

# Aerodinámica de Turbinas Eólicas

---

## ¿Qué es la aerodinámica?

*De aero- y dinámico.*

1. **adj.** Perteneiente o relativo a la **aerodinámica**.
2. **adj.** Que tiene la forma adecuada para reducir la resistencia del aire. *Un coche aerodinámico.*
3. **f.** Rama de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del aire y otros gases, y su interacción con los cuerpos que se mueven en ellos.

túnel aerodinámico

<https://dle.rae.es/aerodin%C3%A1mico>

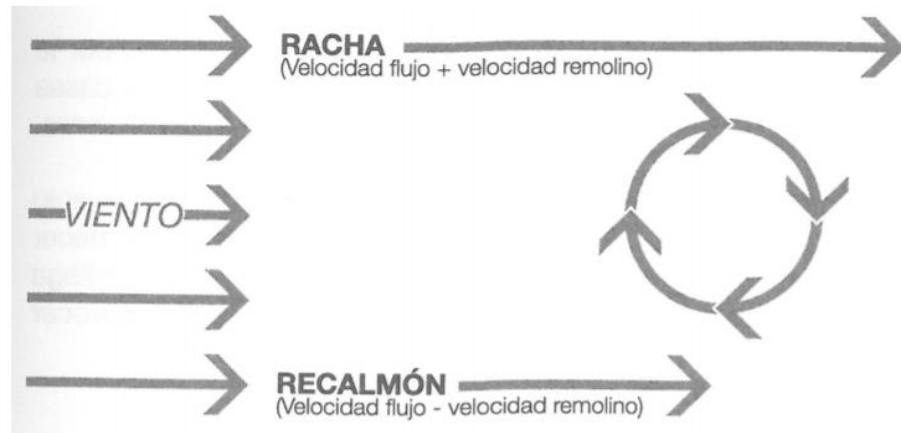
## ¿Qué es la aerodinámica?

- El estudio de la aerodinámica es, justamente, el estudio de la interacción entre un objeto que se mueve y el medio por el cual lo hace.
- Las características físicas del objeto, junto con las características físicas del medio, dan como resultado una dinámica específica de movimiento. Es decir, una aceleración, dirección y velocidad determinada



# Turbulencia

- En meteorología el término turbulencia se refiere normalmente a unos movimientos atmosféricos menores que la corriente media (IDEAM).
- La turbulencia meteorológica es un estado del flujo de aire, en el cual las velocidades muestran fluctuaciones irregulares.

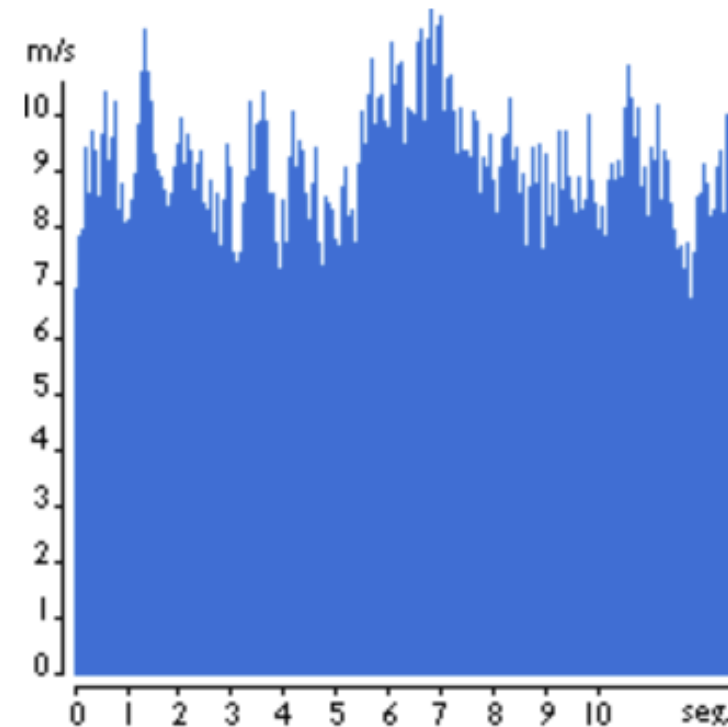


$$\vec{V} = \vec{V}_M + \vec{V}'$$

$\vec{V}$  : velocidad

$\vec{V}_M$  : velocidad media

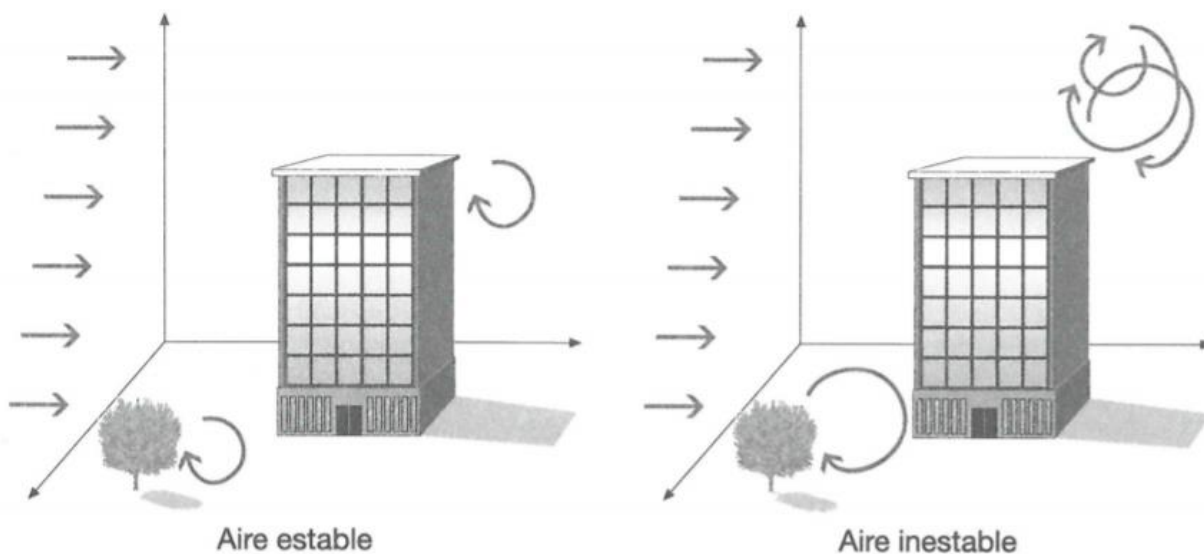
$\vec{V}'$  : velocidad turbulenta (fluctuación)



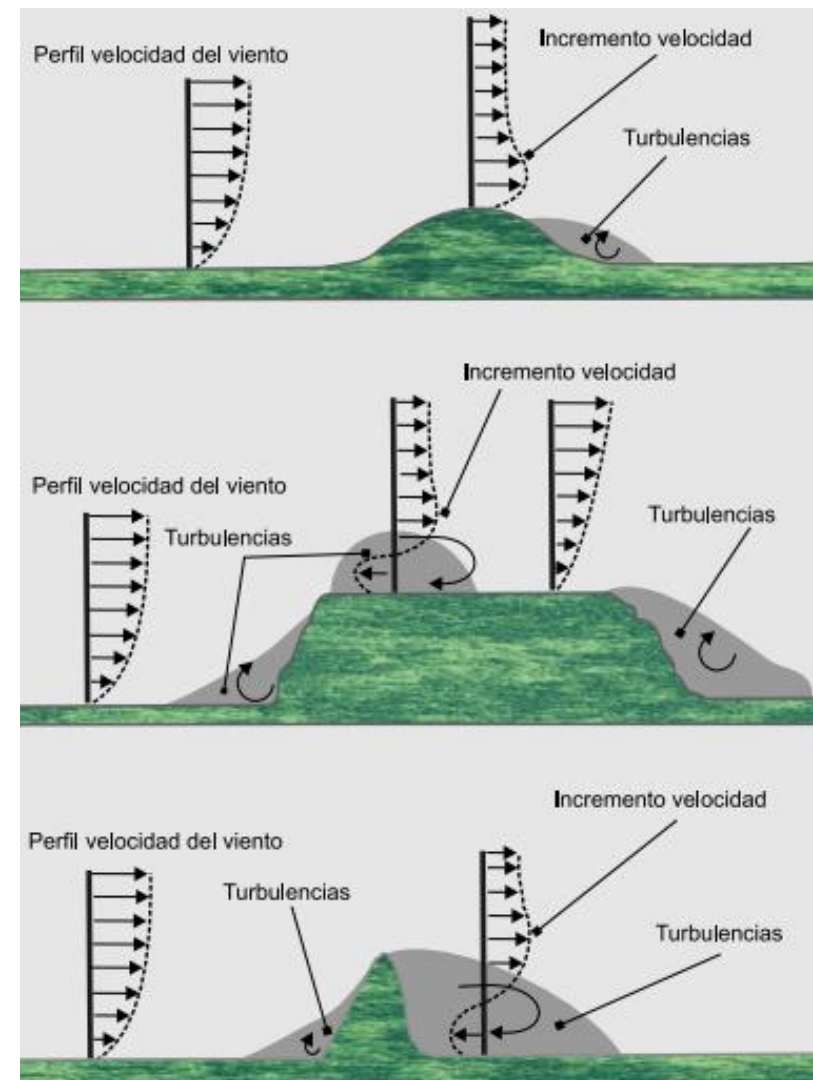
© 1998 [www.WINDPOWER.org](http://www.WINDPOWER.org)

# Turbulencia

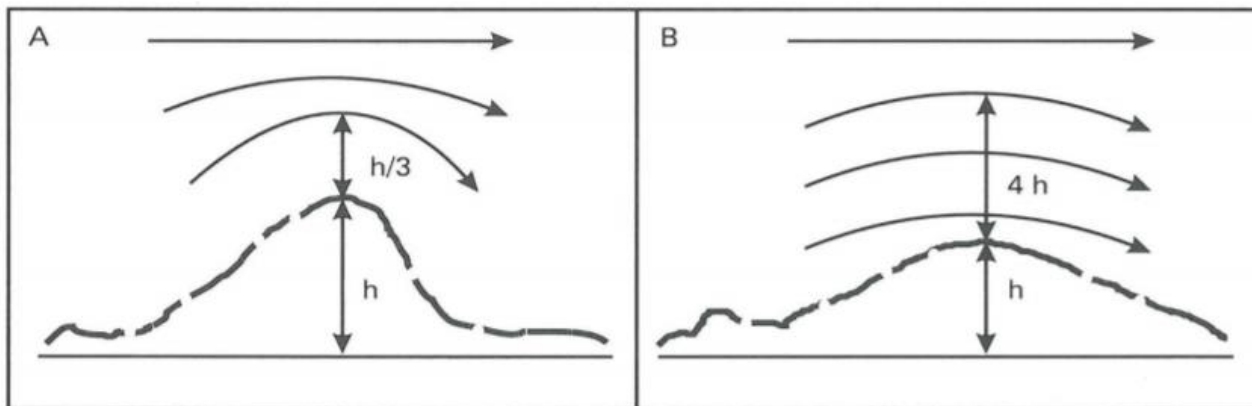
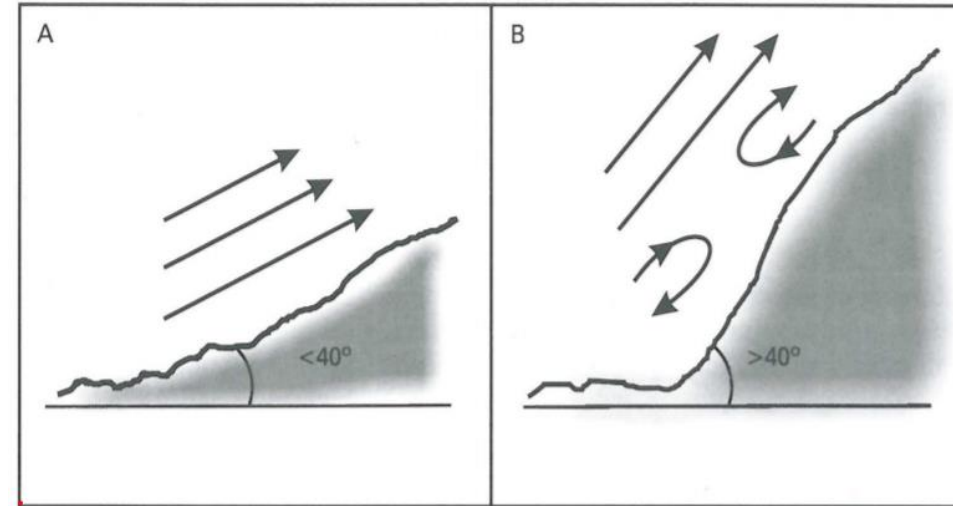
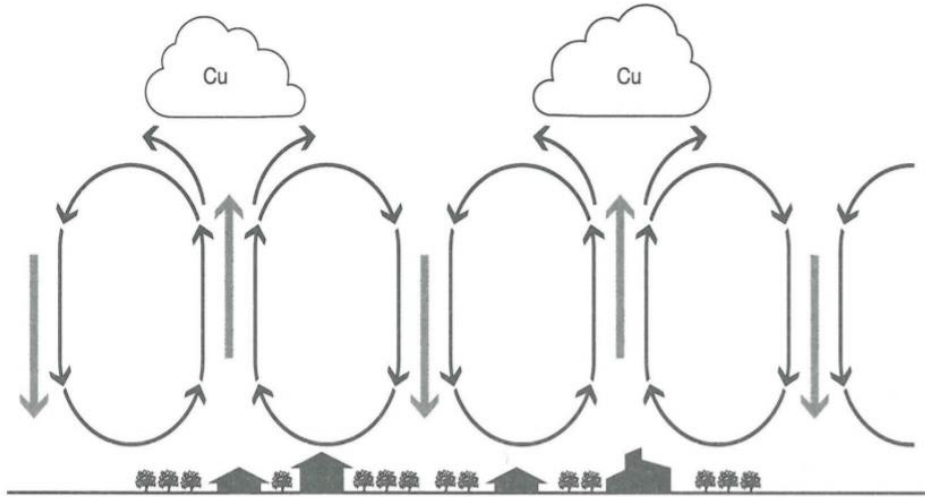
En áreas cuya superficie es muy accidentada y tras obstáculos como edificios, también se producen muchas turbulencias, con flujos de aire muy irregulares, con remolinos y vórtices en los alrededores.



*Turbulencia a sotavento de obstáculos, en aire estable e inestable*



# Turbulencia: Térmica, mecánica, cima





## Turbulencia y fatiga

---

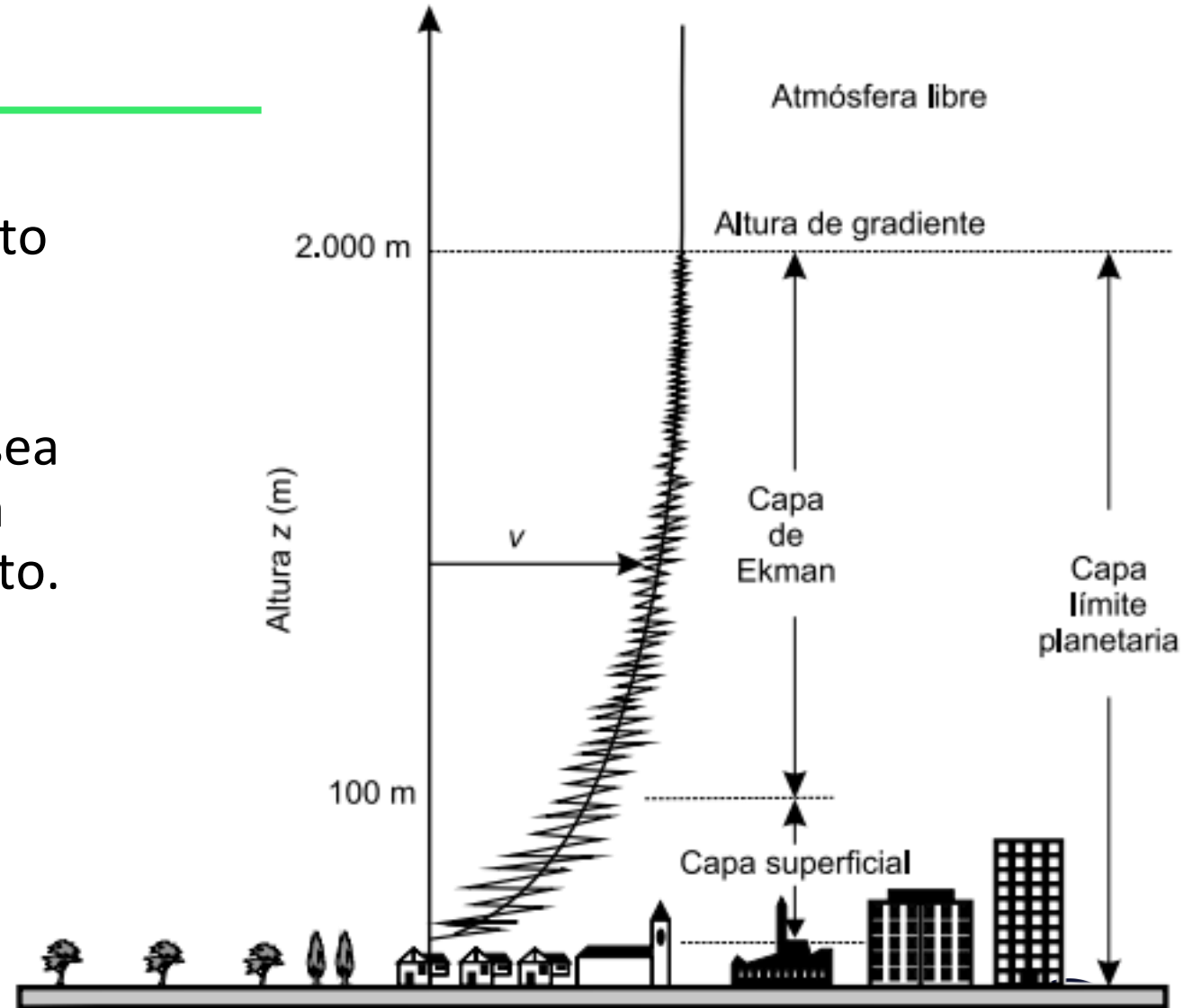
La velocidad del viento puede incrementarse o pueden generarse turbulencias que den lugar al cambio de sentido de la velocidad del viento. Estas turbulencias pueden causar la fatiga de las palas de las turbinas eólicas.

Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador. También provocan mayores roturas y desgastes en la turbina eólica



# Rugosidad

- En mecánica la rugosidad es el conjunto de irregularidades que posee una superficie.
- En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.
- A una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento.



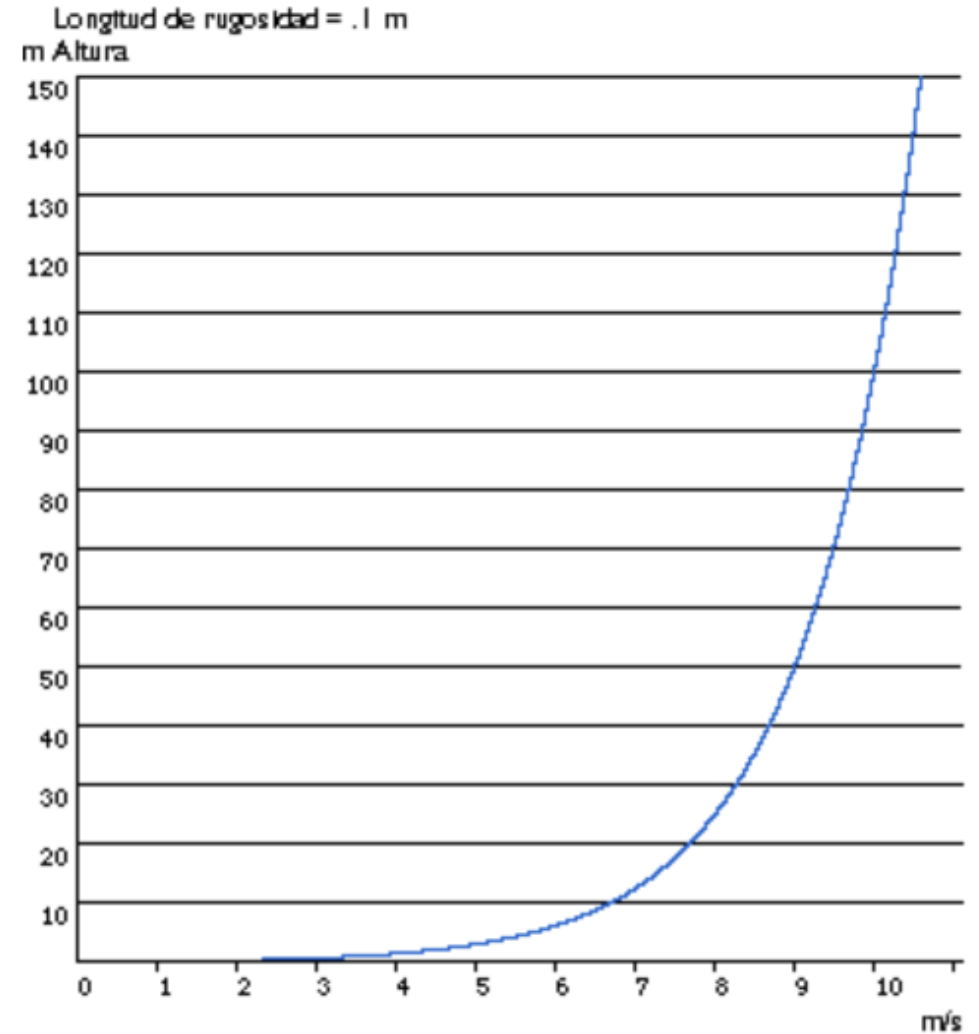


## Rugosidad y cizallamiento del viento:

- El hecho de que el perfil del viento se mueva hacia velocidades más bajas conforme nos acercamos al nivel del suelo suele llamarse cizallamiento del viento.
- El cizallamiento del viento también puede ser importante en el diseño de aerogeneradores.

Considerando un aerogenerador con una altura del buje de 40 metros y con un diámetro del rotor de 40 metros observará que el viento sopla a 9,3 m/s cuando el extremo de la pala se encuentra en su posición más elevada, y sólo a 7,7 m/s cuando dicho extremo se encuentra en la posición inferior

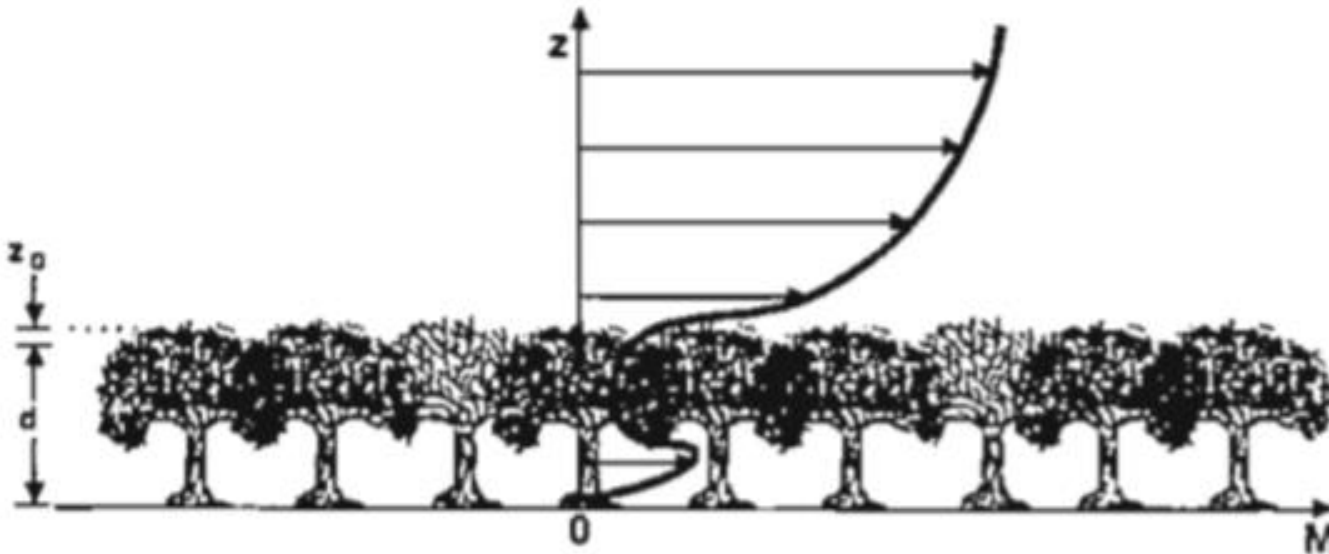
### Cizallamiento del viento



© 2002 Soern Krohn & Asociación danesa de la industria eólica

## Clase de rugosidad y longitud de rugosidad

- En la industria eólica, la gente suele referirse a clase de rugosidad o longitud de rugosidad cuando se trata de evaluar las condiciones eólicas de un paisaje.
- El término longitud de rugosidad es en realidad la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser nula.



$$\bar{M}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

# Clase de rugosidad y longitud de rugosidad

---



Fuente: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#roughness>

# Clase de rugosidad y longitud de rugosidad

Tabla de clases y de longitudes de rugosidad

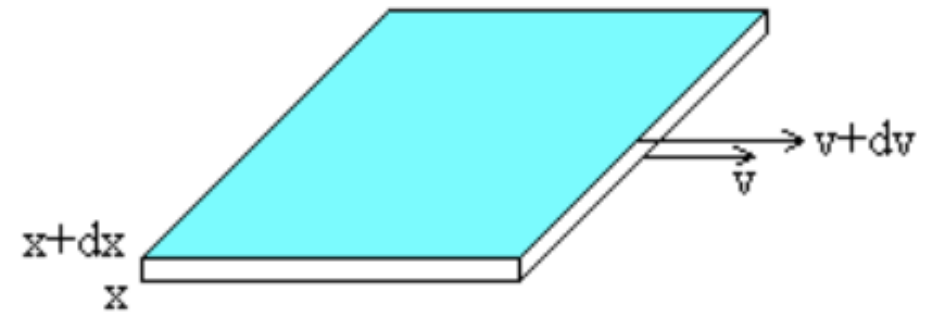
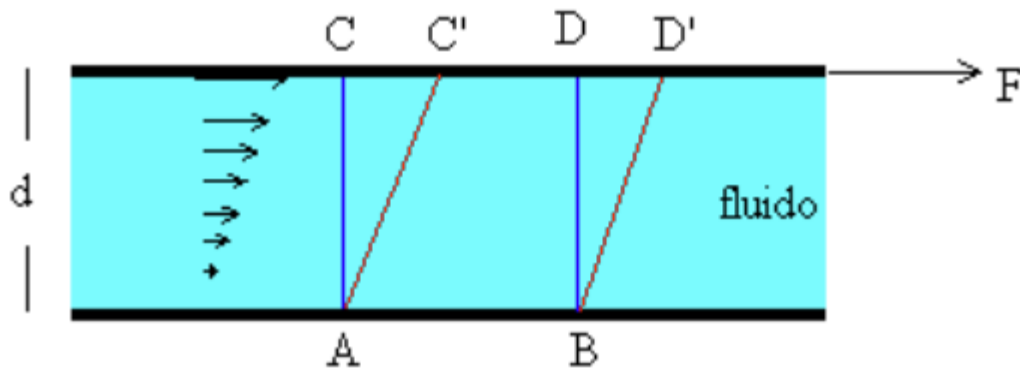
Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m	Tipo de paisaje
0	0,0002	Superficie del agua
0,5	0,0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Fuente: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#roughness>



# Viscosidad

- La viscosidad es el rozamiento interno entre las capas de fluido. A causa de la viscosidad, es necesario ejercer una fuerza para obligar a una capa de fluido a deslizarse sobre otra.



Como consecuencia de este movimiento, una porción de líquido que en un determinado instante tiene la forma ABCD, al cabo de un cierto tiempo se deformará y se transformará en la porción ABC'D

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{d}$$

# Viscosidad

Fluido	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Viscosidad ( $\text{N.s/m}^2$ )
Glicerina	20	1.5
Aceite para motores	0	0.11
Aceite para motores	20	0.03
Sangre	37	$4.0 \times 10^{-3}$
Agua	20	$1.0 \times 10^{-3}$
Agua	90	$0.32 \times 10^{-3}$
Gasolina	20	$2.9 \times 10^{-4}$
Aire	20	$1.8 \times 10^{-5}$
$\text{CO}_2$	20	$1.5 \times 10^{-5}$



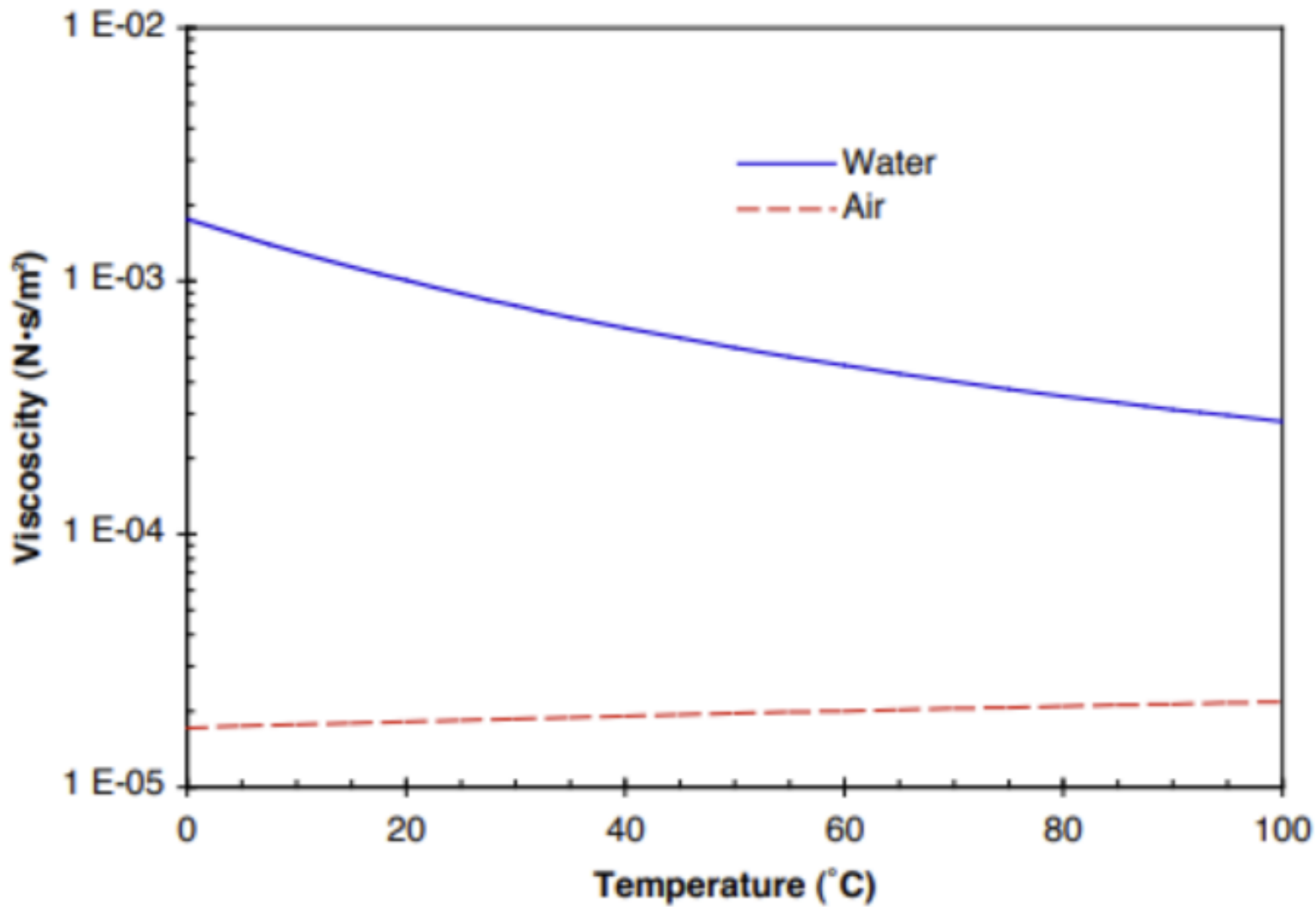
# Viscosidad

## Viscosidad del aire atmosférico

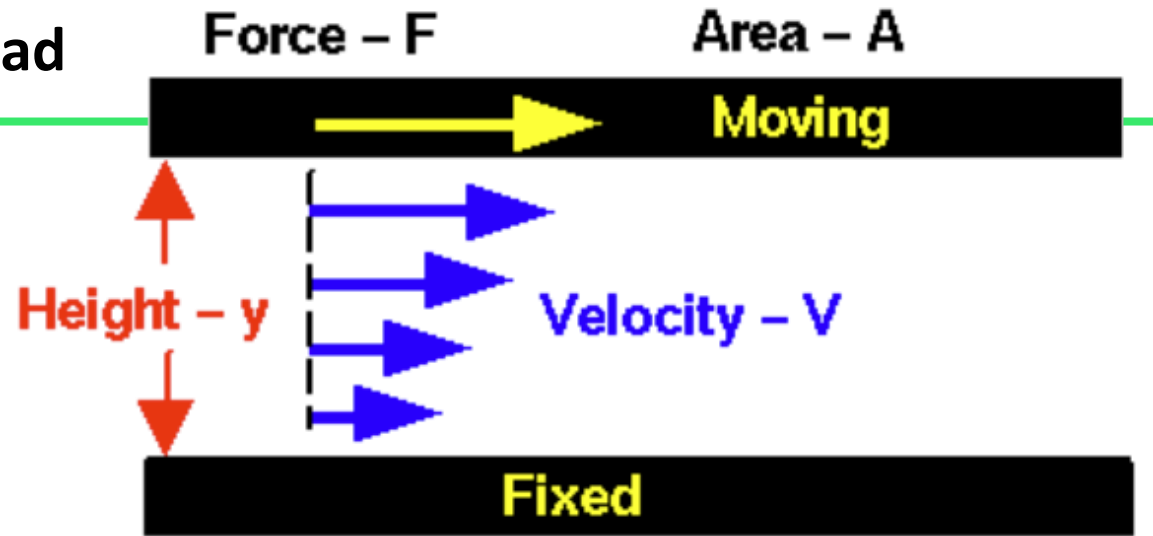
Temperatura ° Celsius	$\mu$ , Viscosidad (dinámica)	$\nu$ , Viscosidad cinemática
-40	1.51 E -5	0.99 E -5
0	1.71 E -5	1.33 E -5
20	1.80 E -5	1.50 E -5
50	1.95 E -5	1.79 E -5

Nota: E -5 significa que la notación es exponencial, lo que implica que el número debe multiplicarse por 0.00001

# Viscosidad



## Viscosidad



Shear Stress =  $\tau$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Shear Stress proportional  
to velocity gradient

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dV}{dy}$$

$\mu$  = dynamic viscosity coefficient  
(depends on temperature - T)

Sutherland's Formula:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \left( \frac{T_0 + 198.72}{T + 198.72} \right)$$

Temperature in degrees Rankine: for  $T_0 = 518.7$ ,  $\mu_0 = 3.62 \times 10^{-7} \frac{\text{lb} \cdot \text{s}}{\text{ft}^2}$

$$\nu = \text{kinematic viscosity coefficient} = \frac{\mu}{\rho} \quad \rho = \text{density}$$

## Densidad del aire

- La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso).
- Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen.
- En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina

### Densidad del aire a presión atmosférica estándar

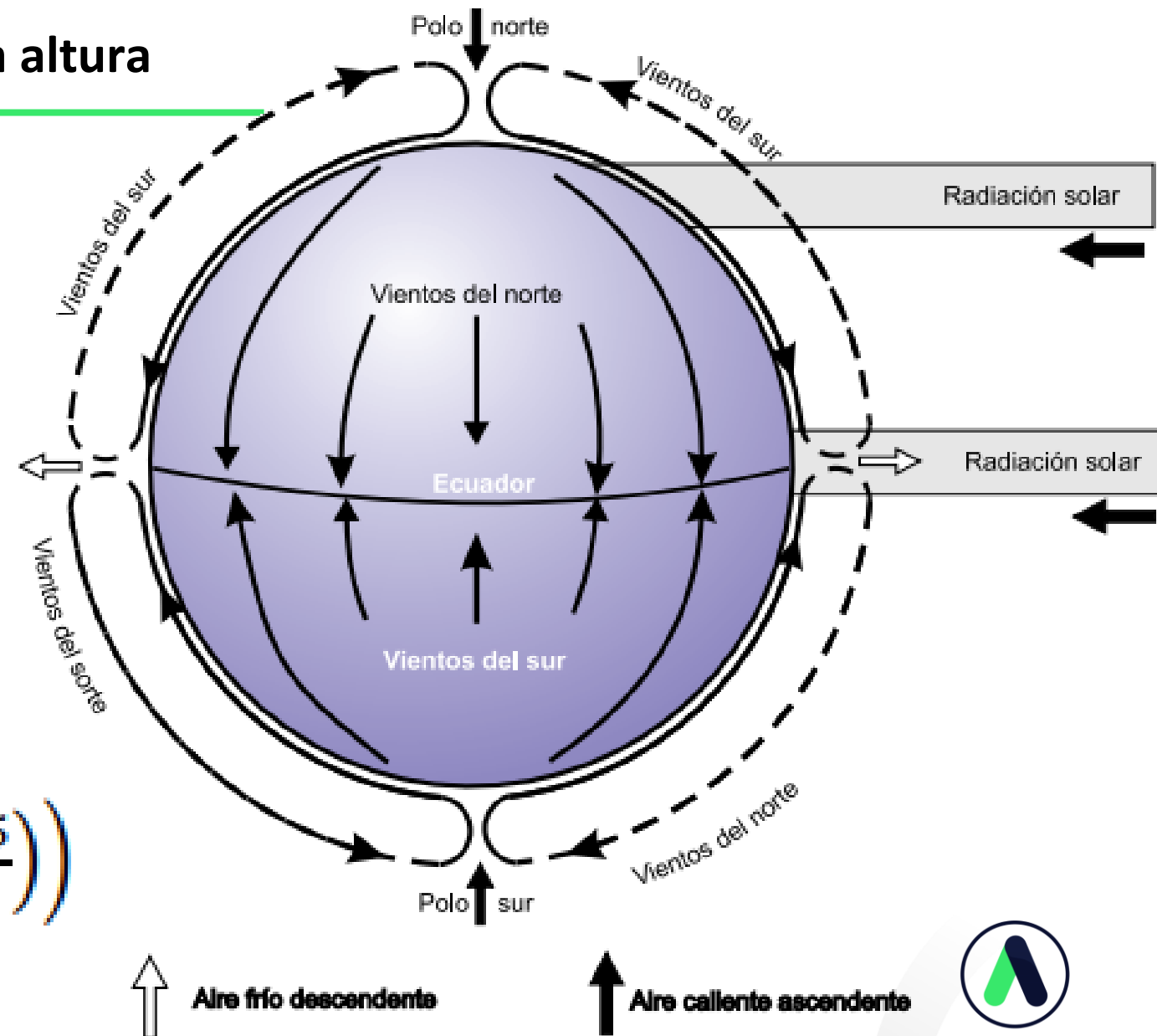
Temperatura ° Celsius	Temperatura ° Farenheit	Densidad, es decir, masa de aire seco kg/m <sup>3</sup>	Contenido de agua máx. kg/m <sup>3</sup>
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225 *)	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051

\*) La densidad del aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar a 15° C se utiliza como estándar en la industria eólica.

## Variación de la densidad del aire con la altura

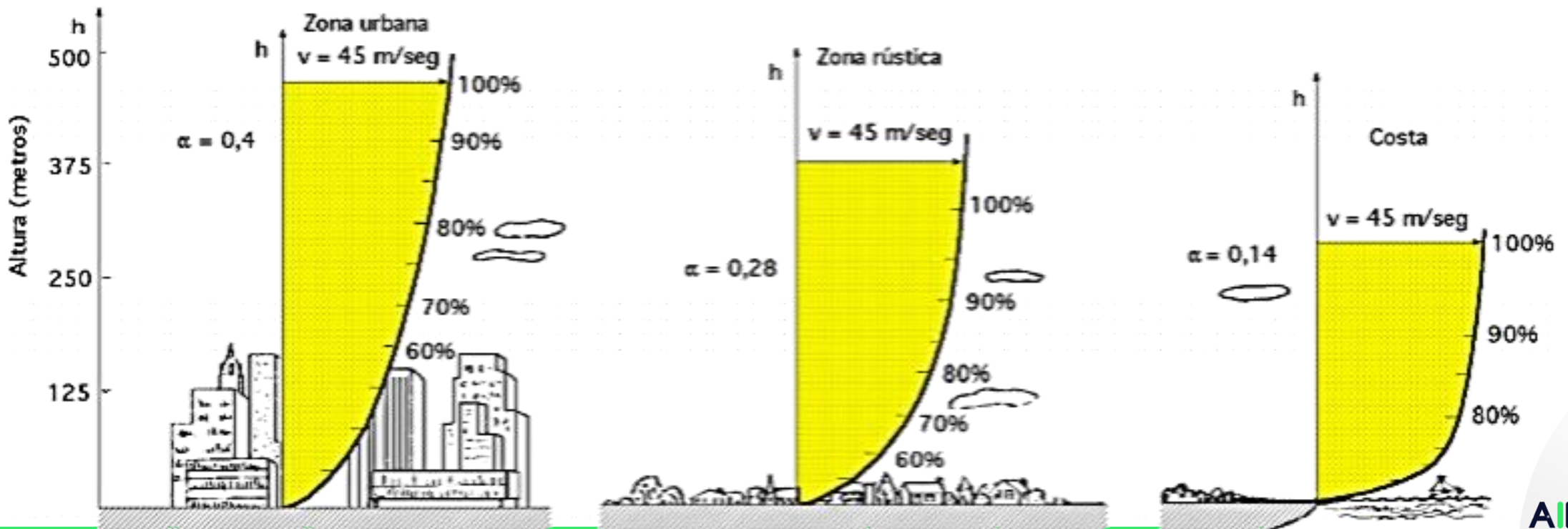
La potencia que es posible extraer del viento depende fundamentalmente de la velocidad, pero no se puede obviar la dependencia del mismo con la densidad del aire

$$\rho = 1.225 \cdot \exp \left( \left( -\frac{h}{8435} \right) - \left( \frac{T-15}{288} \right) \right)$$



# Altura

- Uno de los fenómenos más significativos en la explotación de la energía eólica es el incremento de la velocidad media del viento con la altura
- Los datos de viento habitualmente se miden a la altura estándar de 10 m, ahora bien, los rotores de los aerogeneradores se sitúan a alturas superiores, por lo que es preciso extrapolar los datos.





## Altura y velocidad del viento

- Ley exponencial de Hellman  $V = V_o(H/H_o)^\beta$
- B es un exponente que representa una forma de medida del rozamiento superficial encontrado por el viento
- ley logarítmica  $V = V_o[\ln(H_o/z_o)/\ln(H/z_o)]$
- Donde V y Vo son las velocidades del viento a las alturas H y Ho y Zo es la rugosidad del terreno.

Tipo terreno	$\beta$	$z_o$ (m)
Liso (mar, arena, nieve)	0,10-0,13	0,001-0,02
Moderadamente rugoso (hierba, campos cereales, regiones rurales)	0,13-0,20	0,02-03
Rugoso (bosques, barrios)	0,20-0,27	0,3-0,2
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0,27-0,40	2-10

## Altura y velocidad del viento

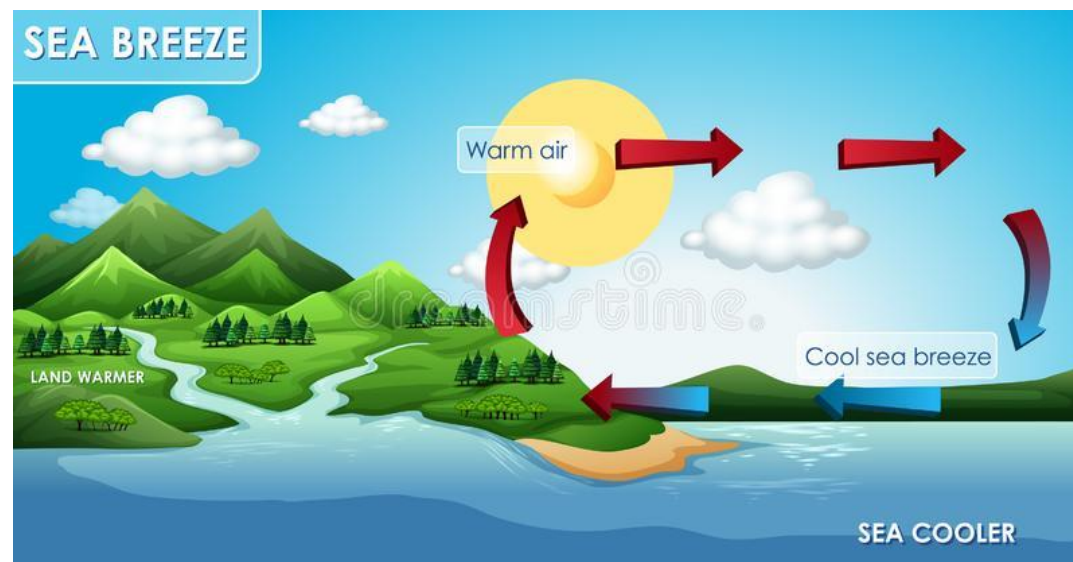
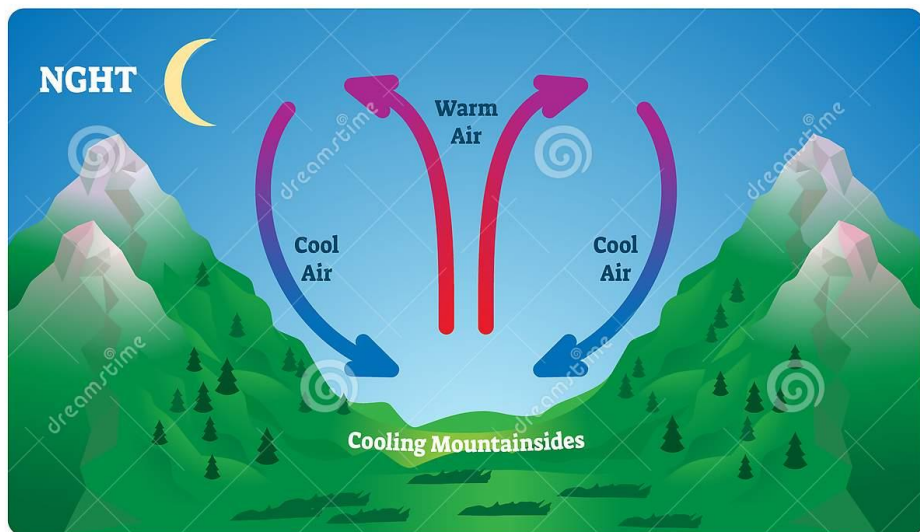
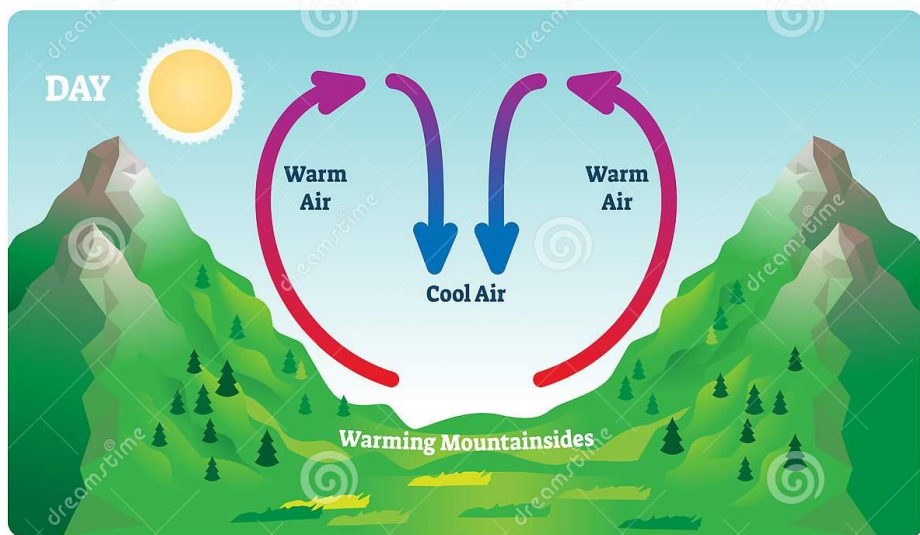
- Ley exponencial de Hellman
- Ejemplo:

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

- ¿si la velocidad a 10 metros de altura es 5m/s cuanto será a 40 metros de altura en el mar?

Tipo terreno	$\beta$	$z_0$ (m)
Liso (mar, arena, nieve)	0,10-0,13	0,001-0,02
Moderadamente rugoso (hierba, campos cereales, regiones rurales)	0,13-0,20	0,02-03
Rugoso (bosques, barrios)	0,20-0,27	0,3-0,2
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0,27-0,40	2-10

# Ciclo diurno

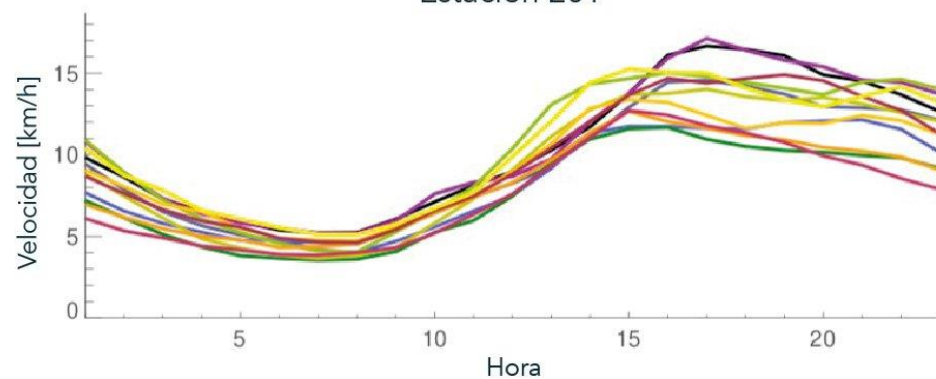


# Ciclo diario



## Ciclo diario y velocidad del viento

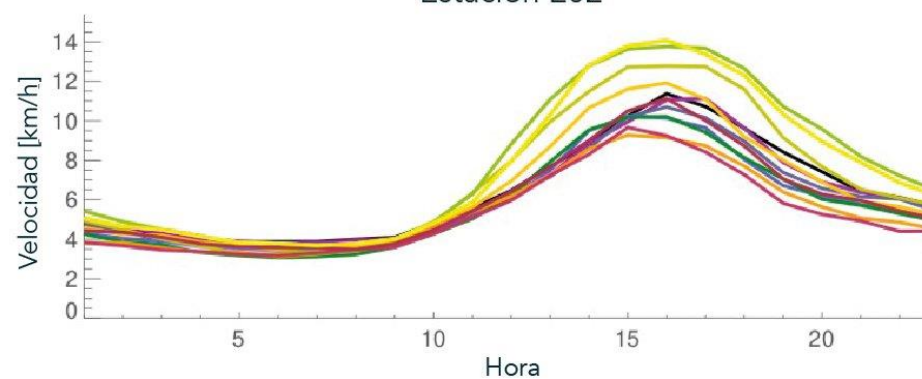
Estación 201



Mes



Estación 202



Mes



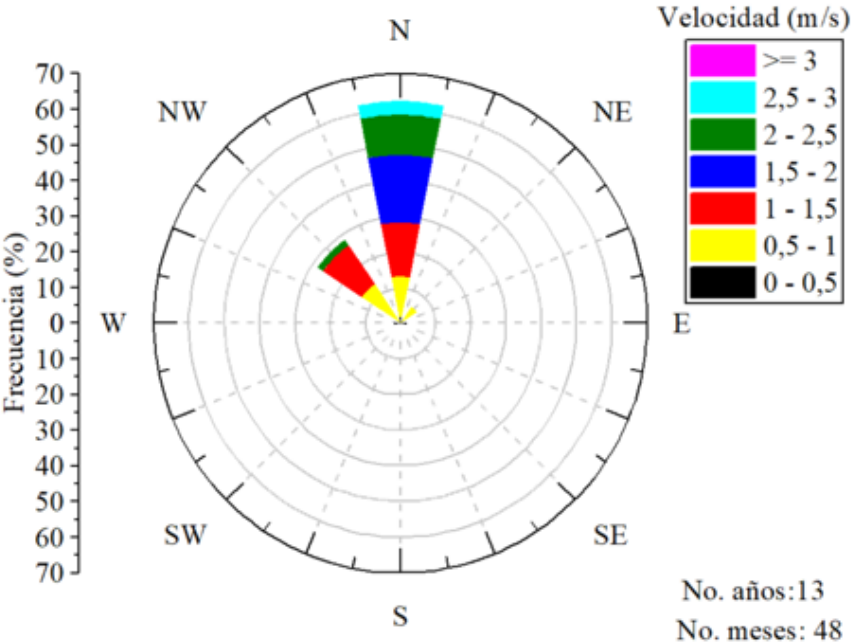
f t i y @siatamedellin

[www.siatamedellin.gov.co](http://www.siatamedellin.gov.co)



# Rosa de los vientos

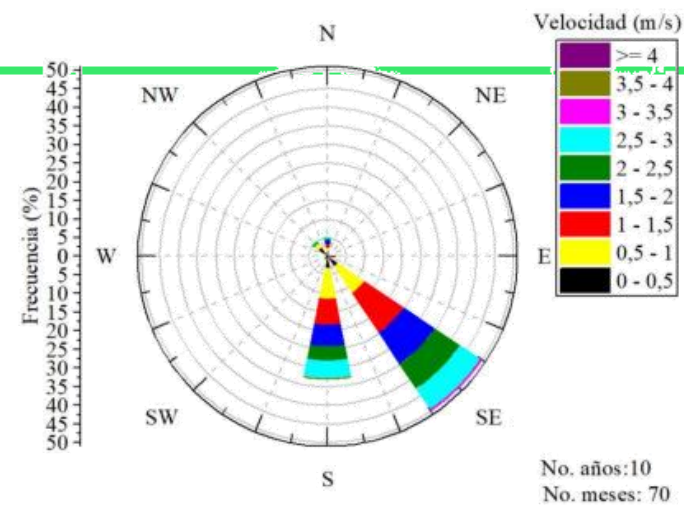
Rosas de viento estación IDEAM  
Villagarzón



Promedios mensuales de velocidad del viento y la dirección de mayor frecuencia

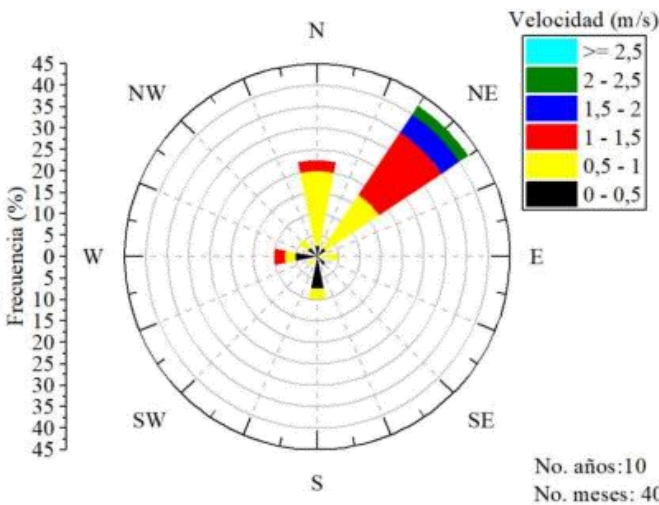
Fuente	IDEAM		NASA		NREL	
Zona	Velocidad (m/s)	Dirección	Velocidad (m/s)	Dirección	Velocidad (m/s)	Dirección
Villagarzón	2.65	N	1.95	SE	0.28	SE
Sibundoy	2.19	-	1.95	SE	0.28	SE
El Encano	2.04	S	2.28	SE	2.38	SE
La Tagua	1.80	NE	0.76	NE	0.15	S
Leguizamo	1.54	NE	0.76	NE	0.15	S
Pto. Asís	0.85	S	0.77	E	0.22	SE

Figura 17. Rosas de viento estación IDEAM El Encano para los años de 1985 al 2012



Fuente: Propia

Figura 19. Rosas de viento estación IDEAM La Tagua para los años de 1974 la 1989



Fuente: Propia

Figura 18. Rosas de viento estación IDEAM Villagarzón para los años de 1981 al 2002

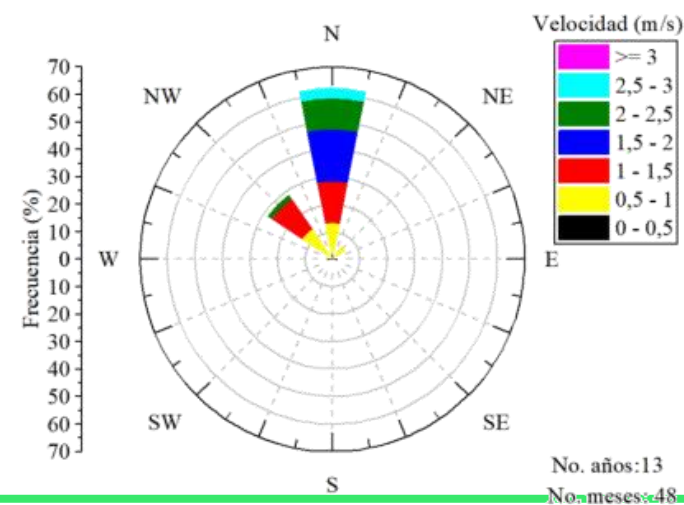
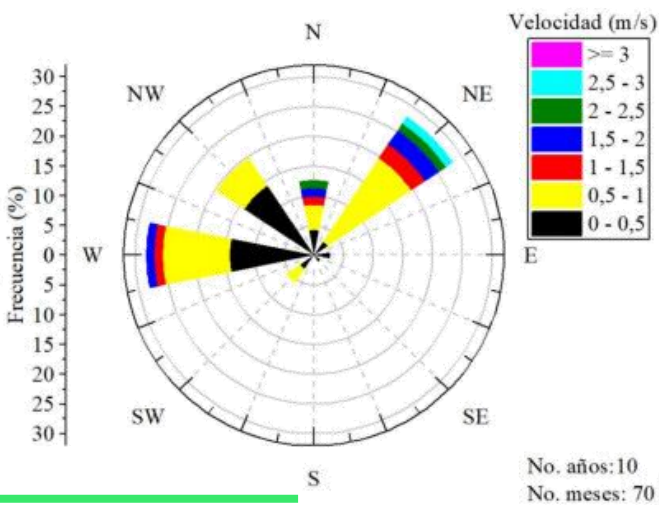


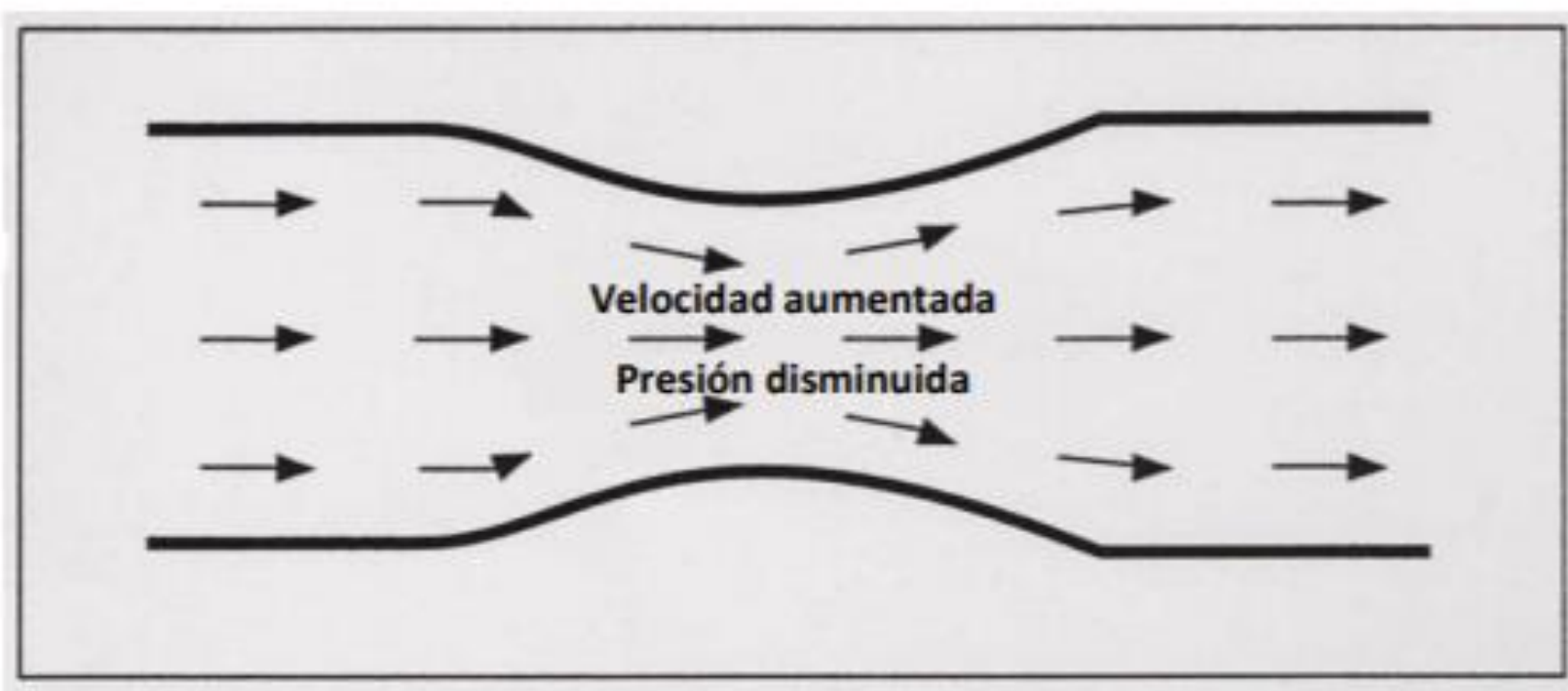
Figura 20. Rosas de viento estación IDEAM Puerto Leguizamo para los años de 1978 a 1987





## Ley y ecuación de Bernoulli

El principio de Bernoulli establece que la presión de los fluidos (líquidos o gases) decrece en el punto donde la velocidad de los mismos se incrementa. En otras palabras, altas velocidades de fluidos se asocian con una baja de presión y una baja velocidad de fluidos con alta presión.



# Ley y ecuación de Bernoulli

Energía por unidad de volumen antes = Energía por unidad de volumen después

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Energía de  
presión

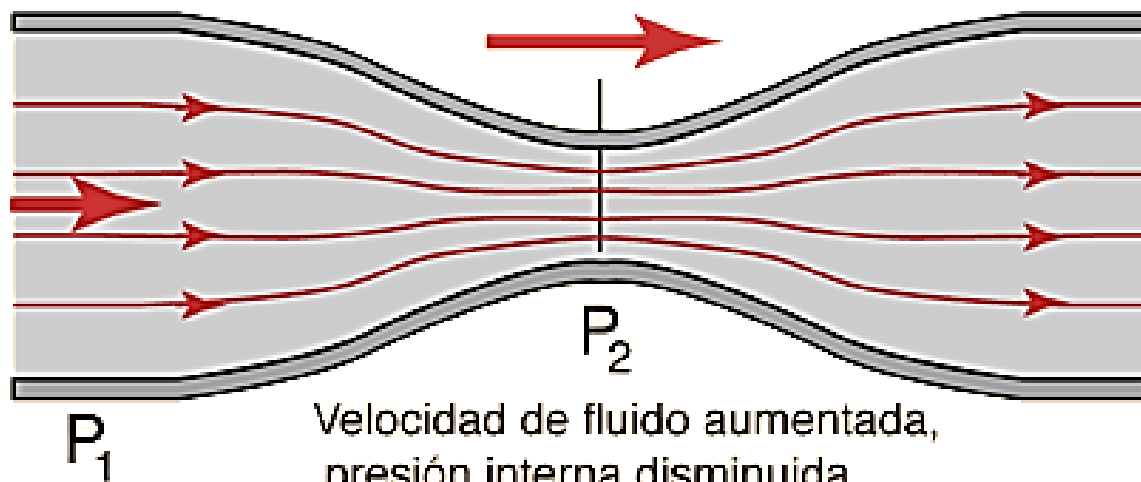
Energía  
cinética  
unidad  
volumen

Energía  
potencial  
unidad  
volumen

El ejemplo citado a menudo de la ecuación de Bernoulli o "Efecto Bernoulli" es la reducción de presión que ocurre cuando aumenta la velocidad del fluido.

Velocidad de flujo  
 $v_1$

Velocidad de flujo  
 $v_2$



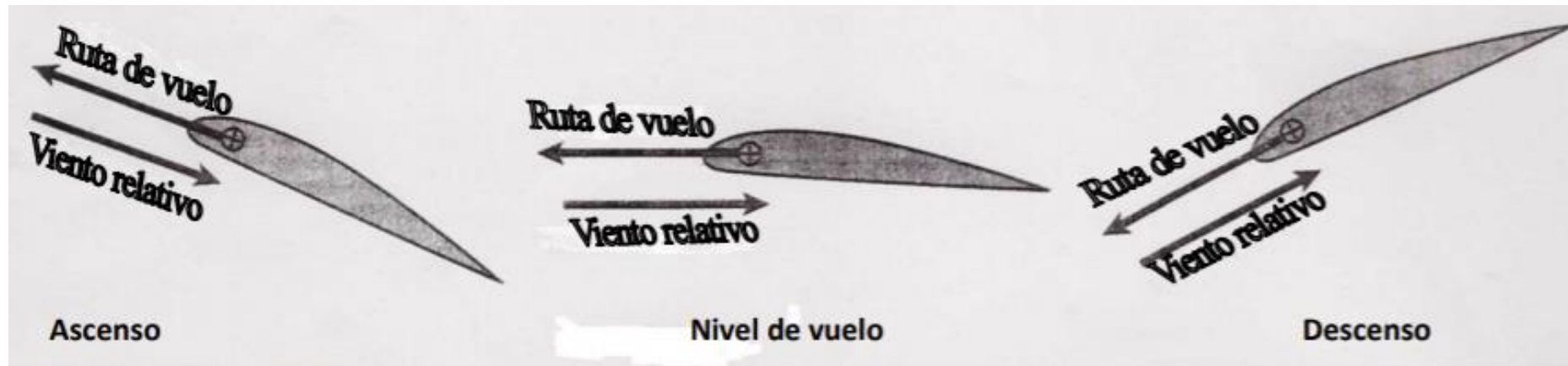
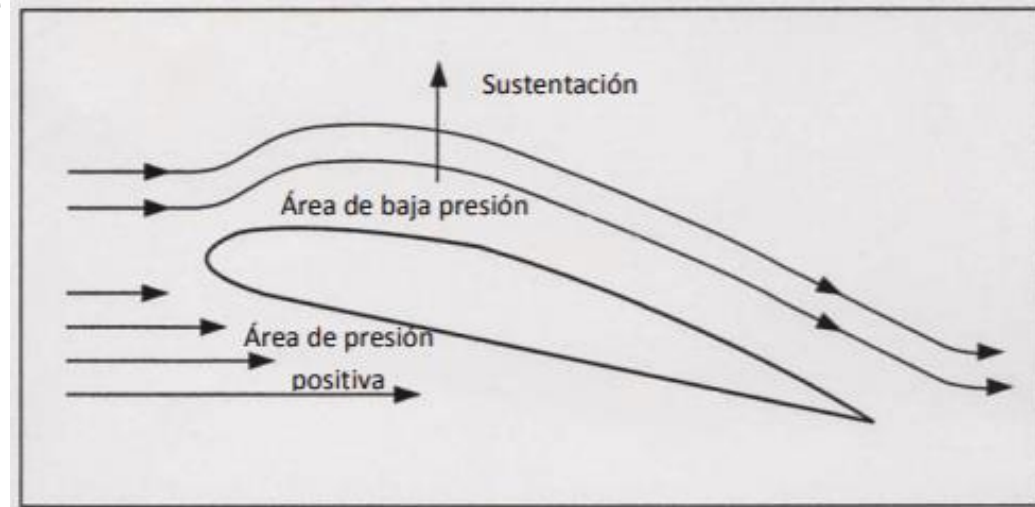
$$A_2 < A_1$$

$$v_2 > v_1$$

$$P_2 < P_1 !$$

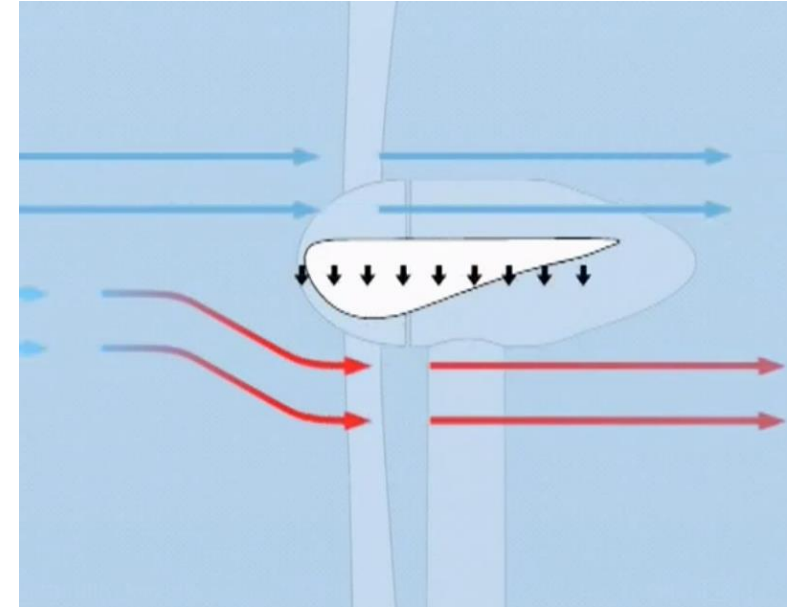
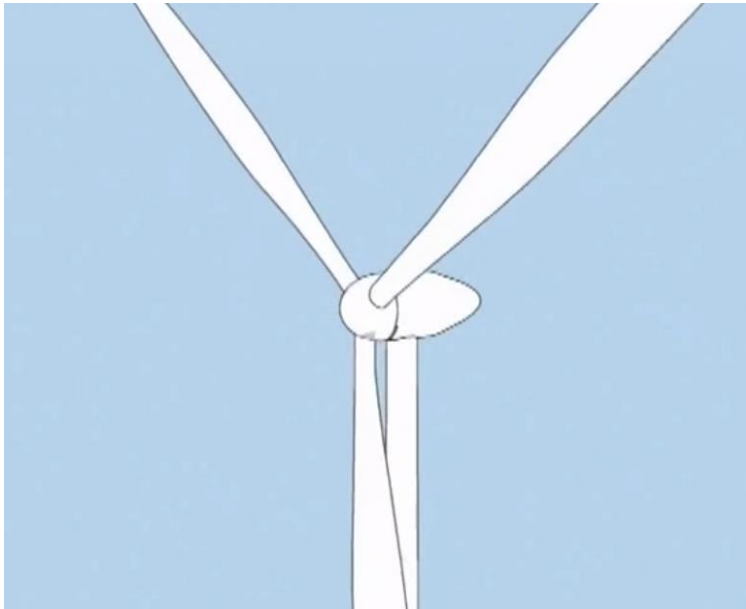
# Ley y ecuación de Bernoulli

El aire pasando rápidamente sobre la curvatura superior del ala, causa una baja presión en el tope de dicha superficie



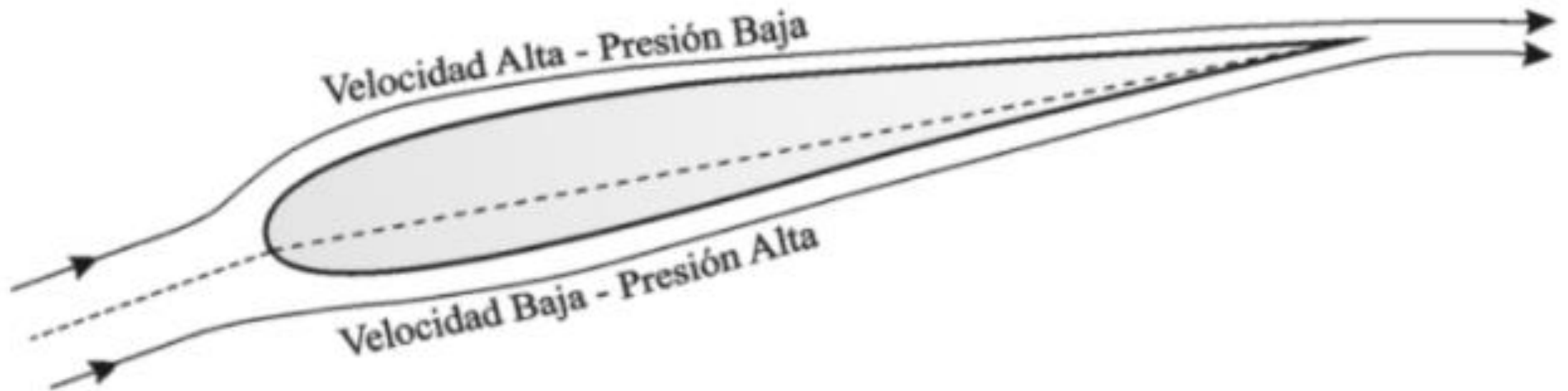
# Ley y ecuación de Bernoulli

La captación de la energía eólica es posible gracias a la acción del viento sobre las palas. El principio aerodinámico que rige esta captación de energía implica que el aire se ve obligado a fluir por las caras inferiores y superior de las palas.



<https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>

# Ley y ecuación de Bernoulli

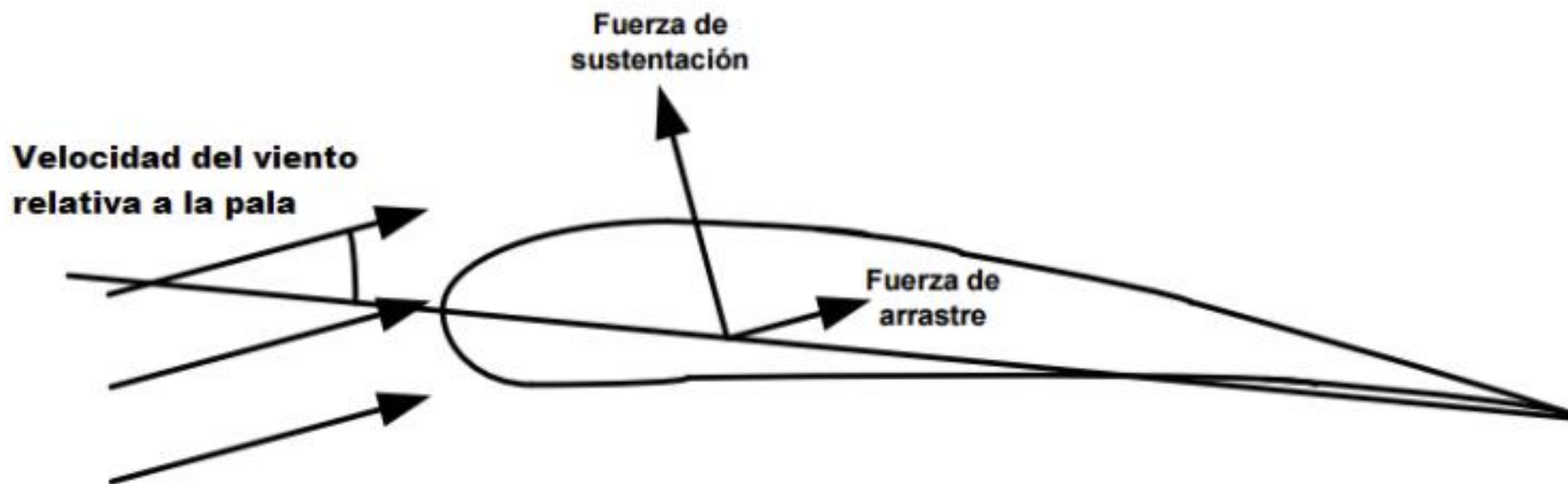


<https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>

# Ley y ecuación de Bernoulli

La diferencia de presión entre las caras de la pala que generará una fuerza resultante sobre esta. Esta fuerza resultante, se descompone en dos direcciones dando origen a:

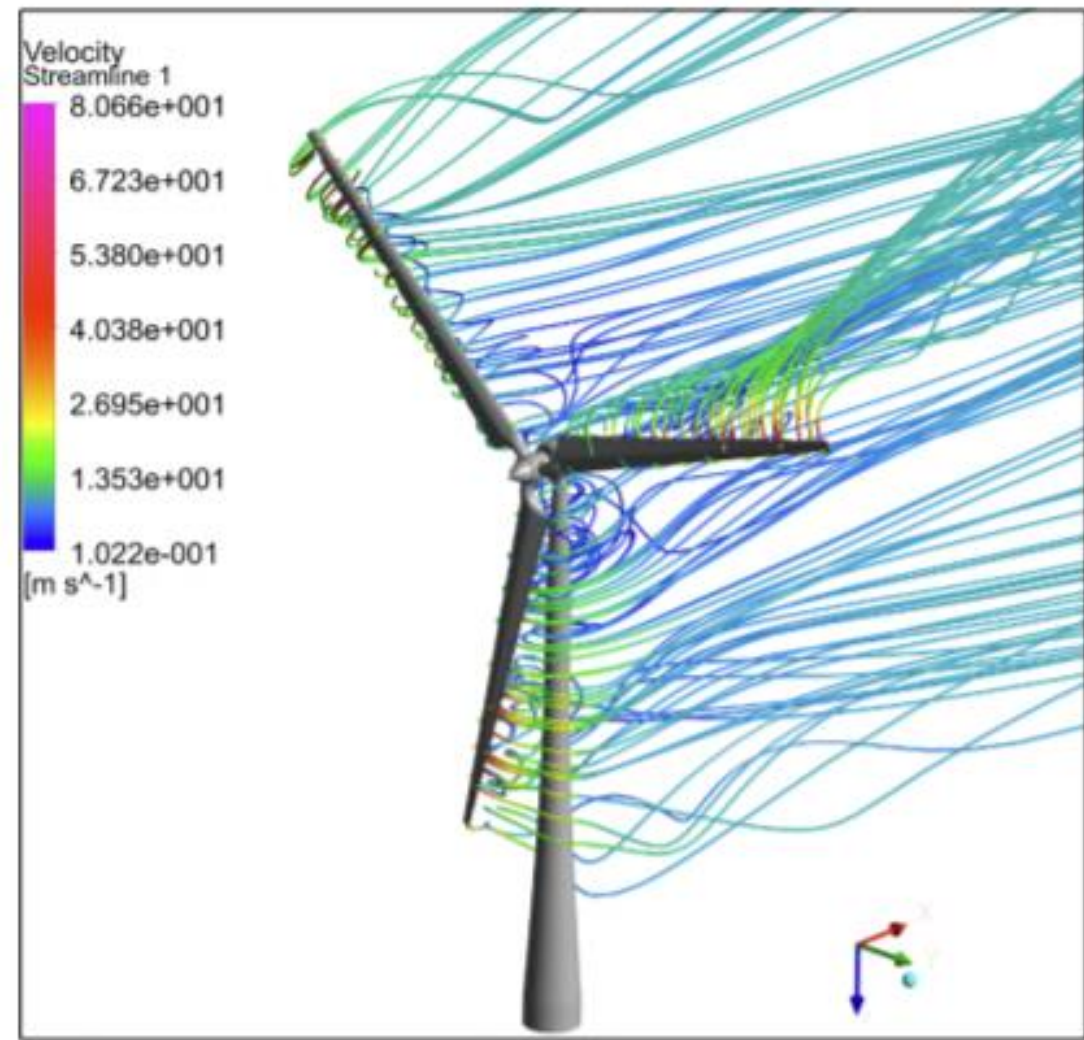
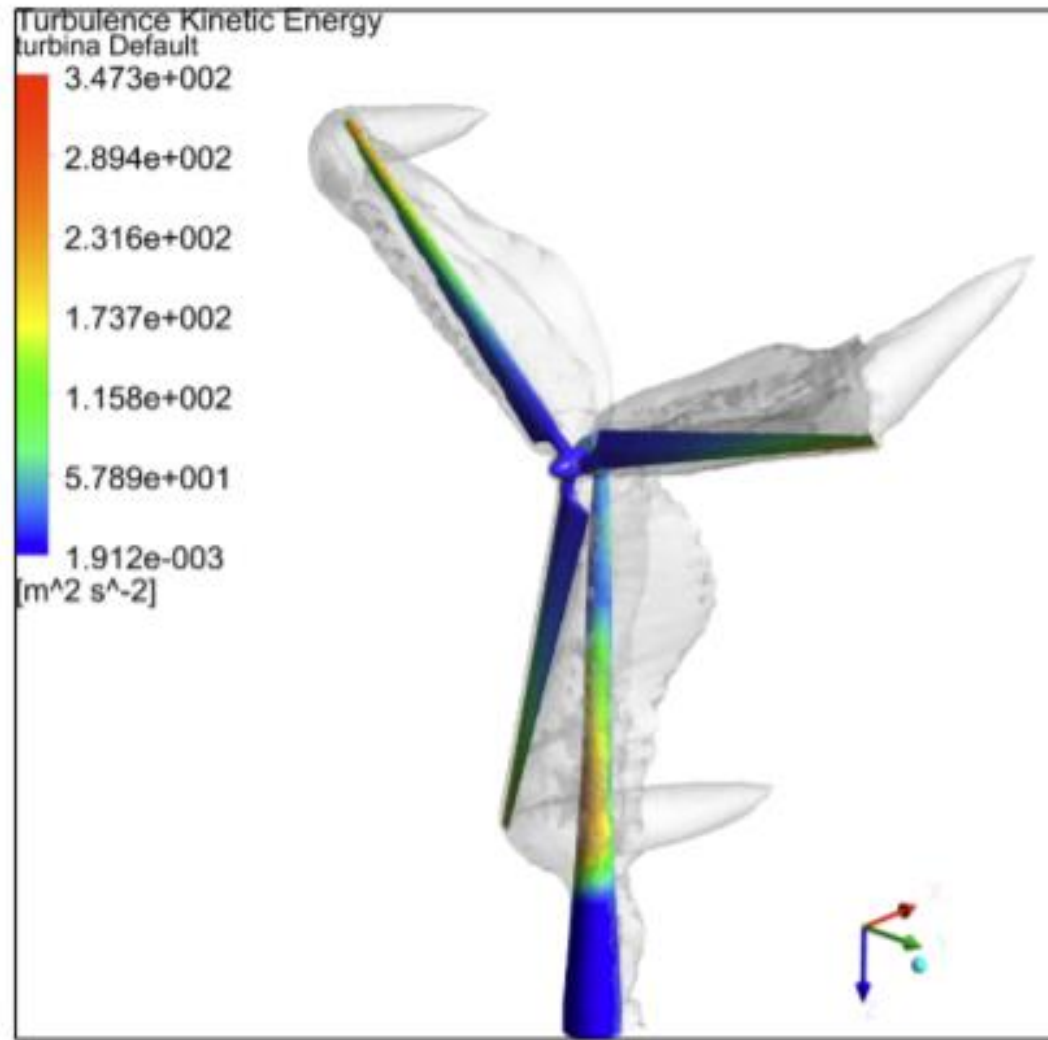
- Fuerza de sustentación
- Fuerza de arrastre



<https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>



# Simulaciones numéricas en CFD



[http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-SANTA\\_FE/SF11aerodin%C3%A1mica.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-SANTA_FE/SF11aerodin%C3%A1mica.pdf)

# Líneas de corriente y tubos de flujo del aire



La trayectoria descrita por un elemento de fluido en movimiento se llama **línea de flujo**.

La velocidad del elemento varía en magnitud y dirección a lo largo de su línea de flujo.

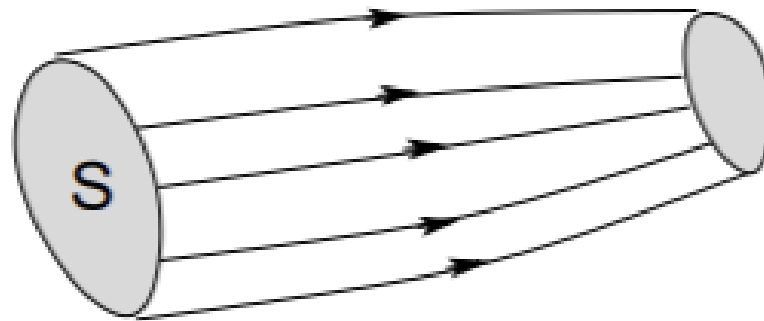
Si cada elemento que pasa por un punto dado sigue la misma línea de flujo que los elementos precedentes se dice que **el flujo es estable o estacionario**.

Un flujo puede empezar no estacionario y hacerse estacionario con el tiempo.

En un flujo estacionario la velocidad en cada punto del espacio permanece constante en el tiempo, aunque la velocidad de la partícula puede cambiar al moverse de un punto a otro

## Líneas de corriente y tubos de flujo del aire

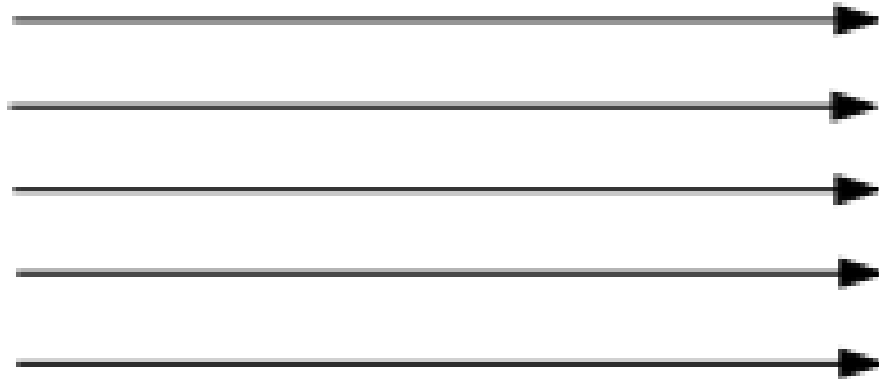
- **La línea de corriente:** curva, cuya tangente en un punto cualquiera tiene la dirección de la velocidad del fluido en ese punto.
- En el régimen estacionario las líneas de corriente coinciden con las líneas de flujo. Si dibujamos todas las líneas de corriente que pasan por el contorno de un elemento del fluido de área  $S$  (ver dibujo) estas líneas rodean un tubo denominado **tubo de flujo o tubo de corriente**.
- En virtud de la definición de línea de corriente el fluido no puede atravesar las paredes de un tubo de flujo y en régimen estacionario no puede haber mezcla de fluidos de dos tubos diferentes.



## Líneas de corriente y tubos de flujo del aire

---

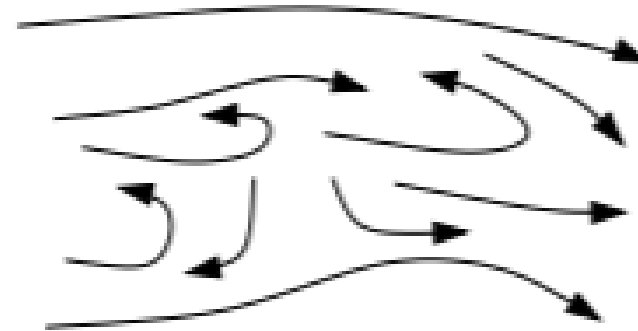
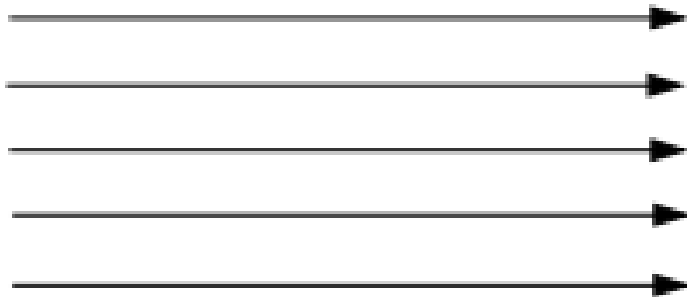
**Se llama flujo laminar** al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Las capas adyacentes del fluido se deslizan suavemente entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. Ocurre a velocidades relativamente bajas o viscosidades altas como veremos



## Líneas de corriente y tubos de flujo del aire

---

**Se llama flujo turbulento** cuando se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos. Aparece a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido



# Tip Speed Ratio

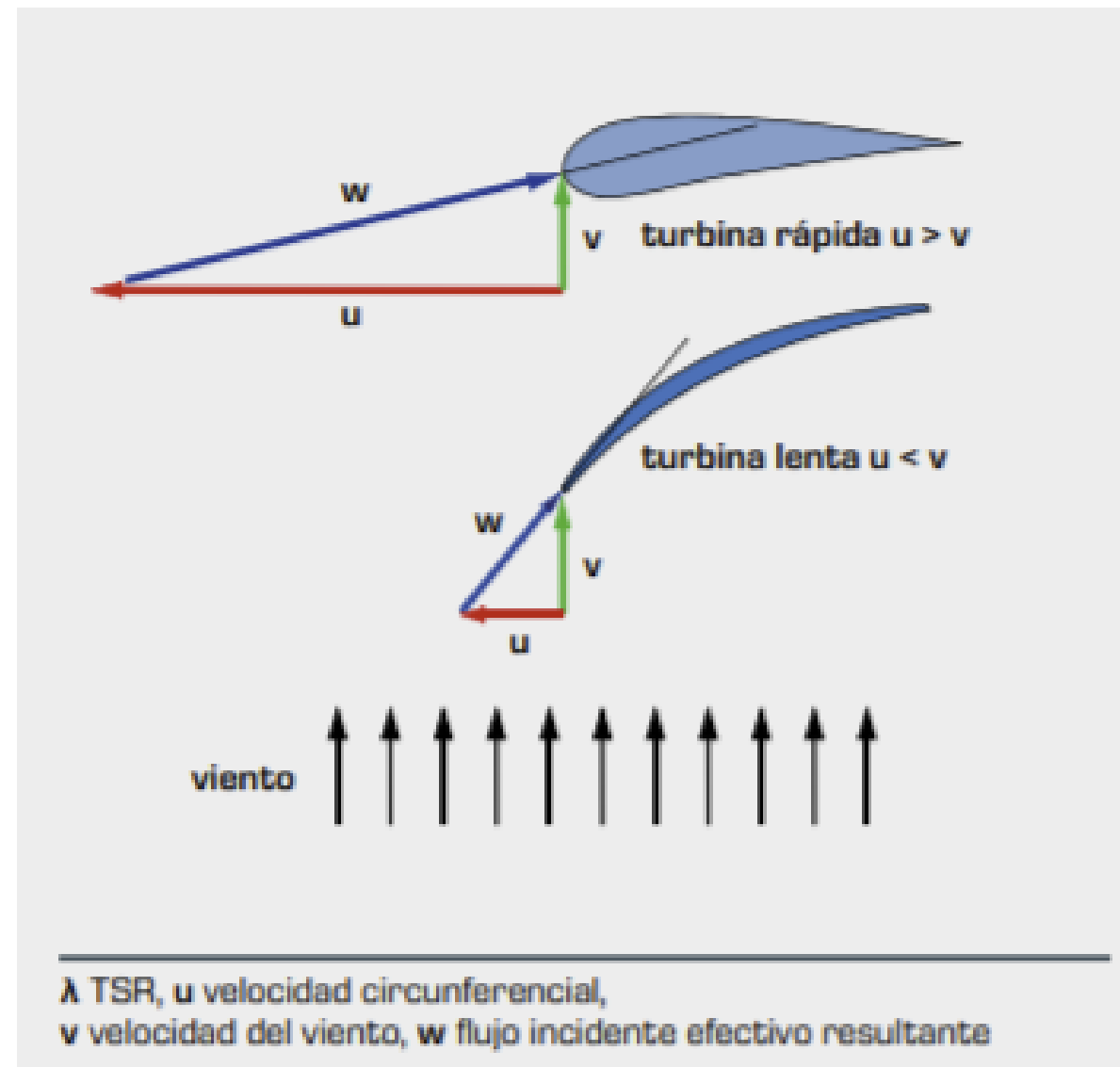
Las turbinas eólicas se caracterizan por la forma y el número de palas del rotor.

La forma y el diseño de las palas del rotor son decisivas para la TSR de la turbina.

*La TSR  $\lambda$  es la relación entre la velocidad*  
**circunferencial  $u$  y la velocidad del**  
**viento  $v$  en dirección axial**

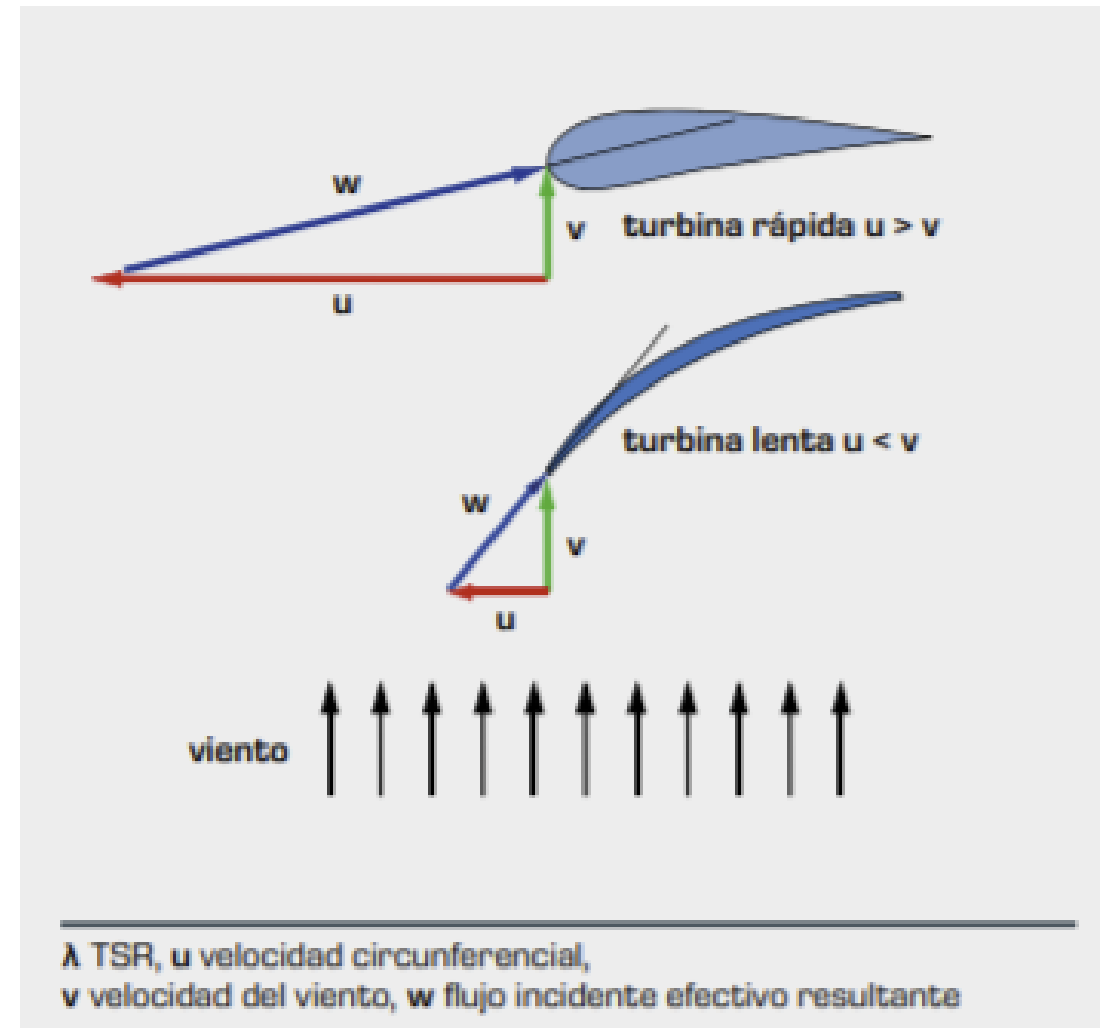
**TSR**

$$\lambda = \frac{u}{v}$$



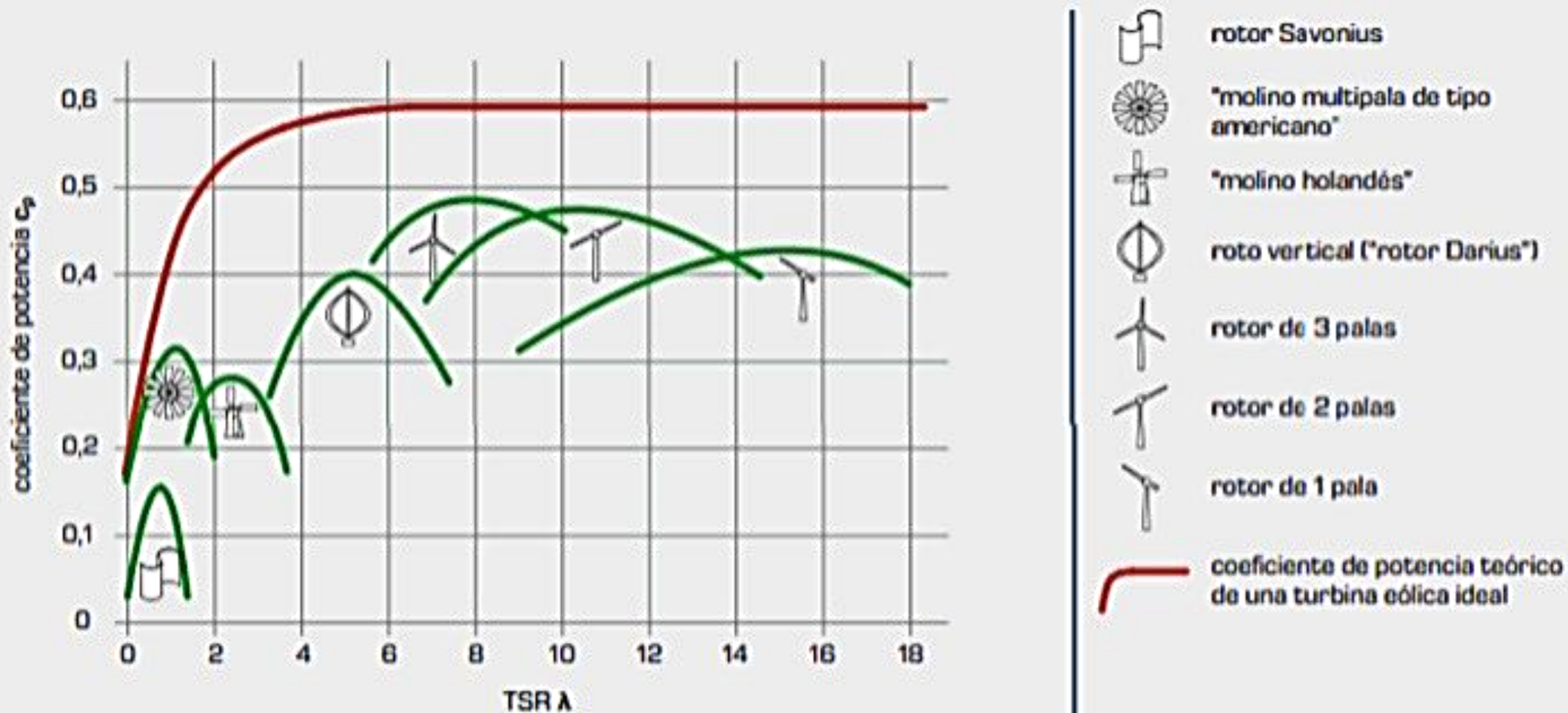
## Tip Speed Ratio

- Las velocidades hacen referencia al extremo de la pala del rotor.
- En este caso,  $w$  es el flujo incidente resultante de la pala del rotor.
- **Las turbinas eólicas modernas están diseñadas como turbinas rápidas, mientras que el rotor Savonius o el molino multipala de tipo americano son turbinas lentas.**



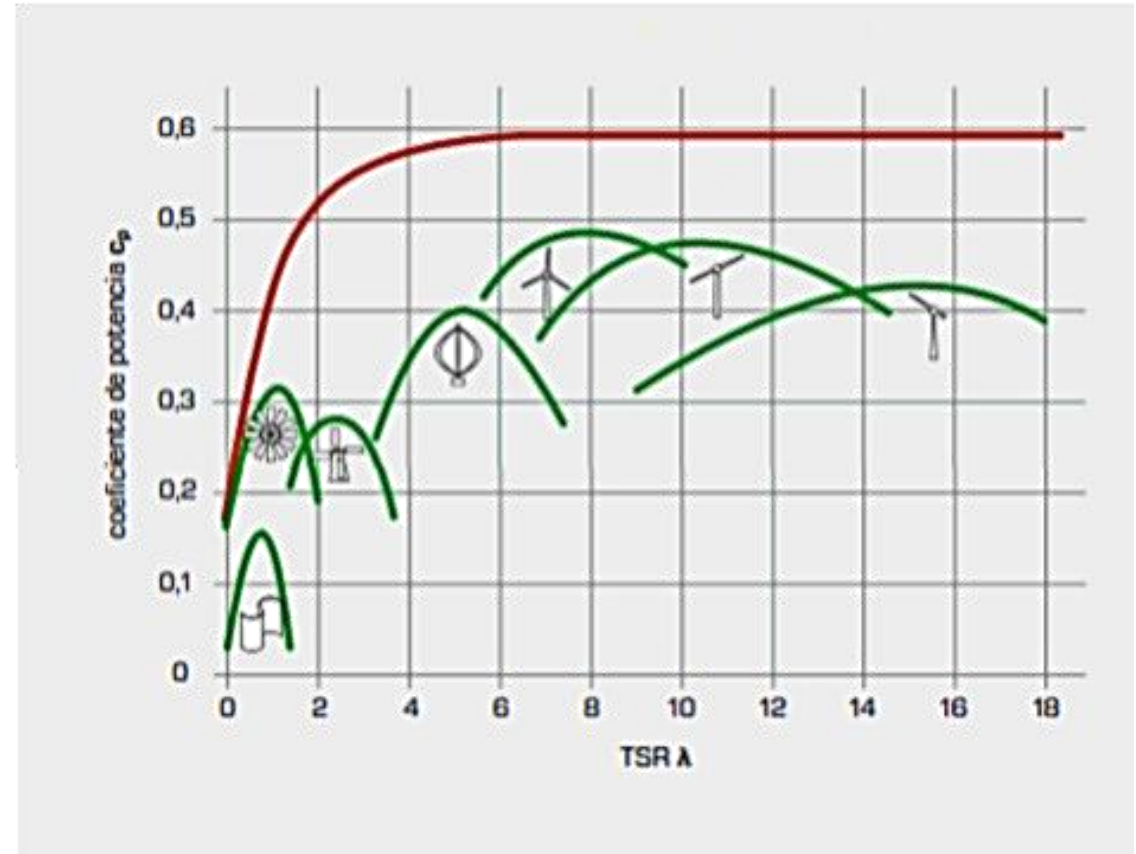


# Coeficiente de potencia en función de la tsr para distintas turbinas eólicas en comparación con el valor ideal



# Tip Speed Ratio

- Cuanto más alta sea la TSR, mejor debe ser el perfil aerodinámico de la pala del rotor. De lo contrario, las fuerzas de resistencia vuelven a agotar los posibles coeficientes de potencia altos.
- El rotor de 3 palas se considera el modelo óptimo, también desde el punto de vista de las oscilaciones.
- Los rotores con un funcionamiento muy rápido tienen, sin embargo, rendimientos más bajos



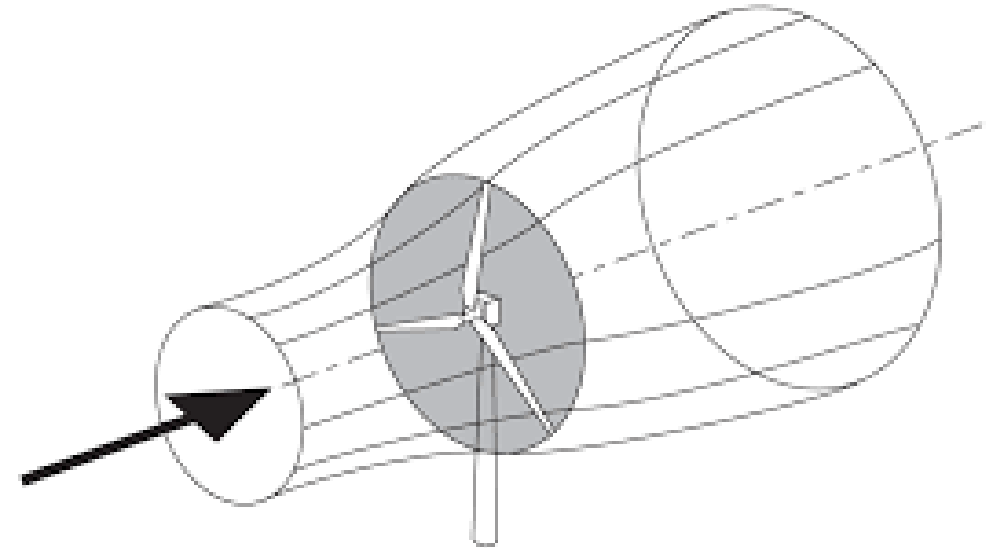
# Teoría del momento y elemento de la pala

---

El análisis del comportamiento aerodinámico del aerogenerador puede comenzar sin ningún diseño de turbina específica, tan solo considerando el proceso de extracción de *energía*. Un modelo simple, mejor conocido como “*Modelo de Disco Actuador*”, puede ser utilizado para calcular la potencia de salida del rotor de una turbina ideal y el empuje del viento sobre el rotor.

Existen otros métodos para el diseño de aerogeneradores:

- Teoría del Momento Unidimensional.
- Teoría del Elemento del Aspa.
- Teoría del Momento del Elemento del Aspa (por sus siglas en inglés BEM, Blade Element Momentum).



# Teoría del momento y elemento de la pala

---

La Teoría del Momento del Elemento del Aspa (BEM), es usada para determinar la forma o geometría optima del aspa y también predecir los parámetros de desempeño para un rotor ideal y condiciones de operación estacionaria. Esta teoría combina 2 métodos para un análisis de desempeño aerodinámico de un aerogenerador.

- Teoría del Momento Unidimensional.
- Teoría del Elemento del Aspa

Las 2 teorías son utilizadas para delimitar las ecuaciones que gobiernan el diseño aerodinámico y la predicción de potencia de un aerogenerador

# Teoría del momento y elemento de la pala

---

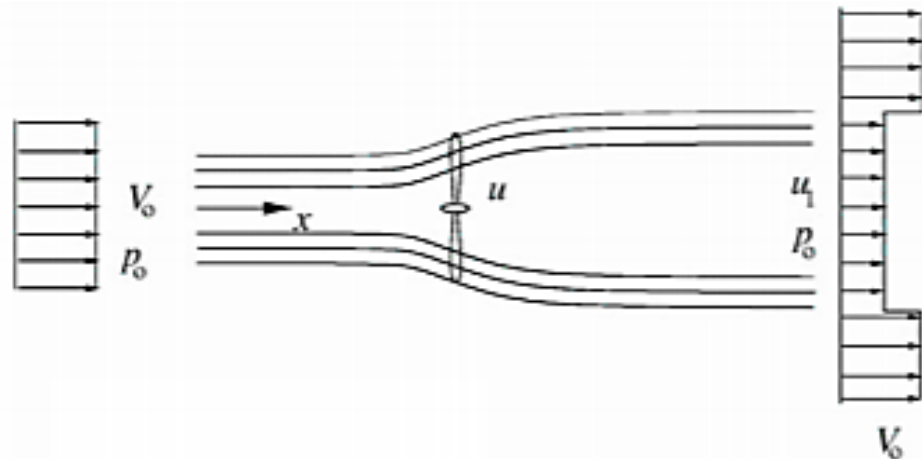
- **Teoría del Momento Unidimensional:** Analiza el balance del momento sobre un tubo de corriente anular rotatorio que pasa a través de una turbina.
- **Teoría del Elemento del Aspa:** Examina las fuerzas generadas por los coeficientes de arrastre y de levantamiento del perfil en varias secciones a lo largo del aspa.

Con la combinación de estas teorías, se obtienen una serie de ecuaciones que pueden resolverse por medio de iteraciones. Actualmente existen programas que tienen programadas ambas ecuaciones.

# Teoría del momento unidimensional

La Teoría del Momento Unidimensional es un modelo utilizado para el diseño ideal de un rotor, donde no hay fricción y ningún componente rotacional en la estela.

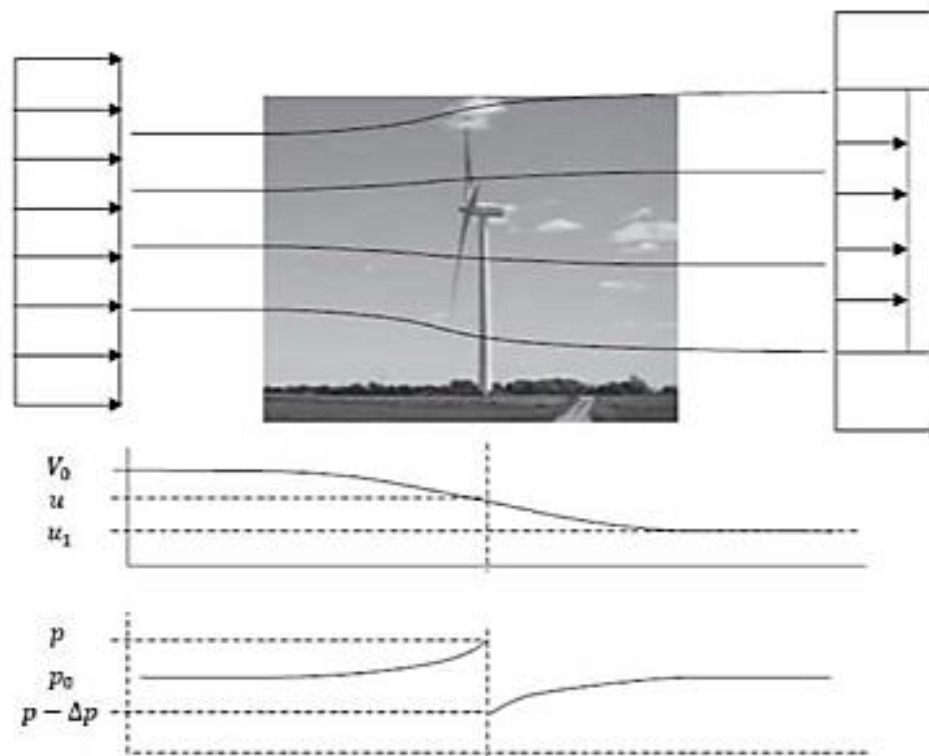
*El diseño del rotor actúa como “dispositivo de arrastre”, adelantando la velocidad del viento desde  $V_0$  lejos de la corriente arriba del rotor a  $U$  en el plano del rotor y  $U_1$  en la estela producida. Este efecto se puede observar en la Figura*



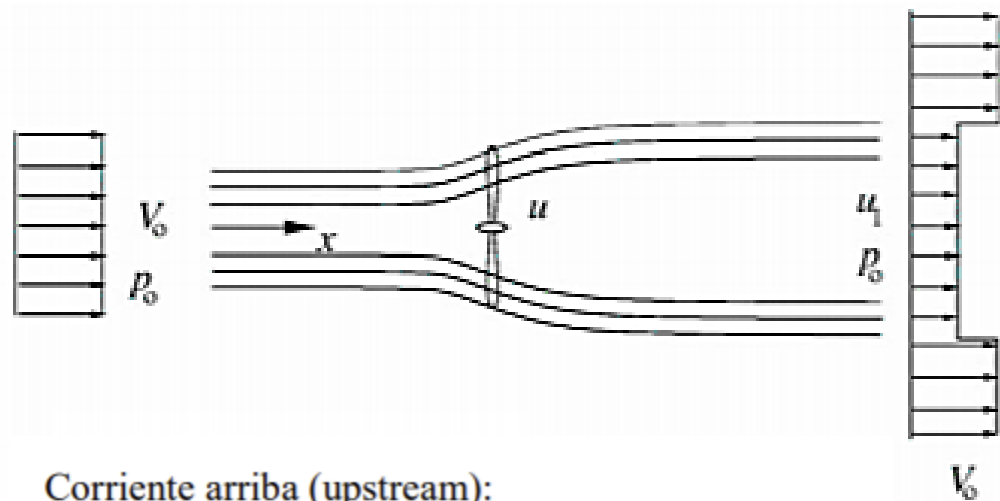


## Teoría del momento unidimensional

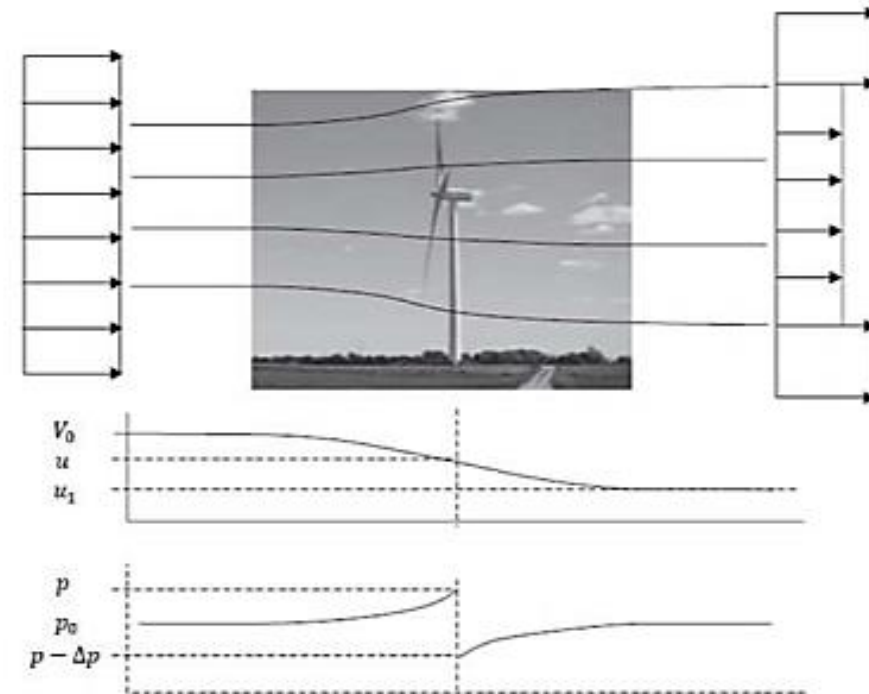
Con base a la ecuación de Bernoulli, es posible establecer una relación de *velocidad y presión para una “corriente arriba” y una “corriente abajo” para el aerogenerador ideal*, como se muestra en la Figura



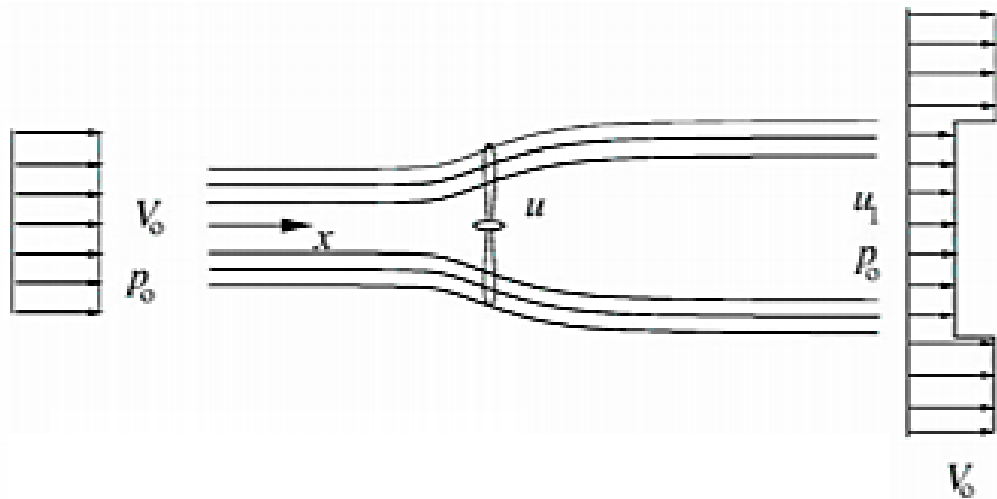
## Teoría del momento unidimensional



$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho u^2$$

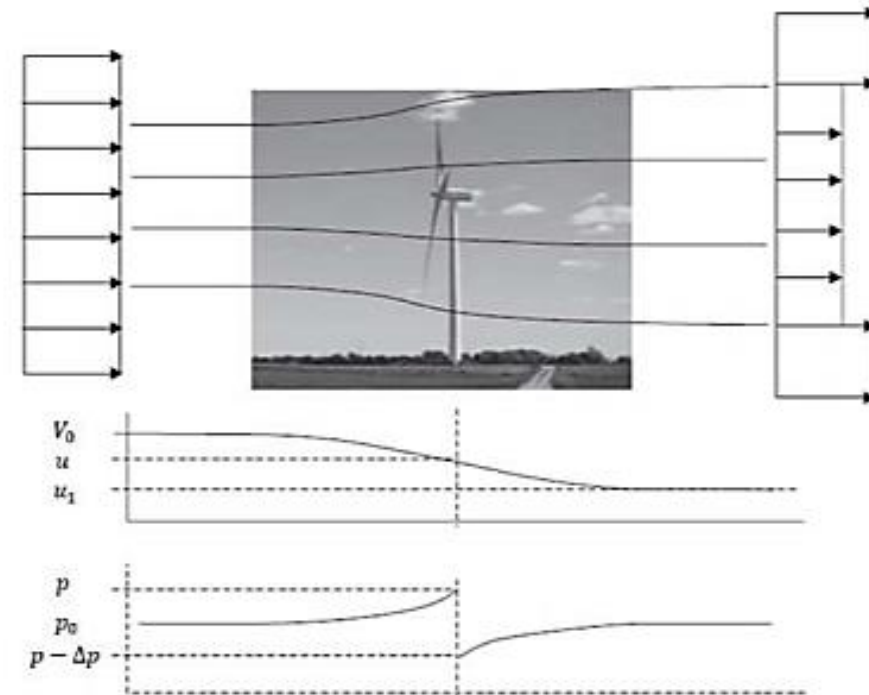


## Teoría del momento unidimensional



Corriente abajo (downstream):

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho u^2$$



## Teoría del momento unidimensional

Corriente arriba (upstream):

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho u^2$$

Corriente abajo (downstream):

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho u^2$$

La caída de presión a través del plano del rotor puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2)$$

## Teoría del momento unidimensional

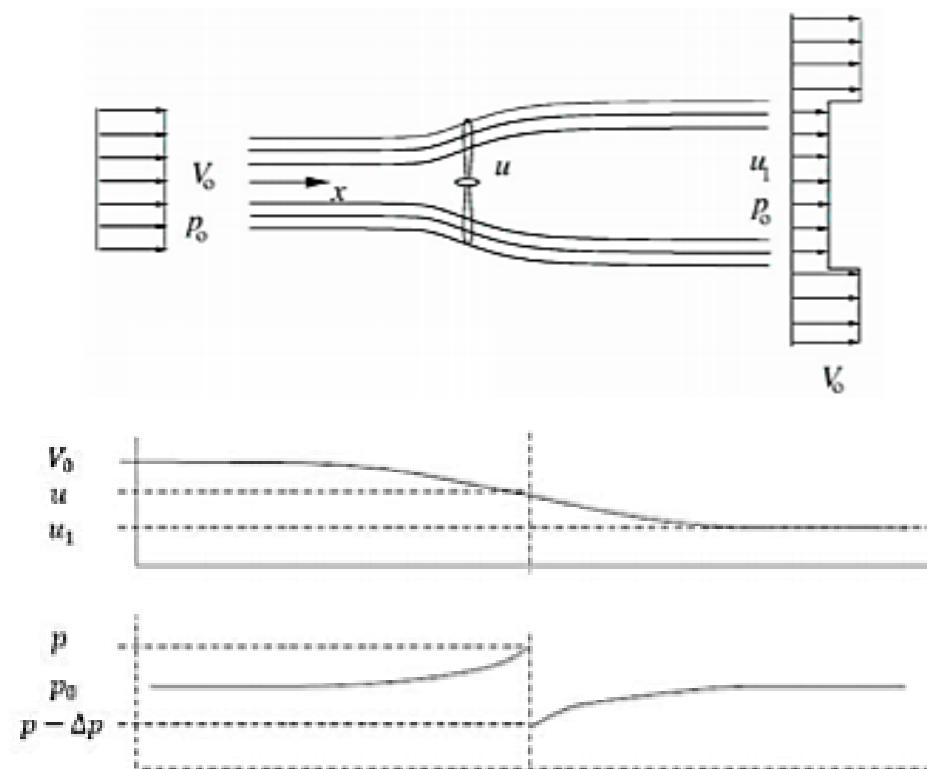
Para un rotor ideal, es posible obtener una relación entre:

- Velocidades  $V_0$ ,  $U_1$
- Empuje o tracción ( $T$ )
- Potencia del rotor ( $P$ ).

El empuje o la tracción es la fuerza en la dirección de la corriente resultante desde la caída de la presión sobre el rotor y utilizando para reducir la velocidad del viento, desde  $V_0$  y  $U_1$

$$T = \Delta p A$$

Donde  $A$  es considerada el área de barrido del rotor



## Teoría del momento unidimensional

Conservación del momento lineal:

$$T = \dot{m}(V_0 - u_1)$$

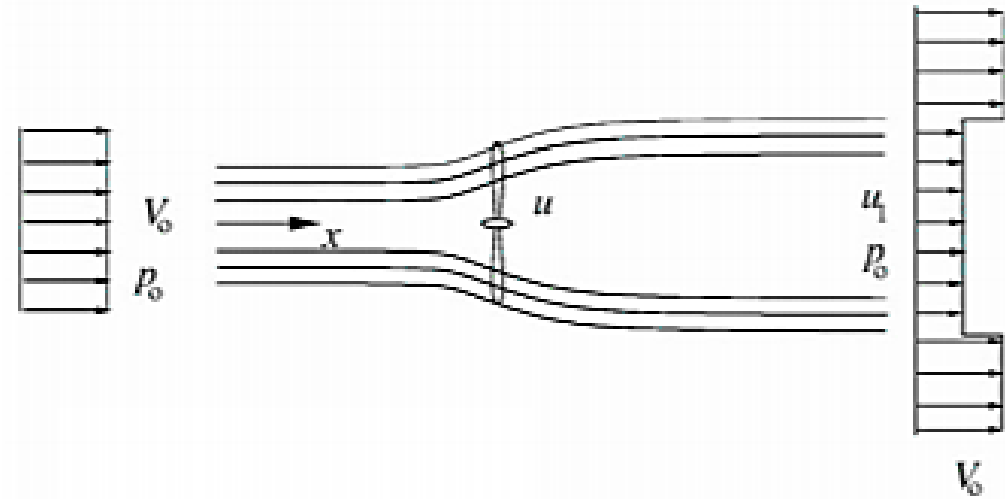
Con la conservación de la masa, obtenemos una relación entre A y A1:

$$\dot{m} = \rho u A = \rho u_1 A_1$$

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) = \dot{m}(V_0 - u_1)$$

$$T = \Delta p A$$

$$\Delta p = \rho u (V_0 - u_1)$$





## Teoría del momento unidimensional

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2)$$

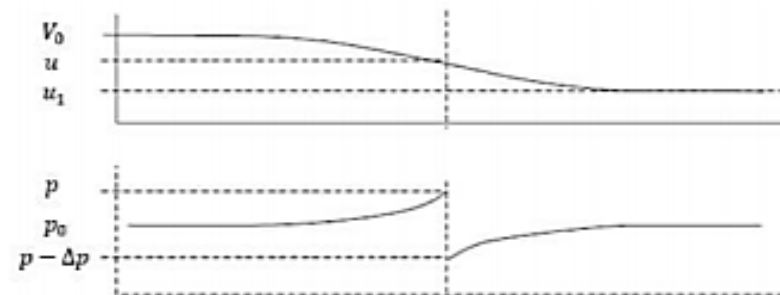
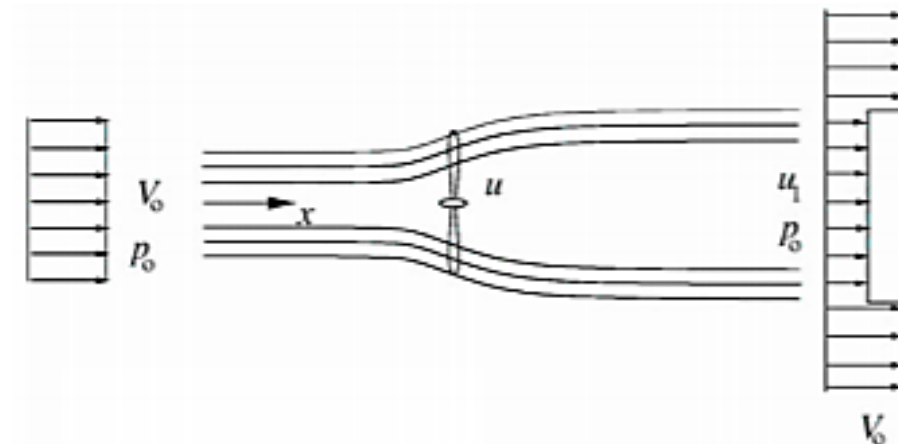


$$T = \Delta p A \quad \equiv \quad T = \rho u A (V_0 - u_1) = \dot{m} (V_0 - u_1)$$



$$u = \frac{1}{2} (V_0 - u_1)$$

Por lo tanto, la velocidad en el plano del rotor, es la velocidad media del viento



## Teoría del momento unidimensional

*Es conveniente definir una entidad, la cual es denominada como “Factor de Inducción Axial” que se define como:*

$$u = (1-a)V_0$$

$$u = (1-a)V_0 \longrightarrow u = \frac{1}{2}(V_0 - u_1) \longrightarrow u_1 = (1-2a)V_0$$

$$T = \Delta p A$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2)$$

$$T = 2 \rho a (1-a) V_0^2 A$$

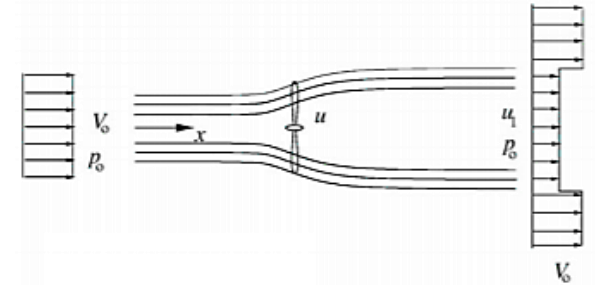
## Teoría del momento unidimensional

La potencia de salida es el empuje por la velocidad del rotor:

$$\left. \begin{aligned} P &= T u \\ T &= \Delta p A \\ \Delta p &= \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho u A (V_0^2 - u_1^2) \\ u &= \frac{1}{2} (V_0 - u_1) \end{aligned}$$

$$P = 2 \rho a (1 - a^2) V_0^3 A$$

## Teoría del momento unidimensional



La potencia disponible en la sección transversal puede ser el equivalente al área de barrido del rotor

$$P_{Disp} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3$$

La potencia puede ser no dimensional con respecto a la potencia disponible, dando un coeficiente de potencia

$$C_p = \frac{P}{P_{Disp}} = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_0^3 A}$$

Lo mismo ocurre con el empuje o tracción, dando como resultado un coeficiente de empuje o tracción

$$C_T = \frac{T}{T_{viento}} = \frac{T}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_0^2 A}$$

## Teoría del momento unidimensional

$$C_p = \frac{P}{P_{Disp}} = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_0^3 A}$$

$$P = 2\rho a(1-a^2)V_0^3 A$$

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

$$C_T = 4a(1-a)$$

$$C_T = \frac{T}{T_{viento}} = \frac{T}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_0^2 A}$$

$$T = 2\rho a(1-a)V_0^2 A$$

# Bibliografía

---

- Castán 2012. Diseño aerodinámico optimizado  
[https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/4101/TFM\\_Carlos%20Cast%C3%A1n%20Fern%C3%A1ndez.pdf?sequence=3](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/4101/TFM_Carlos%20Cast%C3%A1n%20Fern%C3%A1ndez.pdf?sequence=3)
- González Canales 2017. Diseño aerodinámico de un rotor para una turbina eólica de 30 kW  
[http://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A4\\_208.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A4_208.pdf)
- Medina Noguera 2011. Calculo y diseño de una Pala.  
<https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/13388/1/TESIS%20EHECAMANI.pdf>
- Duran 2007. Procedimiento de diseño aerodinámico de la pala de un aerogenerador de eje horizontal.  
<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2787/Pedro%20Luis%20Dur%c3%a1n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dinámica de fluidos: <https://www.ugr.es/~jtorres/t7.pdf>
- [http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-SANTA\\_FE/SF11aerodin%C3%A1mica.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-SANTA_FE/SF11aerodin%C3%A1mica.pdf)
- <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>
- [https://gunt.de/images/download/wind-turbines\\_spanish.pdf](https://gunt.de/images/download/wind-turbines_spanish.pdf)



# Gracias

