



Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables EL-6000

Modulo Energía Eólica

**Semestre Primavera 2010
Ing. Keith Watt Arnaud**



3. Característica Recurso Eólico

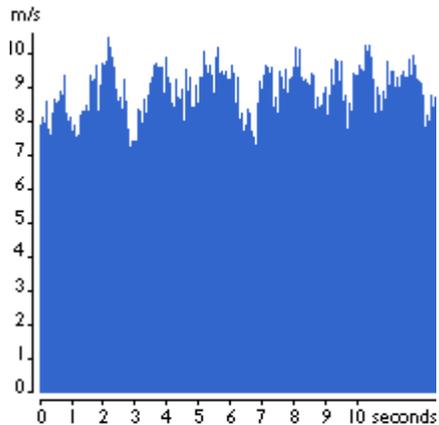


La Naturaleza del Viento

- El Viento corresponde al desplazamiento de masas de aire caliente a zonas frías y viceversa.
 - Energía térmica se transforma en movimiento (Energía Cinética)
- Es variable
 - Geográficamente
 - Temporalmente
 - Minutos - Horas (turbulencias y errores de predicción)
 - Días – Semanas (Mayor precisión, Avances Meteorológicos)
 - Meses – Años (Efectos climáticos, El niño, etc.)

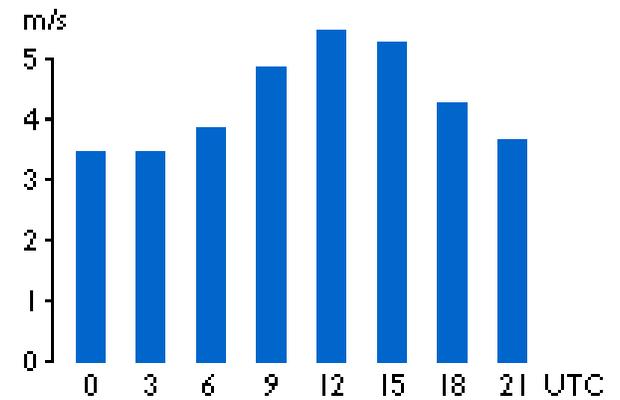
La Naturaleza del Viento

- Varibailidad del Viento en Dinamarca



Segundos
Turbulencia

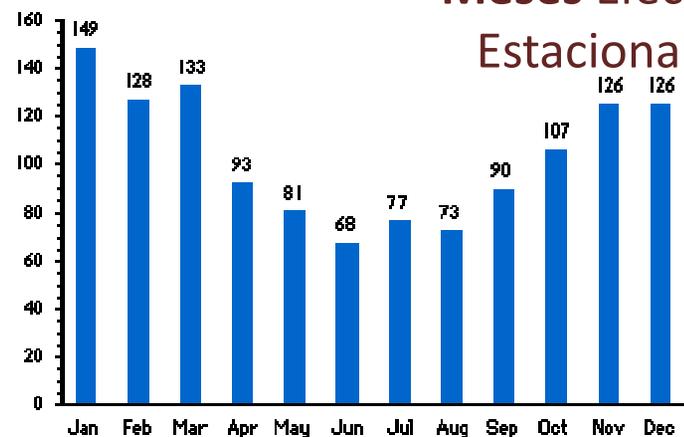
© 1998 www.WINDPOWER.org



Horas Gradientes
de Temperatura

© 1998 www.WINDPOWER.org

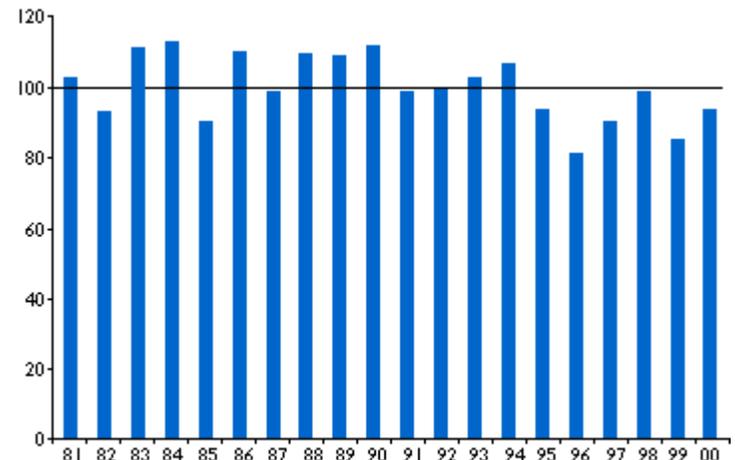
Wind Energy index, Denmark (average=100)



Meses Efecto
Estacional

© 1998 www.WINDPOWER.org

Años Fenómenos
Climáticos
 $\sigma \approx 9-10\%$



© 2001 DWTMA & DWTOA

La Energía y Potencia Eólica

- El Viento es una masa de aire que se mueve a una cierta velocidad

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

- La Potencia del viento en ese instante es:

$$P_{viento} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) v^2$$

- Considerando una masa de densidad Uniforme ρ y área A .

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v \quad \rightarrow \quad P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

La Energía y Potencia Eólica

¡La Potencia del Recurso Eólico es proporcional al cubo de la velocidad del viento!



Ante mayor variabilidad eólica



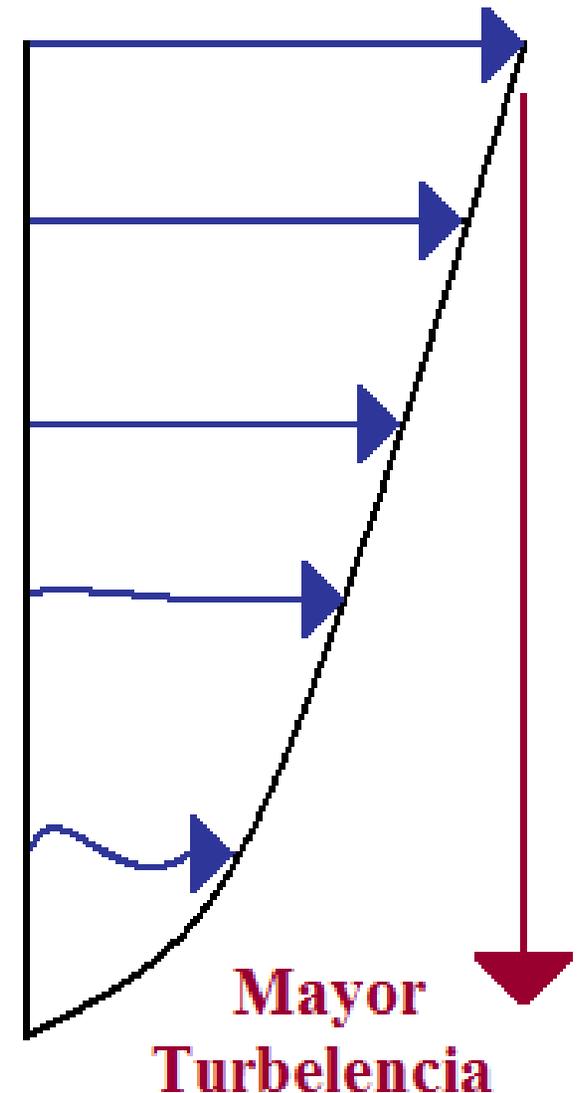
Aún mayor variabilidad de potencia generable



Gran Importancia en poder estimar
con precisión el recurso eólico

El Viento y la Turbulencia

- El viento es diferente según la altura en que se mide
- Producto de la turbulencia que produce la superficie
 - El viento en la superficie es menor que el que se encuentra a alturas mayores
 - Necesario Estimar Velocidad del Viento a mayores alturas



MENOR VELOCIDAD



**Mayor
Turbelencia**

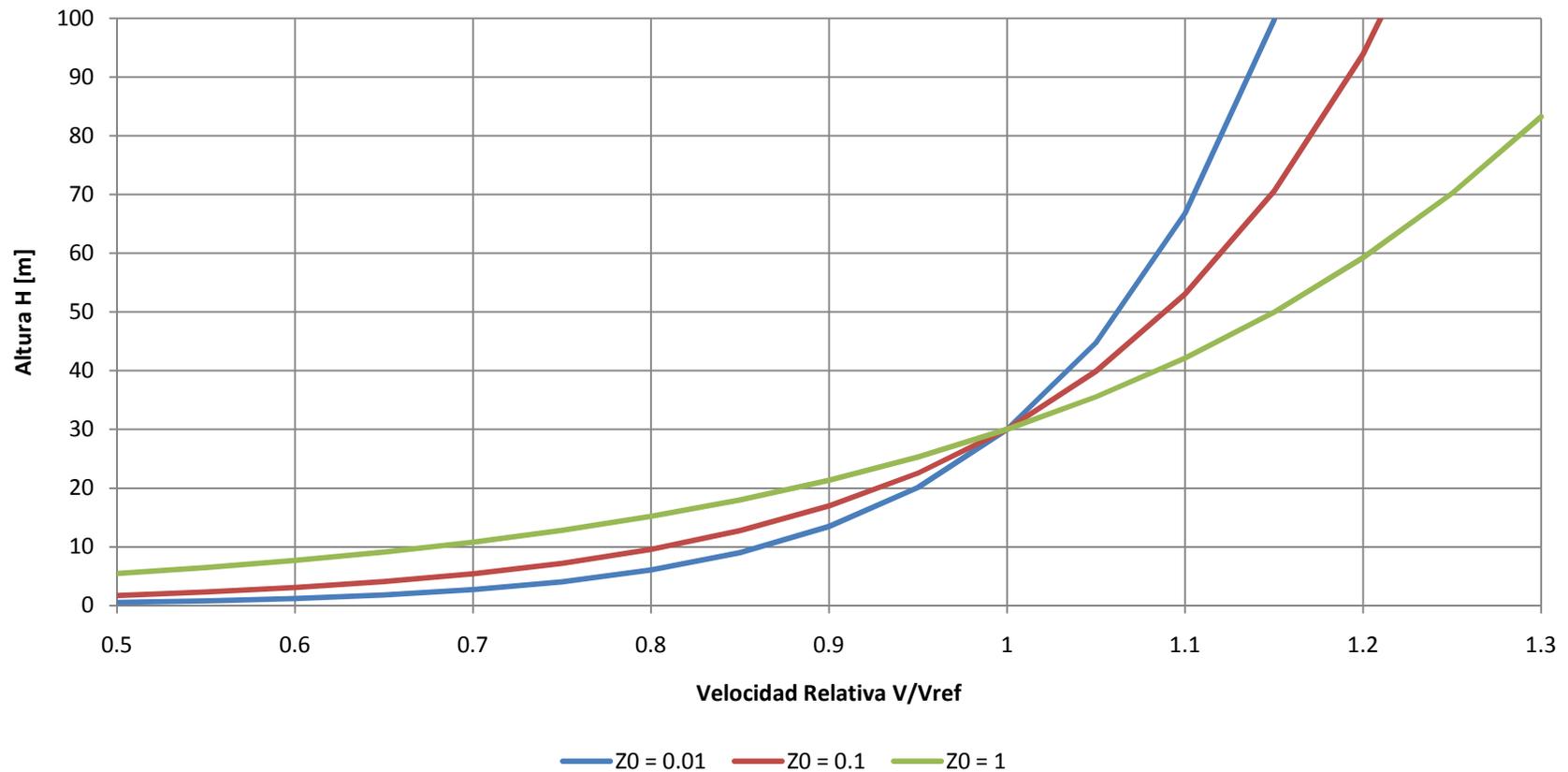
El Viento función de la Altura

- Viento se puede estimar en función:
 - La altura h en que se mide
 - La rugosidad del terreno Z_0
 - **Definición Z_0 :**
 - » Altura en que la velocidad del viento es cero
 - **Función de los obstáculos terrestres**

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)}$$

El Viento Función de la Altura

Estimación Logaritmica de la Velocidad del Viento

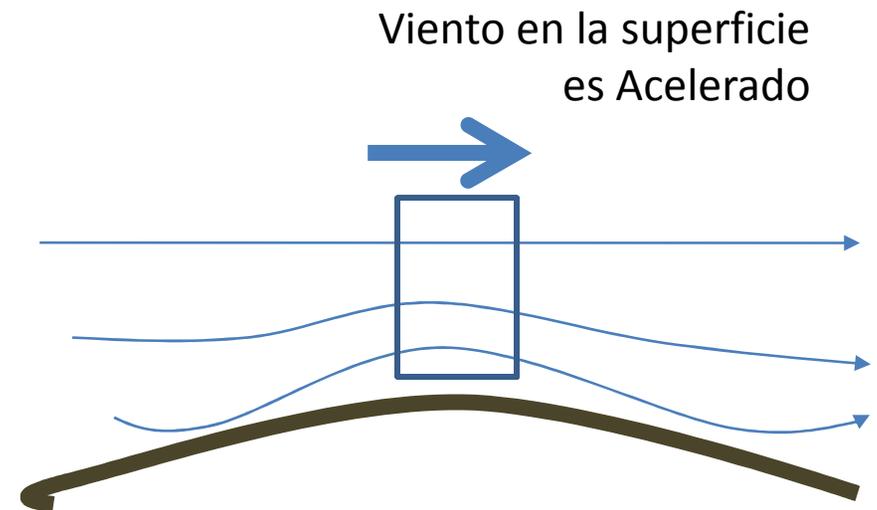


Causas de la Turbulencia Eólica

- Obstáculos también producen turbulencias
 - Edificios
 - Bosques
 - Cerros muy Inclutados
- Turbulencias reducen la velocidad del viento
 - Menor generación eólica



- Geografía puede acelerar el viento
 - Lomas de baja inclinación
 - Pendientes $< 20^\circ$



El Viento es un Fenómeno Local

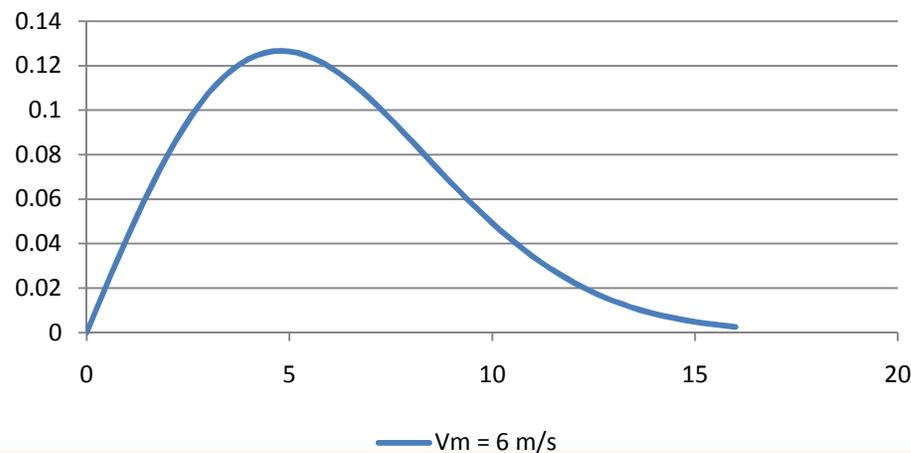
La geografía y características locales tienen gran efecto en el comportamiento del Viento

¡Importante realizar mediciones en el sitio donde se desarrollaría el Proyecto!

Estimación del Viento

- Uso de Histogramas ideales
 - Permiten estimar la frecuencia con que existe una cierta velocidad (Probabilidad)
 - **Función de distribución de Rayleigh**
 - Utilidad al solo conocer la Velocidad media
 - » Buena Representación del Régimen Europeo

Función de Rayleigh



$$f(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right)$$

La Función de Weibull

- Genérica

- Uso de Parámetros permite adaptar la función al régimen de la zona

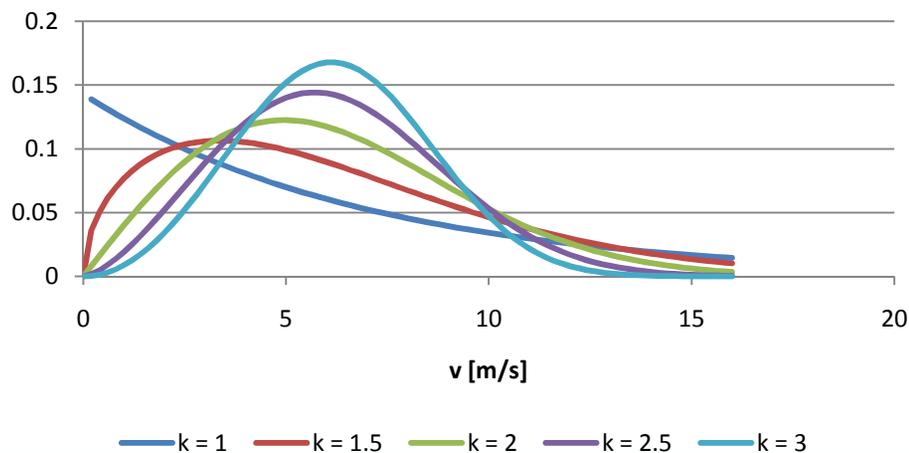
- **Factor de Forma k y**

- **Parámetro de Escalabilidad A**

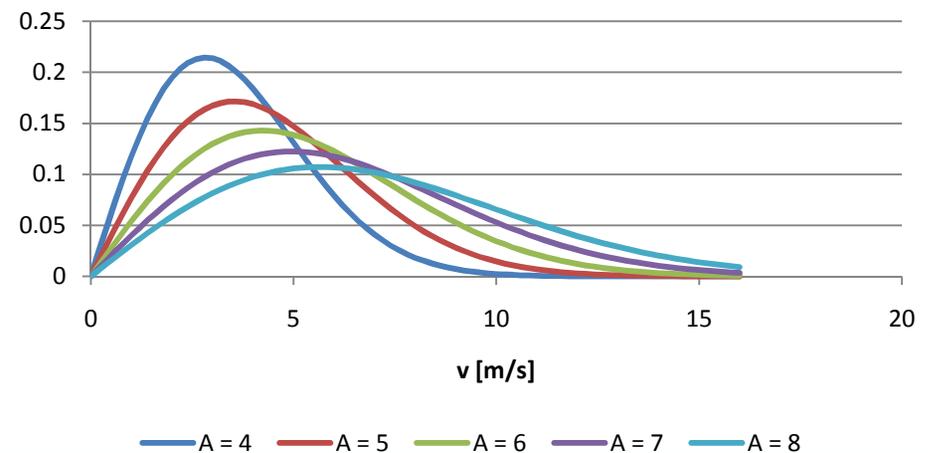
$$f_{k,A}(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right)$$

- Estos se pueden estimar con diversos métodos

Sensibilidad Weibull c/r a factor k



Sensibilidad Weibull c/r parámetro A

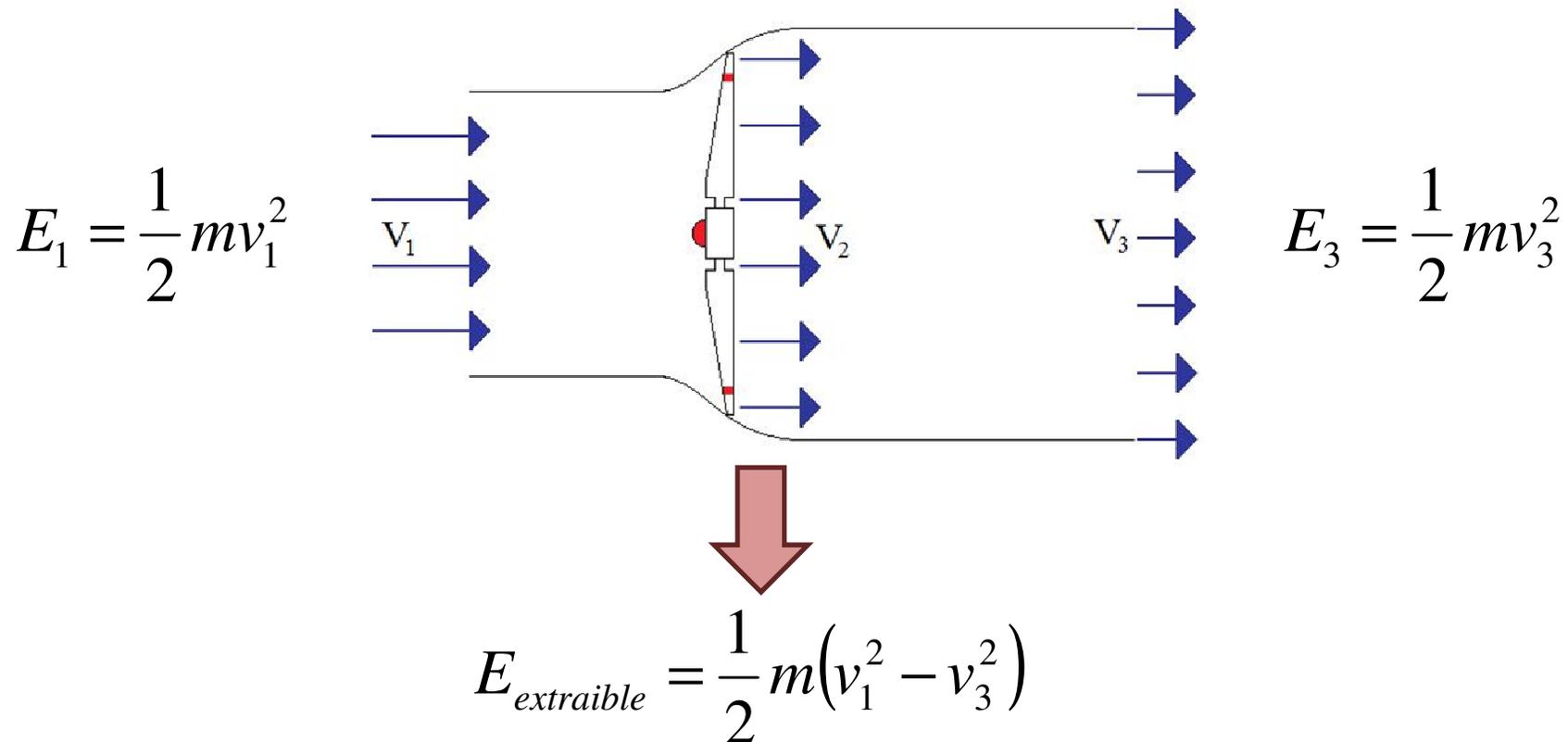


La Importancia de Estimar el Viento

- Al poder conocer y estimar el recurso eólico
 - Dimensionamiento optimo de las Turbinas
 - **Altura**
 - **Diámetro**
 - Elegir la ubicación optima considerando efecto de las turbulencias
 - **Maximizar la Vida Útil de las Turbinas**
 - Estimar la generación de Energía
 - **Determinar las ventas y Rentabilidad**

La Conversión de la Energía Eólica

- Basado en el principio de Bernoulli
 - Conservación de la Energía
 - Velocidad Disminuye
 - Volumen Constante
 - Área Aumenta



La Conversión de la Energía Eólica

- Conversión consiste en reducir la velocidad de la masa de aire interceptada por el área de la turbina
 - La potencia depende de la variación del Flujo de Aire

$$E_{\text{extraible}} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad \longrightarrow \quad P_{\text{extraible}} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2)$$

$\dot{m} = \rho A v_2$

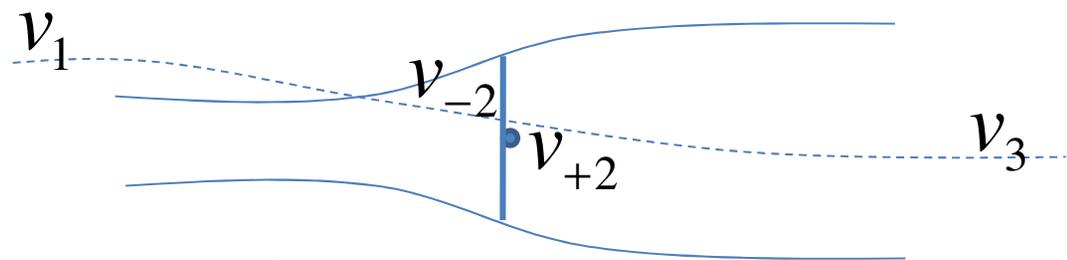
La Conversión de la Energía Eólica

- Existencia de una Velocidad \underline{v}_3 optima tal de maximizar la potencia extraída.

¿Cual Es? ¿Cómo se Determina?

1. Por conservación del Volumen

- El Flujo de Aire se mantiene constante durante todo su trayecto



$$\rho A_1 v_1 = \rho A_{-2} v_{-2} = \rho A_{+2} v_{+2} = \rho A_3 v_3$$

$$v_{-2} = v_{+2} \quad \leftarrow \text{Por Continuidad}$$

La Conversión de la Energía Eólica

2. Según la Teoría de la Conservación del Momentum

– La fuerza **F** es igual al producto entre el cambio total de velocidad y la variación de la masa de flujo **dm/dt**.

$$F = \dot{m}(v_1 - v_3) \quad \text{con} \quad \dot{m} = \rho A v_2$$

3. Según Bernoulli la suma de las energías potencial, cinética y la presión estática

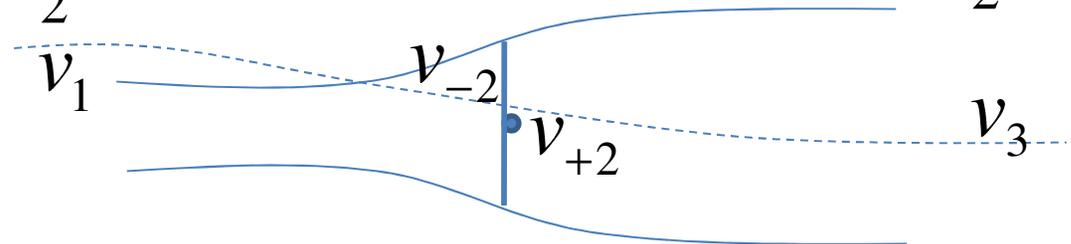
- se mantiene constante siempre y cuando el fluido no ejerza trabajo.

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho g h = Cte$$

La Conversión de la Energía Eólica

4. Realizando las ecuaciones de Bernoulli para la zonas

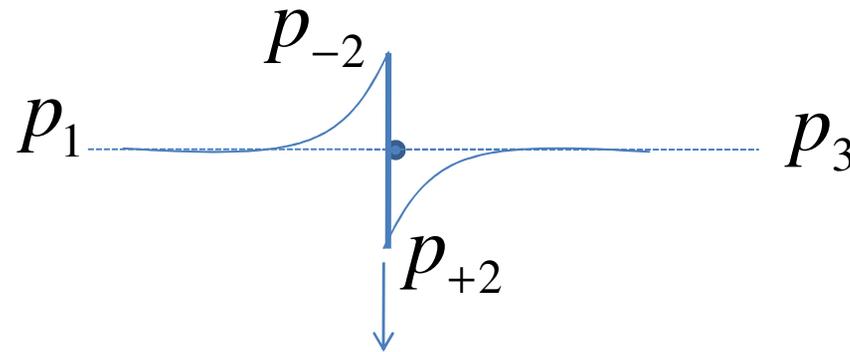
- Antes del Rotor
- Después del Rotor
 - Suponiendo que la Altura del Fluido $h = \text{cte}$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_{-2} + \frac{1}{2} \rho v_{-2}^2$$
$$p_{+2} + \frac{1}{2} \rho v_{+2}^2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

$$v_{-2} < v_1 \Rightarrow p_1 < p_{-2}$$
$$v_3 < v_{+2} \Rightarrow p_{-2} < p_3$$

La presión estática p depende de la distancia del flujo al rotor

La Conversión de la Energía Eólica

5. Por Bernoulli la presión estática presenta una discontinuidad en el rotor.



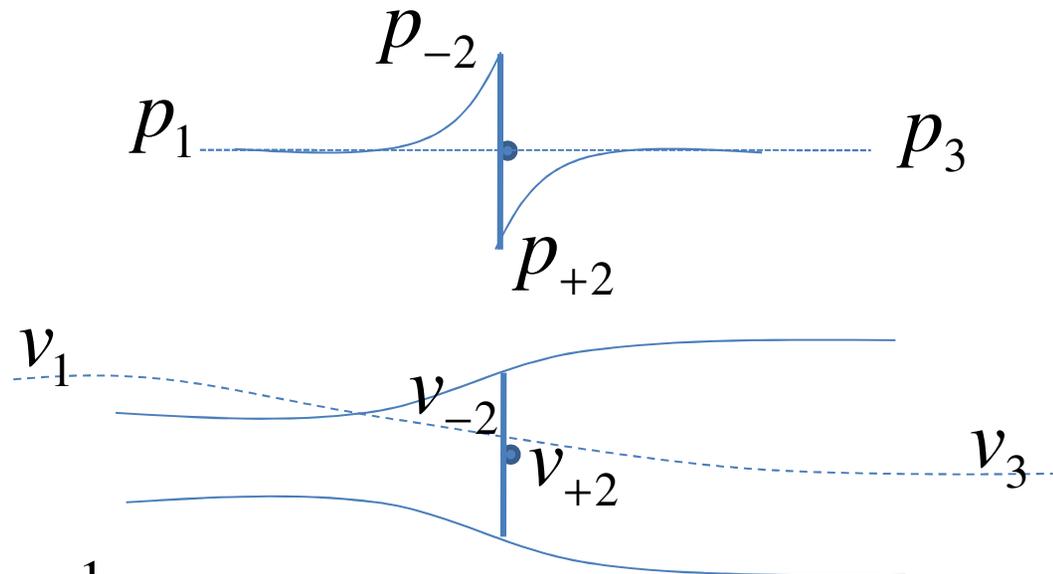
$$F_2 = A(p_{-2} - p_{+2})$$

- La fuerza F ejercida en el Rotor por el aire será igual a la diferencia entre las presiones estáticas por el área del flujo de Aire interceptado.

La Conversión de la Energía Eólica

6. La presión estática p_3 se supone igual a su valor al comienzo p_1 .

- Suponiendo presión Atmosférica Constante



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_{-2} + \frac{1}{2} \rho v_{-2}^2$$

$$p_{+2} + \frac{1}{2} \rho v_{+2}^2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

$v_{-2} = v_{+2}$ $p_1 = p_3$

$$\frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_3^2) = p_{-2} - p_{+2}$$

La Conversión de la Energía Eólica

7. Usando las Expresiones para la Fuerza F provenientes 2 y 5

$$F = \rho A_2 v_2 (v_1 - v_3) = A_2 (p_{-2} - p_{+2})$$

- Usando la expresión 6 para la diferencia de presión estática se obtiene:

$$\rho A_2 v_2 (v_1 - v_3) = \frac{1}{2} \rho A_2 (v_1^2 - v_3^2)$$

- Entonces Despejando para V_2

$$v_2 = \frac{1}{2} (v_1 + v_3)$$

- V_2 es igual al promedio de las velocidades V_1 y V_3 , así podemos obtener la velocidad óptima V_3 .

La Conversión de la Energía Eólica

- Usando la expresión de velocidad V_2 se puede obtener la máxima potencia extraída.

$$P_{extraible} = \frac{1}{2} \rho A \cdot \left(\frac{v_1 + v_3}{2} \right) \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \cdot C_{p,Betz}(v_1, v_3)$$

- La Cual es función del Coeficiente de Potencia o de Betz **C_p**

$$C_{p,Betz}(v_1, v_3) = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_3^2}{v_1^2} \right) \right]$$

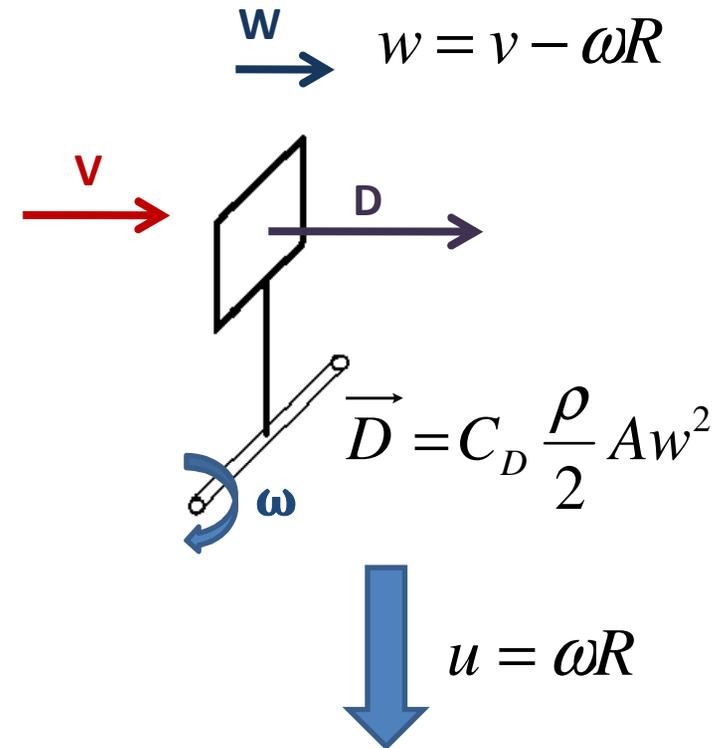
- Las expresiones anteriores permiten probar la “Ley de Betz”
 - Existe un Máximo Teórico para **C_p** de 59%, de potencia que se puede extraer considerando una razón **(V₃/V₁) = 1/3**.

Principios de Aerodinámica

- Fuerza de Arrastre (Drag)

- Fuerza de empuje

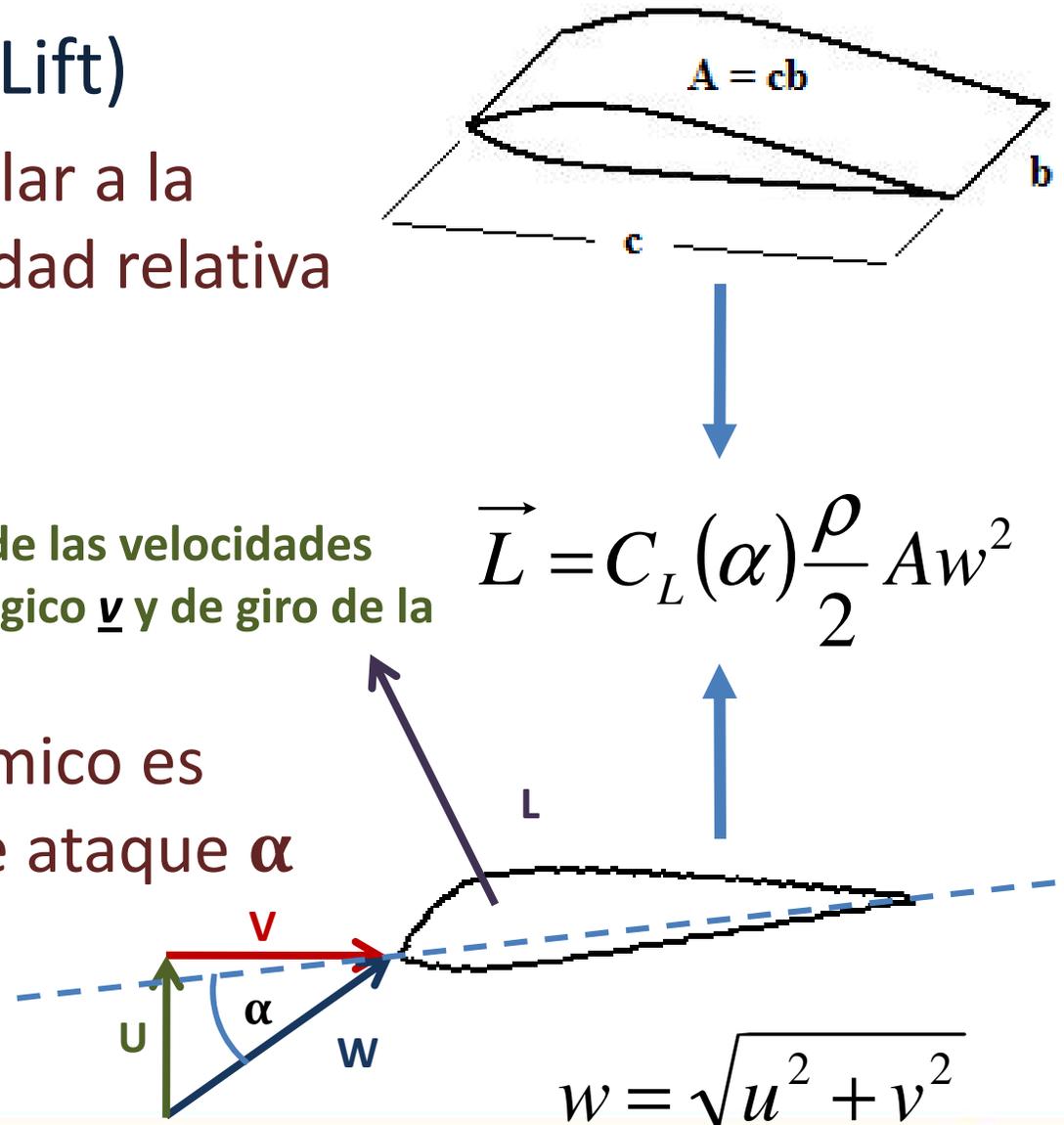
- Actúa en una superficie perpendicular a la dirección del viento relativo w
- Fuerza paralela al Viento
- Coeficiente de poder depende del perfil aerodinámico de la superficie



$$C_P \left(\frac{u}{v} \right) = C_D \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 \frac{u}{v} \quad \leftarrow \quad P = \vec{D} u = \frac{\rho}{2} A v^3 \left\{ C_D \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 \frac{u}{v} \right\}$$

Principios de Aerodinámica

- Fuerza de Arranque (Lift)
 - Fuerza es perpendicular a la dirección de la velocidad relativa del viento w
 - Velocidad relativa w
 - es la suma vectorial de las velocidades del viento meteorológico \underline{v} y de giro de la turbina \underline{u}
 - Coeficiente aerodinámico es función del ángulo de ataque α



Principios de Aerodinámica

- La eficiencia de una Turbina eólica dependerá del valor de su coeficiente de poder C_p .
- El Coeficiente de Poder C_p dependerá de
 - El Principio utilizado
 - Arrastre (Drag)
 - Arranque (Lift)
 - La Velocidad relativa w
 - La Geometría de la aspa y del rotor

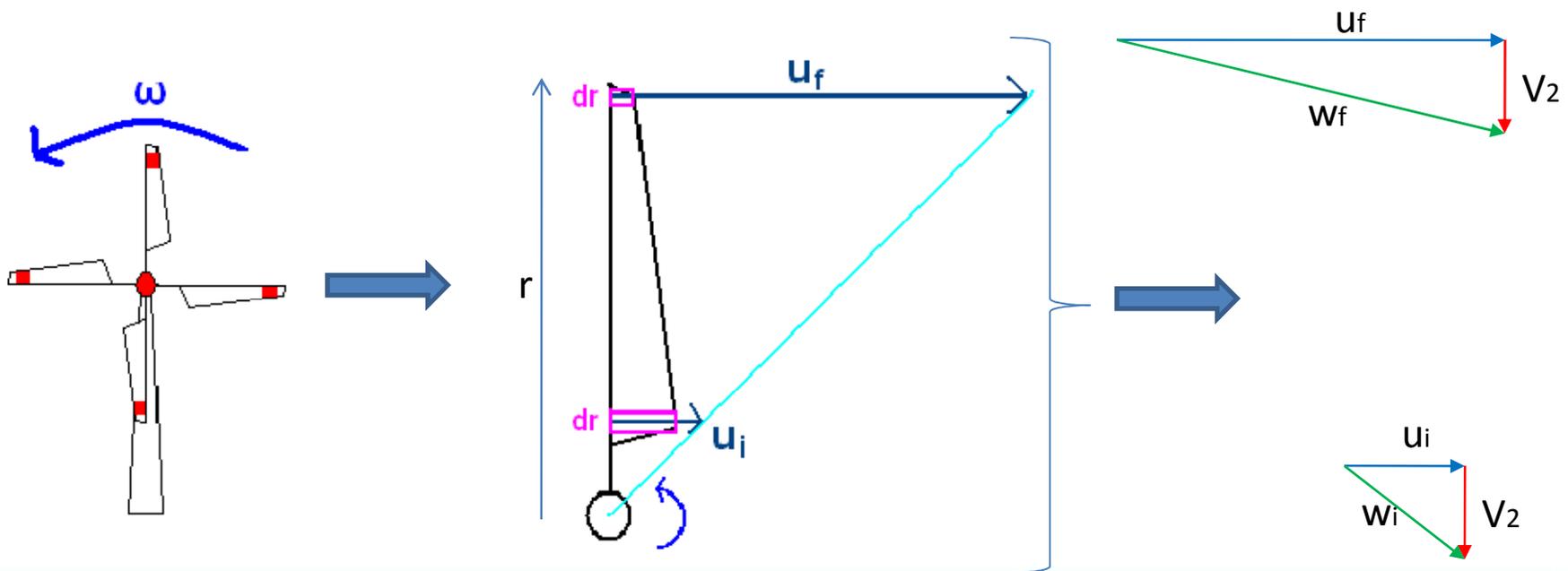
**Toda Turbina esta sujeta
a Fuerzas de Arrastre y
Arranque a la vez**



**El Truco esta en como
maximizar cada fuerza
por separado**

Fuerzas Aplicadas en una Turbina

- Triangulo de Velocidades
 - Velocidad Relativa w , es igual a la suma vectorial entre
 - Velocidad del viento meteorologico en el eje de rotación V_2
($=2*V_1/3$)
 - Velocidad de giro del viento $u(r)$



Fuerzas Aplicadas en una Turbina

- Las Fuerzas de Arranque y Arrastre en ambos extremos serian:

