



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



Fuentes de energía 2023 – 2024

ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO EN VITORIA

Diciembre 2023

1º Máster Ingeniería Industrial

Contenido

1. Introducción	3
2. Análisis preliminar de los datos del viento.....	4
3. Estudio estadístico del recurso eólico en Vitoria	5
3.1. <i>Análisis estadístico anual</i>	5
3.2. <i>Análisis estadístico estacional</i>	5
3.3. <i>Análisis estadístico diurno y nocturno</i>	6
3.4. <i>Histogramas anuales</i>	8
3.5. <i>Rosa de los vientos</i>	9
3.6. <i>Perfil de velocidades con la altura</i>	10
4. Potencia y energía del aerogenerador en Vitoria	11
4.1. <i>Histograma de velocidades según la altura del buje</i>	11
4.2. <i>Ajuste de la distribución de Weibull</i>	11
4.3. <i>Curva de densidad de Weibull</i>	12
4.4. <i>Energía proporcionada por el aerogenerador</i>	13
5. Conclusiones	14

1. Introducción

En este trabajo se realizará un análisis del viento y sus propiedades en la localidad de Vitoria. Para ello se extraerán los datos necesarios de la página *National Climatic Data Center*, empleando una estación meteorológica situada en dicha zona. Para esta ciudad la única fuente de información es la estación meteorológica del aeropuerto.

Tras descargar los datos medidos en dicha estación se realizará un estudio estadístico empleando Excel de Microsoft. Gracias al análisis estadístico de los datos, apoyado en las tablas correspondientes, se conocerán mejor las propiedades del viento en dicho entorno. El fin de este trabajo es estudiar la viabilidad de instaurar un parque eólico en dicha localización. Para ello se evaluará la energía producida por un aerogenerador de 2 MW con las propiedades y situación recopilada a través de los datos y modelos.

2. Análisis preliminar de los datos del viento

Para comenzar el estudio se escogen los 5 años completos más recientes. Por lo que el año 2023 no valdría para extraer los datos ya que faltaría la recopilación del final de diciembre, lo que no representaría correctamente el año. Además, habría que ajustar las fechas analizadas de los años anteriores. Se optará por analizar los años desde el 2018 al 2022.

Dentro de los datos recopilados por la página mencionada anteriormente se realiza un primer filtrado según el tipo de report empleado. Seleccionamos los informes de tipo FM-12, evitando así los datos duplicados.

La frecuencia de muestreo se ve reflejada en las columnas de la fecha. En ella se ve una distinción que va desde años hasta horas.

La web ofrece una recopilación de un alto número de datos o variables. Como se ha mencionado en la introducción, este trabajo se centra en el análisis del viento por lo que únicamente será de utilidad la siguiente información: ángulo de dirección del viento, índice de calidad del ángulo, tipo de observación, velocidad e índice de calidad de la velocidad.

Las medidas de los ángulos son en grados, desde 1 a 360, y para la velocidad serán m/s, tomando valores entre 0 y 900. Siendo el factor de escala 1 para los ángulos y 10 para las velocidades. Por lo que será necesario modificar los datos descargados, que serán en un principio dm/s, multiplicándolos por 10.

El código de calidad, tanto para ángulos como velocidades, tomará valores dentro de un baremo de entre 0 y 9. Siendo 1 el resultado de una medición que logre superar todos los controles de calidad y 9 una medición que únicamente supera unos mínimos. Con esta información se podrá evaluar la cantidad de datos válidos para el devenir del estudio. Dicha información queda reflejada en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Cantidad de mediciones válidas y porcentaje de validez por año y totales.

Años	Válidos	% Válidos
2018	8674	99.0182648
2019	8715	99.4863014
2020	8595	98.1164384
2021	8478	96.7808219
2022	8476	96.7579909
TOTAL	42938	97.9782767

Para los porcentajes se han tenido en cuenta todos los años como no bisiestos con 365 días, excepto para el total donde si se ha tenido en cuenta un día extra. Como la frecuencia de medidas es horaria, dichos días han de ser multiplicados por 24 para obtener los porcentajes correctamente. Todos los años superan 8000

mediciones válidas y porcentajes mayores que 95 %. Por lo que la estación es una fuente de información útil para el análisis.

Debida a la cantidad de datos válidos medidos y a su alto porcentaje en muchas secciones del estudio se empleará el año 2019 como periodo relevante.

3. Estudio estadístico del recurso eólico en Vitoria

3.1. Análisis estadístico anual

Comenzamos el estudio estadístico de manera general, obteniendo la media anual, así como la varianza para ver la dispersión y variabilidad anual.

Se refleja en la **Figura 1**, como la media y varianza de cada uno de los años anteriores es similar por lo que al tomar el año 2019 como periodo relevante se estudia un caso muy característico de las propiedades de dicha localización.

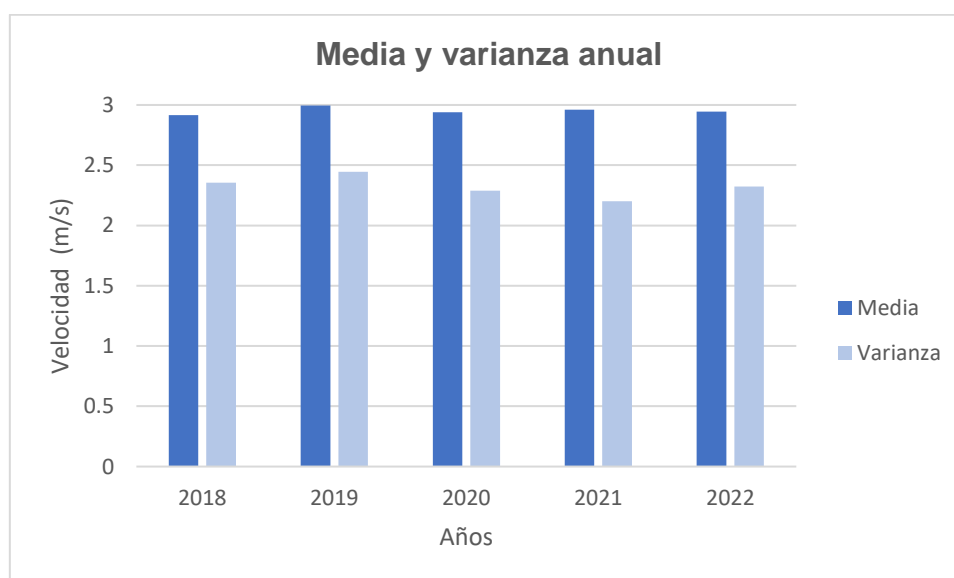
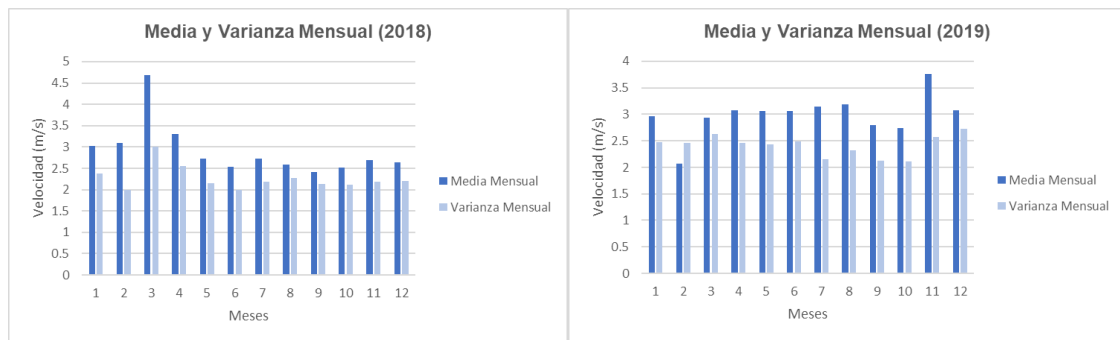


Figura 1. Media y varianza anual.

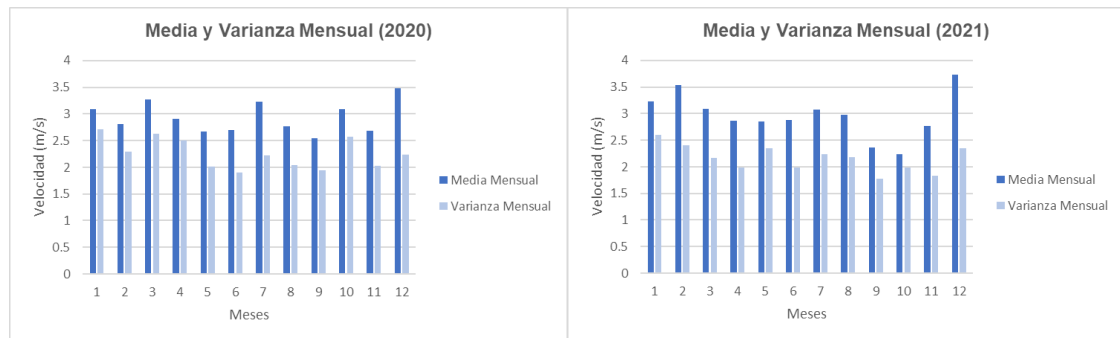
La velocidad media será de entorno a 2.95 m/s con una varianza de 2.3 m/s.

3.2. Análisis estadístico estacional

De la misma manera, en las siguientes **figuras (2, 3, 4, 5 y 6)** se refleja la media y varianza estacional. Para ver la variación a lo largo de las estaciones se reflejarán los valores mensuales de media y varianza.



Figuras 2 y 3. Medias y varianzas mensuales de 2018 y 2019.



Figuras 4 y 5. Medias y varianzas mensuales de 2020 y 2021.

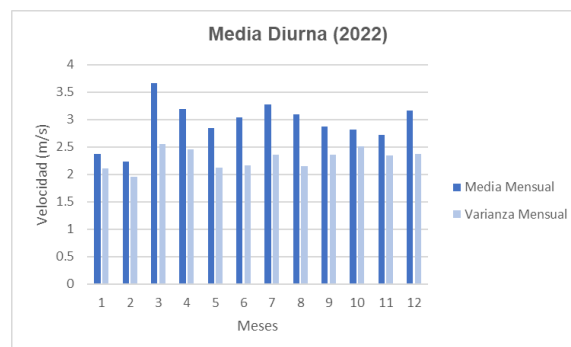


Figura 6. Medias y varianzas mensuales de 2022.

Con dichas gráficas se observa que los meses con valores más elevados suelen ser los de invierno. Aunque hay un par de años en los que el mes de marzo es el que registra los valores más elevados, y un año donde los meses de verano están casi igualados a los de invierno. Esto anterior con respecto a las medias. En cuanto a la varianza se observa que el mes de marzo es el que suele tener mayor dispersión de datos por lo general en todos los años, ocurriendo lo opuesto para los meses de verano, con las menores varianzas.

3.3. Análisis estadístico diurno y nocturno

Para realizar dicho análisis estadístico y obtener los gráficos correspondientes se analizarán los datos obtenidos en los 5 años, primero se filtrarán por meses,

seguido de los periodos diurno y nocturno del día. Se clasifican como diurnos aquellos datos tomados entre las 10:00 y las 18:00 y nocturnos entre las 22:00 y 6:00. Teniendo en cuenta que habrá un año bisiesto, por lo que un mes de febrero dispondrá de 29 días.

Con dicha clasificación se obtendrán las medias y varianzas de cada uno de los meses correspondientes. La cantidad de datos mensuales válidos esta entorno a los 3600, con porcentajes cercanos a 98%. Al separar en periodos diurno y nocturno la cantidad de datos disminuye a 1300 pero porque los datos válidos se dividen entre ambos periodos. Y continuando con porcentajes similares. Con esto se comprueba que la información en la que se basa este estudio es más que válida para sacar conclusiones y analizar la localización. Y además que los periodos tienen la misma cantidad de datos por lo que la comparación es más objetiva.

Para el análisis de este apartado se decide separar las gráficas por media (**Figura 7**) y varianza (**Figura 8**), en las que se analizará cada una de estas medidas por separado, pero viendo simultáneamente los dos periodos, diurno y nocturno.

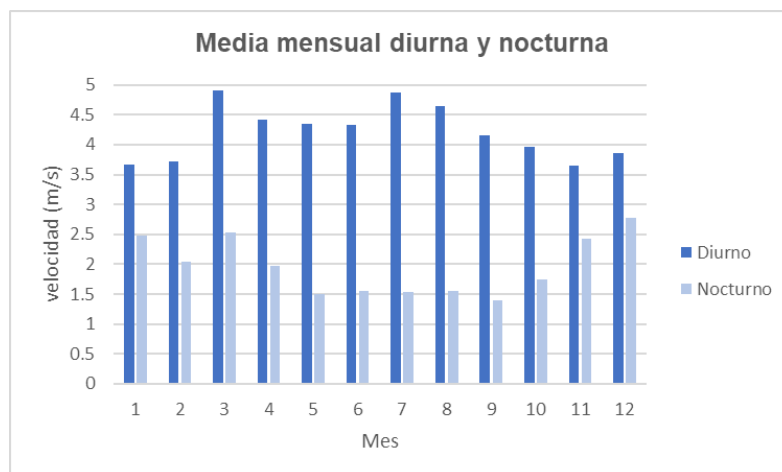


Figura 7. Medias mensuales por periodos diurnos o nocturnos.

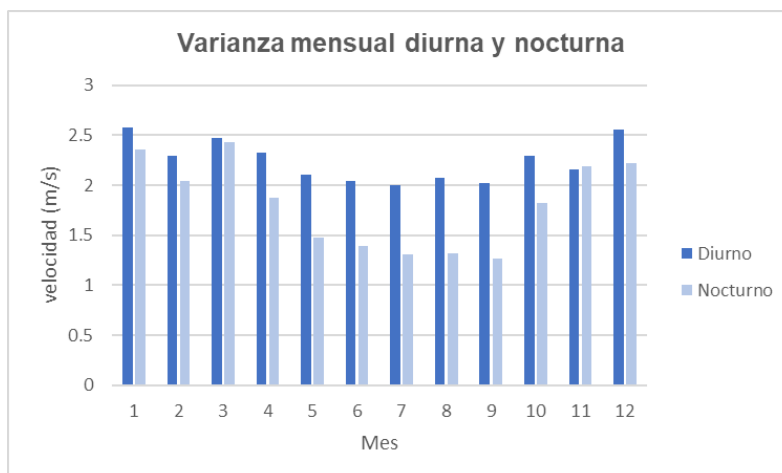
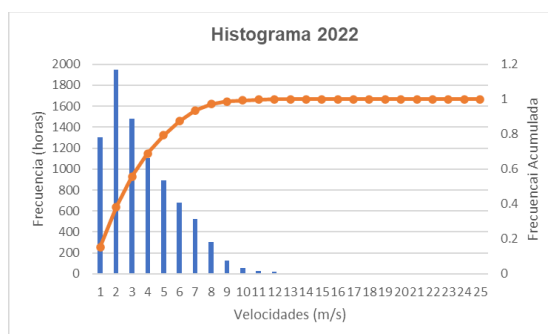
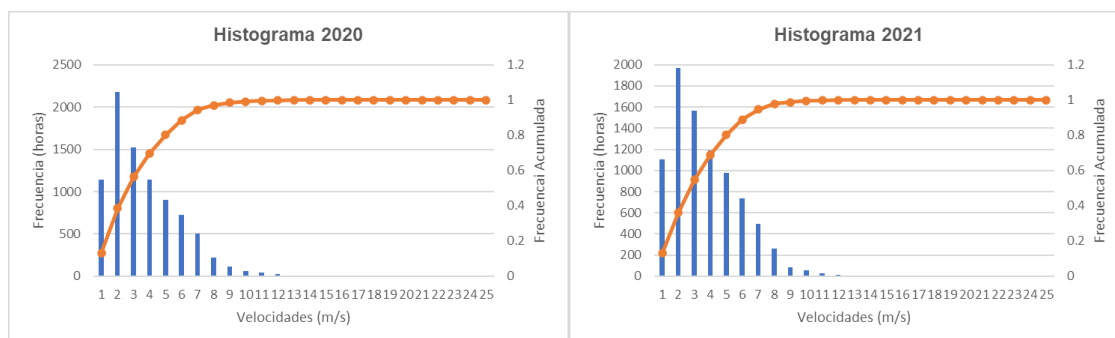
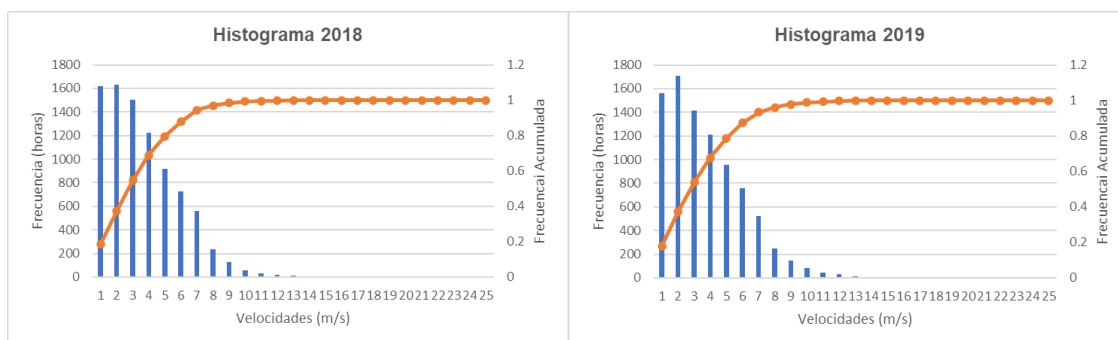


Figura 8. Varianza mensual por periodos diurno y nocturno.

Con las gráficas anteriores se observa como claramente el periodo diurno tiene mayores velocidades medias. Dicha diferencia es mayor en los meses de verano. Por otro lado, la varianza es similar para ambos periodos, lo que significa que la localización no sufre grandes desviaciones según el periodo del día.

3.4. Histogramas anuales

En los siguientes histogramas se representará la frecuencia horaria de cada periodo de velocidades entre 0 y 25 m/s. Además, se añadirá la distribución de la frecuencia acumulada. Para evitar añadir leyenda a cada una de las **Figuras (9, 10, 11, 12 y 13)** se observarán las barras de los histogramas o frecuencia horaria en azul y la distribución de la frecuencia acumulada como una línea naranja. La frecuencia acumulada se medirá en tanto por uno, mientras que la frecuencia horaria de cada intervalo en horas.



Como en las gráficas de los apartados anteriores salen resultados muy similares en cada uno de los años. Además, dichas gráficas confirman los valores de la media ya que hay mayor frecuencia de datos en los intervalos de velocidades entorno al 2 m/s. También se observa que el año 2019 tiene la gran mayoría de velocidades agrupadas en los primeros intervalos, por lo que habrá menor dispersión de los datos.

3.5. Rosa de los vientos

La rosa de los vientos (**Figura 14**) permite representar la dirección que toma el viento en cada una de las mediciones del año representativo, el 2019.

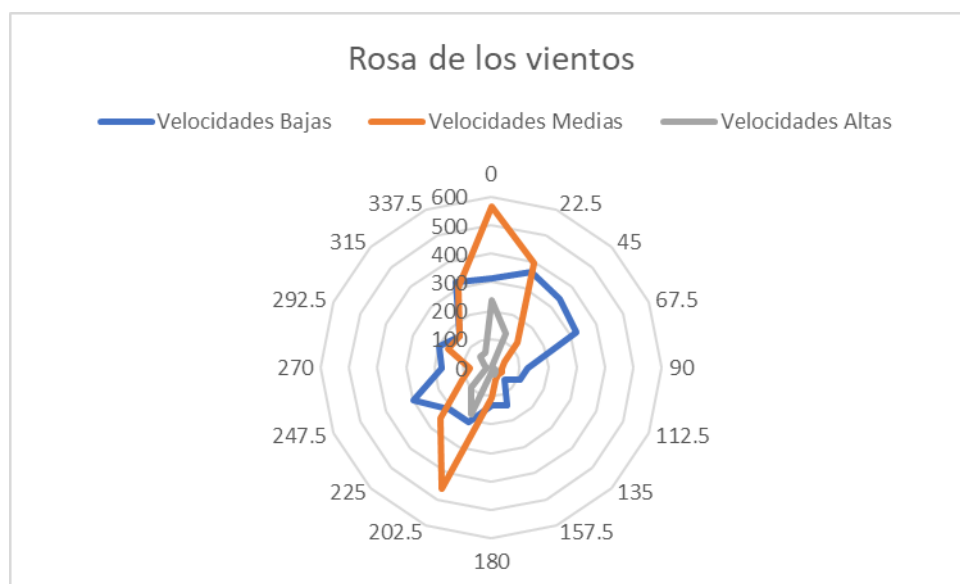


Figura 14. Rosa de los vientos para el año 2019.

Como ya se ha mencionado, en los datos descargados aparecía información sobre los ángulos. Dicha información reflejaba el ángulo con medidas de entre 1 y 360 grados. Para realizar la rosa se divide en 16 intervalos de 22.5 ° cada uno. Hay que mencionar que el 0 hace referencia al Norte y el 180 al Sur. Una vez se han definido los intervalos de ángulos, se pasa a estudiar como reflejar las velocidades. De primeras se piensa en diferenciar las velocidades en tres grupos: bajas, medias y altas. Primero se toman grupos de 8 m/s cada uno, siendo estos: 0-8, 8-16 y 16-24, ya que las velocidades máximas medidas están entorno a 22 m/s. El problema es que el grupo de velocidades altas o 16-24 m/s tiene muy pocos datos o medidas de calidad, por lo que su gráfico era similar al de un punto centrado y no reflejaba nada. Por ello se redujo la velocidad de cada intervalo a 3 m/s. Pasando a los intervalos: 0- 3 m/s (velocidades bajas), 3-6 m/s (velocidades medias) y 6-9 m/s (velocidades altas). Con dichos intervalos se podrá representar casi todos los datos medidos dicho año, como se observa en

su histograma dichas velocidades tienen columnas de suficiente altura o frecuencia. Pese que para la rosa empleamos frecuencia angular y no horaria, pero el número de mediciones es el mismo.

Gracias a los grupos de velocidades formados se pueden representar tres gráficas según la frecuencia angular de los 16 intervalos que se mencionaron. Se observa que, para velocidades medias y altas, especialmente las medias, el aire toma direcciones cercanas al norte y muchas veces al sur. En cambio, para bajas velocidades las direcciones son muy dispersas. Además, tiene sentido que las frecuencias angulares sean mayores para velocidades medias ya que son más próximos a la media anual. Seguramente que la costa este próxima y al norte de Vitoria tenga cierta influencia en dichos resultados.

3.6. Perfil de velocidades con la altura

A continuación, se calcula el perfil de velocidades que toma el viento según su altura, estudiando desde los 0 a 200 metros. Para ello habrá que tener en cuenta la oleografía del terreno.

Para hallar el perfil de velocidades (**Figura 15**) se empleará la ecuación dada:

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)}$$

Donde la velocidad de referencia será la velocidad media, 2.99504303 m/s, del año representativo (2019) se supone que se tomó a 10 m. Por lo que h_{ref} será igual a 10 m. Como la estación de medida esta situada en un aeropuerto la longitud de rugosidad, z_0 , corresponde a la de una clase 0.5 por lo que tomará un valor igual a 0.0024.

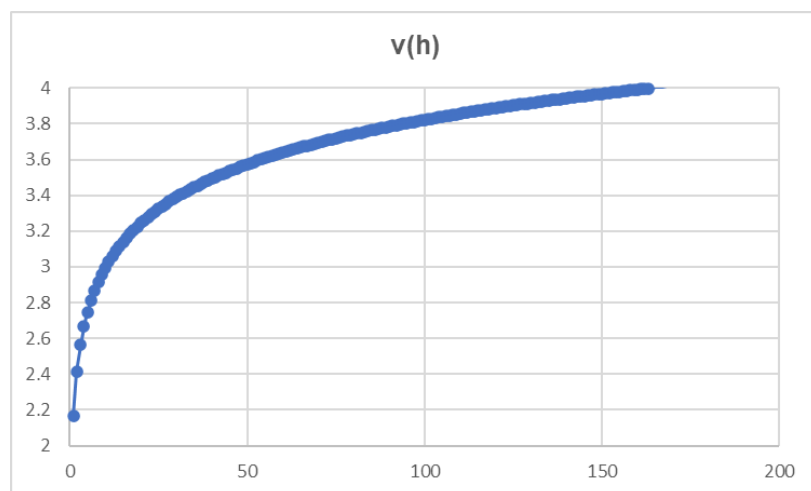


Figura 15. Perfil de velocidades con la altura para el año 2019.

4. Potencia y energía del aerogenerador en Vitoria

4.1. Histograma de velocidades según la altura del buje

Para hallar el histograma (**Figura 16**) correspondiente realizamos una modificación a todas las velocidades medidas por la estación según la ecuación usada en el apartado del perfil de velocidades, sólo que ahora la href será 90 m en vez de 10 m.

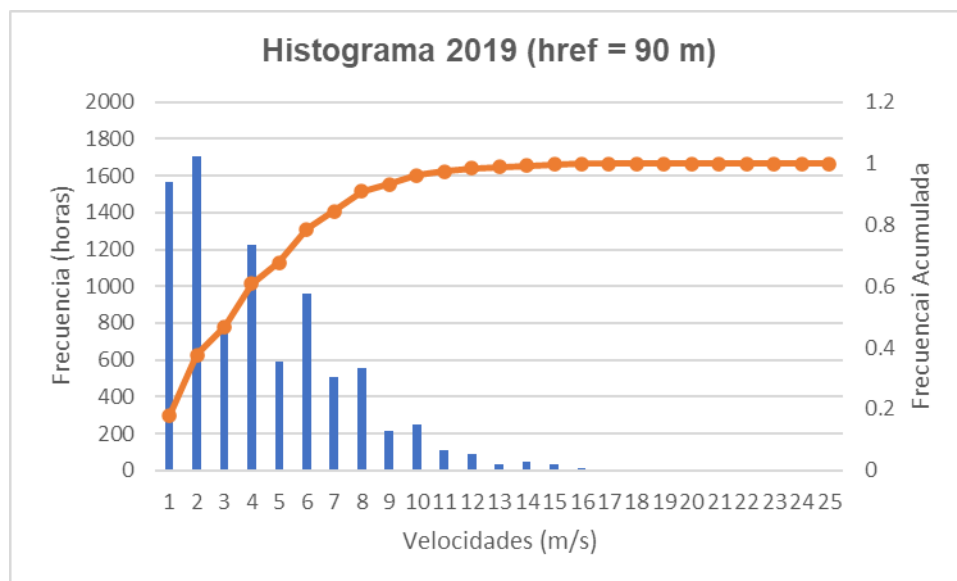


Figura 16. Histograma del año representativo referenciado a la altura del buje del aerogenerador.

Con este gráfico se observa que a dicha altura la gran mayoría de velocidades toman valores bajos, quitando el caso de los rangos cercanos a 6 m/s. Por lo que según la tabla de la curva de potencia y si se excluyen los intervalos con mediciones inferiores a 400, solo se logrará generar como máximo 832 kW.

4.2. Ajuste de la distribución de Weibull

Para ajustar la distribución de Weibull empleamos la función de probabilidad acumulada, con la referencia de la altura del buje del aerogenerador, modificada a:

$$q_i = p_i \cdot u - v$$

Con:

$$\begin{aligned}
 p_i &= \ln(x_i) \\
 q_i &= \ln(-\ln(1 - F_i)) \\
 u &= k \\
 v &= k \ln(C)
 \end{aligned}$$

Se hallan los distintos p_i con los intervalos de velocidades que se han empleado hasta ahora. Y q_i con la frecuencia acumulada de dichas velocidades con referencia a la altura del buje del aerogenerador. Representando dichos valores (**Figura 17**) y empleando Excel se halla la ecuación de la línea de tendencia que se ajusta a dicha distribución. Dicha ecuación será la modificada mencionada anteriormente.

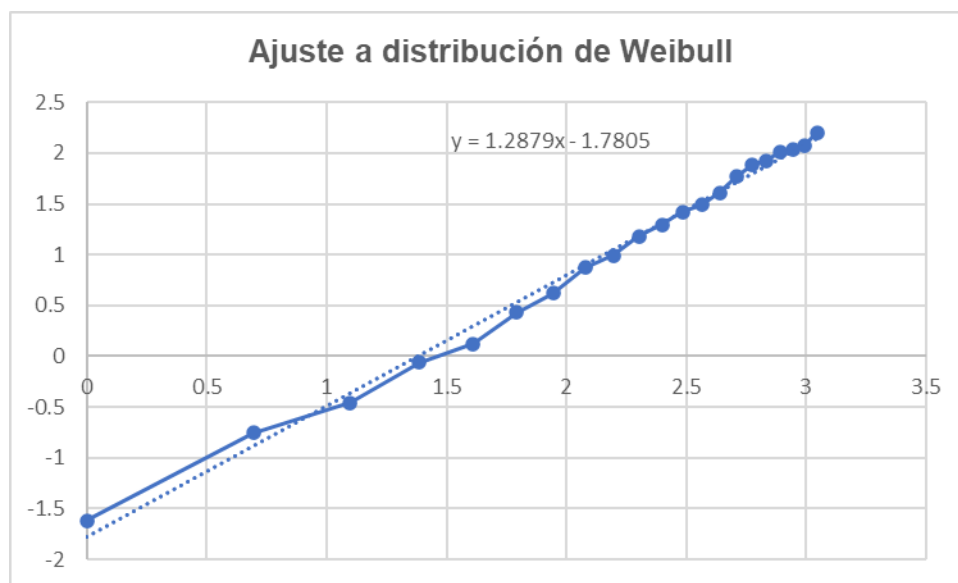


Figura 17. Ajuste de distribución de Weibull

Con la ecuación modificada podemos hallar los valores k y C que definirán la función de densidad de probabilidad de Weibull. Siendo $k = 1.2879$ y $C = 3.98478402$.

4.3. Curva de densidad de Weibull

A partir del ajuste realizado en el apartado anterior y empleando la función de densidad de probabilidad de Weibull se obtiene la **Figura 18**:

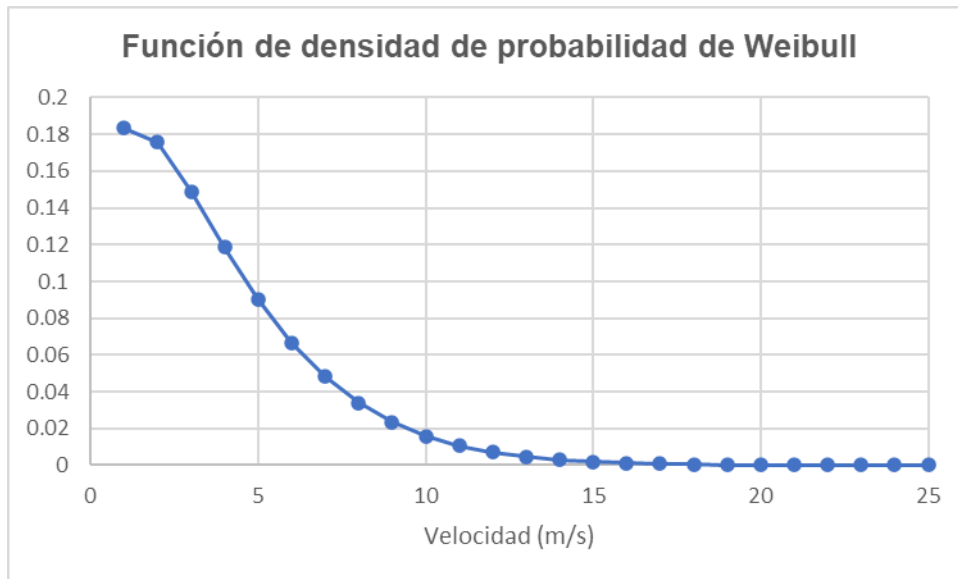


Figura 18. Función de densidad de probabilidad de Weibull para el año 2019.

Se observa la gran semejanza con el histograma anterior puesto que para bajas velocidades en este caso las densidades son mayores, lo que antes se reflejaba con la frecuencia.

4.4. Energía proporcionada por el aerogenerador

Finalmente, se llevará a cabo el cálculo de la energía generada por el aerogenerador en cada rango de velocidades. Este proceso considera la frecuencia de cada intervalo, la potencia proporcionada en el enunciado y la densidad de Weibull calculada en la sección previa.

La energía generada se visualiza en la **Figura 19**. Se observa claramente que el aerogenerador alcanza su mayor producción de energía en el intervalo de 4 a 5 m/s, coincidiendo con el tercer rango más alto de frecuencia de velocidades. Y el más altos de entre las velocidades que hacen que el generador de energía.

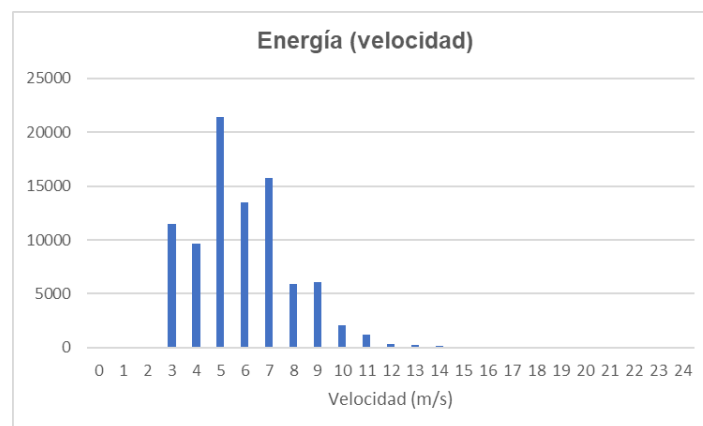


Figura 19. Energía en función de la velocidad.

5. Conclusiones

Viendo los factores de carga para cada intervalo de velocidades, sabiendo que la velocidad media es de 3.78459114 m/s, correspondiendo a un factor de carga para dicho intervalo de 0.0395. Al ser este el menor de los factores de carga a excepción de los nulos se considera poco viable la instalación de un aerogenerador de las características al del enunciado en Vitoria, concretamente en las proximidades del aeropuerto.

Esto ha quedado reflejado en el resto del trabajo, viendo como las mayores frecuencias se daban a bajas velocidades y teniendo peores resultados al cambiar la referencia a la altura del buje del aerogenerador.