renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

Sesión 2: Técnicas de planificación espacial de la energía eólica

Global Atlas de IRENA
Técnicas de planificación espacial
Curso de 2 días

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

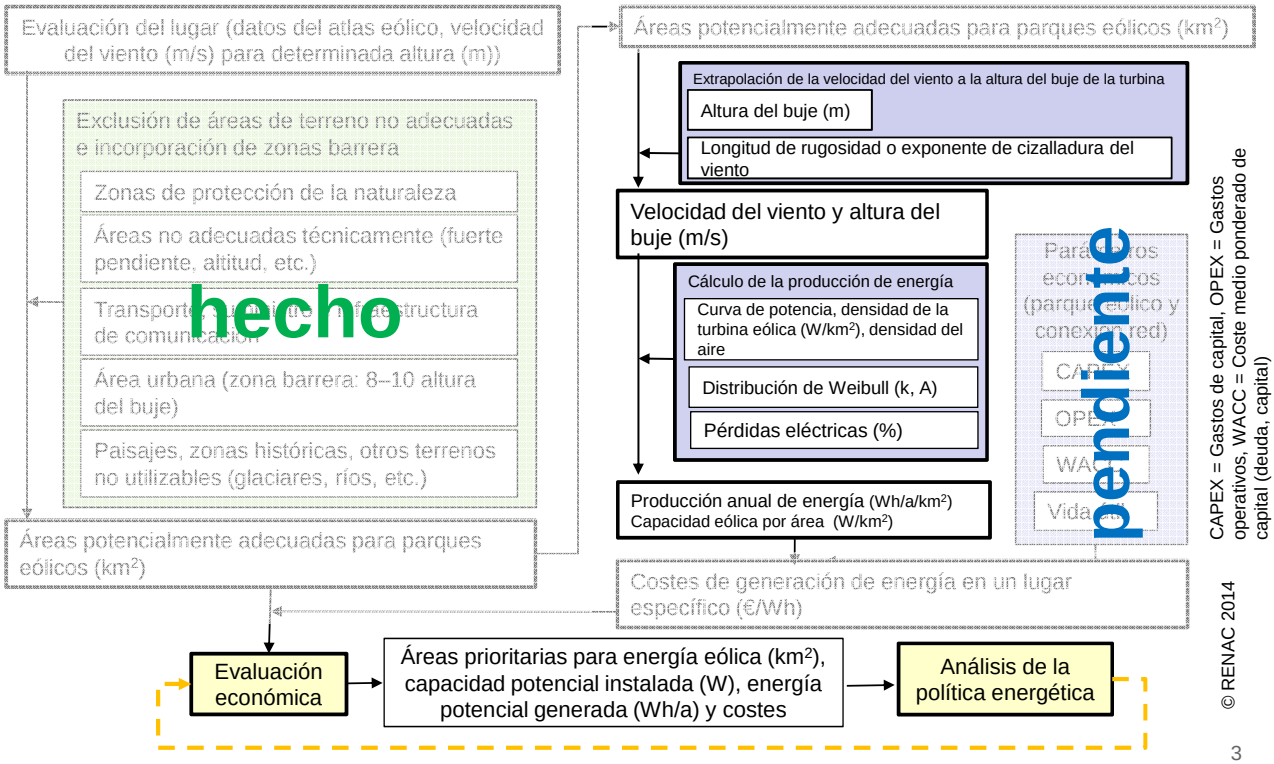
Cuestiones fundamentales que queremos contestar

- Tras haber identificado las áreas que están potencialmente disponibles para las energías renovables, queremos calcular...
  - cuál es la **capacidad eólica** potencial por km² y en total (W/km²), y
  - **cuánta electricidad** (Wh/km²/a) se puede generar en zonas con diferentes regímenes de viento.
- También necesitamos saber qué parámetros son los **más sensibles** a fin de identificar los parámetros de entrada más importantes.

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency



CAPEX = Gastos de capital, OPEX = Gastos operativos, WACC = Coste medio ponderado de capital (deuda, capital)

© RENAC 2014

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

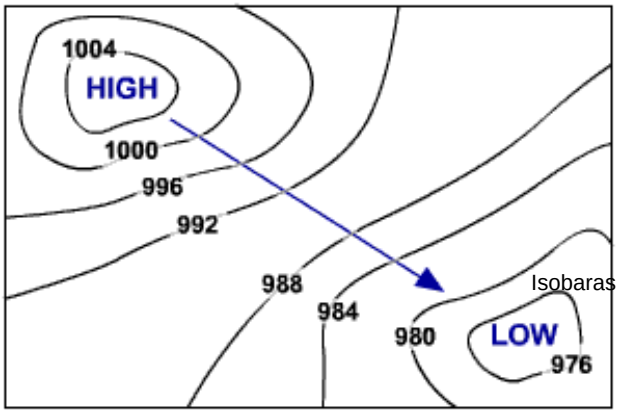
Agenda

1. Formación del viento
2. Aspectos técnicos que necesitamos saber
3. Organización espacial de los parques eólicos
4. Cálculo del rendimiento eléctrico de origen eólico
5. Ejemplo práctico: Cálculo de la capacidad y rendimiento eólicos de un emplazamiento determinado

1. FORMACIÓN DEL VIENTO

Zonas de alta y de baja presión

- Las **zonas de alta presión** se producen cuando el aire se enfría (las zonas de alta presión en invierno pueden ser bastante duras y duraderas). El aire se hace más pesado y baja hacia la tierra. Los cielos suelen estar claros. El flujo de aire es en sentido de las agujas del reloj (hemisferio norte). El aire fluye sobre el suelo hacia la zona de baja presión.



- Las **bajas presiones** se producen cuando el aire se calienta. El aire se vuelve más ligero y se eleva. La presión disminuye hacia el centro y el flujo de aire es en sentido contrario a las agujas del reloj (hemisferio norte). Aparecerán nubes debido al aumento del aire caliente y húmedo, y el tiempo empeorará. El aire fluirá de nuevo a la zona de alta presión a altas altitudes de la atmósfera.

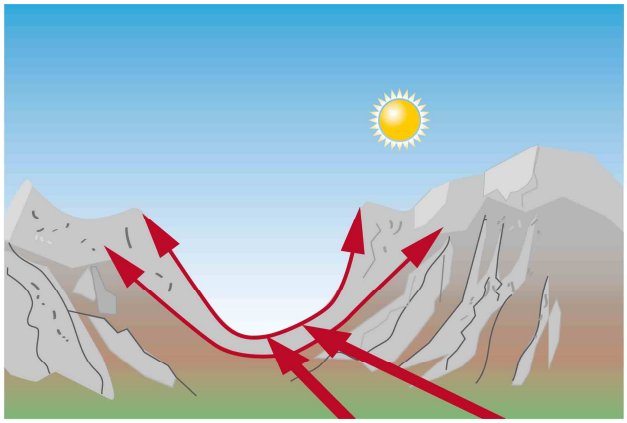
Fuente: http://www.experimentalaircraft.info/weather/weather-info-1.phpar

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

Brisa de valle y de montaña



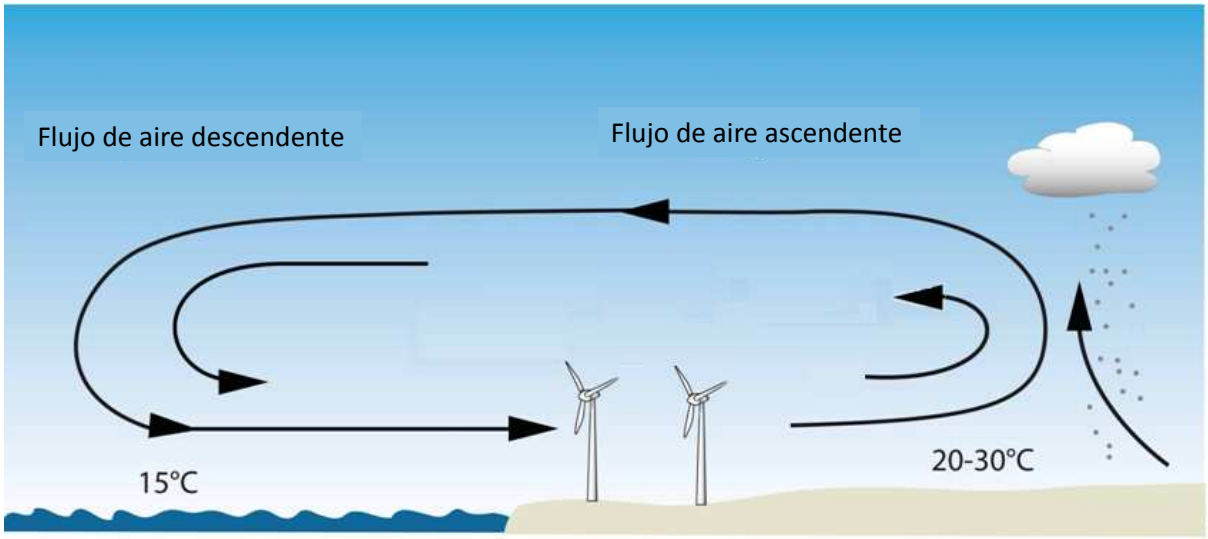
© www.renac.de

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

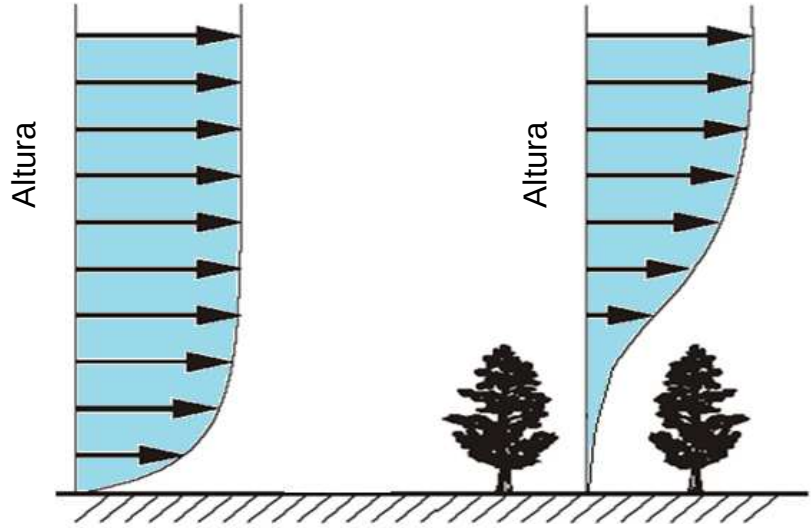
Brisa marina



© www.renac.de

2. ASPECTOS TÉCNICOS QUE NECESITAMOS SABER

Perfil de cizalladura vertical del viento y rugosidad de la superficie



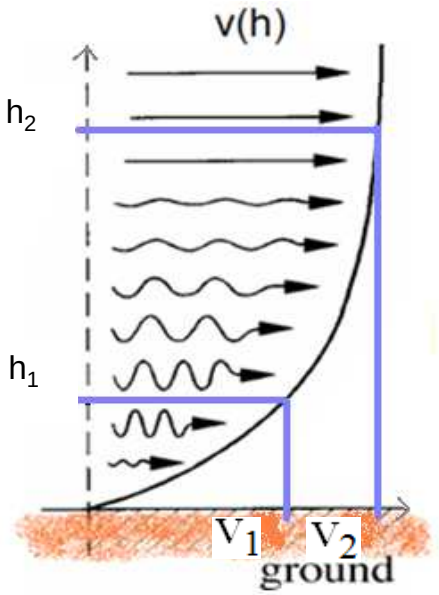
Perfil sobre un área con baja rugosidad (mar, hierba baja)

Perfil sobre un área con alta rugosidad (bosque, ciudad)

Clases y longitudes de rugosidad (Atlas Eólico Europeo)

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad Z_0 [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 1.250 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

Calcular la velocidad del viento a diferentes alturas



$$v_2 = v_1 * \frac{\ln(\frac{h_2}{z_0})}{\ln(\frac{h_1}{z_0})}$$

Siendo:

h_1: altura [m]

h_2: altura [m]

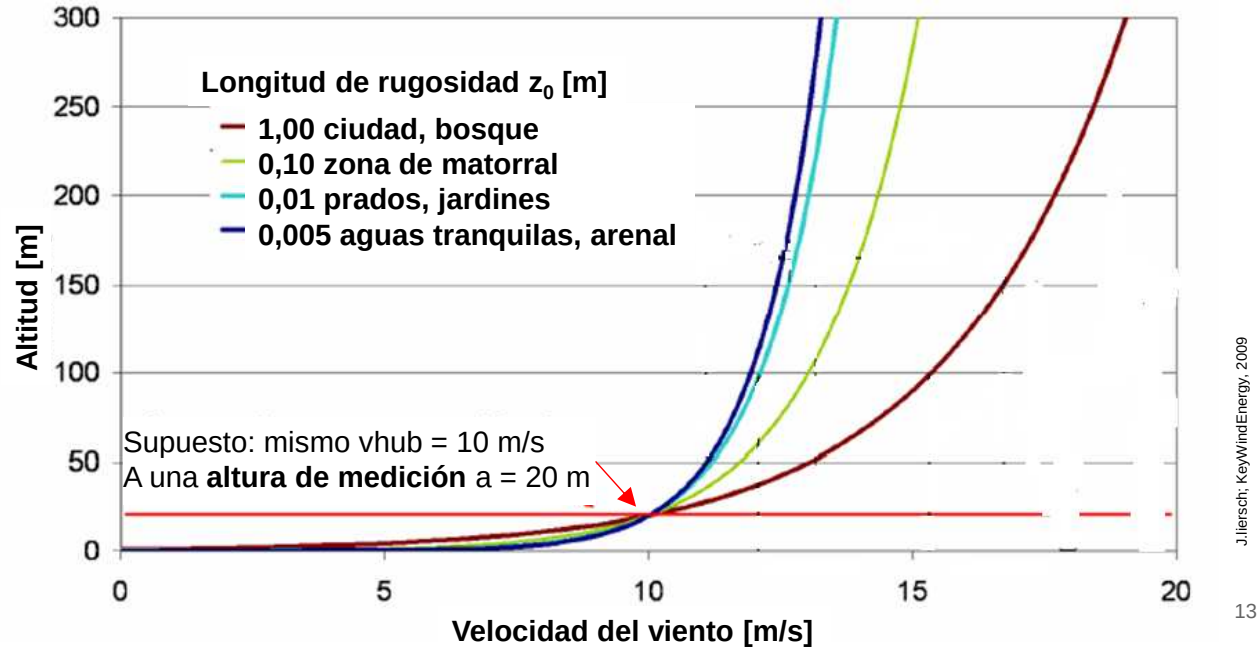
v_1 : velocidad del viento a h_1 [m/s]

v_2 : velocidad del viento a h_2 [m/s]

z_0 : longitud de rugosidad [m]

renac renewables academy · IET International Energy Transition · IRENA International Renewable Energy Agency

Esquema de la cizalladura del viento para diferentes clases de rugosidad - Velocidad del viento medida a la misma altura

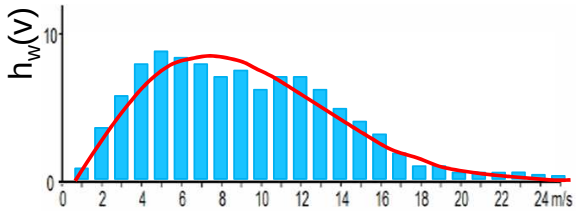


J.Iersch; KeyWindEnergy, 2009

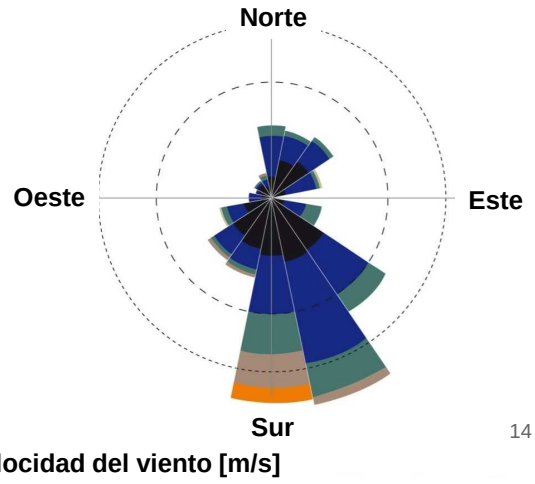
renac renewables academy · IET International Energy Transition · IRENA International Renewable Energy Agency

Evaluación de los recursos eólicos específicos de un lugar para la planificación de parques eólicos

- Para calcular la producción anual de energía de una turbina eólica se necesita la distribución de velocidades del viento. Se puede calcular con una ecuación de Weibull con los parámetros A y K



- La distribución de las direcciones del viento es importante para el emplazamiento de las turbinas eólicas en un parque eólico. La rosa de los vientos muestra la probabilidad de un viento procedente de un determinado sector.
- Las distribuciones de la velocidad del viento se miden para diferentes sectores de dirección del viento.



Factores de la ecuación de Weibull para diferentes regiones

- Para las regiones con una topografía similar, los factores k también son similares
  - 1.2 < k < 1.7 Montañas
  - 1.8 < k < 2.5 Típico de Norteamérica y Europa
  - 2.5 < k < 3.0 Donde la topografía aumenta la velocidad del viento
  - 3.0 < k < 4.0 Vientos, por ejemplo, de las regiones monzónicas
- El factor de escala A está ligado a la velocidad media del viento ($v_{med} \sim 0{,}8 \ldots 0{,}9 \cdot A$)
- Relación del viento medio v_{med}, *k y A (*cálculo del viento medio v_{med})

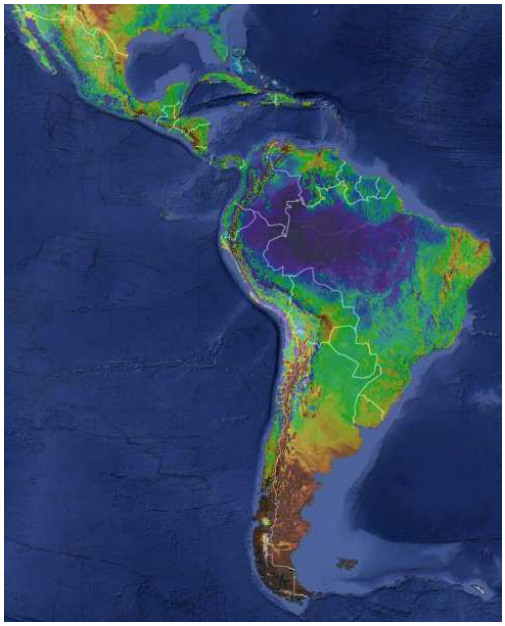
- **Advertencia: ¡Los valores son aproximados! ¡Es necesaria una monitorización in situ!**

$$v_{avg} \approx A\sqrt[k]{0{,}287/k + 0{,}688^{-0{,}1}}$$

Fuente: J.liersch; KeyWindEnergy, 2009

Atlas eólico basado en modelos

- Se toma una cantidad adecuada de mediciones de alta calidad y se caracterizan sus efectos locales
- Las mediciones se compilan en un atlas
- Muestra: Base de datos eólicos globales de 3TIER, velocidad del viento en tierra a 5 km de la costa a 80 m de altura, unidades en m/s
- Limitaciones para terrenos complicados y zonas costeras



Mapa: Atlas Global de IRENA; datos: Base de datos eólicos globales de 3TIER

Potencia del viento

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

- P = potencia del viento (vatios)
- ρ = densidad del aire (kg/m^3; kilos por metro cúbico)
- A = área (m^2; metros cuadrados)
- v = velocidad del viento (m/s; metros por segundo)

Ejercicio rápido: duplicar la velocidad del viento

- Vamos a duplicar la velocidad del viento y calcular qué le ocurre a la potencia del área de barrido del rotor. Supongamos una longitud de las aspas del rotor (radio) de 25 m y una densidad del aire de 1.225 kg/m^3).
- velocidad del viento = 5 m velocidad del viento = 10 m

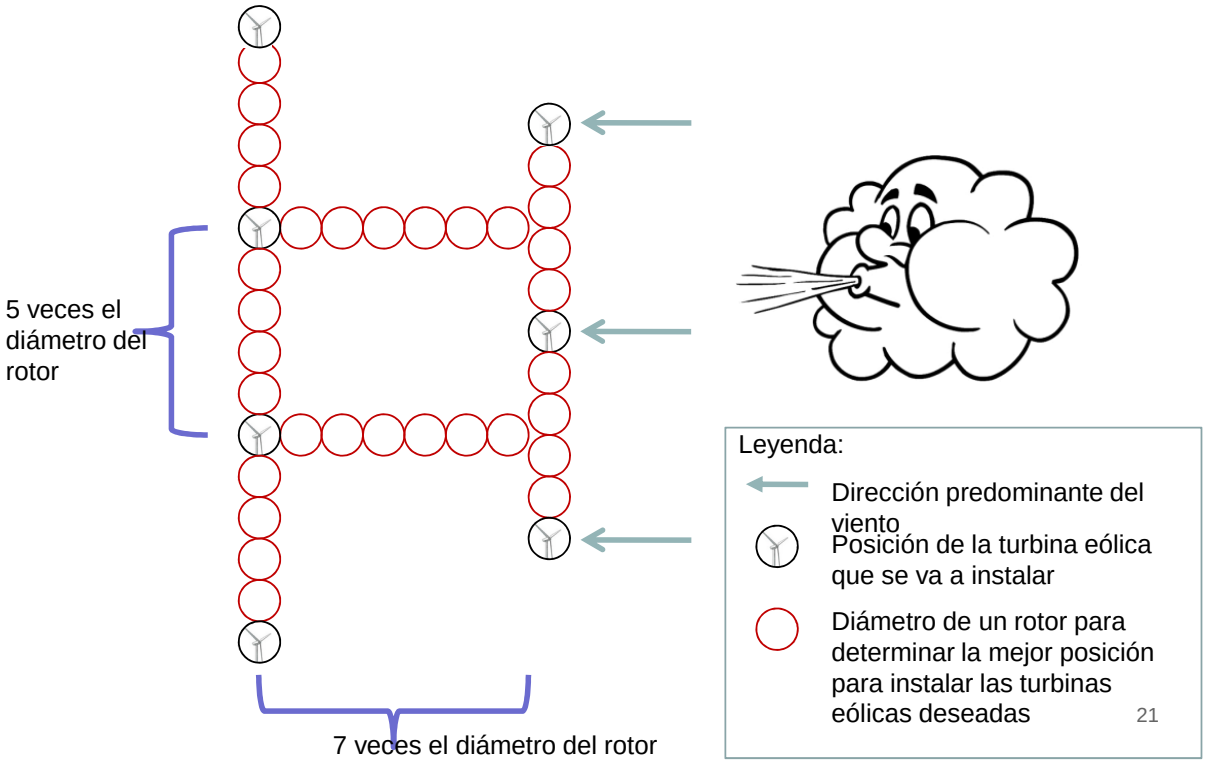
3. ORGANIZACIÓN ESPACIAL DE LOS PARQUES EÓLICOS

Efecto estela

- Formación de nubes en la estela de la primera fila de turbinas en el parque eólico marino de Horns Rev en el mar del Norte
- La última fila de turbinas pierde potencia respecto a la primera fila

Fuente: www.popsci.com/technology/article/2010-01/wind-turbines-leave-clouds-and-energy-inefficiency-their-wake

Distancia entre turbinas para reducir el efecto estela

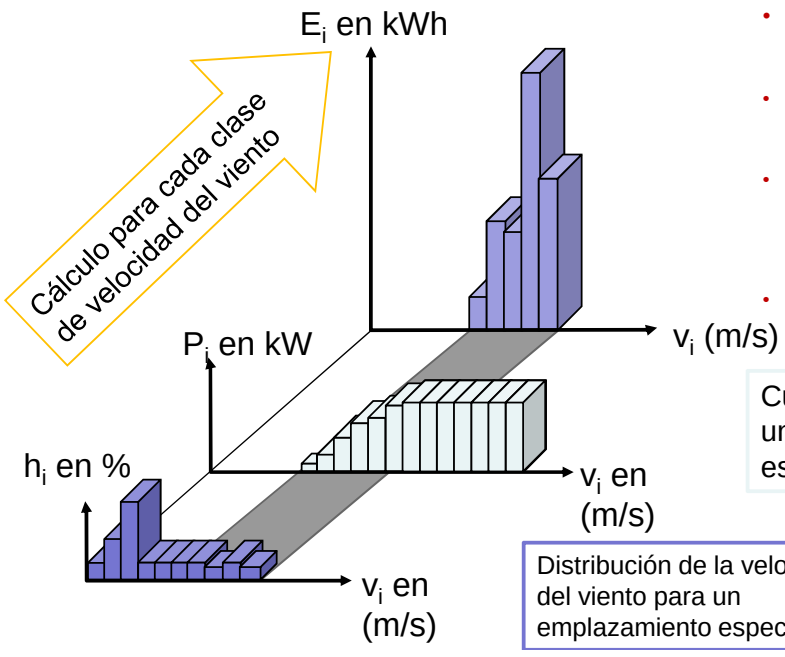


4. CÁLCULO DEL RENDIMIENTO ELÉCTRICO DE ORIGEN EÓLICO

Qué hay que hacer

1. Definir una combinación representativa de turbinas adecuadas (potencialmente específica para el emplazamiento).
2. Obtener información de la curva de potencia para todos los tipos de turbina.
3. Extrapolar las velocidades medias del viento a las correspondientes alturas del buje.
4. Elegir la curva de distribución de la velocidad del viento más probable en el emplazamiento o emplazamientos dados.
5. Calcular las distribuciones de la velocidad del viento para las alturas del buje dadas.
6. Usar distribuciones de la velocidad del viento y curvas de potencia para calcular la producción de energía eólica representativa.

Cálculo del rendimiento energético eólico



- v_i = velocidad del viento de clase i [m/s]
- h_i = frecuencia relativa de la clase de velocidad del viento en %
- P_i = potencia de salida de la turbina éolica para la velocidad del viento de clase v_i [kW]
- E_i= rendimiento energético de la velocidad del viento de clase i [kWh]

Curva de potencia de una turbina eólica específica

Distribución de la velocidad del viento para un emplazamiento específico

© RENAC 2014

Producción anual de energía de una turbina eólica

$$E_i = P_i \times t_i$$

E_i = rendimiento energético del viento de clase, i = 1, 2, 3 …n [Wh, vatios-hora]

t_i = duración de las velocidades del viento para la clase de viento [h/a, horas/año]

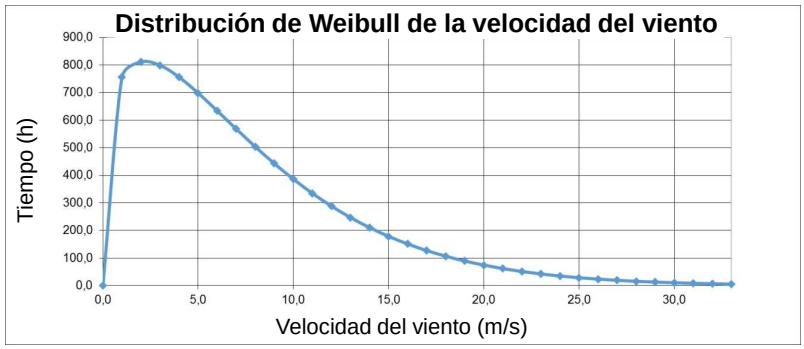
P_i = potencia del viento de clase vi de la curva de potencia de la turbina eólica [vatios, joules por segundo]

$$E_\Sigma = E_1 + E_2 + \ldots + E_n$$

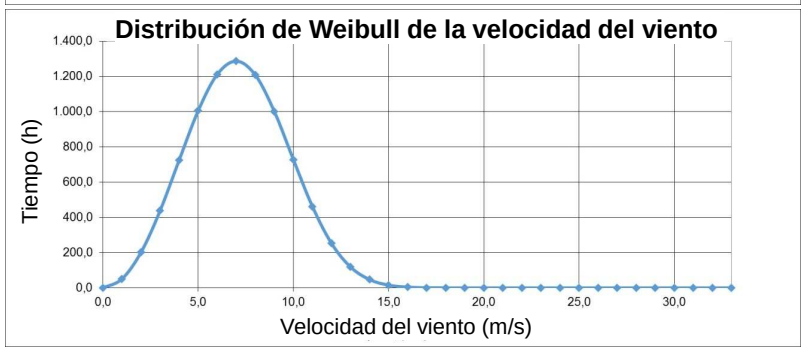
E_Σ = rendimiento energético durante un año [Wh/a, vatios-hora/año]

Forma de las distintas distribuciones de la velocidad del viento

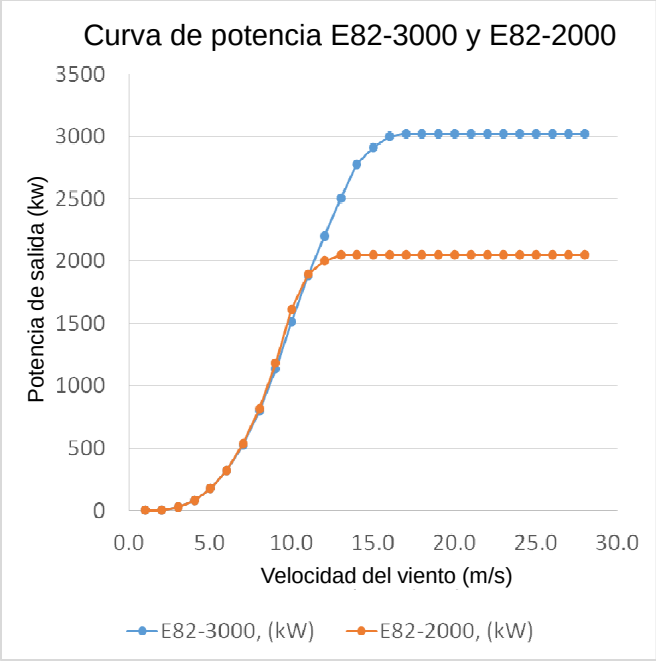
- Distribución de Weibull: factor de forma k=1,25 y A= 8 m/s



- Distribución de Weibull: factor de forma k=3 y A= 8 m/s



Muestras de curvas de potencia de turbinas eólicas (rotor de 82 m de diámetro, 2 y 3 MW)



Fuente: Información de productos Enercon 2014

Ejemplo práctico:

5. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD Y RENDIMIENTO EÓLICOS DE UN EMPLAZAMIENTO DETERMINADO

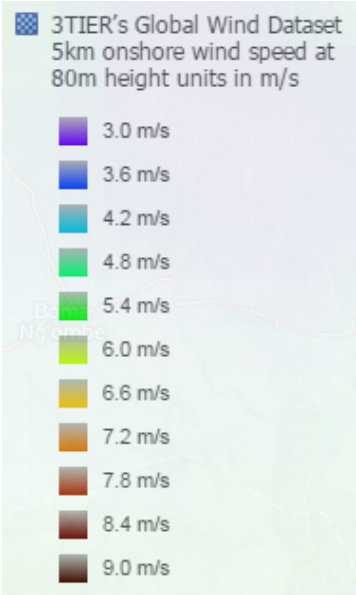
Cálculo del rendimiento energético eólico al suroeste de El Cairo

- Pasos seguidos:
  1) Obtener los datos de velocidad media del viento en el Atlas Global
  2) Calcular el rendimiento eléctrico de una turbina eólica
  3) Calcular la capacidad de potencia eólica y el potencial de energía eólica por km² en la ubicación dada

Ejercicio con papel y lápiz (empezar)

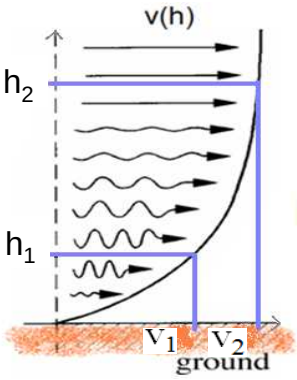
Obtención de la velocidad media del viento

- Velocidad media del viento = **??? a 80 m de altura**



Extrapolación a la altura del buje

- Datos del viento proporcionados para la altura: h_1 = 80 m
- Elijamos la altura del buje: h_2 = 90 m
- Longitud de rugosidad: z_0 = 0.1m



$$v_2 = v_1 * \frac{\ln(\frac{h_2}{z_0})}{\ln(\frac{h_1}{z_0})}$$

Siendo:

h_1: altura [m]

h_2: altura [m]

v_1 : velocidad del viento a h_1 [m/s]

v_2 : velocidad del viento a h_2 [m/s]

z_0 : longitud de rugosidad [m]

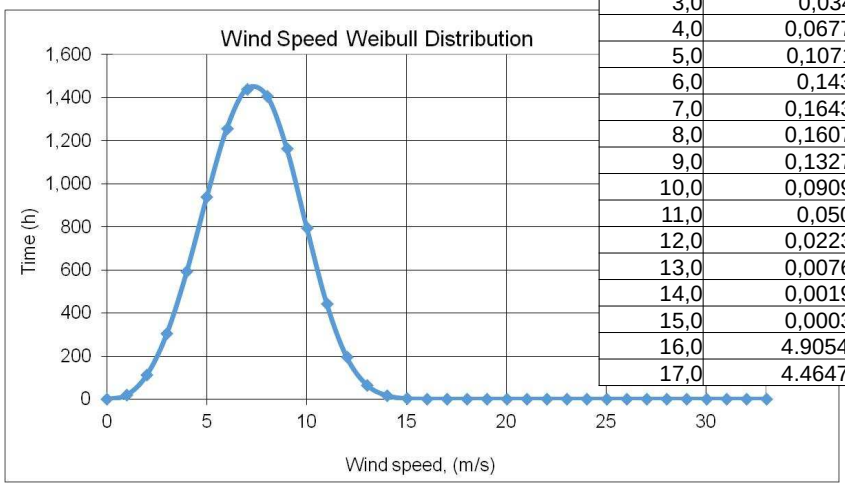
Cálculo de la distribución de la velocidad del viento

- Derivación de la distribución de Weibull
  - Velocidad media del viento: v_2 = 7.3 m/s
  - Supuesto (basado en los datos a los que se tiene acceso) → k = 3,5
  - Factor de escala: v_{med} = 0,9 * A → A = v_{med} / 0,9

    A = (v_{med} / 0,9) = (7,3 m/s) / 0,9 = 8,11 m/s

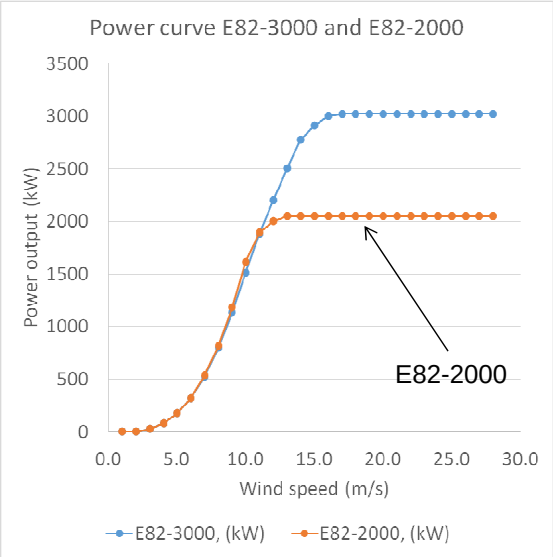
Distribución del viento resultante

v_i (m/s)	Probabilidad de Weibull (%)	número de horas a v_i m/s al año
0,0	0	0,0
1,0	0,002301447	20,2
2,0	0,012930901	113,3
3,0	0,03481178	305,0
4,0	0,067742212	593,4
5,0	0,107112259	938,3
6,0	0,14337442	1.256,0
7,0	0,164325824	1.439,5
8,0	0,160762789	1.408,3
9,0	0,132719153	1.162,6
10,0	0,090914034	796,4
11,0	0,05061706	443,4
12,0	0,022370894	196,0
13,0	0,007647482	67,0
14,0	0,001966378	17,2
15,0	0,000369182	3,2
16,0	4.90543E -05	0,4
17,0	4.46477E -06	0,0



Elección de la turbina eólica

- Elegimos Enercon E82-2000



v_i (m/s)	Potencia de salida de E82-2000, (kW)
0,0	
1,0	0
2,0	3
3,0	25
4,0	82
5,0	174
6,0	321
7,0	532
8,0	815
9,0	1.180
10,0	1.612
11,0	1.890
12,0	2.000
13,0	2.050
14,0	2.050
15,0	2.050
16,0	2.050
17,0	2.050

→ Ejercicio con papel y lápiz

- Producción anual de energía de la turbina eólica para v_i = 6 m/s = **???**
- Producción anual de energía de la turbina eólica para v_i = 7 m/s = **???**

v_i (m/s)	Probabilidad de Weibull (%)	número de horas a v_i m/s al año
0,0	0	0,0
1,0	0,002301447	20,2
2,0	0,012930901	113,3
3,0	0,03481178	305,0
4,0	0,067742212	593,4
5,0	0,107112259	938,3
6,0	0,14337442	1.256,0
7,0	0,164325824	1.439,5
8,0	0,160762789	1.408,3
9,0	0,132719153	1.162,6
10,0	0,090914034	796,4
11,0	0,05061706	443,4
12,0	0,022370894	196,0
13,0	0,007647482	67,0
14,0	0,001966378	17,2
15,0	0,000369182	3,2
16,0	4.90543E -05	0,4
17,0	4.46477E -06	0,0

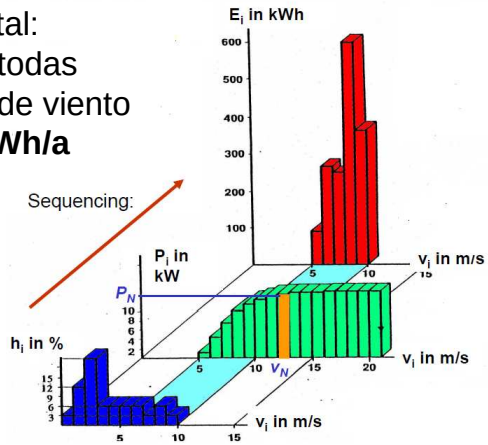
v_i (m/s)	Potencia de salida de E82-2000, (kW)
0,0	
1,0	0
2,0	3
3,0	25
4,0	82
5,0	174
6,0	321
7,0	532
8,0	815
9,0	1.180
10,0	1.612
11,0	1.890
12,0	2.000
13,0	2.050
14,0	2.050
15,0	2.050
16,0	2.050
17,0	2.050

Calcular la potencia de salida para cada clase de velocidad del viento

v_i (m/s)	número de horas a v_i m/s al año	Potencia de salida de E82-2000, (kW)	E82-2000, rendimiento energético anual, (kWh/a)
0,0	0,0		
1,0	20,2	0	0
2,0	113,3	3	340
3,0	305,0	25	7.624
4,0	593,4	82	48.661
5,0	938,3	174	163.265
6,0	1.256,0	321	403.163
7,0	1.439,5	532	765.811
8,0	1.408,3	815	1.147.750
9,0	1.162,6	1.180	1.371.891
10,0	796,4	1.612	1.283.808
11,0	443,4	1.890	838.036
12,0	196,0	2.000	391.938
13,0	67,0	2.050	137.333
14,0	17,2	2.050	35.312
15,0	3,2	2.050	6.630
16,0	0,4	2.050	881
17,0	0,0	2.050	80

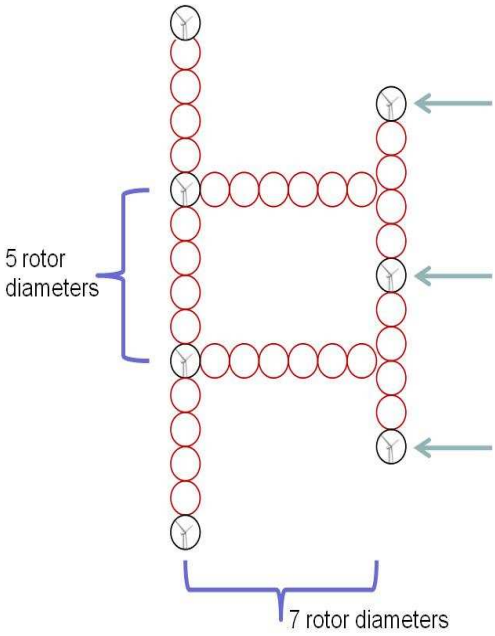
Ejemplo:
@ v=7.0 m/s:
1.439,5 h/a * 532 kW = 765.811 kWh/a

Energía total:
Total para todas las clases de viento = **6,603 MWh/a**



Cálculo de la capacidad por km²

- Diámetro del rotor d=82 m
- Distancia d_1 en la dirección primaria del viento:
  7 veces el diámetro del rotor = 7 * 82 m = 574 m
- Distancia d_2 en la dirección secundaria del viento:
  5 veces el diámetro del rotor = 5 * 82 m = 410 m
- Superficie necesaria para una turbina:
  574 m * 410 m = 235.340 m² = 0,24 km²
- Capacidad por km²:
  2 MW/0,24 km² = **8,3 MW/km²**



Cálculo de la energía por km² y factor de capacidad

- Capacidad por km²:
  2 MW/0,24 km² = 8,3 MW/km²
- Energía generada por cada turbina eólica:
  6.603 MWh por turbina (E82-2000) con 2 MW de capacidad nominal,
  O: 6.603 MWh / 2 MW → 3.302 MWh / 1 MW
- Energía generada por km²:
  3.302 MWh/MW * 8,3 MW/km² = **27,4 GWh/km²/a**

- Factor de capacidad: 3.302 MWh / 1 MW = 3.302 h
  3.302 h / 8.760 h = **37,7%**

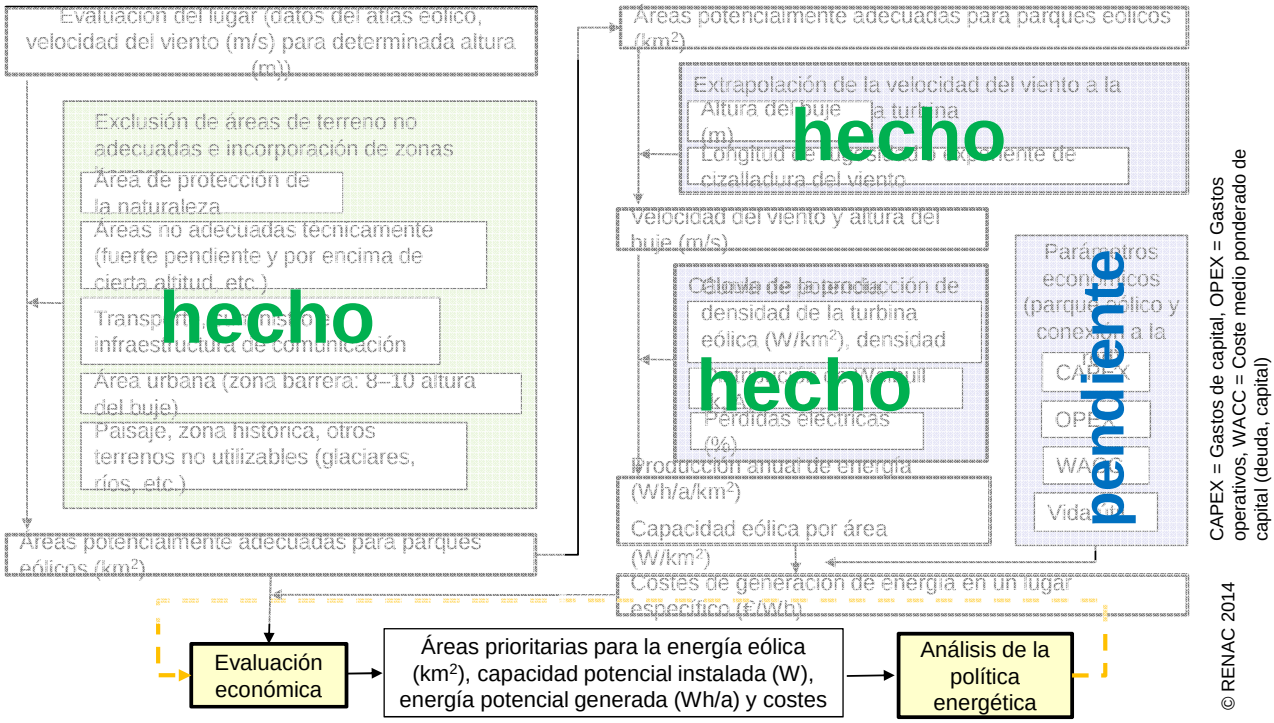
Recuerden

- El ejemplo práctico anterior es sólo un cálculo aproximado, y los resultados sólo son válidos para los supuestos dados (emplazamiento específico, un tipo de turbina, supuestos sobre la velocidad del viento, etc.).
- El rendimiento energético calculado debería considerarse como un resultado ideal. En la vida real, es probable que la potencia de salida esté ligeramente por debajo de estos valores debido a los tiempos de inactividad (mantenimiento, fallos de la red), las pérdidas por el cableado y durante la transformación, la desviación respecto a la distribución ideal de las turbinas en el emplazamiento dado, etc.

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency



CAPEX = Gastos de capital, OPEX = Gastos operativos, WACC = Coste medio ponderado de capital (deuda, capital)

© RENAC 2014

renac renewables academy

IET International Energy Transition

IRENA International Renewable Energy Agency

¡Muchas gracias por su atención!

Lars Koerner
Renewables Academy (RENAC)
Teléfono +49 30 52 689 58-81
koerner@renac.de
www.renac.de

Soluciones

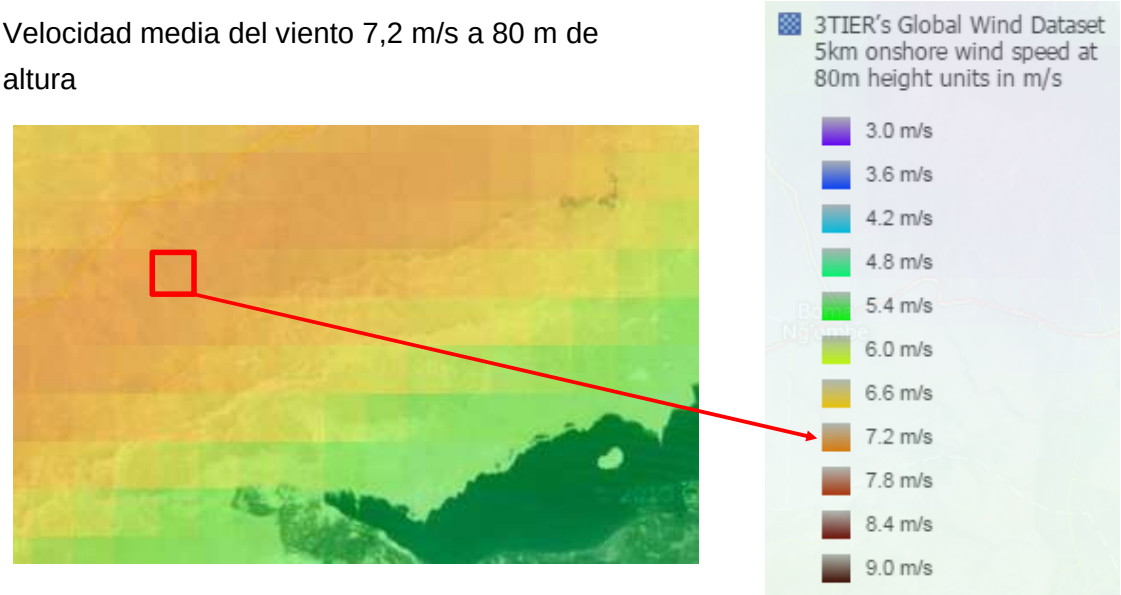
Solución: duplicar la velocidad del viento

- Potencia del área de barrido del rotor calculada con el radio de un rotor de 25 m y una densidad del aire de 1.225 kg/m^3
- velocidad del viento = 5 m/s velocidad del viento = 10 m/s
  potencia = 150 kW potencia = 1.200 kW
- **Al duplicar la velocidad del viento, la potencia se multiplica por 8.**

- Cálculo:
  Potencia =0,5 * densidad del aire * (velocidad del viento)^3 * longitud de las aspas^2 * 3,1415
  Potencia = 0,5 * 1.225 kg/m^3 * **5**^3 m^3/s^3 * 25^2 m^2 * 3,1415 = 150 kW
  Potencia = 0,5 * 1.225 kg/m^3 * **10**^3 m^3/s^3 * 25^2 m^2 * 3,1415 = 1202,6 kW
  Unidades: [kg/m^3 * ^3 m^3/s^3 * m^2 = Joule/s = W]

Obtención de la velocidad media del viento

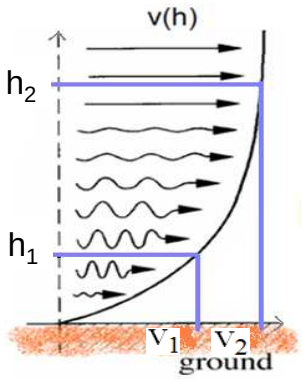
- Velocidad media del viento 7,2 m/s a 80 m de altura



Extrapolación a la altura del buje

- Datos del viento proporcionados para la altura: h_1 = 80 m
- Elijamos la altura del buje: h_2 = 90 m
- Longitud de rugosidad: z_0 = 0.1m

- **Resultado:** **v_2 = 7.3 m/s**



$$v_2 = v_1 * \frac{\ln(\frac{h_2}{z_0})}{\ln(\frac{h_1}{z_0})}$$

Siendo:

h_1: altura [m]

h_2: altura [m]

v_1 : velocidad del viento a h_1 [m/s]

v_2 : velocidad del viento a h_2 [m/s]

z_0 : longitud de rugosidad [m]