



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

INFORME DEL TRABAJO DE EVALUACIÓN CONTINUA

ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO EN EL AEROPUERTO DE DUBLIN.



1º MII - FUENTES DE ENERGÍA.

Curso 2022-2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. ENERGÍA EÓLICA.	1
2.1. Análisis preliminar de los datos de viento.	1
2.1.1. Magnitudes y unidades de interés.	2
2.1.2. Frecuencia de muestreo.	2
2.1.3. Calidad anual/mensual.	2
2.2. Estudio estadístico del recurso eólico en el aeropuerto de Dublin.	3
2.2.1. Medias y varianzas	3
2.2.2. Rosa de los vientos.	7
2.2.3. Cálculo del perfil de velocidades.	8
2.3. Potencia y energía del aerogenerador en la ubicación.	8
2.3.1. Histograma de velocidades teniendo en cuenta la altura del buje del aerogenerador.	8
2.3.2. Ajuste de la distribución de Weibull y curva de densidad de Weibull a partir de los parámetros ajustados.	9
2.3.3. Potencia y energía del aerogenerador en la ubicación.	10
2.4. CONCLUSIONES.	10

1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo principal de este informe es exponer las conclusiones del análisis y tratamiento de unos datos eólicos obtenidos de **National Climatic Data Center de Estados Unidos**. Estos datos son accesibles mediante una herramienta informática (NNCD Climate Data Online) del NOAA Satellite and Information Service.

El lugar elegido para realizar el estudio ha sido el aeropuerto de Dublín. La elección de esta ubicación se debe a que la zona de la costa irlandesa se caracteriza por la existencia de numerosas instalaciones de aerogeneradores offshore, que justifica que es una zona en la que el viento es un recurso valioso debido a sus altas rachas de viento.

La localización en el mapa se muestra en la imagen inferior y sus coordenadas son las siguiente:

1. **Latitud:** 53.420°.
2. **Longitud:** -6.269°.

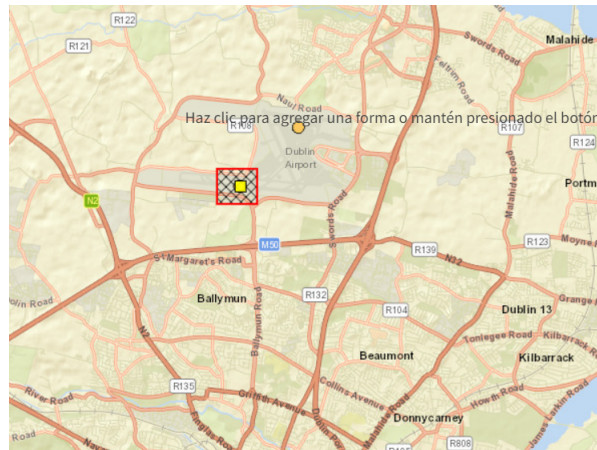


Figura 1.1: Localización del aeropuerto de Dublín.

Los datos utilizados abarcan desde el 01/01/2016 hasta el 31/12/2021, es decir, se han implementado seis años completos.

2. ENERGÍA EÓLICA.

La energía eólica es una fuente de energía renovable que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire a través del movimiento de las palas de un aerogenerador que a su vez pone en funcionamiento una turbina que la convierte en energía eléctrica. La energía eólica proporciona una parte importante de la electricidad en un número creciente de países.

2.1. Análisis preliminar de los datos de viento.

Una vez recibidos los datos del National Climatic Data Center de Estados Unidos, es necesario procesarlo ya que estos suministran un número elevado de variables.

En este caso se ha decidido utilizar Excel para el desarrollo del trabajo. Para el proyecto se han reducido el número de variables a tres, siendo estas: Date, Report type y WND. Estas columnas a su vez han sido modificadas, desglosando la fecha en día, mes y año y de la columna de WND se han obtenido cinco métricas que son: el ángulo, la calidad del ángulo, el tipo, la velocidad y la calidad de la velocidad.

A continuación, se explican los códigos relacionadas con el viento:

- Calidad del ángulo: proporciona un valor comprendido entre 0 y 9, siendo el 9 indicador de medida errónea. Si la calidad del ángulo es 999 significa que dicho dato se ha perdido o recogido mal en la estación.
- Tipo: es el código que indica el tipo de viento recogido. Se indica si este está en calma (C), si es normal (N), si es variable (V)...
- Calidad de la velocidad: proporciona un valor comprendido entre 0 y 9. Si el código de tipo de viento es "V", entonces 999 indica una dirección de viento variable. Si en el tipo aparece un valor de 9, y una velocidad de 0 m/s, un 9 significa que el viento está en calma.

2.1.1. Magnitudes y unidades de interés.

Una vez se dispone de las variables de interés, las principales magnitudes para caracterizar al viento son:

1. **Ángulo de la dirección del viento:** se mide en grados y se mide en el sentido de las agujas del reloj desde el Norte hasta la dirección con la que sopla el viento.
2. **Velocidad del viento:** se mide en m/s y es importante ya que para poder calcular la potencia generada por un aerogenerador se debe considerar la curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad, y la distribución estadística de velocidades en el emplazamiento.

Aunque las magnitudes de las variables se acaban de indicar, cabe destacar que los datos referidos a la velocidad del viento se proporcionan en $(m/s * 10)$. Por ello se ha dividido la columna de *velocidad* entre 10.

2.1.2. Frecuencia de muestreo.

Como frecuencia de muestreo se ha decidido tomar una muestra horaria ya que se considera que la base de datos debe ser lo suficientemente extensa como para poder realizar un estudio de calidad. Se disponen de todos los datos de viento por horas desde el 1 de enero de 2016 hasta el 31 de diciembre de 2021.

2.1.3. Calidad anual/mensual.

Cuando se disponen de bases de datos con numerosas observaciones cabe la posibilidad de que todos los datos no sean de calidad. En este caso se van a analizar dos aspectos: la fuente de la que provienen y los datos referidos al viento.

En primer lugar, se restringen los datos a los que pertenecen a la fuente M-12 ya que si se mantienen todas las disponibles existirían observaciones duplicadas.

En segundo lugar, es importante el considerar el valor del ángulo medido ya que cuando este tenga un valor de 999 se considerara que la observación no es válida.

En las tablas inferiores se muestra la diferencia entre el número total de observaciones y las que son válidas. Se puede apreciar que las observaciones erróneas son escasas con un total de 68 en 2016, 39 en 2017, 13 en 2018, 21 en 2019, 17 en 2020 y 20 en 2021. Por tanto, los datos erróneos son menores al 1 % y se concluye que la base de datos es de calidad.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2016	736	675	723	710	737	719	744	743	718	737	715	743	8700
2017	742	672	744	720	742	716	743	739	718	744	720	744	8744
2018	744	671	744	719	744	718	744	744	679	737	720	744	8708
2019	744	672	739	720	744	720	744	744	717	742	714	744	8744
2020	735	694	741	717	743	718	741	741	720	743	715	744	8752
2021	744	571	742	715	742	720	744	741	719	744	717	743	8642
Total	4445	3955	4433	4301	4452	4311	4460	4452	4271	4447	4301	4462	52290

Tabla 2.1: Número total de observaciones.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2016	735	675	723	709	730	678	740	742	718	730	714	738	8632
2017	730	672	742	706	741	711	742	739	715	743	720	744	8705
2018	744	671	744	718	742	716	743	742	678	736	720	741	8695
2019	744	672	739	719	739	719	738	743	713	741	713	743	8723
2020	735	692	737	716	742	715	739	740	720	743	712	744	8735
2021	744	570	742	713	741	719	739	737	717	743	716	741	8622
Total	4432	3952	4427	4281	4435	4258	4441	4443	4261	4436	4295	4451	52112

Tabla 2.2: Número total de observaciones válidas.

2.2. Estudio estadístico del recurso eólico en el aeropuerto de Dublin.

A continuación, se va a proceder a analizar estadísticamente los datos disponibles.

2.2.1. Medias y varianzas

Con el fin de comprender mejor los datos disponibles se va a analizar la media y la varianza de las variables disponibles tanto anualmente como de forma mensual. Para ello se utilizarán exclusivamente los datos depurados.

El número de decimales se ha limitado a uno ya que los datos disponibles se dan con esta precisión y el ofrecer más cifras significativas realmente no tiene sentido.

En la Tabla 2.3. muestra los resultados de la velocidad del viento.

Año	Media (m/s)	Varianza(m ² /s ²)	Desviacion típica (m/s)
2016	5.5	7.3	2.7
2017	5.8	6.8	2.6
2018	5.2	7.3	2.7
2019	4.8	5.3	2.3
2020	5.1	5.4	2.3
2021	4.5	4.9	2.2

Tabla 2.3: Medias y varianzas anuales de la velocidad.

Se muestra que la media del viento no es estable a lo largo de los años, aunque estas difieren en valores menores a la unidad. Esto se observa fácilmente en el histograma donde además se aprecia que aunque la media prácticamente se mantiene, la varianza ha disminuido en los últimos años. Una varianza alta respecto a la media indica que la aproximación no es muy buena por lo que existe dispersión entre los datos. En el caso estudiado se comprueba que la desviación típica es siempre inferior a la media y por tanto se podría concluir que el resultado es aceptable.

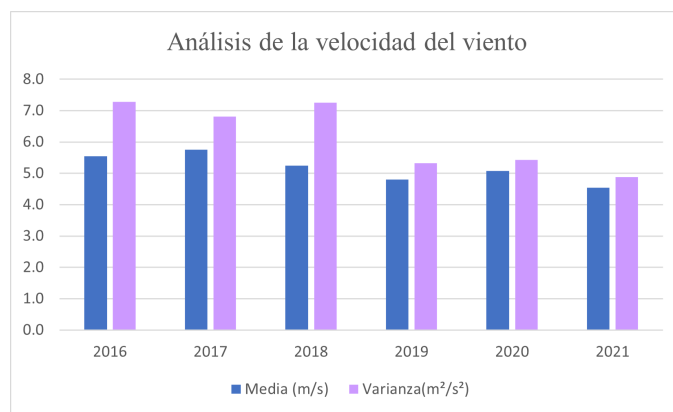


Figura 2.1: Histograma sobre las medias y varianzas anuales de la velocidad.

Una vez estudiado el viento anual se procede a analizar el viento de forma mensual ya que esto nos permitirá sacar conclusiones.

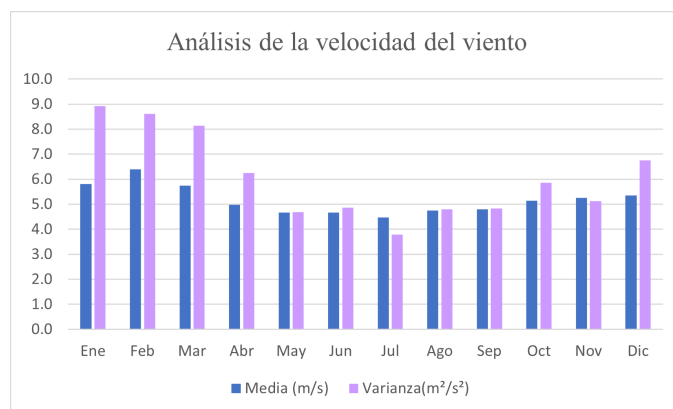


Figura 2.2: Histograma sobre las medias y varianzas mensuales de la velocidad.

Si se comparan los diferentes meses del año se puede ver que los meses en los que hay más viento en esta localización son los meses invernales, es decir, diciembre, enero, febrero y marzo. Esto se

debe principalmente a la inestabilidad meteorológica que existe durante este periodo del año. Es además en estos meses cuando la varianza es mayor por lo que se puede concluir que habrá días con rachas de vientos muy fuertes mientras que otros el viento estará prácticamente en calma, lo que justificaría dicha inestabilidad.

Una vez definidos los meses más relevantes, se realiza un pequeño análisis del mes de febrero. Se observa que durante el mes en el que la media del viento es mayor y a su vez mas inestable, esta inestabilidad depende del año y al disminuir esta media, disminuye también significativamente su variabilidad.

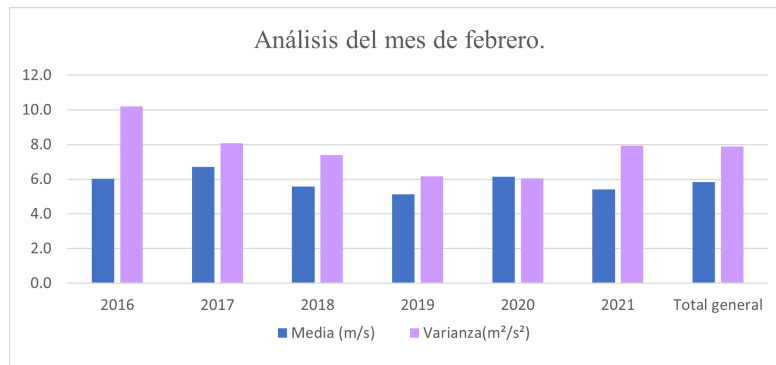


Figura 2.3: Histograma sobre las medias y varianzas del mes de febrero.

Finalmente se realiza un análisis anual en función del horario. Se distingue como periodo diurno el comprendido entre las 10 y las 18 horas mientras que el horario nocturno comprenderá desde las 22 hasta las 6.

Hora	Media (m/s)	Varianza(m²/s²)	Desviacion tipica (m/s)
10	5.6	6.4	2.5
11	5.8	6.5	2.6
12	6.0	6.5	2.5
13	6.1	6.5	2.5
14	6.0	6.1	2.5
15	5.9	6.0	2.5
16	5.7	5.8	2.4
17	5.5	5.6	2.4
18	5.2	5.5	2.3

Tabla 2.4: Media y varianza del horario diurno.

Horas	Media (m/s)	Varianza(m²/s²)	Desviacion tipica (m/s)
0	4.7	6.4	2.5
1	4.7	6.1	2.5
2	4.7	6.3	2.5
3	4.6	6.3	2.5
4	4.7	6.3	2.5
5	4.7	6.0	2.4
6	4.8	5.9	2.4
22	4.6	6.1	2.5
23	4.6	6.3	2.5

Tabla 2.5: Media y varianza del horario nocturno.

A continuación, se muestran los histogramas correspondientes a cada año abarcando desde 2016

hasta 2021. En ellos se observa que la distribución es muy similar, pero cabe destacar que durante 2017 existen días con rachas de viento que no se registran durante el resto de años.

Estos histogramas deben presentar una forma parecida a la distribución de Weibull en la que se dan frecuencias elevadas para velocidades de viento bajas y frecuencias casi nulas para velocidades altas. En este caso cumplen con esta condición y se va a elegir como año optimo más reciente el 2019 ya que es la que tiene la distribución más desplazada hacia la izquierda.

Además, se puede apreciar que a lo largo de los años una velocidad de 4 m/s es la que se da con más frecuencia, seguidas de sus valores vecinos.

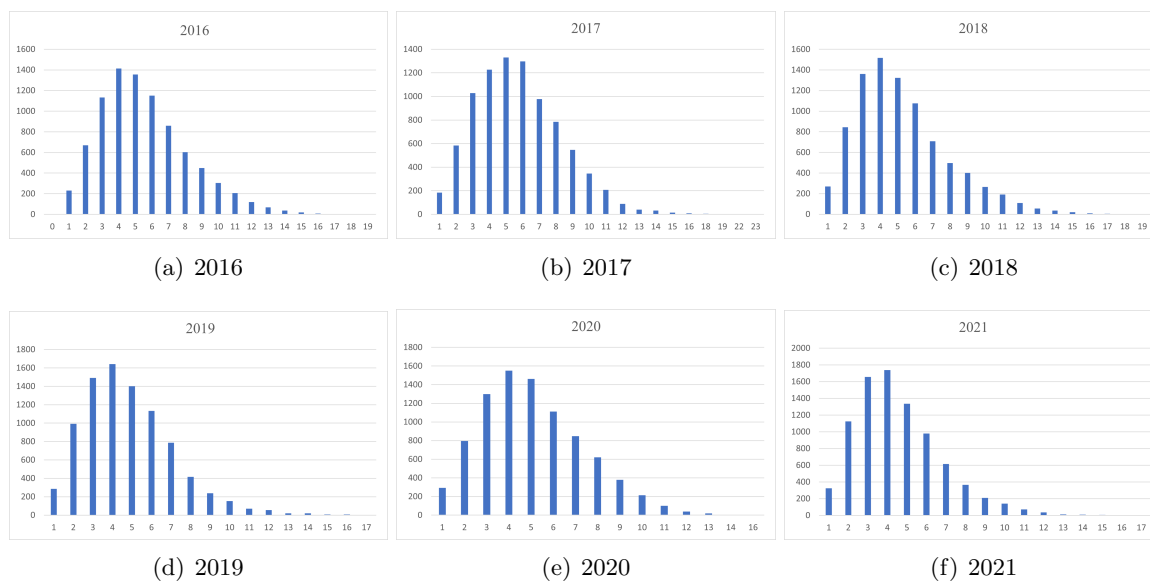


Figura 2.4: Histogramas anuales de velocidad.

Unificando todas las graficas en una se tiene:

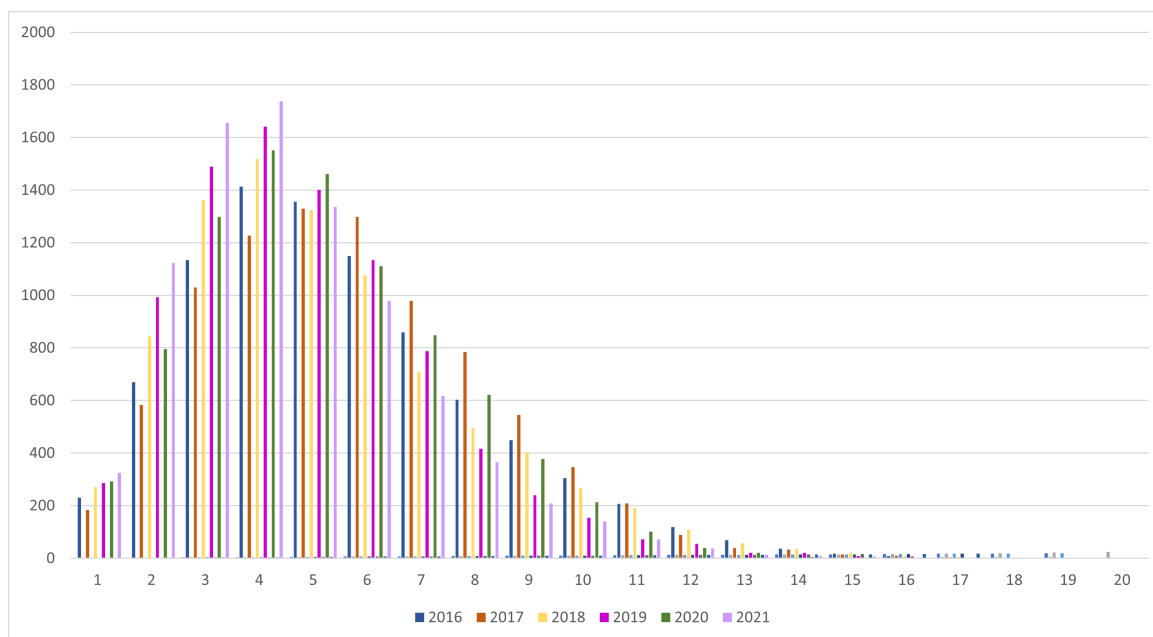


Figura 2.5: Histogramas anuales de velocidad.

2.2.2. Rosa de los vientos.

Hasta ahora se ha realizado un estudio cuantitativo sobre la velocidad del viento en el aeropuerto de Dublín, pero no es solo importante esta velocidad sino la dirección del viento para poder tener una mejor información para caracterizarlo, lo que da lugar a un estudio de mejor calidad para el posicionamiento de aerogeneradores.

Por tanto, se ha considerado de especial interés conocer de donde viene el viento y con qué frecuencia sopla en esa orientación. Esto se va a representar gráficamente mediante la rosa de los vientos.

Para su construcción se necesita segmentar la figura, en este caso en rango de ángulos y para conseguir una mejor precisión se ha decidido hacerlo en tramos de $\frac{1}{16}$ de circunferencia. A cada tramo se le asignará una dirección.

A continuación, se muestra la rosa de los vientos para el año 2019. Se han determinado tres rangos de velocidades, ya que la mayoría se concentran en valores menores a 10 m/s .

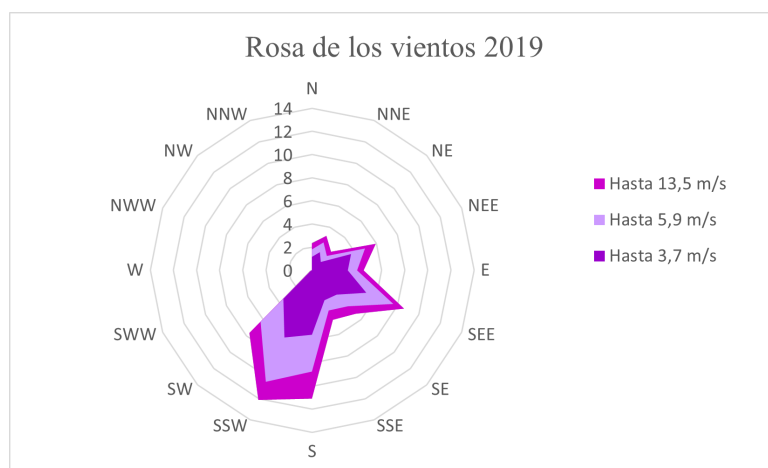


Figura 2.6: Rosa de los vientos del 2019.

Si se analiza la rosa de los vientos se puede observar que en Dublín existe una clara tendencia hacia una orientación SSW, es decir, un viento entre sur y oeste, pero mucho más cercano a sur. Esta orientación comprende los grados entre 191.25 y 213.75.

Además también se pueden ver picos notables, aunque de menor influencia de vientos de orientación SEE, que comprende los grados entre 101.25 y 123.75, situados entre el este y el sur, pero en este caso más cercano al este.

Esto da una idea de que la dirección predominante del viento varía durante el año. Además esto se corrobora con el estudio hecho sobre el clima de Dublín, en el que se indica que el viento predominante sopla del suroeste y se caracteriza porque rompe en las montañas altas de la costa oeste provocando que las precipitaciones sean más frecuentes en la costa contraria a la ubicación elegida.

2.2.3. Cálculo del perfil de velocidades.

Para calcular el perfil de velocidades se utiliza la ecuación dada donde z_0 es igual a 0.0024 metros, ya que se está considerando una pista de aeropuerto, clasificado como clase 0.5. En cuanto a la altura de referencia se van a considerar 10 metros y se va a estudiar la evolución hasta alcanzar los 200 metros. La velocidad promedio del año elegido es igual a 7.2 m/s .

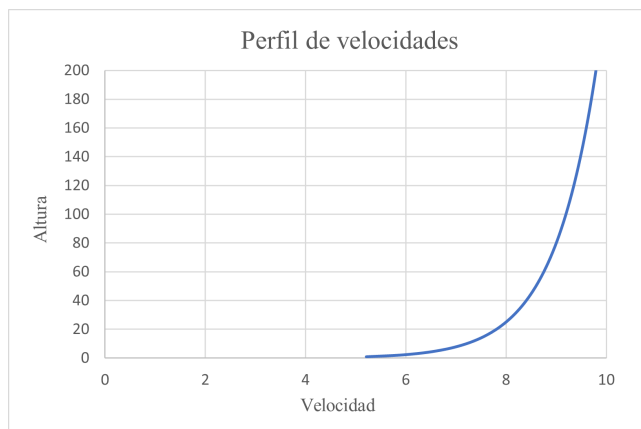


Figura 2.7: Perfil de velocidades para el año 2019.

2.3. Potencia y energía del aerogenerador en la ubicación.

Se va a proceder a analizar la potencia y energía del aerogenerador en el aeropuerto de Dublín.

2.3.1. Histograma de velocidades teniendo en cuenta la altura del buje del aerogenerador.

En este caso se va a tomar como altura del buje 90 metros y se va a mostrar el histograma de las velocidades anuales para dicha altura.

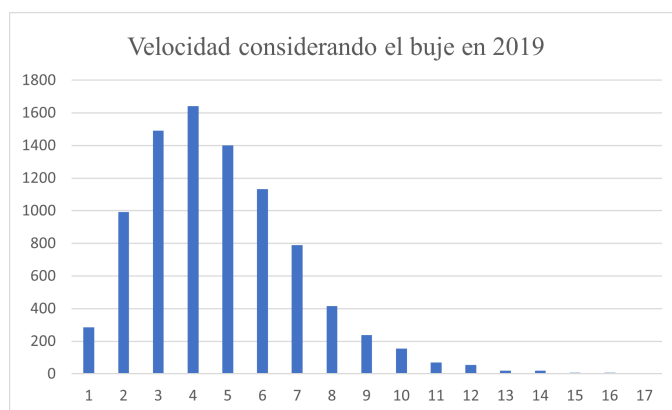


Figura 2.8: Histograma de velocidades teniendo en cuenta la altura del buje.

Si se compara el histograma con el obtenido anteriormente se puede observar que este mantiene la misma forma, aunque si se pone énfasis en las frecuencias se puede comprobar que esta curva está ligeramente desplazada ya que al estar considerando la altura del buje y el perfil de velocidades, se puede concluir que estas velocidades son mayores que las registradas a pie.

La función de probabilidad acumulada es:

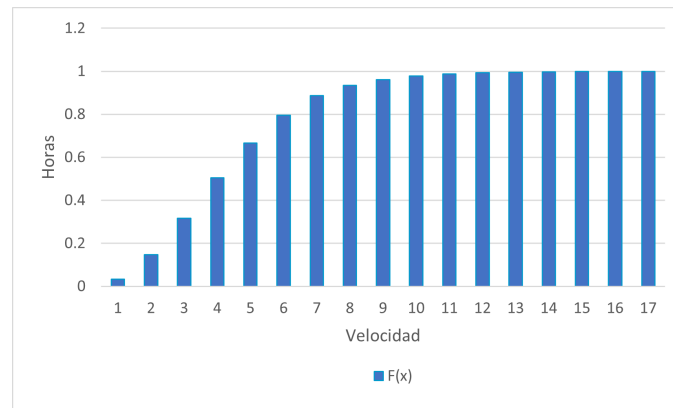


Figura 2.9: Histograma de velocidades teniendo en cuenta la altura del buje.

2.3.2. Ajuste de la distribución de Weibull y curva de densidad de Weibull a partir de los parámetros ajustados.

Se va a emplear la distribución de Weibull con el fin de caracterizar la frecuencia de la distribución. Para ello se necesita la función de densidad de probabilidad de Weibull. Esta depende de los parámetros, k y c , los cuales pueden estimarse mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

Siguiendo los pasos dados en el documento, se utiliza una hoja de Excel para obtener los parámetros necesarios y la distribución que se muestra. El valor de k es igual a 1.435 mientras que el de la c es de 5.668.

En las gráficas que se muestran a continuación se representa la función de densidad de probabilidad de Weibull con todos los valores de p y q . Además, se ha incluido la función de Weibull ajustada, en la que se han omitido los valores cuando la frecuencia acumulada ha alcanzado un valor igual a 1. El objetivo de dicha restricción es poder interpretar la bondad de ajuste.

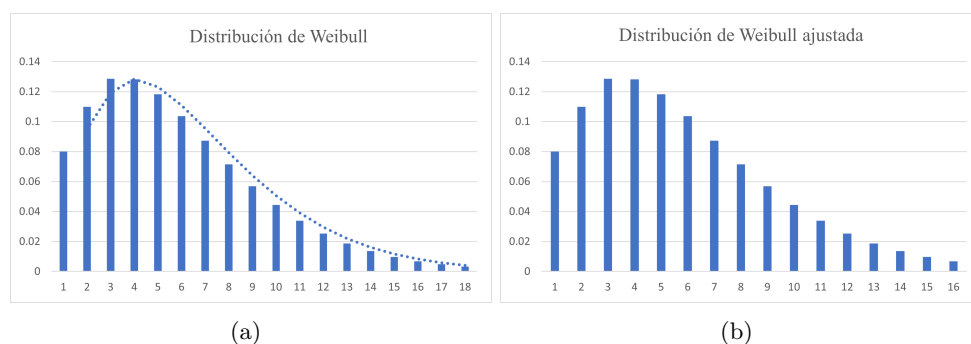


Figura 2.10: Distribución de Weibull en 2019.

Observando las gráficas superiores es posible extraer conclusiones acerca de la bondad de ajuste de la distribución de Weibull. Se aprecia una gran diferencia entre la distribución estándar y la ajustada, con mejores resultados en la ajustada, es decir, cuando se calculan solo los p y q para los que la frecuencia acumulada es menor que 1. Cuando el valor de dicha frecuencia es igual a 1 se obtienen valores no válidos que provoca que al ajustar por mínimos cuadrados la línea de tendencia se desplace.

2.3.3. Potencia y energía del aerogenerador en la ubicación.

Se proporciona la curva de potencia de un aerogenerador genérico de 2 MW de potencia nominal para realizar los cálculos de la densidad de potencia utilizando los datos de viento procesados. El aerogenerador tiene un diámetro del rotor de 87 m y una altura del buje de 90 m.

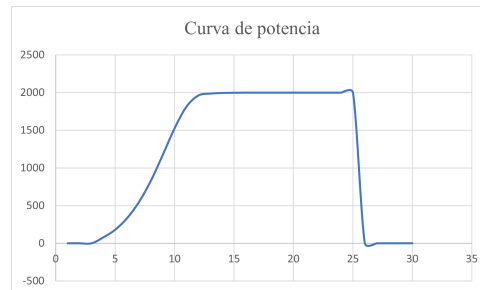


Figura 2.11: Curva de potencia.

El factor de carga se define como la producción anual de energía dividida por la producción teórica máxima, si el aerogenerador estuviese funcionando a su potencia nominal, que en este caso es de 2 MW durante las 8766 horas del año. Los factores de carga pueden variar en teoría del 0 al 100, aunque en la práctica el rango de variación va del 20 al 70 por ciento, y sobretodo alrededor del 20 al 30 por ciento.

Utilizando la curva de potencia y la distribución de Weibull se obtiene que la energía anual media producida es de 573.488 kWh al año mientras que el factor de carga es del 29.5 %. Si se compara este valor con el factor de carga medio español (25 % aproximadamente) se puede comprobar que sería mas interesante situar el aerogenerador en la ubicación elegida para aumentar el rendimiento.

2.4. CONCLUSIONES.

En primer lugar, al analizar los datos de forma anual no existe una variabilidad significativa ni de la velocidad del viento puesto que la media y la varianza solo varia en cuestión de décimas, estando el valor medio en torno a 5 m/s.

En segundo lugar, al estudiar los datos por meses se ha comprobado la variación de los datos de viento en función de la estación, siendo las rachas de viento mas intensas durante los meses de invierno, sobretodo durante enero y febrero.

En tercer lugar, cuando se han dividido los datos en diurno y nocturno se ha apreciado que las rachas de viento son mayores durante el día que durante la noche. Esto se debe principalmente a que durante las horas diurnas, el sol provoca que el aire se mueva de forma mas intensa sobre la superficie terrestre ya que las diferencias de presión y temperaturas son mayores. Así los gases se mueven desde las zonas de altas presiones a las de bajas presiones.

Finalmente, cabe destacar la importancia del procesado de datos tanto al principio del análisis, como en la elección del rango adecuado para la distribución de Weibull, ya que los resultados varían mucho en función de esto y una mala elección deriva en el estudio lejos de la realidad y por tanto errónea.