

Curso:

TECNOLOGÍA DE AEROGENERADORES

- ✓ Docente: Ing. Sergio Ariel Solares Acevey
- ✓ Octubre de 2025



Tema 1: Introducción a la Energía Eólica





Historia

Navegación:

Los primeros usos conocidos de la energía eólica se remontan a la antigüedad, con la invención de los barcos de vela. Los egipcios y otras civilizaciones antiguas ya utilizaban embarcaciones a vela para navegar por el Nilo y el Mediterráneo.



Historia

Molinos de viento:

Los primeros molinos de viento se desarrollaron en Persia alrededor del siglo VII d. C. y se utilizaron para moler granos y bombear agua. Estos molinos de viento se extendieron por todo el mundo islámico y llegaron a Europa durante la Edad Media.



Historia

Energía eólica en el siglo XX y XXI

Auge de la energía eólica: La energía eólica experimentó un resurgimiento en la década de 1970 debido a la crisis del petróleo. Los gobiernos y las empresas comenzaron a invertir en energía eólica como una forma de reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

Avances tecnológicos: En las últimas décadas, la tecnología de las turbinas eólicas ha avanzado significativamente. Las turbinas modernas son más grandes, más eficientes y más confiables que las turbinas antiguas.



Presente

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable de más rápido crecimiento en el mundo.

Se utiliza para generar electricidad en muchos países y está desempeñando un papel cada vez más importante en la transición hacia una economía de energía limpia.

Presente



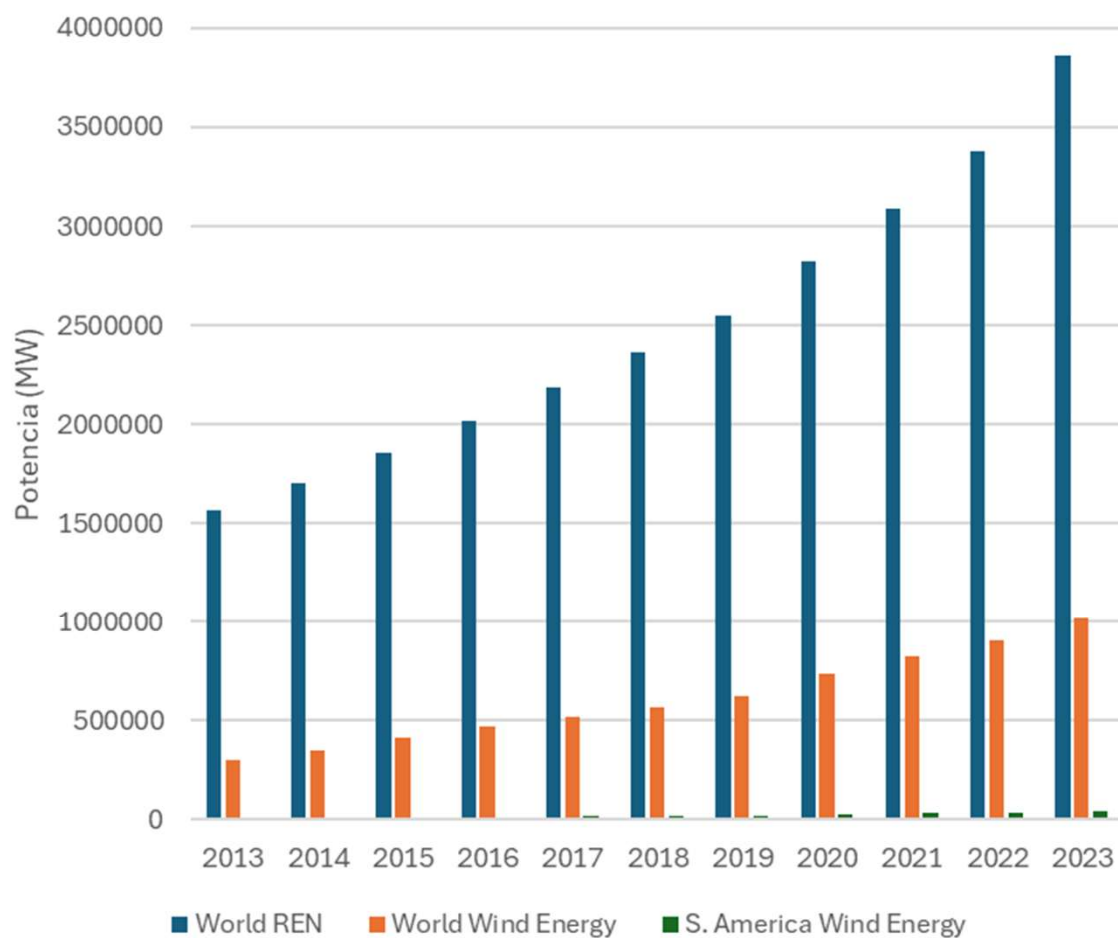
**RENEWABLE ENERGY
STATISTICS 2024**

**STATISTIQUES D'ÉNERGIE
RENOUVELABLE 2024**

**ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA
RENOVABLE 2024**



Capacidad instalada mundial de energía eólica

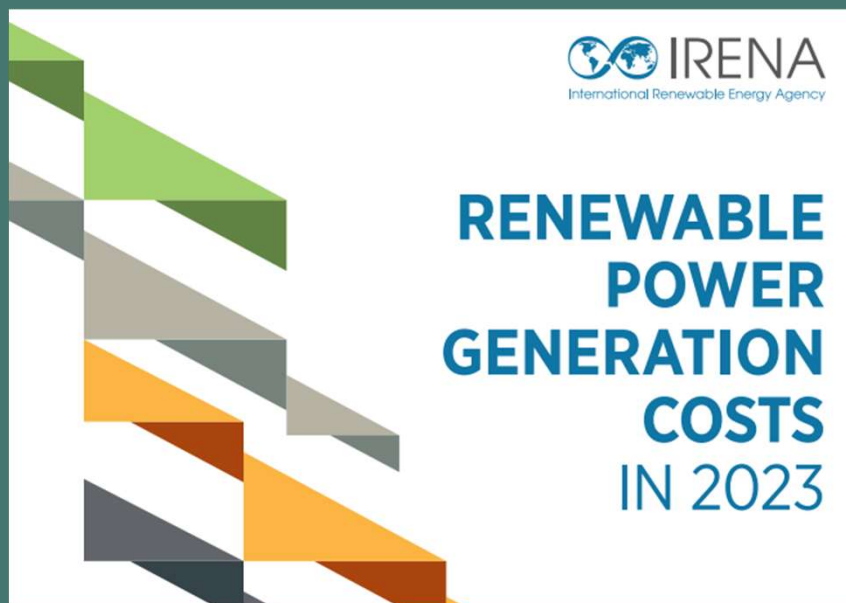


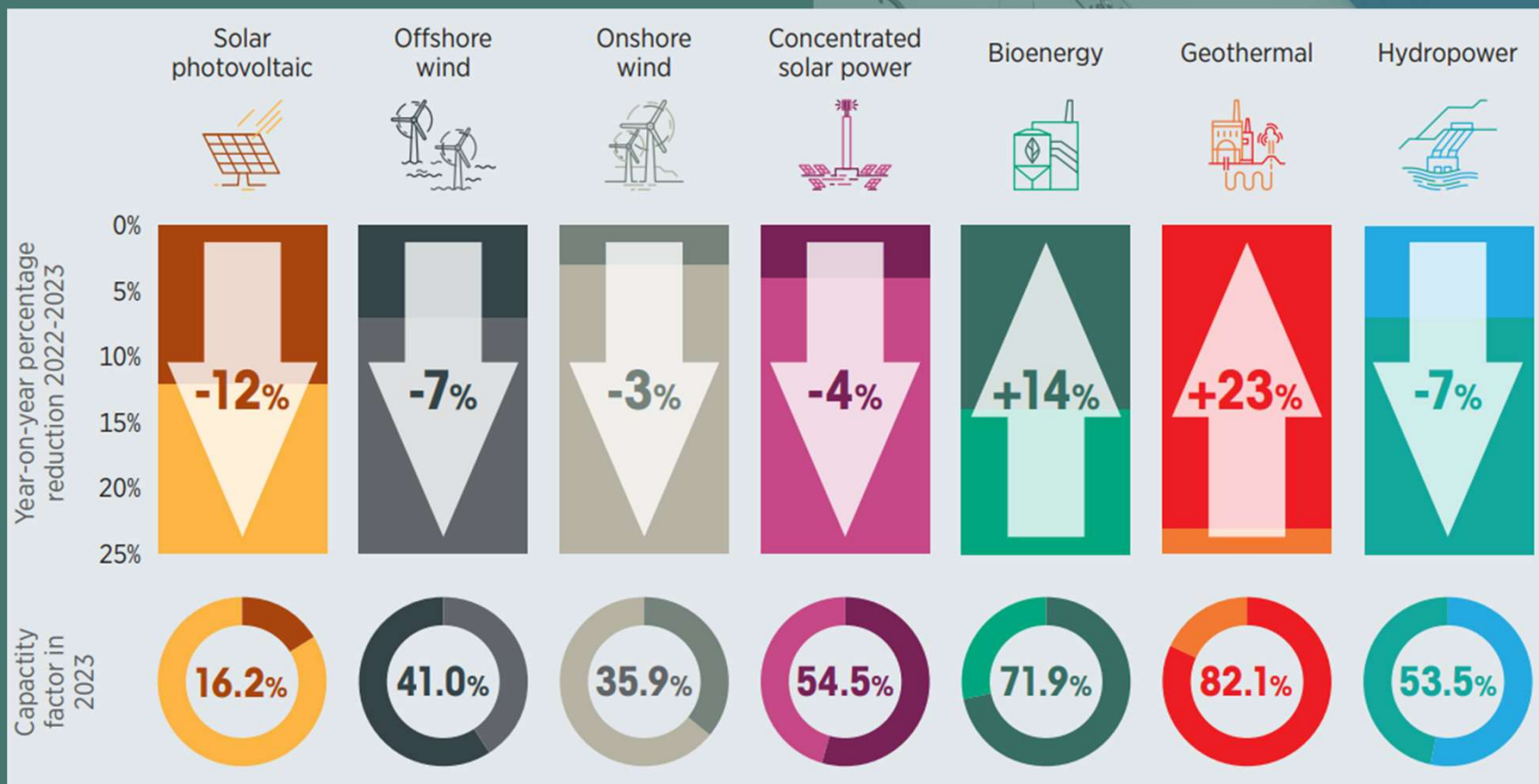
**RENEWABLE ENERGY
STATISTICS 2023**

**STATISTIQUES D'ÉNERGIE
RENOUVELABLE 2023**

**ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA
RENOVABLE 2023**

Presente





1.7. Fabricantes principales

La industria de la energía eólica ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas.

Este crecimiento ha sido posible gracias a la innovación y competencia de varios fabricantes a nivel mundial, que han desarrollado turbinas eólicas cada vez más eficientes y económicas.

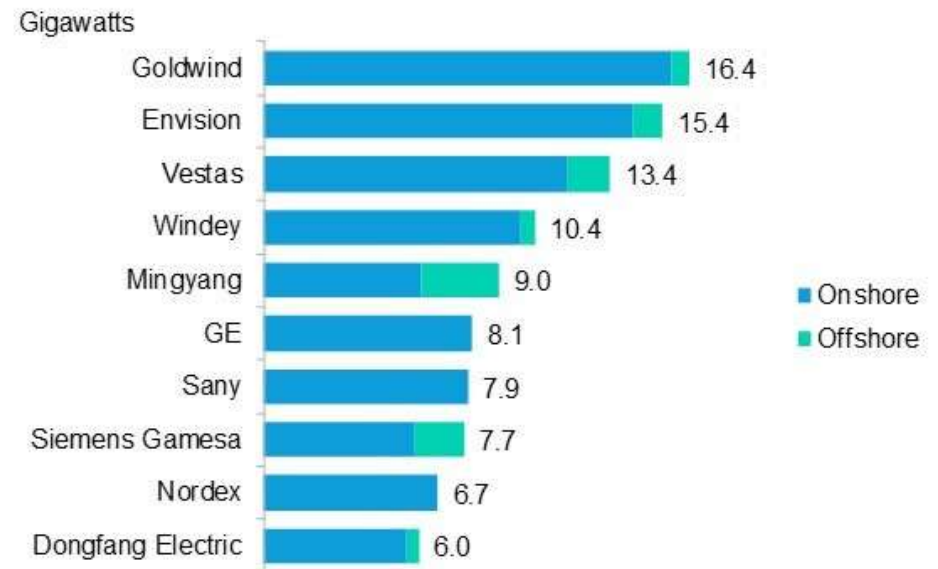
Vestas: Con sede en Dinamarca, Vestas es uno de los líderes mundiales en la industria eólica.

Siemens Gamesa: Resultante de la fusión entre Siemens Wind Power y Gamesa

Enercon: Con sede en Alemania, Enercon es conocida por sus diseños innovadores.

Windey: Un importante fabricante chino de aerogeneradores con una presencia nacional y una creciente presencia internacional.

Top 10 global wind turbine makers in 2023



Source: BloombergNEF. Note: Total commissioned capacity in 2023 was 118GW.

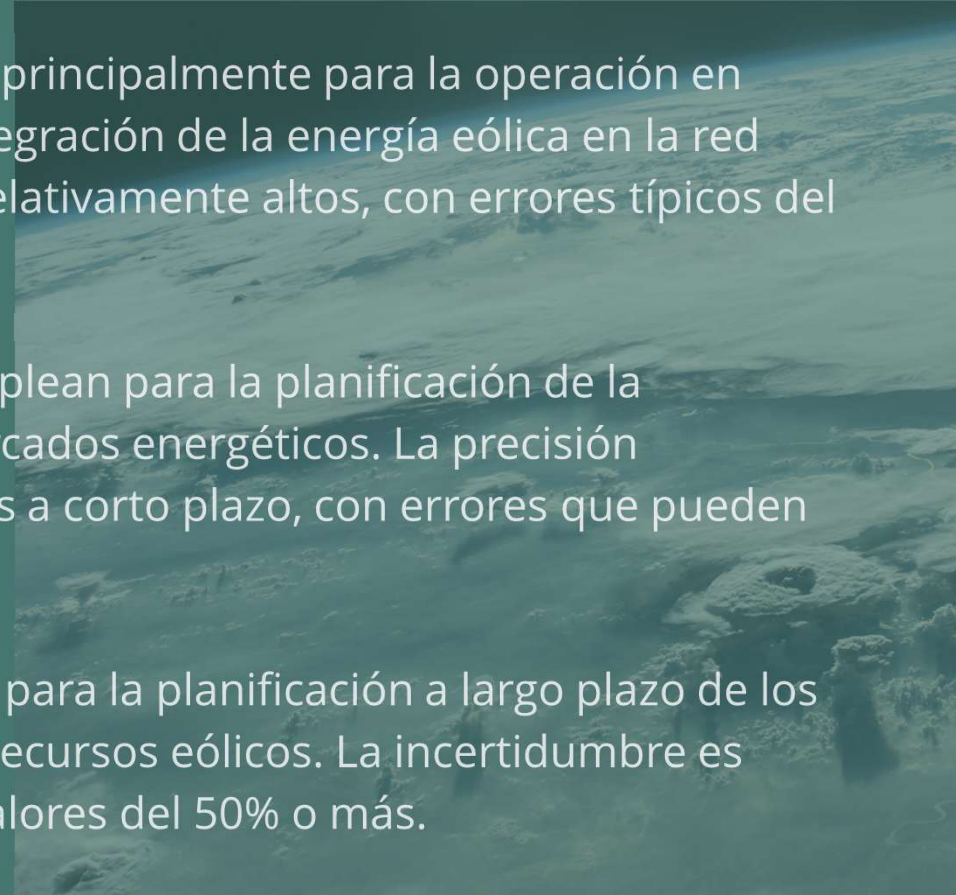
Ciencia de la atmósfera

- La ciencia atmosférica se ocupa de la estructura y evolución de las atmósferas planetarias y con la amplia gama de fenómenos que ocurren dentro de ellos.
- Comenzó a finales del siglo XIX como un conjunto de centros de recopilación regionales. Ha evolucionado hasta convertirse en un sofisticado sistema de estimaciones óptimas de sus respectivos campos tridimensionales en todo el mundo.
- El desarrollo histórico de las ciencias atmosféricas, ha sido impulsado por la necesidad de un **propnóstico climatico más preciso.**



Viento

- Predicciones a **corto plazo (Horas)**: Se utilizan principalmente para la operación en tiempo real de los parques eólicos y para la integración de la energía eólica en la red eléctrica. La precisión puede alcanzar niveles relativamente altos, con errores típicos del orden del 10-20% en la potencia predicha.
- Predicciones a **medio plazo (Semanas)**: Se emplean para la planificación de la producción de energía y para la gestión de mercados energéticos. La precisión disminuye en comparación con las predicciones a corto plazo, con errores que pueden superar el 30%.
- Predicciones a **largo plazo (Meses)**: Se utilizan para la planificación a largo plazo de los sistemas eléctricos y para la evaluación de los recursos eólicos. La incertidumbre es mucho mayor, y los errores pueden alcanzar valores del 50% o más.



Viento

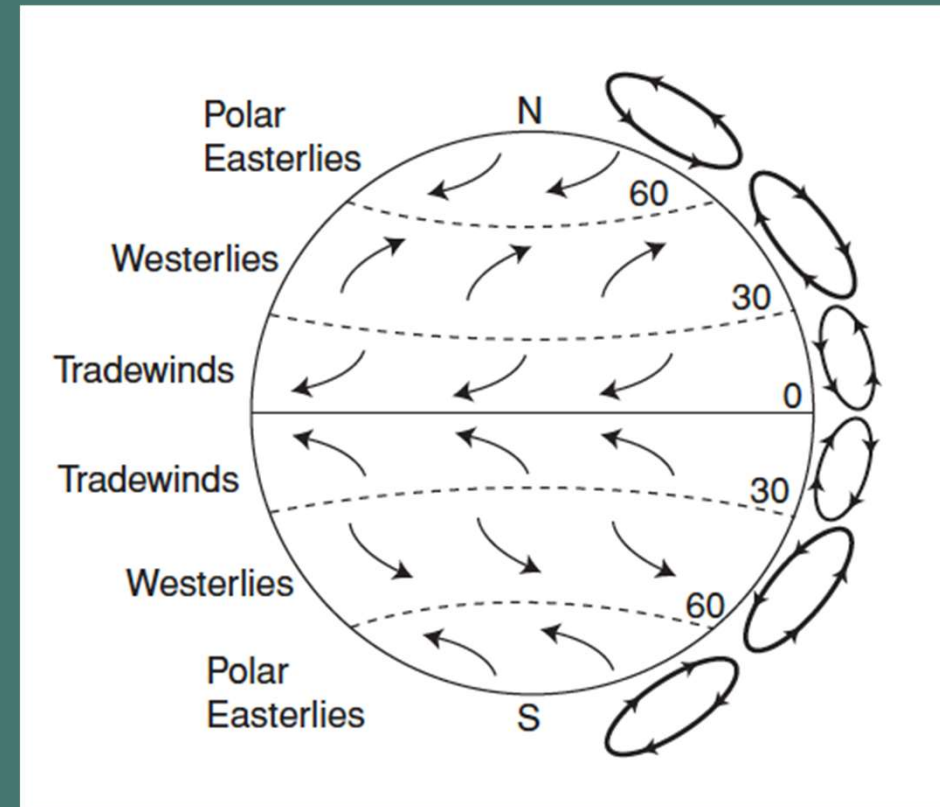
- Se considera viento a todo movimiento de masa de aire impulsado por el calentamiento desigual de la superficie terrestre.
- A macroescala el aire en la atmósfera se calienta o enfría ocasionando gradientes de densidad y por ende desplazamientos de zonas de alta presión a zonas de baja presión.
- A microescala el viento se ve influenciado por el terreno y varía según la altura, el cambio de intensidad de flujo es visible por medio del perfil de viento, incrementándose mientras más alto se esté.



Viento

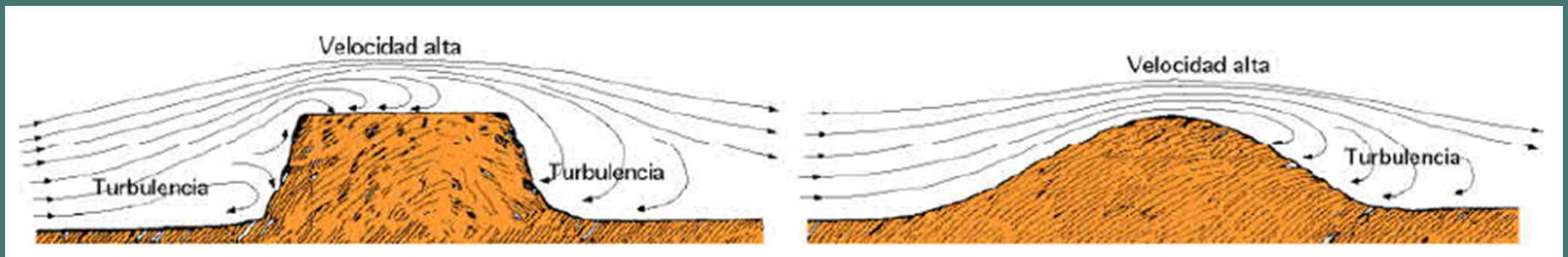
Las causas principales del origen del viento son:

- a) La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos
- b) La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur
- c) Las perturbaciones atmosféricas.

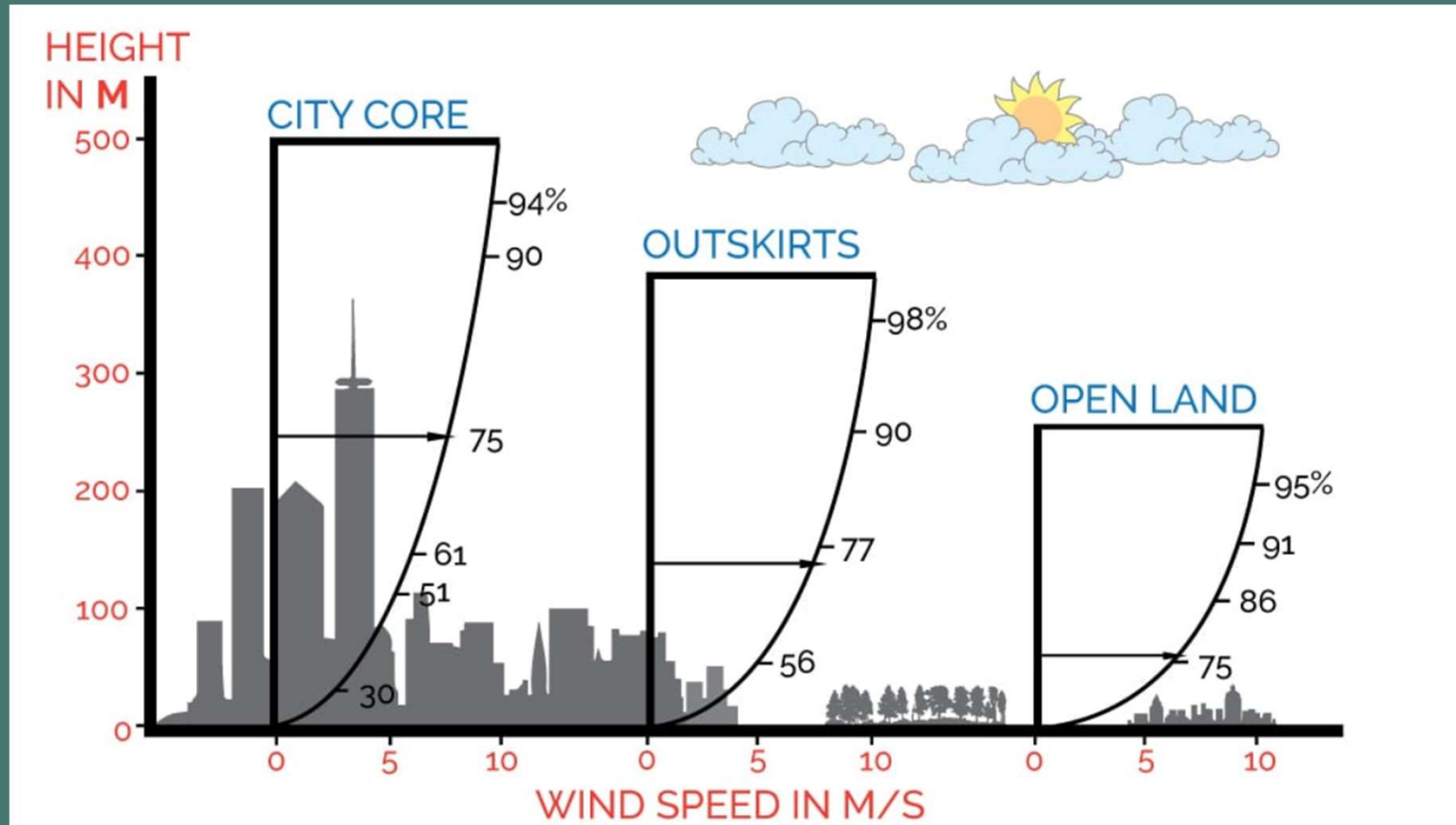


Viento

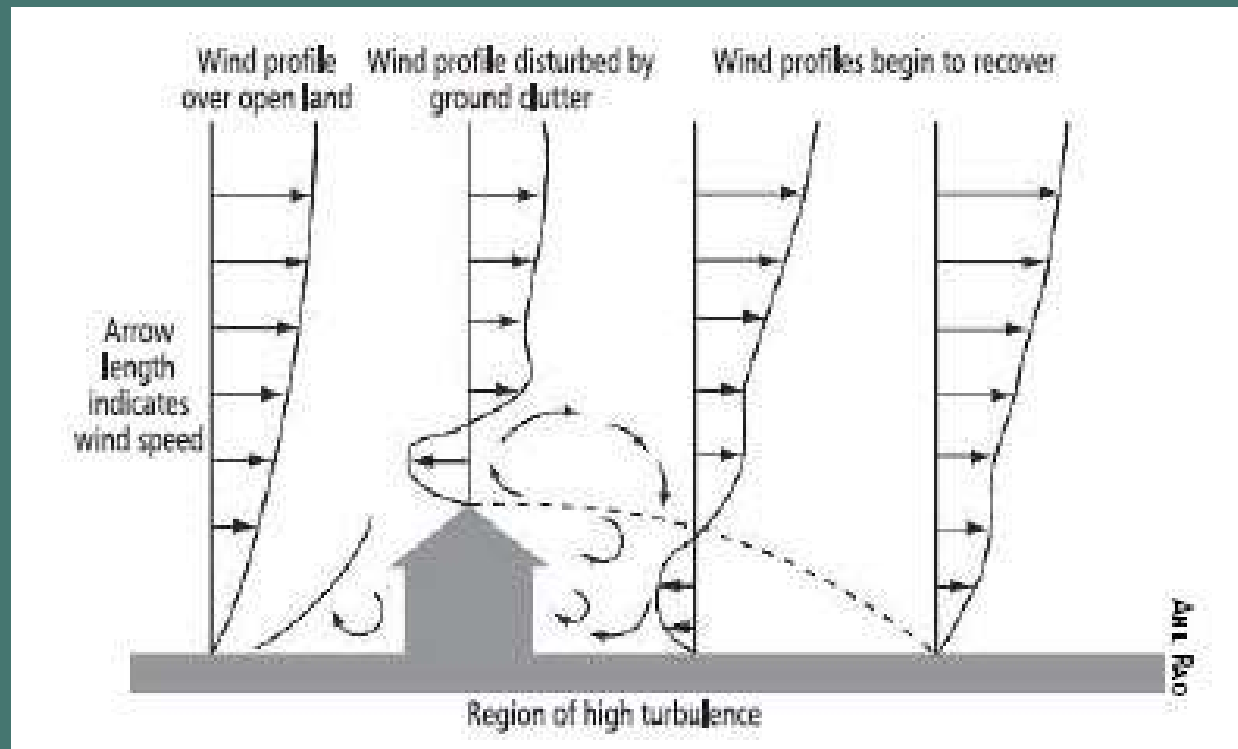
También influye grandemente en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra y estructuras por donde discurre la corriente. Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente



Wind Shear: Cizalladura



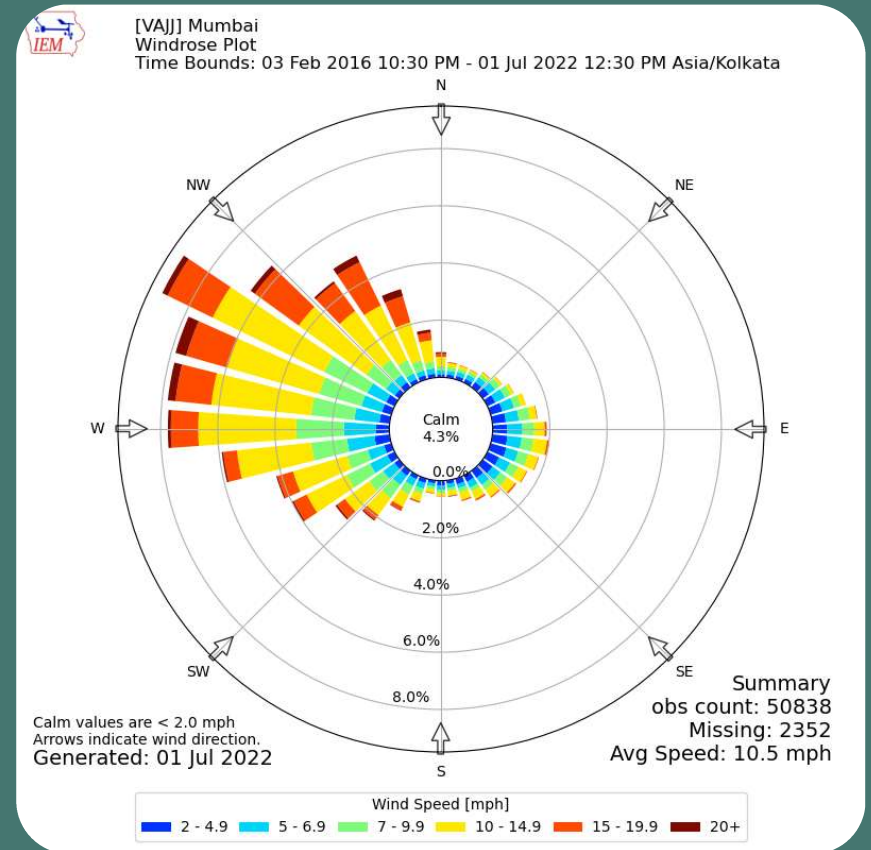
Wind Shear: Cizalladura



Parámetros

Los parámetros más importantes a tomar en cuenta en una medición son la **dirección y la velocidad del viento**, si bien la densidad del aire es también relevante, esta no precisa de mediciones frecuentes ni de tratamiento estadístico complejo.

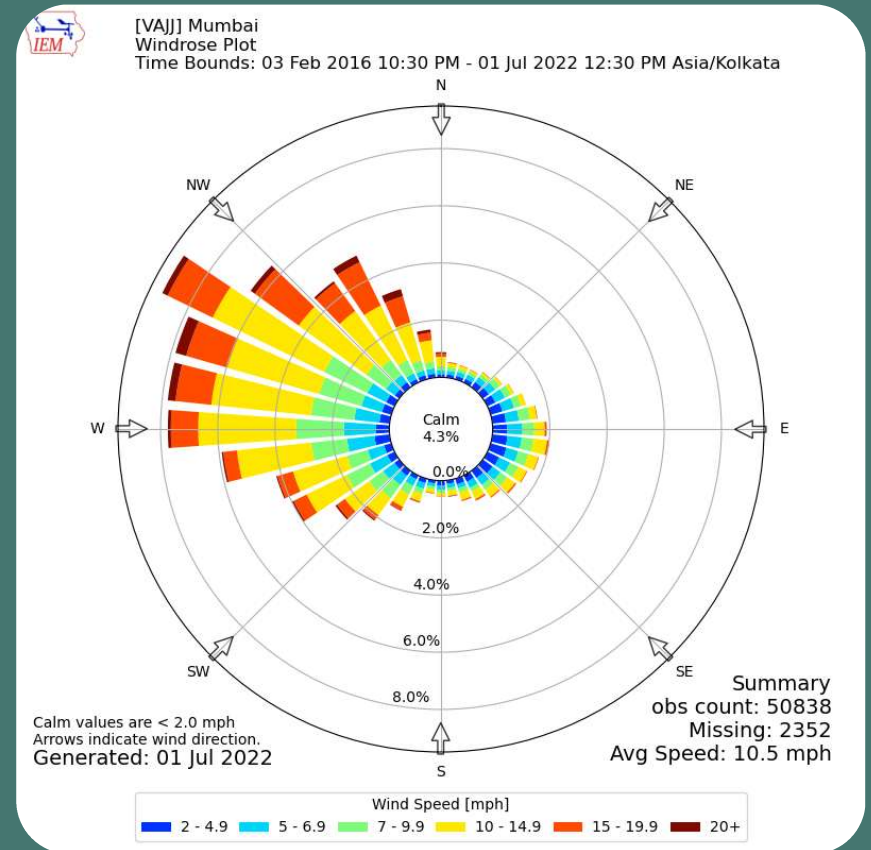
Tanto la dirección como la velocidad son usualmente sensados a frecuencia de 1 Hz, para luego realizar una estimación de la media cada 10 minutos.



Parámetros

La dirección de viento cambia de forma aleatoria, a pesar de ello se puede determinar las tendencias predominantes de dirección.

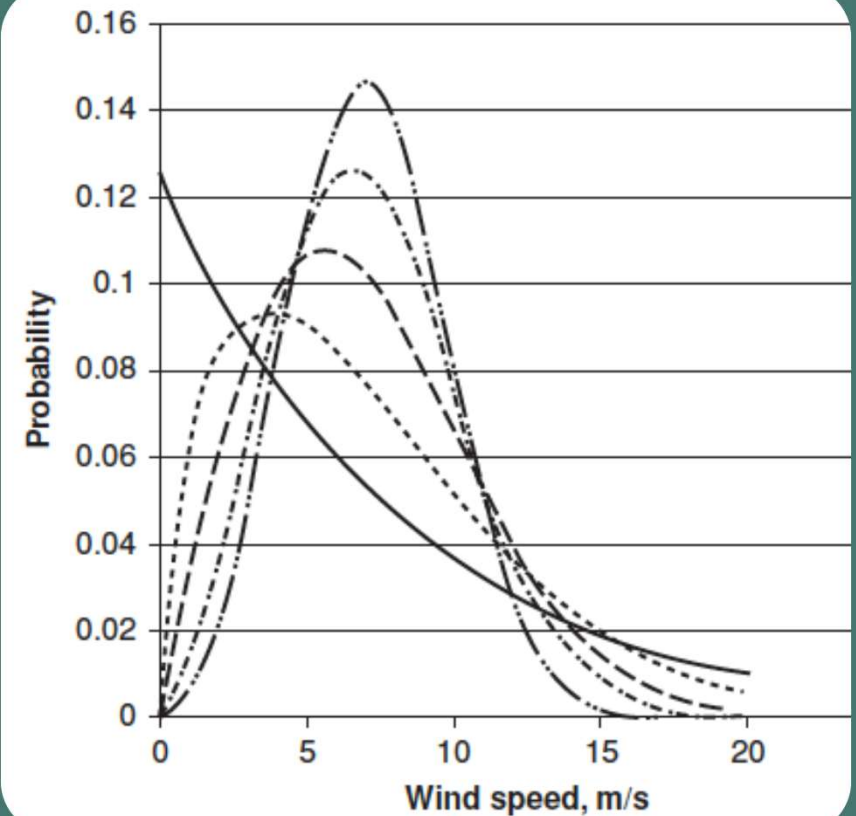
La **rosa de viento** es una herramienta grafica que está dividida en norte, sur, este y oeste, y cual muestra la frecuencia acumulada de la dirección del viento, de la que se determina las direcciones predominantes.



Distribución de probabilidades

Al igual que la dirección, la velocidad del viento es una cantidad estocástica. Las funciones de distribución probabilísticas más comunes para representar la velocidad del viento son **Weibull** y Rayleigh. Rayleigh utiliza un parámetro que es la velocidad media del viento, mientras que Weibull se basa en dos parámetros y, por tanto, puede representar una variedad más amplia de regímenes de vientos. Las distribuciones de Rayleigh y Weibull se denominan distribuciones sesgadas en el sentido de que se definen solo para valores mayores que cero.

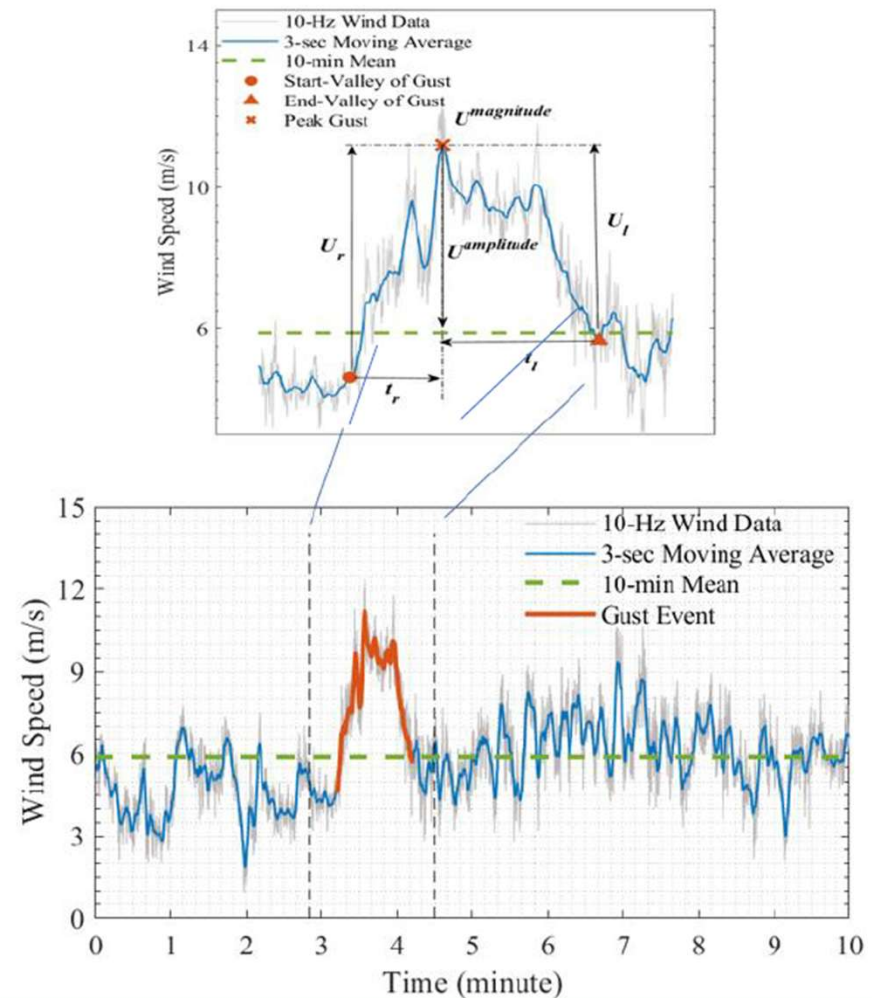
k es el factor de forma y A es el factor de escala.



$$pd(v) = (k/A)(v/A)^{k-1}e^{-(v/A)^k} \text{ for } v > 0$$

Ráfagas

Así mismo las ráfagas de viento son aumentos repentinos y breves de la velocidad y dirección en tres direcciones, con una duración de menos de 20 segundos, y seguidos de una pausa o disminución de la velocidad del viento. Las ráfagas pueden estar caracterizadas por su tiempo de subida, su magnitud y su duración.

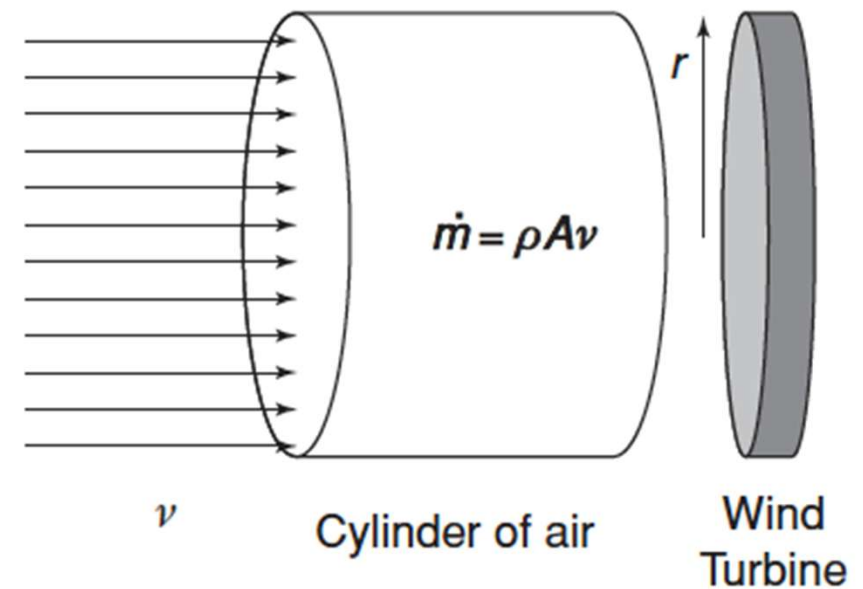


Energía del viento

La energía contenida en el viento es:

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

donde m es masa y v es velocidad; las unidades de energía son $\text{kg m}^2/\text{s}^2 = \text{Joule}$.



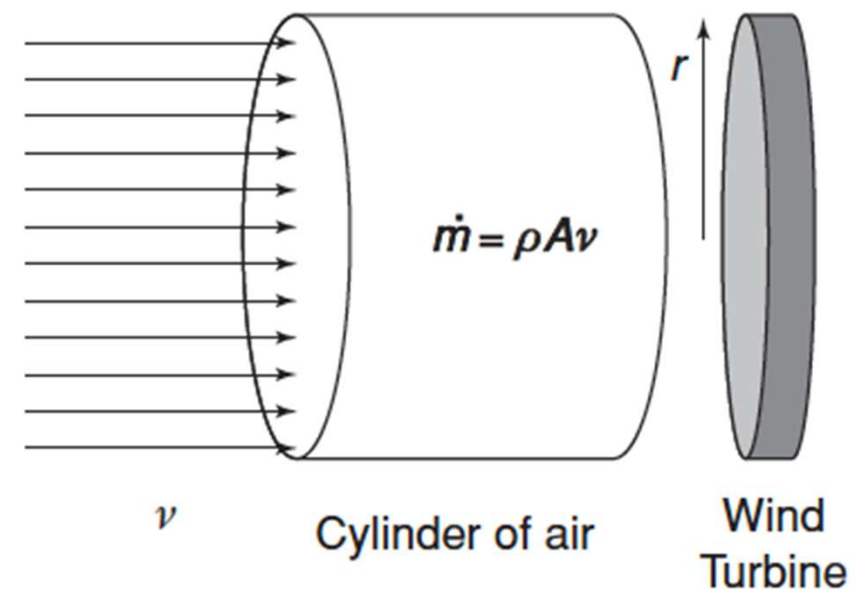
Energía del viento

La masa (m) de la que se extrae la energía es la masa contenida en el volumen de aire que fluirá por el rotor. Para una turbina eólica de eje horizontal (HAWT), el volumen de aire es cilíndrico, como se muestra en la figura.

Con flujo de aire, es conveniente pensar en masa en un cilindro de aire de radio r . Dado que v m/s es la velocidad del viento, la masa contenida en el cilindro de longitud v metros y radio r es la cantidad de masa que pasará por el rotor de la turbina por segundo. Por lo tanto, es conveniente utilizar la masa por segundo.

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

$$\dot{m} = \rho A v$$



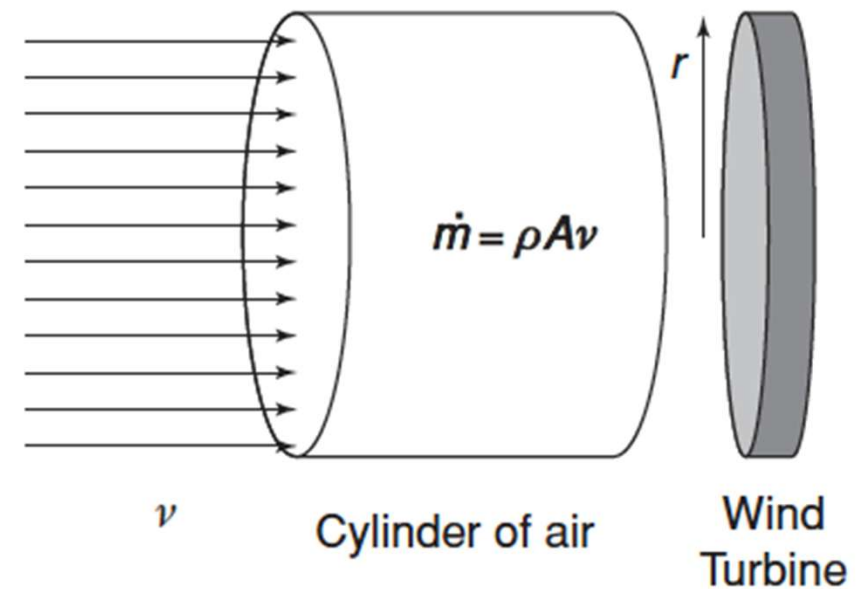
Energía del viento

Donde ρ es la densidad del aire y A es el área de la sección transversal. $\dot{m}$ es la cantidad de materia contenida en un cilindro de aire de longitud v . **$\dot{E}$ es la energía por segundo**, que es lo mismo que la potencia P .

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

$$\dot{m} = \rho A v$$

$$\dot{E} = P = \frac{1}{2} \rho A v v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

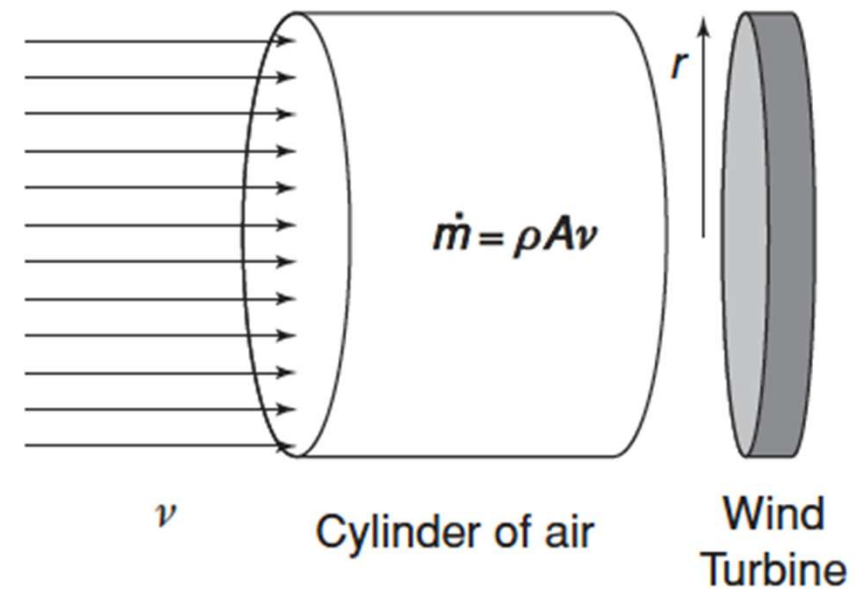


Energía del viento

La distinción entre potencia y energía es importante. Si una turbina eólica funciona a una potencia constante de 10 kW durante 2 h, producirá 20 kWh de energía, que son 72 millones de J (o Watt-segundos).

$$\dot{E} = P = \frac{1}{2} \rho A v v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$



Energía del viento

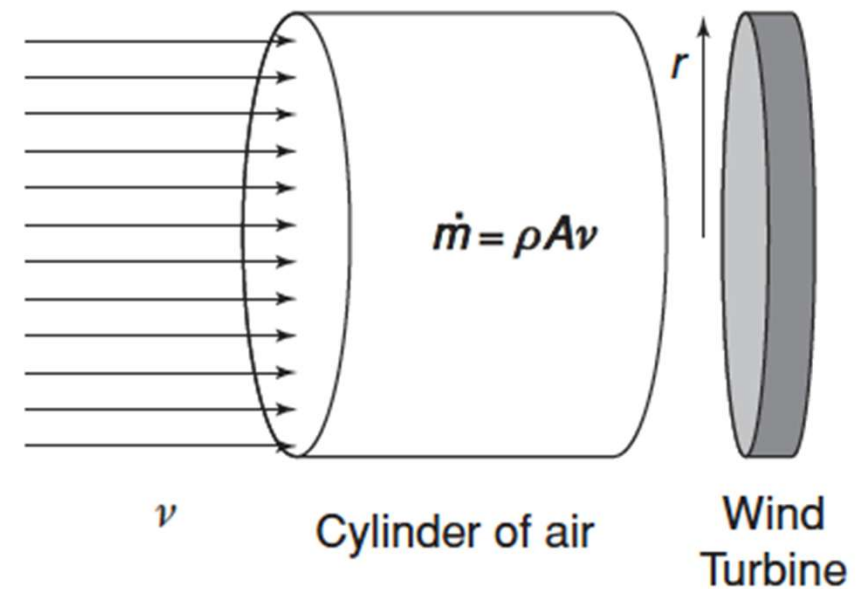
El potencial disponible del recurso eólico y sus capacidades de producción de energía a través de turbinas eólicas se detalla a continuación. A partir de la ecuación de continuidad de la mecánica de fluidos, el caudal másico es una función de la densidad del aire, ρ , y la velocidad del aire (asumido uniforme), U , y está dada por.

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU$$

Según Manwell (2009), la energía cinética por unidad de tiempo, o potencia, y la energía eólica por unidad de área, o densidad de energía eólica, respectivamente son:

$$P = \frac{1}{2} \rho AU^3$$

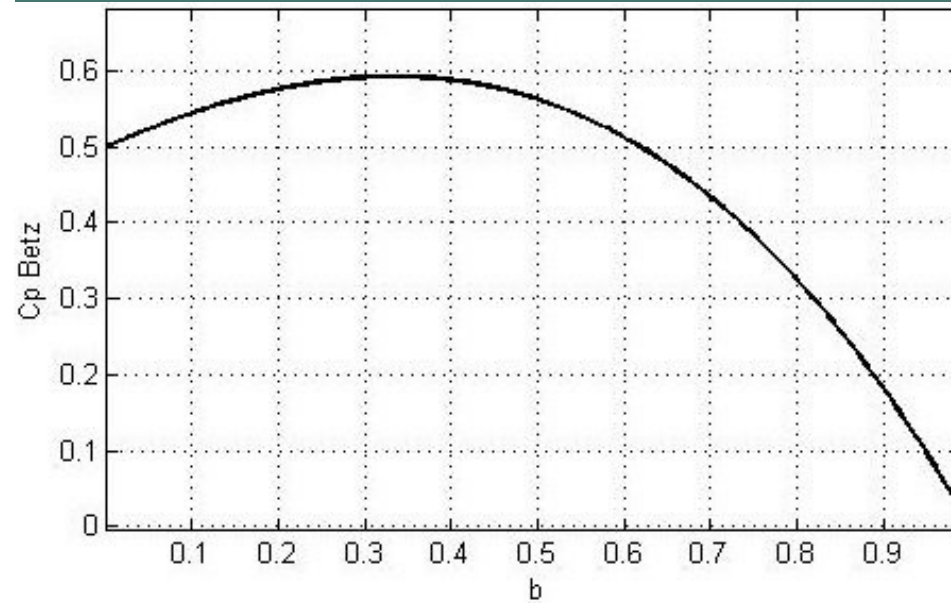
$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3$$



Betz

Derivación del límite de Betz

En 1919, Albert Betz postuló una teoría sobre la eficiencia de las turbinas de rotor. Usando conceptos simples de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, postuló que una turbina eólica con un rotor en forma de disco no puede capturar más del **59,3%** de la energía contenida en una masa de aire que pasará por el rotor.

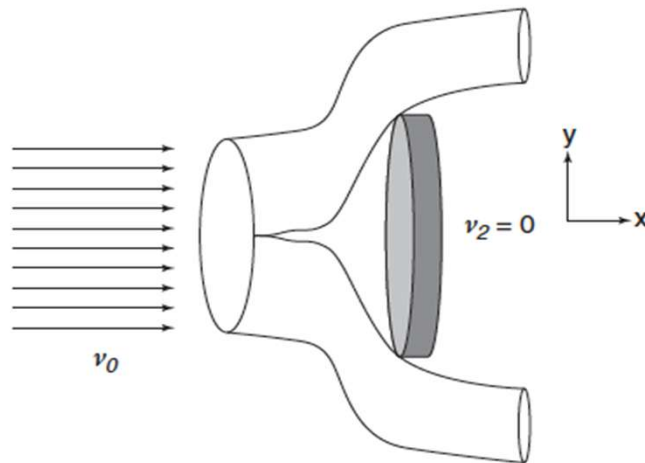


Betz

Conservación de momento

- ¿Puede el rotor de un aerogenerador extraer toda la energía cinética del viento y hacer que $v_2 = 0$?

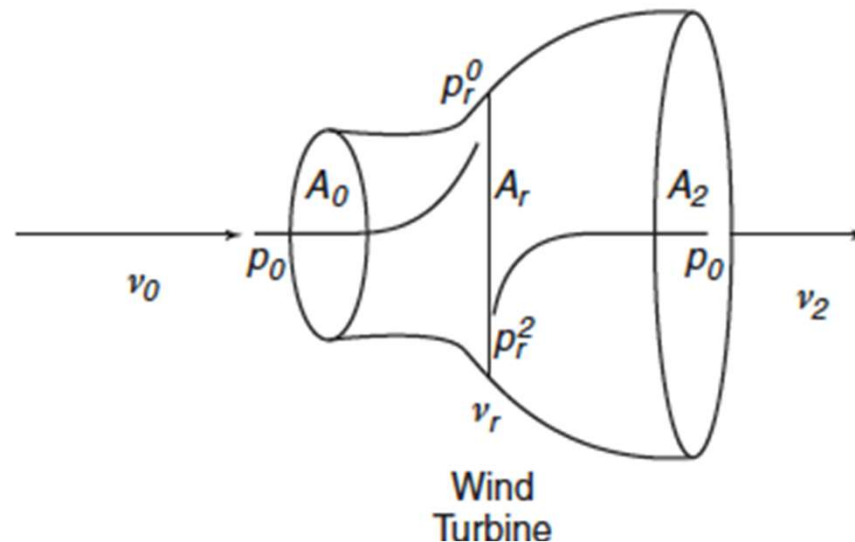
Si v_2 es cero, entonces no pasa viento por el rotor. El rotor actúa como una pared impenetrable y el viento fluye alrededor de la pared. Como no pasa viento a través del rotor, no hay extracción de energía.



Conservación de momento

El mecanismo que entrega potencia al rotor es:

- La diferencia de presión a través del rotor crea la fuerza que realiza el trabajo y genera potencia. Esto es contrario a la intuición. Uno esperaría que la velocidad del viento cayera abruptamente a lo largo del rotor. De hecho, la velocidad del viento no cae, sino que hay una caída brusca de la presión y la energía de la presión se transfiere al rotor. Tenga en cuenta que una caída abrupta en la velocidad del viento causaría una gran aceleración y fuerza indeseables.



Clases de viento

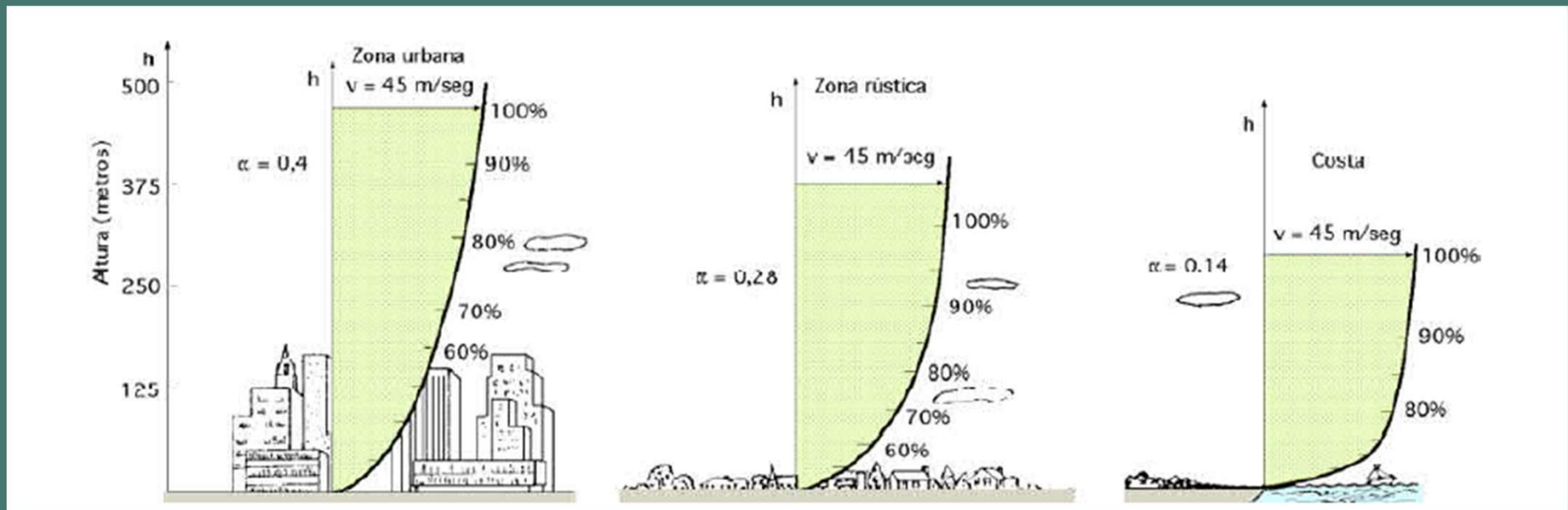
Como convención, la fuerza del viento en un sitio se clasifica en función de la densidad de potencia a una altura de 50 m sobre el nivel del suelo (AGL). La Tabla 3-4 enumera la definición de clases de viento en términos de densidad de potencia a 10 y 50 m.³ Por conveniencia, los rangos de velocidad del viento están asociados con los rangos de densidad de potencia.

Pobre
Marginal
Justa
Bueno
Excelente
Sobresaliente
Magnífico

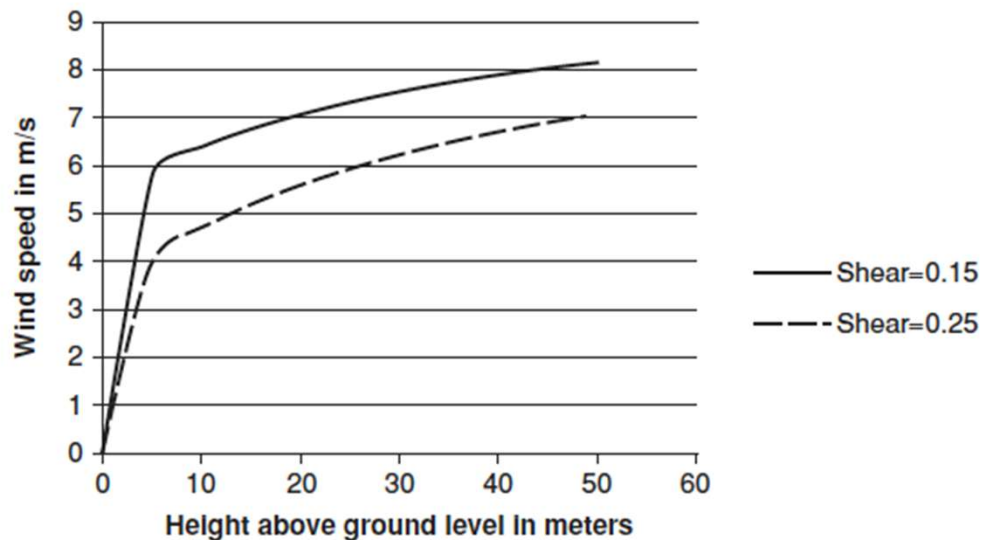
10 m			50 m		
Wind Class	Wind Class Name	Power Density, W/m ²	Average Wind Speed, m/s	Power Density, W/m ²	Average Wind Speed, m/s
1	Poor	0–100	0–4.4	0–200	0–5.6
2	Marginal	100–150	4.4–5.1	200–300	5.6–6.4
3	Fair	150–200	5.1–5.6	300–400	6.4–7.0
4	Good	200–250	5.6–6.0	400–500	7.0–7.5
5	Excellent	250–300	6.0–6.4	500–600	7.5–8.0
6	Outstanding	300–400	6.4–7.0	600–800	8.0–8.8
7	Superb	400–1000	7.0–9.4	800–2000	8.8–11.9

Clases de viento

La cizalladura del viento describe el cambio en la velocidad del viento en función de la altura. Suponiendo que no haya deslizamiento en la superficie, la velocidad del viento en la superficie es cero. Es decir, la velocidad del viento es cero a una altura de cero.



Clases de viento



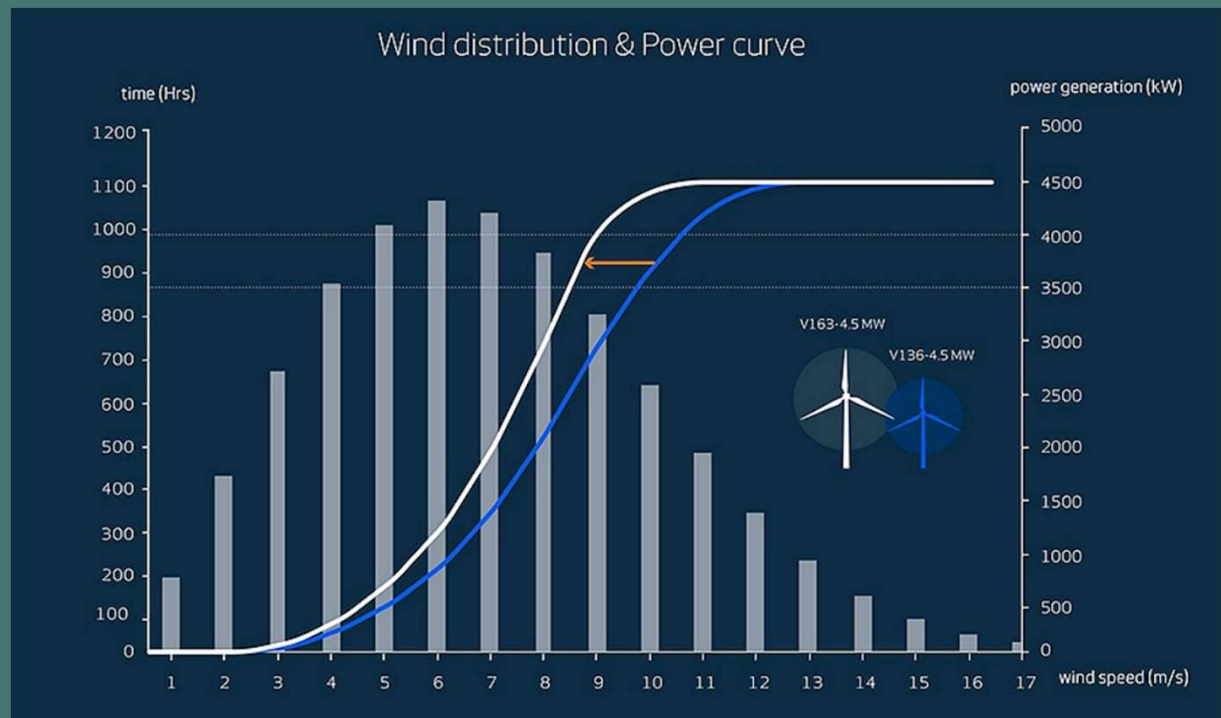
Description	Roughness Class	Roughness Length, m	Shear
Open sea	0	0.0001–0.003	0.08
Open terrain with a smooth surface, like concrete runway, mowed grass	0.5	0.0024	0.11
Open agricultural area without fences and hedgerows and very scattered buildings. Only softly rounded hills	1	0.03	0.15
Agricultural land with some houses and 8-m-tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 1250 m	1.5	0.055	0.17
Agricultural land with some houses and 8-m-tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 500 m	2	0.1	0.19
Agricultural land with many houses, shrubs and plants, or 8-m tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 250 m	2.5	0.2	0.21
Villages, small towns, agricultural land with many or tall sheltering hedgerows, forests, and very rough and uneven terrain	3	0.4	0.25
Larger cities with tall buildings	3.5	0.8	0.31
Very large cities with tall buildings and skyscrapers	4	1.6	0.39

Source: Nielsen, Per. WindPRO 2.5 Users Guide. EMD International, Aalborg, Denmark.

Curvas de potencia

Velocidades de viento operativas

- Velocidad de arranque Cut-In: 3 m/s
Es la velocidad mínima del viento necesaria para que un aerogenerador comience a generar electricidad.
- Velocidad de parada Cut-Out: 22.5 m/s
Es la velocidad máxima del viento a la que el aerogenerador se detiene automáticamente para evitar daños.
- Velocidad de re-ingreso: 20 m/s
Pasado un margen de tiempo en torno a 10 min de viento sostenido estable, la máquina reinicia su operación.



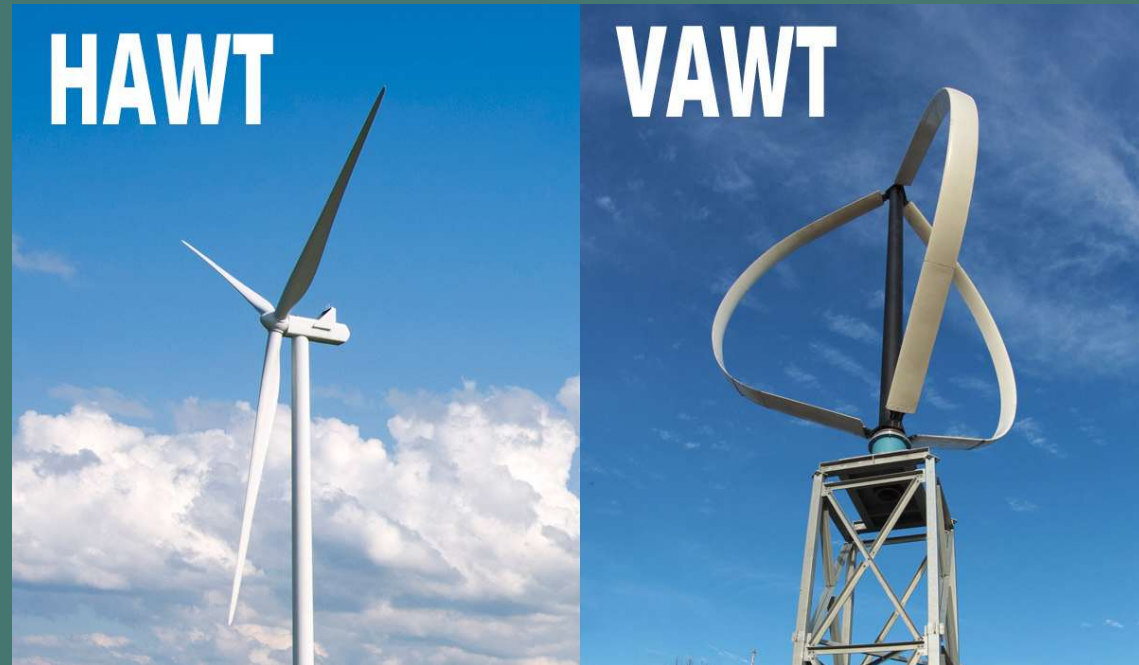
Eje Horizontal (HAWT) vs. Eje Vertical (VAWT)

Aerogeneradores de Eje Horizontal (HAWT):

- El eje de rotación principal es paralelo al suelo y al viento.
- Es el diseño dominante en el mundo para la generación a gran escala.
- Requieren un mecanismo de guiñada (yaw) para orientarse activamente hacia la dirección del viento.

Aerogeneradores de Eje Vertical (VAWT):

- El eje de rotación principal es perpendicular al suelo.
- Son omnidireccionales: no necesitan orientarse, capturan el viento desde cualquier dirección.
- El generador y los componentes pesados se ubican en la base.



Tipos y Características del Eje Horizontal

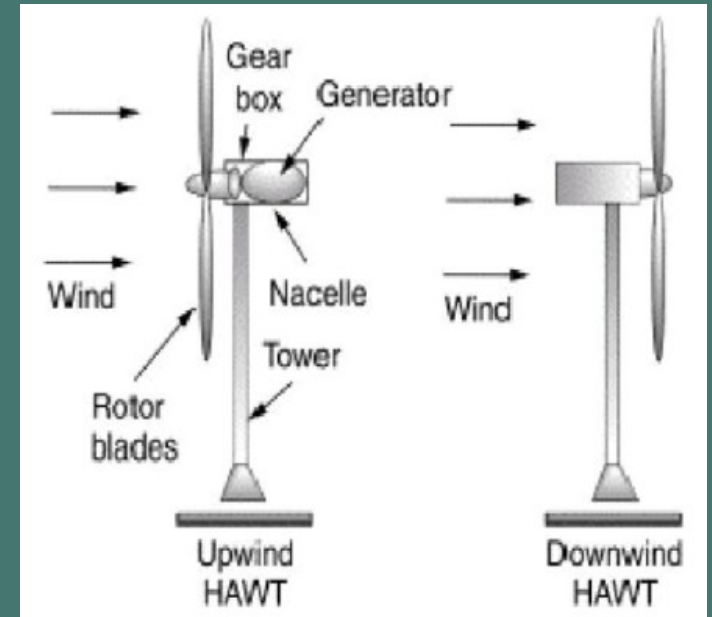
Tipos Principales: La diferencia clave es la posición de las palas respecto a la torre.

1. Upwind (Barlovento):

- Las palas giran delante de la torre (de cara al viento).
- Es el diseño más usado (>95% del mercado).
- Evita la "sombra de viento" generada por la torre, reduciendo la fatiga en las palas.

2. Downwind (Sotavento):

- Las palas giran detrás de la torre.
- Diseño menos común.
- Puede auto-orientarse pasivamente, pero la torre perturba el flujo de viento antes de que golpee las palas.



Análisis del Eje Horizontal (HAWT)

Ventajas:

- Alta Eficiencia: Las palas pueden diseñarse con perfiles aerodinámicos óptimos, capturando la máxima energía (cercana al Límite de Betz).
- Tecnología Madura: Décadas de optimización han reducido sus costos y aumentado su fiabilidad.
- Mayor Altura: Al estar sobre torres altas, acceden a vientos más fuertes y estables.

Desventajas

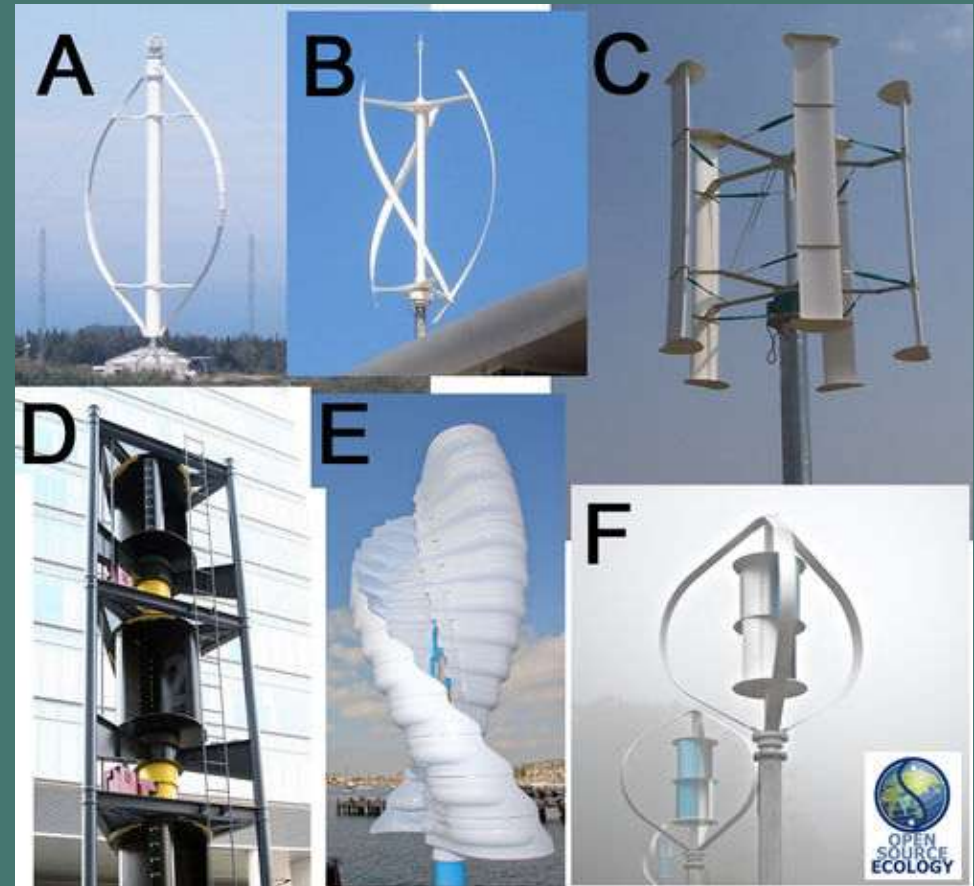
- Complejidad Mecánica: Requieren sistemas complejos en la góndola (a gran altura), como la guiñada (yaw) y el cambio de paso (pitch).
- Mantenimiento Costoso: El acceso a la góndola (donde están el generador y la caja de cambios) es difícil y requiere grúas especiales.
- Impacto Visual y Ruido: Su gran tamaño y velocidad de punta de pala generan un impacto notable.



Tipos y Características del Eje Vertical

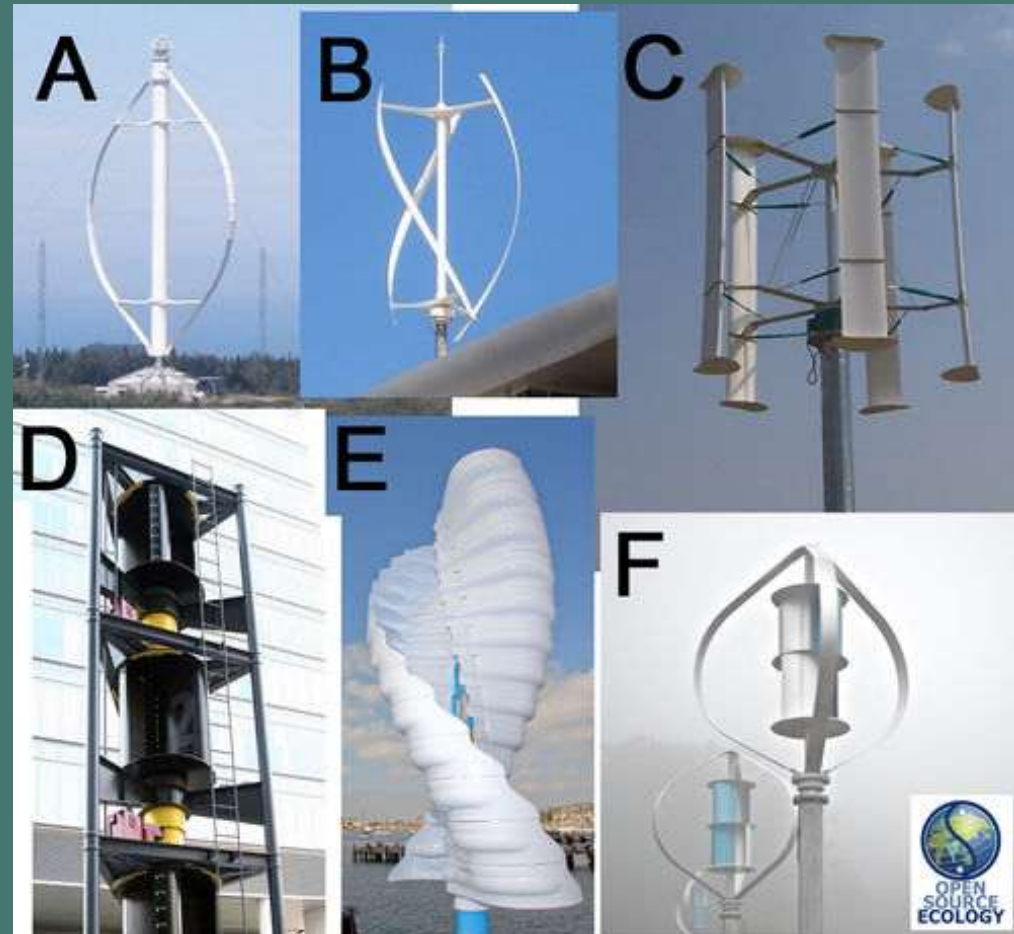
Tipos Principales: Se diferencian por el principio aerodinámico que utilizan.

1. Tipo Darrieus (Basado en Sustentación):
 - Usa perfiles alares (como las alas de un avión) que generan sustentación (lift).
 - Gira a alta velocidad y tiene mayor eficiencia que el Savonius.
 - Formas comunes: "batidora de huevos" o de palas rectas (H-Rotor).
2. Tipo Savonius (Basado en Arrastre):
 - Usa la resistencia o arrastre (drag) del viento.
 - Funciona como dos medias tazas que capturan el viento.
 - Baja eficiencia y baja velocidad, pero tiene un alto par (torque) de arranque.



Tipos y Características del Eje Vertical

(A) Darrius type; (B) Gorlov type; (C) H-type; (D) Savonius type; (E) Twisted Savonius type; (F) mixed Savonius and Darrieus type



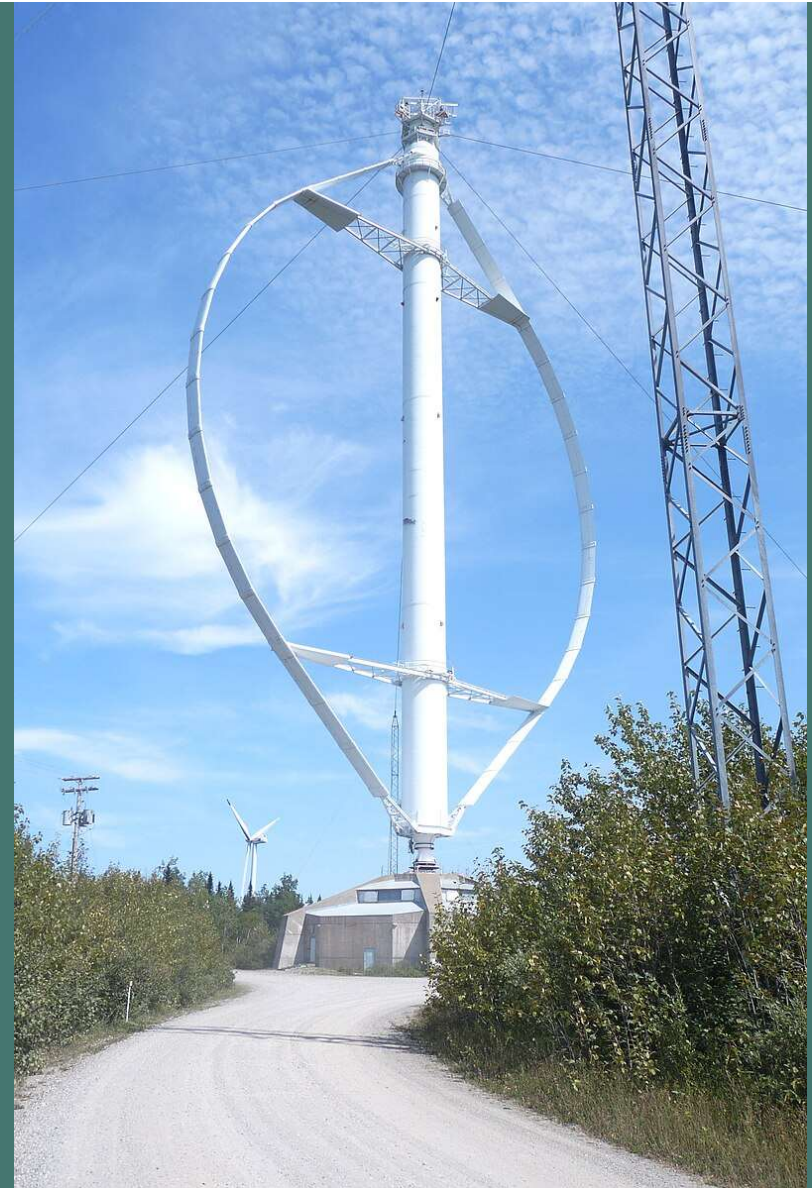
Análisis del Eje Vertical (VAWT)

Ventajas:

- Omnidireccional: No necesita sistema de guiñada. Ideal para vientos turbulentos y cambiantes (como en ciudades).
- Mantenimiento Sencillo: El generador y la caja de cambios están en el suelo, facilitando la reparación y reduciendo costos.
- Menor Ruido: Operan a menores velocidades y son generalmente más silenciosos.

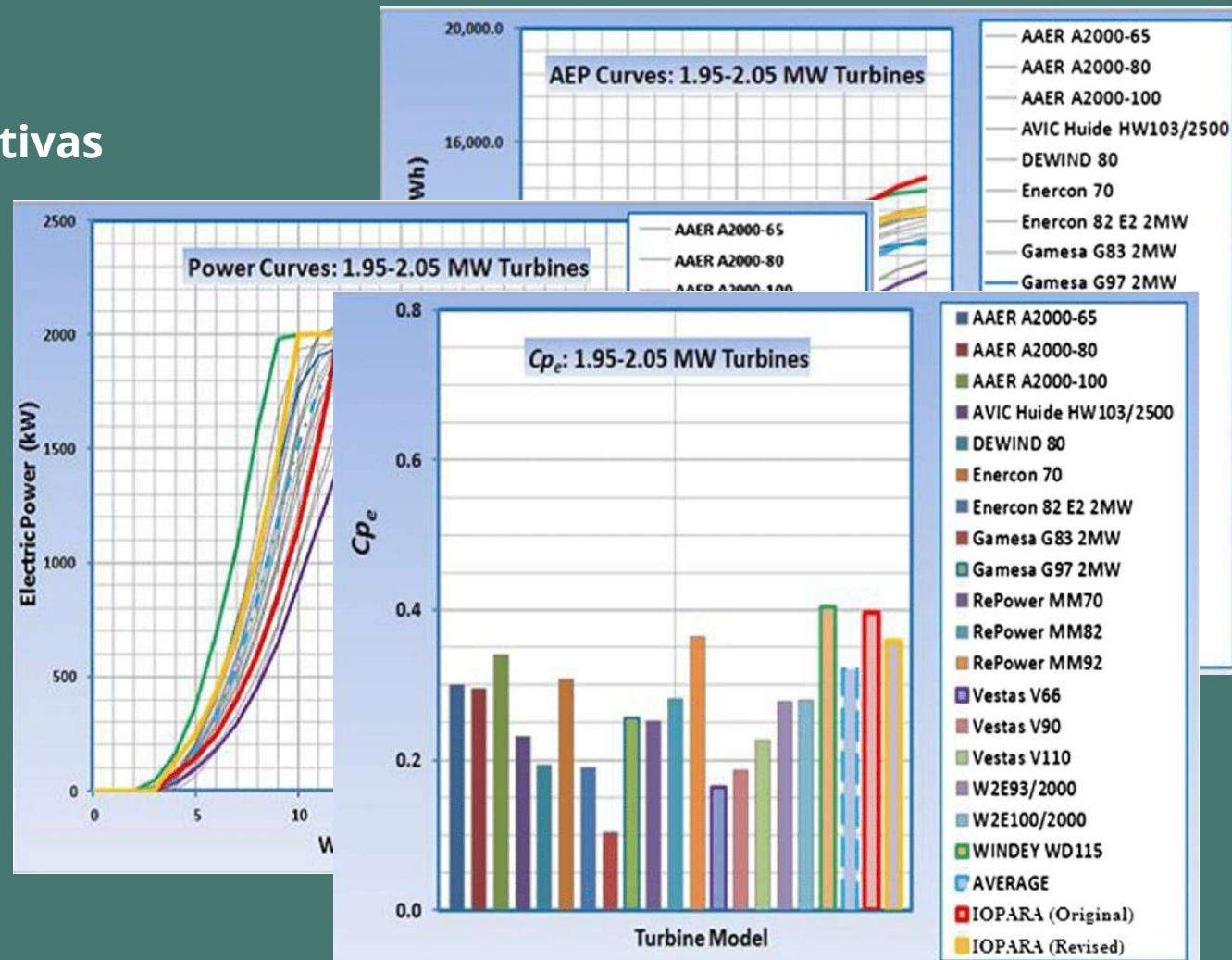
Desventajas

- Menor Eficiencia General: Capturan menos energía por área barrida en comparación con los HAWT.
- Bajo Par de Arranque (Darrieus): A menudo necesitan un impulso externo (motor) para empezar a girar.
- Estrés Estructural: Las palas sufren cargas cíclicas complejas y cambiantes en cada rotación, lo que puede causar fatiga.

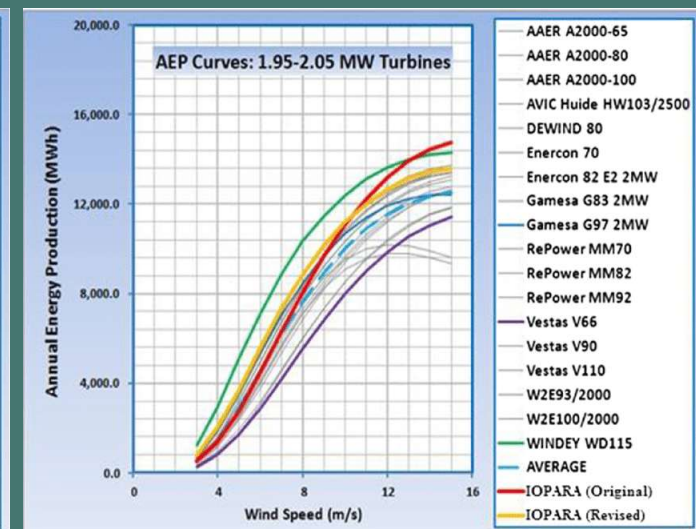
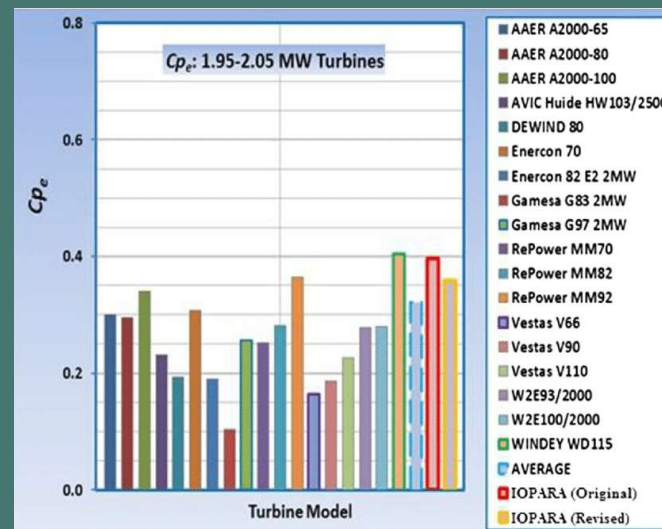
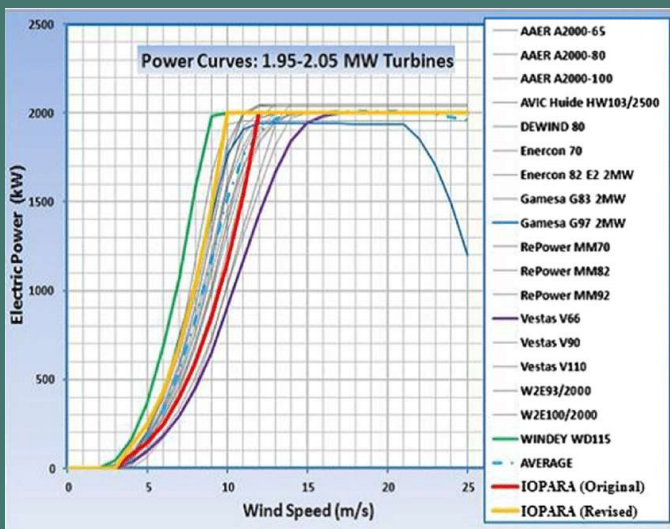


Velocidades de viento operativas

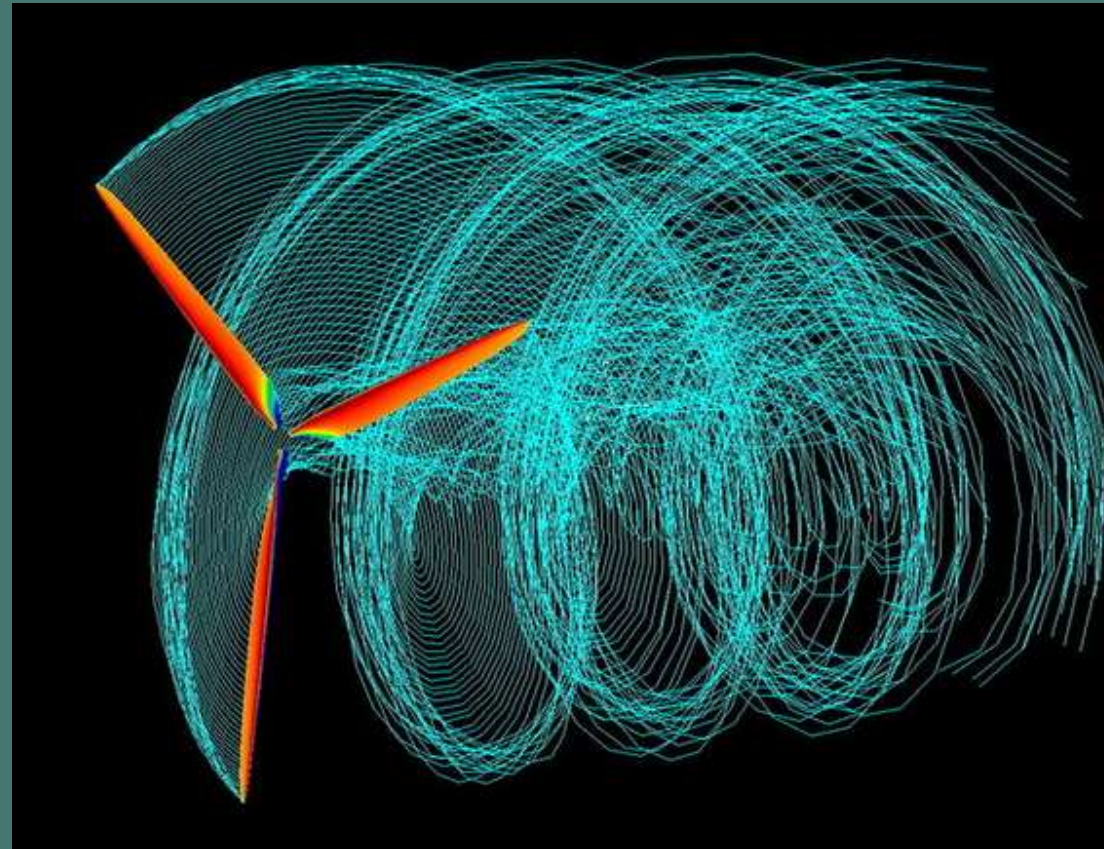
- Velocidad de arranque Cut-In: 3 m/s
Es la velocidad mínima del viento necesaria para que un aerogenerador comience a generar electricidad.
- Velocidad de parada Cut-Out: 22.5 m/s
Es la velocidad máxima del viento a la que el aerogenerador se detiene automáticamente para evitar daños.
- Velocidad de re-ingreso: 20 m/s
Pasado un margen de tiempo en torno a 10 min de viento sostenido estable, la máquina reinicia su operación.



Velocidades de viento operativas

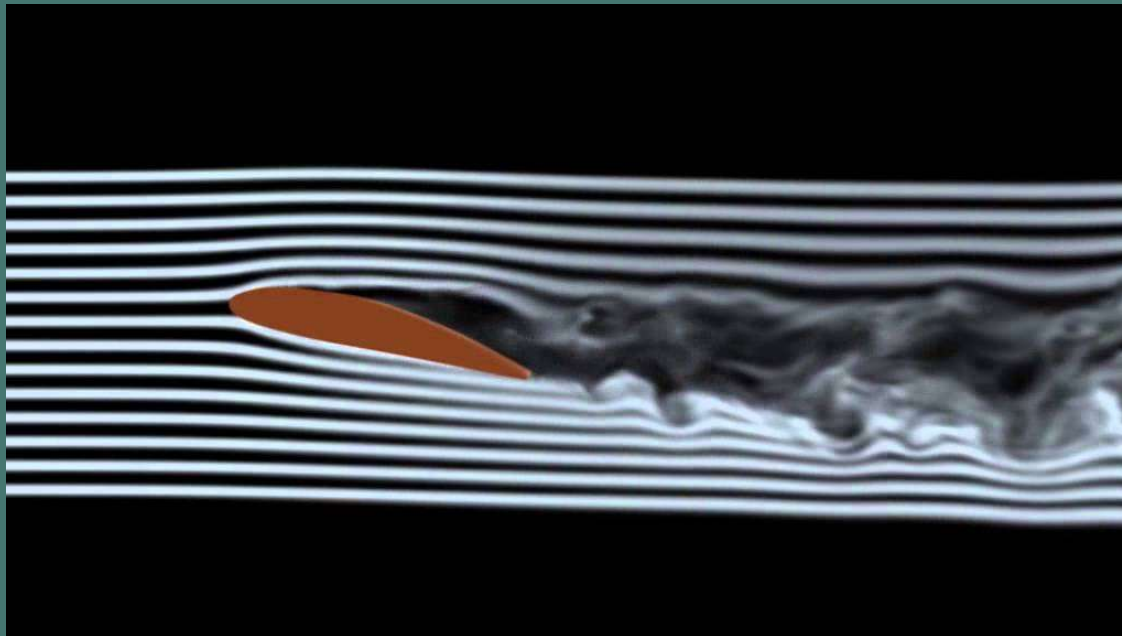


Tema 2: Aerodinámica del aerogenerador



Aerodinámica

Los aerogeneradores son sistemas que interactúan con las fuerzas del viento y reaccionan ante ellas. Estas fuerzas pueden provocar respuestas poco favorables o aprovechables para la turbina, pero también respuestas controladas para generar un movimiento deseado, como en el caso de la rotación del rotor. La pala es el componente que convertirá la fuerza del viento axial en fuerza rotacional.



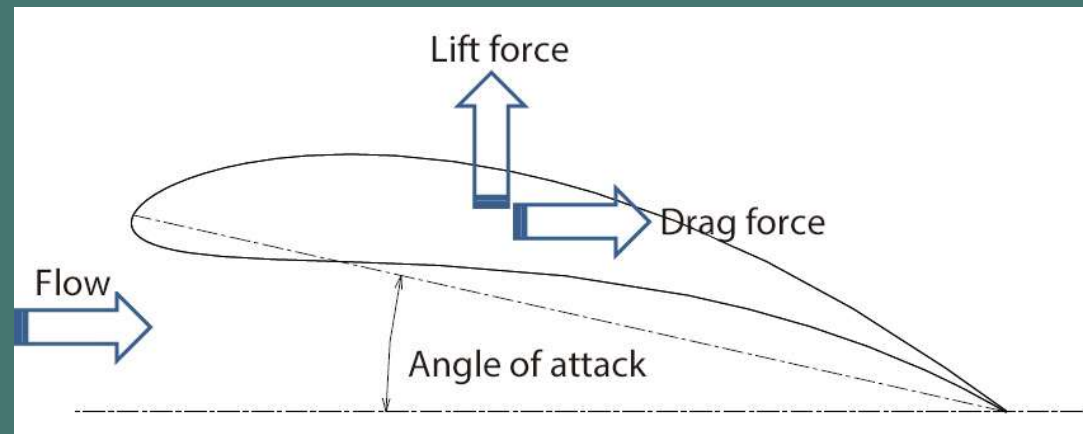
Principios de sustentación y arrastre

Las Fuerzas Aerodinámicas: ¿Qué son la Sustentación y el Arrastre?

Cuando el viento (un fluido) interactúa con un objeto (como el ala de un avión o la pala de una turbina), ejerce una Fuerza Aerodinámica total.

Esta fuerza se descompone en dos componentes clave:

- Sustentación (Lift):
 - Es la fuerza útil.
 - Actúa de forma perpendicular a la dirección del viento relativo.
 - Es la fuerza que "levanta" el ala de un avión o, en una turbina, la que genera el par de giro (torque).
- Arrastre (Drag):
 - Es la fuerza de resistencia.
 - Actúa de forma paralela a la dirección del viento relativo.
 - Se opone al movimiento y frena la pala.



Principios de sustentación y arrastre

El Principio de la Sustentación: ¿Cómo se Genera la Sustentación?

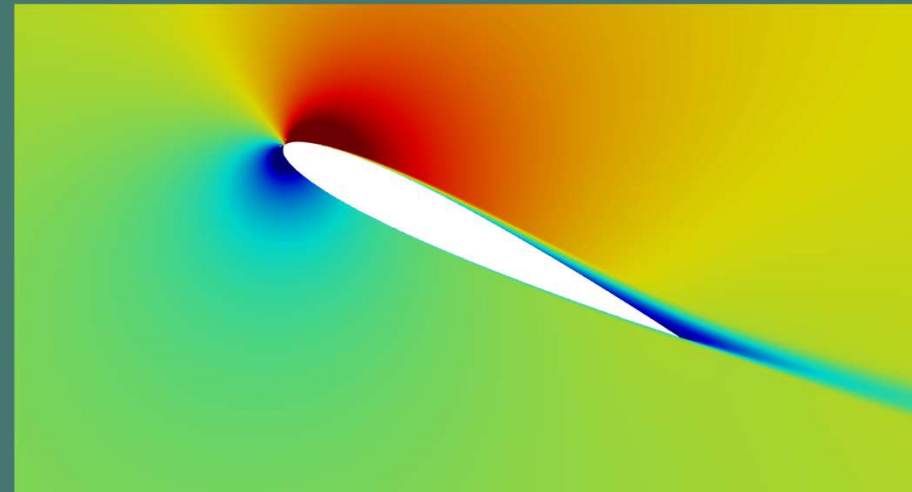
La sustentación se genera por una diferencia de presión en un perfil alar (la forma de la pala).

Principio de Bernoulli:

- La forma curvada del perfil (extradós) obliga al aire a viajar más rápido por encima.
- El aire que viaja más lento por debajo (intradós) tiene una presión más alta.
- Aire rápido = Baja Presión
- Aire lento = Alta Presión
- Esta diferencia de presión crea una fuerza neta hacia arriba (sustentación).

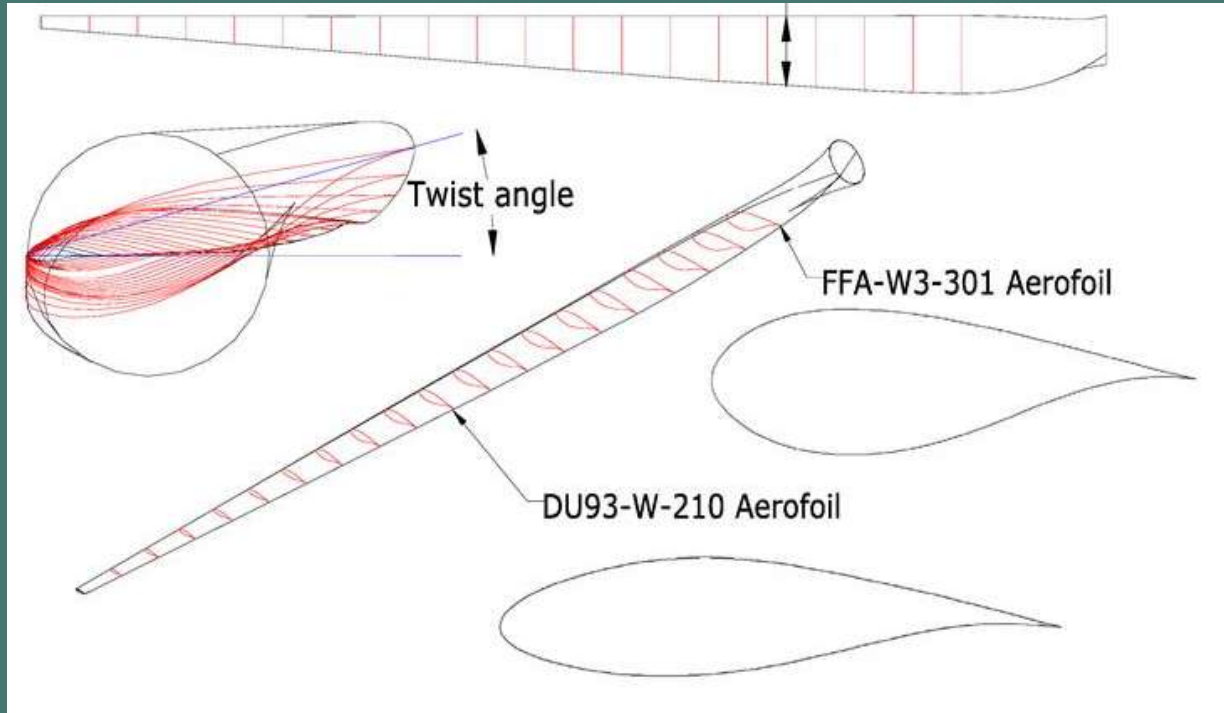
Ángulo de Ataque:

- Es el ángulo entre el perfil alar y la dirección del viento.
- Aumentar el ángulo incrementa la sustentación, pero solo hasta un punto crítico.
- Si el ángulo es demasiado alto, el flujo de aire se desprende y la sustentación colapsa (fenómeno de "Stall" o pérdida).



Principios de sustentación y arrastre





Principios de sustentación y arrastre

El Principio del Arrastre y la Eficiencia: ¿Qué Causa el Arrastre y Cómo se Mide la Eficiencia?

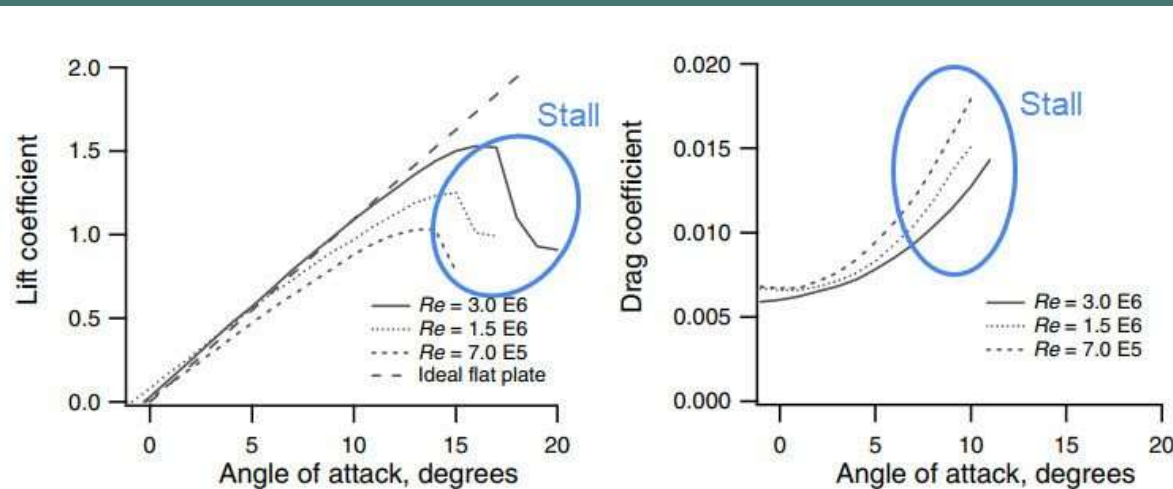
El arrastre es el "costo" aerodinámico de moverse a través del aire.

•Tipos Principales de Arrastre:

- Arrastre de Fricción: Causado por la fricción del aire al "rozar" la superficie de la pala. Depende de la rugosidad de la superficie.
- Arrastre de Presión (o de Forma): Causado por la forma del objeto. Un objeto aerodinámico (como una pala) genera un desprendimiento de flujo pequeño, minimizando este arrastre.

•El Objetivo: La Relación L/D

- La eficiencia aerodinámica no se mide solo por tener alta sustentación, sino por la relación Sustentación/Arrastre (L/D).
- Objetivo: Diseñar palas con el máximo L/D posible, es decir, que generen la mayor sustentación con la mínima resistencia posible.



Cambio de ángulo de las palas

Este gráfico ilustra la eficiencia aerodinámica (Coeficiente de Potencia) de una turbina en función de dos variables clave:

- Eje X (Tip Speed Ratio): La relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento.
- Curvas (Beta): El ángulo de paso (pitch) de las palas, medido en grados.

