

**fcfm**

# **Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables**

## **EL-600**

### **Modulo Energía Eólica**



**Semestre Primavera 2009**

**Ing. Keith Watt Arnaud**



# **3. Característica Recurso Eólico**

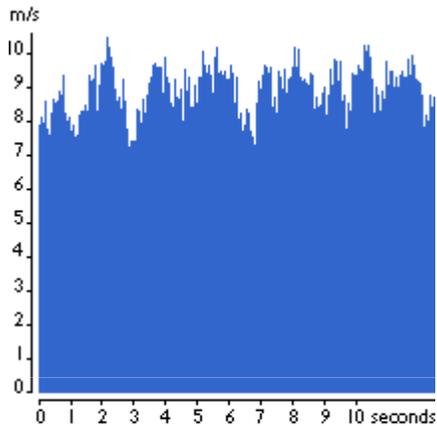


# La Naturaleza del Viento

- 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.)

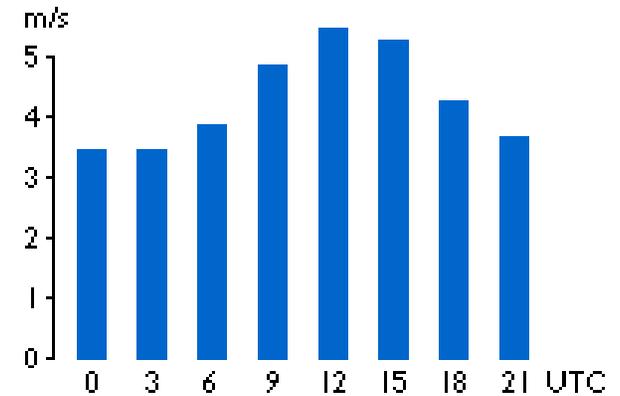
# La Naturaleza del Viento

- Varibailidad del Viento en Dinamarca



**Segundos**  
Turbulencia

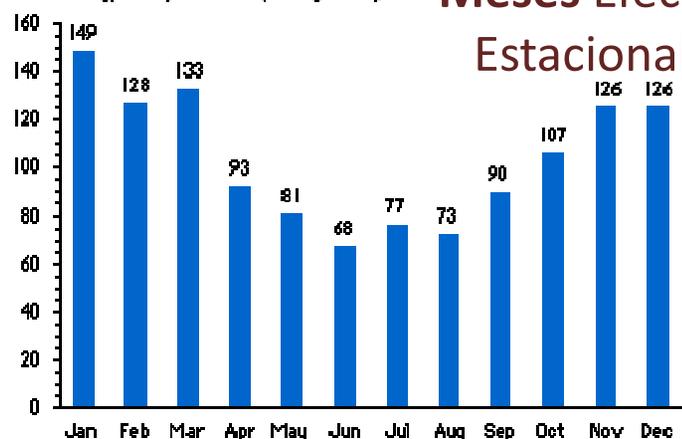
© 1998 www.WINDPOWER.org



**Horas** Gradientes  
de Temperatura

© 1998 www.WINDPOWER.org

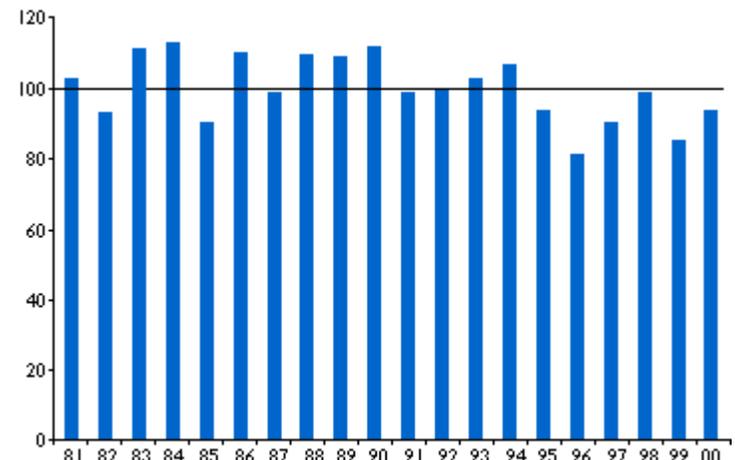
Wind Energy Index, Denmark (average=100)



**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:

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

- Considerando una masa de densidad Uniforme  $\rho$  y área  $A$ .

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

# 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*

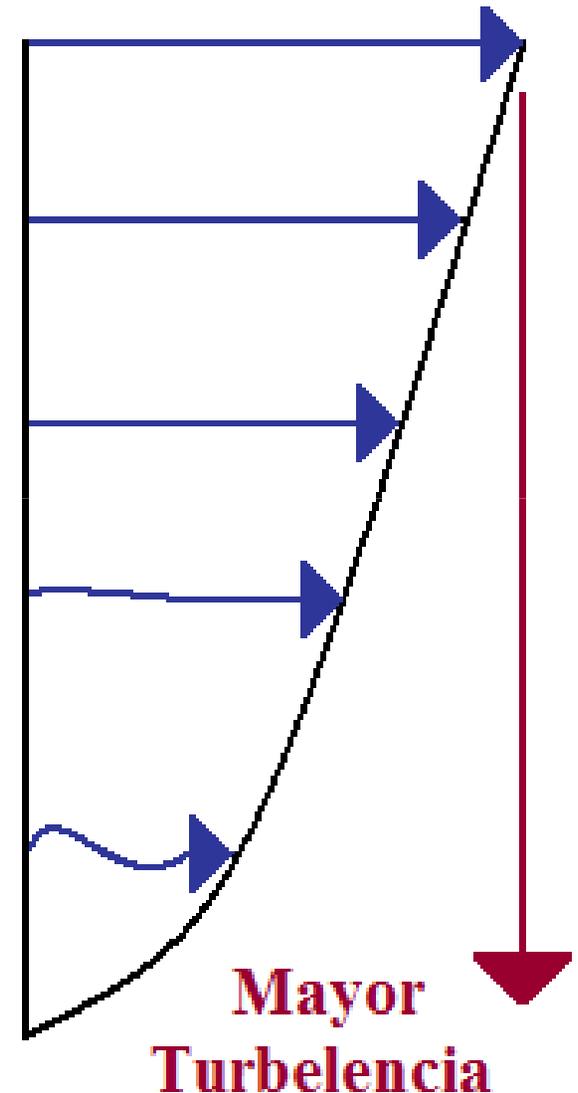


Gran Importancia en poder estimar  
con precisión el recurso eólico

# 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**



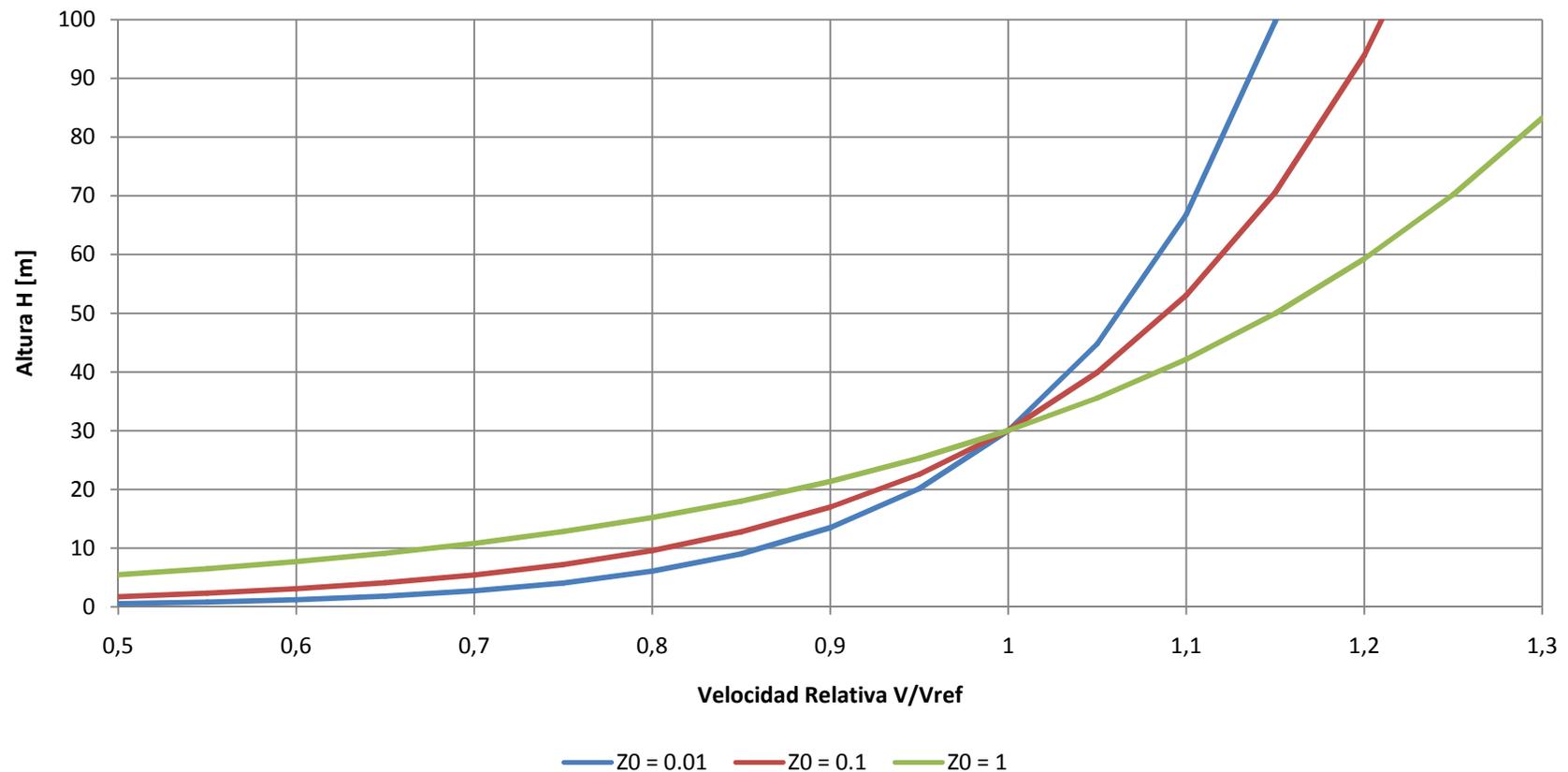
# El Viento función de la Altura

- 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

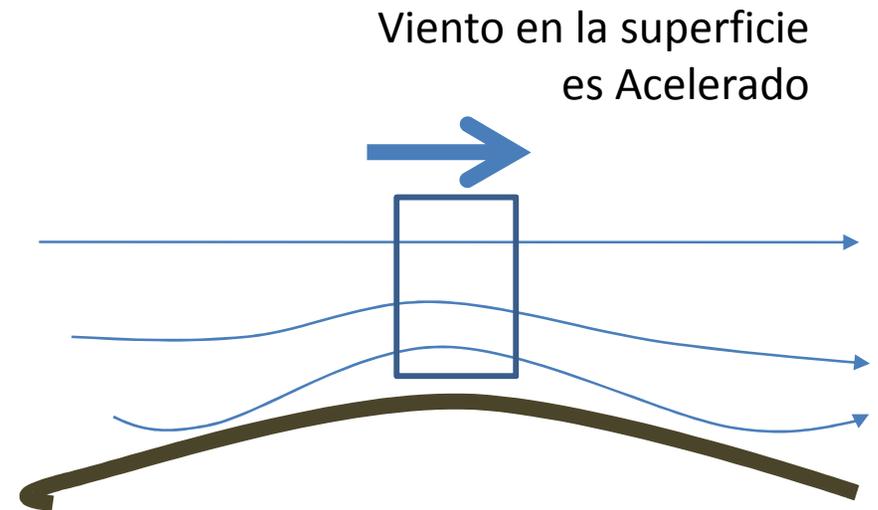


# Causas de la Turbulencia Eólica

- 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

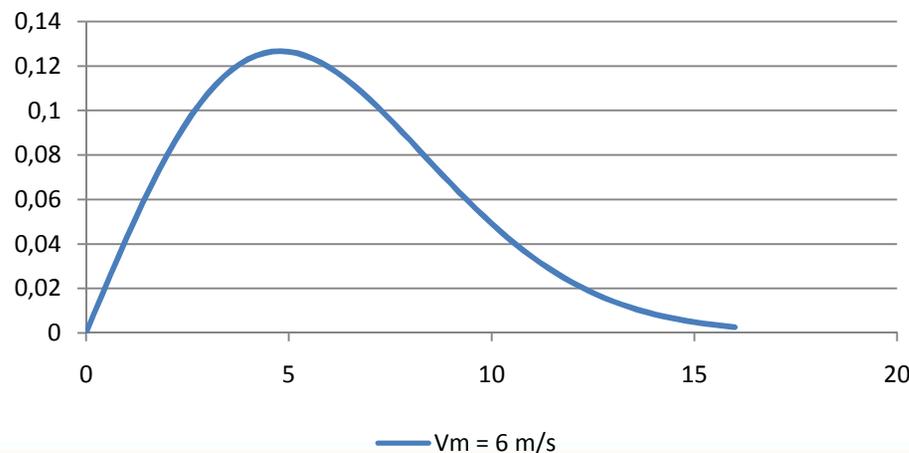
La geografía y características locales tienen gran efecto en el comportamiento del Viento

**¡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

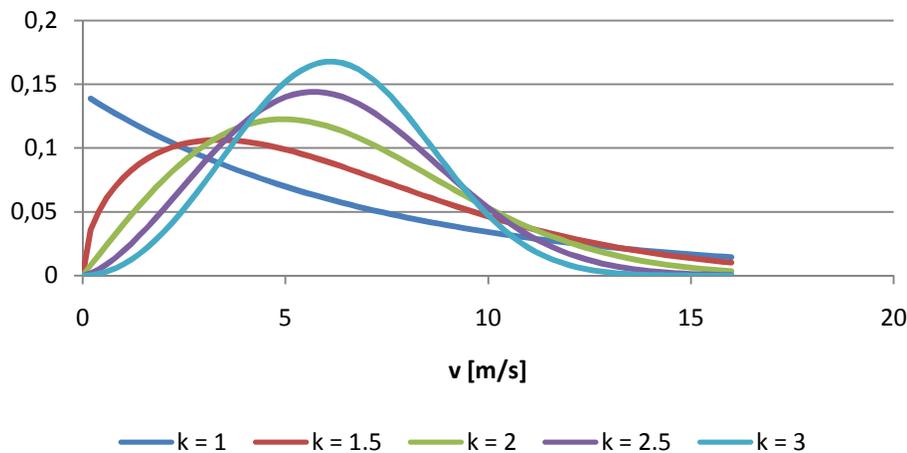
- **Factor de Forma k y**

- **Parámetro de Escalabilidad A**

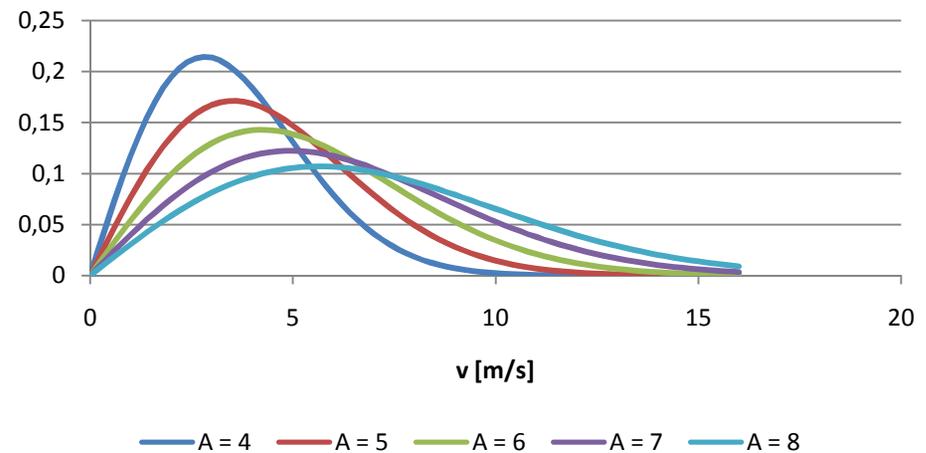
$$f_{k,A}(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right)$$

- Estos se pueden estimar con diversos métodos

Sensibilidad Weibull c/r a factor k



Sensibilidad Weibull c/r parámetro A

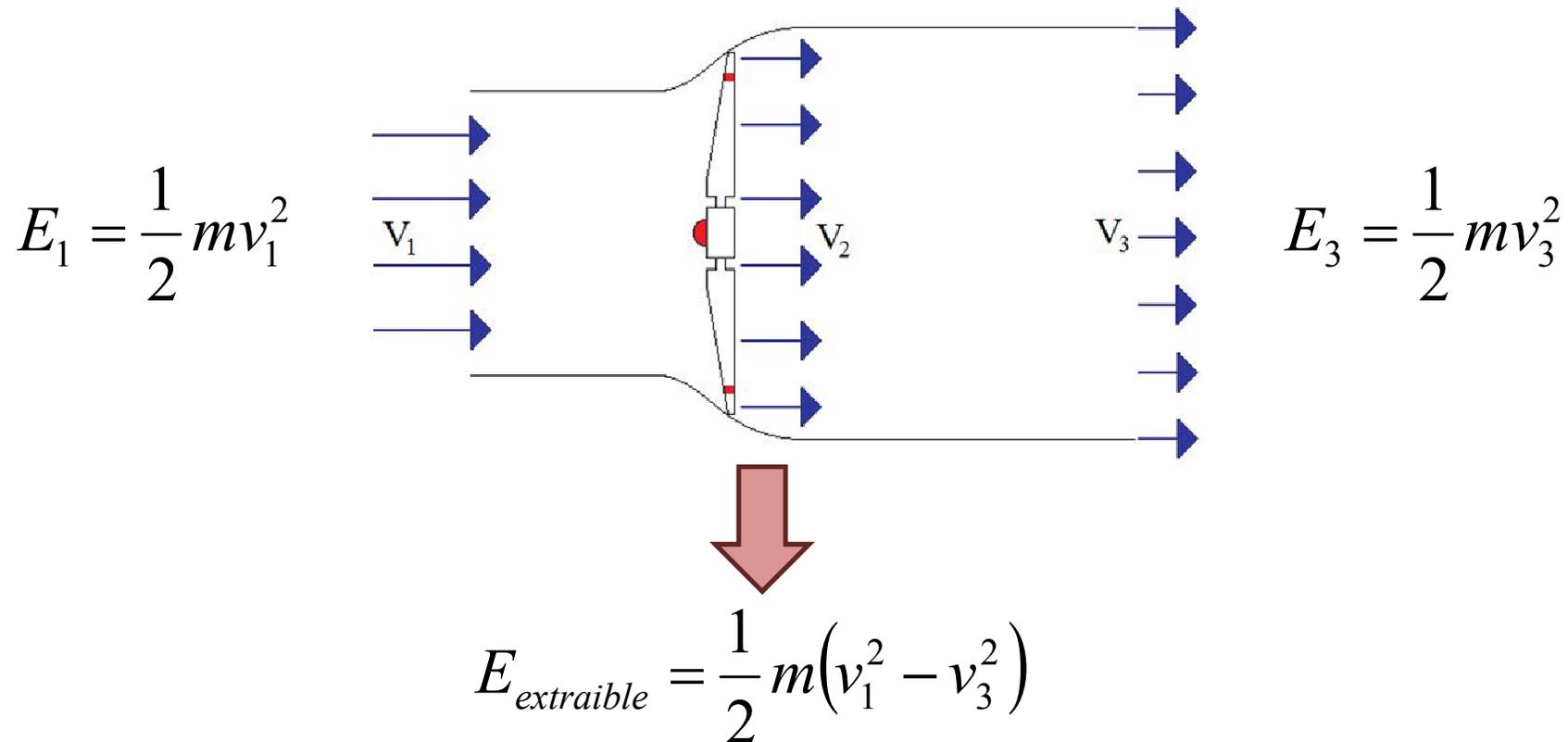


# La Importancia de Estimar el Viento

- 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

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

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

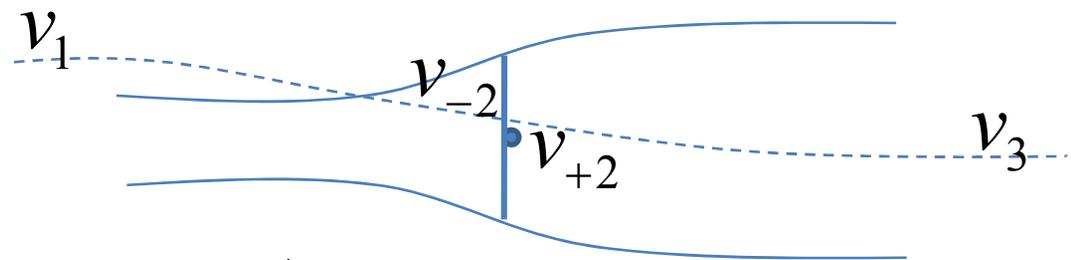
# La Conversión de la Energía Eólica

- Existencia de una Velocidad  $\underline{v}_2$  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

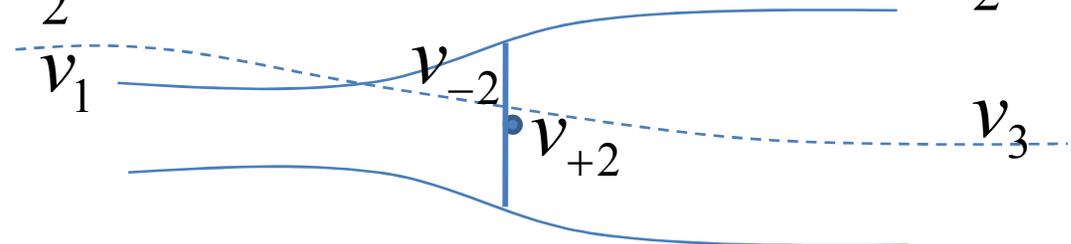
- se mantiene constante siempre y cuando el fluido no ejerza trabajo.

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

# 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  $h = \text{cte}$

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


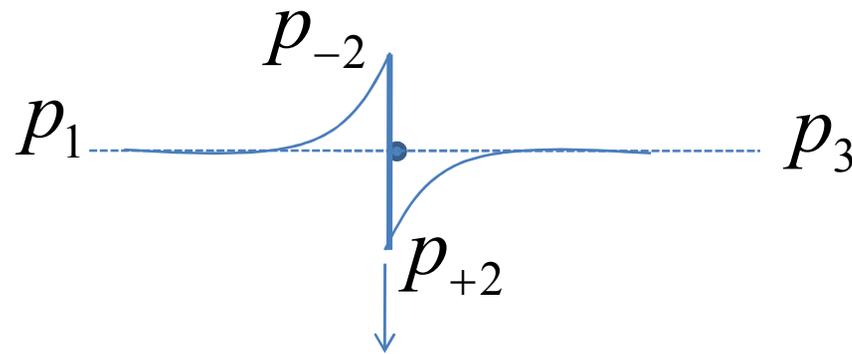
The diagram illustrates the flow of air through a wind turbine rotor. It shows a vertical rotor with a central hub. The flow is represented by solid blue lines above and below the rotor. A dashed blue line represents the velocity profile. The velocity is  $v_1$  before the rotor,  $v_{-2}$  at the top of the rotor,  $v_{+2}$  at the bottom of the rotor, and  $v_3$  after the rotor. The pressure is  $p_1$  before the rotor,  $p_{-2}$  at the top of the rotor,  $p_{+2}$  at the bottom of the rotor, and  $p_3$  after the rotor. Blue arrows point from the equations above to the corresponding velocity and pressure points in the diagram.

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

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.



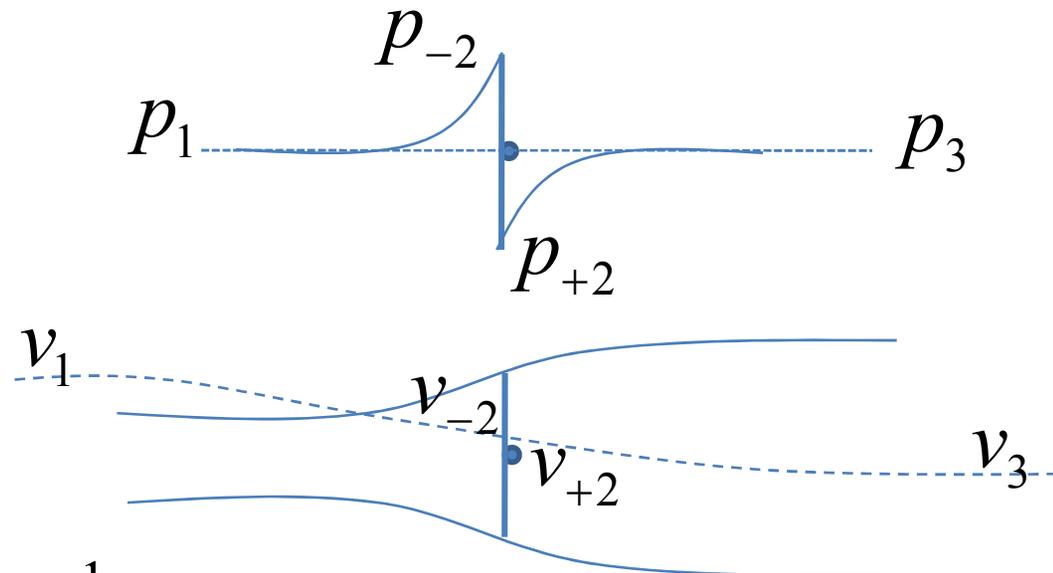
$$F_2 = A(p_{-2} - p_{+2})$$

- 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 optimo cuando es igual al promedio de las velocidades  $V_1$  y  $V_3$

# La Conversión de la Energía Eólica

- Usando la velocidad  $V_2$  optima 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<sub>p</sub>**

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

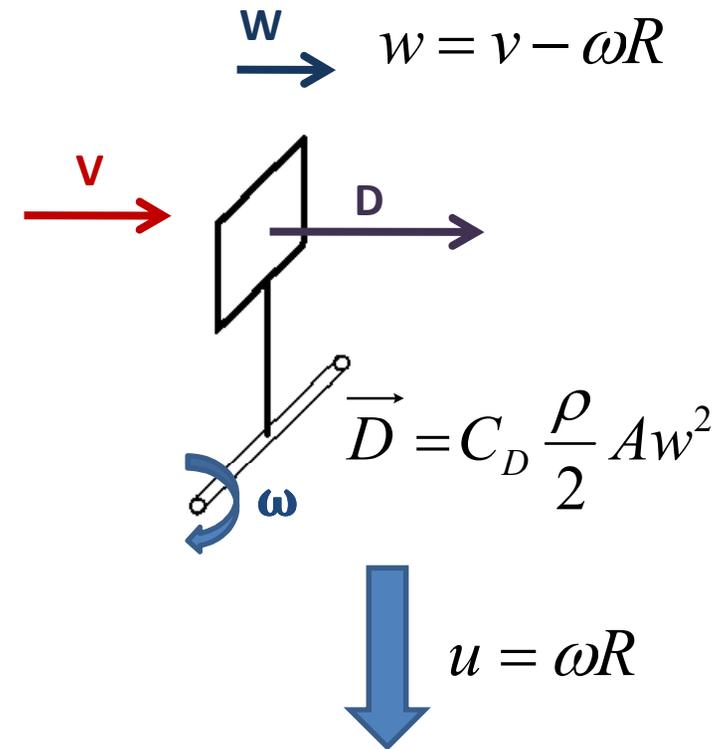
- Las expresiones anteriores permiten probar la “Ley de Betz”
  - Existe un Máximo Teórico para **C<sub>p</sub>** de 59%, de potencia que se puede extraer considerando una razón **(V<sub>3</sub>/V<sub>1</sub>) = 1/3**.

# 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



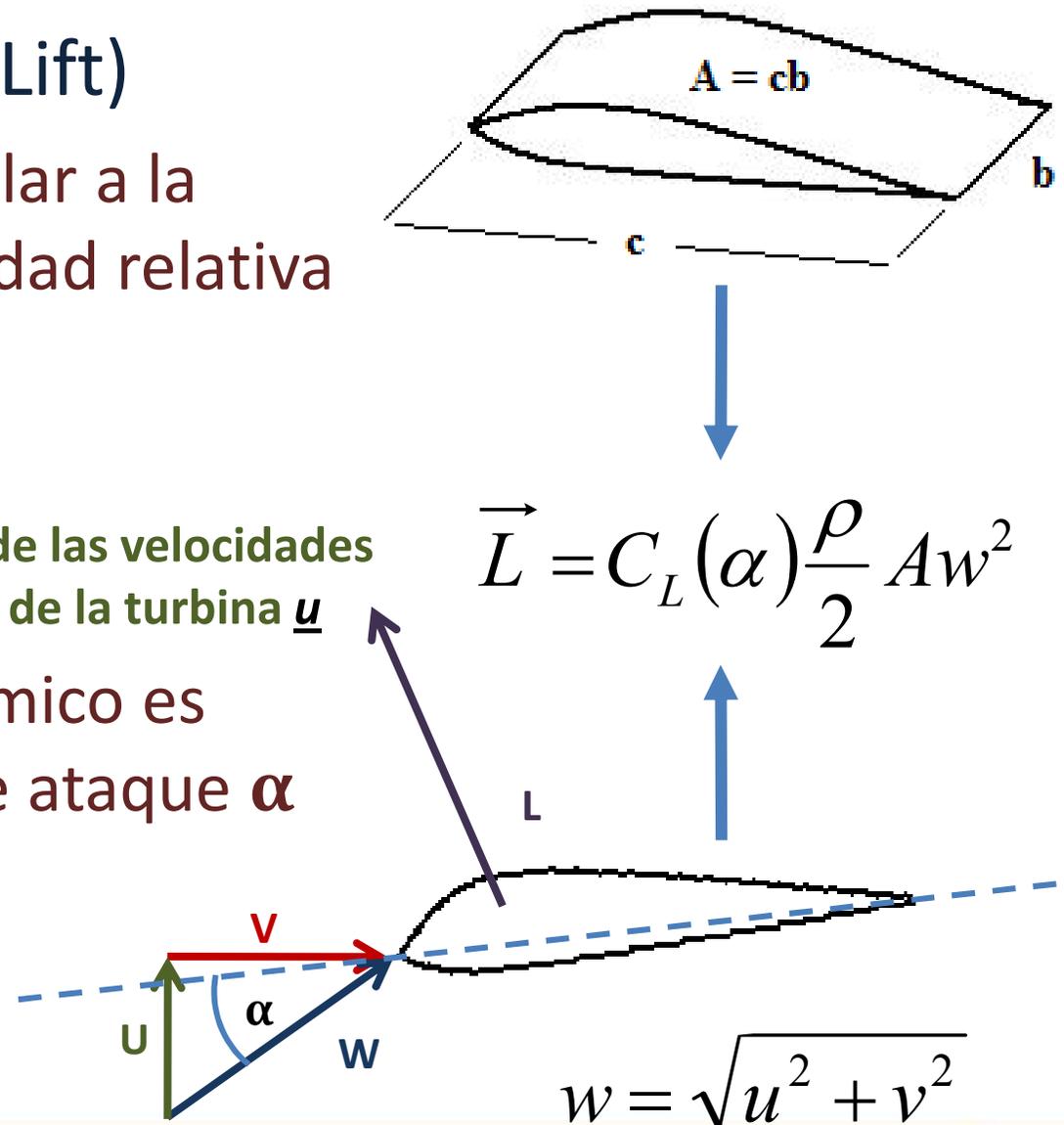
$$C_P \left( \frac{u}{v} \right) = C_D \left( 1 - \frac{u}{v} \right)^2 \frac{u}{v}$$



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

# 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  $v$  y de giro de la turbina  $u$
  - Coeficiente aerodinámico es función del ángulo de ataque  $\alpha$



# 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 ves



El Truco esta en como  
maximizar cada fuerza  
por separado