



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Eléctrica**

# **POTENCIAL EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS EÓLICOS EN CASTILLA Y LEÓN**

**Autor:**

**De Pablo García, M<sup>a</sup> Soraya**

**Tutor:**

**Parra Santos, M<sup>a</sup> Teresa  
Departamento de Ingeniería  
Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, Julio 2019.**



# Agradecimientos

Agradecerle a mi familia todo el apoyo recibido durante el transcurso universitario, especial mención a mi madre, por no dejar que me diera por vencido nunca.

También a todas las personas que han estado a mi lado animándome en todos los momentos difíciles de la carrera.



## ***RESUMEN***

Bajo el marco del proyecto 'TIMMIS' se realizará el estudio de los recursos eólicos en Castilla y León con el propósito de construir un nuevo parque eólico en Castromonte (Valladolid). En este trabajo fin de grado, se analizará si dicho municipio es apropiado para albergar la nueva construcción a través del estudio del potencial eólico de la zona. Además, se obtendrá de forma teórica y de forma experimental la energía que se puede extraer de un aerogenerador en función de sus dimensiones y se comprobará que los resultados en ambos casos, son similares. También, se expondrán las ventajas e inconvenientes que caracterizan a este tipo de energía renovable.

Finalmente, se analizarán los diferentes sistemas de acumulación de la energía eólica existentes actualmente.

## ***PALABRAS CLAVE***

Aerogenerador, velocidad del viento, energía eólica, almacenamiento, cambio climático.





## ÍNDICE

CAPITULO 1 -	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Justificación del proyecto.....	1
1.2.	Estructura de la generación eléctrica en España .....	1
1.3.	Objetivos .....	3
1.4.	Estructura de la memoria .....	4
CAPITULO 2 -	GENERALIDADES DE UN AEROGENERADOR.....	7
2.1.	Elementos constructivos de un aerogenerador.....	7
2.2.	Funcionamiento de un aerogenerador.....	10
CAPITULO 3 -	RECURSOS EÓLICOS .....	13
3.1.	Registros de los datos meteorológicos.....	13
3.2.	Elección de los distintos emplazamientos.....	14
3.3.	Distribución de la velocidad en los emplazamientos seleccionados en el año 2015.....	16
3.4.	Distribución de Villanubla en diferentes años .....	18
3.5.	Probabilidad real de Villanubla en 2018.....	20
3.6.	Rosa de los vientos.....	21
3.7.	Potencia en el viento disponible .....	23
CAPITULO 4 -	POTENCIAL EÓLICO .....	29
4.1.	Función de Weibull: Influencia de los factores de c y k.....	29
4.2.	Elección de los factores de la función de Weibull.....	31
4.3.	Energía con Weibull teórica .....	34
4.4.	Energía resultante experimental.....	38
4.5.	Certidumbre de la generación energética teórica .....	42
CAPITULO 5 -	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	43
5.1.	Ventajas de la energía eólica .....	43
5.1.1.	Abastecimiento de la energía eléctrica a los ciudadanos .....	43
5.1.2.	Reducción de las emisiones de CO2 .....	44
5.2.	Inconvenientes de la energía eólica.....	46
5.2.1.	Ruido .....	46

5.2.2.	Impacto visual.....	47
5.2.3.	Impacto medioambiental.....	49
<b>CAPITULO 6- ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA.....</b>		<b>51</b>
6.1.	<i>Introducción.....</i>	<i>51</i>
6.2.	<i>Almacenamiento hidráulico bombeado.....</i>	<i>52</i>
6.3.	<i>Almacenamiento con aire comprimido.....</i>	<i>54</i>
6.4.	<i>Almacenamiento en baterías ion-litio.....</i>	<i>56</i>
6.5.	<i>Segunda vida de las baterías de los coches eléctricos.....</i>	<i>58</i>
<b>CAPITULO 7- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>		<b>61</b>
7.1.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>61</i>
7.2.	<i>Trabajos futuros.....</i>	<i>63</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>.....</i>	<i>65</i>

## ***CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN***

### **1.1. *Justificación del proyecto***

El presente trabajo está vinculado al proyecto “0422 TIMMIS EMPRENDEDURISMO\_2\_E, Innovación en el fomento del emprendimiento en el área transfronteriza hispanoportuguesa mediante la formación de equipos TIMMIS (Transfronterizos, Inclusivos, Multidisciplinares y Multiculturales con visión Internacional Sostenible), aprobado en la Convocatoria Interreg España-Portugal V-A 2014-2020 (Fondo Europeo de Desarrollo Regional)”.

En él, se aportó la información relacionada con la energía eólica y se transmitieron las ganas de frenar el cambio climático. Más concretamente, se expuso la idea de la creación de un nuevo parque eólico en el término municipal de Castromonte (Valladolid), con el propósito de aumentar así la potencia instalada de las energías renovables e ir dejando poco a poco en desuso las tecnologías convencionales generadoras de gases contaminantes.

Por este motivo, se ve necesario realizar un estudio de los recursos eólicos de la zona con el fin de comprobar que es una zona óptima para la instalación de dicho parque.

Castromonte se encuentra situado en la zona de los Montes Torozos, en la mitad norte de la provincia de Valladolid, a unos 30 km. de la capital. Además, cuenta con una altura sobre el nivel del mar de 840 metros. En el mapa 1.1 se muestra representada la ubicación exacta de dicho municipio.



*Mapa 1.1: Ubicación del municipio de Castromonte en la provincia de Valladolid*

### **1.2. *Estructura de la generación eléctrica en España***

La creación de un nuevo parque eólico ha despertado el interés por conocer la evolución de la potencia instalada con el paso de los años en España.

Por este motivo, en las imágenes 1.1 y 1.2 se representa el porcentaje que existe de cada tipo de tecnología en el año 2017 y 2018 respectivamente.

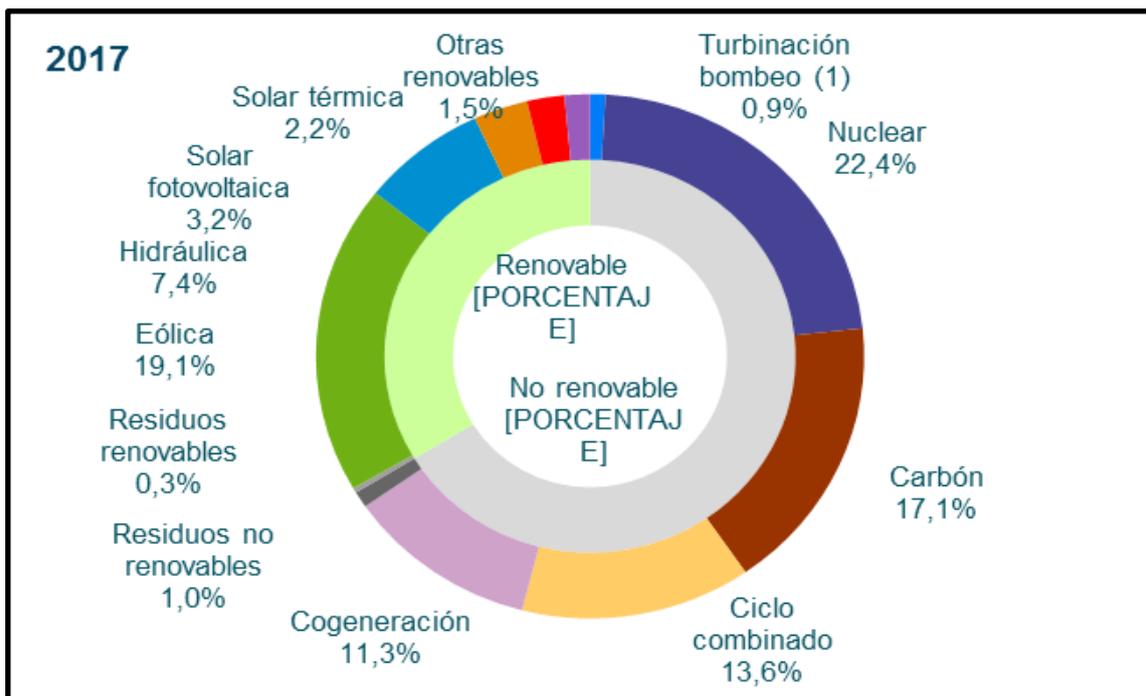


Imagen 1.1: Estructura de la generación eléctrica peninsular (en %) en España en el año 2017. Referencia [REE, 2019]

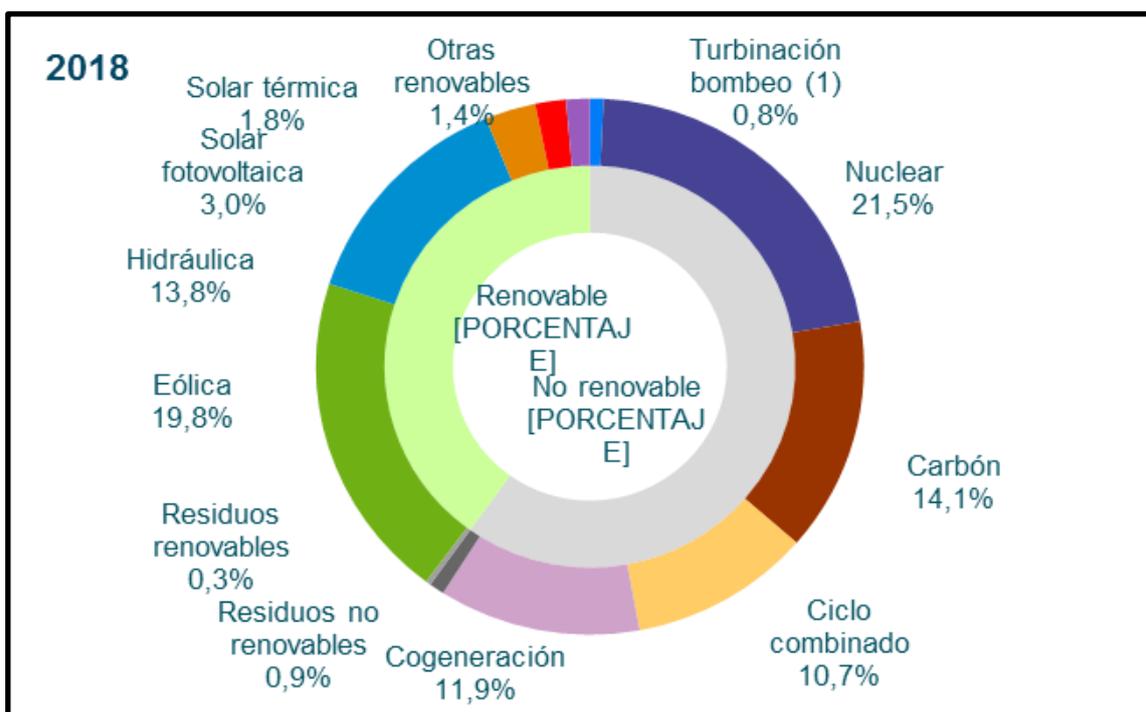


Imagen 1.2: Estructura de la generación eléctrica peninsular (en %) en España en el año 2018. Referencia [REE, 2019]



Como se puede visualizar en estas imágenes, la generación a partir de energías renovables, del año 2017 al año 2018, ha aumentado un 6.4 %, reduciéndose así la generación de electricidad a partir de tecnologías convencionales.

En el caso que interesa en este trabajo, el aumento de la energía eólica también va en aumento año tras año. Esto es debido a que, igual que en Castromonte, en otros puntos de la geografía española se está apostando por el desarrollo masivo de este tipo de tecnología.

Por lo tanto, año tras año, el consumo de energía eléctrica en España poco a poco se irá haciendo a través de energías consideradas “verdes”, es decir, que no emiten gases nocivos a la atmósfera, y con el consiguiente, de evitar que el cambio climático siga yendo a más.

### 1.3. *Objetivos*

En el proyecto TIMMIS se mostró el propósito de construir un nuevo parque eólico en Castromonte, por tanto, en el presente trabajo se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- ❖ El primer objetivo será la comprobación de que el término municipal de Castromonte es una ubicación excelente para la instalación de un nuevo parque eólico. En caso afirmativo, analizar el potencial y los recursos eólicos que existen en los Montes Torozos a través de los registros meteorológicos.
- ❖ Establecer la metodología para la obtención de los parámetros idóneos de la función teórica de Weibull que se ajusten lo máximo posible a los resultados experimentales.
- ❖ Comparar la energía extraída del viento de forma teórica y de forma experimental con el fin de comprobar que se ha hecho una buena elección de los parámetros de la función de Weibull.
- ❖ Estimar el número de habitantes que pueden ser abastecidos gracias a la generación de energía eléctrica a través de un aerogenerador, además de, estimar la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al utilizar una energía limpia, así como, las toneladas equivalentes de petróleo.
- ❖ Realizar un análisis del impacto ambiental que tiene la energía eólica frente a otras fuentes energía, y detallar los principales inconvenientes de este tipo de tecnología.

- ❖ Por último, como el combustible de la energía eólica es el viento, y solo existe generación de energía eléctrica cuando lo hay, se debe analizar las principales formas de almacenamiento de dicha energía con el fin de no desperdiciar lo producido en los momentos en los que la demanda de electricidad sea escasa. Consiguiendo así, utilizarla cuando sí exista una gran demanda aunque la velocidad del viento no sea lo suficientemente alta como para poner en funcionamiento el aerogenerador.

#### **1.4. Estructura de la memoria**

El presente trabajo está estructurado en 7 capítulos en los que se van desarrollando los objetivos mostrados anteriormente:

- ❖ Capítulo 1: Introducción. Breve explicación del lugar en el que se encuentra actualmente la energía eólica en España con respecto a las demás tecnologías. Del mismo modo, se expone la justificación de este trabajo y los objetivos a desarrollar.
- ❖ Capítulo 2: Generalidades de un aerogenerador. Se describen todos los elementos de los que está compuesto un aerogenerador, además del funcionamiento de los mismos para conseguir transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica.
- ❖ Capítulo 3: Recursos eólicos. Se estudian los recursos eólicos de diferentes municipios con el fin de comprobar que Castromonte tiene la mejor ubicación para la construcción de un nuevo parque eólico. Una vez confirmado, se procesan los registros meteorológicos del viento para así obtener la potencia eólica que se puede extraer de forma experimental en este lugar.
- ❖ Capítulo 4: Potencial eólico. Se calcula la energía anual que puede producir un aerogenerador de forma teórica a través de la función de Weibull y la obtenida de forma experimental a partir de los datos obtenidos en el capítulo 3. Finalmente, se comparan ambos resultados y se extraen conclusiones.
- ❖ Capítulo 5: Ventajas e inconvenientes de la energía eólica. Se exponen las principales ventajas (abastecimiento de la población, TEP y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>) e inconvenientes (ruido, impacto visual e impacto medioambiental) de la utilización de esta energía renovable.



- ❖ Capítulo 6: Almacenamiento de la energía. Se describen los principales sistemas de almacenamiento de la energía eólica, para poder así, seguir proporcionando energía eléctrica a pesar de haber ausencia de viento.
- ❖ Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros: Se detallan las conclusiones obtenidas en función de los objetivos marcados anteriormente y se proponen algunos trabajos que podrían dar continuidad a este proyecto.



## ***CAPITULO 2 - GENERALIDADES DE UN AEROGENERADOR***

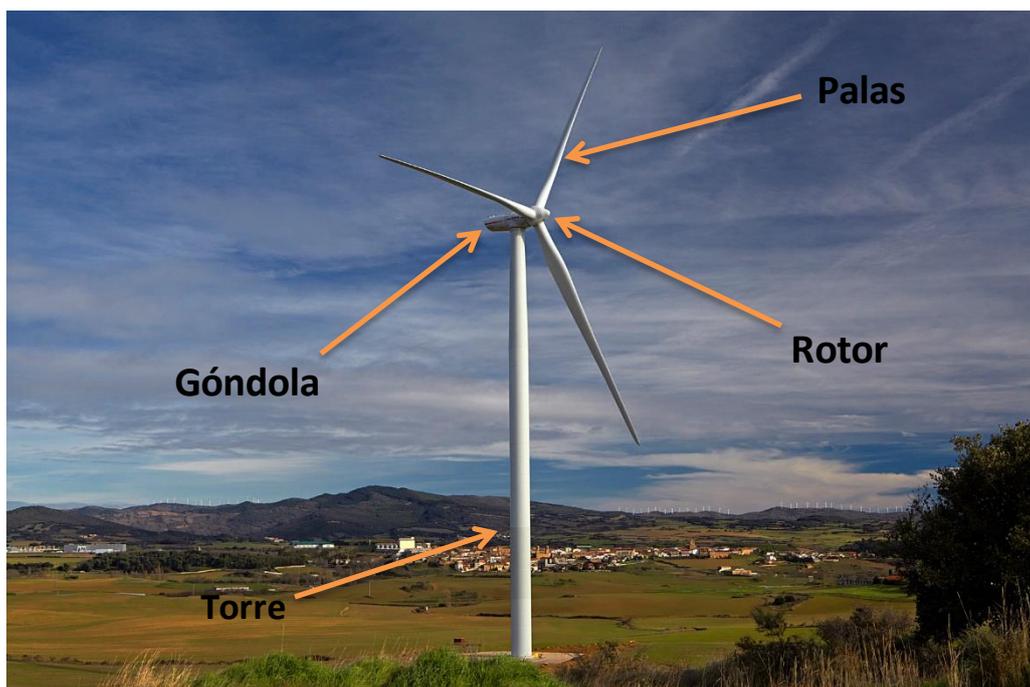
Antes de meterse de lleno con el estudio de los recursos eólicos que hay en Castilla y León, en este breve capítulo, se van a exponer tanto los elementos que forman parte un aerogenerador como el funcionamiento del mismo con el objetivo de poder entender todos los conceptos que se mencionen en el resto del presente trabajo.

### ***2.1. Elementos constructivos de un aerogenerador***

Actualmente, dependiendo del lugar y de las condiciones meteorológicas que existan en la zona donde se va a instalar un aerogenerador, se puede elegir entre una amplia variedad de diseños. Estos se clasifican principalmente en aerogeneradores de eje vertical o de eje horizontal, existiendo diversos tipos dentro de cada uno de ellos. Los de eje horizontal son los más adecuados para elevadas velocidades de viento, proporcionando un alto rendimiento, aunque por el contrario, también provocan un elevado nivel de ruido.

En este trabajo se hablará únicamente de los aerogeneradores de eje horizontal tripala debido a que son los que mejor se adaptan a la zona de interés. Por esta razón, se pasará a describir cada uno de los elementos de los que se componen.

Se comenzará describiendo los elementos indicados en la imagen 2.1. Estos se corresponden con los elementos que se pueden distinguir desde una cierta distancia.

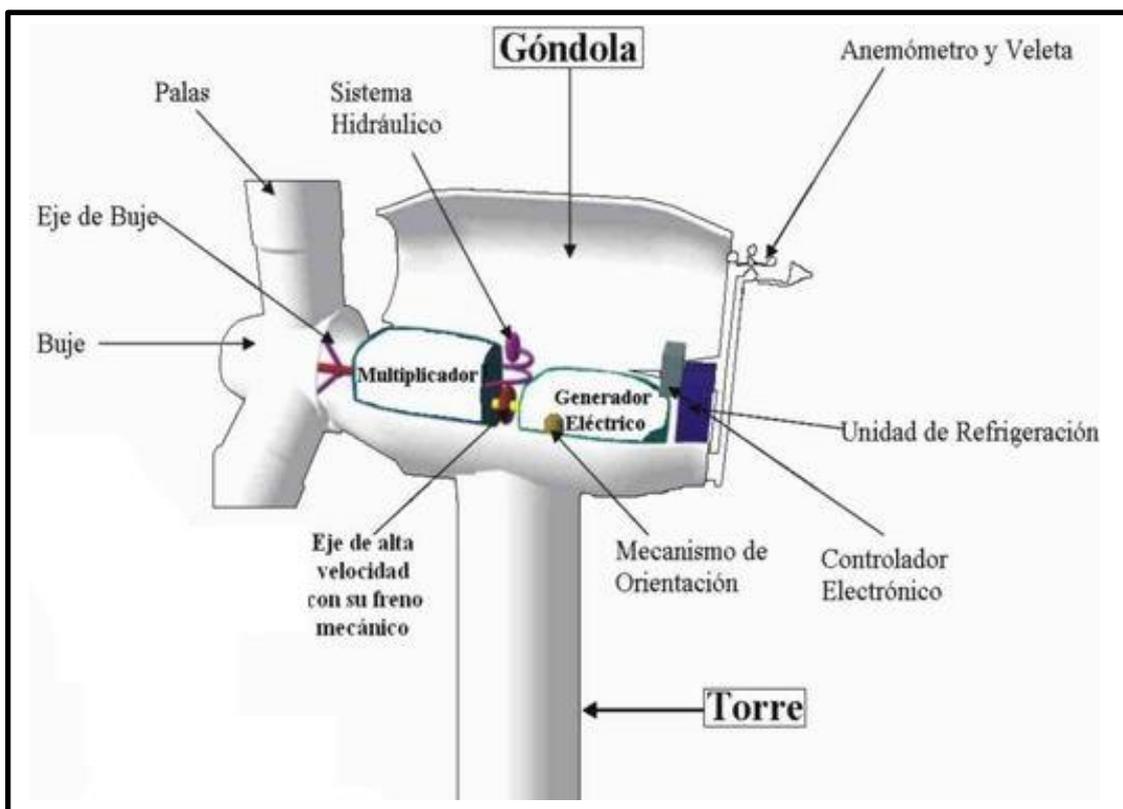


*Imagen 2.1: Elementos externos de un aerogenerador.  
Referencia [Reve, 2019]*

- ❖ **Torre:** Elemento estructural que sostiene la góndola y el rotor a una determinada altura. Cuanto mayor sea la distancia entre el suelo y los elementos mencionados, mayor producción se obtendrá ya que la velocidad del viento también será mayor debido a la capa límite terrestre. Por el interior de ésta, el personal de mantenimiento puede acceder a la góndola a través de un ascensor.
  
- ❖ **Góndola:** Elemento ubicado en la parte alta de la torre. En el interior, se localizan los componentes eléctricos y mecánicos necesarios para transformar la energía mecánica en eléctrica. La parte externa de la góndola, lleva instalada una veleta y un anemómetro los cuales están conectados al controlador electrónico del aerogenerador. También, para asegurarse de la refrigeración del motor, consta de unos respiraderos.
  
- ❖ **Rotor:** Elemento acoplado al eje de baja velocidad con el objetivo de transmitir el giro. Este elemento, agrupa 3 partes del aerogenerador.
  - Nariz: Elemento aerodinámico situado en contra de la trayectoria del viento, sobresaliendo de la línea de unión entre el buje y las palas.
  
  - Buje: Elemento que conecta las palas del aerogenerador con el eje de baja velocidad. Su misión es transmitir al interior de la góndola la potencia del viento. Además, es el único elemento externo que gira.
  
  - Palas: Son las encargadas de captar de forma eficaz la potencia del viento y transmitirla al buje. Dependiendo de la potencia que se desee generar, existen infinidad de diseños y de tamaños.

Se continuará describiendo todos los elementos internos del aerogenerador que aparecen en la imagen 2.2, además de los dispositivos externos, la veleta y el anemómetro.

- ❖ **Anemómetro:** Dispositivo que se utiliza para medir la velocidad del viento. Está conectado al controlador electrónico con el objetivo de transmitir la orden de poner en marcha un aerogenerador o detenerlo en caso necesario.
  
- ❖ **Veleta:** Dispositivo giratorio capaz de indicar la dirección del viento. Al igual que el anemómetro, envía las señales necesarias al controlador electrónico para hacer girar la góndola sobre la torre hasta orientarse paralela a dirección del viento.



*Imagen 2.2: Elementos interior de un aerogenerador. Referencia [Solo-eólica, 2019]*

- ❖ **Eje de baja velocidad (Eje de buje):** Eje que enlaza el buje del rotor con el multiplicador. Además, en su interior se encuentran conductos del sistema hidráulico que permiten el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.
- ❖ **Multiplicador:** Caja de engranajes situada entre el eje de baja velocidad y el de alta velocidad. Es el encargado de hacer que el eje de alta gire 50 veces más rápido que el de baja.
- ❖ **Eje de alta velocidad:** Eje que gira a unas 1500 rev/min aproximadamente haciendo que el generador eléctrico funcione. Lleva incorporado un freno de disco mecánico en caso que el freno aerodinámico falle.
- ❖ **Generador eléctrico:** Elemento encargado de transformar la energía mecánica obtenida por el rotor en eléctrica.
- ❖ **Controlador electrónico:** Ordenador capaz de monitorizar de forma constante las condiciones del aerogenerador. También, con el objetivo de aumentar la eficiencia de este, es el encargado de controlar la veleta.

- ❖ **Unidad de refrigeración:** La función principal de este elemento es expulsar el calor que emite el generador y los demás sistemas eléctricos. Para ello, se hace uso de un ventilador y de una unidad refrigerante por aceite o por agua con el fin de enfriar el aceite del multiplicador.

Para finalizar, se mencionan dos elementos a mayores que no aparecen en la imagen 2.2 pero que también se encuentran en el interior de los aerogeneradores.

- ❖ **Cableado de potencia:** Son los encargados de transportar la energía eléctrica generada por el generador eléctrico hasta el transformador.
- ❖ **Transformador interno:** Dispositivo encargado de elevar la tensión lo suficiente como para ser transportada por canalización subterránea hasta la subestación.

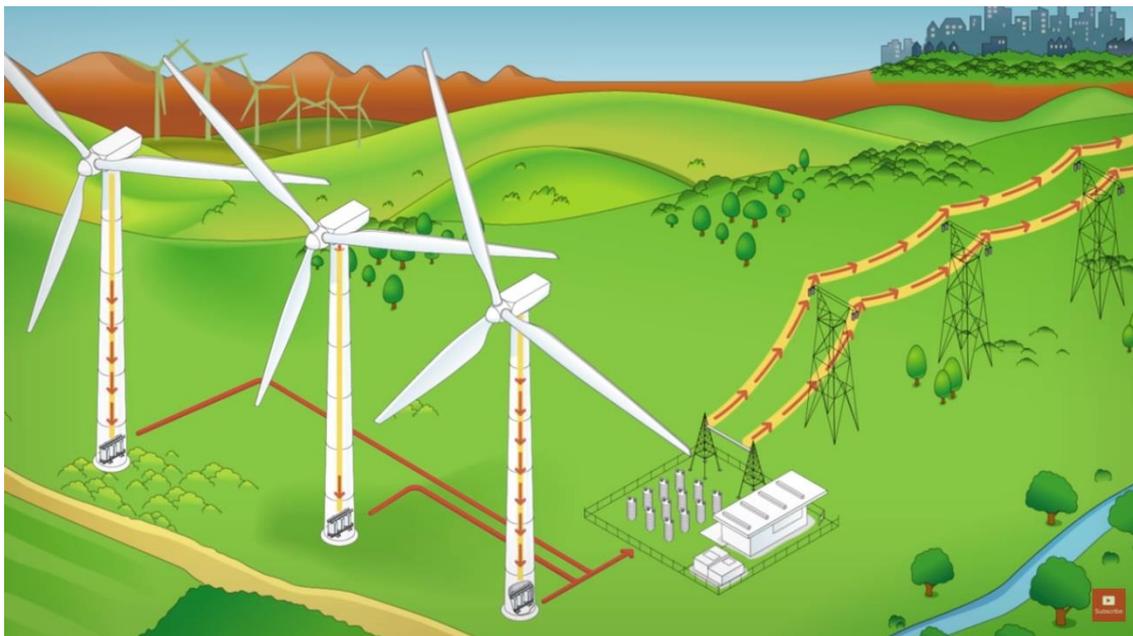
## **2.2. Funcionamiento de un aerogenerador**

El aerogenerador es el único elemento capaz de convertir la fuerza del viento en electricidad. Por ello, a continuación, se describe el proceso completo que lleva a cabo desde que capta la fuerza del viento en forma de energía cinética hasta que llega a la subestación a través de los cables subterráneos de alta tensión transformada en energía eléctrica.

Lo primero y más importante es la captación de la máxima potencia posible que se pueda extraer del viento. Para conseguirlo, las palas tienen que estar perpendicular a la dirección con la que sopla el viento en cada momento. Esta orientación idónea se consigue gracias a la veleta, un aparato instalado en la parte trasera de la góndola que envía las señales precisas al controlador electrónico. Este, es el encargado de dar la orden para que la góndola gire sobre la torre y se coloque automáticamente en la dirección exacta. También, las palas del aerogenerador girarán sobre su propio eje para ofrecer el par máximo, y así, poder trabajar a pleno rendimiento.

Una vez alcanzada esta posición, la energía cinética contenida en las corrientes del aire, provocará el movimiento giratorio de las palas comenzando así, el proceso de la transformación a la energía mecánica. Como las palas están unidas al aerogenerador a través del buje y éste, está acoplado al eje de bajas velocidades, todos estos elementos giran a la misma velocidad. Siendo esta velocidad del orden de 12 rev/min, aunque hay que tener en cuenta que los aerogeneradores pequeños giran más rápido que los grandes.

Sin embargo, para producir energía eléctrica es necesario tener velocidades de giro elevadas, por lo que se ve necesario un aumento considerable de las revoluciones. De eso se encarga el multiplicador, proporcionando un aumento de la velocidad hasta las 1500 rev/min que son transmitidas directamente al generador. Es entonces cuando en este último elemento, la energía mecánica es convertida en energía eléctrica en forma de corriente continua.



*Imagen 2.3: Esquema de un parque eólico y recorrido de la energía eléctrica. Referencia [ACCIONA, 2019]*

Como bien indican las flechas de la imagen 2.3 la corriente continua es conducida hasta la base de la torre donde un convertidor la transformará a corriente alterna, forma en la que es utilizada generalmente. Seguidamente, un transformador elevará la tensión para ser transportada por canalización subterránea hasta la subestación donde, de nuevo, se elevará dicha tensión y de ahí, será transportada hasta los diferentes puntos de consumo.



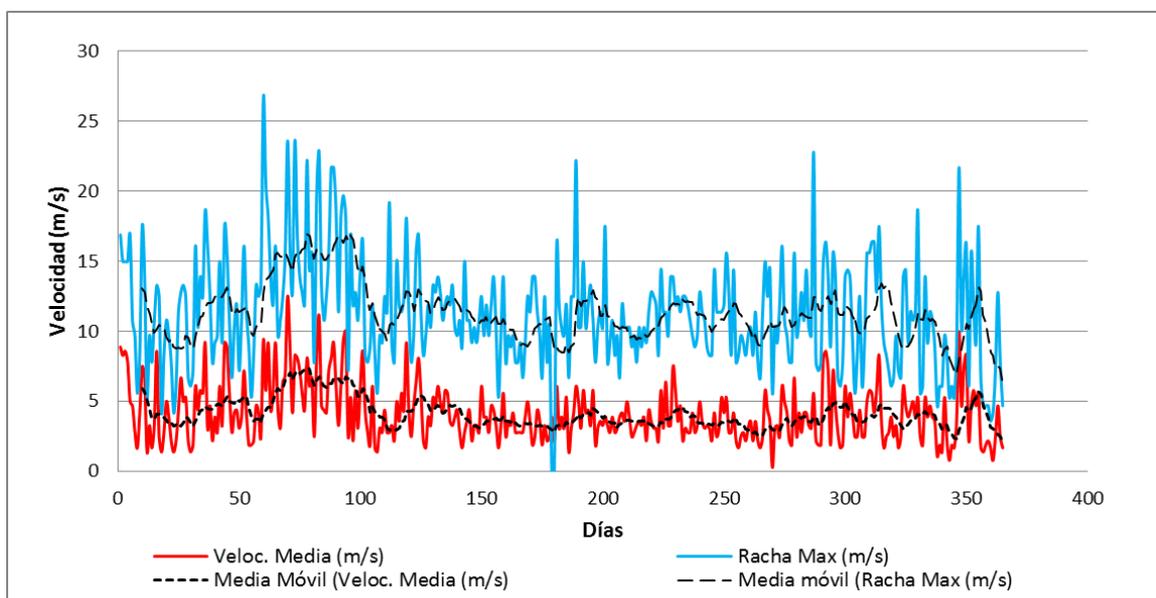
## CAPITULO 3 - RECURSOS EÓLICOS

### 3.1. Registros de los datos meteorológicos.

El estudio que se va a realizar sigue el método descrito tanto en el artículo [Carrillo, 2014] que realiza un estudio similar a este pero en Galicia, como el de [Shu, 2015] que lo realiza en Hong Kong. Se podrá llevar a cabo gracias al registro de los datos meteorológicos de la página web de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología en España). [AEMET, 2018]

La AEMET contiene datos de libre acceso público sobre los registros obtenidos en las diferentes estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país desde 1920, y en algunos casos, hasta la actualidad. Los datos que se pueden encontrar en dicha página pueden ser acerca de la temperatura, la velocidad del viento, la cantidad de las precipitaciones, etc.

En este caso, para saber los recursos eólicos que posee la zona a estudiar, el principal interés de la página recae sobre los datos del viento. En ellos, se podrá adquirir la información referente a la velocidad media del viento, la racha máxima, la hora a la que se produjo dicha racha y la fecha de la recogida de los datos mencionados.

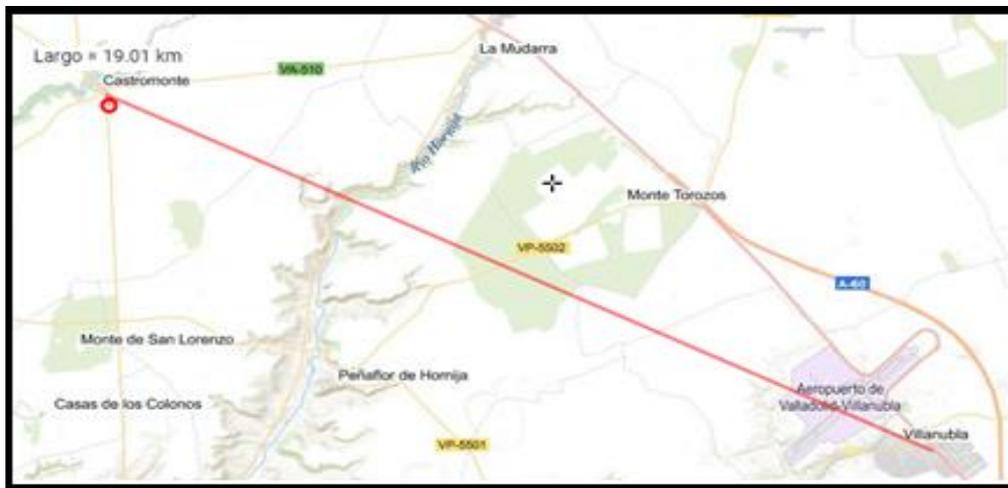


Gráfica 3.1: Velocidades medias y rachas máximas a lo largo del año 2018 en la estación meteorológica de Villanubla.

Como ejemplo, la gráfica 3.1, expone cada uno de los parámetros que proporciona la AEMET. Aunque para llegar a conseguirla, previamente se han tenido que procesar los datos.

Sin embargo, se debe de tener en cuenta que no en todos los puntos de la geografía española cuenta con una estación meteorológica. Es por ello, por lo que se debe buscar una de estas próxima al punto de interés.

La provincia de Valladolid cuenta únicamente con 3 estaciones situadas en Olmedo, Valladolid y Villanubla. Siendo esta última de mayor utilidad por la situación geográfica que ocupa con respecto a la zona de interés de este trabajo, ya que la distancia entre ambos es tan solo de 19 km. aproximadamente. El mapa 3.1 muestra dicha distancia.



*Mapa 3.1: Distancia lineal entre Villanubla y Castromonte*

### **3.2. Elección de los distintos emplazamientos**

La construcción de un parque eólico en un determinado lugar depende de los recursos eólicos de la zona como bien se ha mencionado con anterioridad. Para establecer qué zona es más provechosa para este fin, se ha seguido el procedimiento descrito en el artículo de [Carrasco, 2015] dónde toma como base, 4 lugares de bastante proximidad en el noroeste de México.

Para el presente estudio, se elegirán 4 emplazamientos de Castilla y León cercanos al punto de interés, de los cuáles se procesarán los datos proporcionados por [AEMET, 2018] con el propósito de graficar, visualizar y comparar la distribución anual y acumulada de la velocidad en cada uno de ellos a lo largo de un determinado año.

### CAPÍTULO 3: RECURSOS EÓLICOS

En la tabla 2.1 se muestran las ubicaciones exactas de las estaciones meteorológicas escogidas. Estas han sido las seleccionadas por su proximidad al municipio de Castromonte.

EMPLAZAMIENTOS ESTUDIADOS	Nombre	Provincia	Altitud	Latitud	Longitud	Inicio Datos	Fin Datos
	ARANDA DE DUERO	BURGOS	790 m.	41°39'57"N	03°44'34"W	16/04/2002	02/02/2019
	BENAVENTE	ZAMORA	715 m.	42°00'39"N	05°40'00"W	17/12/1988	02/02/2019
	OLMEDO	VALLADOLID	740 m.	41°19'33"N	04°41'13"W	12/09/1991	10/12/2017
	VALLADOLID AEROPUERTO	VALLADOLID	846 m.	41°42'43"N	04°51'20"W	01/11/1936	02/02/2019

*Tabla 3.1 Emplazamientos escogidos para el estudio de los recursos eólicos.*

Que situadas en el plano quedarían ubicadas así:



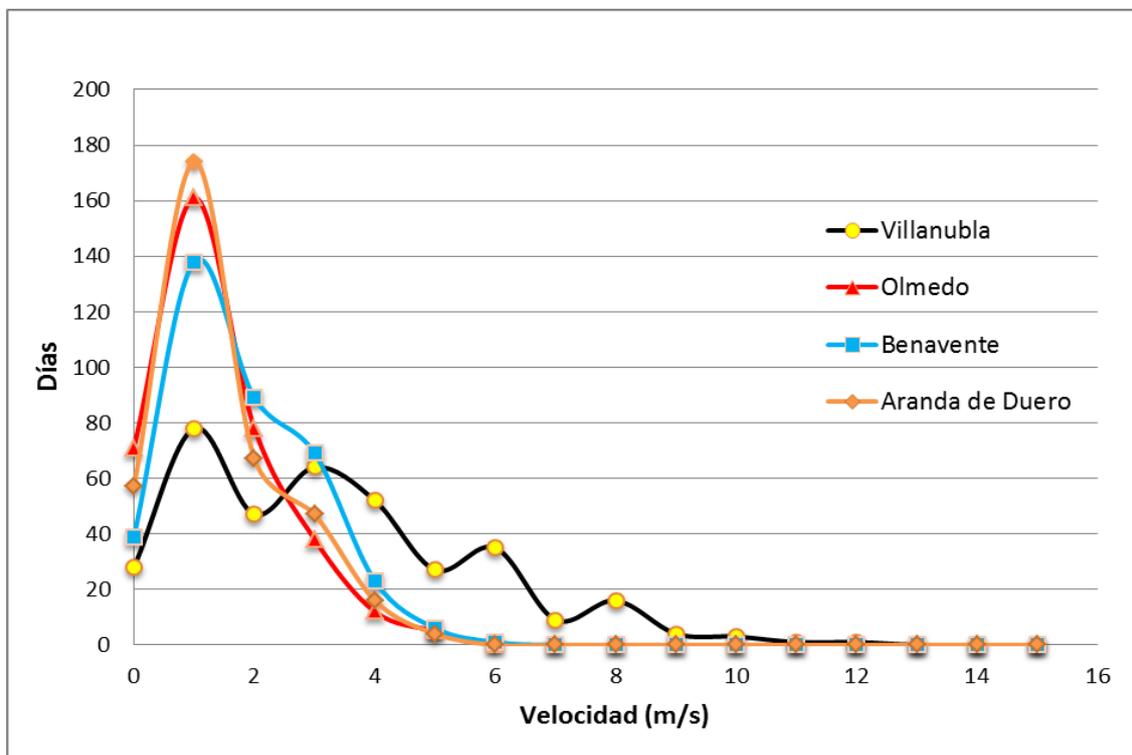
*Mapa 3.2 : Ubicación geográfica de los emplazamientos seleccionados.*

### 3.3. Distribución de la velocidad en los emplazamientos seleccionados en el año 2015

Una vez determinadas las estaciones se debe concretar el año en el que se van a procesar los registros meteorológicos. A causa de que en la actualidad el municipio de Olmedo no cuenta con datos recientes, se tendrá que coger un año anterior. El elegido será el año 2015.

Además, como las velocidades proporcionadas por la AEMET vienen dadas en km/h se tendrán que convertir en m/s para poder trabajar con ellas. Esto es debido a que cuando se habla de aerogeneradores, el criterio al que hace referencia la velocidad está asociado al sistema internacional.

Una vez hecha dicha conversión, se elaborarán las gráficas para poder llegar a una elección acertada.

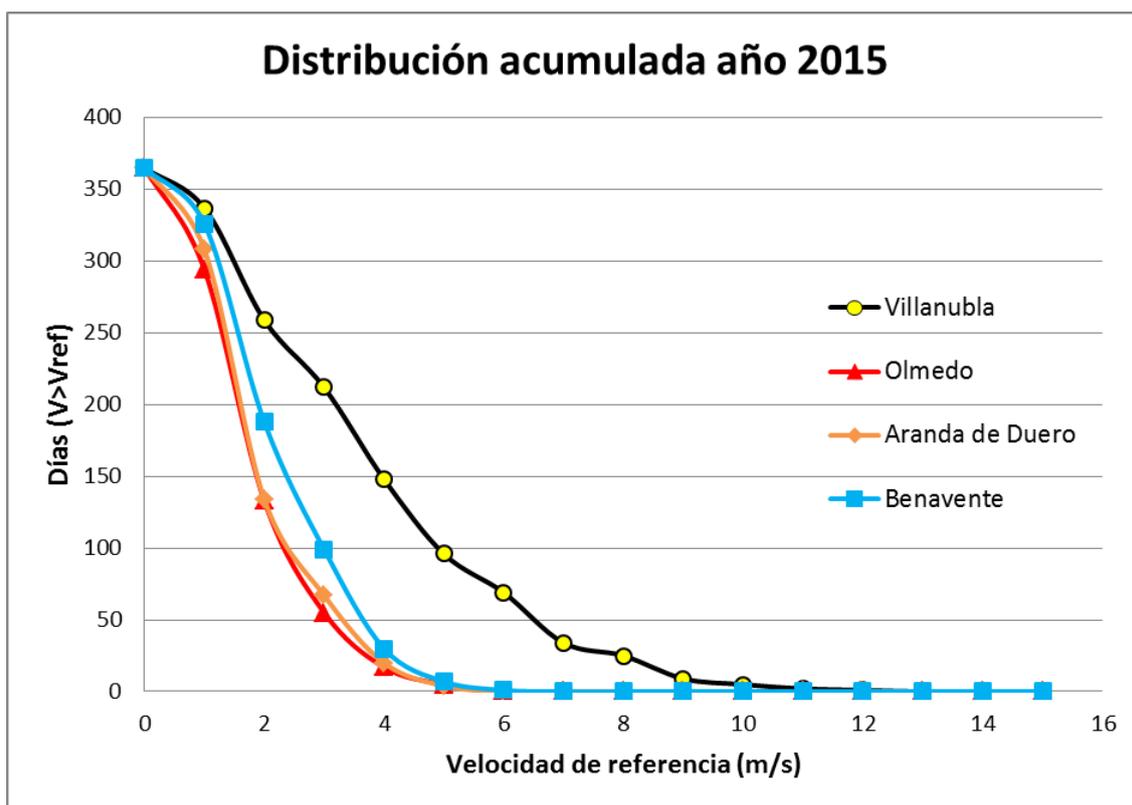


Gráfica 3.2: Comparativa de los días frente a la velocidad en los 4 emplazamientos escogidos.

Antes de pasar a exponer y a comentar las gráficas, para poder hacer una buena interpretación de ellas, se ha de tener en cuenta que un aerogenerador no se pondrá en funcionamiento hasta que la velocidad del viento no alcance los 3 o 4 m/s, que el rendimiento máximo depende de la velocidad del viento, del tamaño y del régimen de giro del aerogenerador, pudiéndose suponer que éste se alcanza a

la velocidad de 11 m/s, y que además, a una velocidad superior de 25 m/s automáticamente se parará por motivos de seguridad.

La distribución acumulada, gráfica 3.3, se obtiene a partir de la gráfica 3.2. Para ello, se ha realizado la suma de la probabilidad de todas y cada una de las velocidades que tengan una velocidad menor o igual que la velocidad de referencia.



*Gráfica 3.3: Comparativa de la distribución acumulada en el año 2015 de los 4 emplazamientos escogidos.*

Por un lado, en la gráfica 3.3 se puede observar que, para los registros obtenidos en Olmedo, Aranda de Duero y Benavente, existen muy pocos días con vientos superiores a los 3 m/s, unos 50-60 días en Olmedo y Aranda respectivamente y en torno a unos 100 en Benavente, con el consiguiente de no asegurar un arranque. Para asegurarse del arranque, tiene que haber vientos iguales o superiores a los 4 m/s y que así comiencen a producir los aerogeneradores, en el supuesto caso de que los hubiera en estos emplazamientos. El problema está en que esta condición meteorológica no llegaría ni a un 14% de probabilidad a lo largo de un año (es decir, únicamente 50 días aproximadamente de los 365 que tiene un año).

Sin embargo, en el caso de Villanubla ocurre todo lo contrario, pudiéndose estimar que aproximadamente habrá unos 150 días al año en los que se podrá extraer energía.

Por otro lado, la gráfica 3.2 corrobora lo comentado en el párrafo anterior. El pico máximo de los municipios más alejados del punto de interés se produce en torno a la velocidad de 2 m/s y luego desciende de forma brusca hasta que en los 6 m/s se hace prácticamente nula. En cambio, la tendencia en Villanubla es mucho más constante, describiendo un descenso mucho menos brusco y más prolongado. Incluso, esta estación meteorológica llega a registrar algún día con vientos de hasta 11 m/s, consiguiendo así que los aerogeneradores funcionen a su máximo rendimiento, un hecho poco común en esta zona.

Por tanto, se concluye que Olmedo, Aranda y Benavente son lugares bastante pobres en el recurso que se necesita para este fin, y que el mejor emplazamiento para levantar un parque eólico es en los alrededores de Villanubla. Por ello, el resto del estudio se basará únicamente en los datos procesados en la estación meteorológica de este municipio.

### **3.4. *Distribución de Villanubla en diferentes años***

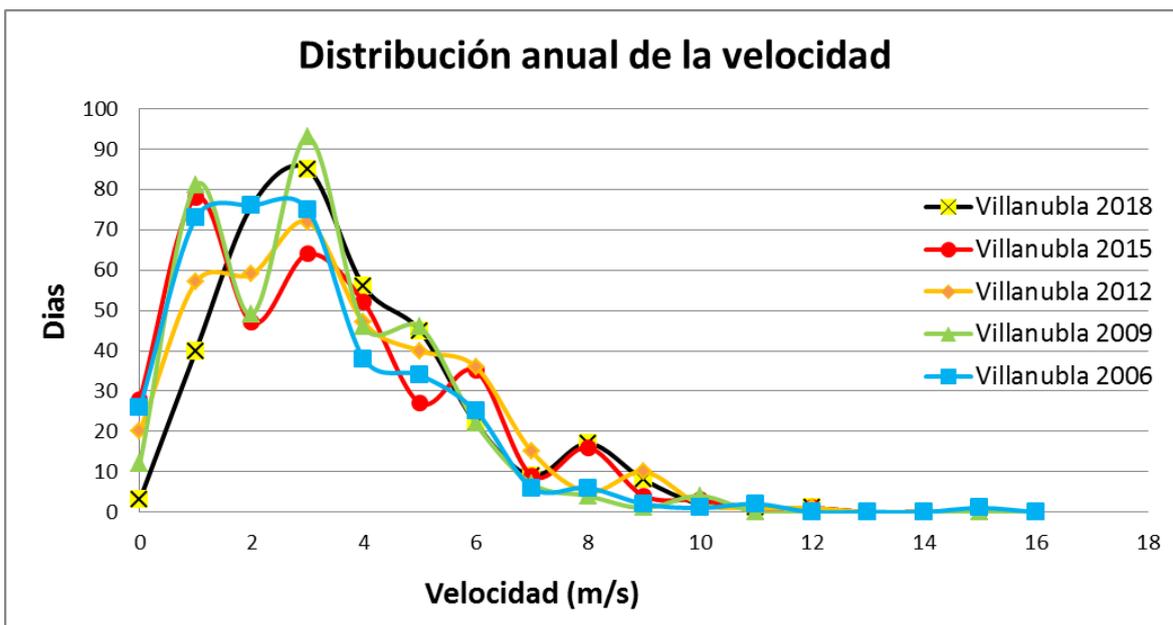
Como bien se ha demostrado en el apartado 3.3, la zona próxima al municipio de Villanubla reúne las mejores condiciones para el fin de este estudio. Es por ello que a partir de este punto, el estudio se centrará en procesar los datos únicamente de la estación meteorológica de dicho lugar.

Primeramente, para tener certidumbre de los resultados y seguir obteniendo un resultado satisfactorio, se ha de comprobar que las velocidades de los vientos en diferentes años escogidos aleatoriamente son similares, para así poder basarse únicamente en uno. De esta manera, no se tendrá que manejar un volumen tan grande de datos.

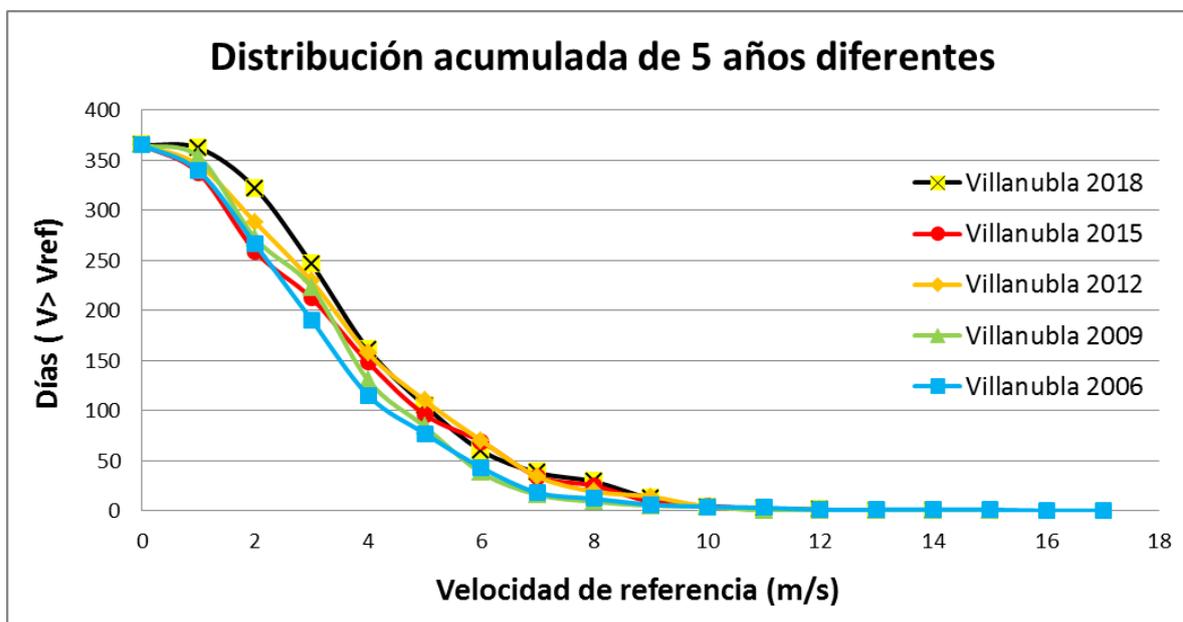
Para obtener las siguientes gráficas se han procesado los registros del viento en los años 2006, 2009, 2012, 2015 y 2018.

En la distribución acumulada, gráfica 3.5, se percibe claramente el patrón que siguen todos los años. Una tendencia decreciente hasta hacerse 0 en el punto en el que la velocidad ronda los 10 m/s.

Respecto a la distribución anual, aunque sea más variable que la anterior y parezca que cada año sea diferente, de nuevo está siguiendo una predisposición, gran número de días a bajas velocidades y escasos días al llegar a los 8-10 m/s.



Gráfica 3.4: Comparativa de los días frente a la velocidad en los años escogidos aleatoriamente (2006, 2009, 2012, 2015 y 2018) en Villanubla.



Gráfica 3.5: Comparativa de la distribución acumulada en los años escogidos aleatoriamente (2006, 2009, 2012, 2015 y 2018) en Villanubla.

En definitiva, gracias a la elaboración de la distribución acumulada y a la distribución anual, se puede corroborar que las curvas de las distribuciones de las

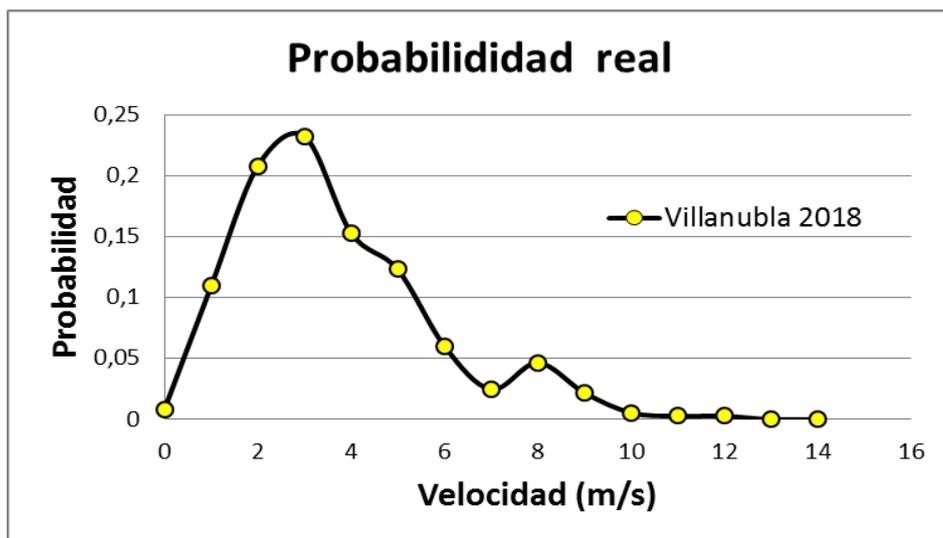
velocidades en los diferentes años, son muy parecidas. Con el consiguiente de poder basarse a partir de ahora en un único año.

### 3.5. Probabilidad real de Villanubla en 2018

Como se comentaba anteriormente, a partir de ahora y hasta el final del capítulo se hará un estudio más detallado de los registros de Villanubla en 2018.

Este apartado consistirá en el análisis de la probabilidad real en Villanubla. Por la proximidad con la actualidad, se considera que el mejor año para hacer el estudio sea basándose en el año 2018.

Para hallar la probabilidad real del viento y obtener la gráfica 3.6, se tendrá que dividir el número exacto de días al año en el que hay una determinada velocidad entre el número de días que tiene un año (365 días). Esta gráfica será muy útil más adelante ya que será comparada con la función de Weibull.



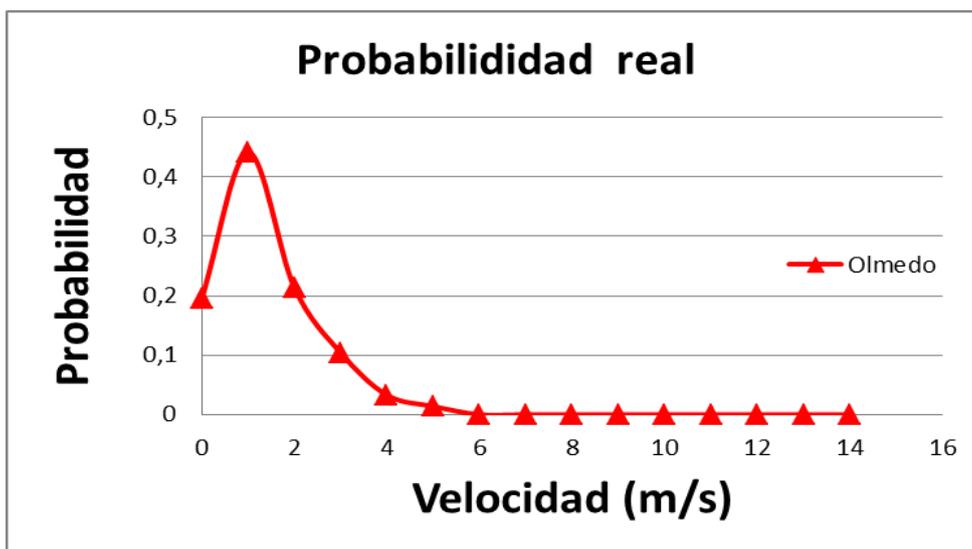
*Gráfica 3.6: Probabilidad real de la velocidad en el año 2018 en Villanubla.*

Se puede observar que el valor máximo de la probabilidad se alcanza a una velocidad aproximada de 3 m/s, como es evidente, se alcanza a un valor muy pequeño con el que aún no se aseguraría el funcionamiento del aerogenerador. Sin embargo, lo que interesa de esta gráfica, es que también hay una gran probabilidad de que la velocidad mínima del viento sea superior a los 4 m/s, con lo que sí se aseguraría el poder empezar a generar energía.

Para comprobar que en este lugar se tiene unos buenos pronósticos del viento, se puede elaborar una gráfica comparativa calculando la probabilidad real en

cualquiera de los emplazamientos anteriormente elegidos, y así poder observar la gran diferencia que existe.

Se tomará como ejemplo la probabilidad real de Olmedo, gráfica 3.7, dónde se comprueba que el máximo alcanzado en esta ocasión sucede en torno a la velocidad de 1 m/s, un valor muy por debajo con respecto al caso anterior. Además, en este lugar, un aerogenerador casi nunca se pondría en funcionamiento ya que la probabilidad de que el viento sople con una fuerza que permita alcanzar más de 4 m/s es mínima.



Gráfica 3.7: Probabilidad real de la velocidad en Olmedo.

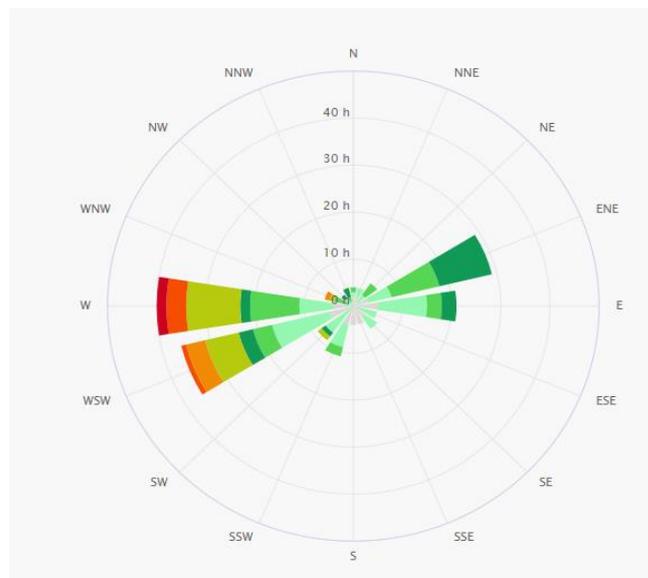
### 3.6. Rosa de los vientos

Una vez obtenida la probabilidad real y la velocidad media del viento a lo largo de determinado año, el siguiente paso sería calcular cuanta producción podría obtenerse de un aerogenerador.

No obstante, para que se pueda sacar la máxima producción de uno de estos y que este funcione a su máximo rendimiento es necesario que las palas se encuentren perpendiculares a la dirección del viento en el caso de aerogeneradores de eje horizontal.

En la actualidad, este es el principal requisito que deben de cumplir los aerogeneradores, por tanto, es imprescindible conocer la dirección principal en la que sopla el viento en el emplazamiento donde se construirá el parque eólico. Para ello, un gráfico muy representativo y que facilitará la determinación del objetivo es la rosa de los vientos.

En la AEMET no incluyen de forma gratuita la información necesaria para adquirir esta rosa de los vientos a lo largo de un año, solamente viene información de las últimas dos semanas desde el día en el que se realiza la búsqueda. Por este motivo, no se puede determinar con precisión dicha dirección ya que es una evaluación durante un periodo de tiempo muy corto. Por esta razón, la rosa de los vientos accesible de forma gratuita y mostrada en la gráfica 3.8, se puede considerar como una fuente muy poco fiable dado que el viento es muy impredecible en el transcurso de los días. Así bien, se tendrá que tomar otra referencia diferente para demostrar que esa dirección es la dominante del viento y que se mantiene constante con el paso del tiempo.



*Gráfica 3.8: Rosa de los vientos entre las fechas de 30-01-2019 y 13-02-2019 en Villanubla.*

Un recurso muy útil y cercano a dicha estación meteorológica que se puede utilizar es la orientación que toma la pista del aeropuerto de Villanubla. Esto es debido a que el trazado con la que están diseñadas coincide con la dirección del viento predominante.

Como se observa en el mapa 3.3, gracias a una vista aérea desde el Google Earth y a la proyección de las coordenadas encima de la pista del aeropuerto, se puede concluir que la dirección que toma es NE – SO. Por tanto, se tomará como referencia esta dirección como predominante de los vientos.



*Mapa 3.3: Orientación geográfica de la pista del aeropuerto de Villanubla vista desde Google Earth.*

### 3.7. Potencia en el viento disponible

Aunque con lo estudiado anteriormente dé la sensación de que es un buen lugar para comenzar la construcción de un parque eólico en esta zona, primeramente se deberá de demostrar si saldrá rentable.

A parte de ser beneficioso económicamente o no, tendrá que ser sobretodo rentable en producción de energía, que es el principal fin de levantar este tipo de instalaciones. Pero para llegar a contabilizar esa energía producida, previamente se tendrá que adquirir la potencia disponible que se puede extraer del viento.

La potencia disponible obedece a la siguiente fórmula:

$$Potencia = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot \frac{V_{\infty}^3 \cdot A}{1000} [=] kW$$

Dónde:

- $\rho_w$  : Densidad del aire seco.
- A : Área barrida por las palas del aerogenerador.
- $V_{\infty}$  : Velocidad del viento en m/s.

Estos parámetros no son constantes a excepción de la densidad del aire que tiene un valor de 1.2 kg/m<sup>3</sup>.

Por un lado, el rango en el que varía la velocidad es de [0 - 25] m/s, es decir, desde que empieza a soplar el viento hasta que hay una velocidad excesiva y por motivos de seguridad el aerogenerador se para. Debido a esto, no tendría sentido considerar un rango mayor ya que a partir de ese límite la potencia extraída sería nula.

Por otro lado, el área barrida por las palas del aerogenerador se rige por la siguiente fórmula.

$$A = \pi \cdot R^2$$

Dónde:

→  $\pi = 3.1415$

→ R: Radio del rotor (m)

Para poder obtener las tablas que permitan ver cuanta potencia se puede extraer del viento, dependiendo del radio que tenga el rotor del aerogenerador, se irá jugando también con el último parámetro mencionado.

El rotor puede ser de una amplia variedad de tamaños, desde los más pequeños (unos 5 m. de diámetro), pasando por diámetros típicos como pueden ser 27 m., 40 m., 54 m., 72 m., 80m., etc., hasta llegar al más grande fabricado recientemente por la empresa francesa “LM Wind Power” según [Xataka, 2019], que tiene una pala de 107 m., es decir, un rotor de 220 m. de diámetro.

Este dato es muy curioso aunque esta vez su finalidad sea para una instalación en alta mar. Sin embargo, probablemente en un futuro no muy lejano, gracias al avance de las tecnologías se puedan llegar a ver aerogeneradores de tan grandes dimensiones también en tierra.

A continuación, variando los parámetros de la velocidad del viento y del área barrida por las palas del aerogenerador como se ha explicado anteriormente, se ha logrado obtener la tabla 3.2 donde se puede observar la potencia extraída total en kilovatios (kW).

Como se observa en dicha tabla hay una gran diferencia en cuanto a kW extraídos entre los aerogeneradores de rotores pequeños y los rotores de gran tamaño.

También y como es lógico, a mayor diámetro de rotor, más área barrida por las palas del aerogenerador y por lo tanto, mucha más potencia extraída. La diferencia entre uno de 54m. de rotor y uno de 80m. es de un 220% mayor en este último, una diferencia bastante notable pero pequeña en comparación con respecto con uno de diámetro de 132m. ya que alcanza un 600%. Este último tamaño de rotor



será tomado de referencia ya que los aerogeneradores instalados actualmente en el punto de interés de Castromonte son de dichas características.

Velocidad	Potencia (5m)	Potencia (27m)	Potencia (54m)	Potencia (80m)	Potencia (132m)	Potencia (220m)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,01	0,34	1,37	3,02	8,21	22,81
2	0,09	2,75	10,99	24,13	65,69	182,46
3	0,32	9,28	37,10	81,43	221,69	615,81
4	0,75	21,99	87,94	193,02	525,50	1459,71
5	1,47	42,94	171,77	376,99	1026,36	2851,00
6	2,54	74,20	296,81	651,44	1773,55	4926,52
7	4,04	117,83	471,33	1034,46	2816,33	7823,13
8	6,03	175,89	703,56	1544,16	4203,96	11677,68
9	8,59	250,44	1001,74	2198,61	5985,72	16627,00
10	11,78	343,53	1374,13	3015,93	8210,87	22807,96
11	15,68	457,24	1828,97	4014,20	10928,66	30357,40
12	20,36	593,63	2374,50	5211,53	14188,38	39412,16
13	25,88	754,74	3018,97	6626,00	18039,27	50109,09
14	32,33	942,65	3770,62	8275,71	22530,62	62585,05
15	39,76	1159,42	4637,70	10178,76	27711,67	76976,87
16	48,25	1407,11	5628,45	12353,24	33631,71	93421,42
17	57,88	1687,78	6751,11	14817,26	40339,99	112055,52
18	68,71	2003,49	8013,94	17588,90	47885,77	133016,04
19	80,81	2356,29	9425,18	20686,26	56318,33	156439,82
20	94,25	2748,27	10993,06	24127,43	65686,93	182463,70
21	109,10	3181,46	12725,84	27930,52	76040,84	211224,54
22	125,44	3657,94	14631,76	32113,61	87429,31	242859,19
23	143,34	4179,77	16719,07	36694,81	99901,61	277504,48
24	162,86	4749,00	18996,01	41692,20	113507,02	315297,28
25	184,08	5367,71	21470,82	47123,89	128294,79	356374,42

*Tabla 3.2: Potencias extraídas en kW dependiendo de la velocidad del viento y el diámetro del rotor de un aerogenerador.*

No obstante, la comparación más diferenciada, se producirá entre el aerogenerador más pequeño escogido y el más grande fabricado actualmente, como es obvio. Lo que haciendo cuentas, se demuestra que con tan solo ponerse en funcionamiento el aumento de kW es cercano a 3 órdenes de magnitud mayor.

Por último, para finalizar este apartado, se muestran dos gráficas comparativas con el fin de demostrar de una forma más visual lo reflejado en la tabla 3.2. En ambos

casos, se han mantenido constantes todos los parámetros de la función por la que se rige la potencia salvo uno. En la primera, el parámetro que se mantendrá constante es el de la velocidad y se hallaran las gráficas a los valores constantes de 5, 10 y 15 m/s. En la segunda, por el contrario, será el diámetro del rotor, es decir, el área barrido será el mismo en todos los puntos de cada una de las diferentes gráficas. Los diámetros tomados son 10m., 44m., 80m., 132m. y 220m.

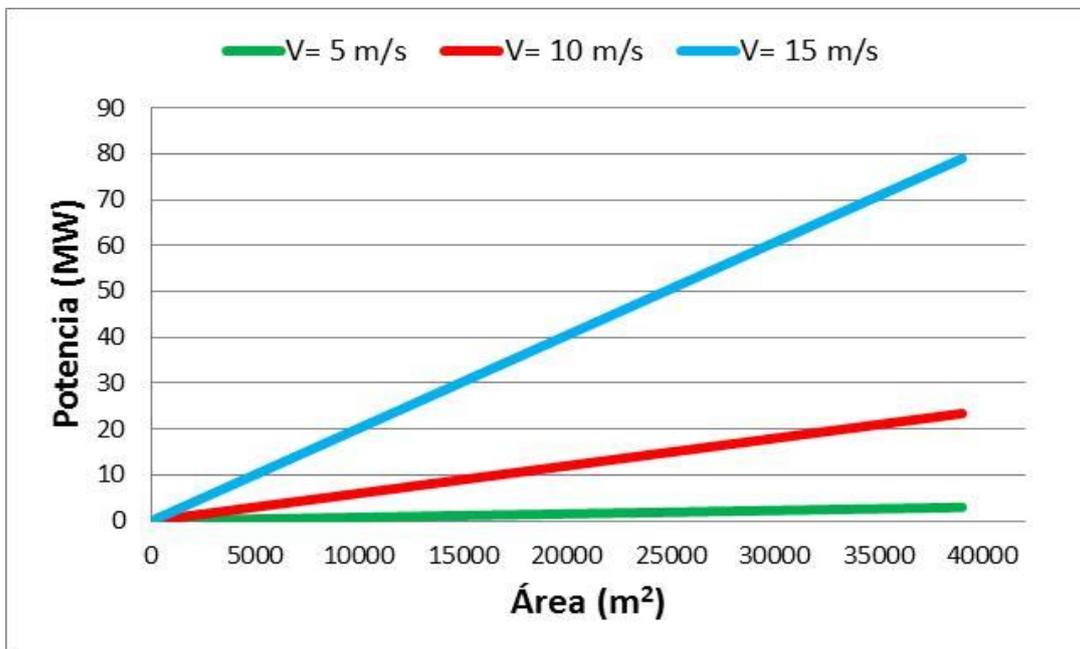
Para mostrarlas lo más simplificadas posibles, los datos de la potencia se han convertido de kW a MW dividiendo entre 1000.

En este primer caso, gráfica 3.9, se representa la potencia obtenida en MW en función del área barrida y con el fin de hacer una mejor descripción global de las opciones contempladas, se han recogido 3 gráficas en una.

Como se ha mencionado antes, se han conservado constantes todos los parámetros a excepción del área. Esta, tiene un rango de variación muy amplio [0-40000 m<sup>2</sup>] debido a que sí se halla el área que barren las palas del aerogenerador más grande fabricado hasta la actualidad (220 m. de diámetro de rotor), se alcanza un valor de:

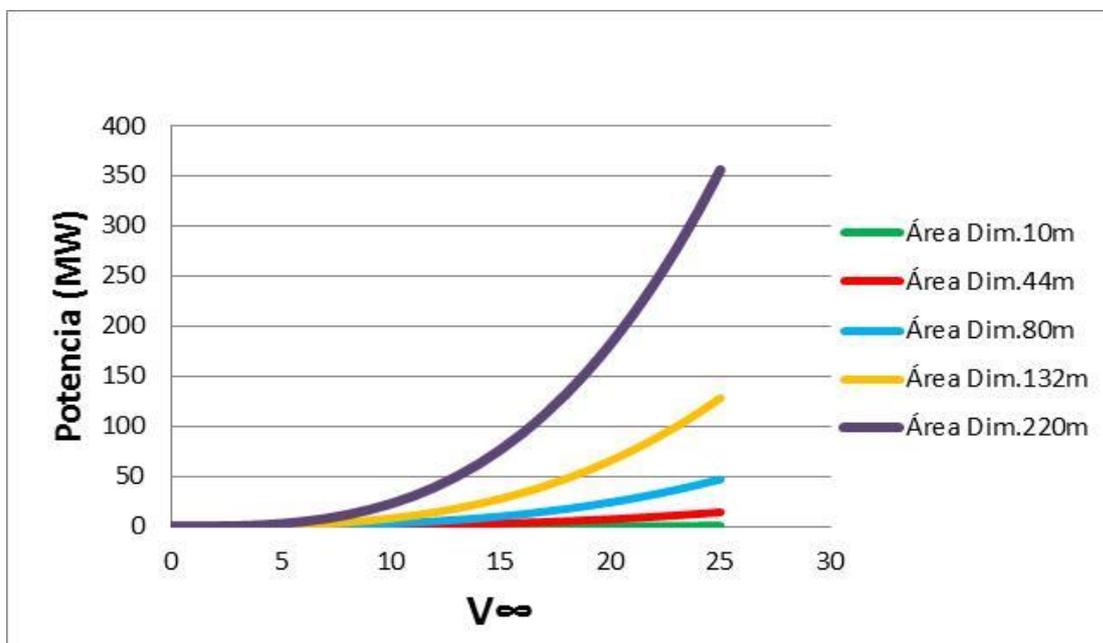
$$A = \pi \cdot R^2 \rightarrow A = \pi \cdot 110^2 \rightarrow A = 38013 \text{ m}^2$$

Además, como es lógico, describen una función lineal ascendente, ya que, a cuanto mayor área barrida, mayor es la cantidad de potencia extraída. Y también, ocurre de forma similar cuando se habla de la velocidad del viento.



*Gráfica 3.9: Potencia en función del área que barren las palas del aerogenerador a diferentes velocidades constantes.*

Sin embargo, en el segundo caso, gráfica 3.10, según se puede percibir a continuación, ocurre todo lo contrario.



*Gráfica 3.10: Potencia en función de la velocidad del viento a diferentes dimensiones del rotor.*

En este caso, se representa la potencia obtenida en MW en función de la velocidad del viento, se han agrupado 5 con el objetivo de observar mejor la diferencia de unas con respecto a otras.

Como se comentaba al comienzo de la descripción de las gráficas, el único parámetro que es variable en esta ocasión es la velocidad del viento. El rango de variación es el mismo que se ha descrito varias veces a lo largo de este capítulo, y alberga los valores desde que empieza a soplar el viento hasta que llega al límite práctico, es decir de 0 a 25 m/s.

Otra diferencia, es que esta figura retrata una función cúbica. Esto es debido a que en la fórmula de la potencia, la velocidad esté elevada al cubo.

No obstante, se llega a la misma conclusión si se habla en términos de potencia, ya que, de nuevo, a cuanto mayor sea el diámetro de los aerogeneradores y mayor velocidad haya, más cantidad se extraerá.





## ***CAPITULO 4 - POTENCIAL EÓLICO***

Como se viene explicando a lo largo del presente trabajo, la distribución de velocidades del viento es un factor determinante en el análisis de los recursos eólicos. Gracias a esta información, los diseñadores de turbinas pueden proyectar un diseño mucho más óptimo y económico dependiendo de la zona donde vayan a instalar los aerogeneradores. Por ello, haciendo referencia al [Mathew, 2006], en este capítulo se describirá una de las formas más conocidas y utilizadas para analizar las distribuciones; la Función de Weibull.

### ***4.1. Función de Weibull: Influencia de los factores de c y k***

La Función de Weibull es una función estadística estándar que representa las variaciones de la velocidad del viento. Estas variaciones se caracterizan por la función de densidad de la probabilidad “F (V)” que indica la fracción de tiempo (o probabilidad) para la cual el viento está a una determinada velocidad “V”. Esta función viene dada por la siguiente fórmula:

$$F(V) = \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right\}$$

Dónde:

- C: Factor de escala en m/s.
- K: Factor de forma.
- V: Velocidad de referencia [entre 0 y 25 m/s].

Si se grafica F(V) dando diferentes valores a los factores de escala y forma, se percibiría que el factor de escala influye en el eje de las abscisas, es decir, cuanto mayor sea el valor de “c”, más alejado del origen se encontrará el punto máximo de la función. Mientras que, el factor de forma variaría en el eje de las ordenadas, esto es que, a mayor valor de “k”, mayor sería la probabilidad obtenida.

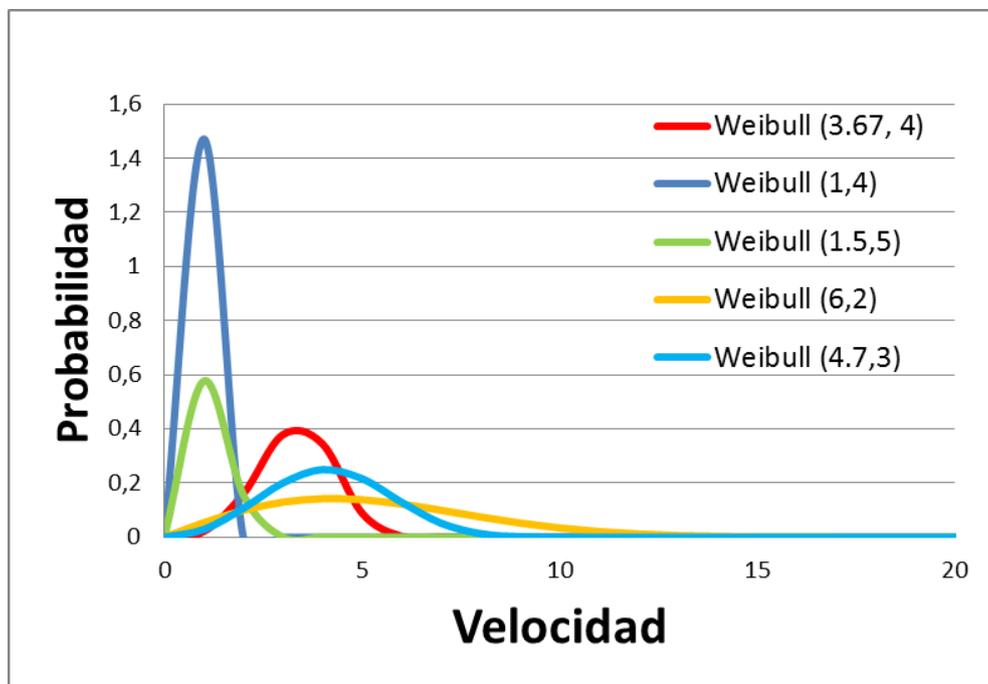
En la gráfica 4.1 se han plasmado varias funciones de Weibull para apreciar la gran influencia que brindan los factores c y k. Añadir que, en la leyenda, el primer componente de cada función corresponde al factor de escala y el segundo al factor de forma. Por ejemplo, en “Weibull (1.5, 5)”, c=1.5 y k=5.

Un dato a tener en cuenta y que no se ha de olvidar para entender la forma de las funciones representadas, es que el gráfico muestra una función de probabilidad, lo que conlleva que en todas y en cada una de ellas, el área bajo la curva debe ser exactamente 1.

Por lo tanto, en la gráfica 4.1 se ve que si uno de los dos factores es elevado y el otro no, la función se ajusta al factor de mayor valor, es decir, si “c” es muy grande y “k” relativamente pequeño será una distribución muy expandida y de poca altura, como pasa en “Weibull (6, 2)” y “Weibull (4.7, 3)”.

Por el contrario, si se tiene una “k” elevada con respecto a la “c” se tendrá una distribución concentrada y de mucha probabilidad, como ocurre en la “Weibull (1,4)”.

Finalmente, para contemplar todas las opciones, si los valores de los factores son cercanos el trazado se asemeja a la forma de una campana desplazada en mayor o menor medida en el eje de abscisas, dependiendo del valor que tome C. Una función de las mostradas que se asocia a esta opción es la “Weibull (3.67, 4)”.

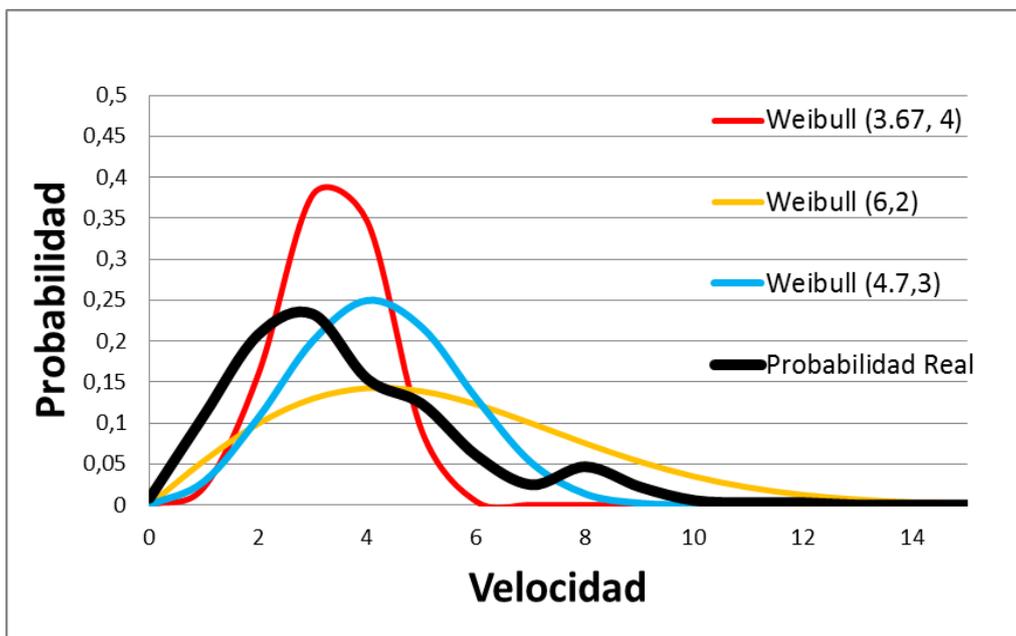


*Gráfica 4.1: Influencia de c y k en la función de Weibull.*

Seguidamente, para encontrar los factores que son necesarios para este estudio, se partirá de este último gráfico. En él, se incluirá la gráfica de la probabilidad real de Villanubla en 2018 (Gráfica 3.6) mostrando así de forma intuitiva que funciones se asemejan a esta, pudiendo despreciar ya aquellas funciones que no muestren ningún tipo de relación. Es así como se obtiene la gráfica 4.2.

Examinando la función de probabilidad real de Villanubla se puede decir que se aproxima bastante a la forma de una campana, por tanto, con el fin de acotar en gran medida los factores que se hallarán en el apartado 4.2, se contempla que funciones como la “Weibull (1,4)” con un factor de forma (k) elevado y un factor de

escala (c) pequeño, han tenido que ser despreciadas debido a que son funciones muy picudas y muy concentradas en valores próximos al origen de coordenadas.



*Gráfica 4.2: Comparativa de la probabilidad real de Villanubla en 2018 con la influencia de c y k*

Se concluye que la “Weibull (4.7, 3)” es la que más se parece a la probabilidad real de Villanubla, aunque desplazada hacia la derecha. Es por tanto, que en el siguiente apartado en base a esta función lineal, se analizan otros factores para hallar el más ajustado.

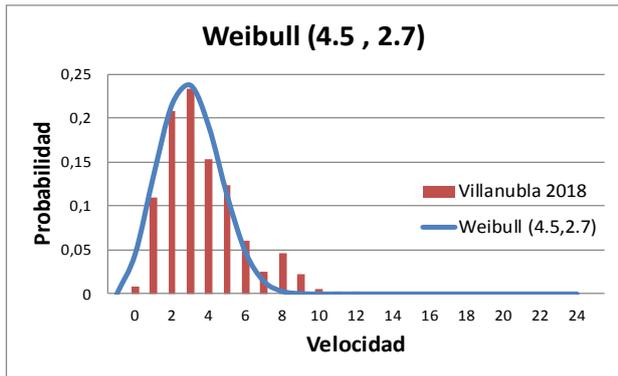
#### **4.2. Elección de los factores de la función de Weibull**

El objetivo de encontrar una función de Weibull que se equipare a la probabilidad real de Villanubla es poder cuantificar la energía que se puede extraer de la fuerza del viento de forma teórica. Por tanto, hacer una buena elección de los factores de forma y escala, es un paso primordial.

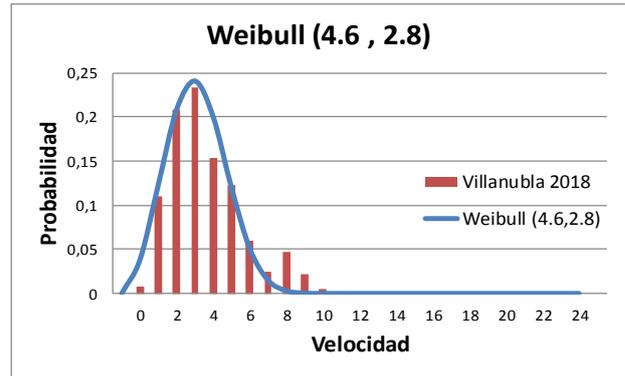
En la gráfica 4.3 se han ilustrado las mejores opciones analizadas partiendo de la base de la función más próxima a la probabilidad real obtenida en el apartado anterior, es decir, la “Weibull (4.7, 3)”. Se ha considerado que la mejor manera de visualizar si la función de Weibull y la probabilidad se ajustan, es utilizando el diagrama de barras y una representación lineal. Esto es debido a que se ha tomado como referencia los artículos de [Shoab, 2019] dónde representa de esta manera,

la distribución mensual de la velocidad en una aldea de Pakistán y del artículo [Khcine, 2019] que lo expone de igual forma, pero en diferentes ubicaciones de Marruecos.

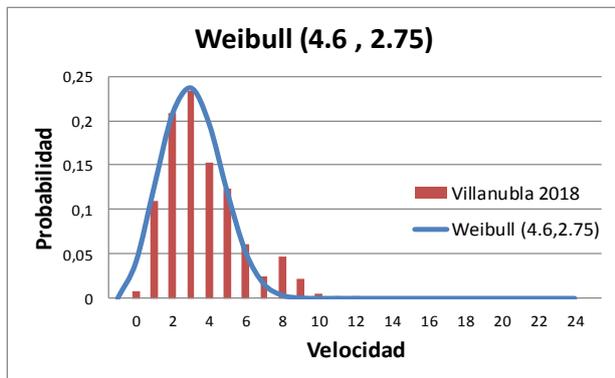
Además, mencionar que la representación de las diferentes funciones de Weibull se ha utilizado una línea curva, mientras que, para la probabilidad real de Villanubla se ha optado por un gráfico de barras con el propósito de poder visualizar mejor la semejanza entre ambas.



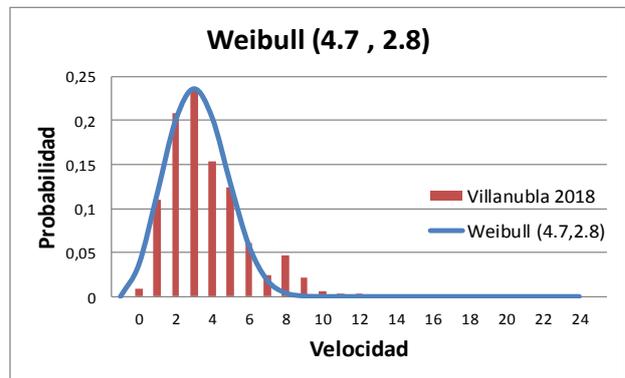
(A)



(B)



(C)



(D)

Gráfica 4.3: Funciones de Weibull con diferentes factores.

A)  $c=4.5$  ,  $k=2.7$  ; B)  $c=4.6$  ,  $k= 2.8$  ; C)  $c=4.6$  ,  $k=2.75$  ; D)  $c=4.7$  ,  $k= 2.8$

A priori, si no se presta mucha atención, las 4 opciones parecen idénticas, todas se ajustan en gran medida. Sin embargo, si se analizan más detenidamente, se pueden apreciar pequeñas diferencias que provocan que una de ellas sea más idónea que el resto. A continuación se muestran unos ejemplos de estas diferencias:



- La imagen B) es la única que no llega a superponer el punto más elevado del gráfico de barras con la función lineal.
- En la opción D), a una velocidad aproximada de 2 m/s la probabilidad supera a la función de Weibull.
- También, la representación D) es la única de las 4 opciones tomadas que se ajusta mejor a la función en la parte derecha de la campana.
- En todas las variantes menos en la A) parece que el punto de máxima probabilidad coincide con el máximo de la función de Weibull.

A pesar de haber descubierto estas distinciones, se sigue suponiendo que cualquiera de ellas se podría tomar como opción válida. No obstante, existe una diferencia minúscula cuantificable que a simple vista no se puede ni calcular, ni aproximar. Por ello, para seleccionar la mejor variante, se hallarán los errores máximos entre la probabilidad real y la probabilidad teórica suministrada por Weibull, es decir:

$$\text{Error máximo} = \text{MAX } |\text{Distribucion de Weibull} - \text{Probabilidad real}|$$

Posteriormente, después de realizar las cuentas pertinentes, se reúnen en la tabla 4.1 los errores máximos de cada distribución.

	(A)	(B)	(C)	(D)
Tipo Weibull	c= 4,5 k= 2,7	c= 4,6 k= 2,8	c= 4,6 k= 2,75	c= 4,7 k= 2,8
Máximo Error	0,083823	0,087285	0,083518	0,091421

*Tabla 4.1: Comparativa de los máximos errores de las distintas funciones de Weibull.*

Rápidamente, se puede apreciar que la opción (D) se descartaría por tener un error bastante superior al resto de alternativas. Sin embargo, para concretar cuál es la más idónea de todas, se tendrá que examinar la diezmilésima parte de los valores obtenidos en las distribuciones (A) y (C) para así poder distinguir cuál de las dos Weibulls tiene menor error máximo.

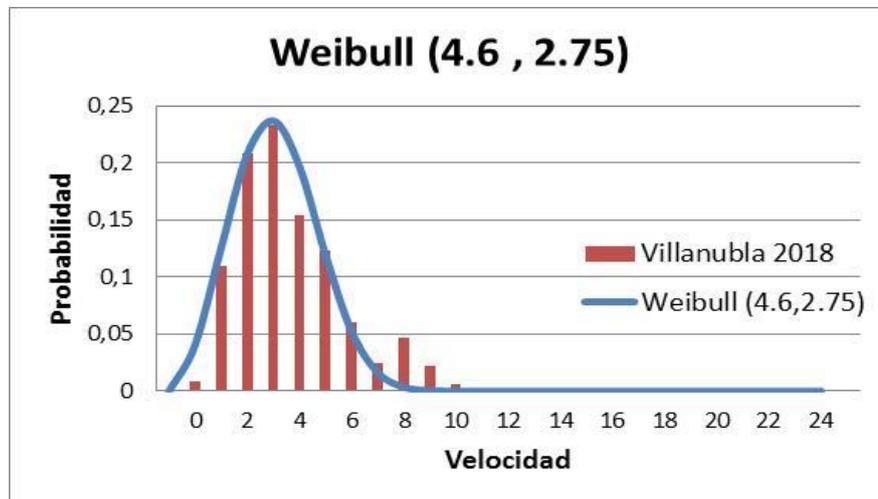
Finalmente, se concluye que la Función de Weibull que más se ajusta a la realidad de la probabilidad de Villanubla es la que tiene los factores c= 4.6 y k= 2.75.

### 4.3. Energía con Weibull teórica

En este punto se averiguará cuanta energía se puede extraer teóricamente de la fuerza del viento en Villanubla con el objetivo de poder realizar una comparación con la energía experimental. Esta última, se calculará posteriormente a partir de la potencia del viento obtenida en el apartado 3.7 del presente trabajo.

Antes de comenzar el proceso de la obtención de la energía teórica a partir de la función de Weibull escogida, se analizará la gráfica 4.4 con el propósito de obtener una información previa sobre los datos sin tener que procesarlos. Además, se harán las explicaciones oportunas para entender cómo se han hallado los datos recogido en la tabla 4.2.

La gráfica 4.4 representa una función sesgada, que dicho en otras palabras quiere decir que no tiene ningún tipo de simetría. Esto es debido a que habrá días muy ventosos pero que serán poco frecuentes y muchos días de bajas velocidades, tal y como se explicaba a lo largo de todo el tercer capítulo de este estudio. Esto conlleva, que habrá días en los que se encontrarán picos de producción de energía, mientras que por lo general, dependiendo de las características del aerogenerador, será capaz de producir la energía mínima posible, ya que, el máximo de la función se encuentra en el valor mínimo teórico con el que es capaz de arrancar un aerogenerador, es decir, a la velocidad de 3 m/s.



Gráfica 4.4: Distribución de Weibull seleccionada para hallar la Energía Teórica.

En la tabla 4.2 vienen agrupados los datos necesarios para calcular la energía teórica a partir de la función de Weibull de factores  $c=4.6$  y  $k=2.75$ . Manifiestar que, en la segunda columna se recoge la transformación de la forma lineal de la gráfica 4.4 a valores numéricos para poder trabajar con ellos. Además, la última columna indica en que momentos el aerogenerador es capaz de producir energía.



Tanto en este caso como en el del apartado 4.4, se ha considerado que el arranque mínimo de dicho aerogenerador sea a la velocidad de 4 m/s.

Previa realización de la tabla 4.2, se tendrá que hallar el número de días que contarán con una determinada velocidad. Para hallar esos días en base a la función de Weibull, se deberá aplicar la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ días} = \text{Probabilidad} \cdot \text{Año}$$

Dónde:

- Probabilidad: Valores de la segunda columna de la tabla 4.2.
- Año: 365 días que tiene un año.

Velocidad	Weibull (4.6,2.75)	Nº Días	Produce energía
0	0	0	NO
1	0,040758	14,88	NO
2	0,125775	45,91	NO
3	0,207805	75,85	NO
4	0,236943	86,48	SI
5	0,196664	71,78	SI
6	0,119317	43,55	SI
7	0,052211	19,06	SI
8	0,016139	5,89	SI
9	0,003439	1,26	SI
10	0,000492	0,18	SI
11	4,61E-05	0,02	SI
12	2,75E-06	0	SI
13	1,01E-07	0	SI
14	2,25E-09	0	SI

Tabla 4.2: Datos obtenidos de la función de Weibull con un  $c=4.6$  y  $k=2.75$

Obtenidos todos los datos necesarios, se podrá proceder al cálculo de la energía teórica extraída. La cual se rige de la siguiente fórmula:

$$Energía = N^{\circ} \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \eta \cdot \text{Potencia} \rightarrow$$

$$Energía = N^{\circ} \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot \frac{V_{\infty}^3 \cdot A}{1000} [=] \text{ kWh}$$

Dónde:

- N° días: Número de días a lo largo del año que tienen una determinada velocidad media.
- $\eta$  : Rendimiento típico de un aerogenerador
- $\rho_w$  : Densidad del aire seco.
- A: Área barrida por las palas de un aerogenerador.
- $V_\infty$  : Velocidad del viento en m/s.

Tal y como se describen en el apartado 3.7, los parámetros que engloban a la potencia, vuelven a tener las mismas características. El área y la velocidad son términos variables, mientras que la densidad del aire sigue siendo constante (1.2 kg/m<sup>3</sup>).

Además, esta expresión, posee dos términos nuevos. Uno ya descrito anteriormente (N° de días), y otro que pasará a describirse a continuación (el rendimiento de un aerogenerador “ $\eta$ ”).

Para definir el rendimiento de un aerogenerador, primeramente se debe poner en conocimiento la ley enunciada por el físico alemán Albert Betz en la década de 1920. Esta ley postula que, un aerogenerador no es capaz de transformar toda energía cinética del viento que atraviesa las palas del rotor en energía mecánica. Apenas, solo un 16/27 del total se puede llegar a convertir, es decir, un 59.26 %. Por lo tanto, se concluyó que existe un máximo teórico para el aprovechamiento de la potencia del viento, conocido también como “límite de Betz”.

Sin embargo, toda esa energía mecánica no es convertida en energía eléctrica debido a las pérdidas de los elementos que realizan la transformación en el interior de la góndola (multiplicador y generador). Estas pérdidas albergan entorno a un 13 % aproximadamente de la energía mecánica. Por tanto, el rendimiento máximo en la práctica que se puede llegar a obtener de energía eléctrica es de un 46 %. Que si se compara con el resto de tecnologías que existen en el ámbito de las energías renovables la convierte en la más eficaz.

Por esta razón, y dado que un aerogenerador nunca va a trabajar constantemente a pleno rendimiento, el valor que se ha tomado para hallar la energía teoría de Weibull en este trabajo es de un 40%, es decir,  $\eta=0.4$ .

Así pues, una vez definidos todos los parámetros que contempla la expresión de la energía, en la tabla 4.3 se muestra en función del número de días, de la velocidad del viento y los diferentes diámetros de los rotores, la energía extraída teóricamente en Kilovatios hora (kWh).

En ella, se puede observar que la mayor cantidad de energía que puede ser generada se concentra en los valores centrales de la tabla, más concretamente a



las velocidades de 5-6 m/s. A dichas velocidades, si se instalarán aerogeneradores de las mismas dimensiones a los que albergan actualmente en los alrededores del punto de interés (diámetro de rotor de 132 m.), se alcanzarían producciones superiores al medio Gigavatio por hora (GWh).

También, lo que llama la atención de la tabla es que a la misma velocidad pero utilizando el aerogenerador más grande existente hasta el momento, la producción sería de 2 GWh (o 2000 kWh), produciendo casi el triple de energía más que los anteriores.

Finalmente, para poder hacer una comparación global se muestra la tabla 4.4. En ella, se exponen los Megavatios hora (MWh) totales que se pueden llegar a generar en un año igual de ventoso que el año 2018. Recordar, que para hacer la suma total no se pueden coger todos los valores de la tabla 4.3, sino que hay que tener en cuenta, una vez más, los límites prácticos. En consecuencia, la suma de energías se empezará a contabilizar a partir de los 4 m/s que es cuando el aerogenerador se pondrá en funcionamiento.

Velocidad	Energía (dim=5m)	Energía (dim=27m)	Energía (dim=54m)	Energía (dim=80m)	Energía (dim=132m)	Energía (dim=220m)
0	0	0	0	0	0	0
1	1,68	49,06	196,25	430,72	1172,65	3257,35
2	41,54	1211,20	4844,81	10633,32	28949,21	80414,48
3	231,61	6753,86	27015,45	59293,16	161425,63	448404,53
4	625,99	18253,95	73015,81	160254,17	436291,98	1211922,15
5	1014,80	29591,62	118366,47	259789,23	707276,18	1964656,06
6	1063,90	31023,26	124093,04	272357,84	741494,21	2059706,15
7	739,27	21557,09	86228,37	189252,93	515241,11	1431225,31
8	341,10	9946,51	39786,02	87321,85	237733,75	660371,53
9	103,50	3017,97	12071,88	26495,21	72133,22	200370,06
10	20,32	592,60	2370,41	5202,56	14163,96	39344,33
11	2,53	73,84	295,35	648,22	1764,79	4902,19
12	0,20	5,71	22,85	50,14	136,51	379,20
13	0,01	0,27	1,07	2,35	6,41	17,79
14	0,00	0,01	0,03	0,07	0,18	0,49
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

*Tabla 4.3: Energía teórica anual extraída en kWh a partir de la función de distribución de Weibull*

Analizando esta, se percibe como es lógico, qué cuanto mayor sea el área barrida por las palas del aerogenerador, mayor es la energía eléctrica generada. Percatándose de una diferencia muy notable entre los diámetros de 54 y 80 m.

siendo esta energía producida de casi el doble, ocurriendo lo mismo si es comparada esta última con la de un aerogenerador de 132 m. de diámetro.

Diámetros	Suma anual (MWh)
5 m.	3,91
27 m.	114,06
54 m.	456,25
80 m.	1001,37
132 m.	2726,24
220 m.	7572,90

*Tabla 4.4: MWh totales en un año dependiendo del tamaño del rotor*

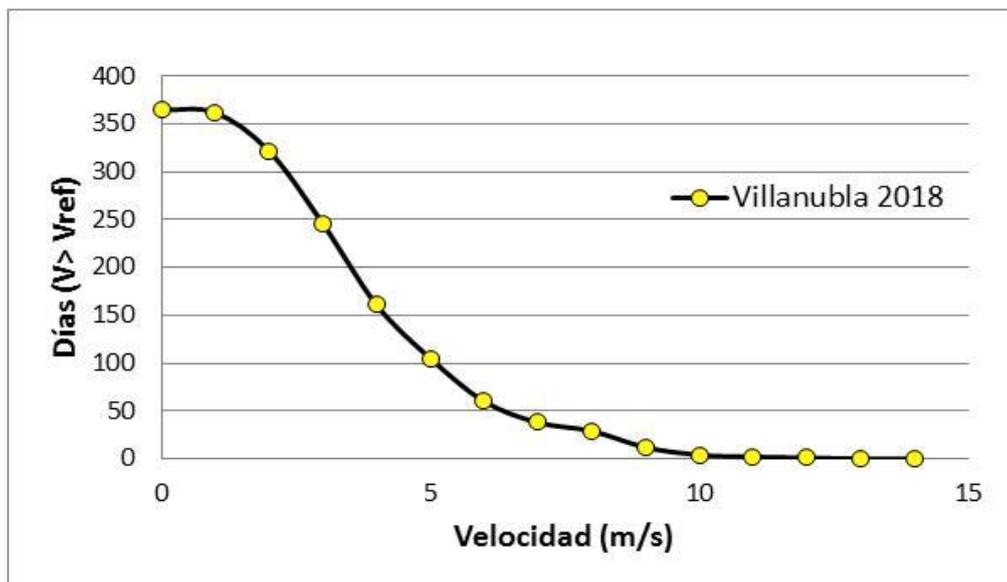
Como cabe de esperar, la producción de un aerogenerador de dimensiones tan elevadas como es el de 220 m. de diámetro, es muy superior al resto de tamaños.

#### **4.4. Energía resultante experimental**

Una vez obtenida la energía teórica siguiendo una función estadística es hora de pasar a calcular la energía experimental a partir de los registros meteorológicos de la AEMET.

La forma de hallar la energía es exactamente igual que en el apartado anterior a diferencia de la obtención del número de días. En esta ocasión, se obtendrá a través de la distribución acumulada de la gráfica 3.5. Con el fin de tenerla presente y entender mejor lo que se va a explicar a continuación, se vuelve a mostrar dicha gráfica.

Los datos representados en la gráfica 4.5 muestran una función descendente que comienza en 365, coincidiendo con los días que tiene un año, hasta hacerse 0 a la velocidad de 13 m/s. Esto quiere decir que en el origen, todos los días del año tienen una velocidad superior a la velocidad de referencia (0 m/s en este caso). Sin embargo, a la velocidad de 1 m/s los días que tengan velocidades mayores a la de referencia habrán descendido aunque sea mínimamente.



Gráfica 4.5: Distribución acumulada de la velocidad en Villanubla en 2018.

El problema está en que al ser un gráfico, visualmente no se puede afirmar cuantos días adquiere cada velocidad determinada. Por este motivo, en la tabla 4.5 se manifiesta el número de días que se utilizará para calcular la energía experimental. Estos días se obtienen gracias a la siguiente fórmula y a los datos procesados para la obtención de la distribución acumulada de Villanubla.

$$N^{\circ} \text{ días} = \text{Días}_n - \text{Días}_{n+1}$$

Dónde:

- Días: Días con una velocidad mayor a la velocidad de referencia.
- “n” varía entre 0 y 14.

Después de haber realizado las cuentas pertinentes, se llegan a los siguientes resultados:

Las velocidades predominantes con el mayor número de días se sitúan en el intervalo de 2 a 5 m/s, lo que hace que entorno a unos 120 días, casi un tercio del año, no se genere energía. Sin embargo, hay que prestar atención a la velocidad de 8 m/s, ya que rompe la tendencia decreciente, aportando una cantidad considerable de días a una velocidad bastante elevada en la que un aerogenerador puede llegar a estar casi funcionando en régimen óptimo.

Velocidad	Días ( $V > V_{ref}$ )	Nº Días
0	365	3
1	362	40
2	322	76
3	246	85
4	161	56
5	105	45
6	60	22
7	38	9
8	29	17
9	12	8
10	4	2
11	2	1
12	1	1
13	0	0
14	0	0

*Tabla 4.5: Número de días obtenidos a partir de los registros meteorológicos de la AEMET.*

Así pues, una vez teniendo claros todos los parámetros que contempla la expresión de la energía, en la tabla 4.7 se muestra en función del número de días, de la velocidad del viento y los diferentes diámetros de los rotores, la energía extraída experimentalmente en Kilovatios hora (kWh).

Velocidad	Energía (dim=5m)	Energía (dim=27m)	Energía (dim=54m)	Energía (dim=80m)	Energía (dim=132m)	Energía (dim=220m)
0	0	0	0	0	0	0
1	4,52	131,92	527,67	1158,12	3152,97	8758,26
2	68,76	2005,13	8020,54	17603,37	47925,19	133125,52
3	259,56	7568,72	30274,89	66446,95	180901,81	502505,03
4	405,34	11819,74	47278,96	103767,26	282506,36	784739,89
5	636,17	18550,79	74203,16	162860,16	443386,79	1231629,98
6	537,44	15671,71	62686,83	137584,27	374573,16	1040481,01
7	349,13	10180,67	40722,70	89377,66	243330,67	675918,54
8	984,40	28705,08	114820,32	252006,20	686086,87	1905796,87
9	659,58	19233,46	76933,84	168853,42	459703,43	1276953,97
10	226,19	6595,84	26383,35	57905,84	157648,64	437912,88
11	150,53	4389,53	17558,12	38536,33	104915,17	291431,02
12	195,43	5698,80	22795,21	50030,64	136208,42	378356,73
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0

*Tabla 4.7: Energía experimental anual extraída en kWh a partir de los registros meteorológicos de la AEMET.*



Lo más destacado que se puede advertir de esta tabla es que la mayor cantidad de energía que se puede generar aparece a las velocidades de 6 y 8 m/s. Principalmente en la de 8 m/s corroborando lo comentado anteriormente, es decir, que a pesar de no tener un número tan abultado de días como las velocidades de 4 o 5 m/s, es capaz de superar la producción de energía de estas últimas por estar trabajando casi a pleno rendimiento.

También, lo que llama la atención de la tabla es que a la misma velocidad pero utilizando el aerogenerador más grande existente hasta el momento, la producción sería casi de 2 GWh (o 2000 kWh).

Finalmente, para poder hacer una comparación global se muestra la tabla 4.8. En ella, se exponen los Megavatios (MW) totales que se pueden llegar a generar en un año igual de ventoso que el año 2018.

Al igual que en el apartado anterior, para hacer la suma total de la energía no se pueden coger todos los valores de la tabla 4.7, sino que hay que tener en cuenta, una vez más, los límites prácticos. En consecuencia, la suma de energías se empezará a contabilizar a partir de los 4 m/s.

<b>Diámetros</b>	<b>Suma anual (MWh)</b>
5 m.	4,144
27 m.	120,846
54 m.	483,382
80 m.	1060,922
132 m.	2888,360
220 m.	8023,221

*Tabla 3.8: MWh totales en un año dependiendo del tamaño del rotor a partir de los datos de la AEMET.*

El análisis de está, es semejante al realizado a la tabla 4.4, a mayor área barrida por las palas del aerogenerador, mayor es la energía eléctrica generada. Sin embargo, a diferencia que en la energía teórica, la diferencia de producción entre los diámetros de 80 y 132 m. es aún más notable en esta ocasión, siendo esta última energía tres veces superior a la del rotor de menor tamaño.

#### 4.5. Certidumbre de la generación energética teórica

Para acabar este capítulo, se realizará la comparación global entre los datos expuestos en los apartados 4.3 y 4.4. El objetivo de esto, es la comprobación de si la opción elegida de la función de Weibull para hallar la energía de forma teórica ha sido la idónea o no.

La justificación se llevará a cabo a través de la obtención del porcentaje del error absoluto entre ambas energías. Este se conseguirá aplicando la siguiente fórmula:

$$Error = \frac{|Energía\ teórica - Energía\ experimental|}{Energía\ experimental} \cdot 100$$

A continuación, se muestra un ejemplo tomando los datos de las tablas 4.4 y 4.8 con el propósito de conseguir un valor numérico del error.

Para un rotor de 27 m. de diámetro:

$$Error = \frac{|114,06 - 120,85|}{120,85} \cdot 100 = 5.61 \%$$

Para todos los diámetros, el error va a tener el mismo valor. Esto es debido a que la fórmula utilizada para obtener ambas formas de energía, es idéntica. Únicamente varía el área barrida por las palas de aerogenerador.

Por tanto, se determina que el error en la probabilidad visto en el apartado 4.2, repercute en un error de un 5.61 % en la producción anual de energía al enfrentar la expresión teórica de Weibull y la probabilidad experimental.

Finalmente, se concluye que los factores escogidos de la función de Weibull han sido acertados ya que el error es muy pequeño. En consecuencia, se puede dar por válido el estudio realizado en este cuarto capítulo.



## ***CAPITULO 5 - VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA***

En los tiempos que corren, la concienciación con el medio ambiente y el cambio climático debe de estar muy presente en la forma de pensar y actuar de todas y cada una de las personas que habitan en este planeta.

Por eso, con el fin de evitar destruir el planeta en el que vivimos, la producción de energía eléctrica a través de materiales fósiles debe ir siendo eliminada para dar paso a las energías alternativas, consiguiendo así, una forma de generar energía de manera limpia y sostenible.

En este capítulo, se describen algunas de las ventajas y de los inconvenientes de la energía eólica.

### ***5.1. Ventajas de la energía eólica***

#### **5.1.1. Abastecimiento de la energía eléctrica a los ciudadanos**

En este primer apartado se mostrarán los cálculos necesarios para poner en conocimiento cuantos habitantes pueden ser abastecidos con la energía extraída de uno o varios aerogeneradores, dependiendo de los MW (Megavatios) que pueda generar cada uno de ellos según sea su tamaño.

Primeramente, se tiene que saber cuál es el consumo de energía promedio por persona. Para ello, se tendrá que hacer la suma total de la potencia de todos y cada uno de los electrodomésticos de uso habitual en un hogar. En estos, hay que incluir la potencia del frigorífico, la televisión, el microondas, la lavadora, etc. además del consumo de todas las luminarias que pueda haber en función del número de horas que vayan a estar en actividad.

[Europa, 2019] recoge los datos del consumo medio (MWh) por persona en Europa en el año 2016. La media europea de dicho consumo a lo largo un año es de 1584 kWh. Sin embargo, hay países como Finlandia o Suecia que superan con bastantes estas cifras, llegando a superar los 4 MWh al año.

En el caso de España, el consumo medio por persona es cercano a la media europea, situándose en los 1500 kWh al año.

En la tabla 5.1, se muestran el número de habitantes que son abastecidos de electricidad por un aerogenerador o por 20 (cifra tomada al azar para hacer una comparativa), a partir de la energía extraída experimentalmente en un año, obtenida en el apartado 4.4 dependiendo del diámetro del rotor.

Para hallar el número de habitantes que pueden ser abastecidos, se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ de habitantes} = \frac{\text{Suma anual experimental (kWh)}}{1500 \text{ kWh}}$$

Se puede observar en la tabla 5.1 que, con un solo aerogenerador de pequeñas dimensiones, los ciudadanos que pueden ser abastecidos por la energía generada son escasas. Por el contrario, con un aerogenerador de 132 m. de diámetro del rotor, ya se puede abastecer a más de 1900 consumidores, cantidad más que de sobra para dar suministro a un pueblo en el que la población no sea excesivamente elevada.

Díametros	Suma anual (MWh)	Nº habitantes (1 Aerog.)	Nº habitantes (20 Aerog.)
5 m.	4,144	3	55
27 m.	120,846	81	1611
54 m.	483,382	322	6445
80 m.	1060,922	707	14146
132 m.	2888,360	1926	38511
220 m.	8023,221	5349	106976

*Tabla 5.1: Número de ciudadanos abastecidos de electricidad gracias a un aerogenerador o a 20 aerogeneradores.*

Sin embargo, si se tiene un conjunto de 20 aerogeneradores, el número de habitantes que son abastecidos aumenta considerablemente, pudiendo suministrar electricidad a un municipio de más de 38.000 residentes con aerogeneradores de 132 m., como puede ser un municipio del tamaño de Laguna de Duero o Arroyo de la Encomienda o superior.

### 5.1.2. Reducción de las emisiones de CO2

La mayor ventaja que ofrecen las energías renovables, en este caso la energía eólica, con el resto de tecnologías, es que ésta, es una energía limpia y sostenible, es decir, que no emite a la atmósfera gases nocivos que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono y, por tanto, al cambio climático.

Sin embargo, las fuentes de energía convencionales, con la quema de combustibles fósiles, emiten enormes cantidades de sustancias nocivas como es el CO<sub>2</sub>, entre otras muchas.



Por lo tanto, en este punto se va a calcular cuantas toneladas de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) se pueden evitar emitir a la atmósfera gracias a la potencia del viento. Para ello, primeramente se debe de saber cuál es la relación entre kWh y la tonelada equivalente de petróleo (TEP). En [Econolandia, 2019] se determina que el valor estandarizado de un TEP en forma de energía son  $4.1868 \cdot 10^{10}$  Julios, que equivalen a 11.630 kWh.

Además, [Carm, 2019] recoge en una tabla la relación entre una tonelada equivalente de petróleo y las toneladas de Co<sub>2</sub>. Algunos de estas equivalencias son las siguientes:

- ❖ Gas natural: 2.467
- ❖ Carbón: 4.472
- ❖ Gasóleo C: 3.453

En la tabla 5.2 se muestran los valores de las toneladas de CO<sub>2</sub> que se pueden reducir anualmente gracias a la energía experimental obtenida en el apartado 4.4.

Diámetros	Suma anual (MWh)	TEP	Gas Natural (T)	Carbón (T)	Gasóleo C (T)
5 m.	4,144	0,36	0,88	1,59	1,23
27 m.	120,846	10,39	25,63	46,47	35,88
54 m.	483,382	41,56	102,54	185,87	143,52
80 m.	1060,922	91,22	225,05	407,95	314,99
132 m.	2888,360	248,35	612,69	1110,64	857,57
220 m.	8023,221	689,87	1701,92	3085,11	2382,13

*Tabla 5.2: TEP y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (T) a la atmósfera en función del tipo de combustible utilizado*

En esta tabla, se puede comprobar que con el desarrollo de la energía eólica se podrían disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en gran medida. Sobre todo, si se analizan las toneladas que se emiten con el uso del carbón como combustible para generar electricidad, ya que, se reducirían más de 1000 toneladas al año si se pasará a producir la energía eléctrica con un aerogenerador de 132 m. de diámetro del rotor.

También, con este tipo de aerogeneradores, la reducción de las emisiones generadas por el consumo de gas natural o de gasóleo son significativas, superando en ambos casos las 600 toneladas al año.

Hay que tener en cuenta, que estos datos están en función de un único aerogenerador. Por tanto, si se tuviera un parque eólico como es en este caso, la

reducción de las emisiones sería grandísima y, en consecuencia, se detendría en gran medida el desarrollo del cambio climático.

## **5.2. Inconvenientes de la energía eólica**

Como se ha comentado, la energía eólica no ocasiona un agravamiento de la destrucción de la capa de ozono gracias a la inexistente emisión de gases contaminantes. Sin embargo, cuenta con algunos efectos secundarios negativos a los que hay que prestar atención. Los más importantes son los que se describen a continuación; el ruido, el impacto visual y el impacto medio ambiental.

### **5.2.1. Ruido**

Como bien expresa el artículo [Zagubien, 2019], la explotación de un parque eólico no provoca grandes secuelas sobre el medio ambiente. Sin embargo, las turbinas eólicas emiten ruido durante el tiempo en el que el aerogenerador está en funcionamiento, siendo esto un efecto secundario negativo.

Por esta razón, para elegir la ubicación de un parque eólico, primeramente se debe evaluar que la distancia con respecto de las áreas protegidas acústicamente (áreas residenciales) sea la correcta, de modo que no haya niveles superiores al límite establecido que causen molestias acústicas. Este nivel se describe como nivel de sonido permitido en el entorno.

Para estimar que valor es el permisible, algunos países toman las directrices de la OMS (Organización Mundial de la Salud), la cual establece que el nivel de ruido acústico no irritante en el medio ambiente para la mayoría de las personas es de aproximadamente 40 dB (decibelios). Siendo considerado este valor en un momento de descanso, es decir, por la noche.

El ruido aerodinámico según explica [Deshmukh, 2018] se genera debido al flujo de aire sobre las palas del aerogenerador, que interactúa de diferentes maneras con la superficie de éstas. Es por ello, que cuanto mayor sean las dimensiones de los aerogeneradores, mayores niveles de ruido generará. Además, el ruido también depende de la velocidad del viento, que de nuevo, cuanto mayor sea ésta, mayor será el ruido ocasionado. Sin embargo, con el paso del tiempo, se han ido fabricando diferentes formas de los perfiles de las palas con el fin de conseguir hallar el idóneo, y así, aminorar el ruido que provocan.

Por los motivos anteriores, y dado que, los niveles de ruido disminuyen al aumentar la distancia con la fuente emisora, se ve necesaria establecer una distancia mínima entre los aerogeneradores y las zonas residenciales para mitigar el conflicto entre la producción de energía renovable y el bienestar de los residentes. Por tanto,

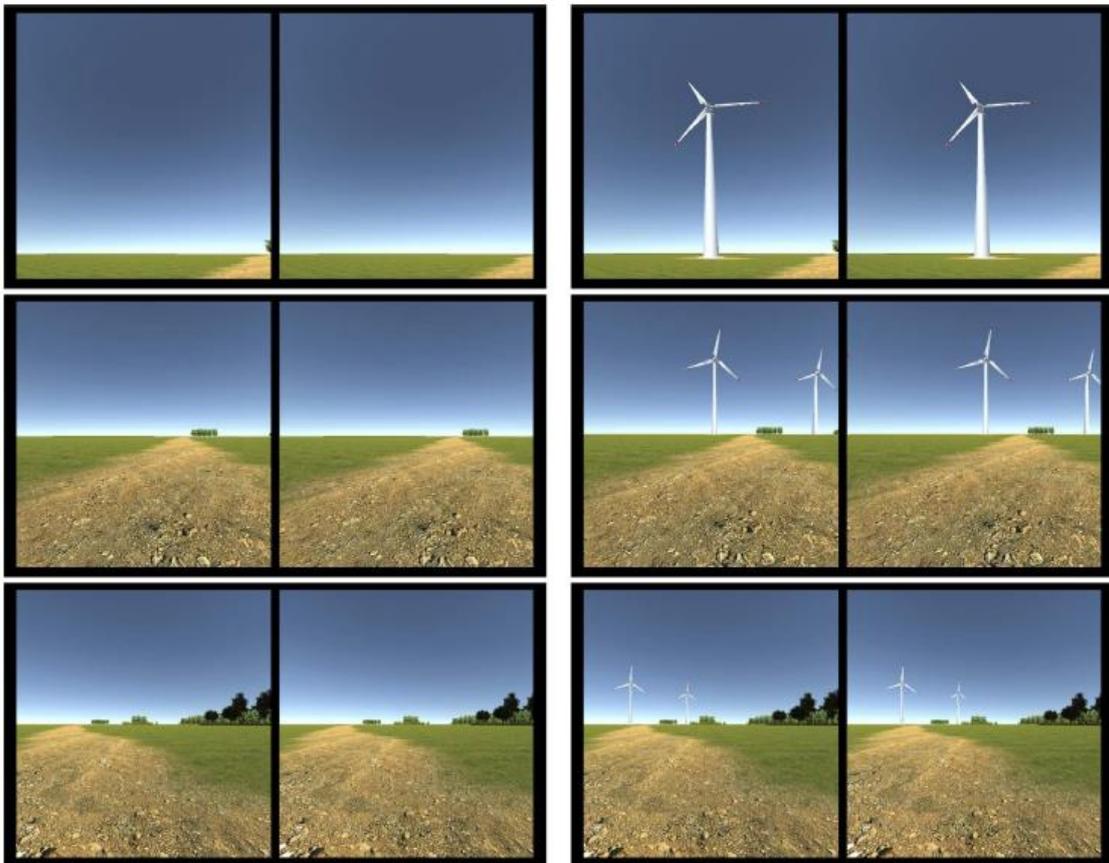
haciendo referencia a lo expuesto en [Masurowki, 2016], se ha establecido una distancia mínima a las zonas residenciales de diez veces la altura del tipo de aerogeneradores que haya instalado en la zona como se indica en la imagen 5.1. Por ejemplo, si se instalarán unos aerogeneradores con una altura de 200 m, la distancia mínima sería de 2000 metros.



*Imagen 5.1: Representación de la distancia mínima que debe haber entre un aerogenerador y una vivienda.*

### 5.2.2. Impacto visual

Otro efecto secundario de la implementación de esta fuente de energía es el gran desafío de la aceptación social. El impacto visual que producen los aerogeneradores provoca diversas opiniones entre la ciudadanía, ya que, cierta población ve a los aerogeneradores como elementos agradables para la vista además de ser admirados por ser una energía ‘verde’. Pero por el contrario, existe otro porcentaje de la población que los considera como elementos que estorban y que solo dañan la imagen del paisaje en los lugares en los que son instalados. En la imagen 5.2 se muestra la diferencia entre tener un paisaje con aerogeneradores o sin ellos, con el fin de proporcionar al lector del presente trabajo, el impacto visual que le generaría si en un plazo de “x” tiempo tuviera que pasar a ver cada día una de estas infraestructuras.



*Imagen 5.2: Comparativa del mismo paisaje con o sin aerogeneradores. Referencia [Yu, 2017]*

En España, también existen diferentes posturas, por un lado, la de políticos y grandes organismos ecologistas que están a favor, y por el otro, las personas afectadas de forma directa por las implantaciones, que a pesar de que la actitud general hacia los aerogeneradores es progresiva, no lo es tanto cuando se propone la instalación de un parque eólico cerca de los hogares, siendo estas personas afectadas reacias a este tipo de instalaciones.

Por ejemplo, las grandes organizaciones ecologistas como son Greenpeace y Ecologistas en Acción promueven que la energía eólica se desarrolle a gran escala con el argumento de conseguir el cumplimiento los protocolos existentes contra el cambio climático. Sin embargo, si se pide opinión a las organizaciones ecologistas de menor magnitud, la opinión cambia alegando que originan problemas de impacto visual y de biodiversidad.

Finalmente, para expresar en porcentajes la aprobación que ha conseguido este tipo de energía renovable, el artículo [Maehr, 2015] muestra los datos registrados de la población de Reino Unido. Se observa que un 63% de la población está a favor de los aerogeneradores, un 28% muestra opiniones equilibradas, un 5% se opone y un 4% no sabe que responder.



Se concluye, que los aspectos visuales pueden influir en la aprobación de los parques eólicos, siendo estos mucho más aceptados cuando están ubicados fuera de la vista de los ciudadanos.

### 5.2.3. Impacto medioambiental

El último gran efecto secundario ocasionado por la energía eólica que se va a mencionar en este trabajo, es el impacto en el medio ambiente.

A parte de causar un impacto sobre el suelo y la flora del lugar donde se va a instalar un parque eólico, puede originar una gran perturbación sobre las aves.

Conforme a la información obtenida referente a [Al Zohbi, 2015], debido a la situación actual de algunas especies de aves, cualquier causa adicional de mortalidad en estas puede ser significativa, a la cual, hay que prestarla una mayor atención.

Aunque el número de muertes de aves debido a colisiones con álabes de turbinas representa el 0.01-0.02% del total, que es mucho menor que los impactos con otras estructuras como vehículos, edificios, ventanas de vidrio o líneas eléctricas, se debe de tener mucho cuidado si no se quiere que esta cifra se dispare.

Un impacto significativo puede ocurrir si la ubicación de los parques no es la apropiada, traduciéndose en colisiones, desplazamientos o efectos de barrera en las diferentes especies de aves. Por lo tanto, es necesario evitar lo más posible la construcción de parques eólicos en áreas de alta concentración de aves como pueden ser las reservas naturales o los caminos utilizados por las aves migratorias, especialmente, cuando estas áreas albergan especies vulnerables.

Además, otro hecho significativo que puede ocurrir si no se toman las medidas necesarias, es la reubicación forzada de las aves en un área alrededor de los aerogeneradores, lo que conllevaría a una pérdida del hábitat natural de estas.

Se concluye así, que antes de comenzar la construcción de un parque eólico, es necesario la realización de un estudio de la fauna que existe en la zona para concretar si ese lugar es válido o no.



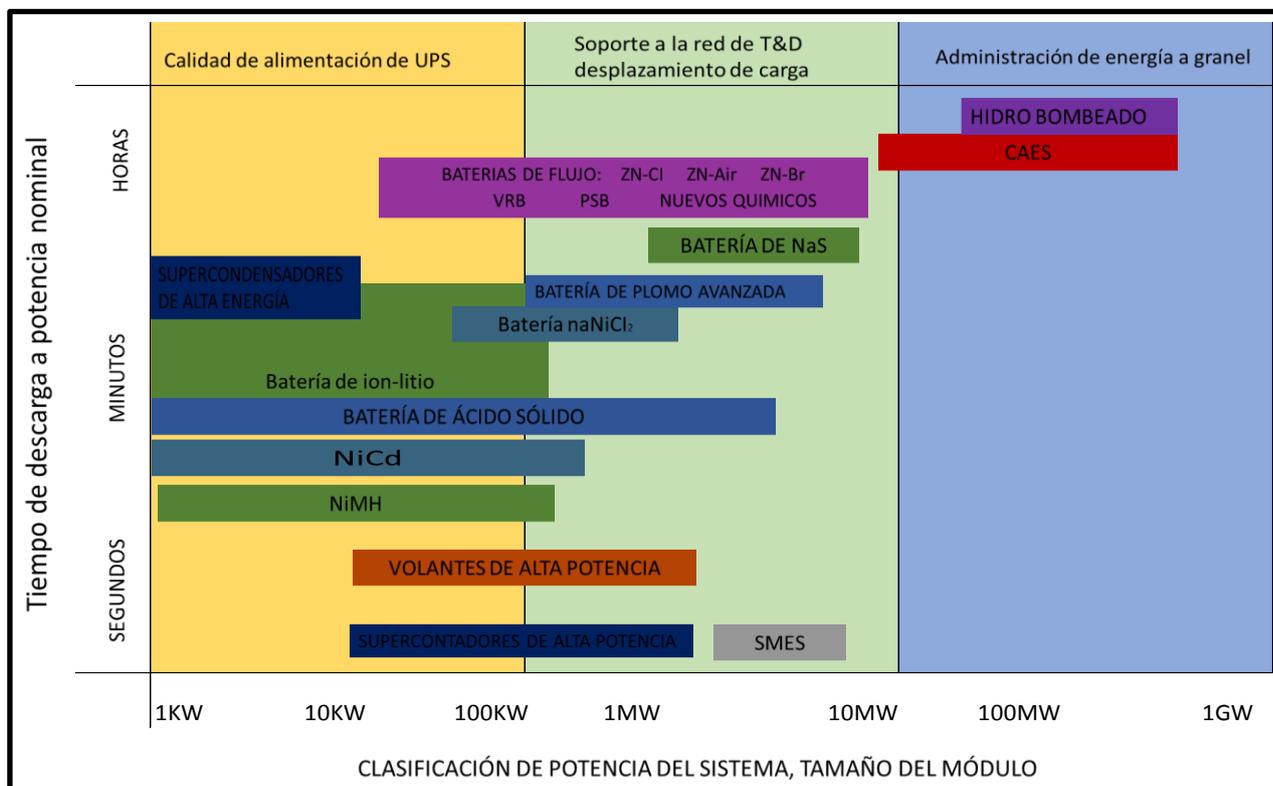
***CAPITULO 6 - ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA***

**6.1. Introducción**

El almacenamiento de la energía eólica es un aspecto fundamental que se debe someter a estudio ya que su combustible, el viento, es una fuente muy variable e intermitente. Esto provoca que durante los períodos de baja velocidad del viento pueda coincidir con los periodos de tasas de energía pico en la red. Mientras que habrá momentos en los que exista una alta generación de electricidad por parte de los aerogeneradores en los que la demanda sea insuficiente, y por tanto, se estaría perdiendo una gran cantidad de energía limpia que luego deberá ser compensada con tecnologías convencionales provocando un mayor impacto medioambiental.

Además, la energía eólica se ha convertido en un motivo de gran preocupación ya que provoca una gran cantidad de oscilaciones en el sistema durante los periodos de intermitencia del viento.

Por estas razones, el almacenamiento de energía a gran escala (> 50 MW) es vital para gestionar las demandas de energía fluctuantes diarias en las grandes redes.



*Imagen 6.1: Representación de los diferentes sistemas de almacenamiento según su capacidad y tiempo de descarga.*

La imagen 6.1 muestra representados todos los sistemas existentes para almacenar energías según la capacidad que pueden albergar y el tiempo de descarga.

En ella se puede observar que los mayores sistemas de almacenamiento son los de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) y los sistemas hidro-bombado (centrales hidroeléctricas reversibles) seguido de los diferentes tipos de baterías.

Por lo tanto, en este último capítulo se describirán algunas de las mejores formas de almacenaje de la energía producida a través de los aerogeneradores apoyándose en los textos de [Akhil, 2013] y [Amirante, 2017] o tomando ejemplo del estudio de los sistemas a gran escala para el almacenamiento de la energía eólica excedente realizado en la isla de Creta (Grecia) [Caralisa, 2019].

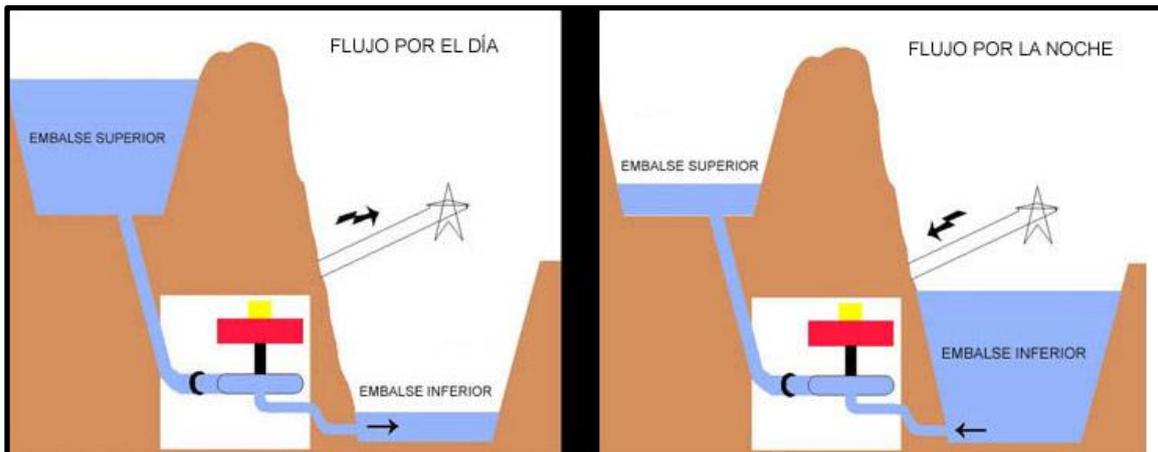
## **6.2. Almacenamiento hidráulico bombeado**

La integración de los parques eólicos con las centrales hidroeléctricas reversibles es una tecnología consolidada que se utiliza actualmente en muchas partes de todo el mundo. Este primer tipo de acumulación a gran escala está incluido dentro del grupo de sistemas mecánicos de almacenamiento.

En las centrales hidroeléctricas reversibles, el agua se bombea del depósito inferior al depósito superior durante la fase de carga aprovechando la energía producida por los aerogeneradores cuando la demanda es escasa. Cuando se necesita electricidad porque existe un pico de demanda, se produce la fase de descarga, liberándose el agua del depósito superior al inferior a través de una turbina produciendo energía eléctrica. Este tipo de centrales utilizan máquinas reversibles, ya se esté hablando de máquinas hidráulicas (bomba-turbina) como de máquinas eléctricas (motor-generator). La imagen 6.2 muestra de forma visual el proceso descrito.

Las ventajas que ofrece de esta tecnología son:

- Largos periodos de almacenamiento.
- Alta eficiencia (90%, dependiendo del tipo de turbina).
- Tiempo de respuesta rápido.
- Gran capacidad de almacenamiento (1000 y 3000 MW). Su volumen está limitado únicamente por el tamaño de ambos depósitos.
- El periodo de descarga dura horas o días.
- La vida útil es del orden de 50-60 años.
- Adecuado para energía a gran escala.



*Imagen 6.2: Funcionamiento de una central hidráulica reversible.  
Referencia [Ecovive, 2019]*

Por el contrario, los principales inconvenientes son:

- Dependencia de la estructura geológica.
- Baja densidad energética ( $0,3 \text{ kWh} / \text{m}^3$ ).
- Largo periodos para su construcción (unos 10 años).
- Inversión inicial con un alto coste de capital (millones de euros).
- Algunos problemas ambientales.



*Imagen 6.3: Depósito superior y parque eólico de la central hidroeólica en la isla de El Hierro. Referencia [Vanguardia, 2019]*

En [García Latorre, 2019] se muestra un ejemplo en el que ya está implantado este sistema a gran escala, ubicado en la isla de El Hierro (Islas Canarias, España). El objetivo de combinar la energía eólica con un sistema hidroeléctrico es conseguir que todo el consumo de electricidad de la isla proceda de fuentes de energía renovables para así evitar la utilización de los combustibles fósiles, y solo recurrir a estas fuentes, como pueden ser los grupos electrógenos diésel, en situaciones de emergencia.

En esta isla, actualmente, existe un parque eólico que cuenta con 5 aerogeneradores que proporcionan una potencia nominal de 11,5 MW y dos embalses con capacidades de 350.000 m<sup>3</sup> y de 150.000 m<sup>3</sup>, lo que supondría, en un pronóstico de la distribución con la que se abastecería a la población en un año, de un 73,4% gracias a las energías renovables y el resto, el 26,6%, sería suministrado a través de un motor diésel.

La imagen 6.3 muestra el depósito superior de la central hidroeléctrica con la capacidad de 350.000 m<sup>3</sup> mencionada anteriormente, además de los 5 aerogeneradores con los que cuenta el parque eólico.

### **6.3. Almacenamiento con aire comprimido**

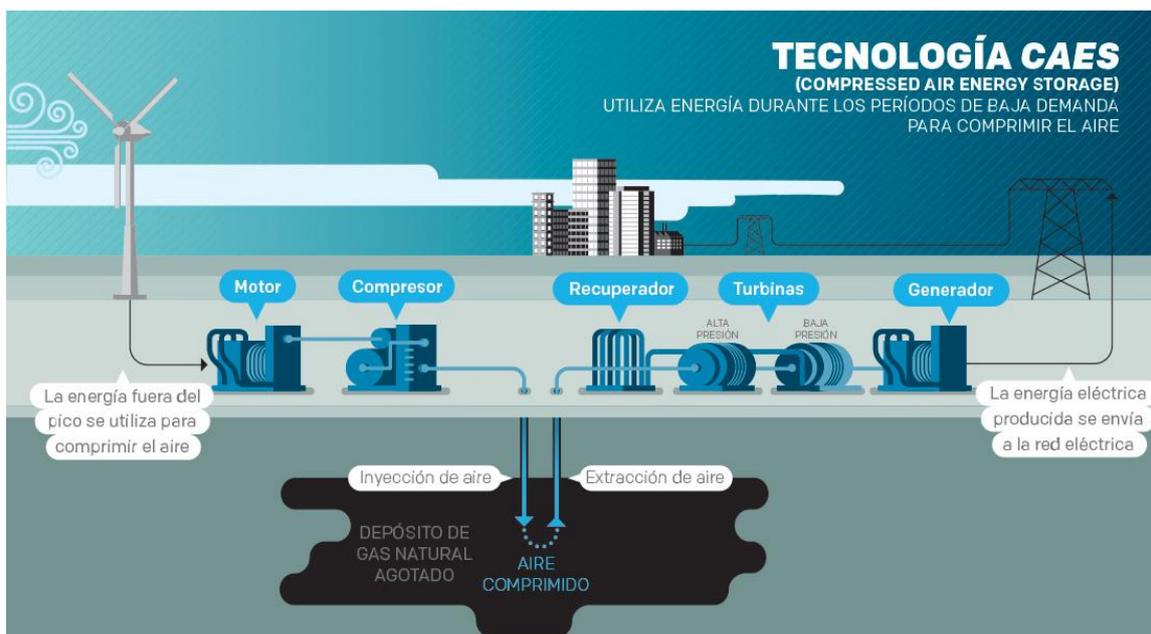
Otro tipo de almacenamiento que pertenece al grupo de los sistemas mecánicos es el almacenamiento en aire comprimido.

Los sistemas de almacenamiento de aire comprimido (CAES), utilizan la electricidad generada por los aerogeneradores fuera de las horas pico (escasez de demanda) para comprimir el aire que posteriormente se almacenará en forma de energía de presión (hasta unos 70-100 bar) en un reservorio, ya sea una caverna subterránea o reservorios en superficie. Cuando se requiere de energía eléctrica, el aire comprimido se calienta para después expandirse a su paso por la turbina, en la cual, la energía almacenada en el gas se convierte en energía mecánica para después ser transformada a energía eléctrica gracias a un generador. La imagen 6.4 representa de forma visual lo descrito.

Una disposición habitual de la planta se compone de un compresor de etapas múltiples, una turbina de gas de múltiples ejes, un motor/generador, un almacenamiento subterráneo para los controles de aire comprimido y otros equipos auxiliares, como pueden ser un tanque de combustible o un intercambiador de calor.

Como se ha comentado anteriormente, puede haber distinciones entre un reservorio superficial o uno subterráneo.

Las plantas de CAES que emplean almacenamiento de aire por encima del suelo normalmente son más pequeñas que las plantas con almacenamiento subterráneo, con capacidades del orden de 3 a 50 MW y tiempos de descarga de 2 a 6 horas. Mientras que los sistemas de almacenamiento subterráneo son más rentables con capacidades de almacenamiento de hasta 400 MW y tiempos de descarga de 8 a 26 horas.



*Imagen 6.4: Esquema del almacenamiento de la energía en aire comprimido (CAES). Referencia [Proyectorfse, 2019]*

Las ventajas de este tipo de sistema son:

- Adecuado para energía a gran escala (Cientos de MW).
- El periodo de almacenamiento puede ser superior al año.
- Eficiencia del 70-89% (Depende de las eficiencias del compresor y la turbina).
- Arranque rápido (9 min. en arranques de emergencia y 12 min. en condiciones normales).
- Densidad de energía aproximadamente de 12 kWh/m<sup>3</sup>.
- Vida útil de 40 años.
- Adecuado para la reducción de picos y control de frecuencia y voltaje.

Por el contrario, los inconvenientes son los siguientes:

- Gran dificultad de encontrar sitios geográficos apropiados con cuevas naturales subterráneas.

- Quema de combustibles fósiles para calentar el aire.
- Por tanto, problemas relacionados con el cambio climático y el entorno.

#### **6.4. Almacenamiento en baterías ion-litio**

El almacenamiento de la energía en baterías está dentro del grupo de los sistemas eléctricos y electroquímicos, y aunque no sean a gran escala como los sistemas descritos anteriormente, también tienen una función muy importante dentro del ámbito del presente trabajo.

A pesar de que existe una gran cantidad de tipos de baterías, este punto se centrará en el desarrollo de las baterías de ion-litio, utilizándose a modo introductorio del último punto de este capítulo.

Las baterías de ion-litio son sistemas de almacenamiento maduro para aplicaciones electrónicas de consumo, además, son líderes en el sector automovilístico en la parte de coches híbridos y eléctricos. Como se puede apreciar en la imagen 6.1, ocupan el centro de la tabla a la hora de hablar de los tiempos de descarga. Al mismo tiempo, abarcan un amplio rango en la capacidad de acumulación de la energía, existiendo baterías con poca capacidad y otras que son capaces de acumular hasta un megavatio de potencia.

Generalmente, las baterías de litio se componen de dos electrodos y un electrolito orgánico. Por un lado, el cátodo de los electrodos está hecho de óxido de litio metálico, mientras que el ánodo es una célula de carbono grafitica. Por otro lado, el electrolito puede ser una solución acuosa hecha de un disolvente orgánico y una sal de litio disuelta o un polímero sólido. El conjunto de estos componentes recibe el nombre de celda y para formar una batería solo basta con la unión de varias de estas celdas.

El funcionamiento de estas baterías es el siguiente:

Durante la fase de carga de la batería, los iones de litio se desprenden del cátodo, dirigiéndose hacia el ánodo, por medio del electrolito. Además, los electrones fluyen de un extremo al otro, haciéndolo a través de un circuito externo. Finalmente, en el ánodo, los electrones se recombinan de nuevo con los iones. Una vez que el flujo de iones por el electrolito sea inexistente, se tendrá constancia de que la batería está totalmente cargada. Por el contrario, para la fase de descarga, se realizará el mismo proceso pero a la inversa. Esta descripción viene reflejada en la imagen 6.5.

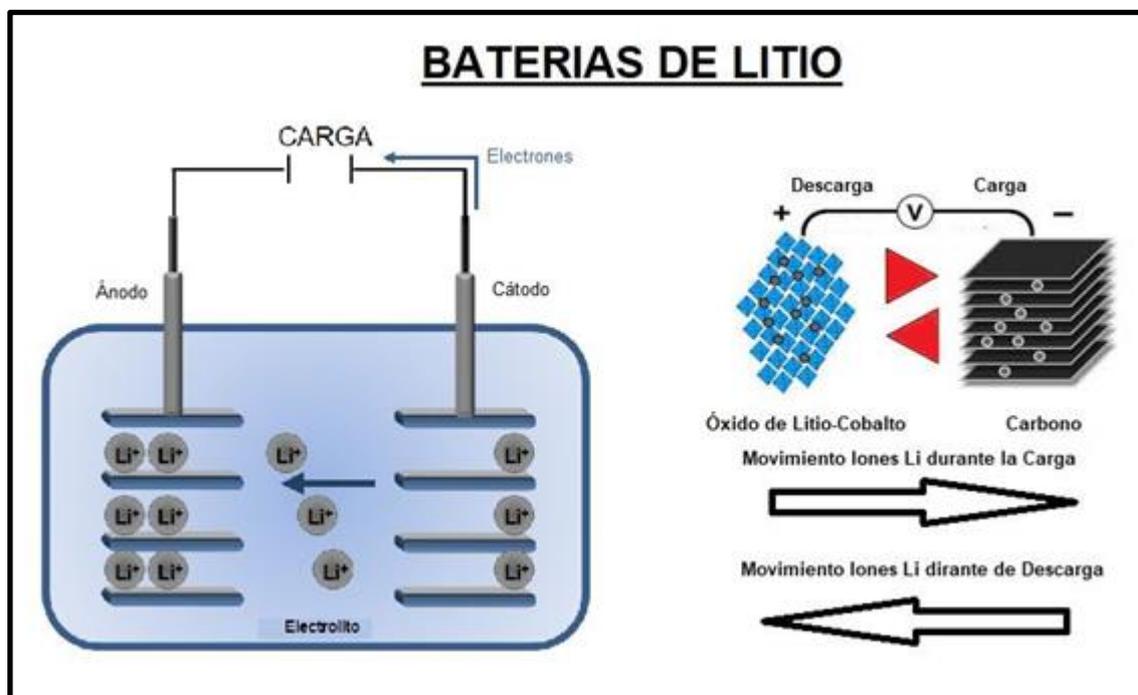
Las ventajas de estas baterías son las siguientes:

- Alta densidad de energía (160–200 Wh / kg).
- Tiempo de respuesta rápido (milisegundos).

- Baja tasa de autodescarga.
- Alta eficiencia (97%).

Por otro lado, los inconvenientes son estos:

- Vida útil dependiente de la temperatura.
- Profundidad de descarga dependiente de la temperatura.
- Coste elevado.
- Necesidad de un sistema que controle el estado de salud de la batería, proporcionando condiciones de trabajo óptimas (Protección contra sobrecalentamiento, la baja temperatura, la sobrecarga y la descarga).



*Imagen 6.5: Descripción de las baterías ion-litio. Referencia [Areatecnologia, 2019]*

Actualmente, existen en vías de desarrollo baterías que utilizan otros materiales diferentes con el fin de mejorar las baterías de ion-litio. Algunas de estas variantes son:

- **Batería de litio-azufre:** Esta batería se está convirtiendo en una alternativa creíble para la batería común de ion litio debido a su alta energía específica, bajo costo, abundancia de materia prima, seguridad y bajo impacto ambiental.

- El dimetilsulfóxido (DMSO) reemplaza el electrolito de base carbonatada en una batería de litio-aire para mejorar el rendimiento de los ciclos, reduciendo el rápido deterioro del ánodo y obteniéndose una mayor eficiencia.
- Una nueva generación de baterías de iones de litio emplea un electrolito de estado sólido, compuesto de borohidruros metálicos de tipo granate, que pueden mejorar de siete órdenes de magnitud el intercambio iónico debido a la geometría microcristalina.

### **6.5. Segunda vida de las baterías de los coches eléctricos**

En los últimos años, el número de vehículos eléctricos ha aumentado significativamente con el propósito de hacer frente al calentamiento global y la contaminación ambiental gracias a ser considerados los mejores sustitutos de los vehículos tradicionales.

Por su alta eficiencia, su alta energía específica y su larga vida útil, las baterías que normalmente se instalan en este tipo de coches, son las baterías de ion-litio como se explicaba anteriormente. En función del tipo de vehículo, la capacidad de acumulación variará, siendo estas de unos 15 a 20 kWh para los coches híbridos y de hasta unos 50 kWh para vehículos completamente eléctricos. Sin embargo, el coste de las baterías todavía representa una proporción significativa de los precios de dichos coches.

El problema reside en que cuando la batería de un coche eléctrico comience a funcionar por debajo del 80% de su capacidad normal, se tendrá que sustituir por una nueva, ya que se considera que en ese estado no es capaz de cumplir con los requisitos necesarios para el funcionamiento óptimo de estos coches.

A pesar del sufrimiento al que son sometidas estas baterías durante los primeros años de vida debido a las temperaturas extremas, la cantidad de ciclos de carga parciales que realizan al cabo de un año y de los distintos niveles de carga, después de su retirada de los vehículos, estas baterías siguen teniendo mucha vida útil aunque su uso estará destinado a actividades que requieran menor nivel de exigencia, como estudia y analiza [Jiang, 2018]. Algunas de estas actividades pueden ser:

- A pequeña escala: Pueden utilizarse como acumuladores de reserva o para beneficiarse de un menor gasto en la factura de la luz de los hogares.
- A gran escala: Utilizadas para almacenar la energía procedente de los aerogeneradores en momentos valle, es decir, cuando la demanda es

escasa o también para la regulación de la frecuencia en los sistemas de energía.



*Imagen 6.6: Instalación que agrupa la energía eólica y el almacenamiento a gran escala de la empresa BMW. Referencia [Freenet, 2019]*

Para este último caso, empresas como la de Nissan con ayuda de The Mobility House, están estudiando la posibilidad de instalar un acumulador en Europa de 100 MWh utilizando más de 3300 baterías totalmente nuevas de 24 kWh o más de 5200 baterías que ya se encuentren en su segunda vida útil, según informa [Motor, 2019].

También [Omicron, 2019] comunica que BMW disfruta ya de su propia instalación repleta de baterías tanto nuevas como usadas, además de contar con su propio aerogenerador con el que proporcionar energía eléctrica a la red alemana cuando esta sea necesaria. La imagen 6.6 muestra dicha instalación.





## ***CAPITULO 7 - CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS***

Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas después de la realización del presente proyecto. Además, se indicará alguno de los posibles trabajos que se pueden realizar a partir de este.

### ***7.1. Conclusiones***

Tras haber realizado el estudio y bajo el marco del proyecto TIMMIS, se presentan las principales conclusiones obtenidas en función de los objetivos marcados al inicio de este trabajo.

- ❖ Se ha comprobado que la zona de los Montes Torozos, más concretamente, el municipio de Castromonte, es un buen territorio para la construcción de un parque eólico. Esto es debido, a que en esta zona, según los datos procesados de los registros meteorológicos de la AEMET, y considerando que el aerogenerador se pone en funcionamiento a partir de velocidades iguales o superiores a los 4 m/s., existen en torno a unos 150 días al año en los que se podrá generar energía eléctrica, mientras que, en los municipios con los que ha sido comparado (Olmedo, Aranda de Duero y Benavente) apenas tendrían 25 días de funcionamiento al año.
- ❖ A pesar de tener que hacer el estudio con los registros meteorológicos de Villanubla en vez de con los de Castromonte, se pueden dar por válidos todos los resultados, ya que existe mucha proximidad entre ambos municipios, y las variaciones entre uno y otro serán mínimas. Además, gracias a que los registros de la AEMET existentes desde hace casi un siglo, en algunos casos, hasta la actualidad, se ha podido comprobar que la distribución de la velocidad en Villanubla año tras año es similar, pudiendo realizar el resto del estudio teniendo solo en cuenta un único año. En este caso, por proximidad con la actualidad, se cogió el año 2018.
- ❖ Se ha demostrado que la elección de los parámetros de la función teórica de Weibull (Factor de escala (c): 4.6 y factor de forma (k): 2.75) han sido los acertados, ya que, el error cometido en el desajuste entre la probabilidad real de Villanubla y dicha distribución de Weibull no llega a ser del 9%. Además, una vez obtenidas las energías tanto de forma teórica como de forma experimental, y después de realizar la comparación entre ambas, se ha obtenido un error de apenas el 6%.

- ❖ En cuanto a las ventajas de esta fuente de energía, si se considera que se van a instalar en este parque eólico 20 aerogeneradores que tengan un diámetro de rotor de 132 metros, se estima que se podrá abastecer de energía eléctrica a más de 38.000 habitantes gracias a la generación de cerca de 3.000 MWh al año por aerogenerador. También, con dicha energía producida, se podrán evitar casi 250 toneladas equivalentes de petróleo. Del mismo modo, se evitaría emitir a la atmósfera más de 600 toneladas de gas natural, más de 850 toneladas de Gasóleo C, y más de 1.100 toneladas de carbón al año, reduciendo así en gran medida el desarrollo del cambio climático.
- ❖ Por el contrario, con el análisis de los inconvenientes, es decir, del impacto ambiental, acústico y visual que provoca este tipo de tecnología, se pone en manifiesto que hay que tener en cuenta estos factores con el fin de que estas instalaciones no resulten perjudiciales bajo ningún concepto. Sobre todo con respecto al impacto acústico, ya que el nivel de ruido no irritante para la mayoría de las personas es de aproximadamente 40 dB (decibelios), por lo que, se tendrá que separar el aerogenerador de las zonas residenciales como mínimo, una distancia que sea igual a 10 veces la altura de aerogenerador (si tiene 200 m. de altura, la distancia mínima será de 2000 m.), puesto que, los niveles de ruido disminuyen según se aleja de la fuente emisora.
- ❖ El estudio de los principales sistemas de almacenamiento a gran escala con el fin de no desaprovechar nada de la energía generada, sea o no sea necesaria la electricidad en el mismo momento que se está produciendo, muestra que, se pueden almacenar grandes cantidades de energía (hasta 400 MW en aire comprimido y entre 1000 y 3000 MW en una central hidroeléctrica reversible) manteniéndose durante un largo periodo de tiempo aunque su densidad energética sea bastante baja. Sin embargo, con las baterías de ion-litio ocurre lo contrario, la capacidad de almacenamiento no es muy elevada (las más grandes son las instaladas en los coches eléctricos con unos 50 kWh) pero tienen una alta densidad energética.
- ❖ Finalmente, se muestra que con la reutilización de 5200 baterías de los coches eléctricos, se podría llegar a almacenar unos 100 MWh gracias a la creación de una “megabatería”. Esto es posible, dado que, a pesar de que estas baterías tengan que ser sustituidas por unas nuevas en los coches eléctricos, su vida útil sigue siendo relevante.



## **7.2. Trabajos futuros**

Finalmente se proponen alguno de los estudios que se podrían realizar en un futuro tomando como base este trabajo, y así, ampliar el conocimiento de los temas tratados.

- ❖ En este trabajo se han obtenido los MWh de energía que se puede extraer del viento en función de diferentes tamaños del rotor. Por tanto, se propone realizar un estudio para definir cuál es el tamaño ideal del rotor para poder generar la mayor cantidad de electricidad posible en esta zona.
- ❖ Otro estudio podría ser la determinación la distancia mínima que debe existir entre aerogeneradores para que no se hagan sombra entre ellos.
- ❖ Se propone la realización de un estudio sobre las de oscilaciones que provoca la energía eólica en el sistema durante los periodos de intermitencia del viento.
- ❖ Se plantea el estudio de las condiciones del terreno en el entorno del parque eólico con el fin de poder construir un reservorio para almacenar la energía eólica en aire comprimido.
- ❖ Finalmente, en vista de que en un corto periodo de tiempo, empezarán a fallar las baterías de los primeros coches eléctricos sacados al mercado, se plantea desarrollar el concepto de 'megabatería' para el almacenamiento de la energía eólica.





## **Bibliografía**

[Akhil, 2013] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, W. D. Gauntlett “DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA” SANDIA REPORT SAND2013-5131 Unlimited Release July 2013

[Al Zohbi, 2015] G. Al Zohbi, P. Hendrick, Ph. Bouillard “Evaluation of the impact of wind farms on birds: The case study of Lebanon” *Renewable Energy* 80 (2015) 682-689.

[Amirante, 2017] R. Amirante, E. Cassone, E. Distaso, P. Tamburrano “Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies” *Energy Conversion and Management* 132 (2017) 372–387.

[Caralisa, 2019] G. Caralisa, T. Christakopoulosb, S. Karellasb, Z. Gaoa “Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103 (2019) 122–139.

[Carrasco, 2015] M. Carrasco-Díaz, D. Rivas, M. Orozco-Contreras, O. Sánchez-Montante. “An assessment of wind power potential along the coast of Tamaulipas, northeastern Mexico” *Renewable Energy* 78 (2015) 295-305.

[Carrillo, 2014] C. Carrillo, J. Cidrás, E. Díaz-Dorado, A.F. Obando-Montaño. “An Approach to Determine the Weibull Parameters for Wind Energy Analysis: The Case of Galicia (Spain)” *Energies* 2014, 7, 2676-2700.

[Deshmukh, 2018] S. Deshmukh, S. Bhattacharya. A. Jain, A. Ranjan Paul. “Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review” 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, Sydney, Australia.

[García Latorre, 2019] F. J. García Latorre, J. J. Quintana, I. de la Nuez “Technical and economic evaluation of the integration of a wind-hydro system in El Hierro island” *Renewable Energy* 134 (2019) 186-193.

[Jiang, 2018] Y. Jiang, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, Y. Gao, N. Li “State of health estimation of second-life LiFePO<sub>4</sub> batteries for energystorage applications” *Journal of Cleaner Production* 205 (2018) 754-762.

[Khchine, 2019] Y. E. Khchine \*, M. Sriti, N. E. E. K. Elyamani “Evaluation of wind energy potential and trends in Morocco” *Heliyon* 5 (2019) e01830

[Maehr, 2015] A.M. Maehr, G.R. Watts, J. Hanratty, D. Talmi “Emotional response to images of wind turbines: A psychophysiological study of their visual impact on the landscape” Landscape and Urban Planning 142 (2015) 71–79.

[Masurowki, 2016] F. Masurowski, M. Drechsler, K. Frank “A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany” Energy Policy 97 (2016) 343–350.

[Mathew, 2006] S. Mathew” Wind Energy. Fundamentals, Resource Analysis and Economics” 2006

[Shoaib, 2019] Shoaib M., Siddiqui I., Rehman S., Khan S., Alhems LM. Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. Journal of Cleaner Production 216 (2019) 346-360.

[Shu, 2015] Z.R. Shu, Q.S. Li, P.W. Chan “Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong” Energy Conversion and Management 101 (2015) 644–657

[Yu, 2017] T. Yu, H. Behm, R. Bill, J Kang “Audio-visual perception of new wind parks” Landscape and Urban Planning 165 (2017) 1–10.

[Zagubien, 2019] A. Zagubien, K. Wolniewicz “The impact of supporting tower on wind turbine noise emission” Applied Acoustics 155 (2019) 260–270.

### **PAGINAS WEB:**

[AEMET, 2018] <https://datosclima.es/> , última visita 15.05.2019

[Areatecnologia, 2019] <https://www.areatecnologia.com/>, última visita 30.06.2019

[Carm, 2019] [www.carm.es/](http://www.carm.es/) última visita 03.07.2019

[Econolandia, 2019] <http://www.econolandia.es/> última visita 03.07.2019

[Ecovive, 2019] <https://ecovive.com/> , última visita 29.06.2019

[Europa, 2019] <https://ec.europa.eu/> última visita 04.07.2019

[Freenet, 2019] <https://www.freenet.de/>, última visita 01.07.2019

[Motor, 2019] <https://www.motor.es/>, última visita 01.07.2019

[Omicrono, 2019] <https://omicrono.elespanol.com/> , última visita 30.06.2019



- [Proyectofse, 2019] <http://www.proyectofse.mx/>, última visita 30.06.2019
- [REE, 2019] <https://www.ree.es/> , última visita 02.07.2019
- [Reve, 2019] <http://www.evwind.com/>, última visita 17.06.2019
- [Solo-eólica, 2019] <https://solo-eolica.blogspot.com/> , última visita 29.06.2019
- [Vanguardia, 2019] <https://www.lavanguardia.com/> , última visita 30.06.2019