

Capítulo 2.

Modelo de Producción Eólica Regional

Tabla de contenido

Capítulo 2. Modelo de Producción Eólica Regional	20
1 ¿Qué es la Energía Eólica?	20
2 Medición del Viento	21
3 Clasificación del viento.....	22
4 Naturaleza del viento	24
5 Potencia Eólica	28
6 Variaciones de Viento. Distribución Weibull.....	33
7 Curva de Potencia	36
8 Factor de Carga	37
9 Confiabilidad – Disponibilidad.....	38
10 Componentes de un aerogenerador	39

Capítulo 2. Modelo de Producción Eólica Regional

1 ¿Qué es la Energía Eólica?

La palabra eólico viene del griego Eolo, Dios del viento en la mitología griega. Hoy en día todos entendemos la energía eólica como la energía producida por el viento, energía cinética generada por el efecto de las corrientes de aire producidas por el movimiento de las masas de aire que desplazan áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

El viento es una manifestación indirecta de la energía solar, producida como resultado del diferente grado de calentamiento de la superficie terrestre por los rayos solares y por el movimiento de rotación de la Tierra sobre sí misma. Se considera que un 1-2% de la radiación solar incidente en las capas altas de la atmósfera, acaba transformada en la energía cinética de los vientos. Considerando que la aportación del Sol en su interacción con el sistema de la atmósfera de la Tierra es de 174.000 TW sólo 1,74 TW están destinados a mantener la circulación general de la atmósfera, es decir, los vientos. Esta cantidad supone unas 50-100 veces la energía obtenida por biomasa en todas las plantas de la Tierra.

En la utilización de la energía eólica interviene de forma decisiva, además de la velocidad media del viento, las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento.

Algunos de los puntos que hacen que este tipo de energía esté alcanzando tanta importancia en los últimos años se debe a que la energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles, contribuyendo a evitar el cambio climático. Además es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón, las centrales de combustible e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costes de reparar los daños medioambientales.

El generar energía sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde un punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable, por ser limpio y estar exento de problemas de contaminación. Es más, se suprimen radicalmente los impactos originados que supone la extracción de los combustibles, su transporte y combustión, lo que es sin duda muy beneficioso para la atmósfera. Además, evita la contaminación que conlleva el transporte de los combustibles: gas, petróleo, gasoil, carbón. Reduce el intenso tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales. Suprime riesgos de accidentes durante ese transporte y un sinfín de aspectos más. La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierra. Al contrario de lo que ocurre con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos, ni gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. No origina, tampoco, productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes.

Otras ventajas a destacar de la energía eólica es que puede ser instalada en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, en zonas no aptas para ser cultivables, etc.

- Anemómetros de presión (de bola y cuadrante, de tubo de Pitot, Best Romani, de ráfagas ERA, anemoclinómetro IMFL, anemómetros de sección variable (ventímetros, rotámetros).

Los anemómetros Best Romani tienen apreciaciones de tiempo inferiores a la décima de segundo permitiendo registros de velocidad casi instantáneos. Para obtener las magnitudes fundamentales necesarias para el dimensionamiento de un equipo, se emplean anemómetros acoplados a aparatos registradores con el objeto de tener la variación de la intensidad del viento en función del tiempo.

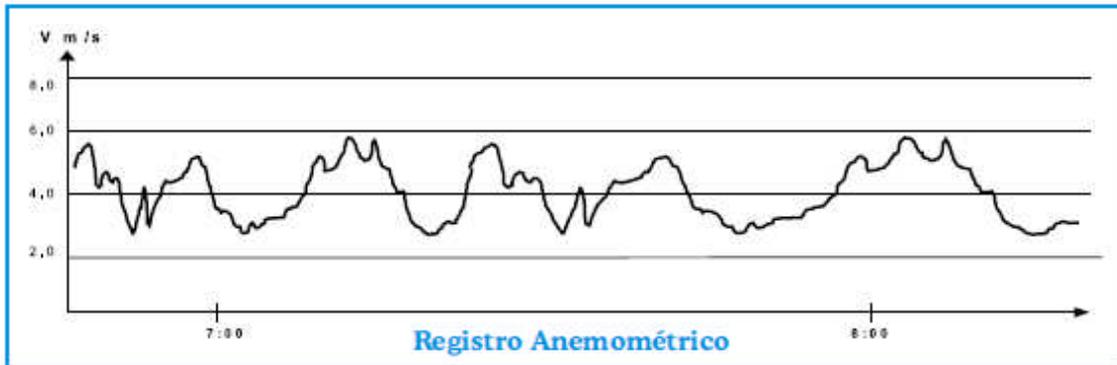


Ilustración 2. Registro de un Anemómetro

3 Clasificación del viento

Se ha establecido una escala de velocidades de vientos llamada Beaufort que clasifica los vientos en 17 categorías.

Grados Beaufort	Nudos		m/s		km/h		Descripción	Presión s/superficie Plana en daN/m ²	
	de	a	de	a	de	a		de	a
0	<	1	0	0.2	<	1	Calma		
1	1	3	0.3	1.5	1.0	3.0	Ventolina	0.0	0.3
2	4	6	2.1	3.1	7.4	11.1	Brisa Suave	0.6	1.2
3	7	10	3.6	5.1	13.0	18.5	Brisa Leve	2	3
4	11	16	5.7	8.2	20.4	29.7	Brisa Moderada	4	9
5	17	21	8.8	10.8	31.5	38.9	Viento Refrescante	10	15
6	22	27	11.3	13.9	40.8	50.0	Viento Fuerte	17	25
7	28	33	14.4	17.0	51.9	61.2	Viento muy Fuerte	27	38
8	34	40	17.5	20.6	63.0	74.1	Temporal	40	55
9	41	47	21.1	24.2	76.0	87.1	Temporal Fuerte	58	76
10	48	55	24.7	28.3	89.0	101.9	Temporal muy Fuerte	79	104
11	56	63	28.8	32.4	103.8	116.8	Tempestad	108	137
12	64	71	32.9	36.5	118.6	131.6	Huracán	141	174
13	72	80	37.1	41.2	133.4	148.3		179	220
14	81	89	41.7	45.8	150.1	164.9		226	273
15	90	99	46.3	51.0	166.8	183.5		279	338
16	100	108	51.5	55.6	185.3	200.1		344	402
17	109	118	56.1	60.7	202.0	218.7	Ciclón	409	480

Ilustración 3. Clasificación del Viento Beaufort (a)

Equivalencias:

$$1 \frac{m}{s} = 3,6 \frac{km}{h} = 2,237 \frac{millas}{h} = 1,944 \text{ nudos}$$

$$1 \text{ nudo} = 1 \frac{\text{milla náutica}}{h} = 1,125 \frac{millas}{h} = 1,852 \frac{km}{h} = 0,5144 \frac{m}{s}$$

Grados Beaufort	Criterios de Apreciación en el Mar
0	Mar en calma
1	Se forman rizos con aspecto de escamas pero sin espuma en las crestas
2	Rizos cortos, pero pronunciados. Crestas con aspectos cristalinos que no se rompen
3	Grandes Rizos. Las crestas comienzan a romper. Espuma de aspecto cristalino
4	Las olas cortas se alargan
5	Se forman crestas en las ondas de aguas acumuladas e estanques y lagunas
6	Comienzan a formarse grandes olas. Las crestas de espuma blanca se forman por todas partes. Brumazones
7	Se agita y la espuma de blanca de las olas comienza a formar regueros
8	Olas altas de mayor longitud. Las crestas comienzan a pulverizarse en brumas. La espuma se escapa
9	Las olas muy altas comienzan a romperse. Las brumas reducen la visibilidad
10	Se rompen violentamente las olas muy altas. Masas de espuma. Superficie del agua blanca. Visibilidad pobre

Ilustración 4. Clasificación del Viento Beaufort (b)

Grados Beaufort	Criterios de Apreciación en Tierra
0	El humo se eleva verticalmente
1	El viento inclina el humo pero no hace girar las veletas
2	Las hojas se mueven. El viento se siente en el rostro, giran las veletas
3	Las hojas y ramas pequeñas se mueven continuamente. Las banderas de tejido suave se extienden
4	El viento levanta el polvo y papeles sueltos, las ramas se agitan
5	Los árboles pequeños frondosos empiezan a balancearse
6	Se mueven ramas grandes. Vibran los hilos eléctricos, se oye el silbido. Resulta difícil utilizar el paraguas
7	Los árboles se agitan. Es molesto caminar contra el viento
8	Se rompen las ramas pequeñas. Se hace difícil caminar
9	Las ramas medianas se quiebran. Pequeños daños en las estructuras edilicias (se arrancan sombreretes de chimeneas, tejas de los techos, etc.)
10	Los árboles son arrancados de cuajo y daños estructurales considerables
> 11	Destrozos extensos. Techos arrancados, etc.

Ilustración 5. Clasificación del Viento Beaufort (c)

4 Naturaleza del viento

Los vientos tienen distinto origen o naturaleza según la escala geográfica en la que varían, así distinguimos variaciones de viento a escala global (~10.000 km), en la macro-escala (~1.000 km), en la meso-escala (~100 km) y en la micro-escala (~10 km).

Variación a escala global (Circulación Atmosférica)

La Causa del viento a escala global es el desigual calentamiento de la tierra (también causa de vientos a menor escala)

La circulación atmosférica tiene lugar en la troposfera, zona inferior de la atmósfera que contiene 4/5 de la masa de ésta y cuyo espesor alcanza 7 km en el polo y 17 km en el ecuador. Tiene su origen en dos causas fundamentales.

Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores cálidos, rojo, naranja y amarillo, en la siguiente imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar (tomada de un satélite de la NASA, NOAA-7, en julio de 1984).

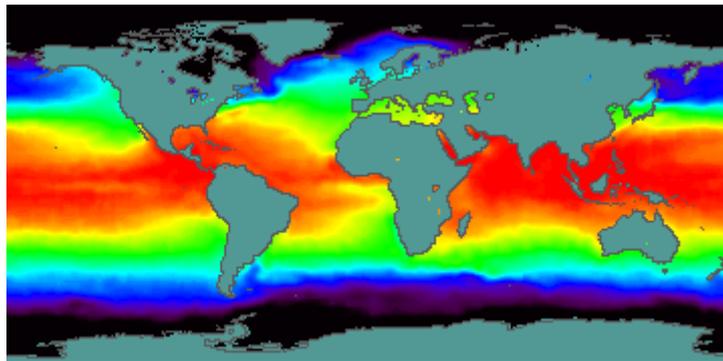


Ilustración 6. Imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar tomada por el satélite de la NASA, NOAA-7.

El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo no rotase, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al ecuador.

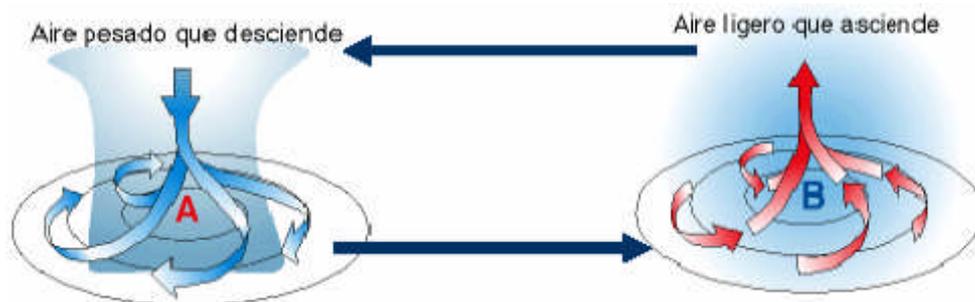


Ilustración 7. Movimiento del aire en la atmósfera(a)

La radiación solar, más intensa en los polos, es el factor determinante.

La rotación de la tierra produce desvíos de los vientos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur y por efecto centrífugo una sobre-elevación de la altura de la atmósfera en el ecuador.

La circulación general de la atmósfera como término medio, puede representarse esquemáticamente al nivel de la superficie terrestre como se señala en la *Ilustración 7*.

En cada hemisferio se pueden distinguir tres núcleos más o menos individualizados: tropical, templado y polar. Los núcleos tropicales, a ambas partes del ecuador, están separados por la zona de las calmas y bajas presiones ecuatoriales. Los núcleos templados están separados de los anteriores por zonas de altas presiones subtropicales, y de los núcleos polares por ejes de depresión situados hacia los paralelos de latitud 60°.

El esquema presentado no es perfecto. El desigual calentamiento de los océanos y continentes, la existencia del relieve y las variaciones de las estaciones implican deformaciones y una partición de las zonas de altas y bajas presiones.

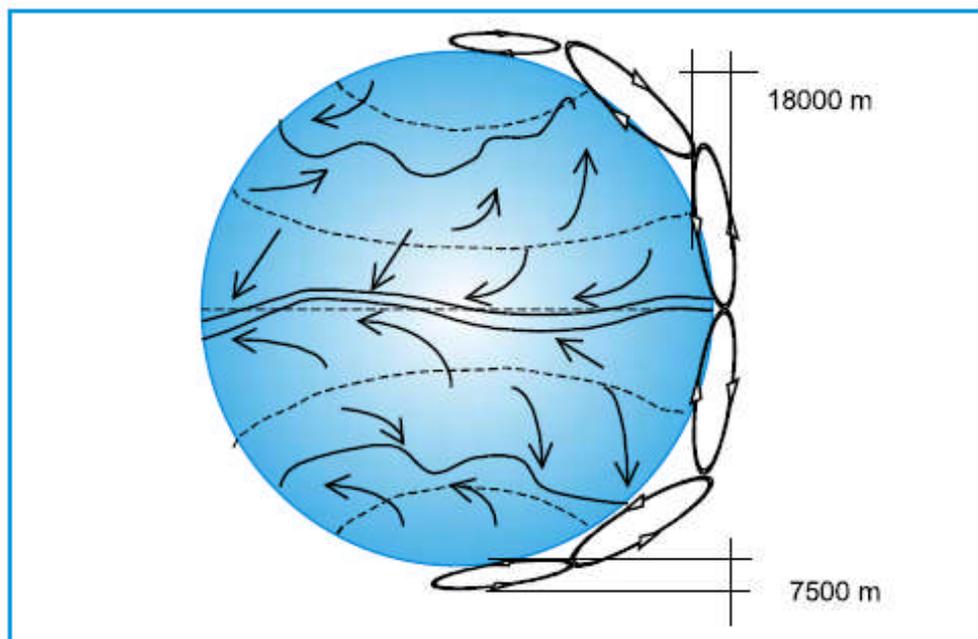


Ilustración 8. Movimiento del aire en la atmósfera (b)

Variación estacional en la energía eólica

Como consecuencia del desplazamiento en la superficie de la tierra de las zonas de alta presión (anticiclones) y de zonas de baja presión, la velocidad y dirección del viento varía generalmente a lo largo del año. Las isostaquias de enero son diferentes a las de julio. Como la posición de las áreas ciclónicas y anticiclónicas depende de la posición del sol respecto del ecuador, se observa una variación más o menos cíclica del viento en intensidad y en dirección.

Variaciones diurnas (noche y día) del viento

Los vientos sufren oscilaciones diarias debido a efectos de convección. Siendo el calor específico de la tierra inferior al del agua, aquélla se calienta más rápidamente que el mar bajo el efecto de la radiación solar. Por ello, cuando el tiempo es bueno, se originan movimientos de convección sobre la parte continental. Durante el día se produce una corriente de aire en las proximidades del suelo, en el sentido del mar hacia la tierra. Por la tarde el fenómeno se invierte al enfriarse la tierra con más rapidez que el mar. Estos fenómenos se observan hasta a 50 km de la costa y alrededor de los grandes lagos.

En las montañas se originan brisas, a partir de las 10:00 horas el viento circula del valle a la montaña por que los montes se calientan antes. Por la tarde la corriente se invierte.

Cabe aclarar, que la presencia de vientos dominantes pueden modificar sensiblemente las conclusiones indicadas sobre las brisas. Aquí el viento dominante se compone con las corrientes de convección para dar como resultante el viento real. Como las brisas dependen de los fenómenos térmicos, se deduce que también se producen variaciones diarias más o menos cíclicas en la intensidad y dirección del viento.

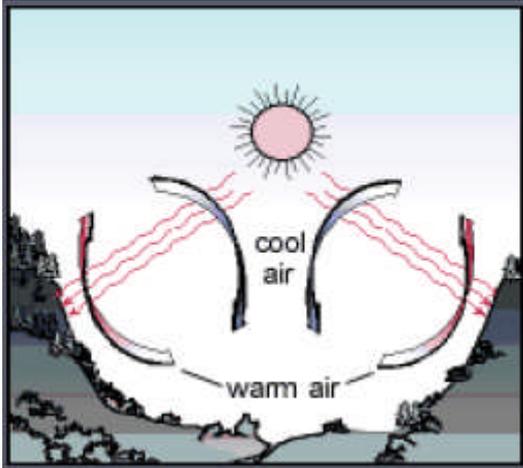


Ilustración 9. Vientos Diurnos

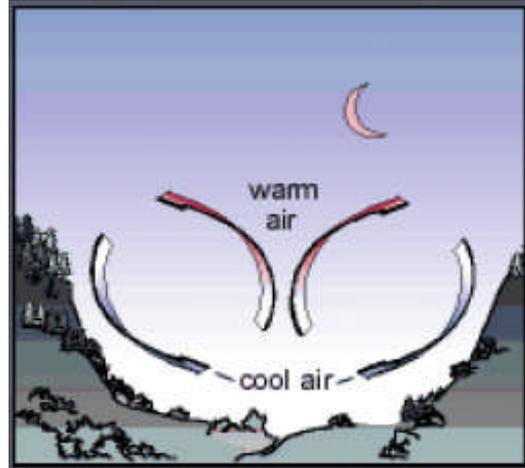


Ilustración 10. Vientos Nocturnos

Variabilidad del viento a corto plazo

Determinados registros anemométricos realizados, muestran que la velocidad instantánea del viento varía continuamente en magnitud y dirección. En intervalos de tiempo muy cortos, como un segundo, la velocidad puede duplicarse y la dirección variar considerablemente. El movimiento del aire puede considerarse como la superposición de un viento de velocidad uniforme y de turbulencias. Con anemómetros de precisión se han determinado variaciones en la velocidad del viento de 23 m/s a 37 m/s en un cuarto de segundo, acompañada de una variación de dirección de 20° (14m/s con 20° en 0,25s).

Un remolino simple cuya velocidad tangencial es V , arrastrado por la corriente uniforme V_m da origen a una oscilación de velocidad y dirección según la fórmula:

$$V = V_m + V$$

Cuando V_m y V son del mismo sentido, la velocidad es máxima. Cuando V_m y V son de sentido opuesto, la velocidad es mínima.

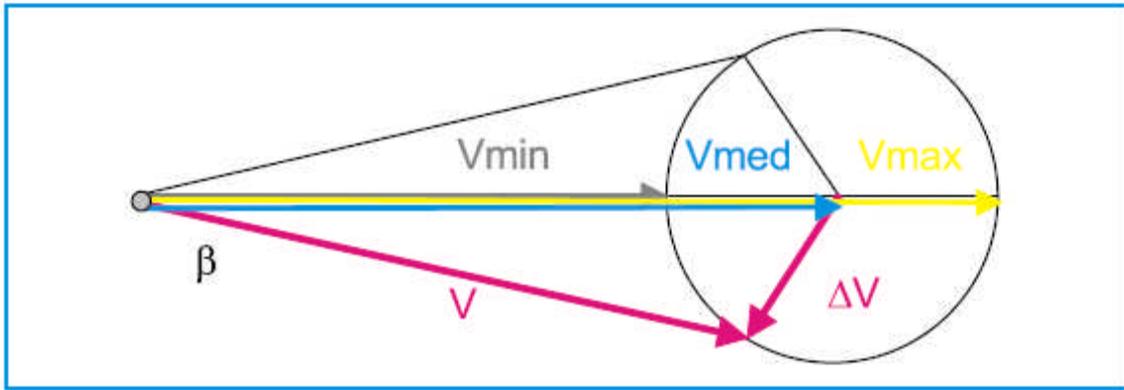


Ilustración 11. Variabilidad del viento a corto plazo

La relación V/V_m varía habitualmente entre 0,3 y 0,4.

En la hipótesis de que V sea constante podemos escribir:

$$V_{max} = V_m + V$$

$$V_{min} = V_m - V$$

De aquí se deduce:

$$V_m = (V_{max} + V_{min})/2$$

$$V = (V_{max} - V_{min})/2$$

Si se designa por β al ángulo que forma V_m con la dirección de la velocidad instantánea V , la oscilación máxima puede calcularse por la expresión:

$$\sin \beta = V/V_m$$

Variación de la Velocidad del Viento con la Altura

El aumento de la velocidad del viento, a medida que nos separamos del suelo, es un fenómeno bien conocido. Así de 2 m/s a 20 m de altura la velocidad del viento pasa a 7 u 8 m/s a 300 m de altura.

La reducción de la velocidad en las proximidades del suelo se debe a la reducción experimentada por la vegetación, construcciones y obstáculos de otras clases.

Las determinaciones meteorológicas nos demuestran que el crecimiento relativo de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo varía de un punto a otro.

Varios autores han propuesto la siguiente expresión para representar la ley de variación de la velocidad del viento:

$$V/V_0 = (H/H_0)^n$$

Siendo V_0 la velocidad observada a la altura H_0 y V la velocidad observada a la altura H .

Generalmente se toma para H_0 el valor 10 m, n es un coeficiente que varía desde 0,10 a 0,40.

También se puede aplicar la siguiente ley logarítmica:

$$V/V_0 = \log(H/z_0)/\log(H/z)$$

Donde z_0 es la longitud relativa de la rugosidad del suelo.

Tipo de terreno	z_0 en m	n
Liso (mar, arena, nieve)	0.001-0.02	0.10-0.13
Moderadamente rugoso (hierba corta, campos de trigo u otros cereales, regiones rurales)	0.02-0.3	0.13-0.20
Rugosos (bosques, barrios)	0.3-2	0.20-0.27
Muy Rugoso (ciudades, altos edificios)	2-10	0.27-0.40

Ilustración 12. Variación de la Velocidad del Viento con la Altura

En la tabla se indican los valores de z_0 y n en función de rugosidades diversas.

Se debe destacar que las alturas H y H_0 no son relativas al suelo, sino respecto a un nivel de viento nulo. Esta puede ser por encima de los tallos de los cereales o la altura de ramaje de los árboles. Puede plantearse la relación entre z_0 y n siguiente:

$$n = 0,04 \ln z_0 + 0,003 \ln z_0^2 + 0,24$$

Como la energía susceptible de ser captada es proporcional al cubo de la velocidad (como más adelante se demostrará), se deduce que la relación entre las energías disponibles a H metros y a H_0 metros sobre el suelo viene dada por la expresión:

$$E/E_0 = (H/H_0)^{3n} \text{ con } 0,30 < 3n < 1,20$$

Por lo tanto será de gran importancia para recoger el máximo de potencia colocar los generadores lo más alto posible.

5 Potencia Eólica

Energía del viento

Una masa de aire m con movimiento uniforme unidireccional de velocidad v tiene una energía cinética:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Si ρ es la densidad del aire de la corriente uniforme, la energía por unidad de volumen de esta masa es:

$$e = \frac{1}{2}\rho v^2$$

El flujo volumétrico Q a través de una superficie de control estacionaria de sección frontal A es:

$$\dot{Q} = Av$$

Luego, el flujo de energía o potencia eólica de la corriente a través de A es:

$$P = e\dot{Q} = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Esta expresión nos muestra la gran dependencia de la potencia con la velocidad.

Asimismo nos indica la conveniencia de operar a nivel del mar, donde la densidad es máxima, con un valor medio de $1,225 \text{ kg/m}^3$. Permitámonos obtener la potencia eólica de una corriente uniforme, en principio enteramente disponible para su transformación en otra forma de energía mecánica, por metro cuadrado de sección y a nivel del mar y para varias velocidades del viento. Los resultados se muestran en la tabla.

Velocidad (m/s)	1	2	5	7	10	20	40
Fuerza del viento (grados Beaufort)	1	2	3	4	5	9	12
Definición por observación de sus efectos	No mueve banderas.	Mueve banderas.	Extiende banderas	Levanta polvo. Mueve las ramas pequeñas de árboles	Mueve los árboles pequeños. En estanques forma pequeñas olas	Desperfectos en partes salientes de edificios. Derribo de chimeneas	No hay experiencia
Densidad de potencia (W/m^2)	0,6	4,9	76	210	612	$4,9 * 10^3$	$39 * 10^3$
Energía anual kWh	5,3	43	666	$1,84 * 10^3$	$5,36 * 10^3$	$42,9 * 10^3$	$341 * 10^3$
Presión dinámica (mbar)	$6,1 * 10^{-3}$	0,025	0,15	0,30	0,61	2,45	9,8

Ilustración 13. Relación entre la velocidad del viento, su valor en grados Beaufort, sus efectos fácilmente apreciables, la densidad de potencia, la energía a lo largo de un año y la presión dinámica.

Puede deducirse de los valores obtenidos que por encima de 5 m/s la densidad de potencia del viento es interesante.

La totalidad de la energía cinética del viento no puede extraerse, debido a que se trata de una corriente abierta, por lo que una deceleración substancial hace que la corriente rodee a la masa de aire remansada, reduciéndose el caudal por la sección preparada para su captura. Adicionalmente, aparecen pérdidas de diverso tipo en la extracción de la energía, en su transmisión mecánica y finalmente en su conversión eléctrica.

Por ello se define el coeficiente de potencia C_p , a modo de eficiencia de conversión, como el cociente entre la potencia extraída, es decir, aprovechada P_a , y la disponible en el viento. Para una corriente estacionaria valdría:

$$C_p = \frac{P_a}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

Un valor representativo máximo es del orden de 0,4 para una aeroturbina o aerogenerador moderna de tipo rápido. La *Ilustración 14* muestra el coeficiente de potencia máximo obtenible para distintos tipos de aeroturbinas actuales como función del parámetro λ de velocidad del rotor. Las aeroturbinas rápidas presentan una serie de ventajas:

- Se obtienen elevados valores de C_p junto con un amplio margen de velocidades para los que son posibles valores aceptables.
- Proporcionan rotores más ligeros, debido fundamentalmente a aumentar la velocidad relativa a la pala y con ello los efectos aerodinámicos, siendo por lo tanto posible construirlo de menor anchura (cuerda).
- La rapidez del rotor ocasiona que para igual potencia sea menor el par ($P = C \omega$), reduciéndose las cargas sobre la parte lenta del eje, con lo que puede construirse más ligero. Un régimen de giro alto del rotor requiere una multiplicación menor en la caja de engranajes, reduciéndose su costo y aumentando su eficiencia. Veremos que la

obtención de elevados coeficientes de potencia para λ elevados requiere de un diseño aerodinámico depurado.

- Afortunadamente, el reducido C_p a bajas velocidades, que ocasiona pares bajos en el arranque, es compatible con el bajo par de arranque de los generadores eléctricos.

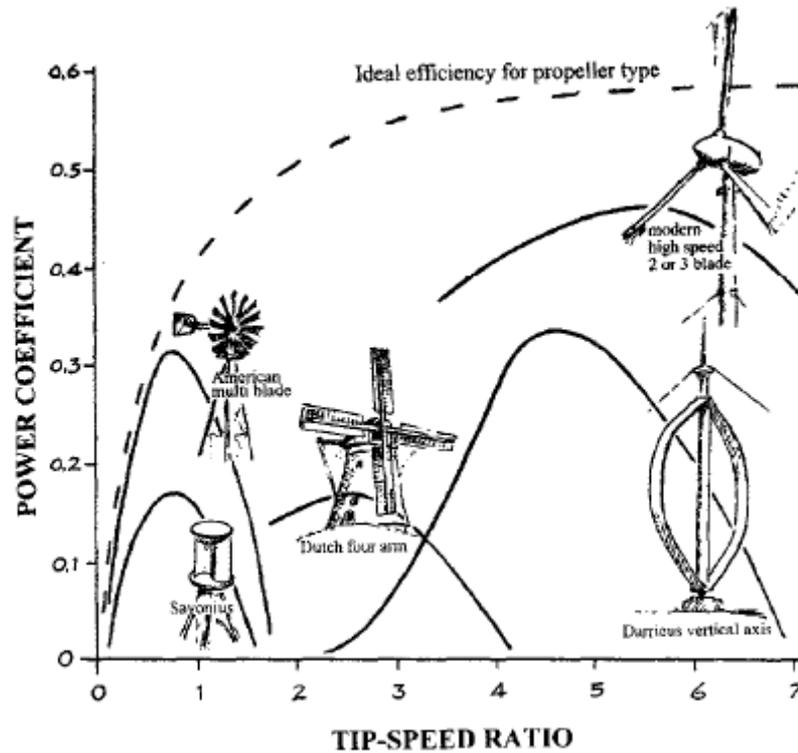


Ilustración 14. Coeficiente de potencia C_p para diferentes tipos de Aerogeneradores

Figura 2.1.1.1.- Variación del coeficiente de potencia C_p máximo con el parámetro de velocidad del rotor para diferentes tipos de aeroturbinas con tecnología actual.

El área de referencia para calcular P en una aeroturbina es la de la sección recta frontal al viento de la zona afectada por el giro de las aspas. Para una aeroturbina de eje horizontal es $A = \pi D^2/4$, siendo D el diámetro del rotor.

La densidad del aire ρ puede cambiar por efecto de la climatología, afectando de manera detectable la potencia disponible.

Por tanto la fracción de la energía del viento que una turbina convierte en la práctica en energía mecánica de rotación se llama "coeficiente de potencia" (C_p) de esa turbina.

$$\text{Potencia de la turbina} = C_p * \text{Potencia del Viento} = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3$$

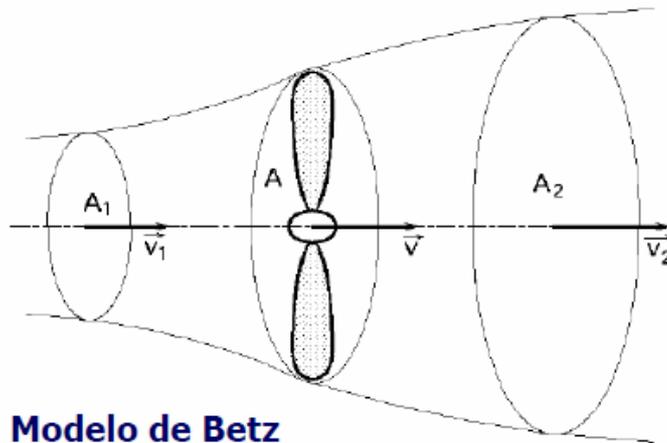
En el apartado siguiente calcularemos cual es el máximo coeficiente de potencia con que puede funcionar una turbina, el denominado límite de Betz.

Límite de Betz

En su extraordinaria obra de 1926, Albert Betz publicó la teoría sobre los rotores eólicos, consiguiendo presentar a un público relativamente amplio las bases teóricas de la energía

eólica. A continuación se presenta lo esencial de la teoría de Betz para un mejor entendimiento del funcionamiento de un aerogenerador.

Sea un tubo de corriente como el esquematizado en la Ilustración. Se supondrá que, a barlovento de la hélice, el aire posee una velocidad v_1 (velocidad del viento sin perturbar) en la sección transversal A_1 , mientras que la velocidad v_2 se corresponde con la sección transversal A_2 a sotavento de la zona en que se encuentra la hélice. En el plano que contiene la hélice, la sección transversal batida por la misma (área del rotor) es un disco imaginario de área A , siendo v la velocidad del viento en la misma (velocidad útil). Asimilamos la hélice a un disco de área A que capta parte de la energía del aire en movimiento que llega a él, es decir $v_2 < v < v_1$. Sin embargo, es obvio que v_2 nunca es cero (no puede extraerse toda la energía cinética del aire).



Modelo de Betz

Ilustración 15. Modelo de Betz

El caudal másico ($Qm = \text{densidad} * \text{caudal} = \rho Q$) es constante (conservación de la masa), es decir:

$$Qm = \rho Q = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A v$$

(Esto explica que el tubo de corriente se ensanche tras la turbina, como $v_2 < v < v_1$, entonces $A_2 > A > A_1$)

Podemos expresar la potencia útil transferida por el viento a la turbina de dos maneras:

i) Pérdida, por unidad de tiempo, de energía cinética del viento al pasar por la hélice:

$$P_{\text{útil}} = \frac{-\Delta E_k}{\Delta t} = \frac{E_{k1} - E_{k2}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \rho A d (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (1)$$

Donde hemos utilizado los argumentos y variables definidas; en particular nótese que

$$v = d / \Delta T$$

ii) el trabajo generado, por unidad de tiempo, por la fuerza del viento (igual, por las leyes 2ª y 3ª de Newton, a menos la tasa de cambio en la cantidad de movimiento del aire al pasar por la hélice) sobre el área A :

$$P_{\text{útil}} = Fv = \frac{\rho A d(v_1 - v_2)}{\Delta t} v = \rho A v(v_1 - v_2) \quad (2)$$

Nótese que por la 3ª ley de Newton:

$$\text{Fuerza del viento} = -\text{Fuerza sobre el viento} = \frac{-m(v_2 - v_1)}{\Delta t} v = \rho A v(v_1 - v_2)$$

De las ecuaciones (1) y (2) anteriores tenemos que

$$\frac{1}{2} \rho A v(v_1^2 - v_2^2) = \rho A v(v_1 - v_2)$$

Y, por tanto, recordando que $(a^2 - b^2) = (a + b)(a - b)$, que

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (3)$$

Es decir, en el modelo de Betz, y para que las ecuaciones (1) y (2) sean consistentes entre sí, la velocidad del viento en el plano de la hélice (velocidad útil) es la media de las velocidades del viento antes y después de la misma.

Insertemos este resultado en la expresión (1) para la potencia de la turbina, y hagamos el cambio $v_2 = bv_1$ (sabemos que $0 < b < 1$):

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v_1 + bv_1}{2} \right) (v_1^2 - b^2 v_1^2) = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 (1 + b)(1 - b^2) \quad (4)$$

El valor máximo para la potencia se obtiene ahora haciendo

$$\frac{dP_{\text{útil}}}{db} = 0$$

, que nos deja:

$$(1 - b^2) + (1 + b)(-2b) = (1 + b)(1 - 3b) = 0$$

Soluciones:

$$b = 1 \text{ (sin sentido físico)}$$

$$b = \frac{1}{3} \Rightarrow v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

De modo que la potencia máxima se obtiene sustituyendo en la ecuación (4):

$$P_{\text{útil}} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

es decir, el coeficiente de potencia máximo (ideal) de una turbina eólica es:

$$C_p^{Betz} = \frac{16}{27} \approx 59 \%$$

Conocido como el Límite de Betz

La ecuación de Betz proporciona el límite superior de las posibilidades de un aerogenerador, pero es todavía poco realista al no tener en cuenta una serie de factores como:

- La resistencia aerodinámica de las palas
- La pérdida de energía por la estela generada en la rotación
- La compresibilidad del fluido
- La interferencia de las palas

Además, habrá que tener en cuenta además el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador, por lo que considerando (por ejemplo) el siguiente balance para los distintos componentes:

- Rendimiento de Betz	59,3%
- Rendimiento de la hélice	85%
- Rendimiento del multiplicador	98%
- Rendimiento del alternador	95%
- Rendimiento del transformador	98%

Se obtiene un rendimiento global de la instalación del orden del 46%.

6 Variaciones de Viento. Distribución Weibull

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costes de generación. Los inversores necesitan la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad.

Si se mide las velocidades del viento a lo largo de un año se observa que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes. La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull, como la mostrada en la Ilustración.

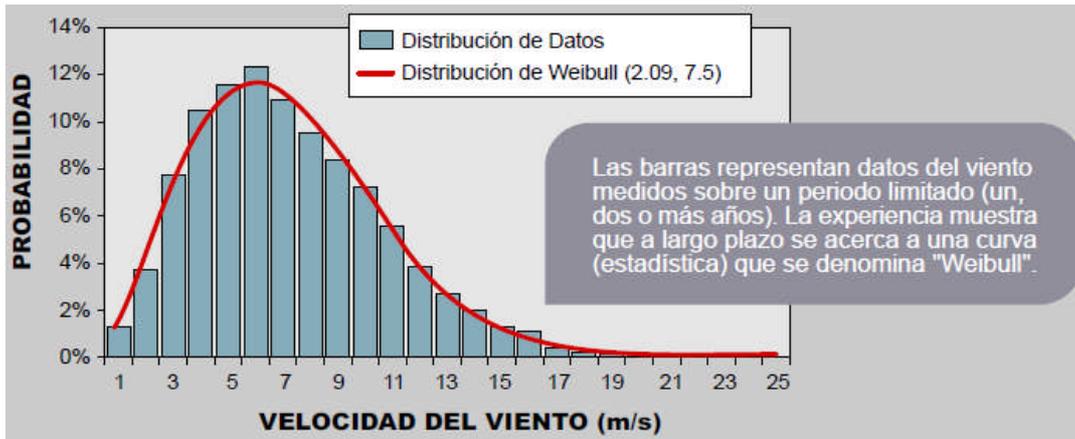


Ilustración 16. Distribución de Weibull. Expresa con que frecuencia sopla el viento en un rango de velocidad determinado.

Este emplazamiento particular tiene una velocidad media del viento de 7,5 metros por segundo, y la forma de la curva está determinada por un parámetro de forma de 2. El gráfico muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sopla a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 por cien. La mitad del área azul está a la izquierda de la mediana de la distribución. Esto significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de la velocidad mediana y la otra mitad soplará a más de la velocidad mediana.

Puede preguntarse por qué decimos entonces que la velocidad del viento media es de 7,5 m/s. La velocidad del viento media es realmente el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos en ese emplazamiento. Como podrá observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces tendrá velocidades de viento muy altas, pero son muy raras. Por otro lado, las velocidades del viento de 5,5 m/s son las más comunes. Los 5,5 metros por segundo es el llamado valor modal de la distribución. Si multiplicamos cada diminuto intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y los sumamos todos, obtenemos la velocidad del viento media. La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Por lo tanto, la Distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en el valor medio. Si el parámetro de forma es exactamente 2, como en el gráfico de esta página, la distribución es conocida como distribución de Rayleigh. Los fabricantes de aerogeneradores proporcionan gráficas de rendimiento para sus máquinas usando la distribución de Rayleigh.

Distribución de Probabilidad Weibull y Rayleigh

Como ya hemos descrito, una forma muy común de caracterizar la velocidad del viento en un emplazamiento es mediante una distribución de probabilidad, usando normalmente las distribuciones de Rayleigh y Weibull.

La función de probabilidad de Weibull para una variable aleatoria x es:

$$f(x, \lambda, k) = \begin{cases} -\frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Donde $k > 0$ es el parámetro de forma y $\lambda > 0$ es el parámetro de escala. En muchas bibliografías se denomina al parámetro de escala λ como c, y guarda una estrecha relación con la velocidad media de la distribución. En la siguiente ilustración se muestran diferentes distribuciones de Weibull para diferentes valores de sus parámetros λ y k.

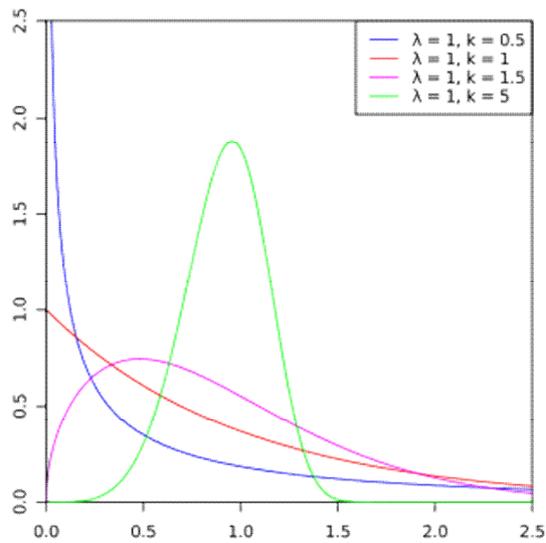


Ilustración 17. Representación de la función de densidad de Weibull para diferentes valores del parámetro de forma k.

El parámetro de escala (λ) da información sobre lo amplia que es la distribución y el parámetro de forma (k) afecta a la curvatura de la función.

Por otro lado se tiene la función de densidad de probabilidad de Rayleigh:

$$f(x, \sigma) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Donde σ es un número real que condiciona la función. En la ilustración siguiente se representan las funciones de densidad de probabilidad de la distribución de Rayleigh para diferentes valores del parámetro σ .

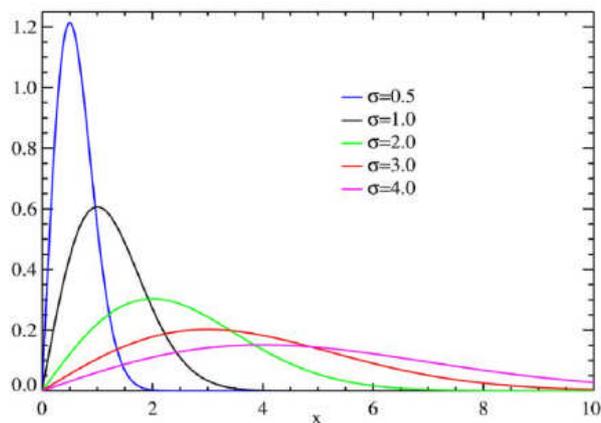


Ilustración 18. Distribución de densidad de probabilidad de Rayleigh para diferentes valores del parámetro σ .

El parámetro σ da información del rango de valores donde probablemente se encontrará siempre la velocidad del viento.

Como ya se ha mencionado la distribución de Weibull es una generalización de la de Rayleigh, cuando el parámetro de forma vale 2.

7 Curva de Potencia

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. Dos velocidades características en estas curvas son:

- Velocidad de Conexión

Normalmente, los aerogeneradores están diseñados para empezar a girar a velocidades alrededor de 3-5 m/s. Es la llamada velocidad de conexión. El área azul de la izquierda (en la gráfica de la página anterior) muestra la pequeña cantidad de potencia perdida debido al hecho de que la turbina sólo empieza a funcionar a partir de, digamos, 5 m/s.

- Velocidad de Corte

El aerogenerador se programará para pararse a altas velocidades del viento, de unos 25 m/s, para evitar posibles daños en la turbina o en sus alrededores. La velocidad del viento de parada se denomina velocidad de corte. La minúscula área azul de la derecha representa la pérdida de potencia.

Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas realizadas en campo, dónde un anemómetro es situado sobre un mástil relativamente cerca del aerogenerador (no sobre el mismo aerogenerador ni demasiado cerca de él, pues el rotor del aerogenerador puede crear turbulencia, y hacer que la medida de la velocidad del viento sea poco fiable). Si la velocidad del viento no está variando demasiado rápidamente, pueden usarse las medidas de la velocidad del viento realizadas con el anemómetro y leer la potencia eléctrica disponible directamente del aerogenerador, y dibujar los dos tipos de valores conjuntamente en un gráfico como el mostrado en la ilustración.

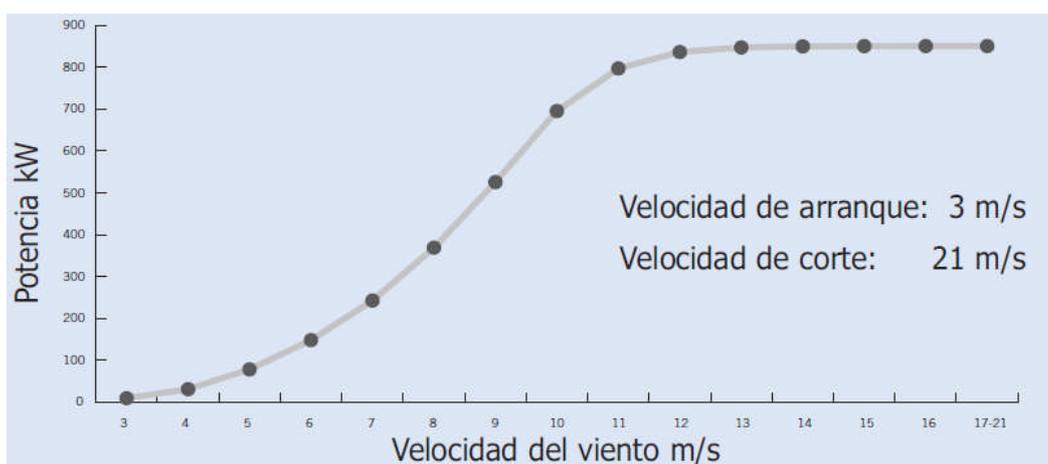


Ilustración 19. Curva de Potencia Aerogenerador modelo G58 del Fabricante Gamesa

Es práctica habitual obtener de forma rápida la potencia que dará cada aerogenerador en una ubicación usando la representación de la distribución de probabilidad de Weibull del viento y la curva del aerogenerador en cuestión. La Weibull queda definida por los datos de viento a la altura del aerogenerador, por lo que se debe calcular la distribución correspondiente para cada caso. Este cálculo ayudará a elegir el aerogenerador más conveniente en una primera aproximación.

8 Factor de Carga

Otra forma de conocer la producción anual de energía de un aerogenerador es mirar el factor de carga de una turbina en su localización particular. Con factor de carga queremos decir la producción anual de energía dividida por la producción teórica máxima, si la máquina estuviera funcionando a su potencia nominal (máxima) durante las 8.766 horas del año.

$$F_c = \frac{\text{Producción de energía en un periodo de tiempo}}{\text{Potencia Nominal} * \text{horas del periodo considerado}}$$

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 muy frecuentemente están alrededor del 20 al 30 por ciento.

Aunque generalmente se preferiría tener un gran factor de carga, puede no ser siempre ventajoso desde el punto de vista económico. Esto puede ser difícil de comprender para aquellos que están acostumbrados a la tecnología convencional y nuclear.

A) En localizaciones con mucho viento, por ejemplo, puede ser ventajoso usar un generador más grande (de mayor potencia nominal) con el mismo diámetro de rotor (o diámetro de rotor más pequeño para un tamaño determinado de generador). Esto tendería a disminuir el factor de carga (utilizando menos de la capacidad de un generador relativamente grande), pero puede significar una producción anual sustancialmente mayor. Si vale o no la pena tener un menor factor de carga con un generador relativamente mayor, depende tanto de las condiciones eólicas como, por supuesto, del precio de los diferentes modelos de turbinas.

B) Otra forma de ver la paradoja del factor de carga es decir que, hasta cierto punto, se tiene la posibilidad de elegir entre tener una producción de potencia relativamente estable (cerca del límite de diseño del generador) con un alto factor de carga, o bien una alta producción de energía (que fluctuará) con un bajo factor de carga.

9 Confiabilidad – Disponibilidad

La confiabilidad de las turbinas eólicas mejoró enormemente en los últimos años debido al mejor conocimiento de la naturaleza del viento, del avance tecnológico para producir mejores materiales y diseños y de la mayor experiencia en la operación. El avance no sólo se verificó en los elementos constituyentes de la turbina sino también en todo lo referido a los sistemas de control.

La confiabilidad de los equipos normalmente se mide a través del tiempo medio entre fallas, el tiempo medio de reparación y también midiendo la disponibilidad. Aquí existen algunas alternativas. Estos índices llegan hoy en día a valores del orden del 98%.

$$\text{Disponibilidad Total (DT)} = \frac{\text{horas turbina es capaz de generar}}{\text{horas del periodo considerado}}$$

$$\text{Disp. Operativa (DO)} = \frac{\text{horas reales de operación}}{\text{horas con velocidad dentro del rango de operación}}$$

10 Componentes de un aerogenerador

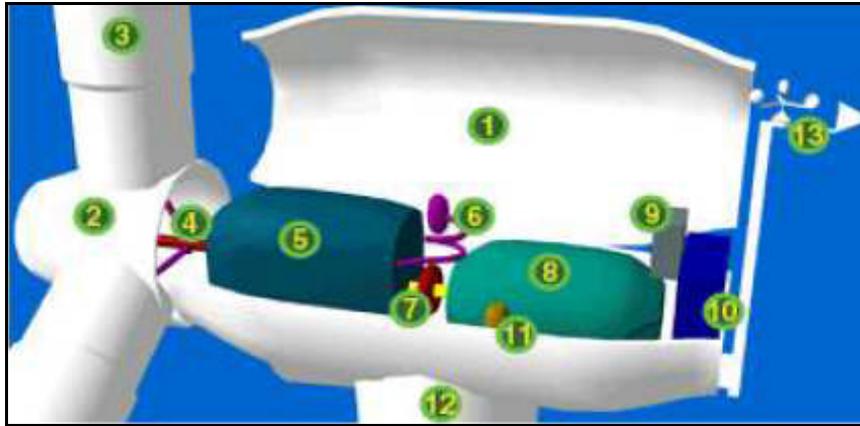


Ilustración 20. Componentes de un aerogenerador

(1) Góndola

La góndola contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador (5) y el generador eléctrico (8). El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre (12) de la turbina. A la izquierda de la góndola tenemos el rotor del aerogenerador, es decir, las palas (3) y el buje (2).

(2) Buje

El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador (4).

(3) Palas

Las palas del rotor capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje (2). En un aerogenerador moderno de 1000 kW cada pala mide alrededor de 27 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión.

(4) Eje de Baja velocidad

El eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje (2) del rotor al multiplicador (5). En un aerogenerador moderno de 600 kW el rotor gira bastante lentamente, de unas 19 a 30 revoluciones por minuto (rpm). El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos (6).

(5) Multiplicador

El multiplicador tiene a su izquierda el eje de baja velocidad (4). Permite que el eje de alta velocidad (7) que está a su derecha gire 50 veces más rápidamente que el eje de baja velocidad.

(6) Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico es utilizado para restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.

(7) Eje de alta velocidad

El eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1.500 rpm, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico (8). Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

(8) Generador eléctrico

El generador eléctrico suele llamarse generador asíncrono o de inducción. En un aerogenerador moderno la potencia máxima suele estar entre 500 y 3.000 kilowatts (kW).

(9) Controlador eléctrico

El controlador electrónico tiene una computadora que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación (11). En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama a la computadora del operario encargado de la turbina a través de un enlace telefónico mediante módem. La computadora parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de 25 metros por segundo, con el fin de proteger a la turbina y sus alrededores.

(10) Unidad de refrigeración

La unidad de refrigeración contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico (8). Además contiene una unidad de refrigeración del aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador (5). Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

(11) Mecanismo de orientación

El mecanismo de orientación es activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta. Normalmente, la turbina sólo se orientará unos pocos grados cada vez, cuando el viento cambia de dirección.

(12) Torre

La torre del aerogenerador es el soporte de la góndola y el rotor, y desde dónde los técnicos pueden acceder a la góndola. Una torre de un aerogenerador de 1,5 MW en potencia mide aproximadamente 80 m de altura.

(13) Anemómetro

El anemómetro y la veleta se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico (9) del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico (9) del aerogenerador para girar al aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

Tabla de Ilustraciones

Capítulo 2. Modelo de Producción Eólica Regional	
<i>Ilustración 1. Diagrama Polar</i>	21
<i>Ilustración 2. Registro de un Anemómetro</i>	22
<i>Ilustración 3. Clasificación del Viento Beaufort (a)</i>	22
<i>Ilustración 4. Clasificación del Viento Beaufort (b)</i>	23
<i>Ilustración 5. Clasificación del Viento Beaufort (c)</i>	23
<i>Ilustración 6. Imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar tomada por el satélite de la NASA, NOAA-7</i>	24
<i>Ilustración 7. Movimiento del aire en la atmósfera(a)</i>	24
<i>Ilustración 8. Movimiento del aire en la atmósfera (b)</i>	25
<i>Ilustración 9. Vientos Diurnos</i>	<i>Ilustración 10. Vientos Nocturnos</i> 26
<i>Ilustración 11. Variabilidad del viento a corto plazo</i>	27
<i>Ilustración 12. Variación de la Velocidad del Viento con la Altura</i>	28
<i>Ilustración 13. Relación entre la velocidad del viento, su valor en grados Beaufort, sus efectos fácilmente apreciables, la densidad de potencia, la energía a lo largo de un año y la presión dinámica.</i>	29
<i>Ilustración 14. Coeficiente de potencia C_p para diferentes tipos de Aerogeneradores</i>	30
<i>Ilustración 15. Modelo de Betz</i>	31
<i>Ilustración 16. Distribución de Weibull. Expresa con que frecuencia sopla el viento en un rango de velocidad determinado.</i>	34
<i>Ilustración 17. Representación de la función de densidad de Weibull para diferentes valores del parámetro de forma k.</i>	35
<i>Ilustración 18. Distribución de densidad de probabilidad de Rayleigh para diferentes valores del parámetro σ.</i>	35
<i>Ilustración 19. Curva de Potencia Aerogenerador modelo G58 del Fabricante Gamesa</i>	36
<i>Ilustración 20. Componentes de un aerogenerador</i>	39