

## **ESTIMACIÓN DE POTENCIA ANUAL GENERADA POR UN GENERADOR EÓLICO**

Ing. BUFANIO, RUBEN; UTN FRH – GESE; [ruben.bufanio@speedy.com.ar](mailto:ruben.bufanio@speedy.com.ar)  
Ing. BONOLI ESCOBAR, MARIANO; UTN FRH – GESE; [mbonoli@fi.uba.ar](mailto:mbonoli@fi.uba.ar)  
Ing. EDWARDS, DIEGO; UTN FRH – GESE; [Edwards\\_diego@yahoo.com.ar](mailto:Edwards_diego@yahoo.com.ar)  
Lic. GOGNI, VALERIA; UTN FRH – GESE; [Valeria.gogni@gmail.com](mailto:Valeria.gogni@gmail.com)

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 El recurso eólico**

La medición del recurso eólico es uno de los pilares fundamentales para la caracterización de un sitio en donde se pretenda instalar una planta de generación de energía eléctrica a través de turbinas de viento. La producción de energía a través de fuentes renovables ha alcanzado en los últimos cinco años, en el mundo, crecimientos sorprendentes de más del 30% por año. Políticas de no dependencia y cuidado del medio ambiente como las desarrolladas en Europa han pronosticado una penetración de este tipo de energía de un 20% para el 2020 y en dicho valor la energía eólica es el mayor porcentaje no menos de un 18%.

La Argentina, dominada en su matriz energética eléctrica por la generación convencional fósil, cuenta con posibilidades inigualables en cuanto a recursos eólicos. Posee velocidades medias de viento en la mayor parte de su territorio, medidas a 50 metros de altura, que superan los 6m/s.

La medición del viento como recurso puede parecer conceptualmente simple, sin embargo, por naturaleza el viento es un proceso estocástico y depende de una gran cantidad de factores como estacionales, climatológicos como temperatura presión y humedad y características geográficas, entre otros.

La correcta estimación del potencial eólico de una región, es de vital importancia a la hora de evaluar un posible proyecto, tanto esto para determinar el apropiado sistema electroproductor como para estimar inversiones, costos de producción de energía y conseguir financiamiento para los mismos.

#### **1.2 Medición del recurso eólico**

Para registrar la velocidad del viento, se utilizan generalmente anemómetros que miden la intensidad del mismo. Esta entrada de información es procesada por un dispositivo denominado datalogger el cual registra parámetros como medias, máximas, mínimas y desvíos promediados cada 10 minutos.

Al estudiar la distribución de ocurrencia de la serie de intensidades de viento, es muy frecuente encontrar que la distribución de Weibull se ajusta a los datos razonablemente. Sin embargo, pueden encontrarse estudios donde se utilizan otras distribuciones como la LogNormal, Gamma y Frechét. En definitiva, cada caso exige un estudio para confirmar o no estos modelos.

### **1.3 Objetivo del trabajo**

Uno de los fines principales de todo estudio de recurso eólico es la estimación de la energía que se puede generar en un determinado sitio. Con este fin es la potencia media anual estimada, uno de los índices fundamentales que define si un sitio es adecuado para la instalación de un parque eólico.

Es por ello nos proponemos a través del modelado y simulación computacional por medio de un software libre como el R:

- Estimar las distribuciones de probabilidad de la velocidad del viento en el sitio que necesita ser caracterizado. A partir de esta información estimaremos la potencia media anual que podemos obtener bajo esas condiciones.
- Caracterizar la potencia media generada por un aerogenerador en un determinado sitio.
- Estimar porcentaje de energía evitada por cut-out (velocidad de viento máxima de un aerogenerador).
- Evaluar el estudio con datos reales de una determinada región, con este fin se utilizarán los obtenidos de la localidad de Cutral-Có Provincia del Neuquén.

## **2. DISTINTAS POTENCIAS EN JUEGO**

### **2.1 Potencia contenida en el viento $P'$ y Potencia aprovechable $P''$**

Los molinos de viento extraen energía contenida en el viento para convertirla en energía eléctrica y entregarla a la red. Esta energía que se busca extraer del viento es fundamentalmente energía cinética y se relaciona con el cubo de la velocidad de viento a través de la siguiente expresión:

$$P' = P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Sin embargo, de acuerdo con el principios de la conservación de la energía, solo es posible extraer una parte de esta. El límite de Betz establece en 0,59 la proporción máxima de energía que podemos extraer del viento utilizando un aerogenerador.

La potencia se ve entonces afectada por el coeficiente de potencia  $C_p$ , donde  $0 \leq C_p \leq 0,59$ . A mayor eficiencia aerodinámica del sistema generador, más alto será el valor de  $C_p$ .

En aplicaciones reales, el valor de  $C_p$ , rara vez toma valores superiores a 0,5. En los generadores de velocidad variable, es posible modificar los parámetros de operación logrando mantener el valor de  $C_p$  lo más alto posible y aproximadamente constante en la zona de operación por debajo de potencia nominal.

## **2.2 Curva de potencia de los aerogeneradores**

Para poder estimar la energía obtenida por un aerogenerador debemos disponer de la distribución de velocidad del viento del sitio y contar con la curva de potencia del aerogenerador entregada por el fabricante.

Dicha curva de potencia indica cuál será la potencia generada por el aerogenerador para las distintas velocidades de viento. La curva de potencia se obtiene empíricamente y es entregada por el fabricante del aerogenerador.

Por otro lado debemos tener en cuenta que el aerogenerador requiere una velocidad de viento mínima para poder operar (velocidad de cut-in), que oscila alrededor de 3-5 m/s. Además, si la velocidad del viento es muy elevada, puede reducir la vida útil del molino, razón por la cual existe una velocidad máxima (velocidad de cut-out) por encima del cual el molino no opera. Este último parámetro se encuentra alrededor de los 25 m/s.

## **2.3 Cálculo de la energía generada**

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, podemos obtener la energía promedio cosechada en un intervalo de tiempo  $t$  de la siguiente manera:

$$E = t \times \int_{\text{velocidad Cut-in}}^{\text{velocidad Cut-out}} P(v) f(v) dv$$

Donde  $P(v)$  es la curva de potencia del aerogenerador y  $f(v)$  es la distribución de probabilidad de la velocidad del viento.

Para resolver la integral propuesta, debe recurrirse a métodos numéricos.

## **3. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO**

Para poder ajustar una serie de datos históricos a una determinada distribución de probabilidad, debemos definir en primer lugar el modelo de probabilidad utilizaremos para realizar el ajuste.

Al estudiar datos empíricos de estas distribuciones, la distribución de probabilidad que se presenta con mayor frecuencia es la de Weibull, le siguen en importancia la de Rayleigh, y con bastante menor frecuencias han resultados de utilidad otras distribuciones como Log-Normal, Gamma y Frechét. La distribución de Rayleigh no es mas que un caso particular de la Weibull con parámetro de forma  $K = 2$ , por lo que el ajuste de los datos a una distribución de Weibull resulta mas general y la incluye.

Resulta difícil de encontrar fundamentos teóricos que justifiquen el uso de una u otra distribución para la distribución del viento. Por este motivo, la práctica más adecuada, resulta ser la de comparar los ajustes logrados para los distintos modelos mencionados y elegir el que mejor se comporta en cada situación.

#### **4. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA LAS POTENCIAS**

##### **a. Distribuciones de probabilidad para $P'$ y $P''$**

Una vez seleccionada la distribución de probabilidad de la velocidad del viento y estimados sus parámetros, interesa a estudiar las distribuciones de probabilidad de la potencia contenida en el viento  $P'$  y de la potencia aprovechable  $P''$ .

Se puede demostrar que para vientos cuya distribución de probabilidad es Weibull, tanto  $P'$  y  $P''$ , tendrán también distribución de Weibull respectivamente [1].

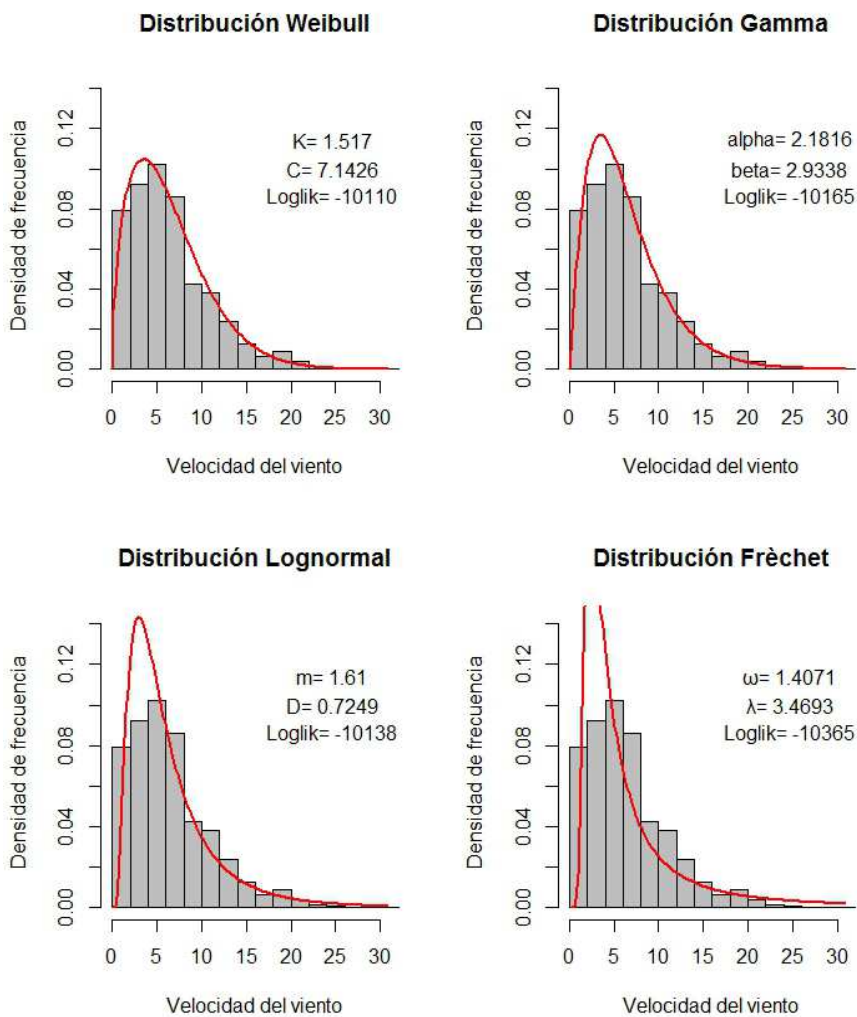
#### **5. APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE VIENTOS EN LA LOCALIDAD DE CUTRAL-CÓ**

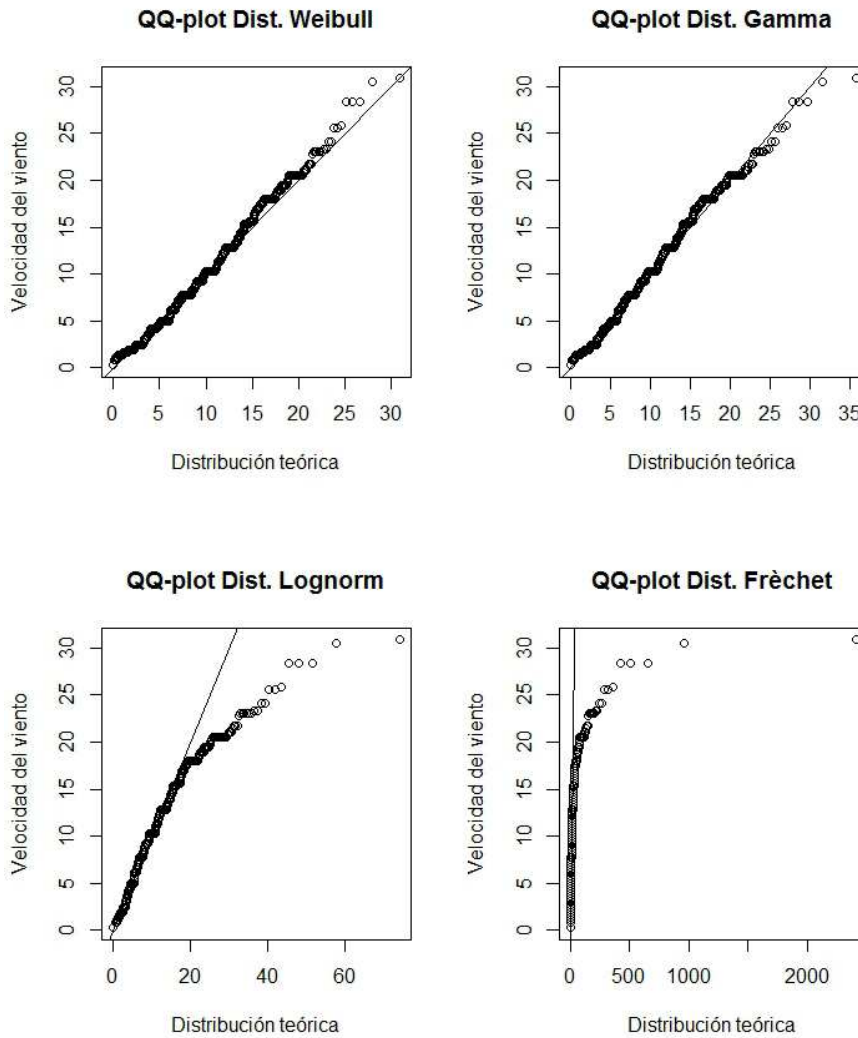
A los efectos de ejemplificar, se muestran a constinuación los resultados con el componente desarrollado para datos de velocidad del viento relevados en la localidad de Cutral-Có, provincia de Neuquén. Se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional FRN, al señor decano Ing. Pablo Livskovsky, a la secretaria académica Patricia González, al municipio y al personal del aeropuerto de Cutral-Có en facilitar los datos de velocidad del viento y sus características para realizar el presente trabajo.

##### **a. Elección de la distribución de probabilidad para la velocidad del viento**

Debe tenerse presente que los datos relevados requieren rigurosos procedimientos de validación y limpieza, previos a los análisis que se presentan en este estudio. Omitimos el detalle de los mismos a los efectos de concentrarnos los análisis correspondientes al presente trabajo.

Se presentan a continuación los ajustes de los datos a los tres modelos analizados (Weibull, LogNormal, Gamma y Frèchet). Para los cuatro modelos propuestos, el que presenta mejor ajuste considerando la verosimilitud es el modelo de Weibull. También se observa mejor comportamiento en los gráficos Q-Q Plot.





El viento, podrá considerarse entonces con una distribución Weibull con parámetro de escala  $C=7,14$  y parámetro de forma  $K=1,52$ . La velocidad media del viento es de 6,4 metros/segundo, mientras que el desvío estándar es de 4,6 metros/segundo.

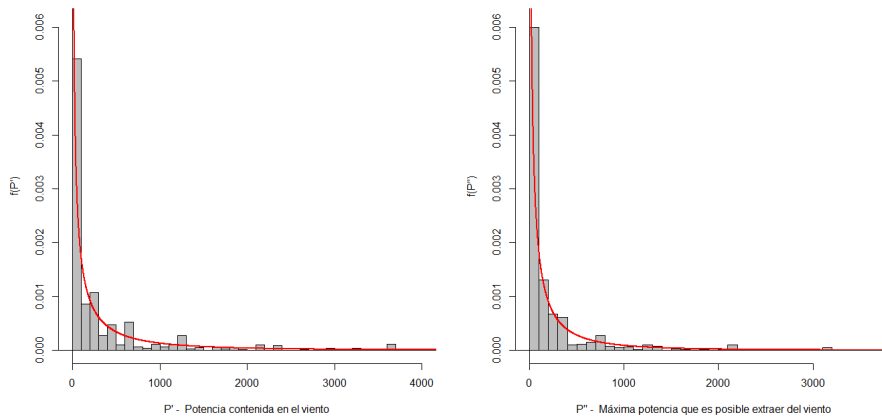
## b. Potencia contenida en el viento

Una vez definida la distribución de probabilidad adecuada para la velocidad del viento, podemos conocer la distribución de la potencia contenida en el viento  $P' = P_{Viento} = 0,5 \rho A v^3$  y de la máxima potencia que podemos extraer del mismo  $P'' = P_{Aprovechable} = 0,5 \rho A v^3$ .

Para el caso en que  $v$  tiene una distribución  $v \equiv Weibull(C; K)$ , puede demostrarse que  $P' = P_{Viento}$  posee la misma distribución  $P' = P_{Viento} \equiv Weibull(C' = C; K' = K / 3)$ . Para el caso que estamos analizando la distribución será entonces Weibull con parámetro de escala  $C=7,14$  y parámetro de forma  $K=0,49$ .

Para el mismo caso, puede demostrarse también que  $P'' = P_{Aprovechable}$  posee distribución  $P'' = P_{Aprovechable} \equiv Weibull(C'' = 0,59 C; K'' = K / 3)$ . En este caso los parámetros serán  $C=4,21$  y  $K=0,49$ .

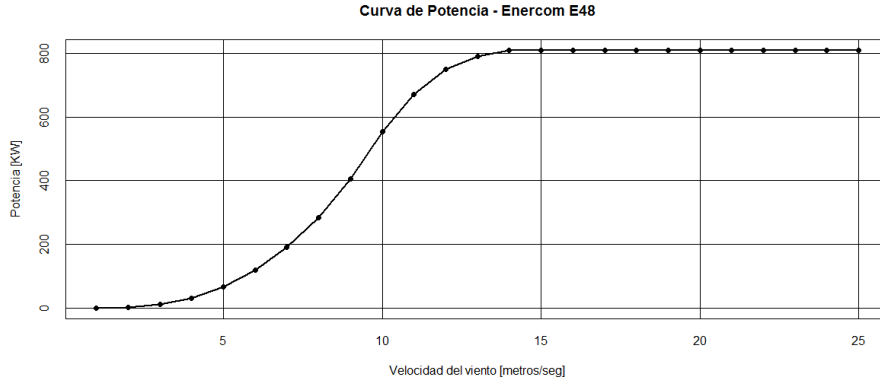
A continuación se presentan las distribuciones de  $P'$  y  $P''$  junto con los histogramas construidos a partir de los datos de velocidad de viento recolectados.



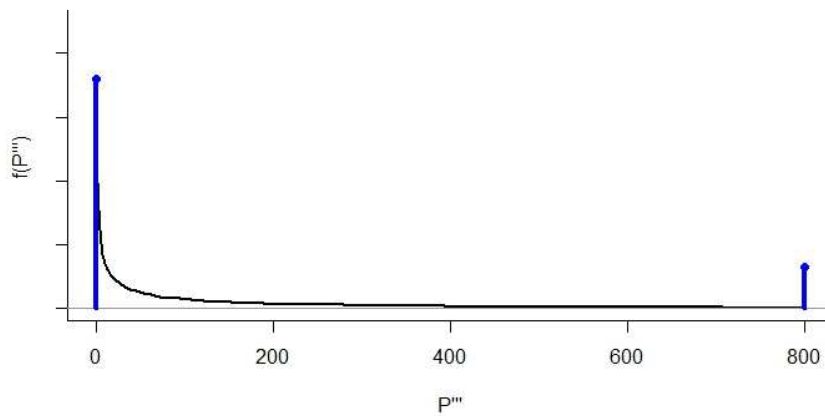
### c. Potencia obtenida por un aerogenerador

Para poder estimar la potencia que un aerogenerador puede producir en una determinada región, debemos tener en cuenta el generador estamos trabajando.

Para el presente trabajo hemos considerado un generador de marca Enercom E48 de 800 KW de potencia. La curva de potencia de este equipo se muestra a continuación.



Teniendo Si consideramos una velocidad de cut-in de 4 mts/seg y una velocidad de 22 mts/seg, podemos obtener una distribución de la potencia generada, la cuál graficamos en la siguiente figura. En ella vemos como nos encontramos con valores de probabilidad no nula que son:  $P''' = 0$  que corresponden a los momentos en que el molino no opera, es decir, cuando la velocidad del viento se encuentra por debajo del cut-in o por encima del cut-out. El otro valor de de probabilidad no nula es  $P''' = 800$  que se corresponde con la potencia nominal de 800 KW.



Resolviendo para este caso la integral  $E = t \times \int_{\text{velocidad Cut-in}}^{\text{velocidad Cut-out}} P(v) f(v) dv$ , obtenemos una energía promedio 2.204 MWh.

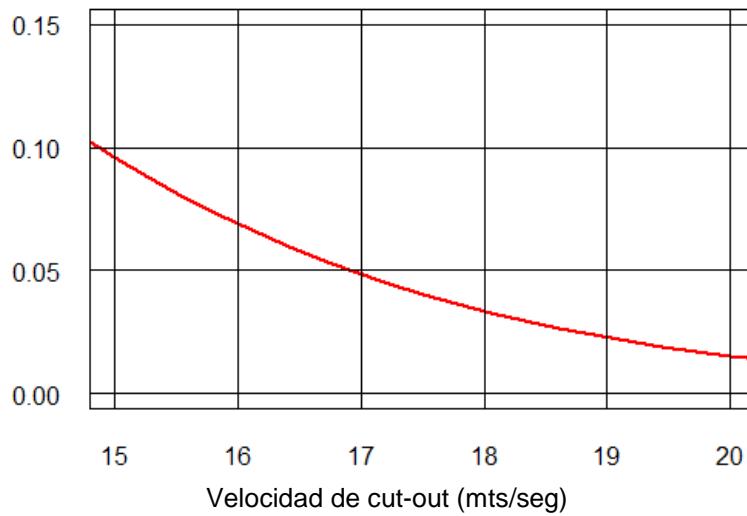


**d. Pérdidas por variación de cut-out**

El valor de cut-out de un aerogenerador puede ser modificado. Tener un valor de cut-out demasiado elevado puede ocasionar que esfuerzos en el molino que reducen su vida útil. Por el contrario, si el cut-out es bajo, se pierde generación de potencia juntamente cuando el aerogenerador puede entregar valores altos de energía.

Partiendo de la distribución de las potencias, podemos analizar las pérdidas de energía a partir en función del valor de cut-out. Esta información es punto de partida para poder optimizar el valor de cut-out adoptado.

*Proporción de energía perdida*



**e. Referencias y Bibliografía**

- [1] BONOLI M., GOGNI V., EDWARDS D., BUFANIO R. (2011) "Caracterización estadística de recurso eólico con fines energéticos". XXIX Coloquio Argentino de Estadística. Santa Fé.
- [2] BURTON, TONY; SHARPE, DAVID; JENKINS, NICK; BOSSANYI, ERVIN "Wind Energy Handbook." Wiley 2001.
- [3] CHENG, YEUNG (2002) "Generalized extreme gust wind speeds distributions" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol 90, Iss 12-15, Pages 1657-1669
- [4] SARKAR A, S SINGH, D MITRA (2011) "Wind climate modeling using Weibull and extreme value distribution" International Journal of Engineering, Science and Technology. Vol 3, No 5
- [5] MATTIO, HÉCTOR FERNANDO; TILCA, FERNANDO "Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores"(2009)
- [6] PRAMOD JAIN "Wind Energy Engineering". Mac Graw Hill (2011)
- [7] VILLANUEVA, D; FEIJÓO, A "Wind Power distributions: A review of their applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 1490-1495
- [8] Grupo GESE: Grupo de Estudios Sobre Energía. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Haedo.