

Energía eólica

La energía eólica se basa en el aprovechamiento de la fuerza del viento para generar electricidad, un recurso natural renovable y limpio. Su funcionamiento se da gracias a aerogeneradores que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica. La eficiencia en la generación de esta energía depende de una correcta elección del emplazamiento, que a su vez se relaciona directamente con el análisis de las características del viento.

Definición y causas del viento

El viento es el **movimiento de masas de aire en la atmósfera** originado por diferencias de presión atmosférica entre dos puntos. Este fenómeno depende de diversos factores, entre ellos:

- Clima general de la región.
- Orografía (relieve) y rugosidad del terreno.
- Hora del día, ya que el calentamiento y el enfriamiento de la superficie terrestre y marítima varían según la exposición al sol.

Estos factores son cruciales para determinar la viabilidad de una zona para la instalación de aerogeneradores.

Comportamiento del viento:

Dirección del viento

Entre el ecuador y los polos, el viento presenta un comportamiento específico, siendo más constante a altitudes elevadas (1000 metros o más) y más variable en la superficie debido a la influencia de obstáculos y rugosidad del terreno.

Vientos globales y locales

El viento en zonas costeras presenta patrones característicos. Así es que, durante el día, el aire de la superficie terrestre se calienta más rápidamente que el del mar, creando brisas marinas hacia el continente. Por el contrario, durante la noche, el efecto se invierte debido al enfriamiento más rápido de la tierra. Esto se puede ver en la Figura 1.

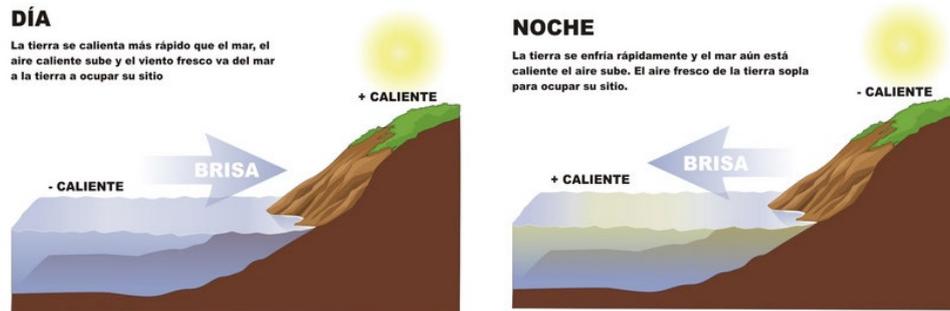


Figura 1. Variación de la dirección del viento en función del período día/noche.

Vientos de montaña

De día, el aire se calienta y asciende por las laderas; de noche, desciende. Este ciclo diurno y nocturno es relevante en zonas montañosas para planificar la ubicación de generadores. Se puede ver en la Figura 2.

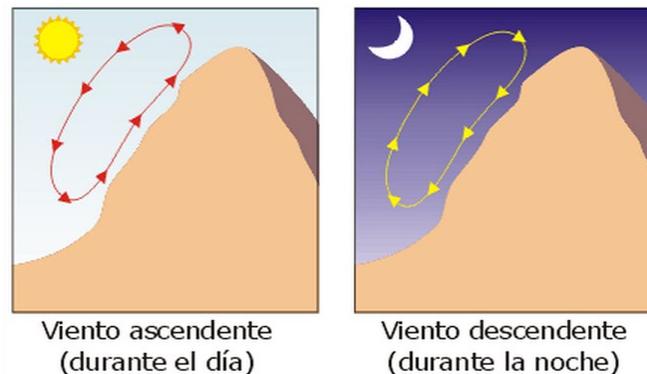


Figura 2. Variación en la dirección de los vientos de montaña.

Efecto del viento ante obstáculos

Efecto túnel

En pasos estrechos entre montañas o edificios, la velocidad del viento aumenta al concentrarse en esos puntos. Estos lugares pueden ser favorables para colocar aerogeneradores.

Efecto colina

En presencia de colinas, el viento se agrupa y aumenta su velocidad, aunque, si el terreno es accidentado, se generan turbulencias, lo que puede alterar la efectividad y dirección del viento. Las zonas con colinas suaves suelen ser preferibles para instalaciones eólicas. El efecto colina se representa en la Figura 3.

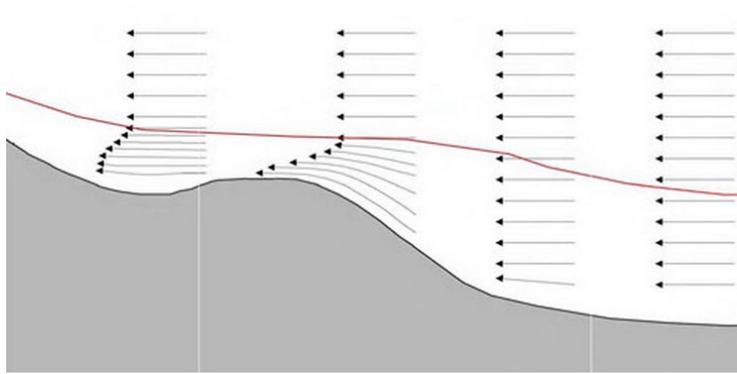


Figura 3. Efecto colina.

Variación del viento a lo largo del día en altura

El viento varía en función de la altura sobre el nivel del suelo debido a la **rugosidad del terreno**. A nivel superficial, la rugosidad y los obstáculos retrasan el viento, pero a medida que se asciende, esta influencia disminuye. Existen modelos matemáticos para predecir el comportamiento del viento:

- **Modelo logarítmico de Pradtl** (para alturas entre 0-100 m).

$$v(h) = \frac{v^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$$

Donde:

h : altura

v^* : Velocidad de fricción (depende de la tensión cortante y la densidad del aire)

k : constante de Von Karman

h_0 : rugosidad, depende del terreno, se puede estimar como $h \approx \frac{\epsilon}{30}$, donde ϵ es la altura media de la rugosidad del terreno

- **Modelo logarítmico modificado** (para alturas entre 0-300 m).

$$v(h) = \frac{v^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) + 5,75 \cdot \frac{h}{z}$$

Donde:

h : altura

v^* : Velocidad de fricción (depende de la tensión cortante y la densidad del aire)

k : constante de Von Karman

h_0 : rugosidad, depende del terreno, se puede estimar como $h \approx \frac{\epsilon}{30}$, donde ϵ es la altura media de la rugosidad del terreno

z : altura a la que la rugosidad no influye

- **Simplificación aceptada**

$$v(h) = v(H) \cdot \left(\frac{h}{H}\right)^\alpha$$

h : altura

H : altura de referencia (10 m)

α : coeficiente de rugosidad del terreno (puede depender de la dirección del viento y de la época del año)

Distribuciones estadísticas de la velocidad del viento

Distribución Weibull

Es un modelo estadístico usado para analizar la velocidad media del viento en una región. Los parámetros **C** (escala) y **k** (forma) son cruciales para determinar el comportamiento del viento.

$$f(v) = f(v; C, k) = \begin{cases} \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}, & \text{si } v \geq 0 \\ 0, & \text{si } v \leq 0 \end{cases}$$

Distribución Rayleigh

Aplicable en áreas donde el viento sigue un patrón uniforme. Este modelo es útil para simplificar cálculos en zonas con una velocidad de viento relativamente constante.

$$f(v) = f(v; C) = \begin{cases} \frac{2 \cdot v}{C^2} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^2}, & \text{si } v \geq 0 \\ 0, & \text{si } v \leq 0 \end{cases}$$

Turbulencia atmosférica

La turbulencia es la **variación instantánea** de la velocidad del viento, que depende de la rugosidad y la altitud. La intensidad de turbulencia se reduce a mayor altura, lo que beneficia la estabilidad de la producción de energía en aerogeneradores altos. Se describe con la varianza.

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} (v(t) - \bar{v}) \cdot \partial t$$

Equipos de medición

Para evaluar el potencial eólico de una región se emplean anemómetros, que miden la dirección y velocidad del viento. Los tipos principales incluyen:

- **Anemómetros de cazoletas:** Usados frecuentemente por su precisión (error <1%), tienen un costo moderado y son adecuados en la mayoría de las condiciones.
- **Otros tipos:** De hélice, ultrasonidos, láser, entre otros, que ofrecen distintas precisiones y costos según el contexto y necesidades específicas del proyecto.

Campaña de medidas

Para un estudio de viabilidad se instala un mástil con un anemómetro a la altura estimada de los aerogeneradores, registrando datos de velocidad y dirección del viento durante un período de al menos un año. Los valores se registran cada diez minutos y se utilizan para:

- Evaluar la constancia y variabilidad del viento.
- Estimar la producción anual de energía.
- Considerar datos históricos de estaciones cercanas para obtener una visión más completa.