



Laboratorio de Energías Renovables y Radiación Solar

Energías Renovables: Energía Eólica



**José Luis Gómez Amo
Víctor Estellés Leal
M^a Pilar Utrillas Esteban
Fernando Tena Sangüesa**

Energía Eólica

Los objetivos de esta practica son por una parte analizar el recurso eólico (velocidad y dirección del viento) y por otra, obtener la curvas de potencia de un aerogenerador y la energía suministrada en una localidad de medida

Para ello se utiliza series temporales de velocidad y dirección del viento y las características de un Aerogenerador comercial (se encuentra en internet).

FUNDAMENTO TEÓRICO

a) El recurso eólico

El viento es el agente productor de la energía eólica. Para conocer el valor de dicha energía es preciso estudiar previamente la caracterización del viento y su variación con el tiempo. Para ello se utilizan series temporales de datos obtenidos mediante anemómetros a partir de los cuales podemos analizar:

- La evolución de la velocidad: $v = f(t)$
- La dirección en que el viento se mueve en el emplazamiento elegido (se considera la dirección de donde viene el viento).

Esos datos nos permiten estudiar la distribución estadística de velocidades que es del tipo Weibull (figura 1), cuya ecuación tiene la forma:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad [1]$$

donde v es la velocidad del viento en (m s^{-1}) y, c y k son dos parametros que caracterizan la función de Weibull, c es el parametro de escala, con las mismas unidades de v , y k es el parametro de forma, adimensional, que modifica la simetría de la distribució.

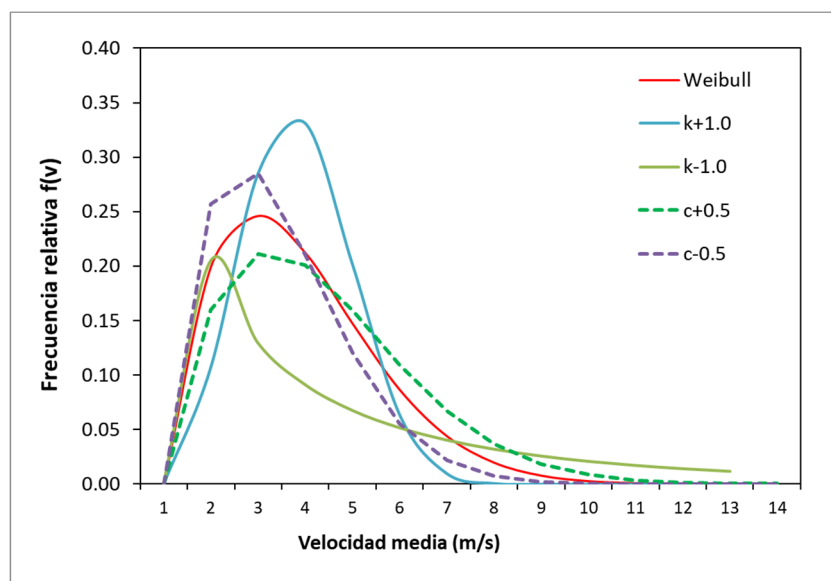


Figura 1. Distribución relativa de velocidades del viento. El eje de ordenadas representa la probabilidad (en tanto por 1) de que se de una determinada velocidad. El área bajo la curva vale 1 (100%)

La energía eólica es la energía cinética del viento que incide sobre el aerogenerador. Por unidad de tiempo tendremos la potencia del sistema, que puede analizarse de diversas maneras:

1.- **Potencia disponible:** $P_d = \frac{1}{2} A \rho v^3$ [2]

Siendo ρ la densidad del viento ($\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$ en c. n.), A , el área barrida por el rotor, de diámetro d , ($A = \pi(d/2)^2 \text{ m}^2$) y v la velocidad del viento incidente (m s^{-1})

2.- **Potencia máxima aprovechable.** Fijada por el límite de Betz:

$$P_{\max} = 0.593 P_d \quad [3]$$

3.- **Potencia aprovechable real.** Viene determinada por el coeficiente de potencia del sistema, c_p , que es una característica del aerogenerador utilizado e indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. En la figura 2 puede verse la forma del coeficiente de potencia de distintos tipos de aerogeneradores.

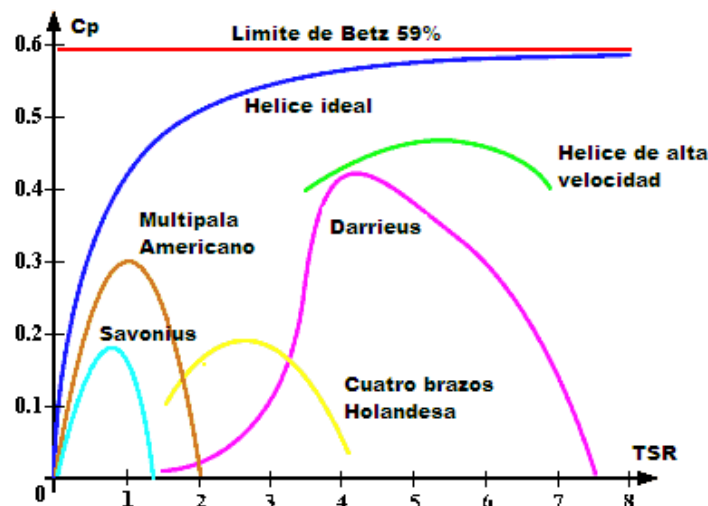


Figura 2. Coeficiente de potencia de distintos tipos de aerogeneradores.

La potencia aprovechable puede expresarse, por tanto, mediante la ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} c_p A \rho v^3 = \frac{\pi}{8} c_p \rho d^2 v^3 \quad [4]$$

4.- El coeficiente de potencia del sistema, c_p , puede obtenerse a partir de la potencia aprovechable real y de la potencia disponible:

$$\frac{P_a}{P_d} = \frac{\frac{1}{2} c_p A \rho v^3}{\frac{1}{2} A \rho v^3} = c_p \quad [5]$$

Los datos de potencia aprovechable real se obtendrán a partir de los datos que nos proporcionan los diferentes aerogeneradores.

b) La densidad de potencia

La densidad de potencia se obtiene multiplicando la potencia correspondiente a cada velocidad por la probabilidad de la misma según los valores de la correspondiente distribución de frecuencia.

En la figura 3 se presenta la densidad de potencia correspondiente a un aerogenerador tipo. La curva más alta representa la densidad de potencia disponible, la intermedia la densidad de potencia máxima aprovechable (límite de Betz) y la más baja la densidad de potencia aprovechable real según el coeficiente de potencia (c_p) del aerogenerador utilizado.

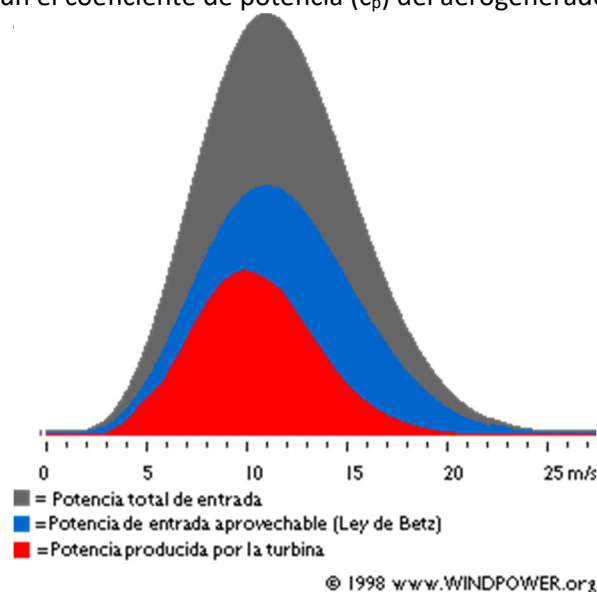


Figura 3. Densidad de potencia correspondiente a un aerogenerador tipo

c) Características del aerogenerador utilizado

Las principales características de un aerogenerador comercial vienen indicadas por su curva de potencia. En la figura 4 se presenta una curva de potencia tipo de un aerogenerador.

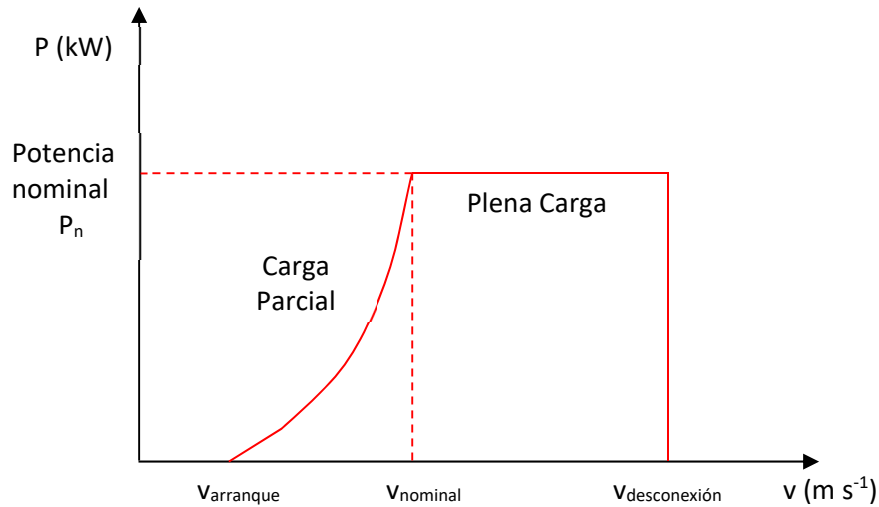


Figura 4. Curva de potencia de un aerogenerador

En ella podemos leer:

- 1.- La velocidad de arranque del aerogenerador.
- 2.- La potencia máxima del mismo y la velocidad mínima a que esta potencia es alcanzada (velocidad nominal).
- 3.- La velocidad de desconexión.
- 4.- La forma de la curva de variación de potencia, que obedece a la ecuación [3].

REALIZACIÓN

- 1.- Estudio de las frecuencias relativas de **velocidad media** (histogramas de frecuencia con un paso de 1 m s^{-1}). **Comentar los resultados obtenidos. Los datos proporcionados son para una altura media de 10m.**
- 2.- Rosa de los vientos de frecuencias y de velocidades.

Construir la tabla 1 (frecuencias en 16 sectores de 22.5 grados cada uno. Para cada intervalo anotar el número de puntos (frecuencia) y la velocidad media.

Tabla 1. Frecuencia, velocidad y potencia por sectores

SECTOR	Centro intervalo	Frecuencia velocidades medias (N)	Media de velocidades medias $v \text{ (m/s)}$	Desviación estándar velocidad media (σ)	Error desviación estándar $\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$
N	0.0 (360)				
NNE	22.5				
NE	45.0				
ENE	67.5				
E	90.0				
ESE	112.5				

SE	135.0				
SSE	157.5				
S	180.0				
SSW	202.5				
SW	225.0				
WSW	247.5				
W	270.0				
WNW	292.5				
NW	315.0				
NNW	337.5				

A partir de los valores de dicha tabla, hacer la representación de las frecuencias y velocidades medias en forma de diagrama polar. **Comentar los resultados obtenidos.**

- 3.- Teniendo en cuenta que el viento sigue una distribución de Weibull según la ecuación (1)

Calcular la distribución Weibull para los datos proporcionados (utilizar el histograma de velocidades medias calculado en el apartado 1) y comparar las distribuciones teórica y experimental. **Comentar los resultados obtenidos.**

En el **ANEXO II** se indica una forma de cálculo de los parámetros de la distribución Weibull y en la bibliografía se reseña un artículo con distintos métodos para este cálculo.

- 3.- **Estudio de un caso práctico.** Buscar un aerogenerador en internet (en el **ANEXO II**, hay diferentes direcciones donde se pueden encontrar aerogeneradores comerciales) que permita aprovechar el potencial eólico del lugar de medida. Se deben encontrar los siguientes valores:

- velocidad de arranque
- velocidad de desconexión
- velocidad nominal
- potencia máxima
- longitud de la pala

Para el aerogenerador escogido y suponiendo que la densidad del aire es 1.225 kg/m^3 (CN):

a) Calcular y representar en la misma gráfica (curvas teóricas), **la potencia disponible, la potencia máxima aprovechable y la potencia aprovechable real** (Figura 3).

b) Calcular la rosa de los vientos de energías suministradas por el aerogenerador (kWh) y justificar la dirección en la que se debería orientar un aerogenerador de estas características en la zona de estudio. Comparar el valor obtenido para alturas del aerogenerador de 10 m (velocidades de viento iniciales) y de 80 m (velocidades de viento calculadas). Para calcular los kWh = **frecuencia (tanto por 1) x potencia x 24horasx365días**

RESULTADOS

- 1.- Histograma de frecuencias de la velocidad media del viento (comentarios de los resultados).



- 2.- Tabla de valores por sectores (16) para los datos de viento proporcionados y representación gráfica en forma polar (rosa de los vientos) de los valores absolutos de las magnitudes: frecuencia (f) y velocidad (v). Comentario de los resultados.
- 3.- Cálculo de los parámetros k y c de la distribución de Weibull (incluir los errores). Análisis de sensibilidad de ambos parámetros
4. Representación para el aerogenerador propuesto, de las curvas de potencia disponible, potencia máxima aprovechable, potencia aprovechable real y del coeficiente de potencia.
- 5.- Calcular la rosa de los vientos de energías suministradas por el aerogenerador (kWh) para 10m y la altura real del aerogenerador y comparar ambos resultados.

ANEXO I

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

Los datos de viento se obtienen de una estación anemométrica y normalmente se recogen a una altura sobre el terreno de aproximadamente 10 m pero los aerogeneradores se instalan a diferentes alturas teniendo en cuenta su diseño y la potencia que se pretende generar. Suponiendo que la altura ideal para generadores entre 0.5 y 5 kW esta alrededor de 80m, calcular las velocidades de viento diferentes alturas entre 10 y 100m:

$$v_i = v_0 \left(\frac{z_i}{z_0} \right)^\alpha$$

Imaginando un escenario en el que ubicar la torre del aerogenerador, utilizad el valor de α que le corresponda.

Tabla 2. Valor del coeficiente α según la rugosidad de diferentes tipos de superficie del suelo

Coeficiente α	Descripción
0.09	Mar en calma
0.12	Zonas agrícolas abiertas con presencia limitada de obstáculos de poca altura
0.16	Zonas agrícolas abiertas con presencia limitada de obstáculos altura media (6 – 8 m)
0.20	Zonas agrícolas con presencia de numerosos obstáculos de altura media (6 – 8 m)
0.30	Zonas urbanas y bosques

ANEXO II

CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA DISTRIBUCION WEIBULL

La función densidad de probabilidad de Weibull es:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad [1]$$

donde v es la velocidad del viento en (m s^{-1}) y, como podemos ver, la función de Weibull está caracterizada por dos parámetros, uno de escala, c , con las mismas unidades de la velocidad, que se relaciona de forma directa con la velocidad media y otro de forma, k , adimensional, que modifica la simetría de la distribución: valores cercanos a 1 corresponden a distribuciones muy asimétricas, mientras que valores elevados ($k > 2-3$) corresponden a distribuciones simétricas, similares a las de Gauss.

La función de distribución acumulada es:

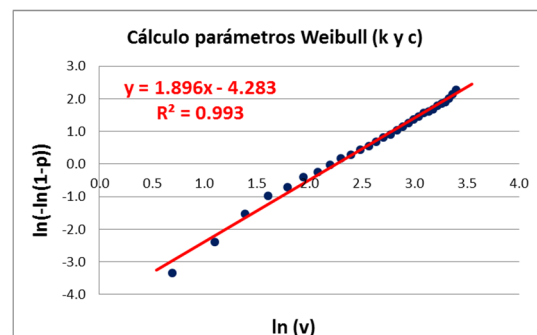
$$p(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad [2]$$

Aunque hay diversos métodos para la determinación de los parámetros c y k , usaremos, por su simplicidad y buenos resultados, el método gráfico de mínimos cuadrados, aplicado a la función de distribución acumulada, $F(v)$.

La ecuación [2] se puede escribir como:

$$\ln[-\ln(1-p(v))] = k \ln v - k \ln c \quad [3]$$

La ecuación es, básicamente, la ecuación de una línea recta, $y = a x + b$. Representando gráficamente $y = \ln(-\ln(1-p(v)))$ frente a $x = \ln v$, obtenemos una línea recta cuya pendiente es el parámetro k y la intersección con el eje es $(k \ln c)$, lo que nos permite calcular ambos parámetros.



$$k = a \quad b = -k \ln c \quad c = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad [4]$$

Velocidad		Frecuencia de datos (f)	Frecuencia de datos acumulada (p)	$x_i = \ln v_i$	$y_i = \ln(-\ln(1-p_i))$
De	a				
0	v_1	f_1	$p_1 = f_1$	x_1	y_1
v_1	v_2	f_2	$p_2 = f_1 + f_2$	x_2	y_2
v_2	v_3	f_3	$p_3 = f_1 + f_2 + f_3$	x_3	y_3
v_3	v_4	f_4	$p_4 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$	x_4	y_4
.....					
v_{n-1}	v_n	f_n	$p_n = f_1 + f_2 + \dots + f_n$	x_n	y_n

Tabla. Tratamiento de datos para el ajuste de la curva Weibull



ANEXO III

Paginas donde se pueden encontrar las características técnicas y curvas de potencia aprovechable de algunos aerogeneradores comerciales

- Soluciones Energéticas S.A. (SOLÉNER): <https://www.solener.com/>
- ECOTÈCNIA: <https://www.thewindpower.net/manufacturers/ecotecnia.php>
- Autosolar: <https://autosolar.es/aerogeneradores>
- <https://www.vevor.es/>



BIBLIOGRAFÍA

Costa, P. A., R. Coelho, C. Freitas, M. E. Vieira. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. Applied Energy (2012), 89, 395–400.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911004983>)

Akdag, S. A., A. Dinler. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. Energy Conversion and Management (2009,) 50, 1761–1766.

Seguro, J. V. , T. W. Lambertb. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (2000), Volume 85, Issue 1, 75–84

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610599001221>)