



FUENTES DE ENERGÍA 2022/23

ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO EN LA ESTACIÓN DE CHICAGO

INFORME TÉCNICO



VERSIÓN 3

Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANÁLISIS PRELIMINARES DE LOS DATOS DEL VIENTO.	3
MAGNITUDES DE INTERÉS, UNIDADES Y FRECUENCIA DE MUESTREO.	3
CALIDAD DE LOS DATOS.....	3
DISCUSIÓN SOBRE LA CALIDAD DE LOS DATOS.	3
ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANUAL.....	4
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DIURNO/NOCTURNO.....	7
HISTOGRAMAS ANUALES.....	7
PERFIL DE VELOCIDADES.....	9
4.CÁLCULOS DE POTENCIA Y ENERGÍA.	10
HISTOGRAMA Y FRECUENCIA ACUMULADA PARA LA ALTURA DEL BUJE.....	10
AJUSTE DE WEIBULL.....	10
POTENCIA Y ENERGÍA DEL AEROGENERADOR.....	11
5. CONCLUSIONES.....	12

1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Completar un estudio del recurso eólico en la ciudad de Chicago.
- Sacar buena nota en este trabajo.
- Aprender nuevos conocimientos sobre la aplicación Excel.

La metodología que se ha utilizado ha comenzado con una lectura de los documentos y una visualización de los diversos vídeos que se han dejado en el Moodle de la Asignatura. A continuación se han tratado los datos gracias a Excel. Con todos los gráficos y diagramas realizados se ha procedido a redactar el informe. Tras una última lectura correctiva se ha subido el estudio en el Moodle de la asignatura.

2. ANÁLISIS PRELIMINARES DE LOS DATOS DEL VIENTO.

MAGNITUDES DE INTERÉS, UNIDADES Y FRECUENCIA DE MUESTREO.

Los datos proceden de la aplicación *National Neural Circuitry Database* (NNCD) *Climate Data On-line* del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) *Satellite and Information Service*. Los datos pertenecen a la estación de Chicago de los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Los datos son horarios, es decir, teóricamente se tendrían 24 datos cada día, lo que equivaldría a 8760 datos (8784 si es un año bisiesto, como el 2020).

Las magnitudes son:

- **Ángulo de viento:** se mide en el sentido de las agujas del reloj, entre el norte y la dirección del viento. Se mide en grados y su valor está comprendido entre 001 y 360.
- **Calidad de ángulo de viento:** número entre el 0 y 9. Solo se han considerado los datos con un valor 1, ya que indica que se han superado todos los controles de calidad.
- **Velocidad de viento:** mide la velocidad de desplazamiento horizontal del aire que pasa por un punto fijo. Se mide en dm/s y su valor está comprendido entre 0000 y 0900.
- **Calidad de velocidad de viento:** número entre el 0 y 9. Solo se han considerado los datos con un valor 1, ya que indica que se han superado todos los controles de calidad.

CALIDAD DE LOS DATOS.

En la Tabla 1 se encuentran los datos con los que se va a analizar la calidad de los datos. En ella se encuentran el número total de datos y los datos verificados de ángulo, de viento y de ángulo y viento junto con su porcentaje respecto al total. El número total de datos se compara con el número posible de datos que se podrían tomar en un año (8760 o 8784). Los otros datos se comparan con el número total de datos tomados ese año.

Año	N.º Total de datos	Datos de ángulo verificados	Datos de velocidad de viento verificados	Datos con ° y vel viento verificado
2018	8679 (99,1%)	8448 (97,3%)	8679 (100%)	8448 (97,3%)
2019	8208 (93,7%)	7974 (97,2%)	8208 (100%)	7974 (97,2%)
2020	8194 (93,3%)	7974 (97,3%)	8194 (100%)	7974 (97,3%)
2021	7221 (82,4%)	7015 (97,2%)	7221 (100%)	7015 (97,2%)

Tabla 1. Calidad de los datos de la estación de Chicago.

DISCUSIÓN SOBRE LA CALIDAD DE LOS DATOS.

Observando los porcentajes, se concluye que la cantidad de datos tomados disminuye a medida que pasan los años, siendo muy marcado en el último año 2021, con más de 1000 datos no tomados. Además, se tienen datos del ángulo no verificados (es decir, no con un 1 en calidad del ángulo) pero todos los datos de la velocidad del viento se encuentran verificados.

Se decide tomar el año 2020 para realizar el estudio ya que presenta muchos más datos que el año 2021. No se toman años anteriores pese a que tengan más cantidad de datos verificados porque se pretende tomar el año más cercano posible al 2022 pero que a la vez tenga una buena cantidad de datos con calidad.

3. ESTUDIO ESTADÍSTICO DEL RECURSO EÓLICO EN LA UBICACIÓN.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANUAL.

En la Tabla 2 se encuentran los estadísticos anuales del ángulo y la velocidad en los años 2018, 2019, 2020 y 2021.

Año	Promedio (° ó m/s)		Varianza (°² ó (m/s)²)	
	Ángulo (°)	Velocidad (m/s)	Ángulo (°²)	Velocidad ((m/s)²)
2018	190,95	3,94	12150,87	4,53
2019	216,29	3,78	28397,06	4,46
2020	194,94	3,80	10800,64	4,02
2021	191,62	3,70	10092,40	4,06

Tabla 2. Estadísticos anuales de la estación de Chicago.

Se observa en la Figura 1 la representación de dichos valores. Los valores del ángulo suelen ser parecidos, excepto en 2019 que aumentó en más de 25 grados. La velocidad también presenta valores parecidos en los últimos cuatro años. Comparando las varianzas del ángulo y la velocidad se observan valores muy altos por lo que se concluye que la dirección y la velocidad del viento varía mucho durante el año.

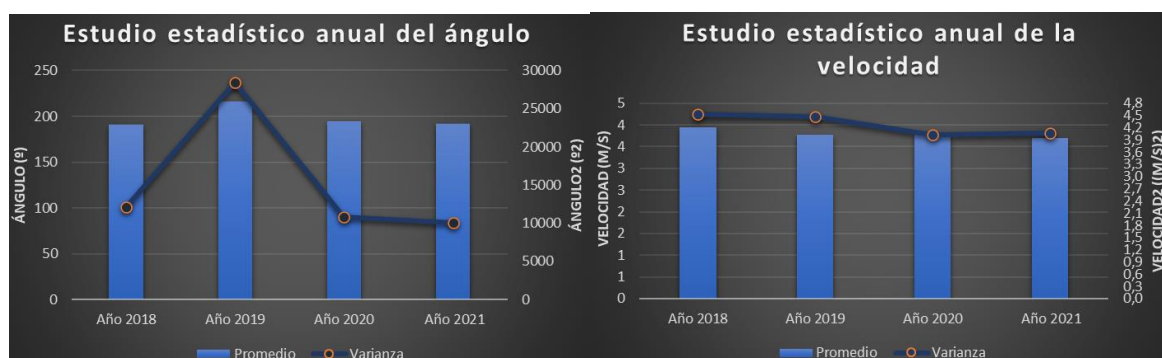


Figura 1. Estudio estadístico anual del ángulo y de la velocidad en la estación de Chicago.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ESTACIONAL.

En la Tabla 3 se encuentra la media y la varianza para todos los meses de todos los años de estudio del ángulo del viento.

Mes	Estadístico	2018	2019	2020	2021
Enero	Media (°)	245,4	221,3	226,0	201,3
	Varianza (°²)	3415,4	7480,1	7482,0	10082,8
Febrero	Media (°)	230,5	217,6	202,9	231,6
	Varianza (°²)	5409,8	17844,4	10280,5	8234,2
Marzo	Media (°)	197,2	218,7	210,4	191,9
	Varianza (°²)	11284,5	30010,9	9363,6	10746,0
Abril	Media (°)	173,0	199,2	181,2	164,6

	Varianza ($^{\circ 2}$)	15061,4	34002,1	13919,4	12347,6
Mayo	Media ($^{\circ}$)	188,1	206,3	203,0	191,7
	Varianza ($^{\circ 2}$)	16413,6	43115,9	14644,0	9819,5
Junio	Media ($^{\circ}$)	198,9	230,0	157,6	171,7
	Varianza ($^{\circ 2}$)	18392,0	48022,4	13086,0	13180,4
Julio	Media ($^{\circ}$)	157,6	243,9	169,6	164,1
	Varianza ($^{\circ 2}$)	11773,9	47468,2	11797,2	8064,5
Agosto	Media ($^{\circ}$)	182,1	196,5	178,9	176,2
	Varianza ($^{\circ 2}$)	13031,0	24177,2	9436,7	10205,8
Septiembre	Media ($^{\circ}$)	166,3	189,7	177,7	190,1
	Varianza ($^{\circ 2}$)	10559,8	23666,1	11419,7	10607,2
Octubre	Media ($^{\circ}$)	144,1	226,6	201,0	225,2
	Varianza ($^{\circ 2}$)	10237,0	25150,7	8148,7	4625,3
Noviembre	Media ($^{\circ}$)	196,1	224,8	214,0	196,6
	Varianza ($^{\circ 2}$)	9073,0	17162,2	6618,8	7931,6
Diciembre	Media ($^{\circ}$)	213,7	232,8	214,6	220,4
	Varianza ($^{\circ 2}$)	8796,1	17184,9	8509,6	8642,2

Tabla 3. Estadísticos estacionales para el ángulo del viento en la estación de Chicago.

En general, la media mensual del ángulo se encuentra entre 250 y 150 grados. Además, los valores son ligeramente más altos en meses de invierno que de verano. La varianza en cambio aumenta en los meses cálidos. Estas conclusiones no se pueden aplicar al año 2019, que comparado con el resto de años es un año atípico, con valores más altos en verano y una varianza que dobla en valor al resto de años. La representación gráfica de los datos está en la Figura 2.



Figura 2. Estudio estadístico estacional del ángulo en la estación de Chicago.

En la Tabla 4 se encuentra la media y la varianza para todos los meses de todos los años de estudio de la velocidad del viento.

Mes	Estadístico	2018	2019	2020	2021
Enero	Media (m/s)	5,3	4,5	5,1	3,4
	Varianza ((m/s) ²)	5,6	4,3	5,9	2,5
Febrero	Media (m/s)	4,6	4,2	4,0	4,4
	Varianza ((m/s) ²)	4,4	4,6	4,5	4,7
Marzo	Media (m/s)	4,5	4,2	4,5	3,8
	Varianza ((m/s) ²)	3,4	4,6	4,2	4,9
Abril	Media (m/s)	4,6	4,5	3,7	3,5
	Varianza ((m/s) ²)	5,3	8,5	4,0	3,6
Mayo	Media (m/s)	4,6	3,7	4,2	3,5
	Varianza ((m/s) ²)	6,2	4,2	4,0	3,1
Junio	Media (m/s)	3,3	3,1	3,1	3,4
	Varianza ((m/s) ²)	3,9	3,4	3,3	2,6
Julio	Media (m/s)	3,4	3,1	2,3	3,1
	Varianza ((m/s) ²)	3,1	3,9	1,8	2,3
Agosto	Media (m/s)	3,2	3,2	3,6	3,7
	Varianza ((m/s) ²)	2,3	2,6	2,5	3,2
Septiembre	Media (m/s)	3,4	3,5	3,6	4,3
	Varianza ((m/s) ²)	3,0	3,4	2,7	6,0
Octubre	Media (m/s)	4,1	3,8	3,9	4,0
	Varianza ((m/s) ²)	5,3	3,7	3,1	3,2
Noviembre	Media (m/s)	4,0	4,0	4,7	4,3
	Varianza ((m/s) ²)	3,0	4,3	4,7	5,5
Diciembre	Media (m/s)	4,4	3,9	4,0	4,1
	Varianza ((m/s) ²)	4,9	4,0	3,6	3,4

Tabla 4. Estadísticos estacionales para la velocidad del viento en estación de Chicago.

En general, la media mensual de la velocidad se encuentra entre 3 y 4,5 grados. Además, los valores son ligeramente más altos en meses de invierno que de verano. La varianza en este caso es muy dispar y varía según el año y el mes, sin poder sacar una tendencia clara. Solo se observa un gran pico en el mes de abril de 2019. La representación gráfica de los datos está en la Figura 3.

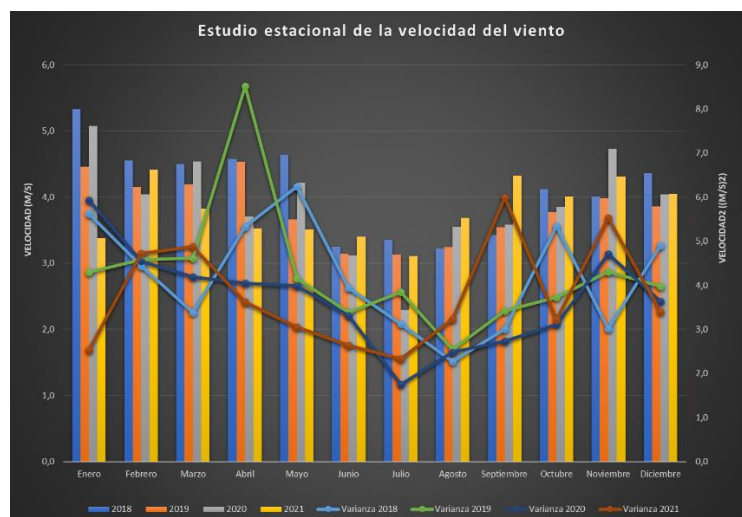


Figura 3. Estudio estadístico estacional de la velocidad en la estación de Chicago.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DIURNO/NOCTURNO.

Se divide el día para el análisis estadístico diurno/nocturno en dos partes, el día (de las 10 a las 18) y la noche (de 19 a las 9).

En la Tabla 5 se encuentra la media y la varianza para el día y la noche para el ángulo del viento. En general la media nocturna suele ser mayor que la media diurna. En cambio, la varianza es menor durante la noche que durante el día.

Día/Noche	Magnitud	2018	2019	2020	2021
Diario	Media ($^\circ$)	182,2	220,7	190,9	192,1
	Varianza ($^\circ^2$)	12894,6	31962,6	10911,9	10445,8
Nocturno	Media ($^\circ$)	193,2	213,3	196,4	191,3
	Varianza ($^\circ^2$)	11660,0	26234,1	10724,3	9879,2

Tabla 5. Estadísticos diurnos/nocturnos para el ángulo del en la estación de Chicago.

En la Tabla 6 se encuentra la media y la varianza para el día y la noche para la velocidad del viento. En general la media nocturna suele coincidir con la media diurna. Con la varianza sucede algo parecido, suele tener valores muy similares tanto el día como la noche. De un año a otro se ve como 2018 tuvo mayor velocidad que el resto de años.

Día/Noche	Magnitud	2018	2019	2020	2021
Diario	Media (m/s)	4,2	3,8	3,9	3,8
	Varianza ((m/s) 2)	4,7	4,4	4,0	3,9
Nocturno	Media (m/s)	4,0	3,8	3,9	3,8
	Varianza ((m/s) 2)	4,4	4,5	4,1	4,1

Tabla 6. Estadísticos diurnos/nocturnos para la velocidad del viento en la estación de Chicago.

HISTOGRAMAS ANUALES.

La Figura 4 contiene los histogramas anuales de la velocidad entre los años 2018 y 2022. Los intervalos son de 0,5 m/s.

Tal como se ha justificado en los puntos **CALIDAD DE LOS DATOS** y **JUSTIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS DATOS** se tiene una gran cantidad de datos (un poco menos en el año 2021 pero aún así más del 80% de los datos posibles). El pico del histograma se suele mantener en [3;3,5).

Además, todos los histogramas tienen una forma parecida, por lo que en todos los años se ha tenido una distribución parecida de los datos de velocidad de viento.

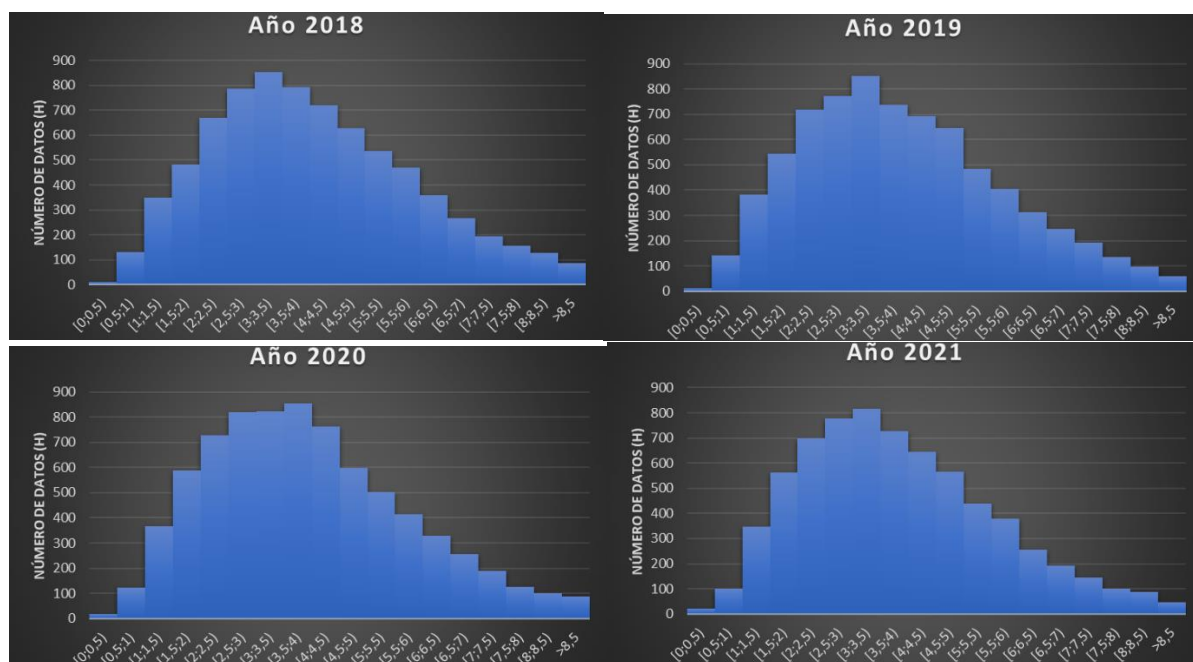


Figura 4. Histogramas anuales en la estación de Chicago.

ROSA DE LOS VIENTOS.

La rosa de los vientos del año de estudio (2020) se compone de 16 sectores de 22, 5° respectivamente. En la representación de la rosa de los vientos (Figura 5) se valoran 3 velocidades: entre 0 y 4 m/s (vel 1), entre 4 y 8 m/s (vel 2) y más de 8 m/s (vel 3).

En la rosa de los vientos se observa que la mayoría de los vientos se concentran en el eje norte sur, teniendo el viento una clara dirección predominante.

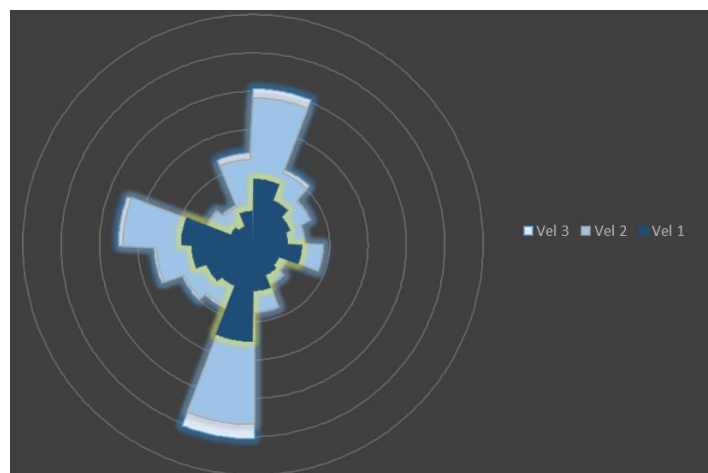


Figura 5. Rosa de los vientos para el año 2020 de la estación de Chicago.

PERFIL DE VELOCIDADES.

Si se quiere calcular un perfil de velocidades se debe elegir el parámetro z_0 (longitud de la rugosidad). La estación se encuentra en la ciudad de Chicago, una gran ciudad con edificios altos y rascacielos, por lo que se considera $z_0=1,6$.

También se debe elegir la velocidad de referencia. En este caso se toma la velocidad media del año 2020, 3,9 m/s. Se toman las alturas de 10 en 10 metros. El perfil de velocidades se encuentra en la Tabla 7.

Comparando la velocidad de la estación, que está a 10 metros (3,9 m/s) y la que alcanzaría en el buje, que son aproximadamente 90 metros (8,57 m/s) se ve que aumenta más del doble, lo que explica por qué las alturas de los bujes son mayores que de la estación de medición

Altura (m)	Velocidad (m/s)
10	3,9
20	5,4
30	6,2
40	6,9
50	7,3
60	7,7
70	8,0
80	8,3
90	8,6
100	8,8
110	9,0
120	9,2
130	9,4
140	9,5
150	9,7
160	9,8
170	9,9
180	10,1
190	10,2
200	10,3

Tabla 7. Perfil de velocidades para la velocidad media del año 2020 de la estación de Chicago.

4. CÁLCULOS DE POTENCIA Y ENERGÍA.

HISTOGRAMA Y FRECUENCIA ACUMULADA PARA LA ALTURA DEL BUJE.

La Figura 6 contiene el histograma teniendo en cuenta la altura del buje y la frecuencia acumulada.

Las velocidades han aumentado, por lo que ahora el histograma contiene intervalos de valor 2,5 m/s. Si se compara con el histograma sin modificar (Figura 4), el histograma se ha “desplazado” hacia la derecha. A partir de los 17,5 m/s la frecuencia acumulado no aumenta significativamente por lo que la mayoría de la velocidad del viento que se encontraría en el aerogenerador tendría una velocidad menor a 17,5 m/s).



Figura 6. Histograma y frecuencia acumulada de la velocidad para el año 2020 en la estación de Chicago.

AJUSTE DE WEIBULL.

Para conocer la distribución de Weibull de los datos se necesita conocer el valor de k y c . Con el objetivo de obtenerlos se hace la transformación de los datos según las instrucciones del trabajo y se realiza un ajuste de mínimos cuadrados (Figura 7)

El ajuste aporta un valor de $k=1,9899$ y $c=4,5332$. La bondad del ajuste se comprueba con el coeficiente de correlación al cuadrado (R^2). R es una medida de dependencia lineal entre dos variables, siendo mayor la correlación lineal directa cuanto más cerca se encuentre de 1. R vale $0,9995^{1/2} = 0,9998$, por lo que se tiene una gran correlación y por tanto un buen ajuste de Weibull.

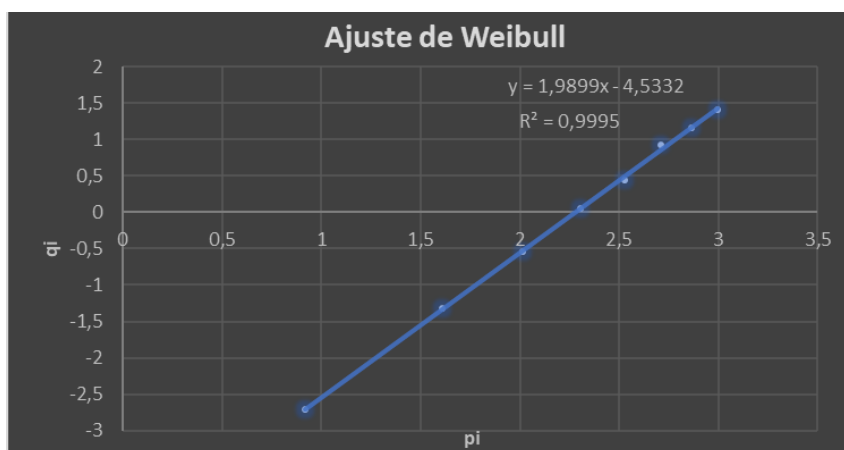


Figura 7. Ajuste de Weibull con su ajuste de mínimos cuadrados y su coeficiente de correlación al cuadrado.

CURVA DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL.

La curva de densidad de probabilidad de Weibull se observa en la Figura 8.

Si se compara la curva con el histograma que pretende representar (histograma de la Figura 6) se observa que tienen una forma parecida. Pese a la gran correlación que presentaban, la curva no es perfecta ya que se observa que infraestima los valores más bajos de velocidad.



Figura 8. Curva de densidad de probabilidad de Weibull.

POTENCIA Y ENERGÍA DEL AEROGENERADOR.

La densidad de potencia del aerogenerador se encuentra en la Figura 9. La energía anual media se calcula como el área de dicha curva, con un valor de 425.947,83 MJ.

Si su potencia nominal (2 MW) y se considera que trabaja todas las horas del día a la velocidad nominal, la máxima energía del aerogenerador es de 1.051.200 MJ. El cociente entre la energía media anual y la cifra anterior da el factor de carga, que resulta 40,52%.

Tras consultar con el profesor de la asignatura, informa de que el factor de carga de un parque eólico es de media del 36%, con valores entre el 24 y el 56%. Se observa que el factor de carga de la instalación es mayor que la media, por lo que esta localización presenta vientos a altas temperaturas y con ausencia de edificios muy favorables para una estación eólica.



Figura 9. Densidad de potencia el aerogenerador.

5. CONCLUSIONES

Se tiene una sensación satisfactoria del trabajo, ya que tras seguir los pasos descritos como metodología se ha conseguido llegar al objetivo principal: terminar un Estudio del recurso Eólico. El objetivo secundario de mejorar los conocimientos sobre Excel también se ha cumplido. Sin embargo, el objetivo de sacar buena nota aún no se conoce porque no se ha ofrecido la nota.

La metodología ha sido la que se ha descrito anteriormente: realizar cálculos y figuras, redactar y corregir el documento. Para realizar los cálculos y las figuras se han necesitado aproximadamente 15 horas. La redacción del trabajo ocupó unas 3 horas. La corrección constó de 1 hora. Se considera que es una gran carga para una asignatura de 3 créditos, ya que deberían ser 48 horas y se han empleado casi la mitad en este trabajo que vale 1 punto de la nota.

Como conclusión, se observa que el emplazamiento Chicago es muy recomendable para un parque eólico, ya que su factor de carga se encuentra en el intervalo aceptable de los parques que se encuentran en funcionamiento. Sin embargo, se debe tener en cuenta otros aspectos, como que es una ciudad muy grande y con diversos rascacielos, por lo que puede ser que las construcciones humanas impidiesen construir un parque eólico en el emplazamiento elegido.