

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**Diseño de una práctica de laboratorio para la  
monitorización de un aerogenerador mediante  
hardware open-source.**

Design of a laboratory session for wind-turbine monitoring via  
open-source hardware.

Para acceder al Título de

Graduado en Ingeniería de Tecnologías de  
Telecomunicación

Javier Gracia Saiz

Noviembre – 2020



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

**Realizado por:** Javier Gracia Saiz

**Director del TFG:** Jesús María Mirapeix Serrano

**Título:** “Diseño de una práctica de laboratorio para la monitorización de un aerogenerador mediante hardware open-source”

**Title:** “Design of a laboratory session for wind-turbine monitoring via open-source hardware “

**Presentado a examen el día:** 2 de noviembre de 2020

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Adolfo Cobo García

Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús Mirapeix Serrano

Vocal (Apellidos, Nombre): Amparo Herrera Guardado

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG

(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado N.º

(a asignar por Secretaría)

***Diseño de una práctica de laboratorio para la monitorización de un aerogenerador mediante hardware open-source.***

Este trabajo tiene como objetivo la realización de una práctica de laboratorio para la asignatura `Energía y Telecomunicaciones`, impartida en el tercer curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. Con esta práctica se pretende que los alumnos sean capaces de comprender los aspectos fundamentales de teoría de aerogeneradores, siendo capaces de monitorizar la evolución de diferentes parámetros.

Para la práctica propuesta se utilizará la maqueta de un aerogenerador, un túnel de viento y un dispositivo hardware open-source (Arduino). Con estos elementos se obtendrán medidas de parámetros tales como la velocidad de viento o la energía generada por el aerogenerador. Relacionándolos con conceptos fundamentales como el efecto en el rendimiento del número de palas o el ángulo de ataque de las mismas.

***Design of a laboratory session for wind-turbine monitoring via open-source hardware.***

This project aims to carry out a laboratory session for the subject "Energy and telecommunications" taught in the third year of the Bachelors degree in Telecommunications. The goal is to enable students to easily understand fundamental aspects of wind-turbine theory, being able to monitoring the evolution of different key parameters.

For the proposed practice session, students will use a wind-turbine model, a wind tunnel and an open-source hardware device (Arduino). With these elements, measurements of parameters such as wind speed or energy produced by the wind-turbine will be obtained. Relating them with the fundamental concepts such as the effect on the performance of the number of blades or the attack angle of them will provide a more efficient learning process.

# Índice General

1.	Introducción .....	1
2.	Energías renovables .....	2
2.1.	Energías renovables en España y en el mundo .....	2
2.1.1.	Impacto del Covid-19 .....	5
2.2.	Energía eólica .....	9
2.2.1.	Teoría de los aerogeneradores .....	15
2.2.2.	Componentes y funcionamiento de un aerogenerador .....	16
3.	Elementos de la práctica .....	19
3.1.	Hardware open-source.....	19
3.2.	Arduino.....	19
3.2.1.	Arduino UNO.....	19
3.3.	Maqueta del aerogenerador y montaje .....	21
3.4.	Sensor DHT11 .....	24
3.4.1.	Características Sensor DHT11 .....	25
3.5.	Túnel de viento.....	25
4.	Desarrollo de la práctica .....	28
4.1.	Aplicación Excel (PLX-DAQ) .....	30
4.2.	Conexiones .....	31
4.3.	Programa de control .....	32
5.	Guion de la práctica .....	35
6.	Resultados de la práctica .....	39
7.	Conclusiones y líneas futuras.....	51
7.1.	Conclusiones .....	51
7.2.	Líneas futuras .....	51
8.	Bibliografía .....	53

## Índice de figuras

Figura 1. Contribuciones a la demanda de energía primaria global 1973-2015 (Fuente: IEA).....	3
Figura 2. Contribuciones a la demanda de energía primaria global 1973-2017 (Fuente: IEA).....	3
Figura 3. Descripción estadística detallada de la producción y consumo de energía en la UE (Fuente: EUROSAT).....	4
Figura 4. Estructura de la generación por tecnologías (Fuente: Red Eléctrica Española) .....	5
Figura 5. (A) Comparativo de la demanda entre 2005-2019. (B) Comparativo de demanda en los meses de marzo 2006-2020 (Fuente: Red Eléctrica Española).....	6
Figura 6. Demanda de energía 16 de enero de 2020 (Fuente: Red Eléctrica Española).....	7
Figura 7. Demanda de energía 16 de marzo de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española).....	7
Figura 8. Demanda de energía 31 de marzo de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española).....	8
Figura 9. Demanda de energía 8 de julio de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española).....	8
Figura 10. Estadísticas de países productores de energía eólica 2005-2017 (Fuente: IEA).....	10
Figura 11. Detalle de países productores de energía eólica (Fuente: IEA).....	10
Figura 12. Potencia eólica acumulada en todo el mundo hasta 2017 (Fuente: EurObserv'ER 2018)	11
Figura 13. Gráfico comparativo de ruido producido en dB (Fuente: GE Global Research / National Institute of Deafness).....	12
Figura 14. Planta de almacenamiento en Barasoain, Navarra (Fuente: Acciona) .....	13
Figura 15. Parque eólico Walney Extension, Reino Unido.....	14
Figura 16. Proceso de montaje del proyecto "Elican".....	14
Figura 17. Modelo de Betz. (Fuente: <a href="http://bibing.us.es">http://bibing.us.es</a> ).....	16
Figura 18. Detalle de componentes situados en la góndola de un aerogenerador (Fuente: <a href="http://energiasrenovadas.com">http://energiasrenovadas.com</a> ).....	17
Figura 19. Esquemático de la placa Arduino UNO (Fuente: Fritzing) .....	20
Figura 20. (Izq.) Anclaje de la base. (Dcha.) Inserción de mástil en la base. ....	21
Figura 21. (Izq.) Montaje de la estructura de la góndola. (Dcha.) Unión de la estructura de la góndola con el mástil.....	22
Figura 22. (Izq.) Sujeción para el rotor. (Dcha.) Ajuste de la sujeción para el rotor.....	22
Figura 23. (Izq.) Ajuste de la sujeción del rotor (2). (Dcha.) Posición final. ....	23
Figura 24. (Izq.) Inserción del rotor en su posición. (Dcha.) Colocación del engranaje multiplicador. ....	23
Figura 25. (Izq.) Eje de sujeción unido al rotor. (Dcha.) Desmontaje del rotor. ....	23
Figura 26. (Izq.) Separación del rotor. (Dcha.) Colocación de las palas.....	24
Figura 27. Montaje del rotor en la estructura.....	24
Figura 28. Esquema interno del sensor DHT11. (Fuente: <a href="http://datasheetpdf.com">http://datasheetpdf.com</a> ) .....	25

Figura 29. Sensor DHT11. ....	25
Figura 30. Esquemático de túnel de viento tipo Eiffel (Fuente: Integración experimental y de software como equipamiento de un túnel de viento. José Luis Hernández Neira, Manuel Blázquez, German Carro Fernández) .....	27
Figura 31. Montaje para realizar la calibración. ....	28
Figura 32. Calibración de aerogenerador .....	29
Figura 33. Imagen del cuadro de control de PLX-DAQ. ....	30
Figura 34. Esquema de montaje de los componentes en Fritzing.....	31
Figura 35. Esquemático de conexiones. ....	36
Figura 36. Gráfica de potencia con 3 palas.....	40
Figura 37. Gráfica de potencia con 2 palas.....	41
Figura 38. Gráfica de potencia con 6 palas.....	42
Figura 39. Graduación ángulo de palas. ....	42
Figura 40. Gráfica de potencia a 0°.....	43
Figura 41. Gráfica de potencia a 20°.....	44
Figura 42. Gráfica de potencia a 45°.....	45
Figura 43. Gráfica de potencia a 60°.....	46
Figura 44. Toma de distancia con metro para la práctica. ....	47
Figura 45. Gráfica de potencia a 70cm. ....	48
Figura 46. Gráfica de potencia a 90cm. ....	49
Figura 47. Gráfica de potencia a sotavento.....	50
Figura 48. Vista del colapso de un aerogenerador en el Moncayo (Zaragoza). (Fuente: El País).....	51

## Índice de tablas

Tabla 1. Características Arduino UNO. (Fuente: <a href="http://descubrearduino.com">http://descubrearduino.com</a> ) .....	21
Tabla 2. Tabla de calibración .....	29
Tabla 3. Resultados obtenidos con configuración de 3 palas.....	39
Tabla 4. Resultados obtenidos con configuración de 2 palas.....	40
Tabla 5. Resultados obtenidos con configuración de 6 palas.....	41
Tabla 6. Resultados obtenidos con configuración de 0°.....	43
Tabla 7. Resultados obtenidos con configuración de 20°.....	44
Tabla 8. Resultados obtenidos con configuración de 45°.....	45
Tabla 9. Resultados obtenidos con configuración de 60°.....	46
Tabla 10. Resultados obtenidos con distancia de 70 cm.....	48
Tabla 11. Resultados obtenidos con distancia de 90cm.....	49
Tabla 12. Características sistemas ópticos. (Fuente: Estudio experimental de sensores tipo FBGs para medir deformaciones y temperaturas en estructuras. Benjamín Torres Górriz) .....	52

# 1. Introducción

La gran demanda de energía en las últimas décadas ha provocado que los recursos fósiles comiencen a escasear y no sean suficientes para satisfacer las necesidades de la población mundial, dando así una gran oportunidad a las energías renovables.

Además del agotamiento de los recursos fósiles, la sociedad es cada vez más consciente de que el cambio climático es un hecho y que la utilización de recursos fósiles aumenta la cantidad de gases de efecto invernadero, por lo que la producción de energía se está reconduciendo hacia el uso de energías renovables.

El presente proyecto se centra en una de las energías renovables más antigua y que se ha afianzado como una de las inversiones más seguras y atractivas por su tecnología limpia y ayudas y subvenciones a través de leyes de promoción de las energías renovables.

Este proyecto tiene como objetivo la realización de una práctica didáctica para la asignatura de “Energía y Telecomunicaciones” en el marco de la energía eólica. Como punto de partida se emplea el trabajo de fin de grado “Diseño de una práctica didáctica para la caracterización de un kit aerogenerador” [11]. En dicho trabajo, se utilizaba el kit aerogenerador de Vernier y se realizaban diversas modificaciones tales como, retirar o incluir palas al aerogenerador incluso variar su ángulo de ataque, con el fin de que el alumno practicara con las modificaciones y caracterizara los distintos resultados obtenidos.

Dada la evolución en el ámbito de la monitorización mediante hardware cada vez más accesible y con mayores prestaciones, en este proyecto, además de relacionar las medidas obtenidas con los conceptos fundamentales, como el efecto en el rendimiento del número de palas o el ángulo de ataque de estas, se monitorizan las medidas mediante el uso de hardware open-source.

El texto queda dividido en cinco bloques fundamentales. El primer y segundo bloque tratan un aspecto más teórico donde se describen conceptos de energías renovables haciendo mención especial a la energía eólica. El tercer bloque abarca todo el desarrollo tanto de hardware como de software open-source centrándonos en la plataforma Arduino, monitorización de medidas, utilización de diversos sensores, realización de túnel de viento y montaje de maqueta de aerogenerador. En el cuarto bloque se plantea y explica la práctica didáctica para finalmente proceder a la realización de esta. Por último, en el quinto bloque se estudian las conclusiones y líneas futuras.

## 2. Energías renovables

Es vital asentar los conceptos relacionados con la energía y todas sus variantes para poder comenzar este proyecto.

En primer lugar, vamos a definir qué es la “Energía”. La energía es la *capacidad para realizar un trabajo* [1]. En el Sistema Internacional de Unidades, la energía se mide en Julios.

Para continuar, definimos que es la “Energía Renovable”. Es la energía cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales [1]. La aparición de las energías renovables no surge por una única causa, si bien, la más conocida es que las reservas de combustibles fósiles son finitas y atendiendo a la tasa de consumo actual se estima que las reservas de carbón podrían durar 120 años, las de petróleo 45 años y las de gas natural 60 años. Alguno de los factores clave para la aparición de las energías renovables son los siguientes:

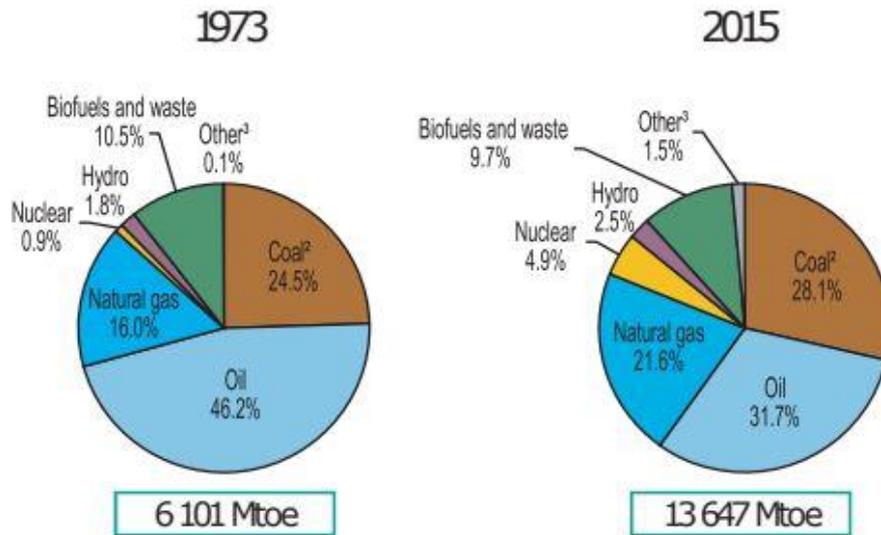
1. Agotamiento de las reservas de combustibles fósiles
2. Seguridad en el suministro energético
3. Cambio climático y desarrollo sostenible
4. Aumento de la demanda energética mundial

También es imprescindible conocer la definición de Energía Primaria [3]. Se define como la energía que se obtiene directamente de recursos naturales. Combustibles (*fuels*) y flujos de energía (*flows*) son las dos fuentes de energía primaria. En el primer caso estaremos hablando de petróleo, carbón o gas natural; mientras que en el segundo caso hablaremos de viento, radiación solar o flujo de agua, asociados con las energías eólica, solar e hidráulica, respectivamente.

### 2.1. Energías renovables en España y en el mundo

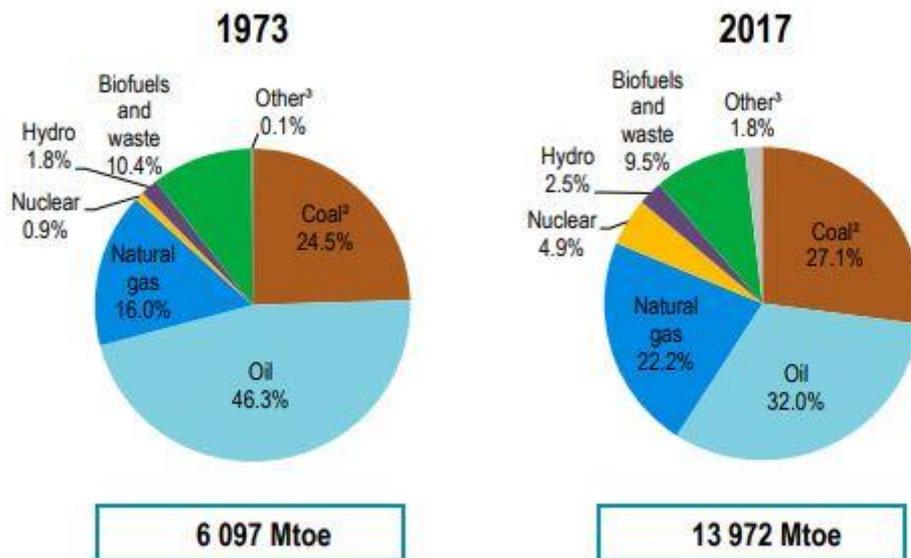
En las siguientes figuras se muestran las contribuciones a la demanda de energía primaria global entre los años 1973 y 2017 incluyendo el año 2015 para verificar las diferencias en un periodo corto de tiempo.

En las figuras aparece *Other*, se corresponde a la demanda de energía geotérmica, solar, eólica, etc.



1. World includes international aviation and international marine bunkers.
2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
3. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, heat and other.

Figura 1. Contribuciones a la demanda de energía primaria global 1973-2015 (Fuente: IEA).



1. World includes international aviation and international marine bunkers.
2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
3. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, heat and other sources.

Figura 2. Contribuciones a la demanda de energía primaria global 1973-2017 (Fuente: IEA)

En las Figuras 1 y 2 podemos observar que las contribuciones a la demanda de energía tales como; solar, geotérmica o eólica ha ido en aumento desde un registro prácticamente nulo en los años 70.

En España, el organismo que vela por el uso de las energías renovables y por la eficiencia energética es el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). El IDAE fija los

objetivos de cobertura por parte de las energías renovables en relación con la demanda tanto al consumo final bruto de energía como de energía eléctrica, partiendo de la normativa y directrices europeas. Para el periodo 2010-2020, las tecnologías renovables consideradas por el IDAE son:

- Energía Eólica
- Energía Solar Térmica
- Energía Solar Termoeléctrica
- Energía solar Fotovoltaica
- Biomasa
- Biocombustibles
- Geotermia
- Hidráulica
- Energías derivadas del mar

En la siguiente figura se muestra una descripción estadística detallada de la producción y consumo de energía de fuentes renovables en la Unión Europea (UE).

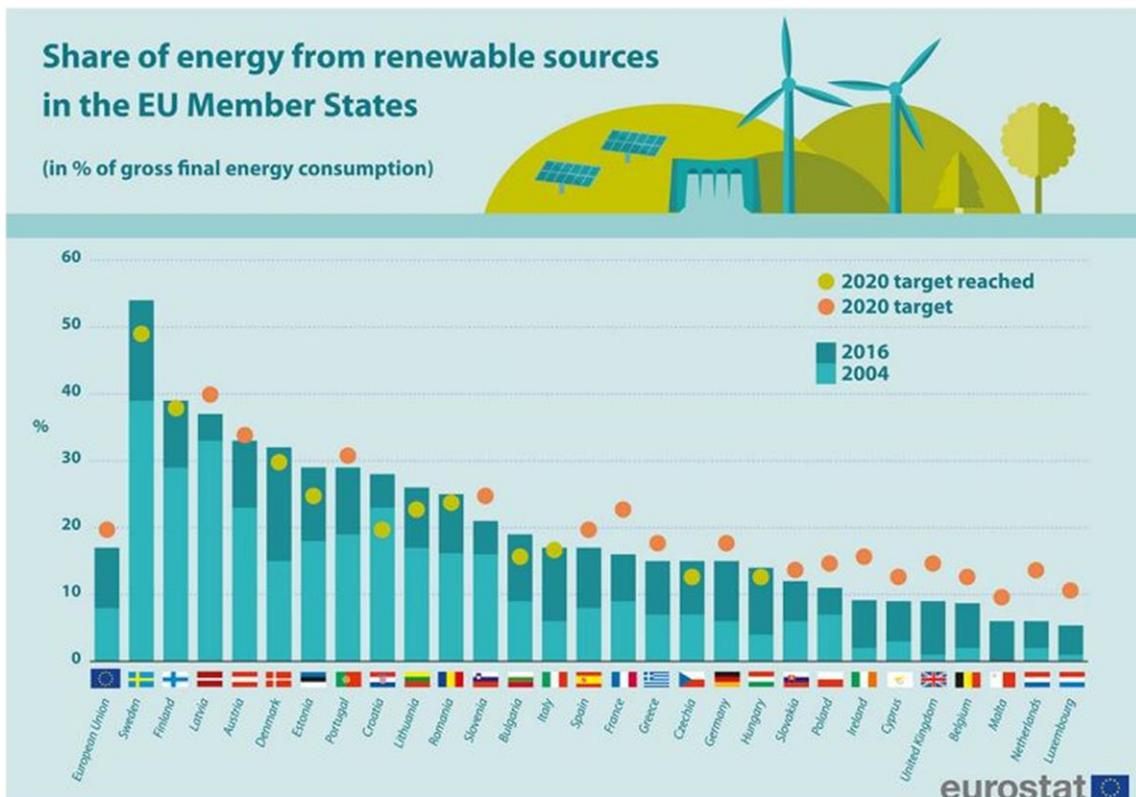


Figura 3. Descripción estadística detallada de la producción y consumo de energía en la UE (Fuente: EUROSAT)

El objetivo establecido por cada país para el año 2020 aparece marcado con un punto en color naranja. Mientras que en color verde se muestra el punto en el que se encuentran actualmente.

El objetivo 20/20/20 pretende reducir un 20% el consumo de energías primarias y emisiones de gases efecto invernadero y aumentar un 20% las energías renovables, además de mejorar en un 20% la eficiencia energética en las edificaciones.

En el caso de España, atendiendo a los datos del año 2017 donde la cuota de renovables era de 17,5 %, dos puntos y medio por debajo del objetivo para el 2020, hace creer que no se cumplirá el objetivo 20/20/20, si bien, todo apunta a que se cumpla para el año 2030.

### 2.1.1. Impacto del Covid-19

El acontecimiento con mayor impacto del año 2020, es sin lugar a dudas, la situación provocada por el coronavirus. Las medidas impuestas por el Gobierno para paliar la situación generada por la crisis sanitaria provocada por la Covid-19, han provocado que muchas empresas hayan recurrido al teletrabajo para proseguir su actividad e incluso algunas hayan procedido al cierre temporal. También se ha visto afectado el sector industrial, reduciendo o paralizando su producción [4].

Estas acciones se han visto reflejadas en la demanda de energía como se puede observar a continuación, y por consiguiente en la reducción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

La siguiente figura muestra la estructura de la generación eléctrica por tecnologías durante el mes de marzo de 2020. En dicha gráfica podemos observar que la energía eólica es la tecnología que más electricidad produce con 5640 GWh.

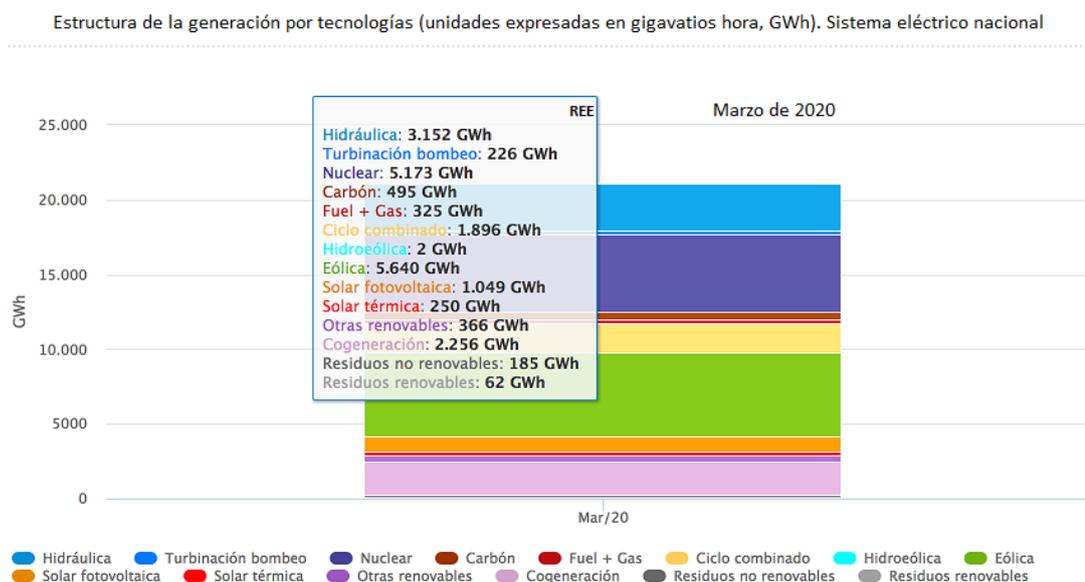


Figura 4. Estructura de la generación por tecnologías (Fuente: Red Eléctrica Española)

En la Figura 5 se muestra una disminución en la demanda de electricidad durante el mes de marzo de 2020, coincidiendo con el mes de confinamiento que ha sufrido la población española debida a la crisis sanitaria provocada por la Covid-19.

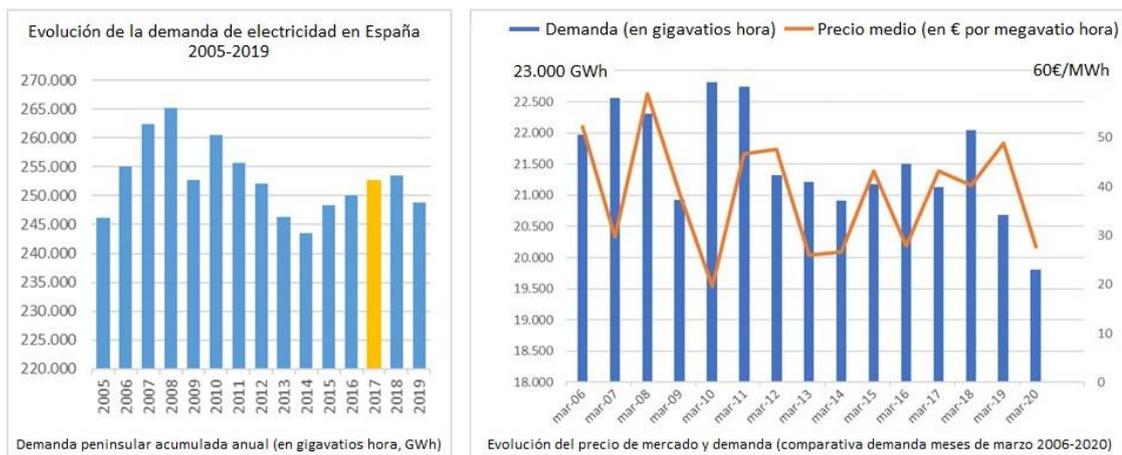


Figura 5. (A) Comparativo de la demanda entre 2005-2019. (B) Comparativo de demanda en los meses de marzo 2006-2020 (Fuente: Red Eléctrica Española)

Gracias a la aplicación de visualización de datos eléctricos ofrecido por Red Eléctrica Española, es posible obtener la demanda de energía eléctrica en cuatro días distintos (durante los meses de enero, marzo y julio) a la misma hora (12:00 h) para comprobar el impacto en dicha demanda de energía a consecuencia de la situación generada por el coronavirus.

Para comprender las siguientes gráficas debemos saber que:

**La demanda real** (curva amarilla) refleja el valor instantáneo de la demanda de energía eléctrica.

**La previsión de la demanda** (curva verde) es elaborada por Red Eléctrica Española con los valores de consumo en periodos precedentes similares, corrigiéndola con una serie de factores que influyen en el consumo como laboralidad, climatología y actividad económica.

**La programación horaria operativa** (línea escalonada roja) es la producción programada para los grupos de generación a los que se haya adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados diario e intradiario, así como en los mercados de gestión de desvíos y regulación terciaria. Estos dos últimos son gestionados por Red Eléctrica Española teniendo en cuenta la evolución de la demanda [12].

A continuación, se muestra a modo de ejemplo la demanda del día 16 de enero de 2020 a las 12:00 horas la cual fue de 36.589 MWh. También podemos observar la generación de energía eólica. La demanda máxima de energía el día 16 de enero fue de 38.326 MWh, habiéndose generado 10.856 MW de energía eólica.



Figura 6. Demanda de energía 16 de enero de 2020 (Fuente: Red Eléctrica Española)

En la siguiente gráfica, observamos la demanda de energía el día 16 de marzo de 2020 a las 12:00 horas, primer día laboral tras haberse decretado el estado de alarma mediante el Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo de 2020. La demanda máxima fue de 32.943 MWh y la generación de energía eléctrica mediante la energía eólica fue de 11.130 MW.



Figura 7. Demanda de energía 16 de marzo de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española)

Tras endurecer las medidas asociadas a la cuarentena, obligando a los trabajadores no esenciales a permanecer en sus hogares, el 31 de marzo de 2020 la demanda máxima fue de 29.357 MWh, casi 10.000 MWh menos que el 16 de enero cuando las empresas trabajaban con total normalidad.



Figura 8. Demanda de energía 31 de marzo de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española)

Por último, tras haber finalizado el estado de alarma, la demanda de energía se ha ido normalizando. El 8 de julio de 2020 la demanda máxima fue de 37.143 MWh.



Figura 9. Demanda de energía 8 de julio de 2020. (Fuente: Red Eléctrica Española)

El panorama actual sobre el crecimiento de las energías renovables tras la pandemia es incierto. Tal y como hemos visto gracias a las gráficas, la demanda de energía eléctrica se vio mermada, así como su precio durante los meses de confinamiento. Todo apunta a que tras la crisis sanitaria provocada por la Covid-19, se produzca una crisis económica que haga plantearse a los gobiernos la viabilidad y perspectivas de los proyectos de energías renovables, los planes de energía o las instalaciones de autoconsumo. Aunque a corto plazo la caída de los precios de la electricidad supone las condiciones más desfavorables para los intereses de los proyectos renovables, hay que enfatizar la visión a medio y largo plazo, donde los proyectos renovables siguen siendo viables [5]. Puede afirmarse que las perspectivas en términos generales siguen siendo positivas para el sector, ya que organismos como la Unión Europea

han apostado fuertemente por las energías renovables para su plan de recuperación económica.

## 2.2. Energía eólica

La energía eólica se define como la energía eléctrica generada a partir del viento con la ayuda de molinos o aerogeneradores [2].

No se sabe a ciencia cierta cuál fue el primer momento en el que el ser humano procedió a dar uso a la energía del viento, si bien, los primeros indicios de su uso se asocian a las primeras embarcaciones (a vela).

La primera vez que se utilizó un molino de viento para la generación de electricidad está datada en el año 1892 con un diseño de Poul La Cour capaz de generar 25 kW.

Acercándonos al momento actual, la energía eólica sufre un fuerte impulso en el año 1973, motivado por la crisis del petróleo que provoca el estudio serio de fuentes de energía alternativas. Se crean por ejemplo mapas de cuantificación del potencial eólico, imprescindibles para poder seleccionar apropiadamente un emplazamiento óptimo y se diseñan aerogeneradores cada vez más potentes. Estos aerogeneradores se agrupan en grandes instalaciones denominadas “parques eólicos”, posibilitando la generación de parques con grandes potencias nominales [2].

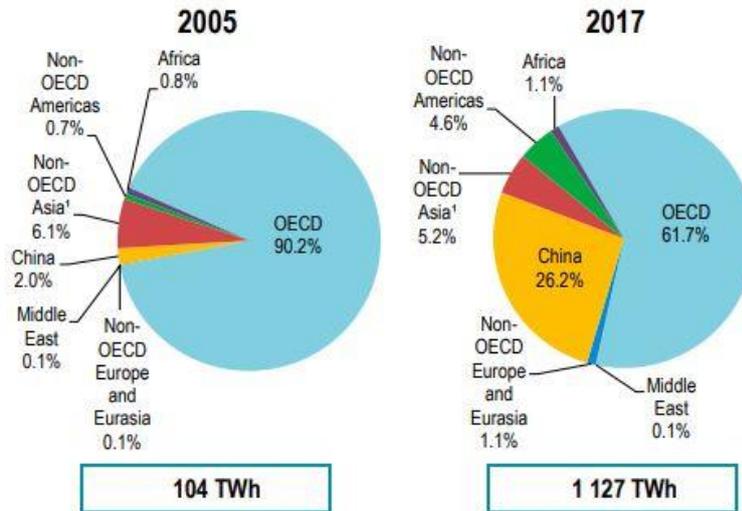
Cada año, la Asociación Empresarial Eólica (AEE) realiza una memoria donde recopila los datos del año y analiza las perspectivas de futuro para el sector de la energía eólica y las renovables.

A nivel mundial, durante el año 2018 se recogieron importantes cifras de potencia total instalada; 538,5 GW y nueva potencia instalada (Hasta 2017), 52.573 MW. Las cifras sitúan a China en primera posición en cuanto a potencia instalada acumulada, encontrándose España en quinta posición.

La memoria realizada por la AEE para el año 2018 indica que en España ya hay instalados 20.142 aerogeneradores en 1.090 parques eólicos distribuidos en 803 municipios. La energía eólica cubre el 18,24% de la demanda eléctrica, lo que corresponde a 12 millones de hogares. Se generan 47.896 GWh con 96 MW de nueva potencia instalada.

Los últimos datos estadísticos obtenidos por la International Energy Agency (IEA) en el año 2017 posicionan a China como principal país productor de energía eólica, con un porcentaje de 26.2 % del total producido. Mientras que España se sitúa dentro del *top ten* de países productores de energía eólica, ocupando el sexto lugar con el 4.4 % del total de energía producida. Cabe destacar que China es el país que encabeza la potencia neta instalada [9].

2005 and 2017 regional shares of wind electricity production



1. Non-OECD Asia excludes China.

Sources: IEA, World Energy Statistics, 2019; IEA, Renewables Information, 2019.

Figura 10. Estadísticas de países productores de energía eólica 2005-2017 (Fuente: IEA)

Producers	TWh	% of world total
People's Rep. of China	295	26.2
United States	257	22.8
Germany	106	9.4
India	51	4.5
United Kingdom	50	4.4
Spain	49	4.4
Brazil	42	3.8
Canada	29	2.6
France	25	2.2
Turkey	18	1.6
Rest of the world	205	18.1
<b>World</b>	<b>1 127</b>	<b>100.0</b>

2017 data

Net installed capacity	GW
People's Rep. of China	163.7
United States	88.3
Germany	55.7
India	32.8
Spain	23.0
United Kingdom	19.9
France	13.1
Canada	12.3
Brazil	12.3
Italy	9.6
Rest of the world	84.2
<b>World</b>	<b>514.9</b>

2017 data

Country (top ten producers)	% of wind in total domestic electricity generation
Spain	17.8
Germany	16.2
United Kingdom	14.8
Brazil	7.2
Turkey	6.0
United States	6.0
People's Rep. of China	4.5
France	4.4
Canada	4.4
India	3.3
Rest of the world <sup>1</sup>	2.4
<b>World</b>	<b>4.4</b>

2017 data

Figura 11. Detalle de países productores de energía eólica (Fuente: IEA)

En la siguiente figura, se muestra la evolución de la potencia eólica acumulada en el mundo entre los años 2000 y 2017. Podemos observar que el aumento de producción de energía de este tipo es exponencial.

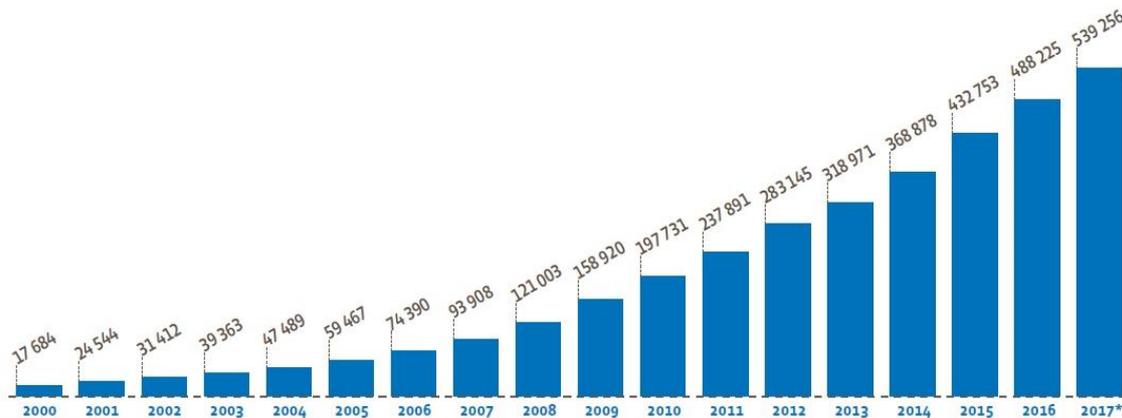


Figura 12. Potencia eólica acumulada en todo el mundo hasta 2017 (Fuente: EurObserv'ER 2018)

El aumento de la utilización de energía eólica viene justificado por una serie de ventajas de las que cabe destacar:

- Energía segura y renovable.
- Sin emisiones ni residuos (con la excepción del proceso de fabricación, transporte y los aceites empleados en su mantenimiento).
- Instalaciones fácilmente desmontables y recuperables.
- Instalaciones compatibles con otros usos del suelo (por ejemplo, ganadería).
- Generación regulable según la demanda.
- Posibilidad de realizar instalaciones *offshore*.

Sin embargo, también podemos encontrar desventajas. La principal recae en que la energía eólica al igual que la solar fotovoltaica, se sustenta de recursos fluctuantes y el almacenaje de la energía cuando no hay demanda era un problema. Por otro lado, los parques eólicos suponen un impacto visual importante generando desaprobación en gran parte de la sociedad.

También existe un impacto sobre la flora y la fauna en especial a las aves de gran envergadura siendo los buitres leonados los más afectados. Las aspas en movimiento generan turbulencias y zonas de depresión que afectan en el vuelo de las rapaces planeadoras haciéndolas chocar. Otra de las especies más afectadas son los murciélagos, debido a que el calor de las turbinas es un gran foco de atención para los insectos y éstos para los murciélagos, los cuales también chocan con las aspas.

Por último, se puede considerar un inconveniente el ruido producido por los aerogeneradores, sobre todo en las zonas cercanas a estos. A continuación, en la figura siguiente se muestra una comparación del ruido que genera un aerogenerador con el ruido que generan electrodomésticos de uso cotidiano.

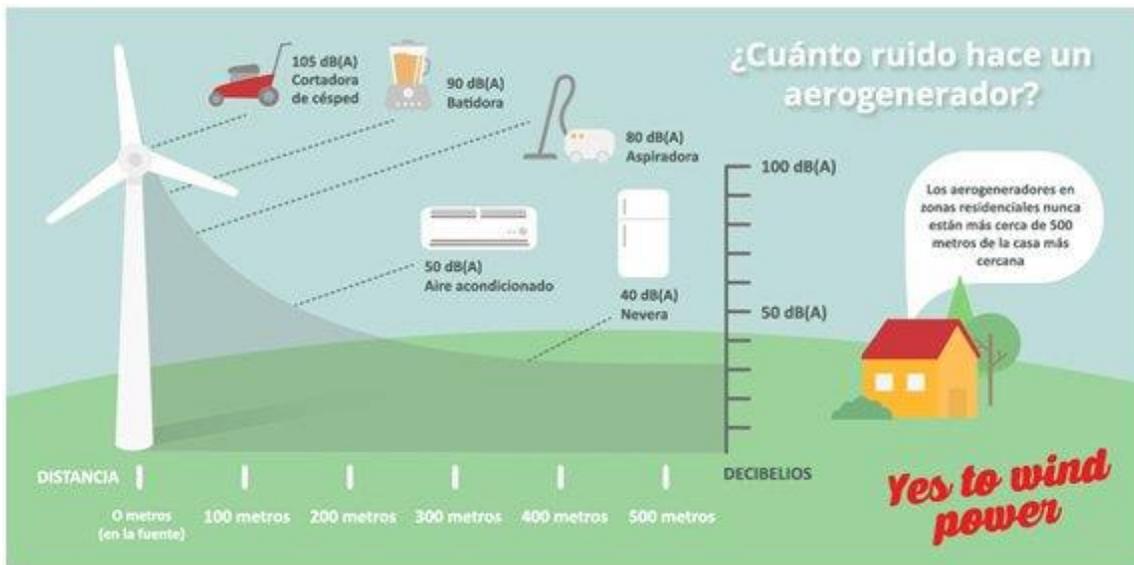


Figura 13. Gráfico comparativo de ruido producido en dB (Fuente: GE Global Research / National Institute of Deafness)

En cuanto al problema de almacenaje de la energía ya existen soluciones en curso como las centrales hidroeléctricas de bombeo, almacenamiento con aire comprimido, baterías de Li-ion o pilas de hidrógeno.

Uno de los principales puntos débiles de la energía eólica, es sin duda el problema de almacenamiento. El viento es un flujo fluctuante y se puede dar el caso en el que exista demanda de energía y no haya viento, o que haya viento y no haya demanda de energía, por lo que esta se pierde.

Para resolver este problema, se está estudiando la incorporación de plantas de almacenamiento con baterías de Li-Ion.

En España, la empresa Acciona ya ha instalado una planta de almacenamiento de energía eólica la cual se encuentra instalada en Barasoain (Navarra). Parte de la electricidad producida por los aerogeneradores es almacenada en dos tipos de baterías (Potencia y energía) de Li Ion. La batería de potencia es capaz de suministrar electricidad durante 20 minutos mientras que la batería de energía suministra menos potencia, pero durante más tiempo, 60 minutos. Cuando el viento genera energía y no hay demanda, ésta se almacena en las baterías pudiendo satisfacer la demanda cuando el viento no genere energía.



Figura 14. Planta de almacenamiento en Barasoain, Navarra (Fuente: Acciona)

La energía eólica dispone de una variante llamada eólica *offshore*. Se trata de una fuente de energía, con el mismo sistema de aprovechamiento del recurso natural que la eólica tradicional, a diferencia de que se construye en alta mar.

La energía eólica *offshore*, es una tecnología en desarrollo que aparte de utilizar información sobre los regímenes de viento, como la eólica *onshore*, necesita de otros datos tales como batimetría, corrientes, altura y frecuencia de las olas.

Un parque eólico *offshore*, se compone básicamente por un conjunto de aerogeneradores, cables de conexión y una subestación transformadora antes de la conexión a la red de transporte.

Los parques eólicos *offshore*, se sitúan a unas distancias de la costa de entre 8 y 70 km, dependiendo de la distancia de la plataforma continental.

Para hacernos una idea de la eficiencia energética de este tipo de energía renovable, obtener una potencia de 6-8 MW requiere 1 km<sup>2</sup>. Por lo que para obtener 25000 MW se requerirían 3600 km<sup>2</sup>.

Varios países europeos ya disponen de parques eólicos *offshore*, encabezados por Reino Unido.



Figura 15. Parque eólico Walney Extension, Reino Unido.

La empresa española Iberdrola promueve en estos momentos 8.000 MW en diversos proyectos en Reino Unido, Francia y Alemania, el equivalente a la potencia total instalada en España de energía nuclear.

En España, ya se ha instalado el primer aerogenerador marino en la costa este de la isla de Gran Canaria bajo el proyecto "Elican". Aunque se trata de un aerogenerador en estado experimental, es el primer aerogenerador de cimentación fija que se instala en el sur de Europa haciéndolo único. El montaje de este aerogenerador se realiza completamente en puerto, y su transporte hasta la localización final se realiza mediante remolcadores, dispone de una torre telescópica que se estira en su emplazamiento final ya en altamar.

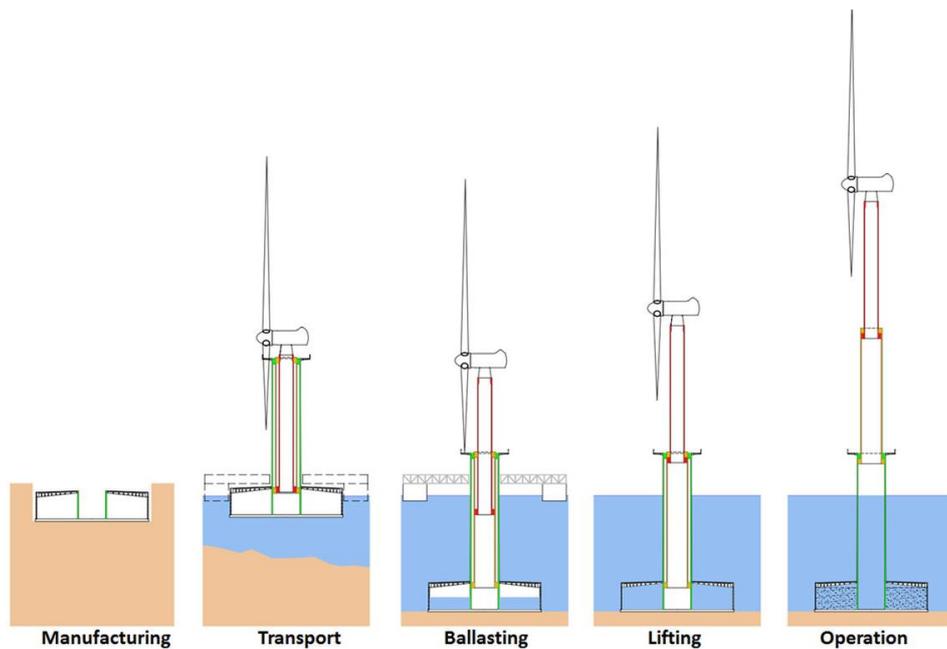


Figura 16. Proceso de montaje del proyecto "Elican".

Existen varios tipos de anclajes al lecho marino dependiendo de la altura y de la geografía de este. Sin embargo, dado que gran cantidad de los potenciales emplazamientos de gran rendimiento para esta tecnología se encuentran en lugares donde la plataforma continental está a más de 50 m de profundidad, los anclajes fijos son inviables. Es esta limitación lo que hace que la tendencia actual sea la utilización de soluciones flotantes.

### 2.2.1. Teoría de los aerogeneradores

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) cuando actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, el área de barrido del rotor y la velocidad del viento. La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen.

En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

A presión atmosférica normal y a 15° C el aire pesa unos 1,225 kg/m<sup>3</sup>, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.

El funcionamiento de un aerogenerador se caracteriza por su curva de potencia que indica el rango de velocidades de viento en las que se puede operar y la potencia que se necesita para cada caso.

La potencia obtenida por un generador se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Donde A es el área del aerogenerador,  $\rho$  la densidad del viento y v su velocidad.

Un concepto para tener en cuenta es el límite de Betz. En el año 1926, Albert Betz publicó la teoría de los rotores eléctricos la cual se explica a continuación para poder entender mejor el funcionamiento de un aerogenerador.

Para comprender la Figura 17 sobre el modelo de Betz, es necesario definir los conceptos de barlovento y sotavento.

“Barlovento”. Parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado.

“Sotavento”. La parte opuesta a aquella de donde viene el viento con respecto a un punto o lugar determinado.

*“Sea un tubo de corriente como el esquematizado en la figura. Se supondrá que, a barlovento de la hélice, el aire posee una velocidad  $v_1$  (velocidad del viento sin perturbar) en la sección transversal  $A_1$ , mientras que la velocidad  $v_2$  se corresponde con la sección transversal  $A_2$  a sotavento de la zona en que se encuentra la hélice. En el plano que contiene la hélice, la*

sección transversal batida por la misma (área del rotor) es un disco imaginario de área  $A$ , siendo  $v$  la velocidad del viento en la misma (velocidad útil). Asimilamos la hélice a un disco de área  $A$  que capta parte de la energía del aire en movimiento que llega a él, es decir  $v_2 < v < v_1$ . Sin embargo, es obvio que  $v_2$  nunca es cero (no puede extraerse toda la energía cinética del aire).” [10] (<http://bibing.us.es>)

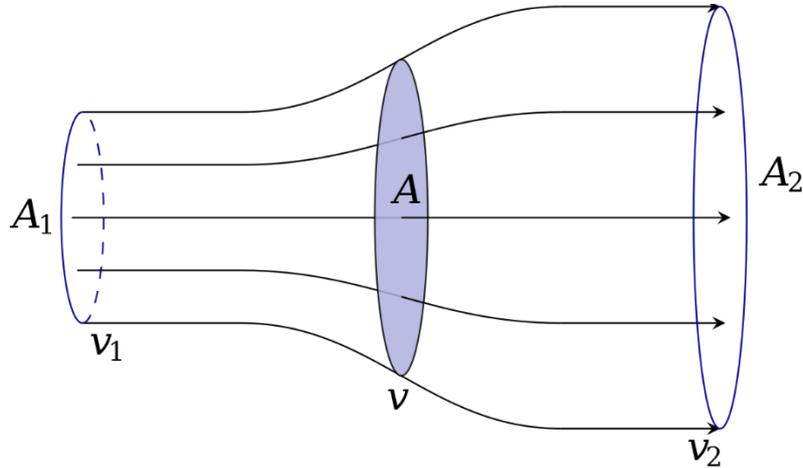


Figura 17. Modelo de Betz. (Fuente: <http://bibing.us.es>)

$$v = \frac{1}{2} * (v_1 + v_2)$$

Calculamos el denominado factor de inducción axial  $a$ , que representa la disminución de velocidad del viento frente al rotor:

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1}$$

La eficiencia que puede alcanzar un aerogenerador, entendida como el cociente entre la potencia mecánica en el eje y la disponible en el viento, se suele expresar mediante el coeficiente de potencia  $C_p$ :

$$C_p(a) = \frac{p}{P_{disp}} = \frac{2 * \rho * A * v_1^3 * a * (1 - a^2)}{\frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3} = 4 * a * (1 - a)^2$$

El valor máximo teórico de  $C_p$  se alcanza para  $a = \frac{1}{2}$ , siendo  $C_p=0.59$ . A este valor se le conoce como Límite de Betz.

### 2.2.2. Componentes y funcionamiento de un aerogenerador

Existen dos tipos de aerogeneradores verticales, de eje vertical que, aunque son más económicos de mantener son menos eficientes, y de eje horizontal. En este proyecto vamos a utilizar la maqueta de un aerogenerador de eje horizontal.

El aerogenerador vertical de eje horizontal es una máquina rotacional cuyo movimiento es provocado por la energía cinética del viento. El movimiento rotacional producido es transmitido y multiplicado mediante un multiplicador de velocidad hasta un generador que es el que se encarga de producir la energía eléctrica.

Todos los componentes del aerogenerador se sitúan en la parte alta de la torre de apoyo, en la llamada góndola. En el interior de la góndola, podemos encontrar el sistema de control que consta de un microprocesador que se encarga de controlar y regular sus variables de puesta en marcha, funcionamiento y parada. Este envía la información y datos a la central de control de la instalación. Cada uno de estos aerogeneradores incorpora, en la base de la torre, un armario con todos los componentes eléctricos (interruptores automáticos, transformadores de intensidad, protectores de sobre tensión, etc.) que facilitan el transporte de la energía eléctrica generada hasta la conexión de red o puntos de consumo. El personal de mantenimiento puede acceder a la góndola a través de la torre.

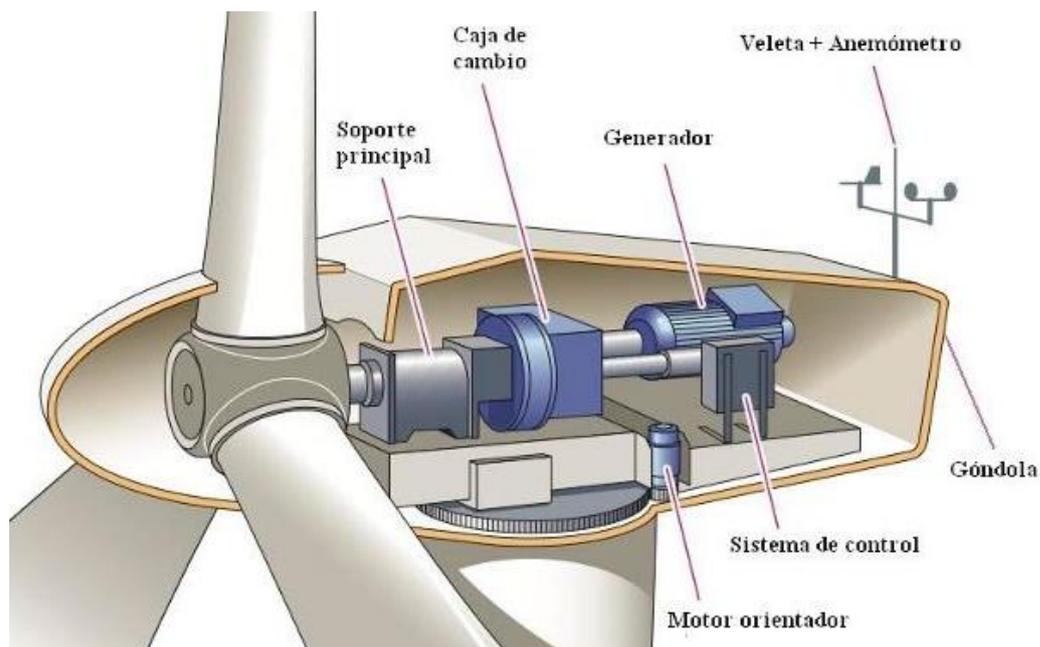


Figura 18. Detalle de componentes situados en la góndola de un aerogenerador (Fuente: <http://energiasrenovadas.com>)

Concretamente, los componentes de un aerogenerador son:

- Torre: sujeta la góndola y el rotor. La altura varía entre 40 y 60 metros, ya que la velocidad del viento aumenta según nos alejamos del suelo, por su interior y a lo largo de ella hay una escalera para acceder a la góndola.
- Sistema de orientación: se activa por el controlador electrónico, estudia la dirección del viento utilizando la veleta y su velocidad con un anemómetro.
- Controlador electrónico: es un ordenador que controla continuamente las condiciones del aerogenerador y del mecanismo de orientación. En caso de cualquier anomalía detiene el aerogenerador y notifica del problema en el ordenador del operario de mantenimiento de la turbina.
- Góndola: contiene los componentes clave del aerogenerador, el multiplicador y el generador eléctrico.

- Palas del rotor: capturan la energía del viento y la transmiten hacia el rotor. Cada pala mide entre 25 a 35 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión, construido de material resistente y ligero.
- Rotor: el rotor es donde la energía cinética del viento se convierte en energía rotativa, está acoplado al eje de baja velocidad del generador. En un aerogenerador moderno de 1 MW el rotor gira muy lento, a unas 19 a 30 revoluciones por minuto (r.p.m.), está dotado de un freno aerodinámico que detiene el rotor cuando la velocidad del viento puede ser peligrosa para el equipo.
- Freno: está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia, que se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.
- Multiplicador: permite que el generador gire a una velocidad más elevada que la de la turbina (normalmente entre 750 y 1500 rpm), para que su tamaño sea reducido (está alojado en la góndola).
- Generador eléctrico: en los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 800 y 1.500 kW.
- Sistema de control de Aerogenerador: el sistema de control se puede entender como el “cerebro” del aerogenerador, en el sentido que regula su funcionamiento, por ejemplo, los procesos de arranque y parada de la turbina. También se encarga de vigilar que la operación del aerogenerador se dé dentro de un rango preestablecido, evitando que, por ejemplo, se alcancen velocidades del rotor peligrosas para la integridad de las palas. Lógicamente, el sistema de control también vigilará el correcto funcionamiento de las partes eléctricas. En el caso de detectar un funcionamiento no esperado, el sistema de control se encargará de la desconexión del aerogenerador de la red. Desde el punto de vista de implementación práctica, la lógica de control se puede encontrar implementada en un PLC (*Programmable Logic Controller*) [2].

Algunas de las señales que se pueden monitorizar son: velocidad del rotor, voltaje e intensidad del generador, carga asociada, temperatura (exterior, interior, aceite multiplicador, devanados del generador), presión hidráulica, ángulo de paso de cada pala del rotor, ángulo de orientación, dirección y velocidad del viento, vibraciones en la góndola y palas del rotor, puerta de la torre (sistema de alarma), etc.

Los sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) son utilizados en la monitorización de los parques eólicos.

## 3. Elementos de la práctica

### 3.1. Hardware open-source

La declaración de principios del Hardware libre lo define como *“aquel hardware cuyo diseño se hace disponible públicamente para que cualquier persona lo pueda estudiar, modificar, distribuir, materializar y vender, tanto el original como otros objetos basados en ese diseño”* [7]. Así, el hardware libre utiliza materiales inmediatamente disponibles, procesos estandarizados, infraestructura abierta, contenido no restringido y herramientas de diseño libres brindando a los usuarios la posibilidad de controlar su tecnología mientras comparten el conocimiento y alientan el comercio a través del intercambio abierto de diseños.

Su objetivo es crear diseños de aparatos informáticos de forma abierta, de manera que todas las personas puedan acceder, como mínimo, a los planos de construcción de los dispositivos. La información sobre la manera de comunicarse con el hardware, el diseño de este y las herramientas utilizadas para crear ese diseño deben ser publicadas para ser usadas libremente. De esta manera se facilita el control, implementación y mejoras en el diseño por la comunidad de desarrolladores [8]. Es importante destacar que no se debe confundir libre con gratis.

### 3.2. Arduino

Se trata de una placa base que incorpora un sencillo microcontrolador y un entorno de desarrollo para crear aplicaciones para dicha placa. Los proyectos que parten de Arduino engloban desde robots hasta sistemas de riego automático.

Está disponible con una licencia *Creative Commons* que otorga libertad de desarrollo, aunque los productos derivados deben cumplir unas determinadas pautas, sobre todo en lo relativo a la propia denominación de Arduino, lo cual viene a ser una especie de control de marca.

#### 3.2.1. Arduino UNO

La placa de Arduino que se va a utilizar en este proyecto se trata de la denominada UNO. Consta de una placa basada en ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada / salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio.

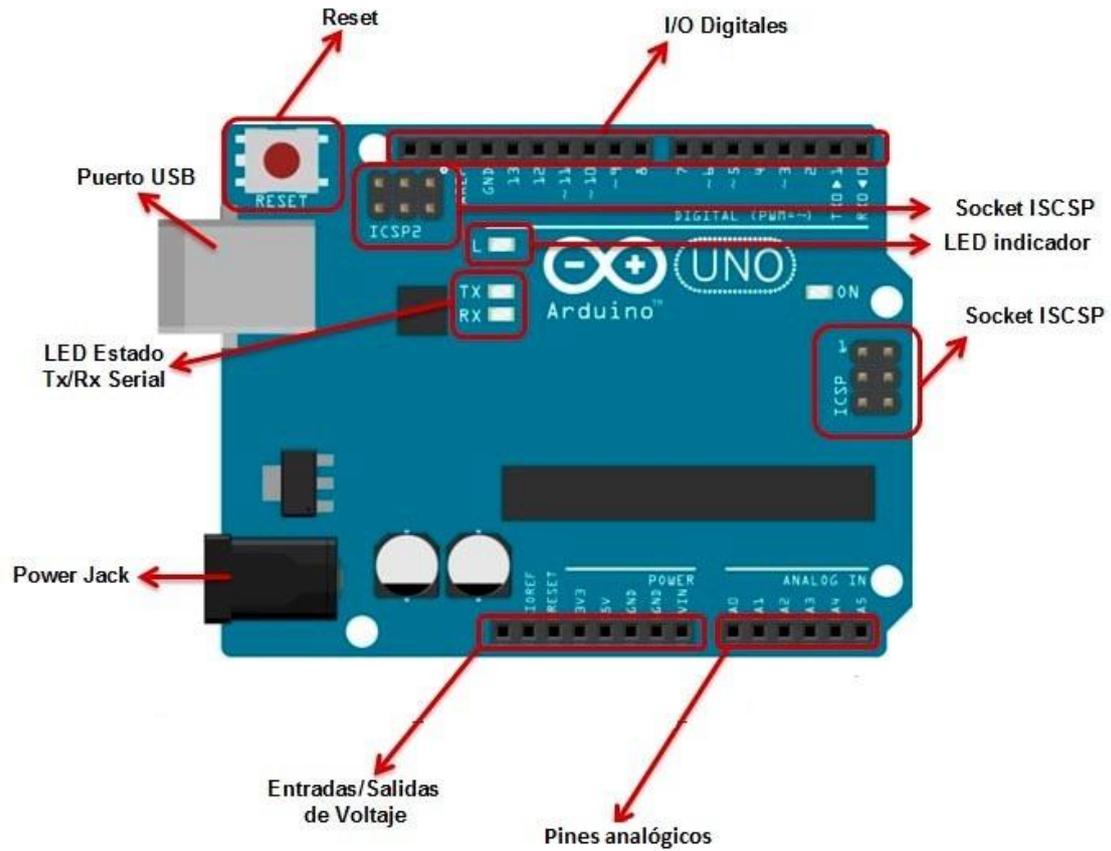


Figura 19. Esquemático de la placa Arduino UNO (Fuente: Fritzing)

Características Arduino UNO	
Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de E/S digitales PWM	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente CC por pin de E/S	20 mA
Corriente DC para Pin de 3.3 V	50 mA
Memoria flash	32KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 KB utilizados por el arranque
SRAM	2 KB (ATmega328P)

EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BuiltIn	13
Longitud	68.6 mm
Anchura	53.4 mm
Peso	25 g

Tabla 1. Características Arduino UNO. (Fuente: <http://descubrearduino.com>)

### 3.3. Maqueta del aerogenerador y montaje

Para la práctica de este proyecto, se va a utilizar una maqueta de un aerogenerador. El kit consta de base, torre, góndola, palas y rotor. Este kit puede generar electricidad desde 0.5 a 3 voltios.

Nota: Las siguientes figuras están sacadas del manual de instalación del kit, que se puede consultar en <http://vernier.com>, 2016.

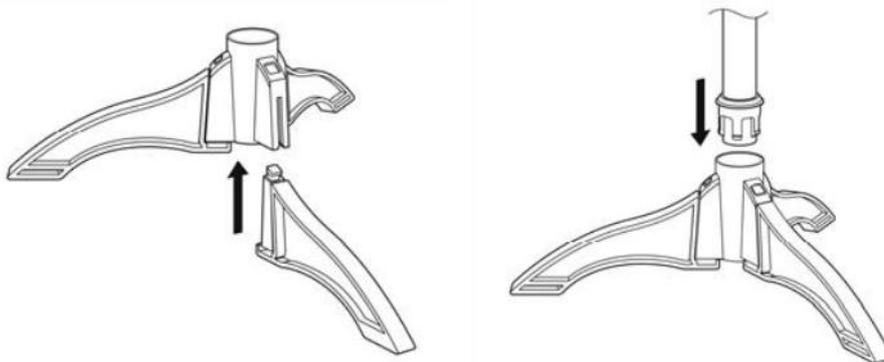


Figura 20. (Izq.) Anclaje de la base. (Dcha.) Inserción de mástil en la base.

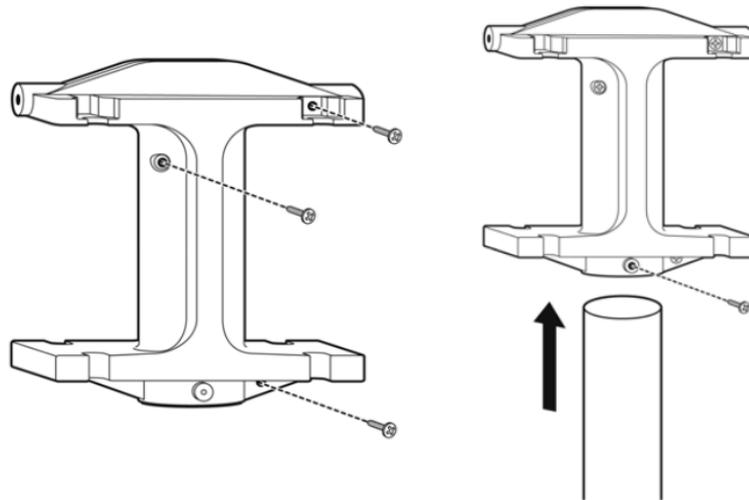


Figura 21. (Izq.) Montaje de la estructura de la góndola. (Dcha.) Unión de la estructura de la góndola con el mástil.

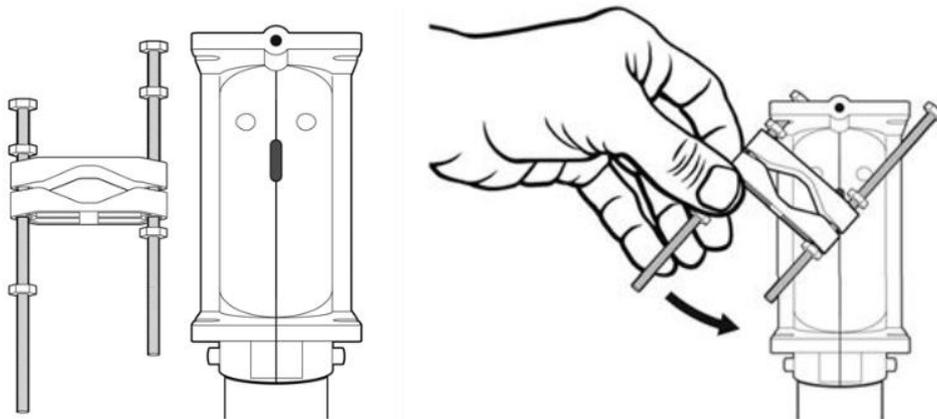


Figura 22. (Izq.) Sujeción para el rotor. (Dcha.) Ajuste de la sujeción para el rotor.

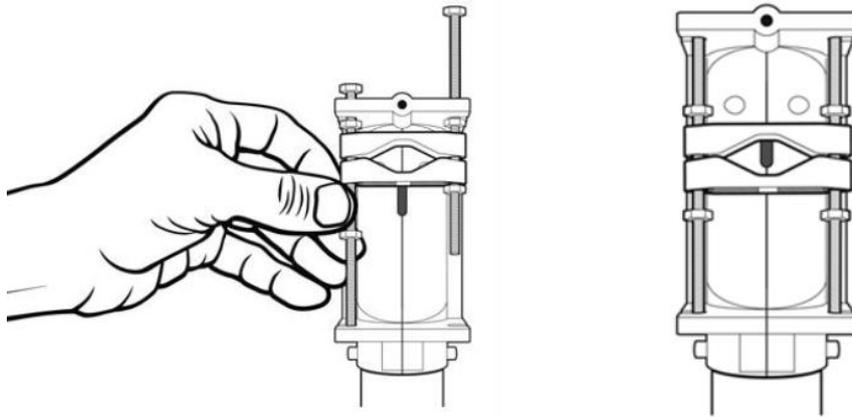


Figura 23. (Izq.) Ajuste de la sujeción del rotor (2). (Dcha.) Posición final.

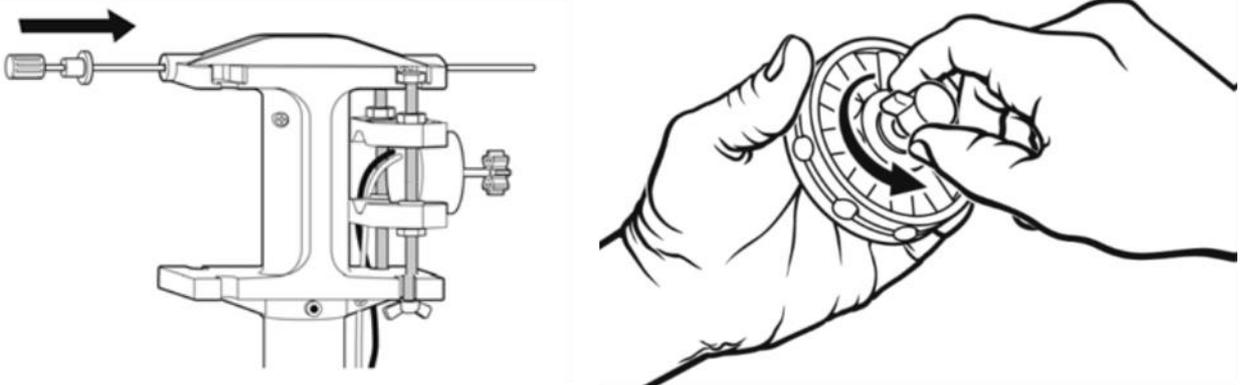


Figura 24. (Izq.) Inserción del rotor en su posición. (Dcha.) Colocación del engranaje multiplicador.

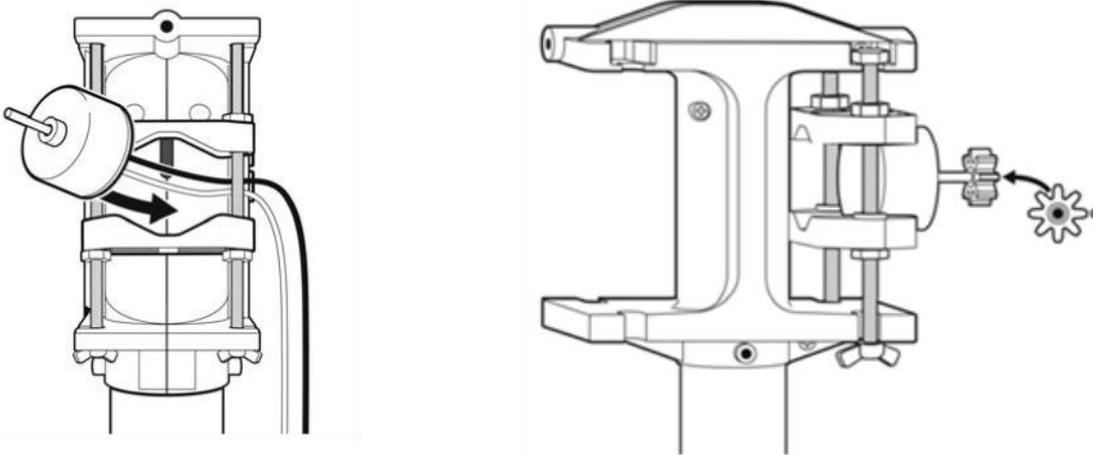


Figura 25. (Izq.) Eje de sujeción unido al rotor. (Dcha.) Desmontaje del rotor.

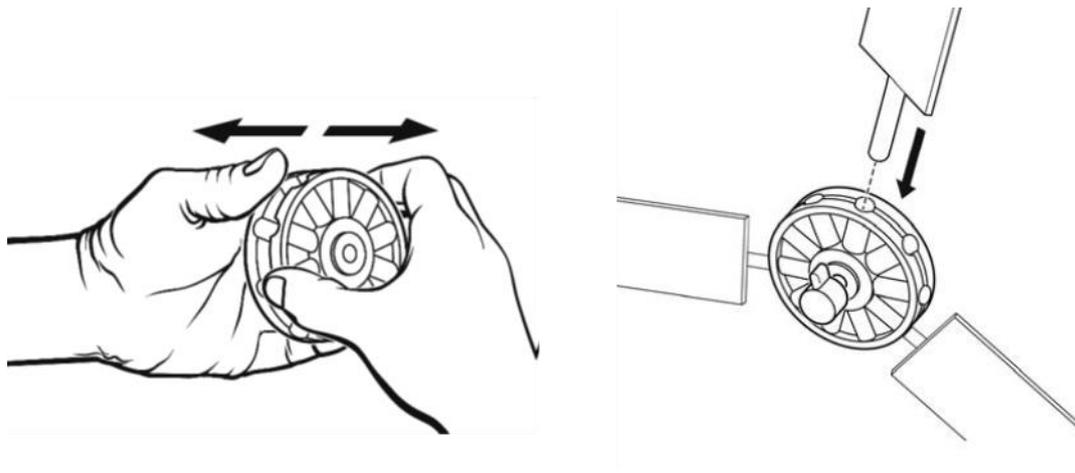


Figura 26. (Izq.) Separación del rotor. (Dcha.) Colocación de las palas.



Figura 27. Montaje del rotor en la estructura.

### 3.4. Sensor DHT11

Se trata de un sensor que mide simultáneamente temperatura y humedad. Consta de un sensor de humedad capacitivo y un termistor. También consta de un circuito integrado básico en su interior que hace la conversión de analógico a digital y este envía una señal digital. El sensor DHT11 viene encapsulado en una PCB y cuenta con una resistencia y un condensador.

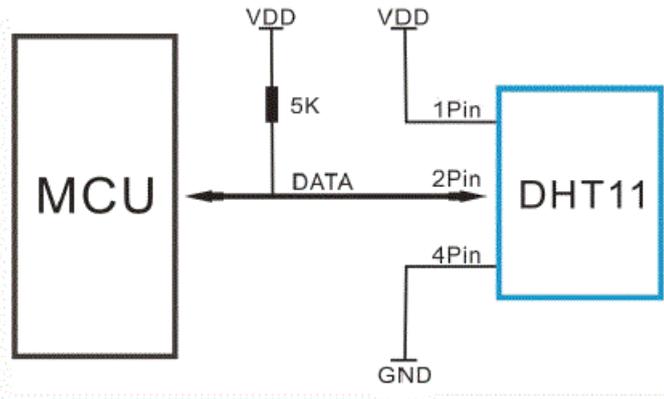


Figura 28. Esquema interno del sensor DHT11. (Fuente: <http://datasheetpdf.com>)

### 3.4.1. Características del sensor

Las características del sensor de temperatura y humedad DHT11 son las siguientes:

- Alimentación de 3.3V a 5VDC.
- Corriente máxima 2.5mA durante la conversión.
- Lectura de humedad con un +/- 5% de precisión.
- Lectura de temperatura con un +/- 2°C de precisión.
- Capaz de medir humedad de 20% a 80%.
- Capaz de medir temperatura de 0 a 50°C.
- No más de 1 Hz en velocidad de muestreo (una vez cada segundo).
- Dimensiones: 15.5mm x 12mm x 5.5mm.

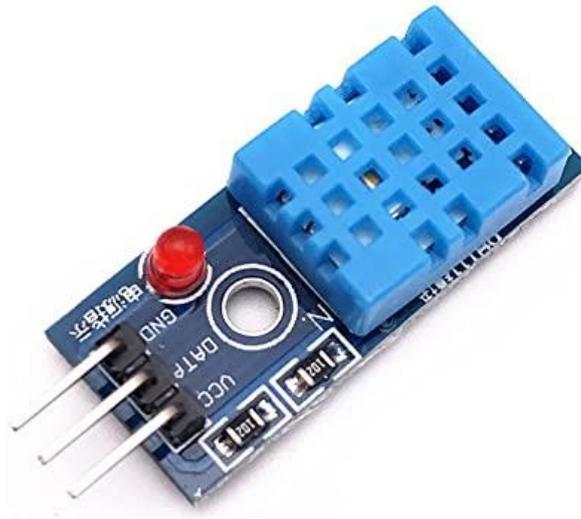


Figura 29. Sensor DHT11.

## 3.5. Túnel de viento

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de

objetos sólidos. Con esta herramienta se simulan las condiciones que experimentará el objeto de la investigación en una situación real. En un túnel de viento, el objeto o modelo permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire o gas alrededor de él.

Para la realización de este proyecto, se ha estudiado la posibilidad de realizar el diseño de un túnel de viento de circuito abierto de tipo Eiffel, ya que los datos susceptibles de estudio hubieran sido mucho más precisos pues se podría controlar las condiciones de viento con mayor efectividad, si bien, dado el tamaño que requeriría el túnel de viento, no ha sido posible la realización del mismo.

Los túneles de viento de tipo Eiffel tienen una sección de trabajo abierta desde donde se aspira el aire, y una sección de prueba limitada por un volumen cerrado, lo cual crea una cámara de estabilización.

Con esto se reduce la deformación e influencia que los límites físicos del túnel tienen sobre el flujo, que teóricamente este debería ser ilimitado, asegurando un flujo uniforme sobre el prototipo a probar.

Las partes o secciones en las que se puede dividir el túnel de viento para su correcto funcionamiento se describen a continuación:

- Cono de contracción: el cono de contracción toma un volumen grande de aire de baja velocidad y lo reduce a un volumen pequeño de aire de alta velocidad sin crear turbulencia.
- Cámara de ensayos: es el lugar donde se colocan el o los modelos a probar junto con los instrumentos de medición. El flujo en esta sección debe ser lo más uniforme posible y para ello se debe de cuidar su longitud, de manera que tiene que ser lo suficientemente larga para que el modelo pueda ser adaptado lo más alejado posible de la entrada para evitar las irregularidades del flujo al inicio de la sección, pero si se excede su longitud puede provocar el desprendimiento de la capa límite, por tal razón debe mantenerse una dimensión efectiva.
- Modelo de prueba: mientras que la circulación de aire se lleva a cabo por la sección de pruebas a la velocidad deseada, los sensores miden sobre el modelo de prueba valores como la velocidad, presión, resistencia y levantamiento. De acuerdo con los datos recabados de estas fuerzas y de la relación que hay entre el ambiente de la prueba y las condiciones reales, las predicciones exactas del funcionamiento del modelo a escala real pueden realizarse.
- Difusor: el difusor reduce la velocidad de la circulación de aire en el túnel de viento.
- Sección del mecanismo impulsor: proporciona la fuerza necesaria que hace al fluido moverse a través del túnel. Esta fuerza viene normalmente de ventiladores lo suficientemente grandes según el fluido a desplazar.

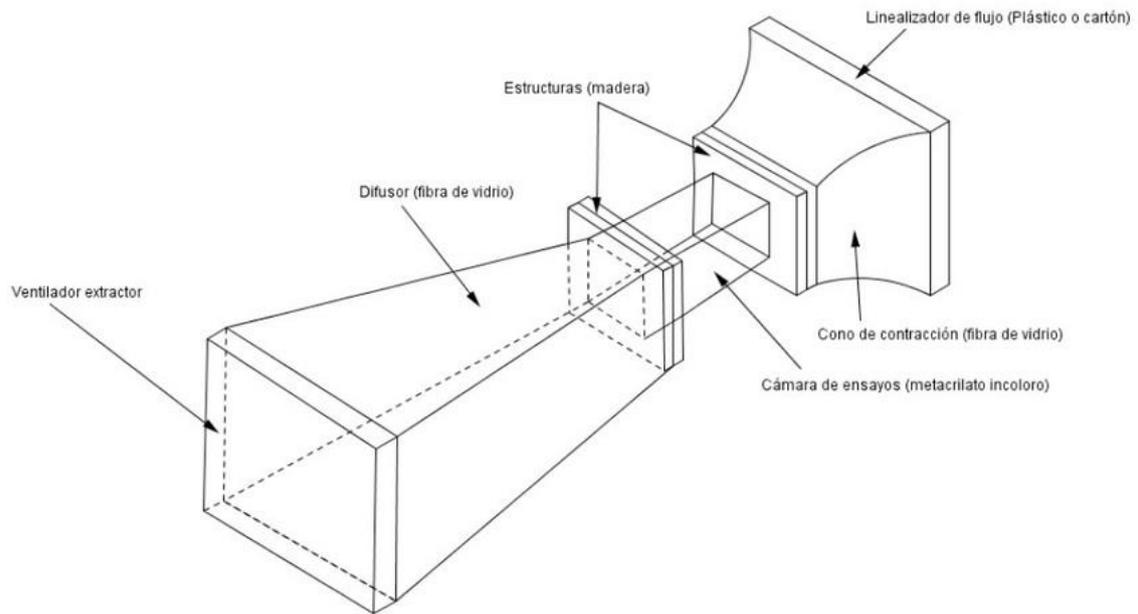


Figura 30. Esquemático de túnel de viento tipo Eiffel (Fuente: Integración experimental y de software como equipamiento de un túnel de viento. José Luis Hernández Neira, Manuel Blázquez, German Carro Fernández)

## 4. Desarrollo de la práctica

Una vez presentados los diferentes elementos que compondrán la práctica, en este apartado se mostrará el desarrollo tal y como se ha diseñado, de acuerdo a los objetivos docentes que se desea alcanzar en el alumnado. Por una parte, el refuerzo de las competencias específicas, tales como los conceptos explicados en el aula referidos a la curva de potencia de un aerogenerador y por otra parte, transversales como el trabajo en equipo, familiarización con hardware open-source y su programación.

Para simular el viento, contamos con 4 ventiladores de ordenador de características, 24 V y 0.42 A, también disponemos de un ventilador más potente de 12 V y 2.6 A.

Alimentamos los ventiladores con una fuente de alimentación TENMA 72-8695 la cual puede regularse desde 0 hasta 32 V y de 0 a 32 A. Dispone de dos canales independientes lo que nos permite regular por un lado los 4 ventiladores menos potentes a través del canal 1 y el ventilador más potente a través del canal 2.

Para la calibración del aerogenerador, nos ayudamos de un anemómetro modelo MS6252B. Con este anemómetro podemos medir velocidad de viento, temperatura y volumen de flujo de manera instantánea.

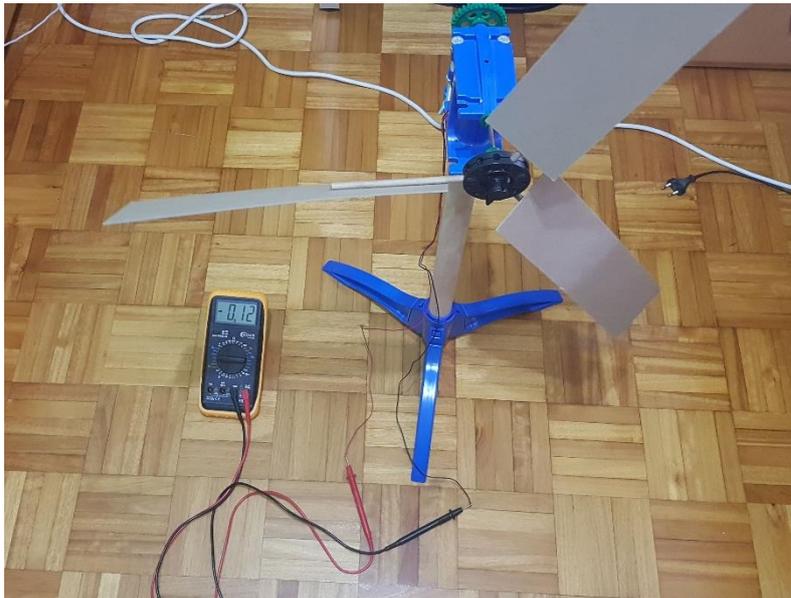


Figura 31. Montaje para realizar la calibración.

Elaboramos una tabla de recogida de valores capturados por el anemómetro y el multímetro conectado al aerogenerador (mV-Velocidad). Una vez obtenidos dichos valores, nos ayudamos de una gráfica para sacar el valor de pendiente e incluirlo en el código de Arduino para que la velocidad que muestre por pantalla se corresponda con la realidad.

Velocidad (m/s)	Tension (V)
0	0
1,55	0,12
2,25	0,22
2,55	0,3
2,85	0,36
3,2	0,4
3,5	0,45
3,9	0,49
4	0,5
4,3	0,52
4,5	0,56
4,9	0,59
5,3	0,65

Tabla 2. Tabla de calibración

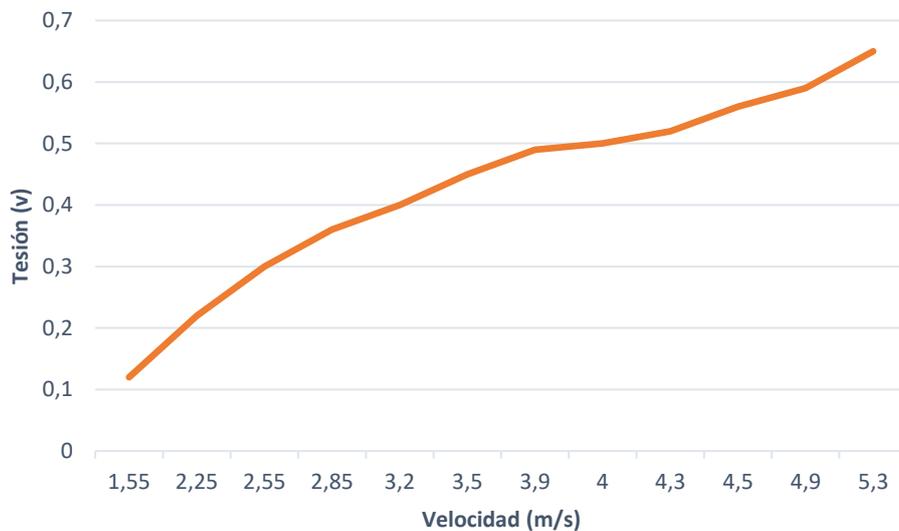


Figura 32. Calibración de aerogenerador

A la vista de los datos reflejados en el gráfico, obtenemos la pendiente, cuyo valor es de 0.129.

Como anunciamos anteriormente, el objetivo de la presente practica es representar en un documento de Excel una gráfica de la potencia (Kw) producida por el aerogenerador frente a la velocidad del viento (m/s). Para la obtención de la potencia necesitaremos conocer la densidad del aire, el área de barrido del aerogenerador y la velocidad del viento.

Con los datos anteriores aplicamos la fórmula de potencia de un aerogenerador.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

El valor de la densidad depende de la temperatura y la humedad ambiental, si bien, por simplificar el cálculo en la placa de arduino utilizamos el valor de densidad del aire en condiciones normales a 15 °C

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Para el cálculo del área de barrido del aerogenerador, realizamos la medida desde el extremo de una pala hasta el centro del rotor obteniendo el radio (r = 35 cm). Y aplicamos la fórmula del área de barrido.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

La velocidad del viento se tomará automáticamente de acuerdo con la calibración ya realizada.

#### 4.1. Aplicación Excel (PLX-DAQ)

Para volcar los valores desde Arduino a Excel y poder realizar la gráfica final donde estudiar los valores obtenidos, utilizamos la aplicación PLX-DAQ. Se trata de un complemento para Excel, que permite capturar hasta 26 canales de datos de un Arduino conectado a un puerto serie, con velocidad de hasta 128 Kbps. Su manejo es sencillo, únicamente deberemos sincronizar en la aplicación el puerto COM por el que la placa de Arduino se conecta al ordenador, en este caso la placa se conecta al COM-6.

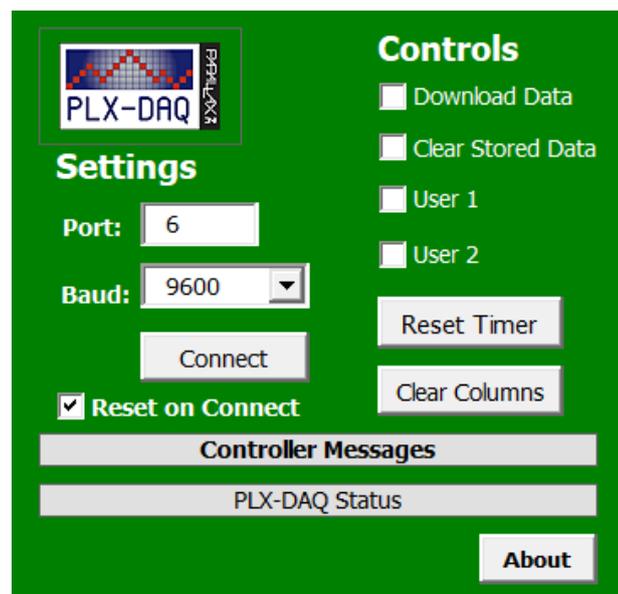


Figura 33. Imagen del cuadro de control de PLX-DAQ.

## 4.2. Conexiones

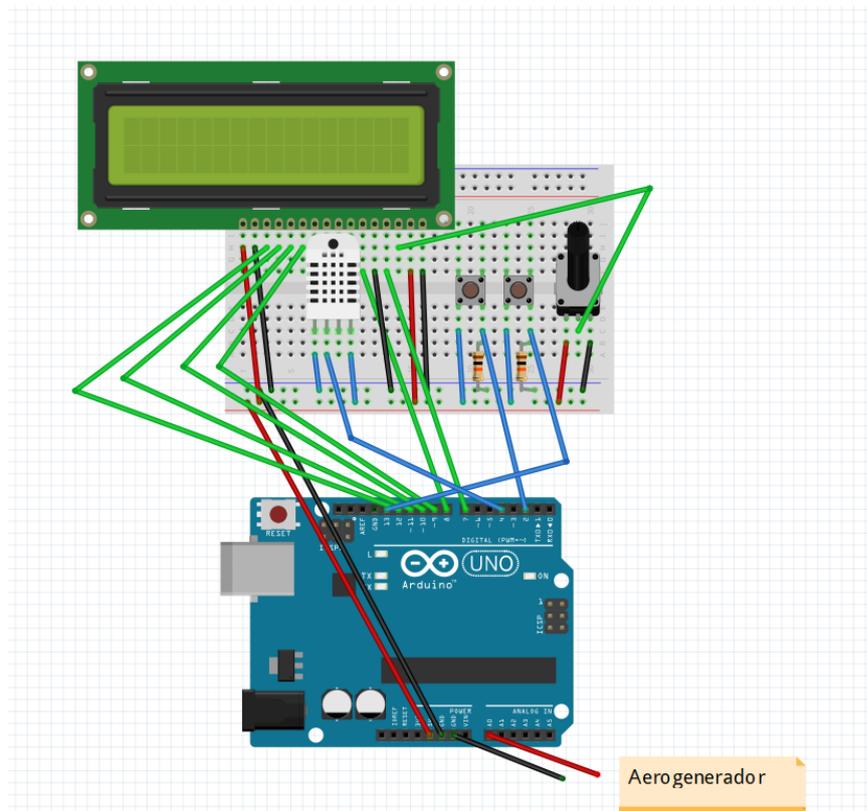


Figura 34. Esquema de montaje de los componentes en Fritzing.

Como se ha mencionado anteriormente, para la realización de esta práctica vamos a utilizar el Arduino UNO.

También utilizamos componentes como la pantalla LCD de 16x2, potenciómetro de 10KΩ, switcho o botón y resistencia de 10KΩ, todos ellos incluidos en el starter kit de Arduino. Además del sensor de temperatura y humedad DHT11.

Para realizar las conexiones, nos apoyamos en el libro “*Arduino projects book*” incluido en el starter kit de Arduino.

Primeramente, vamos a conectar la pantalla LCD. Para ello, conectamos la misma a la alimentación además del led de iluminación. Conectamos también el potenciómetro de 10kΩ para el ajuste de contraste, desde la patilla central del potenciómetro al VO del display.

A continuación, conectamos los pines de datos DB4, DB5, DB6 y DB7 ya que trabajamos en modo de 4 bits. Finalmente, conectamos los pines de control RS y E [7].

Para conectar el switcho únicamente necesitamos una resistencia de 10kΩ, y conectarlo a la entrada analógica de la placa de Arduino que deseemos.

La conexión del sensor de temperatura es sencilla. Consta de 3 patillas (GND, DATA y VIN). Conectamos las patillas laterales a los 5v de la placa de Arduino mientras que la central la conectamos a la entrada digital que deseemos. Internamente el sensor DHT11 contiene una

resistencia de 5kΩ por lo que no tendremos que preocuparnos de incluir resistencias en el montaje.

### 4.3. Programa de control

Una vez obtenido el dato de la pendiente y calculado el área de barrido de nuestro aerogenerador, ya podemos realizar en Arduino IDE el código de control. Arduino IDE se trata de un entorno específico para placas Arduino y que cuenta con todas las herramientas necesarias para programar el microcontrolador.

Comenzamos incluyendo las bibliotecas que vamos a utilizar. En este caso, la de la pantalla LCD y el sensor DHT11. Si no están instaladas, se pueden obtener fácilmente desde la pestaña de Programa > Incluir librerías > Administrar Bibliotecas...

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DHT.h>
```

Informamos a Arduino de las salidas que va a utilizar la pantalla LCD y del tipo de DHT que vamos a usar.

```
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);
DHT dht(SENSOR, DHT11);
```

Definimos las variables que vamos a utilizar y las inicializamos.

```
float veloc1= 0; // entrada A0
float P = 0; // Inicializa la potencia a 0
float A = 0.00385; // Área de barrido para palas tipo 1
float pi = 3.1416;
float v1 = 0; //Inicializa Velocidad instantánea a 0
int tiempo = 0;
int SENSOR = 4; //Entrada del sensor de humedad
int temp,humedad; //Declaramos variables de temperatura y humedad
int switchState1 = 0; //Inicializa el switch1
int switchState2 = 0; //Inicializa el switch2
```

Inicializamos los sensores y sincronizamos la velocidad con el monitor serie. También, indicamos los títulos de las columnas de la hoja Excel y asociamos los pines de entrada de los botones.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); //Sincronizamos la velocidad para visualizar los
datos en el monitor serie o Excel
    pinMode(2, INPUT); //Metemos el boton1 en el pin 2
    pinMode(13, INPUT); //Metemos el boton2 en el pin 13
    Serial.println("CLEARDATA"); //Limpia los datos de excel
    Serial.println("LABEL, Hora, V Aerogenerador, Potencia"); //Títulos de
excel
    Serial.println("RESETTIMER"); // pone el temporizador a 0
    lcd.begin(16, 2); // Fijamos el número de caracteres y filas
```

```

lcd.begin(16, 2);          // Fijamos el número de caracteres y filas
lcd.print("V Aerogenerador"); // Mensaje display
analogReference(INTERNAL); // pone como referencia interna 1.1V
dht.begin(); //Inicializamos en sensor de temperatura y humedad
}

```

Comenzamos el programa.

```

void loop() {
  switchState1 = digitalRead(2); //Sincronización de boton1
  switchState2 = digitalRead(13); // Sincronización de boton2
  if (switchState1 == HIGH){ // Si presiono el botón 1
    lcd.begin(16, 2);          // Fijamos el número de caracteres y filas
    lcd.begin(16, 2);          // Fijamos el número de caracteres y filas
    lcd.print("V Aerogenerador"); // Mensaje display
    v1 =(analogRead(0)); // lectura de sensor a0
    veloc1= (v1*0.0129); // 0,129 corresponde a la pendiente de la curva
    lcd.setCursor(0, 1);      // Ponte en la línea 1, posición 0
    lcd.print(veloc1); //muestra la velocidad del viento en el LCD
    lcd.setCursor(4, 1); // ponte en línea 1, posición 5
    lcd.print("m/s");
    lcd.setCursor(9, 1);
    lcd.print("P:");
    P = 0.5 * 1.225 * A * pi * pow(veloc1,3); // P = 1/2 * densidad del aire
    * Area del aerogenerador * velocidad del viento^3
    lcd.print (P,1); // muestra la Potencia que genera el aerogenerador en
Watts
    // Para visualizar los datos en Excel
    Serial.print("DATA,TIME,");
    Serial.print(veloc1);
    Serial.print(",");
    Serial.println(P);
    delay(1000);
    //Para visualizar en monitor serie de IDE
    Serial.print("V aerogenerador:\n");
    Serial.println (veloc1);
    Serial.print ("Potencia del aerogenerador:\n");
    Serial.println (P);
  }else if (switchState2 == HIGH){ //Si presiono el botón 2
    humedad = dht.readHumidity ();
    temp = dht.readTemperature ();
    lcd.begin(16, 1);          // Fijamos el número de caracteres y filas
    lcd.begin(16, 1);          // Fijamos el número de caracteres y filas
    lcd.print("H:");
    lcd.print(humedad); //muestra la humedad en el LCD
  }
}

```

```
lcd.print("%");  
lcd.print("T:");  
lcd.print (temp);  
lcd.print("C");  
delay(1000); //Delay para evitar parpadeo  
} else {  
  lcd.begin(16, 1);      // Fijamos el número de caracteres y filas  
  lcd.begin(16, 1);      // Fijamos el número de caracteres y filas  
  lcd.print("Presionar boton");  
  delay(500); // Delay para evitar parpadeo  
}  
}
```

## 5. Guion de la práctica

### Metodología

El alumno dispone de 2 sesiones de laboratorio para la realización de la práctica de forma individual o en parejas. Se evaluará la precisión y justificación de los resultados aportados.

Para la realización de la práctica se dispondrán de los siguientes componentes:

- Aerogenerador “Vernier”.
- Placa Arduino UNO.
- Protoboard para realizar las conexiones.
- Sensor de temperatura y humedad DHT11.
- Arduino starter kit (Arduino projects book, pantalla LCD, resistencias, switches, potenciómetro y cables).
- Fuente de alimentación.
- 5 ventiladores de PC.
- Software de monitorización (PLX-DAQ).
- Transportador de ángulos para modificar ángulo de ataque de las palas.
- Cinta métrica.

### Configuración inicial

La práctica se iniciará con la configuración inicial siguiente:

- Número de palas: 3
- Ángulo de ataque de las palas: 30°
- Distancia de los ventiladores a la torre: 50 cm
- Posición torre - ventiladores: Barlovento

### Objetivos de la práctica

Esta práctica tiene como objetivo principal que el alumno se familiarice con la lectura y caracterización de datos que se generan a partir de las distintas simulaciones que se van a realizar. Reforzando además, los conceptos sobre teoría de aerogeneradores impartidos en el aula así como familiarizarse con hardware open-source.

Se deberá visualizar la curva de potencia del aerogenerador frente a la velocidad del viento. Para ello, se harán capturas con un switch a las velocidades de viento establecidas en el presente guion.

### Desarrollo 1 – Montaje de la placa Arduino y sus componentes.

Se aporta esquemático de conexiones.



### Desarrollo 3 – Lectura y caracterización de los resultados.

Una vez ensamblado el código, realizamos capturas a distintas velocidades. Para ello, vamos a ir modificando la velocidad de giro de los ventiladores con la fuente de alimentación y capturaremos mediante el botón “Captura” a las siguientes velocidades:

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)						

Una vez realizadas las correspondientes capturas procedemos a verificar los resultados en la tabla generada por el programa en Excel.

Para analizar distintos resultados vamos a proceder a modificar algunos de los elementos variables (Número de palas, ángulo de ataque de las mismas, distancia del ventilador al aerogenerador y posición del ventilador).

#### 1- Modificar el número de palas.

Aunque lo más habitual son los aerogeneradores tripala, también existen aerogeneradores con una, dos o incluso seis palas. Para analizar el impacto del número de palas en la eficiencia del aerogenerador vamos a modificar el número de palas y repetir el apartado anterior realizando capturas a las distintas velocidades.

- 3 Palas

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)						

- 2 Palas

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)						

- 6 Palas

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)						

#### 2- Modificar el ángulo de ataque de las palas.

La configuración inicial del ángulo de ataque de las palas es de 30°. Con ayuda del transportador, vamos a modificar dicho ángulo y comprobar cómo afecta a la generación de la turbina.

<b>Ángulo (°)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>
<b>Potencia (kW)</b>					

**3-** Modificar la distancia de los ventiladores con respecto a la torre del aerogenerador.

En este apartado vamos a comprobar cómo influye que el flujo de aire esté más o menos concentrado. Para ello, colocaremos los ventiladores a las siguientes distancias de la torre del aerogenerador.

<b>Distancia (cm)</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>
<b>Potencia (kW)</b>			

**4-** Colocar ventiladores a sotavento.

Por último, vamos a comprobar si es más efectivo un sistema a barlovento o a sotavento. Para ello, vamos a colocar los ventiladores por detrás de la torre del aerogenerador.

## 6. Resultados de la práctica

1- Obtención de resultados en condiciones normales.

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,07	0,21	0,51	0,97	1,8

2- Modificar el número de palas.

- 3 Palas

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,07	0,21	0,51	0,97	1,8

<b>V Aerogenerador (m/s)</b>	<b>Potencia (kW)</b>
0,00	0
0,00	0
0,00	0
2,13	0,07
2,17	0,08
2,33	0,09
2,66	0,14
2,66	0,14
3,04	0,21
3,35	0,28
3,41	0,29
3,47	0,31
4,09	0,51
4,55	0,7
4,64	0,74
5,07	0,97
5,30	1,1
5,39	1,16
6,24	1,8
6,36	1,91
6,51	2,05

Tabla 3. Resultados obtenidos con configuración de 3 palas.

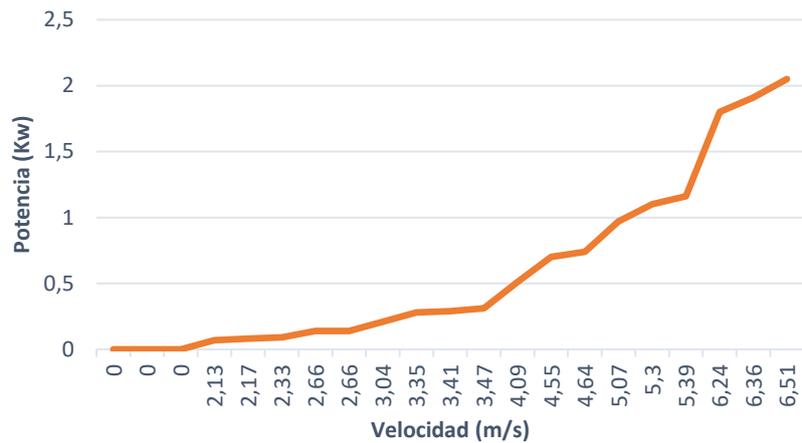


Figura 36. Gráfica de potencia con 3 palas.

Es la configuración más utilizada mundialmente. Se conoce como “Concepto danés”.

- 2 Palas

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)	0	0,08	0,2	0,5	0,9	1,5

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0,00	0
0,00	0
0,00	0
1,11	0,01
1,82	0,04
1,91	0,05
2,05	0,06
2,24	0,08
3,01	0,2
3,48	0,31
3,52	0,32
3,57	0,34
5,86	0,43
4,08	0,5
4,14	0,53
4,50	0,68
4,94	0,89
5,08	0,97
5,16	1,02
5,24	1,06
5,79	1,44
5,90	1,52

Tabla 4. Resultados obtenidos con configuración de 2 palas.

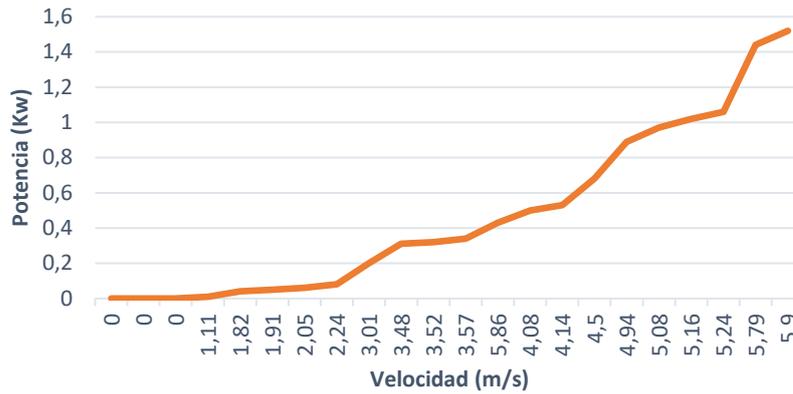


Figura 37. Gráfica de potencia con 2 palas.

La configuración bipala de aerogeneradores tiene la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para entrar y permanecer en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida que en la configuración de 3 palas.

Podemos observar que para obtener 6 m/s de velocidad de giro ya es necesario utilizar el quinto ventilador para alcanzarla.

- 6 Palas

Velocidad (m/s)	0	2	3	4	5	6
Potencia (kW)	0	0,11	0,26	0,53	0,92	1,6

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0,00	0
0,00	0
0,00	0
2,43	0,11
2,66	0,14
2,88	0,18
3,28	0,26
3,32	0,27
4,02	0,48
4,14	0,53
4,24	0,57
4,39	0,63
4,68	0,76
4,85	0,85
4,99	0,92
5,69	1,36
5,75	1,41
5,82	1,46
6,02	1,62

Tabla 5. Resultados obtenidos con configuración de 6 palas.

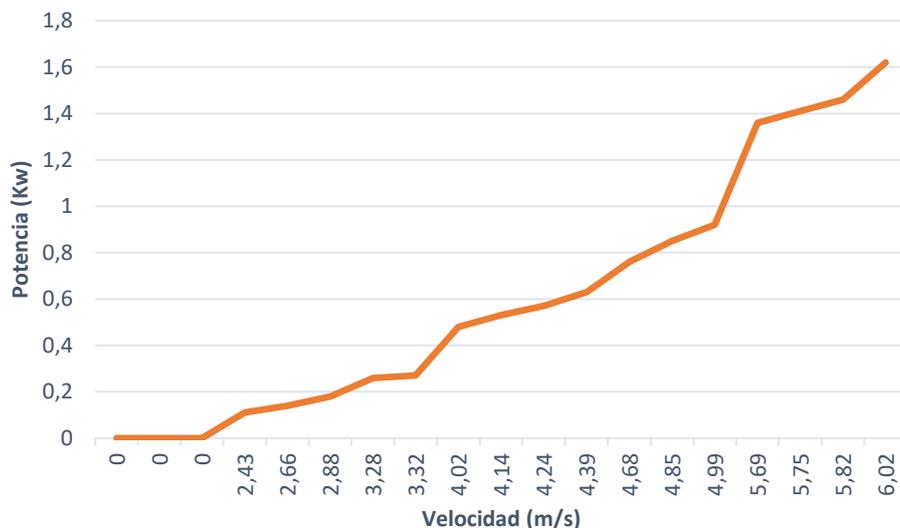


Figura 38. Gráfica de potencia con 6 palas.

Observamos que con menor intensidad de viento conseguimos la velocidad de giro deseada, si bien, la diferencia de potencia con respecto a la configuración inicial, no es significativa con respecto a la diferencia económica que supone instalar el doble de palas.

**3- Modificar ángulo de ataque de las palas.**

Ángulo (°)	0	20	30	45	60	90
------------	---	----	----	----	----	----

Con ayuda del transportador de ángulos que incluye el kit del aerogenerador Vernier, se modifican los ángulos de las palas.



Figura 39. Graduación ángulo de palas.

- 0°

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	<b>0</b>	-	-	-	-	-

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0,00	0
0,00	0
0,00	0
0,00	0
0,00	0
0,00	0
0,00	0

Tabla 6. Resultados obtenidos con configuración de 0°.

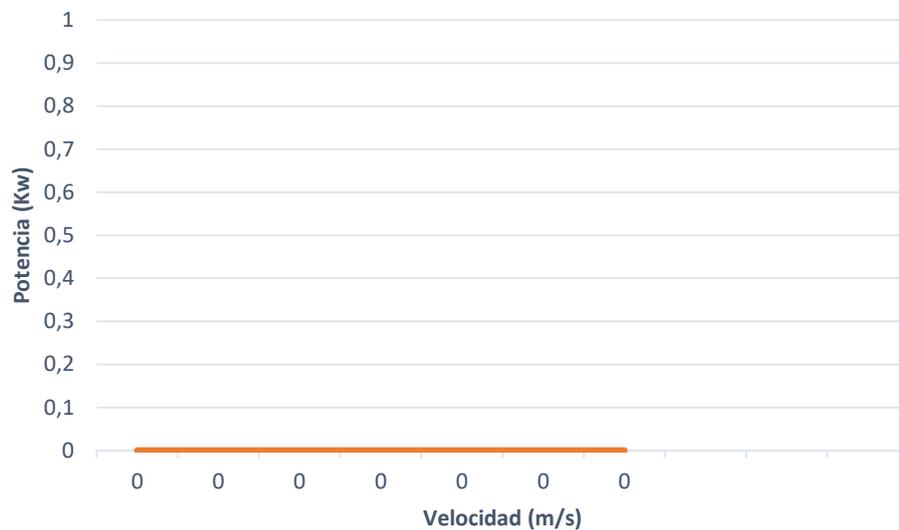


Figura 40. Gráfica de potencia a 0°.

Obviamente, con una configuración a 0° el aerogenerador no se mueve, ya que las palas ofrecen resistencia total.

- 20°

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	<b>0</b>	0,07	0,23	0,51	0,98	1,72

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0	0
0	0
0	0
1,39	0,02
1,65	0,03
1,69	0,04
1,91	0,05
2,12	0,07
2,19	0,08
2,22	0,08
3,12	0,23
3,87	0,43
4,09	0,51
4,33	0,6
5,1	0,98
6,14	1,72

Tabla 7. Resultados obtenidos con configuración de 20°.

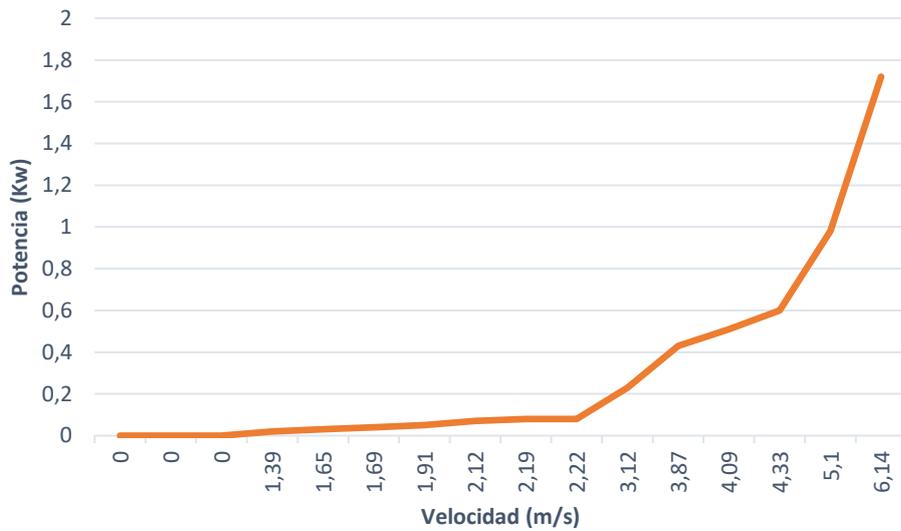


Figura 41. Gráfica de potencia a 20°.

- 45°

<b>Velocidad (m/s)</b>	0	2	3	4	5	6
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,07	0,2	0,51	1,1	-

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0	0
0	0
0	0
1,48	0,02
2,12	0,07
2,26	0,09
2,33	0,09
2,35	0,1
2,52	0,12
2,55	0,12
2,64	0,14
2,66	0,14
2,85	0,17
2,85	0,17
2,99	0,2
3,82	0,41
4,09	0,51
4,33	0,6
4,75	0,79
5,29	1,1
5,53	1,26

Tabla 8. Resultados obtenidos con configuración de 45°.

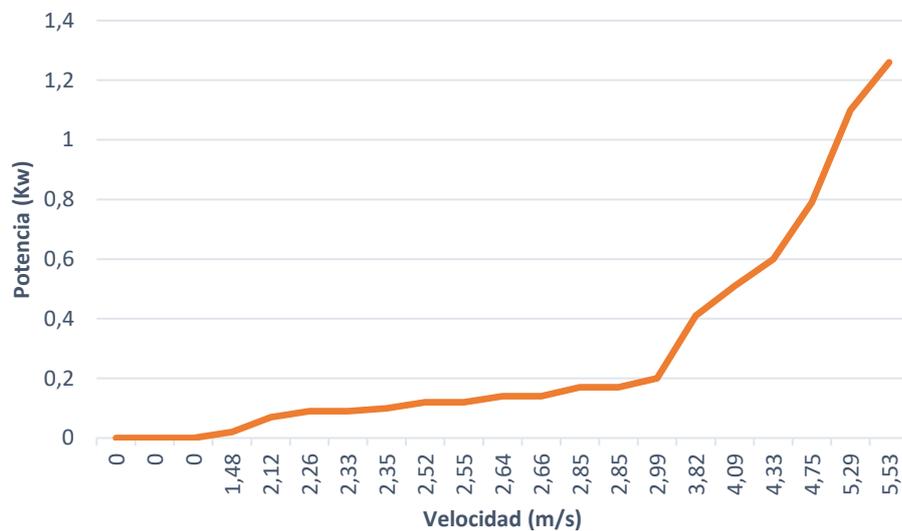


Figura 42. Gráfica de potencia a 45°.

Con las palas en configuración de 45° comprobamos que el aire pasa sin que estas casi opongan resistencia. Por ello, para obtener altas velocidades debemos utilizar el 5º ventilador, y aun así no conseguimos alcanzar la velocidad de 6 m/s.

- 60°

<b>Velocidad (m/s)</b>	0	2	3	4	5	6
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,02	-	-	-	-

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0	0
0	0
0	0
1,14	0,01
1,3	0,02
1,35	0,02

Tabla 9. Resultados obtenidos con configuración de 60°.

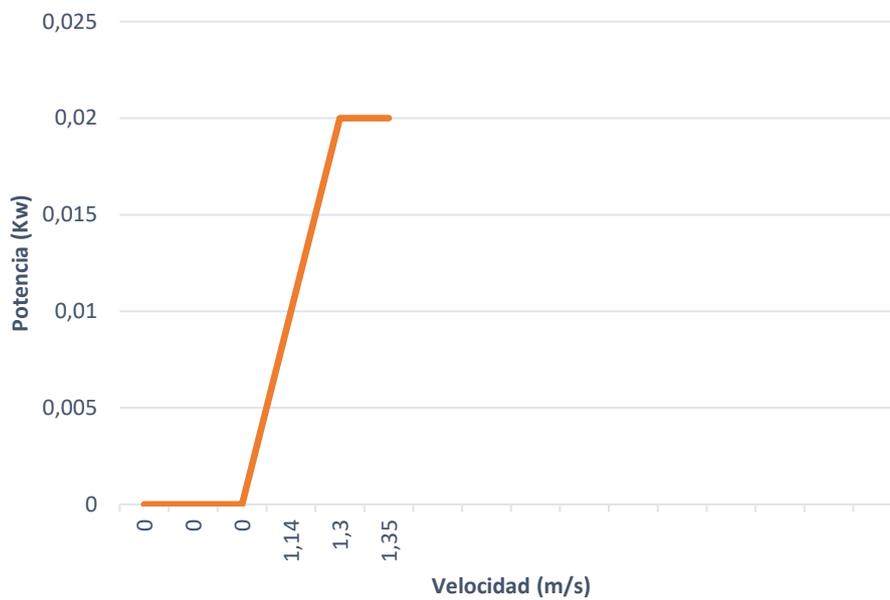


Figura 43. Gráfica de potencia a 60°.

Observamos que los efectos que se mostraban con un ángulo de 45° con el ángulo de 60° se ven incrementados por lo que no llegamos a una velocidad mínima estable.

- 4- Modificar la distancia de los ventiladores con respecto de la torre del aerogenerador

<b>Distancia (cm)</b>	50	70	90
-----------------------	----	----	----



Figura 44. Toma de distancia con metro para la práctica.

- 70 cm

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,06	0,21	0,53	1,06	1,52

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0	0
0	0
0	0
1,97	0,06
1,99	0,06
2,59	0,13
2,71	0,15
2,71	0,15
2,86	0,17
2,88	0,18
3,04	0,21
3,32	0,27
3,82	0,41
4,14	0,53
4,95	0,9
5,22	1,06
5,29	1,1
5,41	1,17
5,69	1,36
5,9	1,52
5,92	1,54

Tabla 10. Resultados obtenidos con distancia de 70 cm.

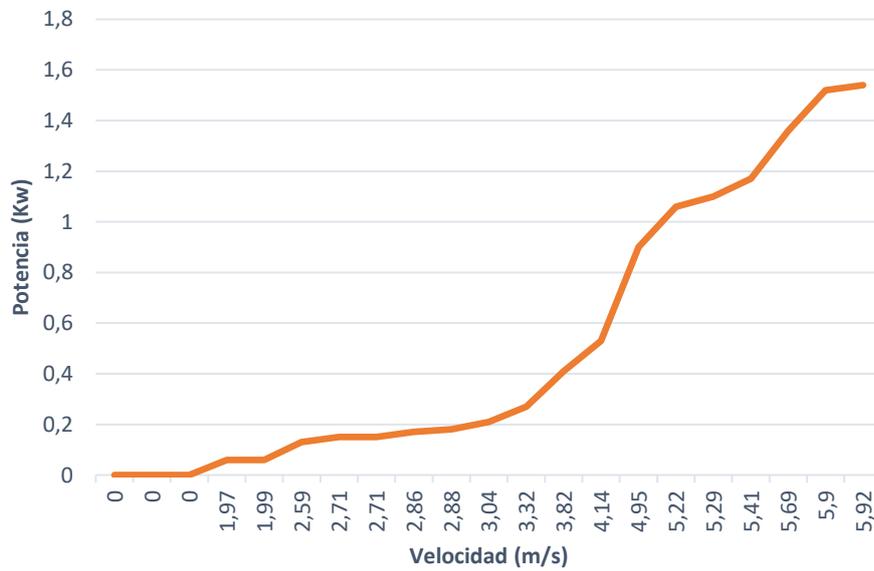


Figura 45. Gráfica de potencia a 70cm.

- 90 cm

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Potencia (kW)</b>	0	0,08	0,22	0,46	0,92	1,8

V Aerogenerador (m/s)	Potencia (kW)
0	0
0	0
0	0
1,77	0,04
1,86	0,05
2,18	0,08
2,44	0,11
3,08	0,22
3,95	0,46
3,96	0,46
4,39	0,63
4,8	0,82
4,93	0,89
4,99	0,92
5,34	1,13
5,74	1,4
6,35	1,89
6,48	2,01
6,76	2,29

Tabla 11. Resultados obtenidos con distancia de 90cm.

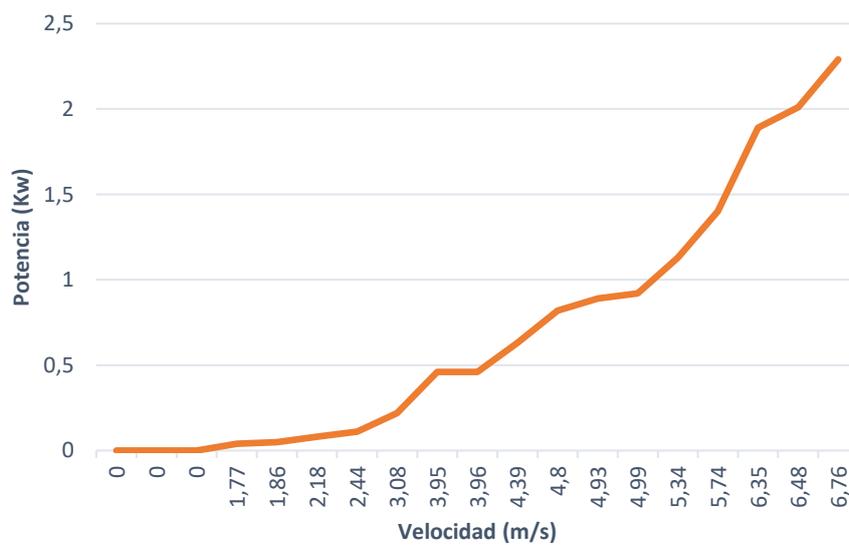


Figura 46. Gráfica de potencia a 90cm.

Al variar la distancia del aerogenerador con respecto a los ventiladores, comprobamos que los datos son más estables ya que el aerogenerador gira a una velocidad más constante debido a que el viento incide en la totalidad de superficie de las palas. Cuanto más cerca están los ventiladores más inciden sobre el rotor y menos sobre las palas.

#### 5- Colocar ventiladores a sotavento.

Lo primero que veremos al colocar los ventiladores por detrás del aerogenerador es que el rotor gira en dirección contraria a la que giraba con los ventiladores por delante, por lo tanto deberemos permutar los cables del aerogenerador para que la lectura por parte de la placa sea correcta.

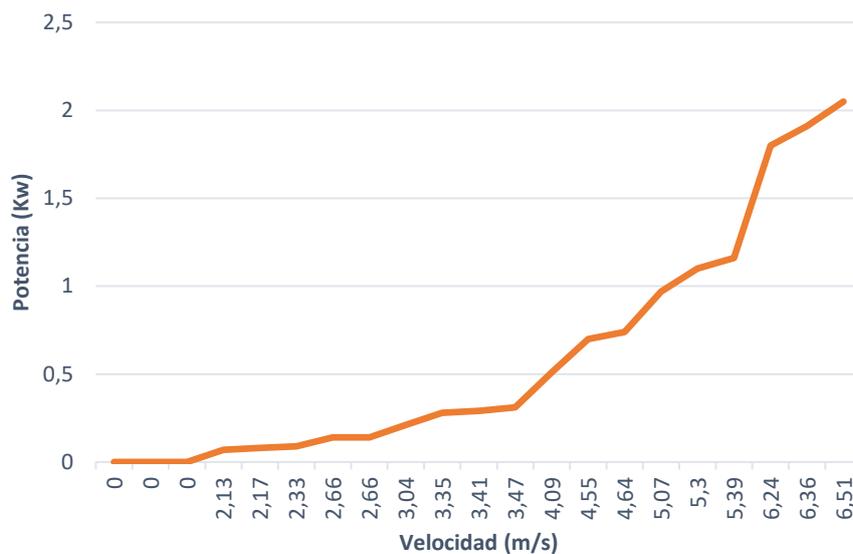


Figura 47. Gráfica de potencia a sotavento

Comprobamos que la variación de potencia generada no es significativa en comparación con la configuración inicial. Este hecho se debe a la configuración de la maqueta del aerogenerador y, en concreto, al diseño de la torre y a la ausencia de una góndola que proyecte una sombra aerodinámica significativa sobre el rotor. Si bien, en la vida real existe un inconveniente claro, y es que existen fluctuaciones de potencia importantes debido al paso del rotor a través del abrigo de la torre.

## 7. Conclusiones y líneas futuras

### 7.1. Conclusiones

En el presente proyecto, se ha estudiado cómo han evolucionado las energías renovables, en especial, la energía eólica a lo largo de la historia. También, se ha comprobado cómo afectan acontecimientos de actualidad como la crisis sanitaria debido a la Covid-19 a la demanda de energía y que las energías renovables se postulan como vía de recuperación económica para organismos como la Unión Europea. Se ha diseñado un practica didáctica para la monitorización de un aerogenerador vía hardware open-source, una herramienta para el desarrollo y manejo de aplicaciones totalmente accesibles bajo licencia libre.

Una vez realizado este trabajo, consiguiendo monitorizar la potencia generada por el aerogenerador y dibujando su curva de potencia frente a la velocidad, concluimos que se puede implementar una práctica didáctica completa que aborda tanto la programación, el montaje de estructuras y el ensamblaje de componentes electrónicos de manera sencilla gracias en mayor medida al hardware open-source.

### 7.2. Líneas futuras

Las torres de los aerogeneradores se componen de láminas de acero soldado, las cuales han de resistir una elevada carga. Es por eso que, resulta interesante conocer su estado de mantenimiento para garantizar la durabilidad del conjunto del aerogenerador.

Existen casos en los que fuertes rachas de viento acompañadas, en ocasiones, con falta de mantenimientos de la estructura, han causado el colapso de la torre del aerogenerador.



*Figura 48. Vista del colapso de un aerogenerador en el Moncayo (Zaragoza). (Fuente: El País)*

En un proyecto más avanzado se podría incluir un estudio de cómo afectan las inclemencias meteorológicas, en especial el viento intenso, a la torre del aerogenerador

realizando una monitorización estructural mediante un sistema óptico, por ejemplo, redes de difracción (FBGs: Fiber Bragg Gratings).

La principal ventaja de esta técnica, sería la reducción de costes de mantenimiento, ya que se podría monitorizar el estado de la estructura de la torre del aerogenerador de manera remota sin necesidad de desplazarse hasta la ubicación del mismo, de una manera precisa, rápida y eficaz. A continuación, se muestra una tabla con las principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

	Aplicaciones	Ventajas	Inconvenientes
<b>Sistemas ópticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformaciones</li> <li>• Ph</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Corrosión</li> <li>• Retracción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TX de datos a velocidad de la luz</li> <li>• Elevada durabilidad</li> <li>• No afección de radiaciones electromagnéticas</li> <li>• Separación de efectos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragilidad del sistema</li> <li>• Afección por suciedad y polvo</li> <li>• Precaución por dobleces del cableado</li> </ul>

Tabla 12. Características sistemas ópticos. (Fuente: Estudio experimental de sensores tipo FBGs para medir deformaciones y temperaturas en estructuras. Benjamín Torres Górriz)

En este proyecto se ha incluido un sensor de temperatura y humedad. Si bien, los datos que arroja son meramente informativos, ya que el parámetro de densidad del aire que se utiliza es el que se emplea en condiciones normales (Densidad a 15°C es de 1,225 kg/m<sup>3</sup>).

En un futuro proyecto, junto con un sensor de presión ambiental como el BMP180 de Arduino, se podrían obtener datos mucho más precisos, aplicando la fórmula de densidad de aire seco.

$$\rho = \frac{p}{\left(\frac{R}{M}\right)T}$$

Donde:

- p es la presión (Pa).
- R es la constante universal de los gases  $8.31447 \left(\frac{J}{mol \cdot K}\right) = 0.08205746 \left(\frac{atm \cdot l}{mol \cdot K}\right)$ .
- M es la masa molecular del aire seco  $28.966 \times 10^3 \left(\frac{kg}{mol}\right)$ .
- T es la temperatura en Kelvin.

## 8. Bibliografía

- [1] Alberto Arroyo Gutiérrez, Mario Mañana Canteli, Raquel Martínez Torre, Jesús Mirapeix Serrano, Cándido Capellán Villacian. *Energías Renovables (I) Introducción*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2018.
- [2] Alberto Arroyo Gutiérrez, Mario Mañana Canteli, Raquel Martínez Torre, Jesús Mirapeix Serrano, Cándido Capellán Villacian. *Energía eólica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2018.
- [3] *Scientific technology for educators & students*. <http://vernier.com>
- [4] *Covid-19: Impacto en los mercados de energía y oportunidades*. <http://energias-renovables.com>
- [5] *Previsiones de precios y demanda de energía*. <http://aleasoft.com>
- [6] *Pantalla LCD de Arduino*. <http://geekfactory.mx/tutoriales-arduino/>
- [7] *¿Qué es el hardware open-source?* <http://oshwa.org>
- [8] *Hardware open-source*. <http://elarduino.com>
- [9] *IEA, World Energy Balances, 2019*. <http://iea.org>
- [10] *Modelo de Betz*. <http://bibing.us.es>
- [11] Oscar López Ruiz. *Diseño de una práctica didáctica para la caracterización de un kit aerogenerador*, 2016.
- [12] *Datos de demanda de energía eléctrica*. <http://ree.es>