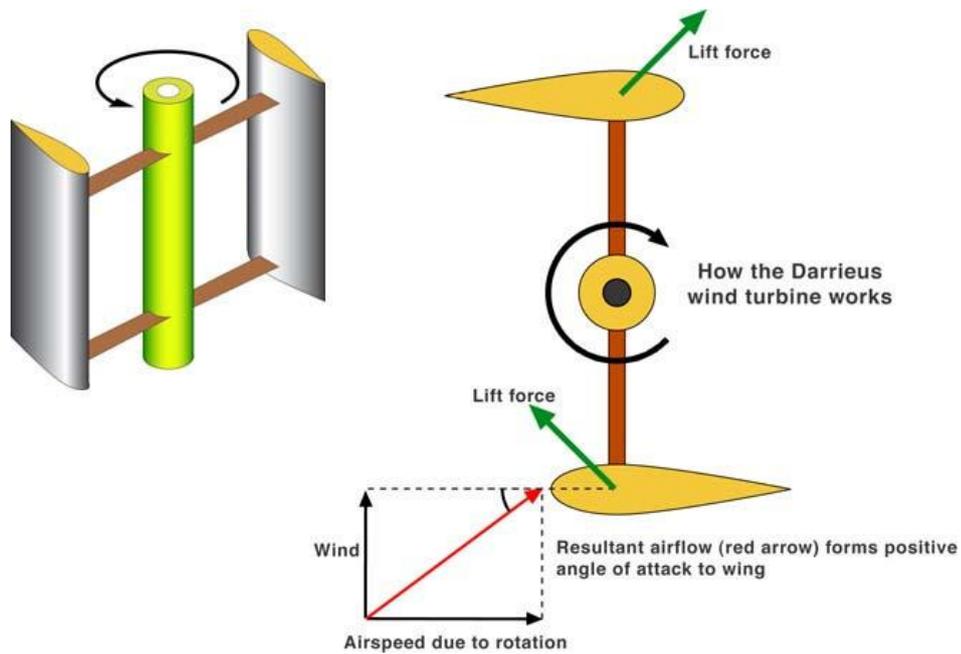
- Tipo *Darrieus* [22]. Este tipo de turbina fue creada por el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus en el año 1926.



*Ilustración 14: Turbina eólica Darrieus [23].*

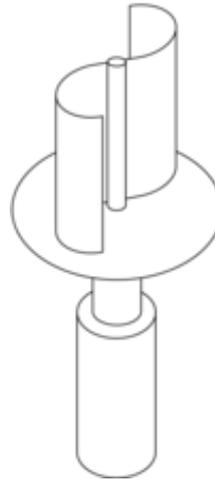
La turbina Darrieus aprovecha el flujo del aire y su propio giro, generando un par de fuerzas que provocan, a su vez, la aceleración de rotación de la turbina. Como se muestra en la Ilustración 15, la resultante del flujo del aire se compone del flujo del

aire y la velocidad que tendría el viento, debida al giro de la turbina (si ésta estuviese parada). Cada componente del viento genera una fuerza de sustentación o *lift* que es perpendicular a la componente del viento. Y, al sumar las fuerzas, da lugar a un par que es el que hace que gire la turbina.



*Ilustración 15: Funcionamiento de las turbinas Darrieus [24].*

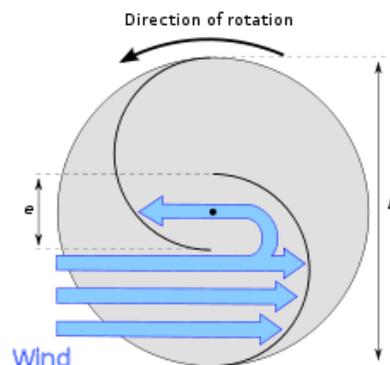
- Tipo *Savonius* [25]. Este otro tipo de turbina fue inventada por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1922.



*Ilustración 16: Rotor Savonius [26].*

Como se muestra en Ilustración 17, las turbinas de tipo Savonius transforman la energía del viento en un par torsor sobre su eje de rotación a través de la fuerza de arrastre (también denominada *drag*). Esto se debe a que las fuerzas de arrastre, en contra del sentido de la dirección de rotación, son menores que a favor de él y, por ello, esta turbina gira. Normalmente suelen tener dos o tres palas.

Las proporciones del espaciado  $e$  son, actualmente,  $1/6$  del diámetro  $D$ . No obstante, hay una gran discusión sobre si debe ser menor.



*Ilustración 17: Diseño y funcionamiento de una turbina Savonius [27].*

Las ventajas de estos dos grandes grupos son:

| <i>Darrieus</i>  | <i>Savonius</i>   |
|------------------|---|
| Mayor eficiencia | Gran par de arranque  |
| Mayor potencia   | No es necesario un dispositivo para ayudarlo a arrancar       |
|                  | Menos emisiones de ruido                                      |
|                  | Mayor estabilidad mecánica y resistencia ante vientos fuertes |

*Tabla 3:Ventajas de los rotores Darrieus y Savonius [28].*

En la actualidad, se han aprovechado las ventajas de estos dos grupos, para crear mejores aerogeneradores. Se han ido desarrollando nuevos diseños que han tenido como origen ambos aerogeneradores, hasta tal punto que se han unificado ambos diseños para obtener ambos beneficios.



*Ilustración 18:Turbina Darrieus-Savonius, Taiwán [29].*

## **2.2 ARDUINO UNO**

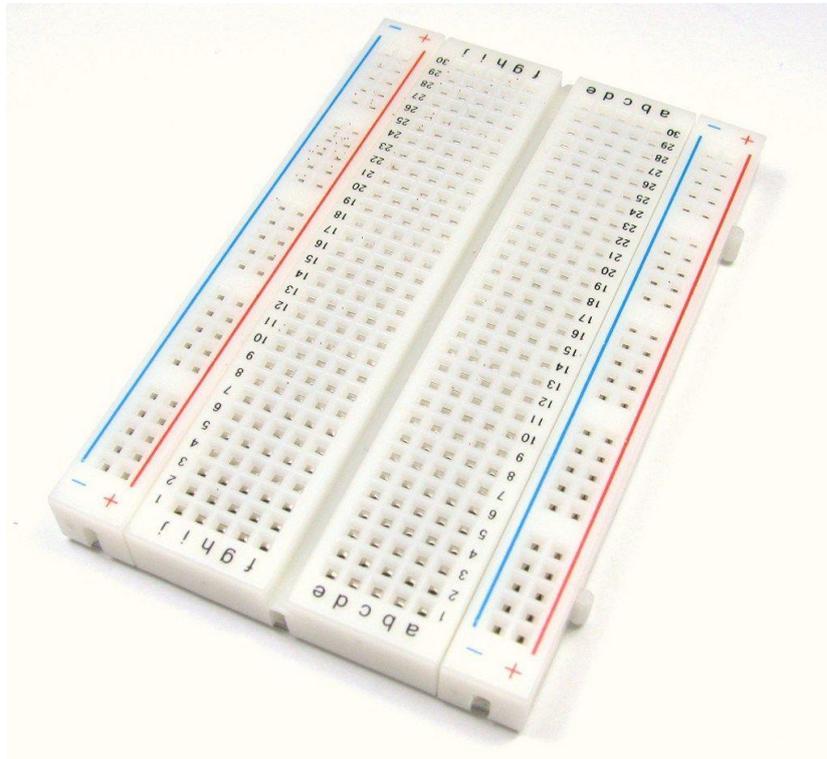
La página web de Arduino describe al Arduino UNO como una placa con microcontroladores basados en el ATmega328P. Posee 14 pines de entradas/salidas digitales, de las cuales 6 pueden usarse como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz (CSTCE16MOV53-R0), una conexión USB, un jack de alimentación, una entrada ICSP y un botón de reinicio.

La placa contiene todo lo necesario para ayudar al microcontrolador; simplemente se conecta a un ordenador con el cable USB o se alimenta con un adaptador AC-DC o una batería, para empezar... Se puede trabajar con UNO sin preocuparse demasiado por hacer algo mal; en el peor de los casos, se puede reemplazar el chip, por poco dinero y volver a comenzar [30].



*Ilustración 19: Arduino UNO [31].*

Se utilizó el Arduino UNO por su bajo coste, por su fácil manejo y por su sencilla programación. Además, posee varios dispositivos compatibles con los que también se trabajó y que serán explicados a continuación. Asimismo, se usó una placa protoboard que facilitaba las alimentaciones al resto de dispositivos que se conectaban al Arduino.



*Ilustración 20:Placa protoboard [32].*

### **2.3HC-05**

Este dispositivo permite la conexión por bluetooth entre el Arduino y otro dispositivo [33]. Es necesario configurarlo. Dependiendo de su funcionamiento, se debe configurar de una manera concreta. En el modo AT, que es el modo de *configuración* del HC-05, se puede cambiar o pedirle los datos predeterminados respecto a:

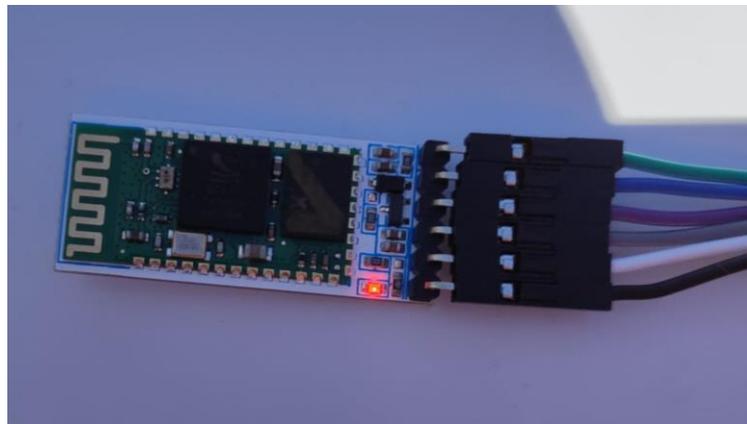
- El nombre del módulo. No se modificó y se mantuvo el que venía predeterminado, es decir, **HC-05**.

- Los baudios, que constituyen la unidad de medida de la velocidad de transmisión de los datos. Para entrar en el modo AT de configuración había que modificar los baudios a 38400 en el código del Arduino. Pero para su uso se utilizó la *configuración 4*, que es la que viene por defecto, a **9600 baudios**.

- El **PIN**, que tampoco se cambió (que es **1234**).

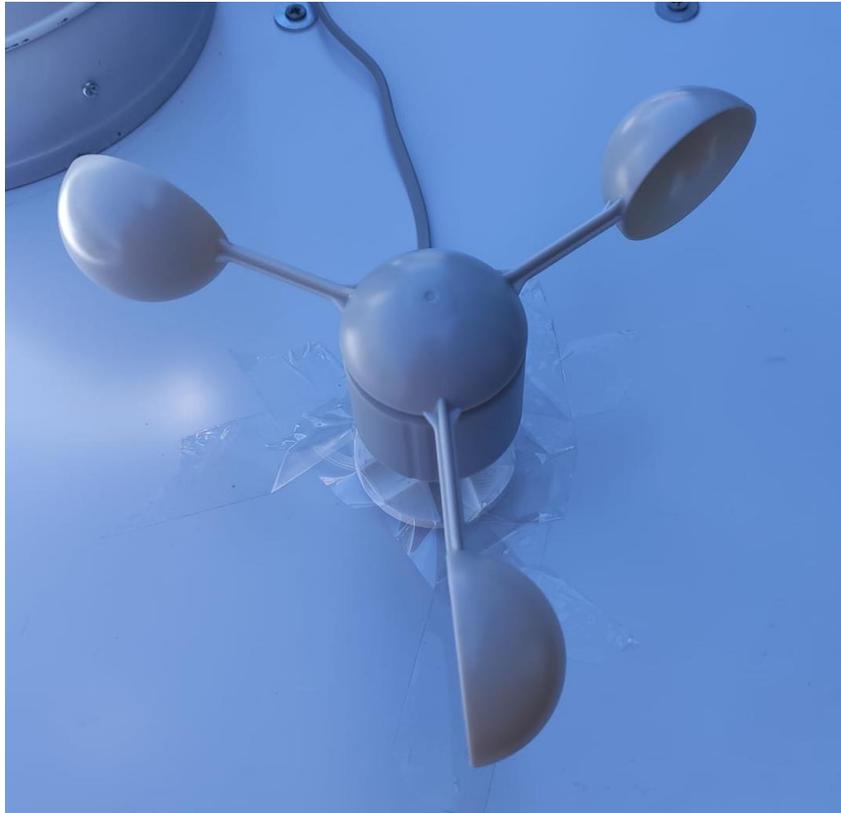
- Información sobre el firmware del módulo por la cual se conoce si el dispositivo está actualizado.

- Su funcionamiento, es decir, si se va a utilizar como *esclavo* o *maestro*. Inicialmente, se pensó que debía trabajar como maestro ya que iba a ser el Arduino el que se iba a conectar a otro dispositivo para transmitirle los datos [34]. Pero en la práctica, se comprobó que era más sencillo que trabajase como esclavo para poder acceder a él a través del dispositivo, a la vez que ir pidiendo datos.



*Ilustración 21: Módulo bluetooth HC-05.*

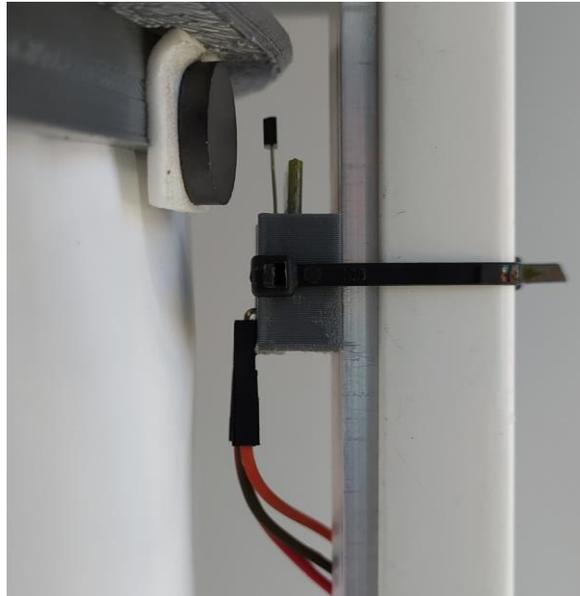
## **2.4 ANEMÓMETRO**



*Ilustración 22: Anemómetro.*

El anemómetro es un sensor de la velocidad del viento [35], y fue comprado por el director del proyecto a través de internet. Este dispositivo se utilizó para medir la velocidad del viento que le llegaba a la turbina para así poder comparar la velocidad del viento con la velocidad de rotación de la turbina. Pero, como se mostrará más adelante, no fue de gran ayuda ya que, cuando la velocidad del viento superaba cierto umbral, el anemómetro no la medía con precisión.

## ***2.5 SENSOR DE EFECTO HALL***



*Ilustración 23: Sensor de efecto Hall.*

Este dispositivo manda una señal cada vez que pasa un campo magnético cerca de él [36]. En la Ilustración 23 se muestra el dispositivo en cuestión sujetado por una brida. A la izquierda de la imagen, se observa un disco pegado a una pala de la turbina, que es un imán el cual genera ese campo magnético. Hay 5 palas y cada una tiene un imán para tener más muestras de la velocidad de rotación de la turbina y así tener una información más precisa de ésta.

Al final, se retirarán 4 de los 5 imanes de las palas por un problema de toma de datos. Sólo quedará un imán para las 5 palas.

## 2.6 SMART AEROGENERADOR



*Ilustración 24: Smart aerogenerador*

La Ilustración 24 muestra el diseño del aerogenerador de este proyecto, cuya autoría (diseño y montaje) corresponde a D. Juan Romeo, director de este proyecto. Está compuesto por unas palas exteriores las cuales facilitan la aceleración de la turbina al redirigir el viento. La turbina se compone de cinco palas que están separadas  $72^\circ$  entre ellas.

Se le instalaron tres ruedas para facilitar su traslado, aunque estas ruedas pueden también fijarse.

También se compone de piezas 3D diseñadas por el director, por no estar disponibles en el mercado y por su diseño complejo. Cuando se finalice y se comercialice este proyecto, se espera que las piezas diseñadas en 3D entren en el mercado aumentando la producción de éstas, a la vez que se reduzca su coste de fabricación.

El cilindro situado en la parte superior del aerogenerador es donde se encontrará el convertidor de energía mecánica a energía eléctrica.

A continuación, se muestran tres vistas (exterior, interior y lateral) de una de las palas que conforman el aerogenerador.



*Ilustración 25: Vista exterior de la pala.*



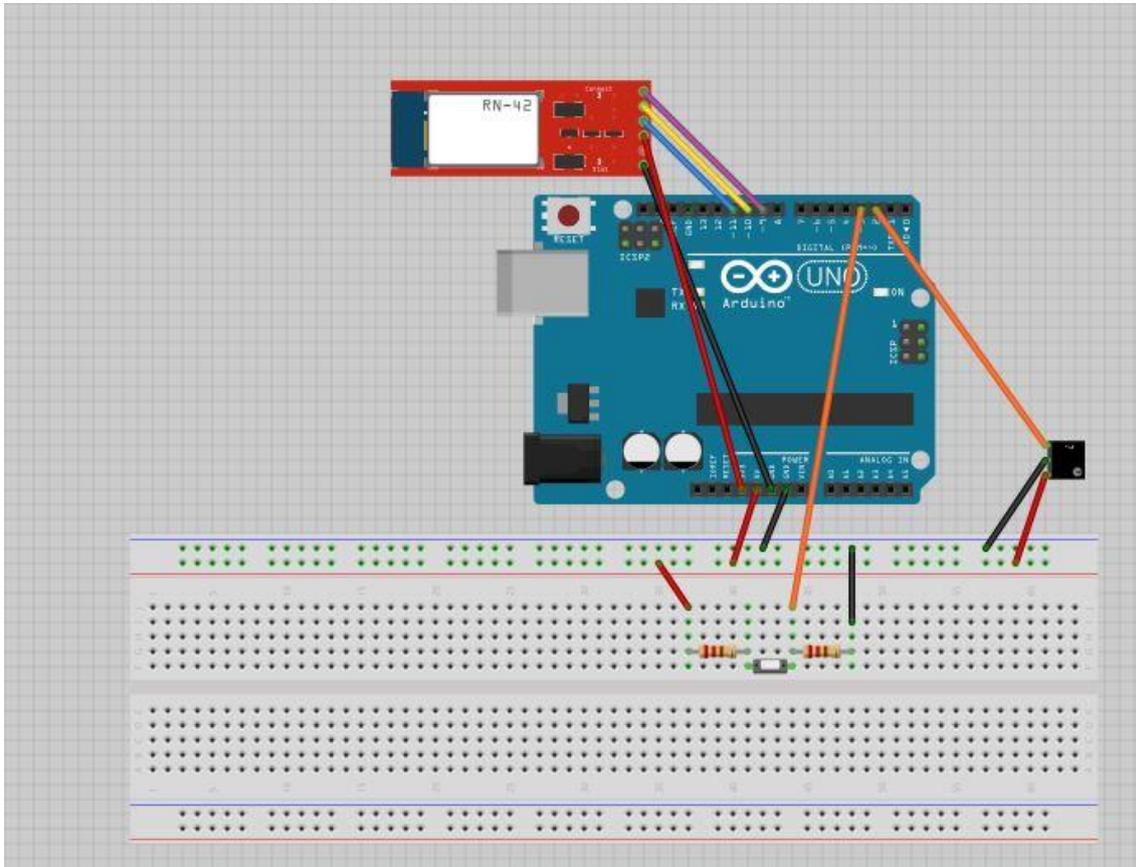
*Ilustración 26: Vista interior de la pala.*



*Ilustración 27: Vista lateral de la pala.*

Además, se situó en la parte superior del aerogenerador, el Arduino con sus conexiones de la siguiente manera:

- Los cables negros y rojos representan las alimentaciones de los dispositivos, siendo tierra y 5 voltios respectivamente, a excepción del módulo bluetooth HC-05, que se alimenta a 3'3 voltios.
- El módulo bluetooth HC-05 se representa por el dispositivo rojo superior. Posee 6 conexiones de las cuales:
  - o Dos son la alimentación,
  - o Otras dos son la recepción y transmisión de datos (con los colores amarillo y azul, respectivamente)
  - o Y el último cable, que sirve para que el módulo bluetooth trabaje como se ha configurado, como primera opción. Antes de alimentar al módulo se debe tener conectado este cable (donde se indica). Como segunda opción, se puede entrar en el modo AT, para configurarlo. Para entrar en este modo, es necesario tener desconectado este cable antes de alimentar al módulo.
- El sensor de efecto Hall se representa por el dispositivo cuadrado negro de la derecha. Posee tres conexiones: dos de alimentación y una, para enviar los datos al Arduino.
- El anemómetro se representa por el interruptor entre las resistencias. Cada vez que el anemómetro da una vuelta, se envía una señal.
- Las resistencias son de valores 10  $\Omega$  y 10 k $\Omega$  siendo la de la izquierda la de 10  $\Omega$ .



*Ilustración 28: Conexiones entre los dispositivos, la protoboard y el Arduino [37].*

Cuando se realizaban las simulaciones se tenía un sensor de efecto Hall que estaba libre. El anemómetro (en la Ilustración 28, el interruptor) se sustituye por un pulsador para simular una vuelta del anemómetro. Estas simulaciones fueron de gran ayuda durante la cuarentena, ya que se pudo avanzar en el proyecto a pesar de estar en confinamiento.

## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Actualmente, se puede comprar un aerogenerador vertical. Internet ofrece diversas opciones. Unas que rondan entre los 100-400 €. Pero NO son fiables. Sólo ofrecen información de su *alimentación* y de una *potencia desconocida*. Podría ser la potencia nominal que se extrae, la potencia máxima extraíble, la potencia máxima teórica, etc. Además, tampoco proporcionan las curvas de potencia que explican cómo funciona realmente el aerogenerador que se desea comprar.

Otras que superan los 1000 € y, aunque ofrecen más detalles sobre el aerogenerador, siguen sin dar las curvas de potencia. Y, en cualquier caso, responden a uno de los dos modelos anteriores: o son tipo Darrieus (la mayoría) o son tipo Savonius.

Por otra parte, existen numerosos proyectos de fin de carrera que han desarrollado aerogeneradores de eje vertical. En ellos se diseñan, los aerogeneradores, para uso doméstico o rural [38]. Pero en estos trabajos solo se elabora un modelo: o Darrieus o Savonius [39].

Este mercado proporcionaba un campo de estudio y de investigación potencialmente interesante. Si no se había logrado un producto eficiente y económico, *¿por qué no desarrollar un diseño que contribuyese a satisfacer las necesidades del ciudadano, sea asequible económicamente y, a la vez, no contamine?*

Cabe destacar, también, que es un proyecto en colaboración con el Ayuntamiento de Madrid que facilita las instalaciones de LaNaveMadrid para desarrollarlo. Sería deseable que cuando finalizara, se pudiera implementar, de manera experimental, en estas instalaciones municipales para comprobar su funcionamiento; y en un futuro próximo, podría estar listo para poder ofrecerlo a la población y generar, así, energía limpia con la finalidad del autoconsumo o del abastecimiento de la red. De hecho, este proyecto comienza a partir de los ensayos del “smart aerogenerador”. Cuando se presentó este proyecto para buscar

miembros que participasen, se explicó que se habían diseñado varios prototipos que fueron evolucionando hasta llegar al modelo final que se pretendía obtener.

De todo ello se deriva un proyecto de gran interés, tanto para las personas que trabajan en su desarrollo, como para los futuros beneficiarios de la población. Se pretende formar parte del conjunto de contribuciones en materia de energías renovables acercándose, así, a un modelo de ciudad libre de contaminación y conectada.

Desde aquí se puede contribuir, también, a fomentar el interés por seguir investigando y trabajando en este campo y alcanzar los objetivos para el desarrollo sostenible, marcados por las Naciones Unidas.

## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

Viendo los productos en el mercado y los que forman parte de los diseños de trabajos de investigación o de fin de grado, queda claro que sólo contemplan el desarrollo de un modelo. Los aerogeneradores verticales, por tanto, tienen por delante un campo de trabajo e investigación muy amplios.

En este proyecto se ha diseñado un aerogenerador que combina las ventajas de los dos modelos mencionados (Darrieus y Savonius) ampliándose, así, su rango de trabajo. Esto sucede, gracias a la sinergia entre los dos modelos.

Además de todo, esto existen razones con peso suficiente que han llevado a la realización de este proyecto. El aerogenerador vertical que se diseña y se presenta:

- Está en pleno desarrollo pues se trata de crear uno que sea verdaderamente eficaz; los que existen en el mercado no cumplen los objetivos que se pretenden, los cuales se mencionarán a continuación. Al querer crear un aerogenerador inteligente, las posibilidades de automatización de las acciones de éste son muchas; por ejemplo, (en función del caudal del viento) que se muevan las palas exteriores para obtener la máxima energía; que se cree una base de datos conectada a los aerogeneradores que permita obtener información puntual de lo que ocurre en cada momento o que se diseñe una versión a menor escala que se utilice como powerbank.
- Utiliza un tipo de energía renovable, es decir, a pesar de que, al fabricarse, se produce algo de contaminación, cuando el producto esté terminado y se ponga en funcionamiento la energía que se produzca provendrá de una fuente no contaminante y que, además, es ilimitada.
- Es de bajo impacto visual, es decir, que no modifica demasiado el paisaje pues es, apenas perceptible al ojo humano. Su pequeño tamaño le permite estar camuflado en

los tejados de los edificios. Por el contrario, los parques eólicos sí tienen un gran impacto visual pues son perceptibles desde una gran distancia.

- Es **reciclable**; una vez que haya finalizado la vida útil de las piezas del aerogenerador, se podrán utilizar para crear nuevos materiales, dar otros usos, etc.
- Se pretende obtener un producto que se componga de piezas **reutilizables**; es decir, las piezas deben ser aprovechadas hasta que finalicen su vida útil.
- **Se reduce la contaminación** producida por materiales que no son ni reutilizables ni reciclables y por utilizar una energía renovable.
- Tendrá un bajo coste gracias al uso de materiales asequibles que permitirán la generalización del consumo al ciudadano.
- Aúna las ventajas de los modelos comentados: la turbina Savonius y la turbina Darrieus, gracias a su diseño.
- Podrá funcionar incluso con vientos muy fuertes, ya que dispondrá de un sistema inteligente para modificar el caudal de aire que entra a la turbina y, así, no desaprovechar la energía eólica.
- Es un pequeño paso para crear la ciudad del futuro, minimizando la contaminación, potenciando el IoT y persiguiendo la automatización generalizada.
- Cuenta con el apoyo del Ayuntamiento de Madrid el cual, además de ofrecer un lugar para desarrollar el proyecto, implementará el producto resultante de modo experimental en un grupo de viviendas, con intención de comercializarlo, posteriormente.

## **4.2 OBJETIVOS**

El principal objetivo de este proyecto es conseguir *el correcto funcionamiento del aerogenerador que se diseñe*. Para ello se deben cumplir las siguientes metas:

1. **Establecer sensores en el aerogenerador.** Se necesita obtener las variables físicas de aerogenerador. Para ello, se efectuarán mediciones de las revoluciones del aerogenerador con un sensor de efecto Hall, de la velocidad del viento con un anemómetro y de la potencia generada.

2. **Transmitir los datos recibidos de los sensores a través del bluetooth.** Con el uso de los programas Arduino y Matlab con los que se realizará la transmisión de los datos a un ordenador, clasificándolos gráficamente para poder interpretarlos más tarde.
3. **Optimizar el diseño del aerogenerador.** Para ello se requiere la visualización de los resultados obtenidos, es decir, que los objetivos anteriores se cumplan. Una vez alcanzados los objetivos se ampliaría la búsqueda de nuevas funciones para implementar en el aerogenerador, por ejemplo:
  - a. El cambio del ángulo de ataque de las alas para mayor generación.
  - b. La mejora de envío de datos cambiando el bluetooth por Wi-Fi o radiofrecuencia. Con esta mejora además se podrá estudiar el uso o creación de una base de datos donde guardar la información obtenida por los sensores.

Además de estos tres objetivos, relacionados directamente con la funcionalidad del aerogenerador, se quieren destacar otros objetivos referidos al producto final, algunos de los cuales se han mencionado con anterioridad:

1. Conseguir un aerogenerador *reciclable y reutilizable*.
2. *Abaratar el coste* de la producción y, por tanto, del precio final del producto para que sea *accesible* al ciudadano medio.
3. Obtener un *Smart-aerogenerador*, con el máximo de funciones automatizadas.
4. *Reducir el coste del mantenimiento*.

## **4.3 METODOLOGÍA**

### **4.3.1 DESARROLLO TEMPORAL DEL PROYECTO**

Para poder cumplir con los objetivos establecidos, el equipo se reunió periódicamente cada semana; aunque en algunas ocasiones, las reuniones tuvieron que posponerse.

En la Tabla 4, que se muestra a continuación, se observa el seguimiento de cómo ha ido progresando el proyecto desde la segunda semana de enero de 2020 hasta la tercera

semana de junio (concretamente, el día 19 de junio). En esta tabla se muestra en color verde las tareas desempeñadas por D. Javier Colinas y en color rojo los periodos de exámenes de ICAI.

Desafortunadamente, con la aparición de la pandemia mundial (COVID-19) se produjeron unas semanas de incertidumbre en las que el equipo no sabía qué iba a pasar con el proyecto ni cómo se iba a poder seguir trabajando en él. El director del equipo se puso en contacto con el resto del grupo interesándose por las intenciones de sus miembros. Los alumnos decidieron continuar con el proyecto y se comenzaron a realizar las reuniones online para comentar los progresos realizados durante el confinamiento.

En este punto del proyecto se decidió cambiar el programa de RealTerm, el cual recibía los datos a través del bluetooth y que posteriormente se guardarían, por el Matlab para poder recibir los datos, visualizarlos y guardarlos. Como el equipo no se podía reunir presencialmente, se decidió realizar simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento de los códigos de Matlab y Arduino, simultáneamente.

Después de avanzar a fases del confinamiento, en las que se permitían las reuniones, y tras finalizar los exámenes finales, el equipo pudo retomar las reuniones para probar los avances durante la cuarentena. Los resultados fueron satisfactorios.

| Objetivos |   | Conexión por bluetooth con Arduino. | Conseguir la visualización de los datos en RealTerm. | Simular la medición de los datos del aerogenerador. | Integrar los códigos de medición y envío de datos. | Corregir los posibles errores de la anterior etapa. | Conexión por bluetooth a través de Matlab | Integrar los códigos de recepción de datos del Matlab con la visualización de los datos | Probar en el aerogenerador los avances. | Interpretación de los datos y optimización. |
|-----------|---|-------------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---|
| Semanas   | 1 |                                     |  |   |  |   |   |   |   |   |
|           | 2 |                                     |  |   |  |   |   |   |   |   |

|    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 3  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 12 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 17 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 18 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 19 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 20 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

|    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 21 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 22 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 24 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabla 4: Seguimiento del progreso del proyecto

### 4.3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

En este apartado se van a indicar los materiales utilizados en el proyecto que permitieron su desarrollo.

- Un **Arduino**. En este caso se utilizó el **Arduino UNO** facilitado por D. Javier Colinas, debido a que se estuvo trabajando con otro Arduino que dejó de funcionar al alimentarlo a la potencia no recomendada. Se utilizó el dispositivo Arduino por tener un software libre, (es decir, es gratis su descarga) y además es barato, lo cual es muy interesante. Recordemos que uno de los futuros objetivos que hay que cumplir es que sea accesible al ciudadano.
- Un dispositivo que permitió la transmisión de datos. Como se explicará más adelante se utilizó el **dispositivo HC-05**, conectado al Arduino para la transmisión de los datos a través de bluetooth.
- Un **ordenador con bluetooth** que tuviera características similares o superiores al **MacBook Air 13''** [40]. Esto se debe a la gran cantidad de datos que tiene que procesar el ordenador. Se explicará más adelante, que debido a este problema se modificaron los códigos para sólo trabajar con lo esencial y así poder visualizar los datos recibidos en directo.
- Un par de **resistencias** y un **pulsador**. Se utilizaban para simular el anemómetro, cuando dos miembros del equipo necesitaban usarlo y no se encontraba disponible en ese momento.

- Varios *imanes*. Para simular cuando no se trabajaba con el aerogenerador y se quería comprobar el funcionamiento. Además, se instalaron en cada pala para, así, poder medir la velocidad de rotación de la turbina.
- *Sensor de efecto Hall*. Un dispositivo descrito anteriormente, utilizado para medir la velocidad de rotación de la turbina.
- Un *anemómetro*. El que se utilizó no fue especialmente útil para última fase del proyecto porque no medía con precisión. No obstante, es necesaria la utilización de un anemómetro para poder establecer el funcionamiento del aerogenerador respecto a la velocidad del viento. Los códigos desarrollados para el uso de anemómetros no son erróneos por lo que se podría sustituir sin inconvenientes.
- *Cables* para realizar las conexiones necesarias entre Arduino y los demás dispositivos conectados a él.
- *Ventiladores* para realizar los ensayos del aerogenerador sin ruido, es decir, para que el aerogenerador esté impulsado por el viento de los ventiladores.
- El *aerogenerador vertical*, diseñado por el director del proyecto, D. Juan Romeo.
- La *licencia de Matlab* (se utilizó el Programa Matlab 2020a), que fue facilitada gracias a la Universidad de ICAI-Comillas.

#### **4.4 OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los objetivos para el desarrollo sostenible son estrategias para asegurar un futuro sin los problemas actuales que asolan a la población mundial como la pobreza, la desigualdad, la paz, la prosperidad, la justicia, la degradación ambiental, etc. Para 2030 se deben cumplir las 17 estrategias para fomentar la sostenibilidad [41].

Este proyecto quiere aportar su grano de arena para obtener este futuro sostenible. Al completar el producto final que se quiere obtener, se implementará en viviendas para estudiar su funcionamiento y posteriormente lanzarlo al mercado para su comercialización. Con la venta de este producto se llegarán a desarrollar los siguientes objetivos:

| <b>Ámbitos para el desarrollo sostenible</b> | <b>Objetivo identificado para el desarrollo sostenible</b> | <b>Rol</b>  | <b>Meta</b>  | <b>Relación con el proyecto</b>  |
|--|--|-------------|--|--|
| <b>Biosfera</b>                              | Objetivo 13: Acción por el clima.                          | Secundario. | Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países [42]. | Con su comercialización se lograría reducir la contaminación producida por las energías no renovables. |
| <b>Sociedad</b>                              | Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante.           | Primario.   | De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos [43].  | La venta del producto final será asequible para el ciudadano.  |
| <b>Economía</b>                              | Objetivo 12: Producción y consumo responsables.            | Primario.   | De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización [44]. | El producto final estará compuesto de materiales reciclables y reutilizables.                          |

*Tabla 5: Objetivos para el desarrollo sostenible en este proyecto.*

## Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

El equipo de trabajo comienza su labor una vez que D. Juan Romeo logra el diseño final del aerogenerador que muestra la Ilustración 29.



*Ilustración 29: Diseño final del aerogenerador.*

Este equipo estará formado por: el director del proyecto, D. Juan Romeo y los alumnos de 4º curso de ICAI, D. Antonio Serda y D. Javier Colinas.

El director comienza explicando las fases en que se dividiría el proyecto y las tareas a realizar por los miembros del equipo. Es decir, el proyecto constaría de 3 fases:

1ª fase: transmisión de datos.

2ª fase: visualización de los datos.

3ª fase: interpretación de los datos y optimización del modelo.

Y las tareas a realizar quedaron distribuidas desde el inicio de la siguiente manera: la investigación de la transmisión de datos, a cargo de D. Javier Colinas y el funcionamiento de los sensores, el anemómetro y el sensor de efecto Hall, a cargo de D. Antonio Serda.

Al finalizar las tareas anteriores se reasignan nuevas tareas. Por un lado, la visualización de los datos recibidos, a tiempo real mediante gráficas, por D. Javier Colinas; y por otro, la elaboración de varios códigos que permitieran la obtención de las potencias, velocidades y aceleraciones de los datos recibidos, y de un programa para calcular el momento de inercia del aerogenerador, por parte de D. Antonio Serda.

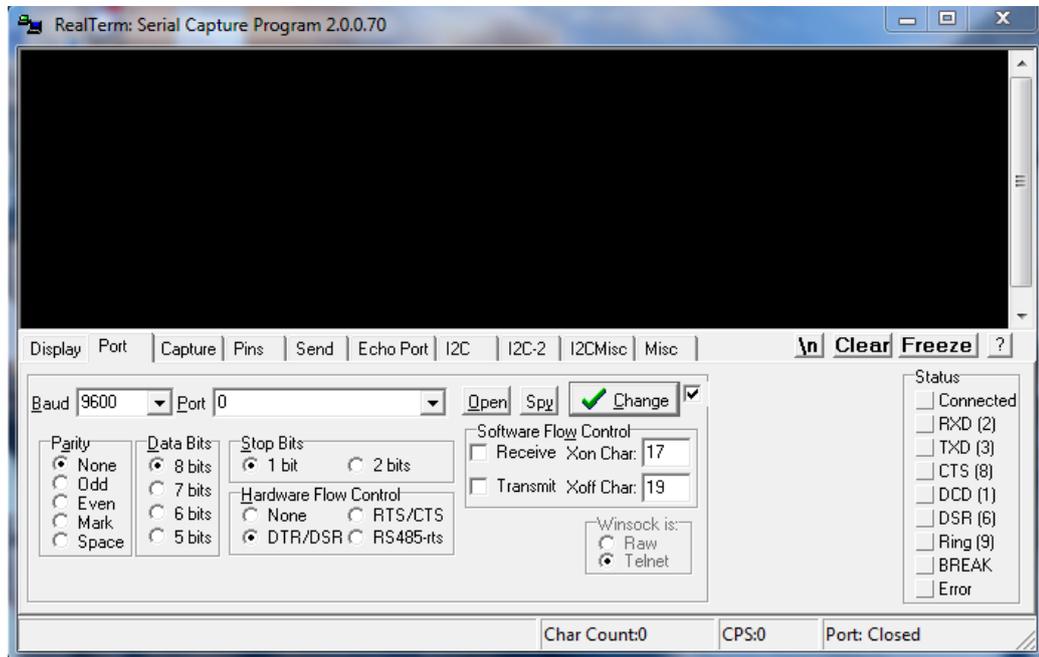
## **5.1 FASE 1**

Para la investigación sobre la transmisión de datos, se debía empezar por una ***búsqueda exhaustiva***:

- A través de internet se encontró mucha información sobre el módulo HC-05 pero desordenada, incompleta y poco fiable.

- Se decide, entonces, pedir ayuda a un profesor de ICAI que supiese sobre el tema. El profesor D. Jaime Boal, experto en *Arduino*, era la persona indicada. A partir de su colaboración quedó claro que el módulo HC-05 debía ser configurado para su posterior uso.

- Una vez configurado el HC-05 empieza el estudio del funcionamiento del programa *RealTerm* [45]. *RealTerm* es un programa que permite, a través de los *puertos serie* la conexión por bluetooth, la adquisición de datos en múltiples lenguajes y, también, permite guardarlos.



*Ilustración 30:Entorno de trabajo del RealTerm.*

- También se investigó el cambiar cómo transmitir los datos, es decir, cambiar el bluetooth por Wi-Fi. Esto se debe a que la conexión del HC-05 está limitada a 6 metros, lo cual podía suponer problemas en el futuro. Se preguntó sobre cómo cambiar el Wi-Fi por el bluetooth a D. Jaime Boal pero tras las siguientes explicaciones se decidió proseguir con el bluetooth ya que para llevar a cabo la conexión a través del Wi-Fi había que:

- Cambiar el código del Arduino para que se conectase al módem wifi que debía.
- Asignar una dirección IP.
- Configurar el código para introducir la contraseña del Wi-Fi.

Y además había que añadirle la dificultad planteada por los siguientes problemas:

- Cada vez que se apagaba el ordenador se modificaba la IP a la que debía conectarse el Arduino. Este problema era sencillo de resolver, simplemente se evitaba apagar el ordenador.

- Cada semana las operadoras cambiaban las IP de los módems. Este problema era más complicado de resolver, aunque se podía pagar a las operadoras para que no modificasen la IP.
  - Cada vez que se transmitiesen los datos podía haber pérdida de éstos, ya fuera al enviarse, al recibirse o incluso al transmitirse, es decir, cuando están viajando del emisor al receptor. Este último requería de uso de otros programas para establecer qué ocasionaba la pérdida de datos.
- Una vez resuelto el anterior dilema se probó el programa RealTerm. Se comenzó enviando un número para entender cómo funcionaba la comunicación. Tras varias pruebas se entendió que se enviaban en formato unsigned int, de tal manera, que el dato podía ocupar desde 0 a 65535 bits. Aunque, el rango de transmisión de datos se situaba entre 0 y 255 bits.
  - Se probó a enviar letras a través de Arduino, las cuales se leían como números en RealTerm que correspondían a la letra asignada a ese número en el código ASCII.
  - Cuando se entendió el funcionamiento del RealTerm se modificó el código del Arduino para transmitir los datos que emitirían si estuviese en el aerogenerador. Para ello, se utilizó el sensor de efecto Hall y un imán, para simular las revoluciones del aerogenerador, y un par de resistencias y un botón para simular la velocidad del viento. En resumen, el programa contaba el tiempo cada vez que pasaba el imán o se pulsaba el botón y con esos tiempos se calculaban la velocidad de rotación del aerogenerador y la velocidad del viento, respectivamente.

Las velocidades eran datos del tipo unsigned int y, por tanto, la velocidad más grande que se podía enviar era 255. Se comprendió este fallo cuando al comprobar los valores, que tendría que haber enviado Arduino, no coincidían con los valores que aparecían en el entorno de trabajo de RealTerm. Se probó a dividir la velocidad en datos que fuesen de 8 bits en 8 bits. Como las velocidades no sobrepasaban el número 65535 se dividió en 2, es decir, que se podían enviar datos que ocupasen hasta 16 bits. Sintetizando, se modificó el código del Arduino para corregir un error y lo que se obtuvo fue la llegada de las velocidades dividida en 2 datos al RealTerm. Y al

multiplicar el primer dato que llegaba, por 256 y sumarle el segundo, se obtenía el mismo valor que enviaba el Arduino.

- Después se hicieron numerosas pruebas de guardar los datos que recibía RealTerm, pero el programa no era muy intuitivo y al guardar los datos en un archivo.txt no aparecían ni números ni letras, sino caracteres ilegibles. Se visitó la página web de RealTerm, pero no se encontró respuesta a la pregunta de cómo guarda este programa los datos recibidos. También se realizó una búsqueda exhaustiva en vídeos, blogs y numerosas páginas web [46].
- Se decidió cambiar a un entorno de trabajo conocido: Matlab [47], ya que, se había trabajado con él en circunstancias similares y daba muy buenos resultados. Se investigaron y se instalaron los programas que añadían comandos para poder trabajar con bluetooth. También se estudió cómo funcionaban los nuevos comandos para poder hacer un código que recogiese los datos que enviaba el Arduino.

A partir de este punto se comienza a trabajar en la FASE 2, a la vez que se solucionan los errores de la FASE 1.

- Se partía de dos posibles opciones. La primera, que Arduino realizase todos los cálculos y los transmitiese a través de bluetooth, pero no se quería sobrecargar el Arduino con demasiados cálculos y esta opción fue desechada. La segunda opción, era que Arduino enviase los datos esenciales y que Matlab se encargase de realizar los cálculos necesarios, que fue la opción escogida. Así que se modificó el código del Arduino para enviar el tiempo que había transcurrido cada vez que una pala pasara por el sensor de efecto Hall o el anemómetro. A partir de este punto se trabaja en todas las fases simultáneamente.
- Durante la FASE 3 se percibió un fallo cuando se visualizaba en una gráfica las revoluciones del aerogenerador, en función del tiempo del sensor de efecto Hall. Cada 65 segundos, se producía un pico que bajaba hasta 0 y luego se volvía a estabilizar donde estaba anteriormente. Este fallo se debía a que se enviaban hasta un máximo de 16 bits, es decir, el número más grande que se podía enviar era el 65535 y a partir de ahí valía 0.

Se produce esto porque el número pasa de valer 1111 1111 1111 1111 a 0001 0000 0000 0000 0000 que, en verdad, equivale a 65536; pero como solo tiene capacidad para leer 16 bits, se “come” los 4 bits más significativos. Luego se estabiliza porque la diferencia entre tiempos (con la que se calcula la velocidad) sigue teniendo una progresión. Por ejemplo, el antepenúltimo número enviado es el 65530, el penúltimo número enviado es el 65540 y el último es el 65550. Entre los dos primeros habría una diferencia de 10 pero lo que se resta es 4-65530, porque el 65540 lo traduce como 4 (lo cual produce una gran aceleración negativa). Pero para la siguiente velocidad quedaría 14-4, que vuelve a ser un dato esperado.

Para solucionar este fallo se cambió el código de Arduino y de Matlab para transmitir los tiempos en 3 trozos, de tal manera que se podían transmitir hasta 24 bits. Por ello, el número más grande que se podía transmitir era 16777215, que en segundos equivalía a 16777 segundos, aproximadamente; y en horas, a 4.66.

## **5.2 FASE 2**

Esta FASE 2 se desarrolló de la siguiente forma:

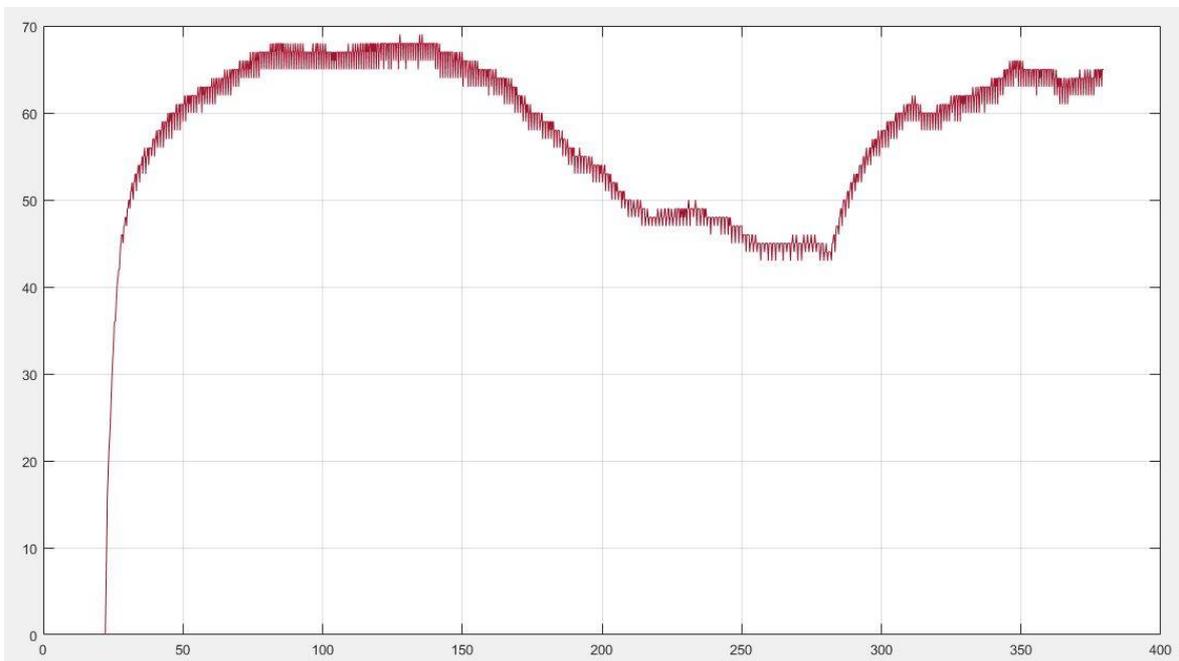
- Se comenzó por estudiar cómo funcionaba el programa Kst2 [48], para poder visualizar, en gráficas, los datos recibidos a través de RealTerm. Pero al no poder guardarlos adecuadamente, se prefirió cambiar al Matlab, como se mencionó anteriormente.
- Se realizó una búsqueda exhaustiva de cómo realizar las gráficas de las velocidades, los tiempos y de la potencia mecánica. Se buscaba que estuviesen en la misma gráfica, a tiempo real y que tuviesen valores similares, modificando sus escalas.

Poder visualizar los datos recibidos, ayudó a solucionar y entender varios errores.

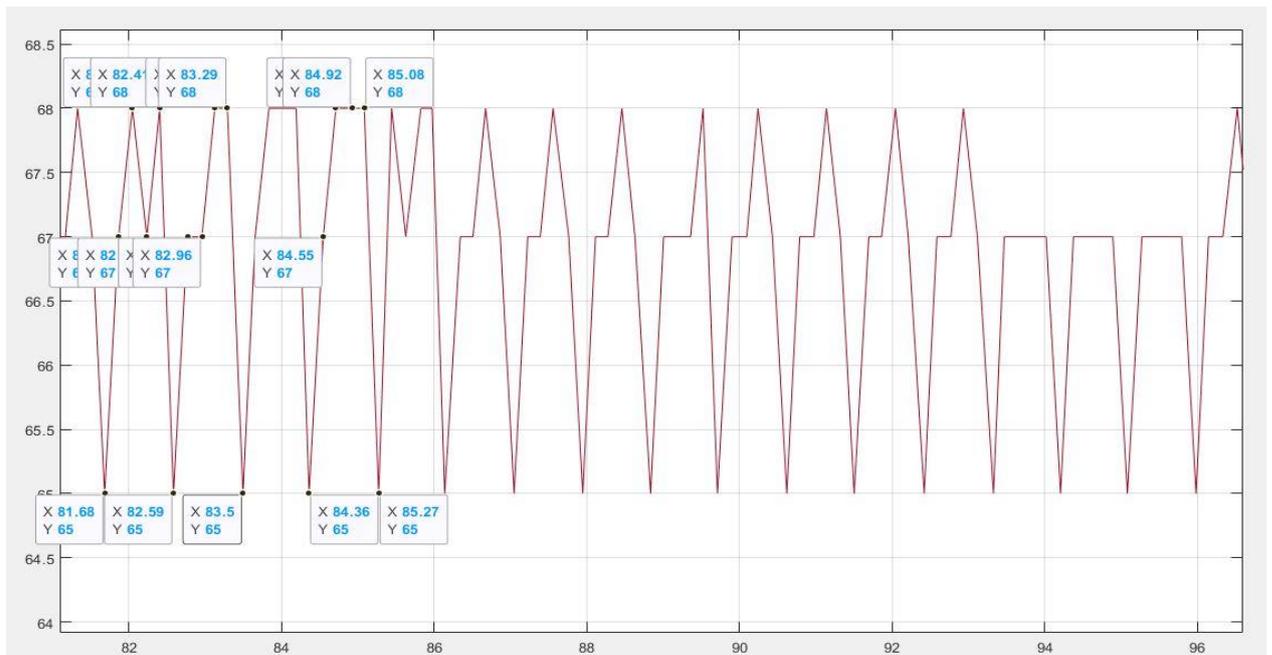
Por ejemplo:

- Si no se reinicia el Arduino, los valores no enviados se mantenían en la cola, esperando a que algún dispositivo solicitase esos datos.

- También se solucionó el problema de la limitación del espacio que ocupaba el dato, como se explicó en la anterior fase.
- Además, al enviar el tiempo, cada vez, que una pala pasaba por el sensor de efecto Hall, se observaba, en las gráficas, una periodicidad cada cinco datos. Y es que cada cinco datos, la velocidad bajaba unas dos unidades, mientras que, en las demás palas, se mantenía estable o variaba una unidad. Se entendió que los imanes situados en las palas no estaban a la misma distancia y, de ahí, esas variaciones. Para solucionarlo, se decidió ordenar los datos según su pala, de tal manera, de que se obtenían cinco tiempos los cuales estaban referenciados a cada una de sus palas. Al visualizarlo en gráfica, no se mostraban variaciones en la velocidad y, por tanto, era correcta la suposición de que no estaban situados a la misma distancia los imanes. Este fenómeno se muestra en la Gráfica 7 más claramente.



*Gráfica 6: Velocidad de la turbina (rpm) frente al tiempo transcurrido (s).*



*Gráfica 7: Velocidad de la turbina (rpm) frente al tiempo transcurrido (s) ampliado.*

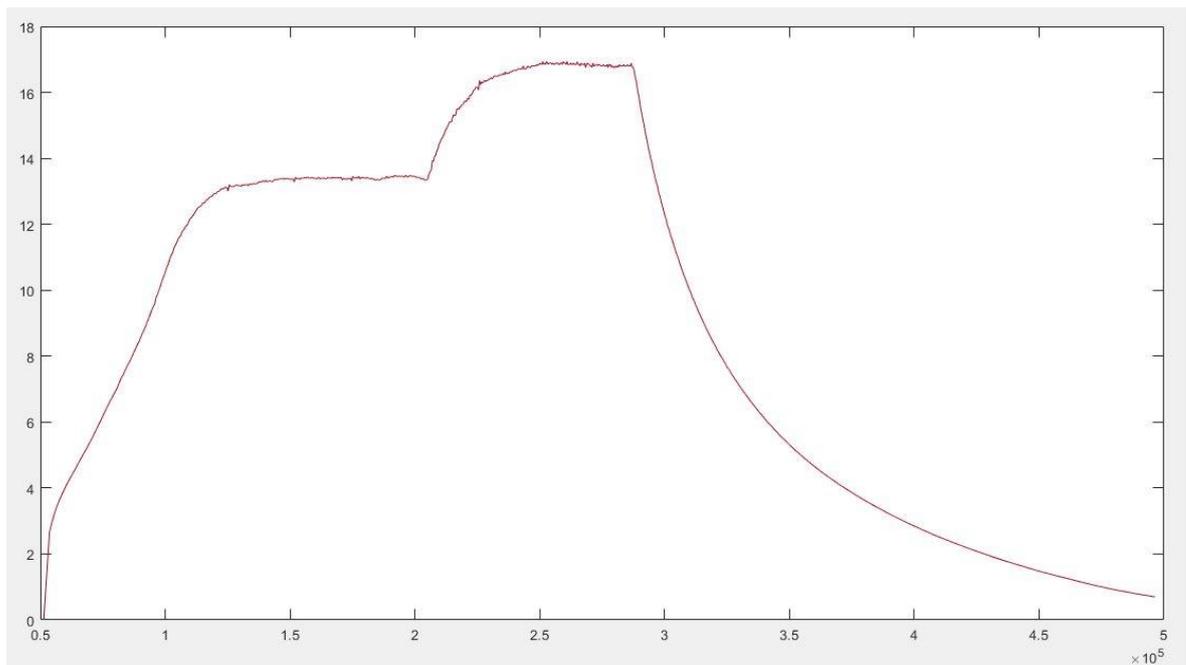
### **5.3 FASE 3**

Cuando el equipo se pudo reunir, se comenzó la FASE 3, a la vez que se comprobaba el correcto funcionamiento de los códigos desarrollados para la visualización de los datos recibidos. Gracias a esta fase, se pudieron corregir errores de lógica que había en el código como se explicó en la anterior fase.

También, permitió al equipo darse cuenta de cómo variaba la velocidad de la turbina según como estuviesen dispuestas las palas exteriores. Estas palas se pueden rotar para cambiar el caudal de viento que entra en la turbina.

Además, se pudo comprobar que la turbina no requería una gran energía del viento para empezar a girar. Esta es una de las ventajas de la turbina diseñada, ya que comparte las ventajas de la turbina Savonius y de la turbina Darrieus.

Estos hechos se pueden visualizar en la Gráfica 8, que está a continuación y muestra los datos recibidos por un solo imán. El aerogenerador se situaba en un espacio lo suficientemente grande para que no hubiera reflujos de aire. Se estableció la mínima potencia de un ventilador alejado unos 4 metros. Cuando se estabilizó la velocidad se movió una de las palas exteriores para que el caudal entrase con mayor facilidad y esto provocó un aumento en la velocidad de rotación hasta volver a estabilizarse. Finalmente, se dejó frenar solo al aerogenerador.



*Gráfica 8: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*

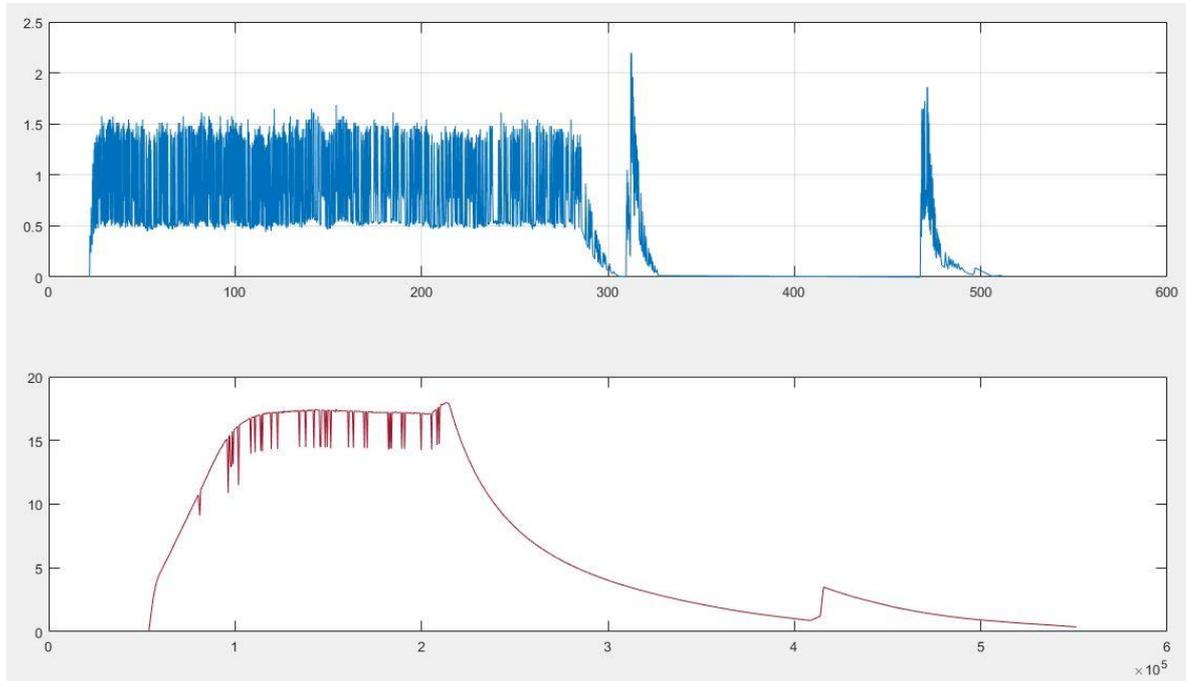
Uno de los problemas que surgió durante esta fase desconcertó al equipo: de vez en cuando, la velocidad caía drásticamente cuando se calculaba la velocidad de una pala y para el siguiente valor, volvía a subir a donde estaba antes. A diferencia del problema descrito en FASE 1, en este caso la velocidad no caía a 0 sino que disminuía. El problema no fue sencillo de solucionar ya que este fenómeno no sucedía uniformemente, aunque las bajadas de

velocidades pronunciadas eran similares. También se observó que en el aerogenerador se producía un movimiento oscilatorio debido a las grandes velocidades de la turbina y al caudal del viento.

En la Gráfica 9 se muestra la velocidad de rotación del anemómetro y de la turbina. La gráfica superior es la del anemómetro que tiene la velocidad (rpm) en función del tiempo (s).

Está tan distorsionada debido a que no posee una inercia muy grande. También porque en un instante, el flujo de aire empuja a una pala; instantes después, no se empuja a esa pala con tanta energía y, además, le llega la siguiente pala, la cual no está situada para favorecer el movimiento y provoca que el anemómetro frene. Esto implica que ese anemómetro no pueda superar cierta velocidad y haya que sustituirlo por uno que no posea esta limitación. Las dos últimas subidas se deben a un “empujón humano” para verificar si las gráficas estaban visualizándose en tiempo real, esto se explicará en el Parte ICapítulo 6.

En la gráfica inferior se observa la velocidad de rotación de la turbina (rpm) en función del tiempo (ms). El fenómeno explicado anteriormente se identifica con las bajadas repentinas de la velocidad, sin periodicidad. Al igual que en el anemómetro, se impulsó manualmente la turbina para comprobar si las gráficas eran “en directo”.



*Gráfica 9: Velocidad de la turbina (abajo) y del anemómetro (arriba) frente al tiempo transcurrido.*

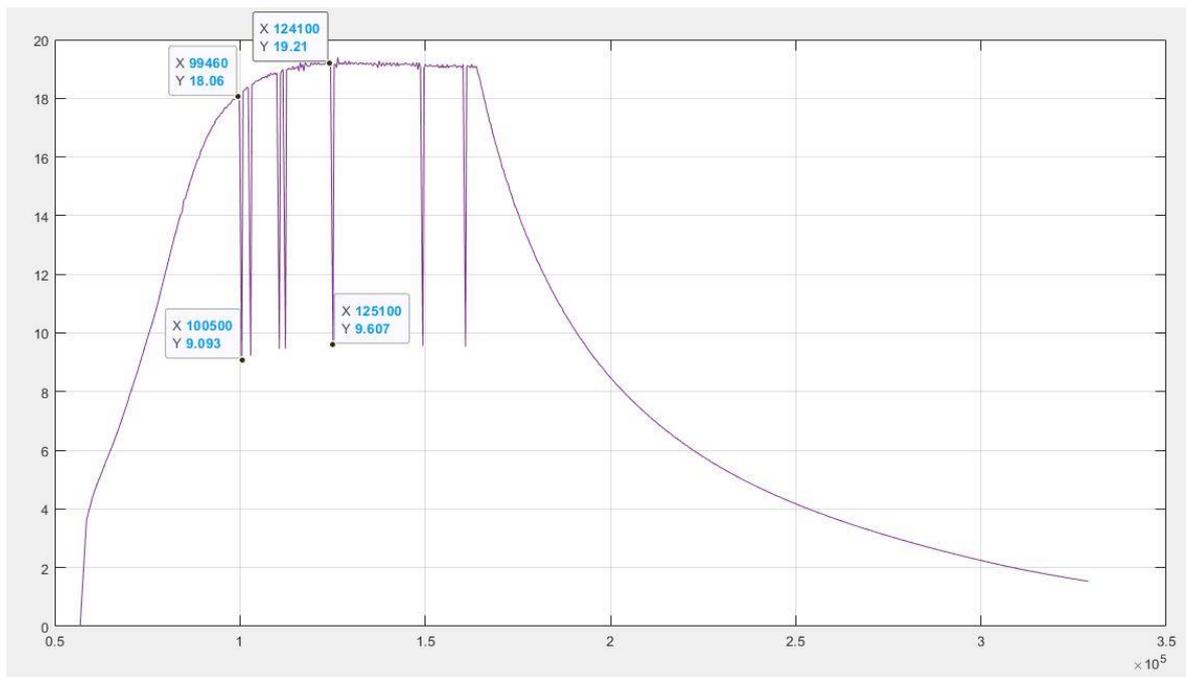
Se pensó que este problema era provocado por dos posibles hechos:

- O el movimiento oscilatorio hacía que el sensor de efecto Hall se alejase del imán provocando que no se contase que esa pala había pasado.
- O los imanes no estaban perfectamente distribuidos, y se daba la situación de que la oscilación adelantase la señal (que una pala había pasado) y que, en la siguiente, la pala hubiese retrasado la señal por la oscilación.

La siguiente vez que se reunió el equipo se comprobó que era la primera opción lo que sucedía. Se consiguió entender el problema al modificar el código de Matlab para asignar los datos a cada pala correspondiente. Y al visualizar solo los datos de una pala se determinó, claramente en las gráficas, que la bajada pronunciada era a la mitad de la velocidad de la turbina y esto significaba que se saltaba una señal de una pala por el movimiento oscilatorio.

En la Gráfica 10, se observa el fenómeno descrito anteriormente. En este caso, se probó a recibir los datos con la máxima potencia del ventilador y estando éste cerca. Además, sólo se visualizaron los datos de una pala. Se comprobó la suposición de que el movimiento

oscilatorio provocaba, que el sensor de efecto Hall, se saltara la obtención de un dato. También se probó que este suceso solo ocurría cuando se alimentaba con el ventilador y al superar cierta velocidad, mientras que, cuando se deja a la turbina frenar con su propia inercia, no sucedían estos problemas.



*Gráfica 10: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*

Se comprobó, además, que se podía cambiar la dirección en la que se producía el movimiento oscilatorio; simplemente cambiando la dirección de las ruedas del aerogenerador, para que el movimiento oscilatorio se produjese en la dirección perpendicular a la que se tomaban los datos de la velocidad de rotación de la turbina.

Mientras se buscaban soluciones a los errores, se realizaron ensayos para calcular el momento de inercia de la turbina libre, es decir, sin conectar nada al eje de la turbina. Y se aprovecharon esos ensayos para ver como respondía el aerogenerador ante distintos caudales de viento. Se utilizó sobre todo la curva de velocidad de rotación de la turbina cuando se le dejaba frenar con su propia inercia.

## Capítulo 6. DESARROLLO DEL SISTEMA

En este capítulo se explicarán los códigos que se muestran en ANEXO I para su mejor entendimiento. Como cualquier programador, no se comenzó por intentar obtener el código deseado en su totalidad (eso suele llevar a emplear mucho más tiempo de trabajo y suele ser más laborioso). El código se fue desarrollando, por partes, que luego se unieron para formar el código que aparece en el ANEXO I. Además, cada código se va a dividir en función de la persona que lo programó. El código elaborado por D. Antonio Serda aparece explicado con más detalle en su Trabajo Fin de Grado “*Instalación de sensores y análisis de datos de un aerogenerador vertical para uso doméstico*”. Aquí se explicará el código desarrollado por D. Javier Colinas.

### **6.1 CÓDIGO DE ARDUINO**

Se comenzó esta parte, como se comentó en la FASE 1, buscando información de cómo funcionaba el módulo bluetooth HC-05. Con las indicaciones del profesor D. Jaime Boal se procedió a probar a enviar un número. Se introducía la librería *SoftwareSerial* para, posteriormente, poder asignar a los pines 10 y 11 de Arduino a los que se conectaría el módulo bluetooth para transmitir y recibir los datos respectivamente. A estos pines se les asignó el nombre BT.

A continuación, se establecían los baudios a los que se iba a comunicar el Arduino, (9600, en este caso). Se asignaron estos baudios, tanto al bluetooth como al serial, para poder comprobar que los datos que se enviaban eran los mismos que se registraban.

Finalmente, se escribió *BT.write(1)* para que enviase un 1 a través del pin de transmisión del módulo bluetooth. Se probó a conectarlo al RealTerm y, al final, se comprendió que los datos eran tipo unsigned int. Se descubrió al modificar el método de lectura del RealTerm, ya que, en los otros, no eran caracteres legibles o, incluso, eran números que no se correspondían con los enviados.

Después, se realizó un código que incluía la toma de datos del sensor de efecto Hall y del anemómetro, aunque no se poseía el anemómetro en ese momento y se simuló con un par de resistencias y un pulsador. En este punto el Arduino recibía los tiempos que les daba el sensor de efecto Hall y el anemómetro y el Arduino calculaba las velocidades y las transmitía por bluetooth. Aquí se tenía un código similar al que se muestra en el ANEXO I.

Al principio, se enviaba la velocidad del sensor Hall y del anemómetro, cada vez que uno de ellos cambiaba, pero esto no era lo correcto y posteriormente, se corrigió. También, al conseguir grandes velocidades en el sensor Hall (mayores de 255), no coincidían los valores enviados con los recibidos. Haciendo cálculos con los valores recibidos se comprendió que la transmisión de datos estaba limitada a 8 bits. Para solucionar este problema, se decidió enviar los datos de dos en dos. Para poder realizar esto se utilizaron variables auxiliares en las cuales se desplazan 8 posiciones hacia la derecha (con el comando <<).

Más tarde, se modificó el código para que solo se enviase el dato de la velocidad cada vez que una de las velocidades se modificase. Además, se comenzó a desarrollar el código de Matlab.

Después, D. Antonio Serda introdujo algunos cambios, en su parte, para que los cálculos fuesen más precisos, quedando el código como se muestra en el ANEXO I.

Una vez probados los códigos de Matlab y Arduino, se pensó que sería mejor realizar los cálculos en Matlab porque Arduino no trabaja bien con decimales. Por esta razón, se modificó el código de Arduino para enviar los tiempos del sensor de efecto Hall y del anemómetro, cada vez que se modificaba uno de éstos.

Por último, se cambió el código para que enviaran los datos, de tres en tres, porque a diferencia de la velocidad que puede aumentar o disminuir, el tiempo sólo aumenta, y una vez superados los 65 segundos, se visualizaba en las gráficas un pico que no se correspondía con la realidad.

## **6.2 CÓDIGO DE MATLAB**

Se empezó a trabajar en Matlab, ya que era un entorno conocido. Como se había trabajado anteriormente con Matlab y bluetooth, era más sencillo buscar la información necesaria para poder cumplir con los objetivos.

Se instalaron los siguientes complementos de Matlab para poder utilizar comandos que no estaban incluidos en Matlab:

- **Matlab Support package for Arduino Hardware** (version 19.2.2) [49].
- **Instrument Control Toolbox** (version 4.1) [50].
- **Control System Toolbox** (version 10.7) [51].
- **Optimization Toolbox** (version 8.4) [52].

Se comenzó por identificar, cómo detectaba Matlab, al módulo bluetooth con el comando *instrhwinfo*. Al no cambiar el nombre del módulo bluetooth, el Matlab lo detectaba como HC-05. A continuación, se creó una variable llamada *bt* para poder establecer la conexión con el módulo con el comando *Bluetooth('HC-05',1)*.

Después, se estableció la conexión con el comando *fopen(bt)*. Y con el comando *fread(bt,1)* Matlab pide al módulo que le envíe el primer dato que tiene en cola y lo lea como un número. Se comprobó que, al enviar letras desde el módulo, se traducían con este comando a números, coincidiendo la letra con el número asignado en el código ASCII. Más tarde, se modificó el comando para recibir dos datos a la vez y que, Matlab, los guardaba como vectores.

Se introdujo, también, el comando *fscanf(bt,1)* que pedía el primer dato en cola al módulo y Matlab lo leía como una letra. Esto se utilizó para identificar si el dato recibido pertenecía al sensor Hall o al anemómetro, para poder guardar el dato recibido en su vector correspondiente.

Después, se iban dibujando las gráficas de las velocidades según se iban recibiendo los nuevos datos. Se visualizaban los datos con el comando *plot(x,y)*; en este caso, se mostraría en una gráfica la variable x en función de la variable y.

Para mantener la gráfica se utilizaba el comando *hold on*. Y para poder visualizar los datos en tiempo real, se utilizaba el comando *pause(100)*; se esperaban 100 ms antes de continuar la ejecución del código.

Cada vez que se finalizaba una prueba y no había finalizado el código de ejecutarse se debía cerrar la conexión entre Matlab y el módulo, con el comando *fclose(bt)*.

También, se podía reiniciar el Arduino. Se realizaba este paso para poder volver a ejecutar el programa sin errores.

En este punto, se comenzó la FASE 3. Se cambió el código para recibir los tiempos en Matlab y realizar los cálculos de velocidades, aceleraciones y potencia.

Probando el funcionamiento del código, se percató el equipo, que las gráficas iban mucho más lentas en la representación de los datos, que la turbina del aerogenerador. Por ello, se comentaron algunas partes del código no fundamentales, para no sobrecargar el ordenador en el que se trabajaba.

También se añadió al código de Matlab, para clasificar el dato recibido a su pala correspondiente. Esto fue porque al visualizar los datos, se observó que las gráficas no eran progresivas, pero sí periódicas. Al separarlos, según a la pala que pertenecían, las gráficas eran lineales y mejores para realizar cálculos de velocidades, aceleraciones y potencia.

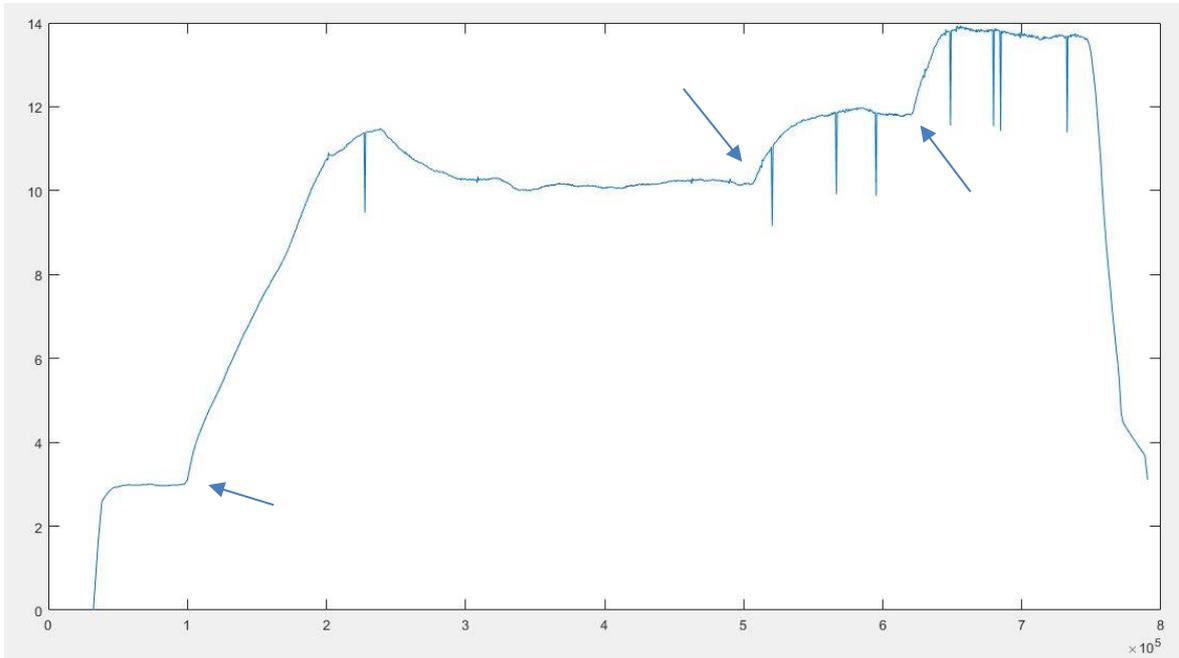
## **Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se realizaron numerosas pruebas para tener información sobre el comportamiento del aerogenerador. Estas pruebas permitieron, no solamente llegar a unos resultados finales, sino que facilitaron el análisis del proceso, introduciendo las mejoras correspondientes en cada momento. Así, se consiguieron resolver dificultades, algunas de las cuales precisan de una investigación más exhaustiva.

Se ha conseguido llegar a unos resultados finales, dentro de lo esperado, aunque la inversión del tiempo empleado, al comienzo del proyecto, ha sido muy superior al previsto y esto ha mermado el tiempo final disponible. Dicho de otro modo, si se hubiesen conseguido la transmisión de datos y la visualización de éstos en los plazos previstos inicialmente, se podría haber dedicado más tiempo a la optimización.

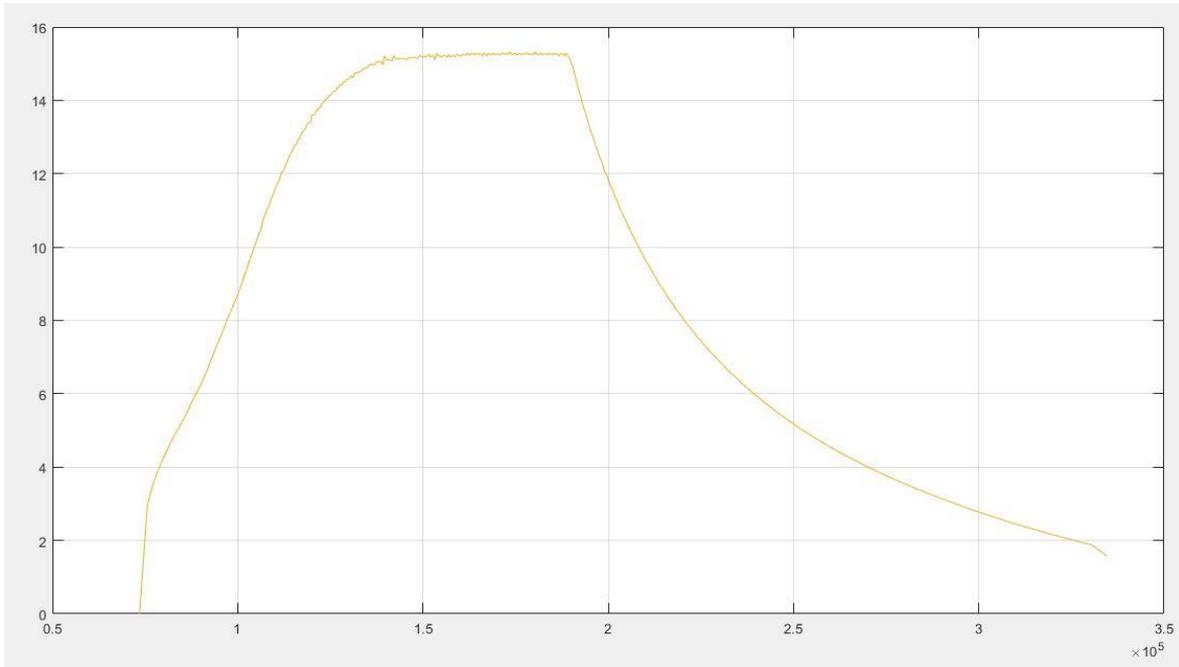
Como ya se ha comentado, se hicieron pruebas con un ventilador a una distancia alejada, a baja potencia, y a una distancia cercana a baja, media y alta potencia.

En la Gráfica 11 se muestra la prueba del comportamiento del aerogenerador al ser impulsado por un ventilador alejado y a baja potencia. Hay que destacar que se observa grandes cambios en la velocidad de la turbina, esto se produjo porque se modificaron las palas exteriores durante el ensayo para comprobar si influía el ángulo de ataque de las palas (tal y como indican las flechas en la gráfica siguiente). Gracias a este ensayo se comprendió la importancia de por qué se habían diseñado esas palas exteriores y también que el aerogenerador podía funcionar con pequeñas corrientes de aire. También hay que mencionar que la frenada fue manual porque ya se poseían varias curvas de frenada de la turbina, como se muestran a continuación.



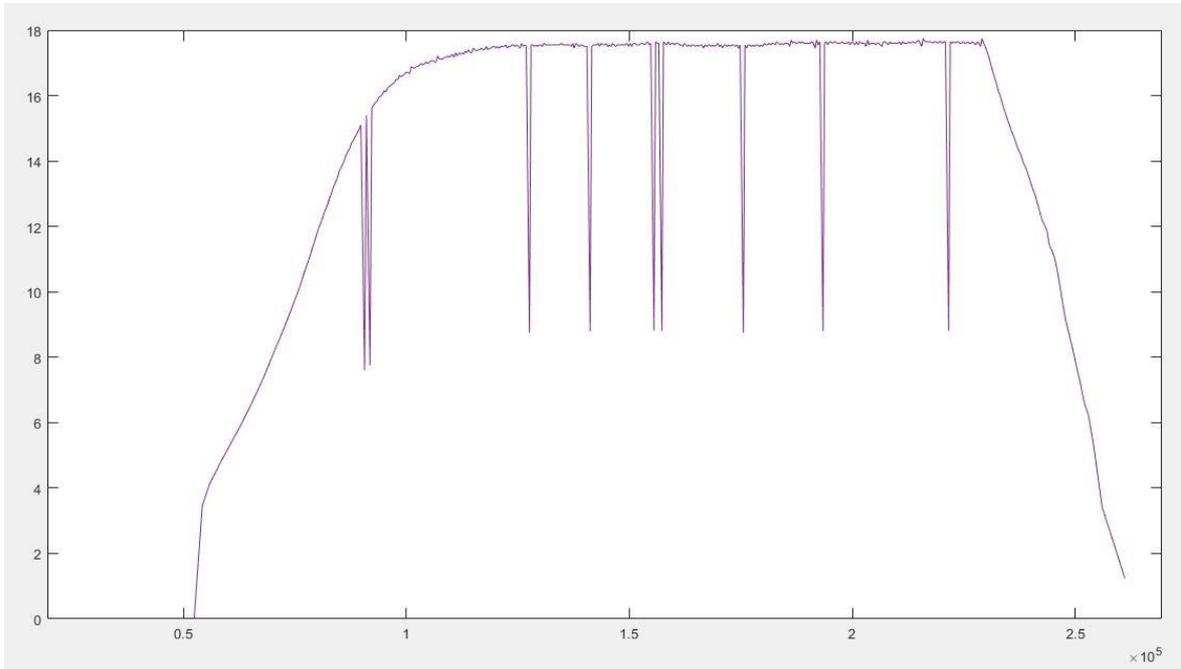
*Gráfica 11: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*

Después, Gráfica 12 se corresponde con el ensayo del aerogenerador al situarse el ventilador cerca de éste y a baja potencia. Además, esta gráfica representa cómo deberían visualizarse todos los ensayos si no se tuviese el problema de los picos de caída en la velocidad de la turbina. Y es que, al superar cierta velocidad el aerogenerador empieza a oscilar y provoca que el sensor de efecto Hall, se salte el paso de una pala, provocando una bajada de velocidad pronunciada. Al sólo registrar los datos de una sola pala, la velocidad se reduce a la mitad porque, al saltarse un dato, tarda dos vueltas en obtener el nuevo dato.

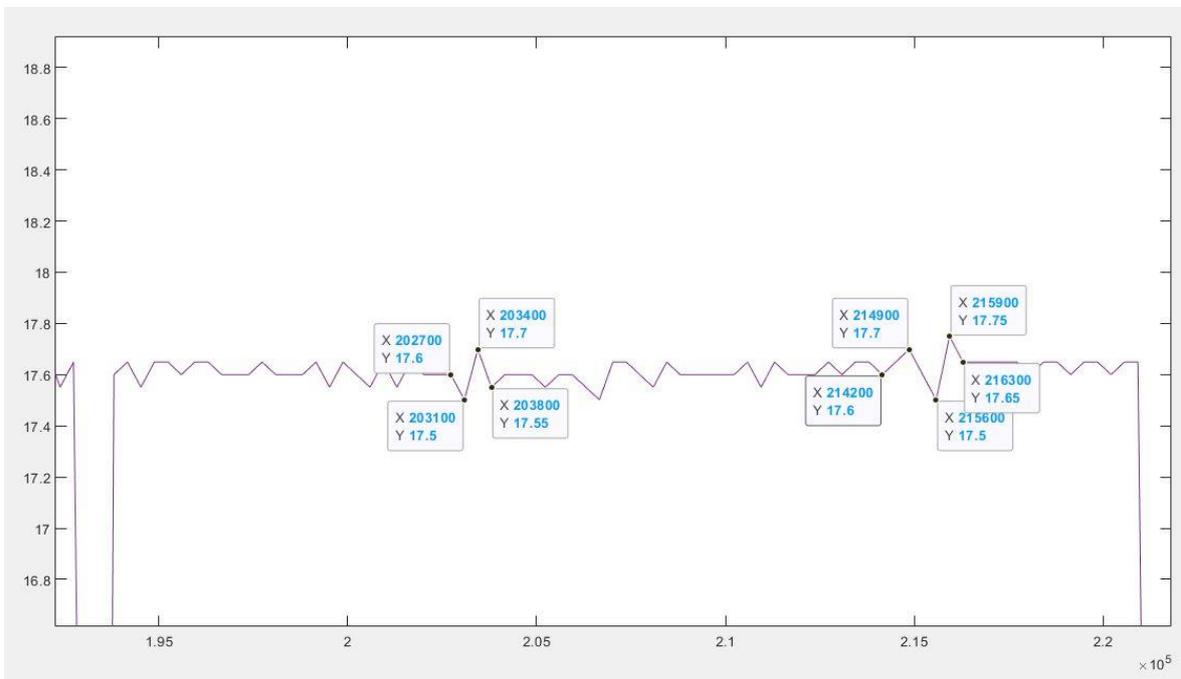


*Gráfica 12: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*

A continuación, en la Gráfica 13 se visualiza un aumento en la velocidad de rotación comparándolo con la anterior gráfica debido a que en esta prueba el ventilador se sitúa otra vez cerca, pero con una potencia media. Se frena también de forma manual y por ello la caída de velocidad no tiene forma de exponencial, como en la anterior gráfica, sino que posee una pendiente más abrupta. En este ensayo aparece uno de esos problemas de los que no se ha sabido interpretar su procedencia. Aunque no se vea a simple vista en esta gráfica, se ha ampliado para poder observar este fenómeno con mayor claridad (Gráfica 14).



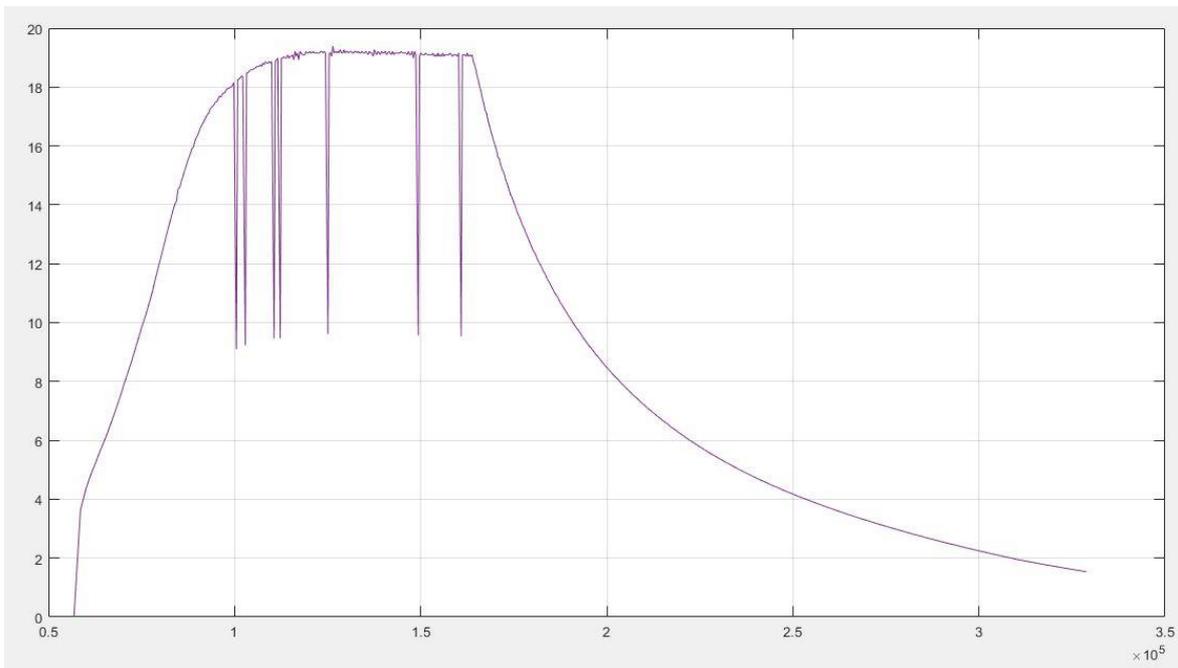
*Gráfica 13: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*



*Gráfica 14: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms) ampliado.*

De vez en cuando, se produce una disminución de la velocidad y, a continuación, una aceleración. Esto sería lo normal, ya que frente a un flujo de aire continuo y constante debería visualizarse una línea recta; pero, al girar la turbina, no siempre está empujando las palas, sino que, a veces, el aire provoca que la turbina se frene. Aunque se frene no llega a pararse, ya que la fuerza que impulsa la turbina es mayor que la que le frena, gracias al diseño desarrollado.

Por último, la Gráfica 15 muestra el comportamiento del aerogenerador al situar un ventilador cerca suyo, a máxima potencia. Al igual que en el anterior ensayo se visualiza un aumento de la velocidad de rotación de la turbina producida por el aumento de potencia. Con la realización de este ensayo se llegó a registrar una velocidad máxima de la turbina de 181 rpm aproximadamente.



*Gráfica 15: Velocidad de la turbina (rad/s) frente al tiempo transcurrido (ms).*

Para resumir, se cumplieron los objetivos marcados y, por tanto, los resultados fueron satisfactorios, a pesar de las adversidades que fueron surgiendo durante el desarrollo del proyecto. Hay que hacer hincapié, no obstante, que se hubiese querido desarrollar aún más el último objetivo, relacionado con la optimización del diseño del aerogenerador.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con la conclusión de este proyecto se ha completado una etapa, pero se dejan abiertas diversas opciones que permitirán la investigación y el perfeccionamiento de los aerogeneradores verticales para el uso doméstico. Además del proyecto, en general y del producto conseguido, en particular, el equipo de trabajo ha evolucionado positivamente a lo largo de todo este tiempo, incluso, a pesar de las dificultades inesperadas asociadas a la pandemia mundial. A nivel individual, el crecimiento también ha sido notable.

Inicialmente, se marcaron unos objetivos que se han cumplido ampliamente, es decir:

- Respecto al objetivo **“establecer sensores en el aerogenerador para obtener las variables físicas del aerogenerador y su entorno”**, desarrollado por D. Antonio Serda, se puede determinar que, al comienzo, el equipo se centró en la obtención de dos variables (la velocidad de rotación del aerogenerador y la velocidad de rotación del anemómetro). Pero, una vez que se avanzó en el resto de los objetivos, estas dos variables pasan a un segundo plano a la vez que la variable tiempo cobra protagonismo (sólo con la velocidad, como dato, no se puede calcular, con precisión, la potencia). Se envían los tiempos medidos al Matlab para calcular con exactitud las velocidades, aceleraciones y potencia del aerogenerador y las velocidades y aceleraciones del anemómetro.
- Respecto a otro de los objetivos, **“transmitir los datos recibidos de los sensores a través del bluetooth”**, a cargo de D. Javier Colinas, su logro favoreció que se ampliaran las metas del proyecto introduciéndose metas nuevas como que el equipo centrara sus esfuerzos en conseguir la visualización de los datos recibidos y en calcular otros datos de interés como la inercia del aerogenerador y las velocidades y aceleraciones anteriormente mencionadas.
- Un tercer objetivo: **“conseguir la optimización del aerogenerador”**, desarrollado por todos los miembros del equipo, no pudo completarse, desafortunadamente. No

obstante, se realizaron importantes avances durante la visualización de los datos recibidos, como, por ejemplo:

- La variación del ángulo de ataque de las palas exteriores, debido a que es una variable muy correlacionada con la velocidad de rotación de la turbina.
  - El funcionamiento correcto del aerogenerador, tanto con vientos fuertes como con vientos débiles.
  - Las oscilaciones que sufría el aerogenerador provocaban la mala obtención de los datos para analizar su comportamiento, pero como se muestra en las gráficas, la turbina no se ve afectada en su velocidad por estas oscilaciones.
- Uno de los objetivos principales, ***“conseguir el correcto funcionamiento del aerogenerador diseñado”***, tampoco pudo completarse en su totalidad. En la actualidad, persisten una serie de incidentes de procedencia desconocida; es decir, no se tiene certeza de si son humanos, estructurales, de lógica o si son debidos a la pérdida de información. A pesar de ello, sí se puede afirmar que el equipo ha conseguido que el aerogenerador diseñado sea funcional.

Como ya se ha indicado, este proyecto puede seguir avanzando en la resolución de los problemas planteados y mediante tareas que podrían completarse. Las tareas que se plantean son, por ejemplo:

- ***Elaboración de un sistema de frenado mecánico***, similar al que se utiliza en los ascensores. El equipo probó a desarrollar un sistema que estuviese conectado al Arduino y que frenase la turbina al superar cierto umbral; pero el servomotor no funcionaba exactamente como se quería y se tuvo que desechar ese sistema. Se propuso la investigación de este tema, pero al desarrollar la transmisión y visualización, el equipo se centró en la interpretación de los datos obtenidos.
- El ***paso del bluetooth al Wi-Fi***. Esta es una de las tareas analizadas a lo largo del proyecto. Se considera necesario realizar este cambio, debido a la limitación de distancia que posee el HC-05. Pero el equipo no poseía los conocimientos para

- desarrollar una red Wi-Fi que pudiese solucionar los problemas que suponía el mismo. No se descarta la idea de utilizar transmisión de los datos por frecuencia.
- ***Diseño y desarrollo de un sistema que permita el cambio de ángulo de las palas exteriores.*** Esta tarea resulta de gran importancia pues influye directamente en la potencia que se extrae de la turbina. Este sistema se requiere por dos razones: la primera, porque en caso de que no se quisiese que el aerogenerador funcionase se cerrarían las palas exteriores impidiendo la entrada del viento; y, la segunda, porque normalmente, cuando aparecen corrientes de aire superiores a las nominales y que podrían provocar daños al aerogenerador, se regularía el ángulo de las palas para recibir la energía del viento evitando sufrir daños y, así, no desperdiciar toda esa energía, de tal manera que la corriente de aire sea similar a cuando se trabaja con condiciones nominales
  - ***Creación de una aplicación o sistema que permita la conexión a través de bluetooth a la vez que la visualización de los datos recibidos.*** Actualmente se utiliza Matlab, pero sus licencias no son baratas y para cumplir con el objetivo de que el producto final sea barato se debe procurar disminuir todos los costes posibles. Se usó Matlab debido a la experiencia del equipo en su entorno de trabajo y dio muy buenos resultados al permitir cumplir con los objetivos establecidos.
  - ***Desarrollo de un convertidor.*** Con la ayuda de la electrónica de potencia habría que diseñar un convertidor que transformara la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica y que además se conectara a la Red. También, se podría desarrollar un sistema que permitiera la conexión al domicilio a la vez que, a la Red, de tal manera que, si hubiera algún dispositivo de la vivienda que necesitara energía, se la entregaría el aerogenerador y lo sobrante se enviaría a la Red. En el caso de no tener nada conectado en el domicilio abastecería a la Red.

## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CurioSfera. “HISTORIA DE LA RUEDA- ORIGEN, INVENTOR Y EVOLUCIÓN “. 6 de junio de 2020. <https://curiosfera-historia.com/historia-rueda-origen-inventor-evolucion/> .
- [2] Areatecnologia. “DESCUBRIMIENTO DE LA ELECTRICIDAD”. 6 de junio de 2020. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/descubrimiento-de-la-electricidad.html> .
- [3] Fundación Endesa. “LA ENERGÍA”. 6 de junio de 2020 <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-que-es-la-energia> .
- [4] Real Academia Española. “RENOVAR”. 6 de junio de 2020. <https://dle.rae.es/renovar?m=form> .
- [5] Julián Pérez Porto y Ana Gardey. “DEFINICIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE”. 6 de junio de 2020. <https://definicion.de/energia-renovable/> .
- [6] Rinconeducativo. “FUENTES DE ENERGÍA NO RENOVABLES”. 6 de junio de 2020. <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/fuentes-de-energia-no-renovables#:~:text=Energ%C3%ADa%20no%20renovable%20se%20refiere,de%20producci%C3%B3n%20o%20extracci%C3%B3n%20viable> .
- [7] Reuters. “CENTRAL NUCLEAR DE COFRENTES” 6 de junio de 2020. <https://www.lasprovincias.es/comunitat/cuando-cerrara-central-nuclear-cofrentes-valencia-20190323182735-nt.html> .
- [8] Valerio Merino. “MINA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA”. 8 de junio de 2020. [https://www.abc.es/economia/abci-gobierno-destinara-2130-millones-para-cerrar-26-minas-carbon-antes-2018-201605271245\\_noticia.html](https://www.abc.es/economia/abci-gobierno-destinara-2130-millones-para-cerrar-26-minas-carbon-antes-2018-201605271245_noticia.html) .
- [9] Manuel Planelles. “PLATAFORMA PETROLERA CASABLANCA, UBICADA FRENTE A LA COSTA DE TARRAGONA”. 8 de junio de 2020. [https://elpais.com/economia/2015/12/29/actualidad/1451413699\\_020379.html](https://elpais.com/economia/2015/12/29/actualidad/1451413699_020379.html) .
- [10] Remica. “TIPOS DE ENERGÍA: DIFERENCIAS ENTRE RENOVABLES Y NO RENOVABLES”. 6 de junio de 2020. <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/> .
- [11] Smartgridsinfo. “PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA”. 6 de junio de 2020. <https://www.smartgridsinfo.es/2018/03/20/alten-consigue-financiacion-construir-central-solar-fotovoltaica-namibia-45-mw> .

- [12] Central solar térmica. “CENTRAL SOLAR PS10, SANLÚCAR LA MAYOR”. 6 de junio de 2020. <http://tecnocentralsolartermica.blogspot.com/2014/02/que-es-una-central-solar-termica.html> .
- [13] Iberdrola. “CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ALDEADÁVILA (SALAMANCA, ESPAÑA)”. 6 de junio de 2020. <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/que-es-energia-hidroelectrica> .
- [14] Fundación endesa. “CENTRALES DE BIOMASA Y SUS TIPOS”. 6 de junio de 2020. <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa> .
- [15] Greenalia. “VISTA AÉREA DE LA PLANTA DE BIOMASA DE GREENALIA EN CURTIS”. 6 de junio de 2020. <https://www.laopinioncoruna.es/economia/2019/10/18/greenalia-finaliza-mayor-central-gallega/1444577.html> .
- [16] Enrique González. “¿CÓMO SE OBTIENE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ?”. 6 de junio de 2020. <https://www.webconsultas.com/belleza-y-bienestar/medioambiente/como-se-obtiene-energia-mareomotriz> .
- [17] Wanafrica. “PLANTA GEOTÉRMICA”. 6 de junio de 2020. <http://www.wanafrica.com/economia/energia/etiopia-construira-planta-geotermica-de-generacion-electrica/> .
- [18] Tomàs Bigordà. “EL PARQUE EÓLICO MÁS GRANDE DE ESPAÑA ESTÁ EN EL ANDÉVALO (HUELVA)”. 6 de junio de 2020. <https://www.renovablesverdes.com/el-parque-eolico-mas-grande-de-espana-esta-en-el-andevalo-huelva/> .
- [19] Red Eléctrica de España. “EVOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN RENOVABLE Y NO RENOVABLE”. 14 de junio de 2020. <https://www.ree.es/es/datos/generacion/evolucion-renovable-no-renovable> .
- [20] David Martínez Quitana. “DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL”. Antecedentes página 27. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [21] David Martínez Quitana. “DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL”. Capítulo 3. Antecedentes. Página 28. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [22] Wikipedia. “AEROGENERADOR DARRIEUS”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador\\_Darrieus](https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_Darrieus) .

- [23] Wikipedia. “UNA TURBINA EÓLICA DARRIEUS UTILIZADA PARA GENERAR ELECTRICIDAD EN ISLAS MAGDALEN”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador\\_Darrieus](https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_Darrieus) .
- [24] CC BY-SA 3.0. “CÓMO FUNCIONA UNA TURBINA GIROMILL”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador\\_Darrieus](https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_Darrieus) .
- [25] Wikipedia. “ROTOR SAVONIUS”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius) .
- [26] CC BY-SA 2.0. “ESQUEMA DE UNA TURBINA SAVONIUS DE DOS DESTORNILLADORES”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius) .
- [27] CC BY-SA 3.0. “FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA SAVONIUS”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_Savonius](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius) .
- [28] Carlos Diago Vidal. “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA USO DOMÉSTICO”. Capítulo 1.2. Tipos de aerogeneradores y principios de funcionamiento. Página 14. 29 de junio de 2020. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf?sequence=1> .
- [29] CC BY-SA 3.0. “TURBINA DARRIEUS-SAVONIUS COMBINADA USADA EN TAIWÁN”. 29 de junio de 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador\\_Darrieus](https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador_Darrieus) .
- [30] Arduino. “ARDUINO UNO REV3”. 9 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> .
- [31] Arduino. “ARDUINO UNO”. 9 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> .
- [32] Electron perdido. “PROTOBOARD 400 AGUJEROS (REF: 0037)”. 14 de julio de 2020. <https://electronperdido.com/shop/herramienta/prototipado/placa-de-prototipado-protoboard-400-agujeros/> .
- [33] Prometec. “EL MÓDULO BLUETOOTH HC-05”. 14 de julio de 2020. <https://www.prometec.net/bt-hc05/> .
- [34] Tech Krowd. “ARDUINO: CÓMO CONFIGURAR UN MÓDULO BLUETOOTH MAESTRO (HC-05) | TECH KROWD”. 14 de julio de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=9pMujGaZwZw> .

- [35] Amazon. “ANEMÓMETRO SENSOR DE VELOCIDAD VIENTO CON RJ11 PARA ESTACIÓN METEOROLÓGICA N25FR WH1080 VÁLIDO UNO MEGA”. 14 de julio de 2020. <https://www.amazon.es/Anem%C3%B3metro-Velocidad-Estaci%C3%B3n-Meteorol%C3%B3gica-Arduino/dp/B07BMVYBW9> .
- [36] Arduino. “GROVE - HALL SENSOR”. 14 de julio de 2020. <https://store.arduino.cc/grove-hall-sensor> .
- [37] Fritzing. “HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA DISEÑAR PROYECTOS”. 14 de julio de 2020. <https://fritzing.org/> .
- [38] Lorena Arbeloa Sola. “DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL”. 4 de julio de 2020. <http://academica.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6667/57946.pdf;jsessionid=F3A3296CF5F9B104DA356E5A3D791F8D?sequence=1> .
- [39] David Martínez Quitana. “DISEÑO Y CÁLCULO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL”. 4 de julio de 2020. [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf) .
- [40] Macbook. “CARACTERÍSTICAS DEL MACBOOK AIR DE 13 PULGADAS”. 14 de julio de 2020. <https://www.macbook.es/macbook-air/> .
- [41] Naciones Unidas. “OBJETIVOS Y METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE”. 14 de julio de 2020. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/> .
- [42] Naciones Unidas. “OBJETIVO 13: ADOPTAR MEDIDAS URGENTES PARA COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS”. 14 de julio de 2020. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> .
- [43] Naciones Unidas. “OBJETIVO 7: GARANTIZAR EL ACCESO A UNA ENERGÍA ASEQUIBLE, SEGURA, SOSTENIBLE Y MODERNA”. 14 de julio de 2020. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> .
- [44] Naciones Unidas. “OBJETIVO 12: GARANTIZAR MODALIDADES DE CONSUMO Y PRODUCCIÓN SOSTENIBLES”. 14 de julio de 2020. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> .
- [45] RealTerm. “REALTERM: SERIAL TERMINAL”. 14 de julio de 2020. <https://realterm.sourceforge.io/> .
- [46] Lulzzek Clukk. “TUTORIAL REALTERM”. 14 de julio de 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=FGLKvjm3FeI> .

- [47] Mathworks. “MATLAB”. 14 de julio de 2020.  
<https://es.mathworks.com/products/matlab.html> .
- [48] Kst. “KST – VISUALIZE YOUR DATA”. 14 de julio de 2020. <https://kst-plot.kde.org/> .
- [49] Mathworks. “MATLAB SUPPORT PACKAGE FOR ARDUINO HARDWARE”. 14 de julio de 2020. <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47522-matlab-support-package-for-arduino-hardware> .
- [50] Mathworks. “INSTRUMENT CONTROL TOOLBOX”. 14 de julio de 2020.  
<https://es.mathworks.com/products/instrument.html> .
- [51] Mathworks. “CONTROL SYSTEM TOOLBOX”. 14 de julio de 2020.  
<https://es.mathworks.com/products/control.html> .
- [52] Mathworks. “OPTIMIZATION TOOLBOX”. 14 de julio de 2020.  
<https://es.mathworks.com/products/optimization.html> .

## Capítulo 10. ANEXO I

### 10.1 CÓDIGO DE ARDUINO

```
#include <Servo.h> // Incluye la librería necesaria para el servomotor del freno
#include <SoftwareSerial.h> // Incluimos la librería SoftwareSerial
SoftwareSerial BT(10,11); // Define los pines RX y TX del Arduino conectados al
Bluetooth (necesario para la función de envío de datos)
Servo freno; // Crea un objeto para controlar el servomotor del freno

//Variables

//Sensor hall
int ah; // Comprobación de inicio de conmutación en el sensor hall
unsigned long toh=0, tfh, dth, kh=12000, vh, vhma=200;
// Variables no empleadas
// unsigned long vh2, dvh, aah;

//Anemómetro
int aan; // Comprobación de inicio de conmutación en el anemómetro
unsigned long toa=0, tfa, dta, ka=666667, va, vama=10000;
// Variables no empleadas
// unsigned long va2, dva, aa;

// Freno
int pos, poso=90, poslims=180, poslimi=90;

// Programa principal (Main)

// Inicialización
void setup()
{
  BT.begin(9600); // Se inicializa el puerto serie BT (Para Modo AT 2) para
  permitir establecer conexión vía bluetooth (necesario para la función de envío de
  datos).
  Serial.begin(9600);

  pinMode(2, INPUT); // Asigna el pin 2 al sensor Hall
  pinMode(3, INPUT); // Asigna el pin 3 al anemómetro
  freno.attach(4); // Asigna el pin 4 al servomotor del freno

  freno.write(poso); // Coloca el freno en la posición inicial

  delay (1000); // Espera 1s antes de iniciar el bucle
}
```

```
// Bucle principal
void loop()
{
  if(digitalRead(3)==HIGH) // Si el anemómetro no detecta conmutación
  {
    aan=1;
    servo(); // Ejecuta la función de movimiento del freno
  }

  if(digitalRead(2)==HIGH) // Si el sensor hall no detecta conmutación
  {
    ah=1;
    servo(); // Ejecuta la función de movimiento del freno
  }

  if(digitalRead(3)==LOW) // Si el anemómetro detecta conmutación
  {
    if(aan==1) // Si la conmutación es detectada justo después de la ausencia de
    conmutación del anemómetro
    {
      tfa = millis(); // Guarda el tiempo de la conmutación actual del anemómetro
      dta = tfa-toa; // Calcula el diferencial de tiempo respecto a la
      conmutación anterior del anemómetro
      toa = millis(); // Guarda el tiempo de la conmutación actual para ser
      empleado en la siguiente conmutación del anemómetro

      if(dta!=0) // Si el diferencial de tiempo del anemómetro no es 0
      {
        va = ka/dta; // Calcula la velocidad del viento
        //dva = va-va2;
        //va2 = va;
        //aa = dva/dta;
      }
      else // Si el diferencial de tiempo del anemómetro es 0
      {
        va = 9999; // Fija una velocidad del viento muy alta
        Serial.print("error va"); // Indica mediante un mensaje en el "Serial"
        que se ha producido un error en el anemómetro
        //dva = va-va2;
        //va2 = va;
        //aa = 10e6;
      }

      // Indica en el "Serial" la velocidad del viento
      Serial.print("tfa:");
      Serial.print(tfa);
      Serial.println('\t');

      enviar(1); //Función de envío de datos (desarrollada por Javier Colinas
      Cano)
    }
  }
}
```

```
aan=0; // Asegura que no se vuelva a calcular el diferencial de tiempo hasta
la siguiente conmutación real del anemómetro

servo(); // Ejecuta la función de movimiento del freno
}

if(digitalRead(2)==LOW) // Si el sensor hall detecta conmutación
{
    if(ah==1) // Si la conmutación es detectada justo después de la ausencia de
conmutación del sensor hall
    {
        tfh = millis(); // Guarda el tiempo de la conmutación actual del sensor
hall
        dth = tfh-toh; // Calcula el diferencial de tiempo respecto a la
conmutación anterior del sensor hall
        toh = millis(); // Guarda el tiempo de la conmutación actual para ser
emplado en la siguiente conmutación del sensor hall

        if(dth!=0) // Si el diferencial de tiempo del sensor hall no es 0
        {
            vh = kh/dth; // Calcula la velocidad angular de la turbina
            //dvh = vh-vh2;
            //vh2 = vh;
            //aah = dvh/dth;
        }
        else // Si el diferencial de tiempo del sensor hall es 0
        {
            vh = 199; // Fija una velocidad de la turbina muy alta
            Serial.print("error vh"); // Indica mediante un mensaje en el "Serial"
que se ha producido un error en el sensor hall
            //dvh = vh-vh2;
            //vh2 = vh;
            //aah = 10e6;
        }

        // Indica en el "Serial" la velocidad angular de la turbina
        Serial.print("tfh:");
        Serial.print(tfh);
        Serial.println('\t');

        enviar(2); //Función de envío de datos (desarrollada por Javier Colinas
Cano)
    }

    ah=0; // Asegura que no se vuelva a calcular el diferencial de tiempo hasta
la siguiente conmutación real del sensor hall

    servo(); // Ejecuta la función de movimiento del freno
}
}

//Función de movimiento del freno
```

```

void servo()
{
    pos = freno.read(); // Detecta la posición actual del servomotor

    if((va>=vamax || vh>=vhmax) && pos<poslims) // Si la velocidad del viento o la
    velocidad angular de la turbina superan o igualan los valores límite establecidos
    y la posición del servomotor no es la de frenado
    {
        // pos +=1; Inicialmente se encontraba así, por ello el servomotor tenía
        problemas puesto que había perturbaciones en su movimiento y en el par.
        pos = poslims; // El servomotor se sitúa en posición de frenado. Javier
        Colinas Cano sugirió este cambio y ahora funciona correctamente.
    }

    if(va<vamax && vh<vhmax && pos>poslimi) // Si la velocidad del viento y la
    velocidad angular de la turbina son inferiores a los valores límite establecidos
    y la posición del servomotor no es la de máxima apertura
    {
        // pos -=1;
        pos = poslimi; // El servomotor se sitúa en posición de apertura
    }

    freno.write(pos); // Envía la señal correspondiente al servomotor
}

//Función de envío de datos (desarrollada por Javier Colinas Cano)
void enviar(int e) //esta función recibe un 1 o un 2 según si el dato a enviar es
del anemómetro o del sensor de efecto hall respectivamente.
{
    //El módulo bluetooth HC-05 solo puede enviar datos que ocupen 8 bits
    como máximo, por tanto, para poder enviar los datos mayores se usarán
    variables auxiliares para permitir el envío de dato completo.
    static int d;
    static int f;
    if (e==1)
    {
        f=tfa>>16;
        d=tfa>>8;
        BT.write(65); //se envía un número que al ser recibido en matlab se
        lee según el código ASCII y se traduce como una A el 65 y una H el
        72, haciendo referencia a los datos recibidos del anemómetro y del
        sensor de efecto Hall respectivamente.
        BT.write(f);
        f = 0; //se actualizan las variables para evitar posibles errores.
        BT.write(d);
        d = 0;
        BT.write(tfa);
    }
    else
    {
        f=tfh>>16;
        d=tfh>>8;
    }
}

```

```
BT.write(72);  
BT.write(f);  
f = 0;  
BT.write(d);  
d = 0;  
BT.write(tfh);  
}  
}  
}
```

## 10.2 CÓDIGO DE MATLAB

```
clear all  
tic % Función de matlab permite contar el tiempo que pasa desde que se  
% inicia la función. Cada vez que se llame a la función toc se guardará el  
% tiempo que ha pasado.  
bt = Bluetooth('HC-05',1); %Se guarda la dirección de bluetooth en la  
% variable bt para poder establecer conexión con el módulo bluetooth  
fopen(bt); % Se abre el canal de conexión que permite la transferencia de  
% datos de arduino al matlab. Además, cambiará la velocidad a de parpadeo  
% del módulo cuando se conecten este y el matlab tras ejecutar esta línea  
% de código  
pause(2); % Espera 2 segundos a que se establezca conexión para no comenzar  
% con el código.  
%% Variables auxiliares  
cont1 = 1; %un contador para ta  
cont2 = 1; %un contador para th  
%% Variables auxiliares que reciben los datos del bluetooth  
a = 0;  
b = 0;  
c = 0;  
%% Vectores en los que se va a guardar los tiempos que se reciben a través  
% de bluetooth  
ta = []; % Tiempo del anémometro  
th = []; % Tiempo del sensor de efecto Hall  
%% Vectores de tiempo para ordenar los datos según los recibe matlab  
tiempo1 = [];  
tiempo2 = [];  
%% Vector que guarda las 2 gráficas  
%s = [];  
%% Variables auxiliares para diferenciar a que pala pertenece el dato.  
m = 1; % Contador para ir guardando el dato en las diferentes palas  
% Contadores para cada pala  
n1 = 1;  
n2 = 1;  
n3 = 1;  
n4 = 1;  
n5 = 1;  
%% Datos  
Jg = 0.147761; %2.2342;
```

```

Ra = 70e-3;
ca = 21*pi/200;
wa(1)=0;
aa(1)=0;
coma=2;
%% Bucle infinito hasta que se superen los 4 millones de datos recibidos
% de ta
while (cont1<4000000)
    %% Recepción de los datos
    c = fscanf(bt,'%c',1); % Se recibe solo 1 dato y se lee en lenguaje C,
    % es decir, según el código ASCII. Sólo recibirá un 65 o un 72 que en
    % lenguaje C se traduce a una A o a una H respectivamente. Sirve para
    % diferenciar a cual pertenece el dato que se va a recibir.
    a = fread(bt,3); % Esta función pide que le envíe 3 datos, que
    % corresponden a 24 bits. Esto se debe a que el módulo bluetooth solo
    % puede enviar datos que ocupen un máximo de 8 bits. Por ello, se ha
    % preparado el código para enviar los datos divididos en 3.
    b = a(1)*256*256+a(2)*256+a(3); % Esta línea vuelve a juntar los 3
    % datos recibidos para dar lugar al número que se tenía que enviar

    %% Organización de los datos recibidos
    if (c == 'A') % Identifica si el dato leído pertenece a ta o a th.
        ta(cont1) = b; % Guarda el dato recibido en el vector ta en la
        % posición cont1
        tiempo1(cont1) = toc; % Guarda el tiempo, contabilizado según matlab

    %% Parte de Antonio
    % Esta parte traduce los tiempos en velocidades lineales,
    % velocidades de rotación, aceleraciones lineales y de rotación

    %
    % if cont1>1 % Esto se debe a que no se puede calcular una
    % velocidad si no se tiene una diferencia de dos tiempos
    %
    %
    %
    wa(cont1) = (2*pi*1000/coma)/(ta(cont1)-ta(cont1-1));
    vvm(cont1) = ca*Ra*wa(cont1);
    %vkm(cont1) = 3.6*ca*Ra*wa(cont1);
    %aa(cont1) = (wa(cont1)-wa(cont1-1))/(ta(cont1)-ta(cont1-1));
    %avm(cont1) = ca*Ra*aa(cont1);
    %avkm(cont1) = 3.6*ca*Ra*aa(cont1);
    %
    %
    % A continuación se dibuja en una gráfica a la velocidad a
    % la que gira el anemómetro en rev/s
    %
    s(1) = subplot(2,1,1); % Sirve para crear una matriz de
    % figuras dividida en este caso en una matriz de 2 filas y una
    % columna
    %
    plot(tiempo1, vvm, '-'); % Sirve para dibujar en la figura
    % últimamente mencionada, es decir, que depende de la última
    % figura que se haya abierto
    %
    hold on % Sirve para mantener la figura a la vista, mientras
    % corre el código
    %
    grid % Esta función sirve para dividir la figura en celdas
    pause(0.001); % Esta función permite que la gráfica se vaya

```



```

%                               %Pmg1(n1) = Jg*(wg1(n1)*ag1(n1));
%                               %s(2) = subplot(2,1,2);
%                               plot(th1, wg1, '-');
%                               hold on
%                               grid
%                               pause(0.001);
%                               end
%                               n1 = n1+1; % Contador de la pala 1
%                               end
%                               % Pala 2
%                               if(m==2)
%                               th2(n2) = th(cont2);
%                               wgHz2(n2) = 1000/(th2(n2)-th2(n2-1));
%                               wg2(n2) = 2*pi*wgHz2(n2);
%                               wgrpm2(n2) = 60*wgHz2(n2);
%                               agHz2(n2) = (wgHz2(n2)-wgHz2(n2-1))/(th2(n2)-th2(n2-
1));
%                               ag2(n2) = 2*pi*agHz2(n2);
%                               agrpm2(n2) = 60*agHz2(n2);
%                               Pmg2(n2) = Jg*(wg2(n2)*ag2(n2));
%                               n2 = n2+1; % Contador de la pala 2
%                               end
%                               % Pala 3
%                               if(m==3)
%                               th3(n3) = th(cont2);
%                               wgHz3(n3) = 1000/(th3(n3)-th3(n3-1));
%                               wg3(n3) = 2*pi*wgHz3(n3);
%                               wgrpm3(n3) = 60*wgHz3(n3);
%                               agHz3(n3) = (wgHz3(n3)-wgHz3(n3-1))/(th3(n3)-th3(n3-
1));
%                               ag3(n3) = 2*pi*agHz3(n3);
%                               agrpm3(n3) = 60*agHz3(n3);
%                               Pmg3(n3) = Jg*(wg3(n3)*ag3(n3));
%                               n3 = n3+1; % Contador de la pala 3
%                               end
%                               % Pala 4
%                               if(m==4)
%                               th4(n4) = th(cont2);
%                               wgHz4(n4) = 1000/(th4(n4)-th4(n4-1));
%                               wg4(n4) = 2*pi*wgHz4(n4);
%                               wgrpm4(n4) = 60*wgHz4(n4);
%                               agHz4(n4) = (wgHz4(n4)-wgHz4(n4-1))/(th4(n4)-th4(n4-
1));
%                               ag4(n4) = 2*pi*agHz4(n4);
%                               agrpm4(n4) = 60*agHz4(n4);
%                               Pmg4(n4) = Jg*(wg4(n4)*ag4(n4));
%                               n4 = n4+1; % Contador de la pala 4
%                               end
%                               % Pala 5
%                               if(m==5)
%                               th5(n5) = th(cont2);
%                               wgHz5(n5) = 1000/(th5(n5)-th5(n5-1));
%                               wg5(n5) = 2*pi*wgHz5(n5);

```

```

% %          wgrpm5(n5) = 60*wgHz5(n5);
% %          agHz5(n5) = (wgHz5(n5)-wgHz5(n5-1))/(th5(n5)-th5(n5-
1));
% %          ag5(n5) = 2*pi*agHz5(n5);
% %          agrpm5(n5) = 60*agHz5(n5);
% %          Pmg5(n5) = Jg*(wg5(n5)*ag5(n5));
% %          n5 = n5+1; % Contador de la pala 5
%           m = 0;
%           end
%           m = m+1; % Contador para ir guardando los datos en
%           % diferentes palas
%
%           end
%           cont2 = cont2+1; % Se añade 1 al contador para guardar el próximo
%           % que se reciba en la siguiente posición del vector th
%       end
%       end
%       a = 0; % Se iguala a 0 para asegurarse de que no se repite un dato
end

%% Dar nombre a los datos de las figuras
% Estas líneas de código solo se ejecutan si se llega a salir del bucle
% infinito, es decir, cuando se llegen a los 4 millones de datos del
% anemómetro (esto se puede modificar)
xlabel(s(1),'tiempo');
ylabel('tiempo');
ylabel(s(1),'metros por segundo del anemometro');
ylabel('radianes por segundo del sensor hall');
%title(s(1),'grafica de registro de velocidades anemometro');
title('grafica de registro de velocidades sensor hall');

fclose(bt); % Esta última línea de código desconecta la conexión entre bluetooth
y
% matlab. Visualmente cambia el parpadeo del módulo bluetooth a mayor
% velocidad. Es necesario para que no surjan problemas. También se puede
% escribir este comando en el command window si se para el código antes de
% finalizar. Además se puede desconectar y volver a conectar (para que
% cambie el parpadeo) y borrar todos los datos del matlab con la línea de
% código clear all.

```