

[1046584516]. gopixa/Shutterstock

Smart grid: fundamentos técnicos

Energía eólica en una red inteligente



Tecnológico
de Monterrey

Modelos básicos de generadores eólicos

El viento: factor importante de energía renovable

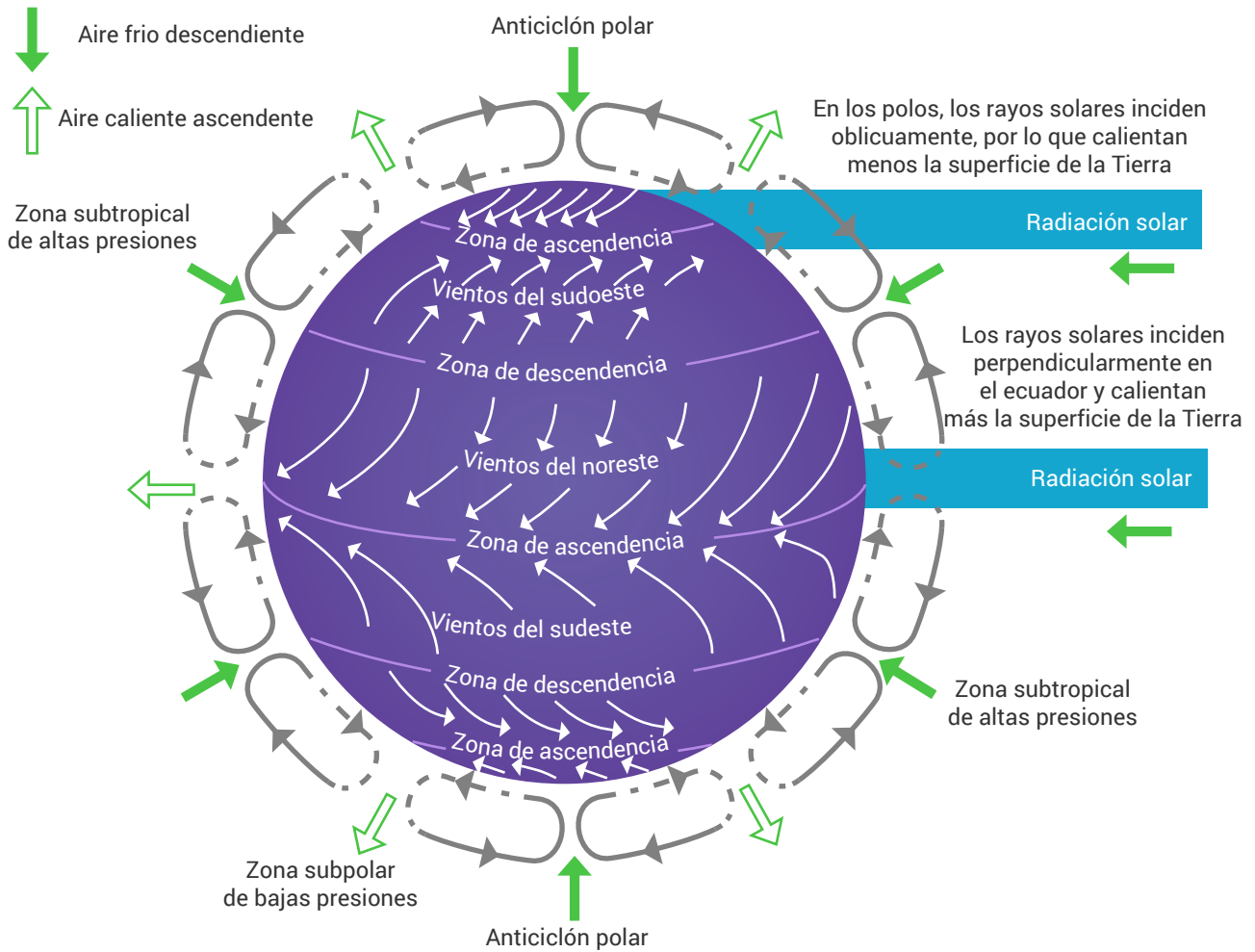
¿Te has cuestionado alguna vez cómo se produce el viento?

El viento es el **aire en movimiento** que se produce por las **diferencias de presión atmosférica** en distintas zonas.



[1014175351]. tickcharoen04 / Shutterstock

Este fenómeno se produce mediante el efecto de la radiación solar que calienta las masas de aire y las hace más ligeras, provocando que asciendan, dejando una zona de baja presión y haciendo que el aire frío y denso descienda; esto aunado a las fuerzas de Coriolis producidas por la rotación de la Tierra y que actúan sobre la masa de aire en movimiento desviándose hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, además de otros factores como la composición de la Tierra en océanos y continentes, el movimiento de traslación de la Tierra, la topografía de los continentes y perturbaciones atmosféricas. A continuación se muestra un ejemplo de las fuerzas de Coriolis:



El potencial del viento

En la siguiente imagen se muestra la distribución estimada del potencial eólico en el mundo. Los vientos se distribuyen anualmente entre $2,5 \times 10^5$ y 5×10^5 kWh.



La medida del viento

La velocidad del viento es un **vector**, por tanto, viene definida por **el módulo, la dirección y el sentido**. El módulo indica la intensidad del viento y se suele expresar en m/s, km/h o en nudos (1 nudo=0,514 m/s). La dirección y el sentido se expresan en **grados sexagesimales**.



[641998230]. 4FR/istock

Los anemómetros miden **el flujo del aire, su velocidad y dirección**; suelen ser de rotación, pero hay de presión, así como de otros tipos. Los sensores de los anemómetros, habitualmente situados en torres a una altura de 10 metros, generan una señal que se transmite a un equipo de registro para su interpretación y/o almacenamiento.

La frecuencia de muestreo y los intervalos promedio dependen del tipo de análisis. Es recomendable hacerlo con una frecuencia de **5 a 10 segundos**, y promedios en intervalos de 10 minutos a 1 hora. Para análisis más detallados, se requieren frecuencias iguales o superiores a 1 Hz e intervalos de 1 minuto.

Tratamiento de los datos del viento

Para medir el aprovechamiento energético eólico, se analizan las **distribuciones temporales**, que pueden ser la media diaria, mensual o anual; y las **distribuciones de frecuencia**, que brindan el número de horas por mes o por año durante las cuales ocurre una determinada velocidad del viento. Para fines estadísticos, se usa la función de **densidad de probabilidad continua** $f(v)$ que representa una aproximación de las probabilidades partiendo del histograma con los valores de la distribución de frecuencias, reflejando la estructura de distribución de los valores de la variable a largo plazo, permitiendo obtener probabilidades de cualquier suceso.

La función de densidad de Weibull es:

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

Donde k es el parámetro de forma (adimensional) y c es el parámetro de escala (m/s). La velocidad media del viento y la desviación típica están dadas por:

$$\underline{V} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{1/2}$$

Donde Γ es la función **gamma de Euler**.

La probabilidad de que la velocidad del viento sea menor o igual a cierto valor v , sea superior a cierto valor v , o esté comprendida entre dos valores v_x y v_y es:

$$P(V \leq v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

$$P(V > v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

$$P(v_x \leq V \leq v_y) = \exp\left[-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_y}{c}\right)^k\right]$$

Para estimar los parámetros k y c , se iguala la media y la desviación muestral con los correspondientes valores de la distribución de Weibull:

$$k = \left(\frac{s}{\underline{V}}\right)^{-1,086}; \quad c = \frac{\underline{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

Donde:

$$\underline{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i; \quad S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \underline{V})^2 \right]^{1/2}$$

Variación del viento con la altura

La altura para instalar turbinas eólicas es de aproximadamente **100 m hacia abajo**. Para cuantificar el perfil vertical de la velocidad del viento en regiones de terreno plano, se usan **dos modelos matemáticos**:

$$V = V_o \left[\ln\left(\frac{H_o}{Z_o}\right) / \ln\left(\frac{H}{z_o}\right) \right]$$

Donde V y V_o son las velocidades del viento a las alturas de H y H_o y z_0 es la rugosidad del terreno. Por otro lado:

$$V = V_o (H/H_o)^\beta$$

Donde β es un exponente que representa el rozamiento superficial encontrado por el viento.

En la siguiente tabla se indican valores de β y z_0 en función de diversas rugosidades:

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

La intensidad del viento depende del relieve del terreno. Los relieves redondeados con pendientes suaves aceleran la velocidad del viento, mientras que los relieves bruscos con pendientes mayores a 30° propician turbulencias que dañan a los aerogeneradores y reducen la energía capturada por los mismos.

Cuantificación de la energía existente en el viento

La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección A perpendicular al flujo del viento v , se da a través del flujo de la energía cinética por unidad de tiempo, como se representa a continuación:

$$P_d = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (\rho Av)v^2 = \frac{1}{2} \rho Av^3$$

Donde m es el caudal másico del aire y ρ es la densidad del aire, que varía con la altitud y las condiciones atmosféricas (normalmente $1,225 \text{ kg/m}^3$ a temperatura de 15°C y presión atmosférica normal de 1.013 mbar).

Un método para comparar la potencia eólica de distintos lugares, es la densidad de potencia media, es decir, la potencia eólica media disponible por unidad de superficie barrida como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho \underline{v}^3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}; \quad \underline{v}^3 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_i^3 \text{ (m}^3 \text{s}^{-3}\text{)}$$

En función de parámetros de Weibull, nos quedaría expresado de la siguiente forma:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

Trabajo realizado en el marco del Proyecto 266632 “Laboratorio Binacional para la Gestión Inteligente de la Sustentabilidad Energética y la Formación Tecnológica”, con financiamiento del Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER (Convocatoria: S001920101).

El trabajo intelectual contenido en este material, se comparte por medio de una licencia de Creative Commons (CC BY-NC-ND 2.5 MX) del tipo “Atribución-No Comercial Sin Derivadas”, para conocer a detalle los usos permitidos consulte el sitio web en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/mx>



Se permite copiar, distribuir, reproducir y comunicar públicamente la obra sin costo económico bajo la condición de no modificar o alterar el material y reconociendo la autoría intelectual del trabajo en los términos específicos por el propio autor. No se puede utilizar esta obra para fines comerciales, y si se desea alterar, transformar o crear una obra derivada de la original, se deberá solicitar autorización por escrito al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

CFE
Comisión Federal de Electricidad

CONACYT
45 años

Tecnológico de Monterrey

FONDO DE SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS LIMPIAS

Colaboran:

Berkeley
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

ASU ARIZONA STATE UNIVERSITY