

Recomendaciones para instalaciones minieólicas

Ignacio Cruz

CIEMAT

**Seminario online sobre
El Desarrollo MINIEOLICO en la COMUNIDAD VALENCIANA
a través de los fondos NEXT GENERATION
Miércoles 6 de Octubre 2021**

Organizado por:



**GENERALITAT
VALENCIANA**

Conselleria de Agricultura,
Desarrollo Rural, Emergencia
Climática y Transición Ecológica

Índice

- Información sobre el **recurso eólico**.
- Recomendaciones sobre **instalación**.
- Recomendaciones sobre **aerogenerador**.
- Recomendaciones sobre **Operación y mantenimiento**.

Atlas y/o mapas eólicos disponibles en la web:

Mapa eólico de la península ibérica:

www.mapaeolicoiberico.com

Atlas Eólico Europeo:

<https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>

Global Wind Atlas:

<https://globalwindatlas.info/>

Mapa eólico Ibérico (Operado por CENER)

Página web: www.mapaeolicoiberico.com

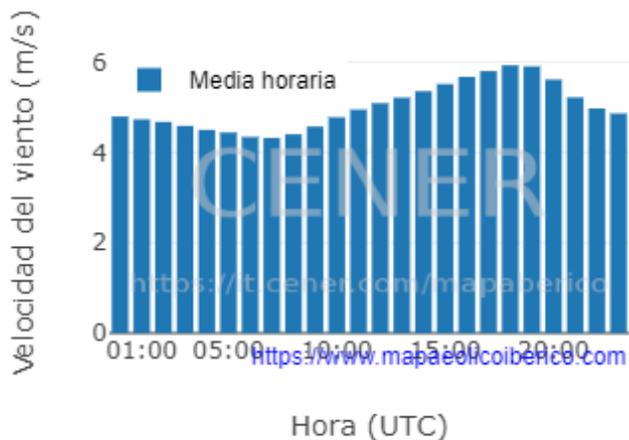
Información disponible:

- Se presentan de forma pública los resultados a **50 m, 100 m y 200m de altura** para la **Península y Baleares** con una **resolución de 50 m x 50 m (Microescala)**, y con una resolución de **3 km x 3 km (Macroescala)**
- Se introduce la latitud y longitud del emplazamiento, se selecciona la retícula (50m x 50 m, 3km x 3km), la variable a obtener y la altura (50 m, 100 m, 200 m).
- La variable puede ser:
 - Velocidad de viento media (m/s)
 - Densidad de potencia (W/m²)
 - Parámetro de escala A de Weibull
 - Parámetro de forma K de Weibull

Mapa eólico Ibérico (Operado por CENER)

Ofrece cuatro gráficos descargables:

Perfil medio diario de la velocidad del viento
lat: 42.7858 lon: -1.36801 altura: 50 m

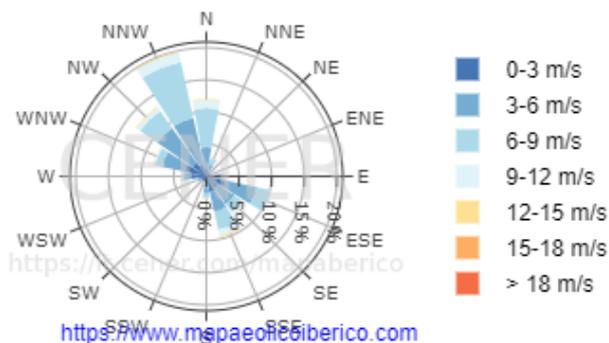


Perfil vertical medio de la velocidad del viento
lat: 42.7858 lon: -1.36801



Rosa de vientos

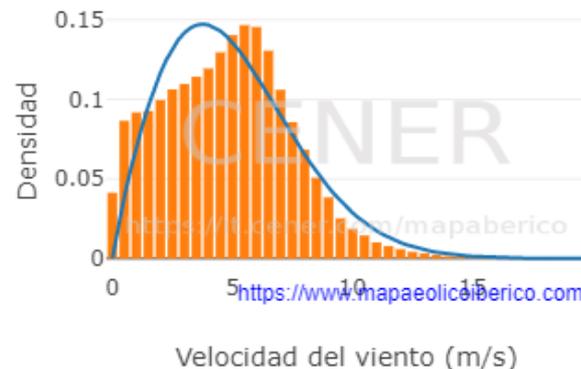
lat: 42.7858 lon: -1.36801 altura: 50 m



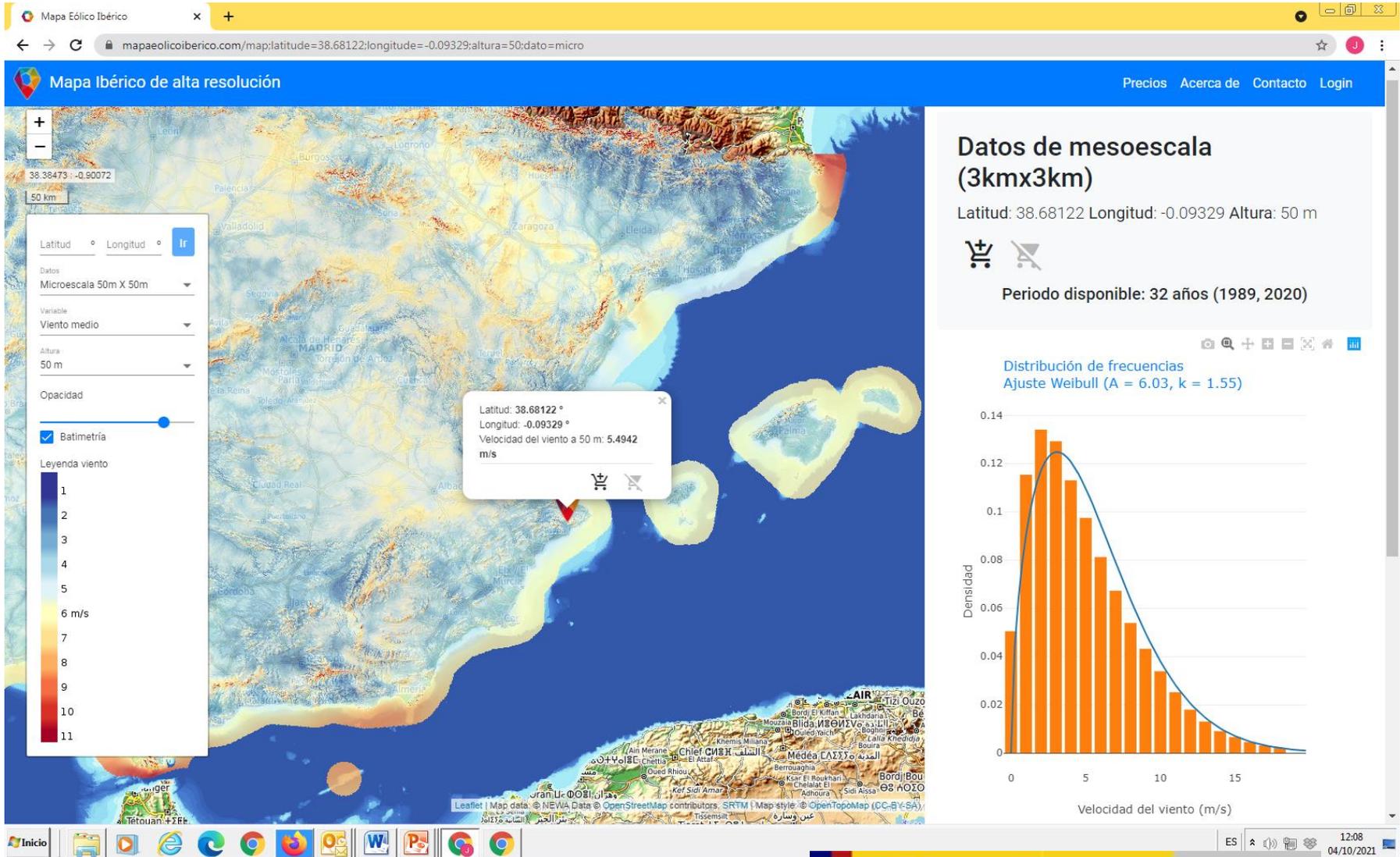
Distribución de frecuencias

Ajuste Weibull ($A = 5.62$, $k = 1.89$)

lat: 42.7858 lon: -1.36801 altura: 50 m



Ejemplo del Mapa eólico Ibérico



Ejemplo del Global Wind Atlas

The screenshot displays the Global Wind Atlas interface. The main map shows the Comunidad Valenciana region in Spain, with a color-coded wind energy potential overlay. A search bar at the top left contains "Spain" and "Comunidad Valenciana". The right sidebar provides detailed data for the selected region:

- Spain** (selected)
- Comunidad Valenciana** (selected)
- Data for 10% windiest areas:** 414 W/m² (Mean Power Density), 4.64 m/s (Mean Wind Speed)
- Height:** 10m
- Mean Power Density @Height 10m:** A line graph showing power density vs. % of windiest areas. The mean power density for the 10% windiest area is 414 W/m².
- Wind Frequency Rose:** A circular rose plot showing wind direction and frequency.
- Mean Wind Speed @Height 10m:** A line graph showing mean wind speed vs. % of windiest areas.

The bottom of the interface shows the DTU logo and logos for the World Bank Group, ESMAP, and VORTEX. The footer includes the text "© 2021 DTU | Powered by WAsP | Terms of use".

Recomendación para el recurso eólico

- La mejor opción es medir el recurso eólico en el emplazamiento al menos 6 meses.
- Es tan importante la velocidad de viento media (anual o mejor mensual), así como la dirección del viento (Rosa de viento).
- Revisar todos los obstáculos alrededor del potencial emplazamiento, especialmente aquellos situados en la dirección predominante del viento.
- Los parámetros mas importantes son la distancia y la altura del obstáculo
- Identificar el tipo y uso del terreno es tambien muy importante para estimar el perfil vertical del viento. (Cuanto ganamos en recurso eólico con la altura)
- Para hacer este estudio la herramienta Google Earth o similares es muy útil y nos va a ayudar a definir la rugosidad.

Influencia de la rugosidad del terreno.

Perfil vertical de la velocidad de viento

- La velocidad de viento se incrementa con la altura sobre el suelo.
- El perfil de viento en un terreno “sin fricción” se representa por vectores de un flujo de viento laminar
- Con el aumento de la rugosidad del terreno se agudiza el aumento el gradiente de la velocidad de viento (cortadura del viento) y crece el coeficiente de cortadura del viento .

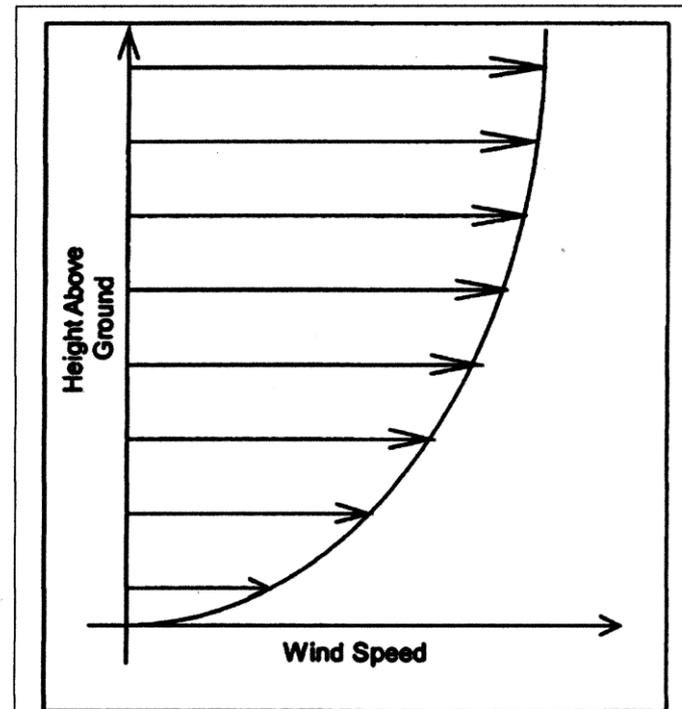
Vertical Wind Speed Gradient

>Wind speed increases with height

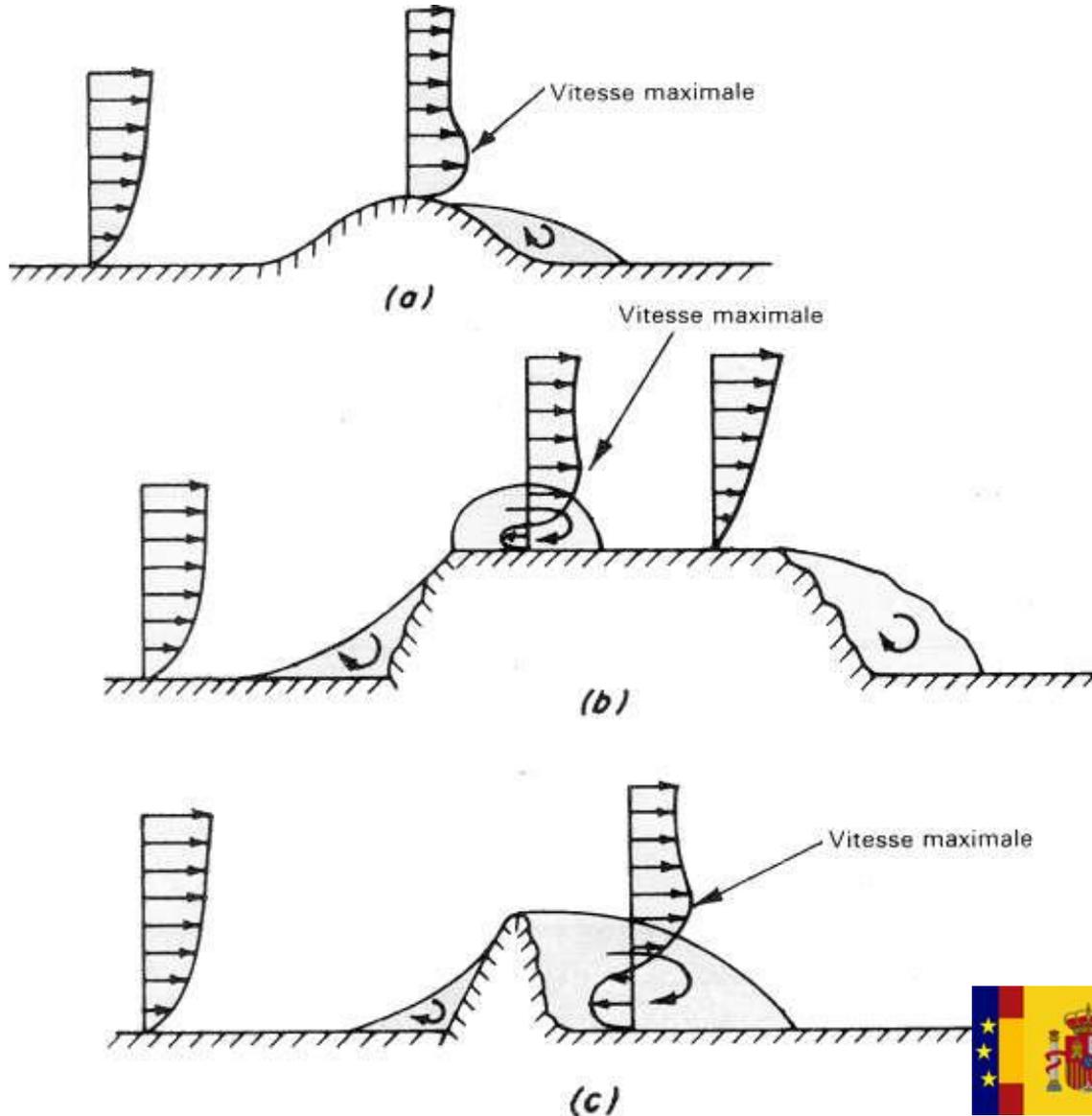
>roughness = sharper gradient

>”wind shear” or α

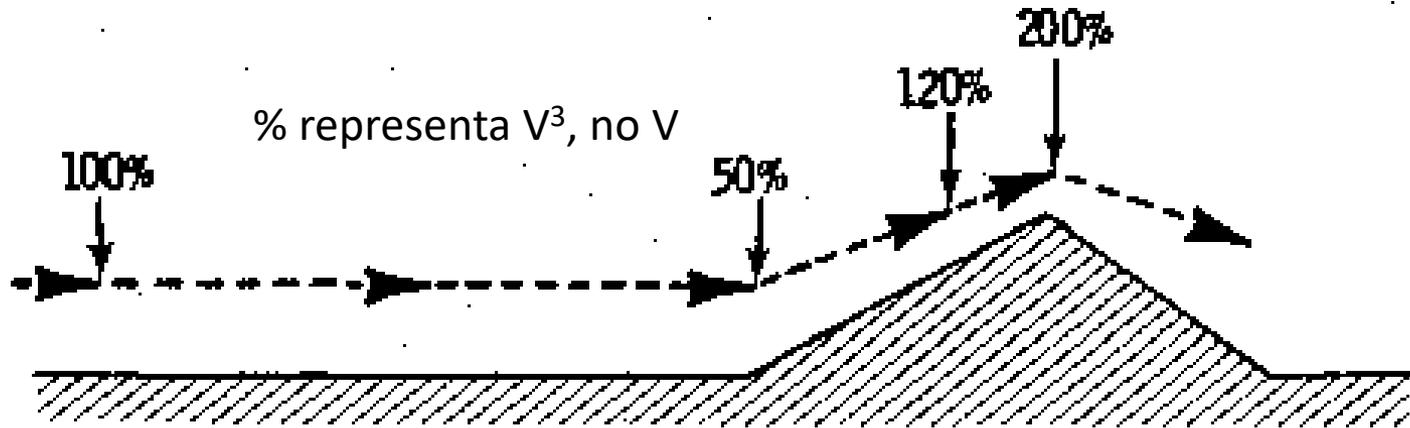
courtesy Wes Slaymaker



Efecto de una colina en el campo de viento (Perfil vertical)



Orografía (Colinas y valles)



- Pendiente de 16,7% = una subida de unos 30 cm para una distancia de 1,8 m
Aumento de velocidad de viento de hasta el 180%.
- Pendiente de 25% = una subida de unos 30 cm para una distancia de 1,2 m
Aumento de velocidad del viento hasta el 200%.
- Pendiente del 50% = una subida de unos 30 cm para una distancia de 60 cm
Aumento de la velocidad del viento hasta 125% y aumento de la turbulencia.

Según AWS Truewind

Por ejemplo en un espacio de 200 m x 200 m,

Cada 100 m de aumento de elevación = 0,5 m/s de aumento de velocidad de viento

Desplazamiento del perfil vertical

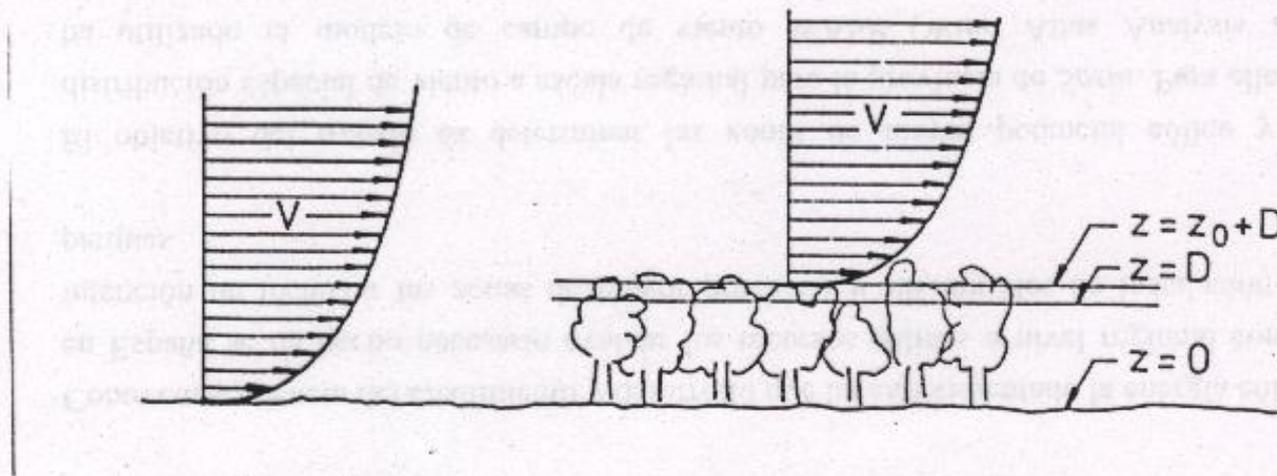


Figura 7. Perfil vertical del viento sobre un bosque.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

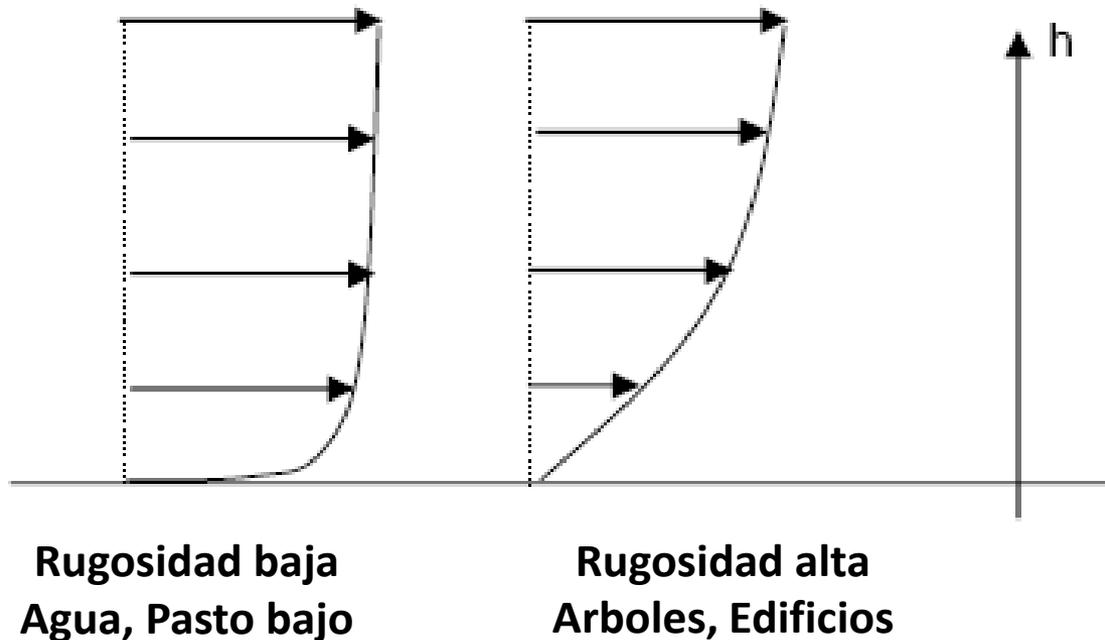
MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

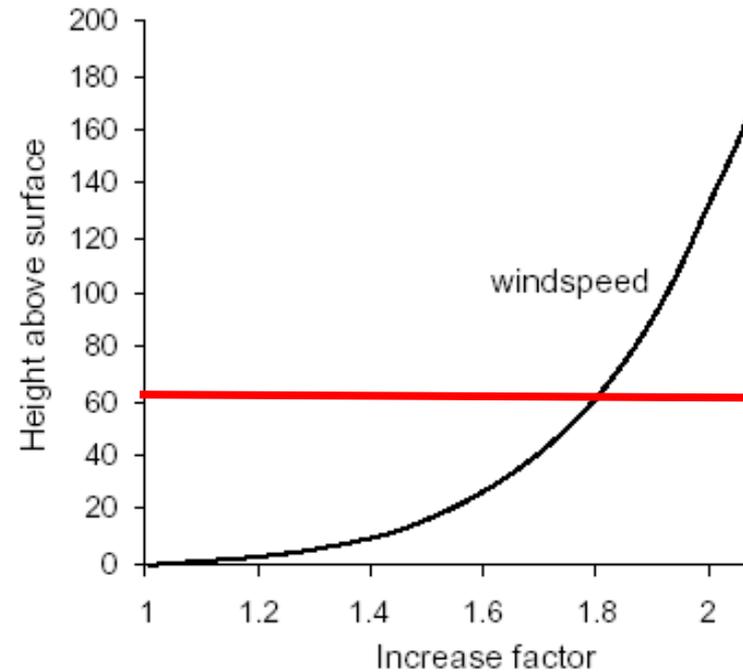
Influencia de la rugosidad del terreno. Perfil vertical de la velocidad de viento

- El rozamiento del suelo está influenciado por la textura o rugosidad de la superficie.



Influencia de la rugosidad del terreno.

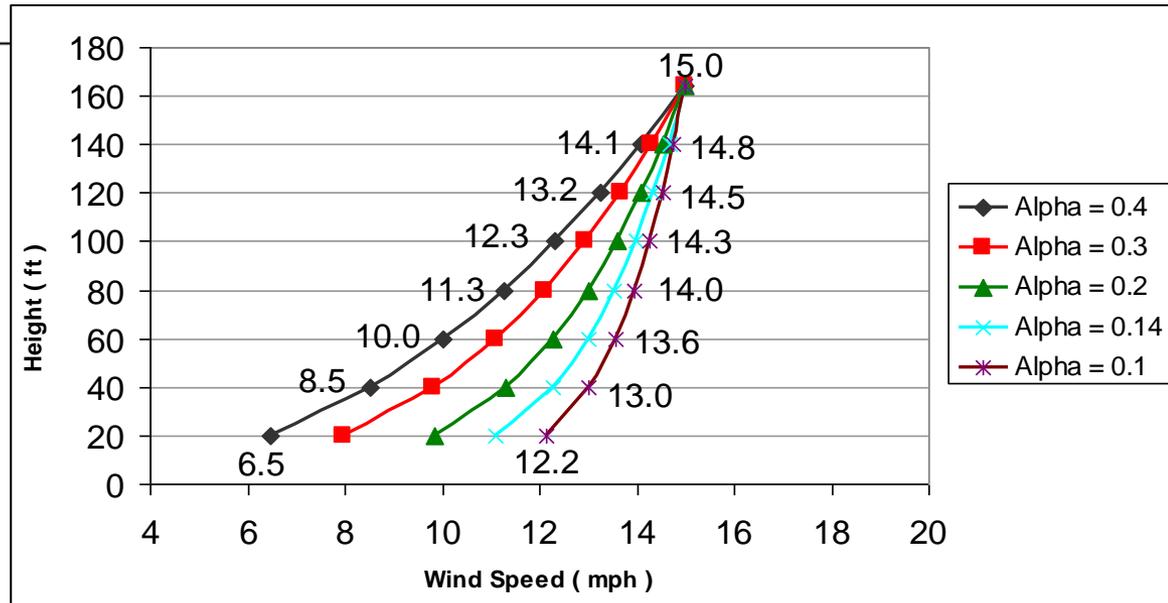
Perfil vertical de la velocidad de viento



Relación entre el perfil vertical del viento y la rugosidad del terreno

Teórico frente a real

Los efectos de la rugosidad del terreno pueden extenderse hasta 500 m de altura sobre el suelo, impactando fuertemente los primeros 20 m, lo que puede tener un impacto significativo en las turbinas eólicas a escala residencial.



Ajuste de la velocidad de viento con la altura $V(z)$

DOS METODOS:

Ley potencial

$$\frac{V_z}{V_{ref}} = \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^\alpha$$

$\alpha = 0.06 - 0.6$

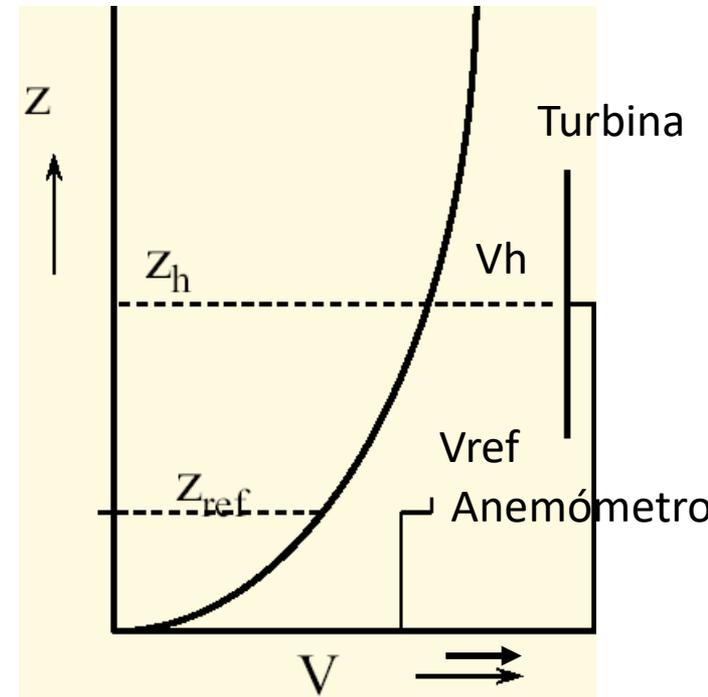
El exponente es
El Coeficiente
de cortadura
Valor
Estándar
 $\alpha = 0.16$

Ley logarítmica

$$\frac{V_z}{V_{ref}} = \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{ref}/z_0)}$$

$z_0 = 0.0002 \text{ m} - 1 \text{ m}$

Gradiente de velocidad Perfil Vertical o Cortadura

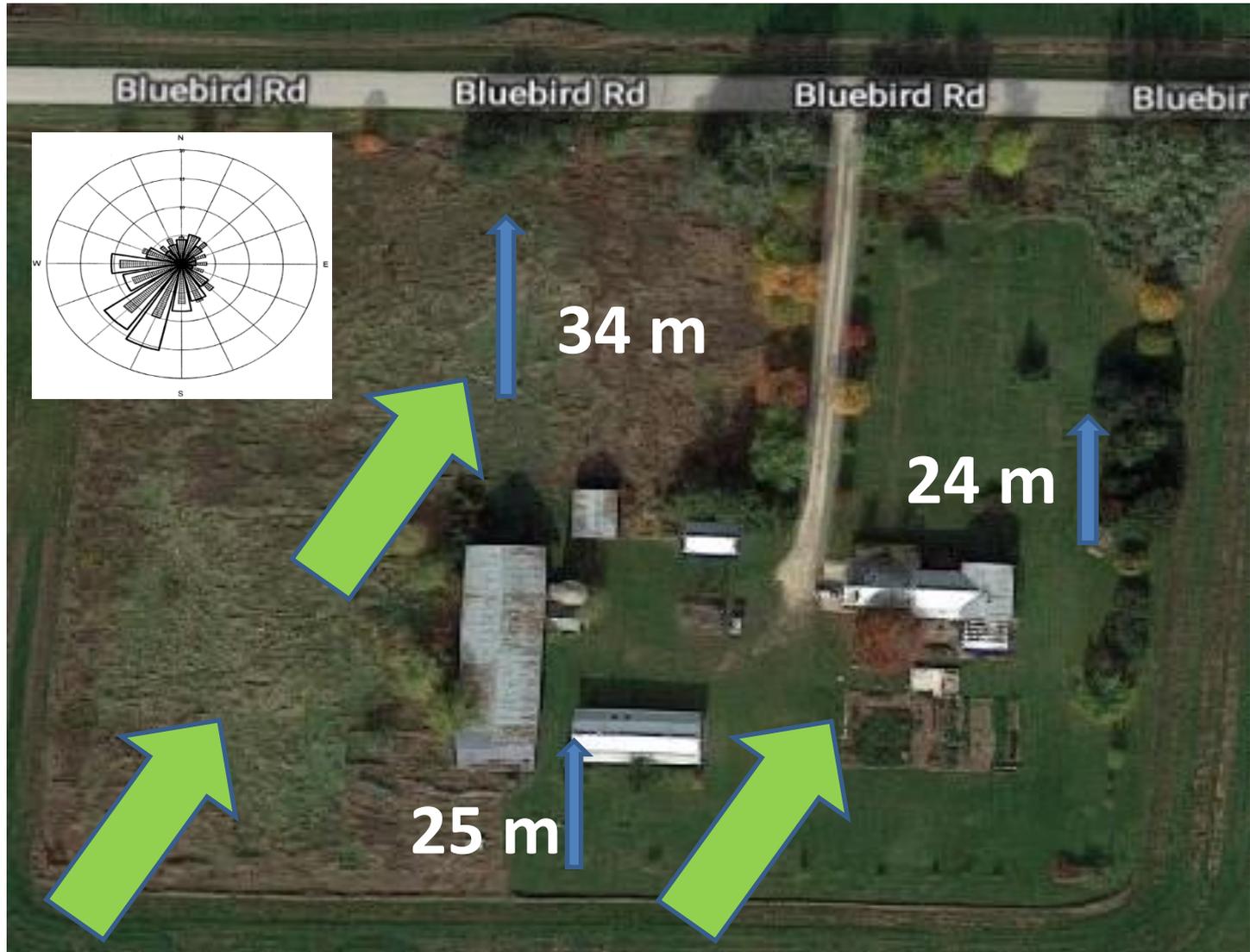


Valores empíricos del coeficiente de cortadura α

Representa la rugosidad del terreno en la formula potencial

Descripción del terreno	Valor α
Suelo liso y duro, superficies con agua	0,10
Hierba corta en suelo labrado	0,14
Terreno llano, 30 cm de hierba o arbustos. Algún árbol aislado	0,16
Campo cultivado en hileras altas, setos, pocos árboles	0,20
Muchos árboles y algún edificio aislado	0,22-0,24
Bosque, varias edificaciones, pequeños pueblos	0,28-0,30
Areas urbanas con edificios altos	0,40

Cual es el mejor lugar para instalar un miniaerogenerador?



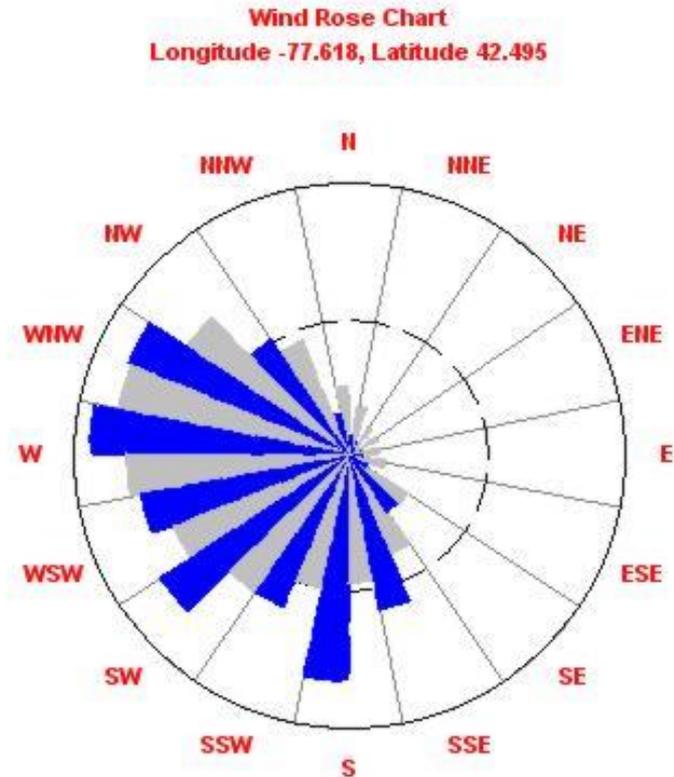
Dirección del viento. Rosa de vientos

Representa las direcciones por donde sopla el viento en 16 cuadrantes

El color gris representa el porcentaje de tiempo que sopla el viento en ese cuadrante, mientras que el **color azul** representa la energía total en ese cuadrante.

Para aerogeneradores conectados a la red mejor direcciones con mas energía.

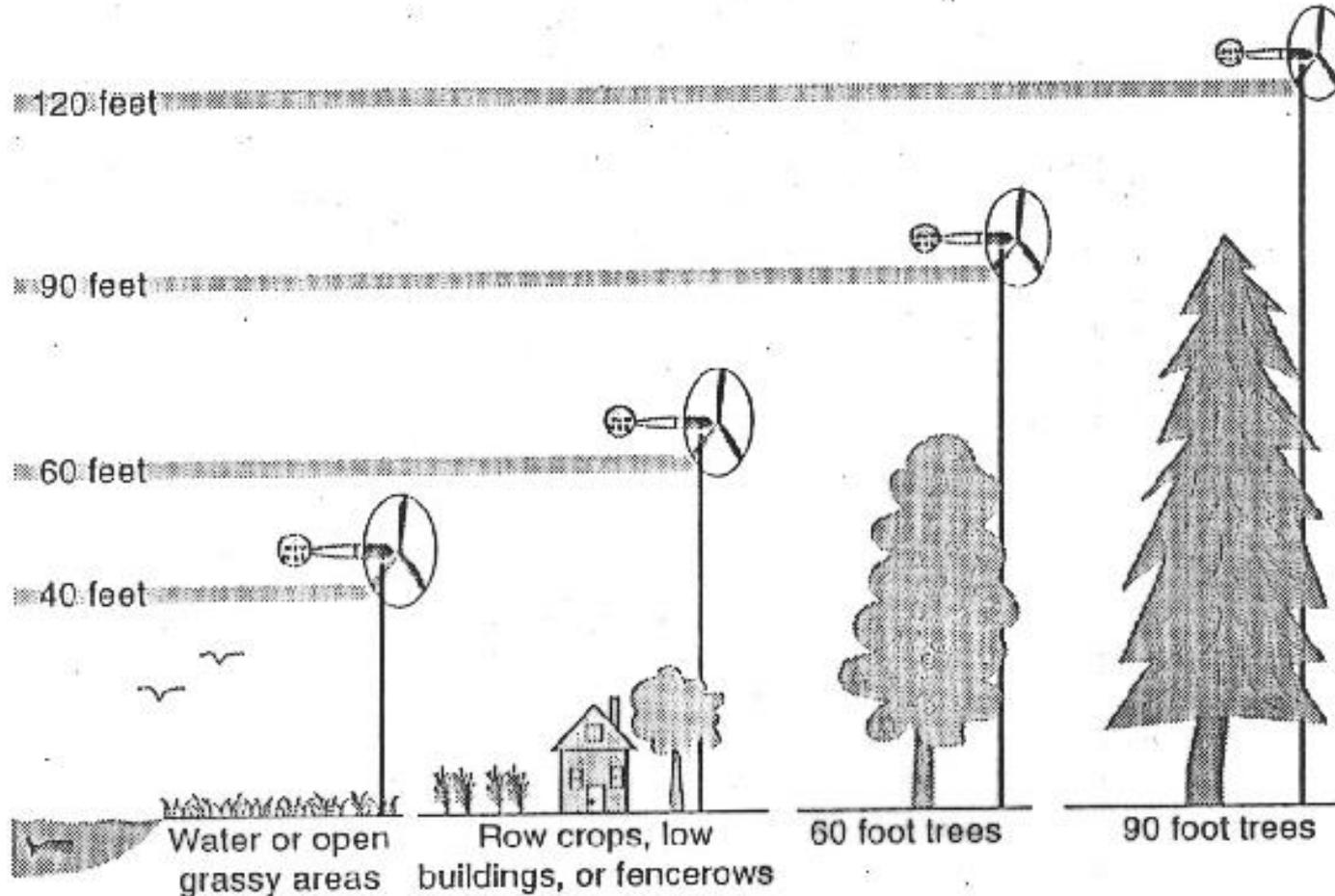
Para aerogeneradores aislados de la red conectados a baterías mejor direcciones con mas tiempo.



Percent of Total Wind Energy (Blue) and Time (Gray):
Circle Center = 0.0%
Inner Circle = 7.5%
Outer Circle = 15.0%

Efecto de los obstáculos

Altura de la torre



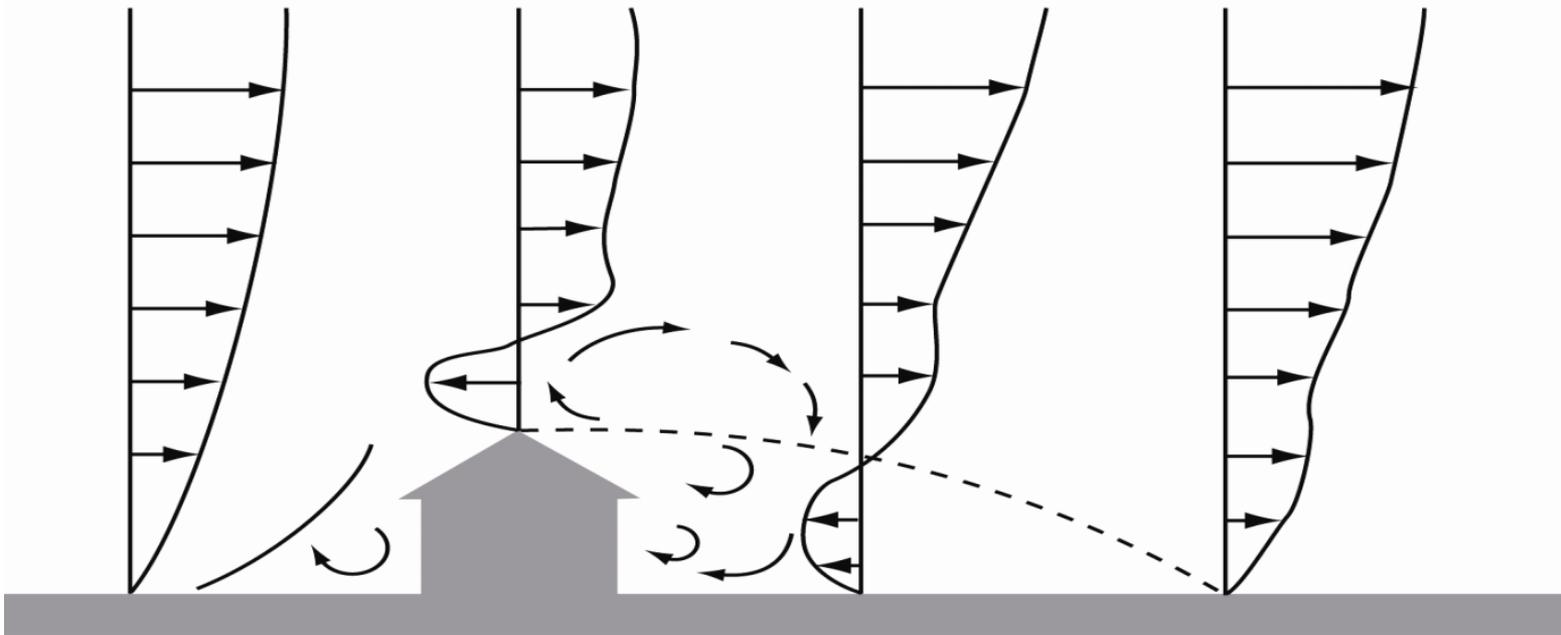
La torre se dimensionara para el emplazamiento específico
Se deberá tener en cuenta el crecimiento de los árboles

Efecto de los obstáculos

Turbulencia

Distancias

Altura de la torre

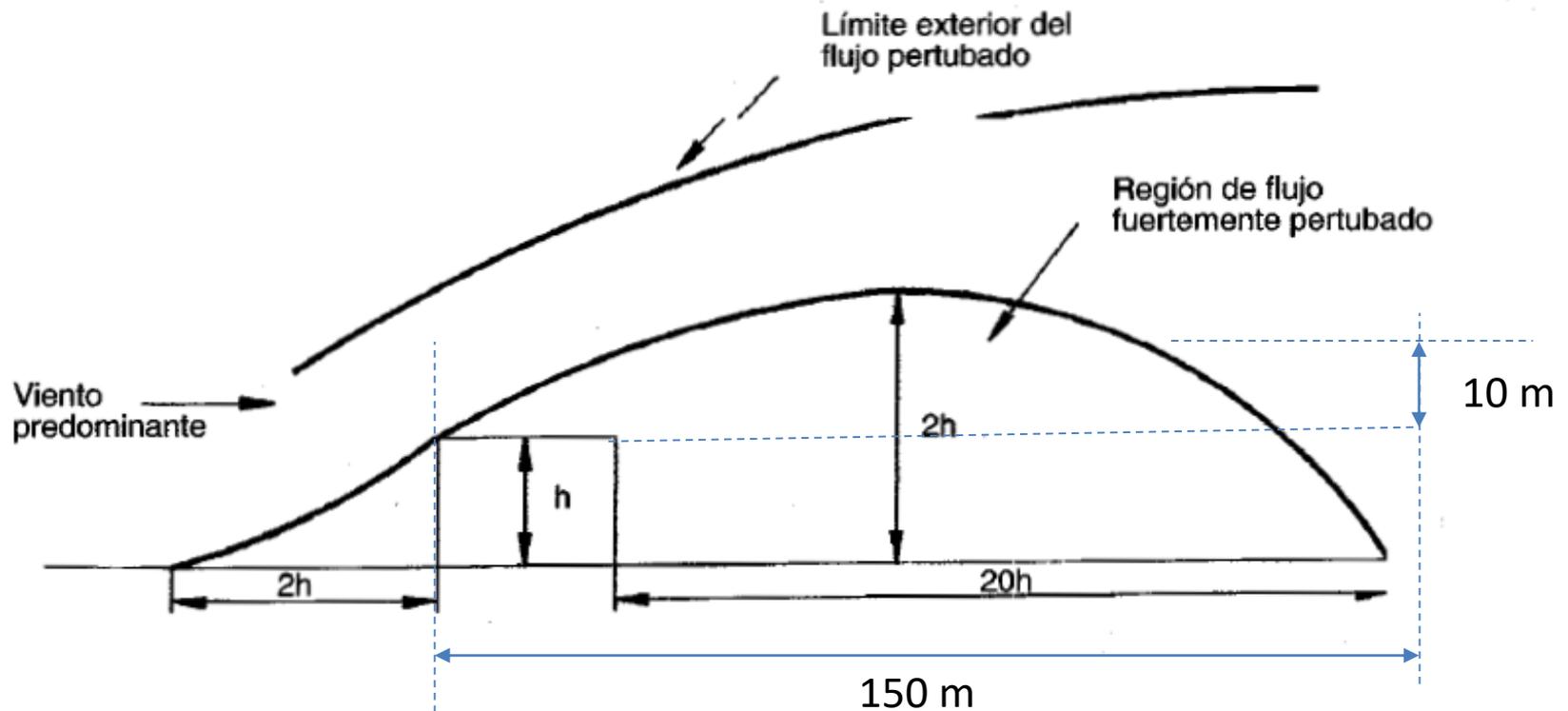


Efecto de los obstáculos



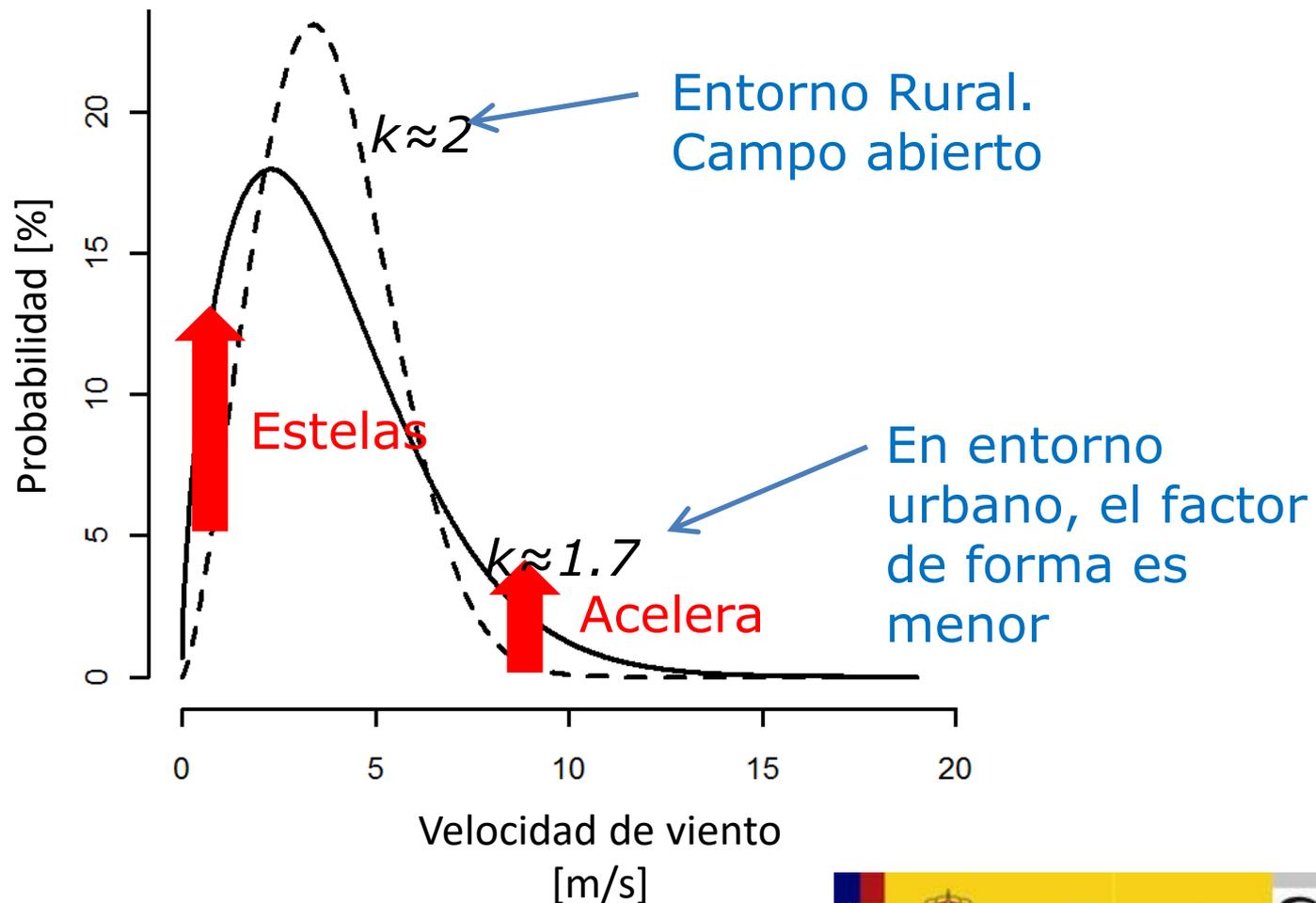
Efecto de los obstáculos

Distancias recomendadas



Efecto de los obstáculos en el recurso eólico

Función de distribución de probabilidades de velocidades de viento (Weibull)



El uso del terreno

Aerogenerador de 4 kW con torre de 21 metros



1983



2010

Instalación. Proceso a seguir

- Verificar el emplazamiento a distancia → para ver el tipo de vegetación + topografía + evaluación preliminar del **recurso eólico**.
- Establecer los objetivos energéticos
- Evaluación del **consumo** de energía en kWh.
- Analizar el **espacio disponible** por la propiedad
- **Zonificación**. Existencia de alguna regulación (Altura máxima, protección ambiental)
- Existencia de **vecinos**. Distancia.
- Finalmente, la **visita al sitio** → evaluación mas detallada. Fotos en todos los rumbos.

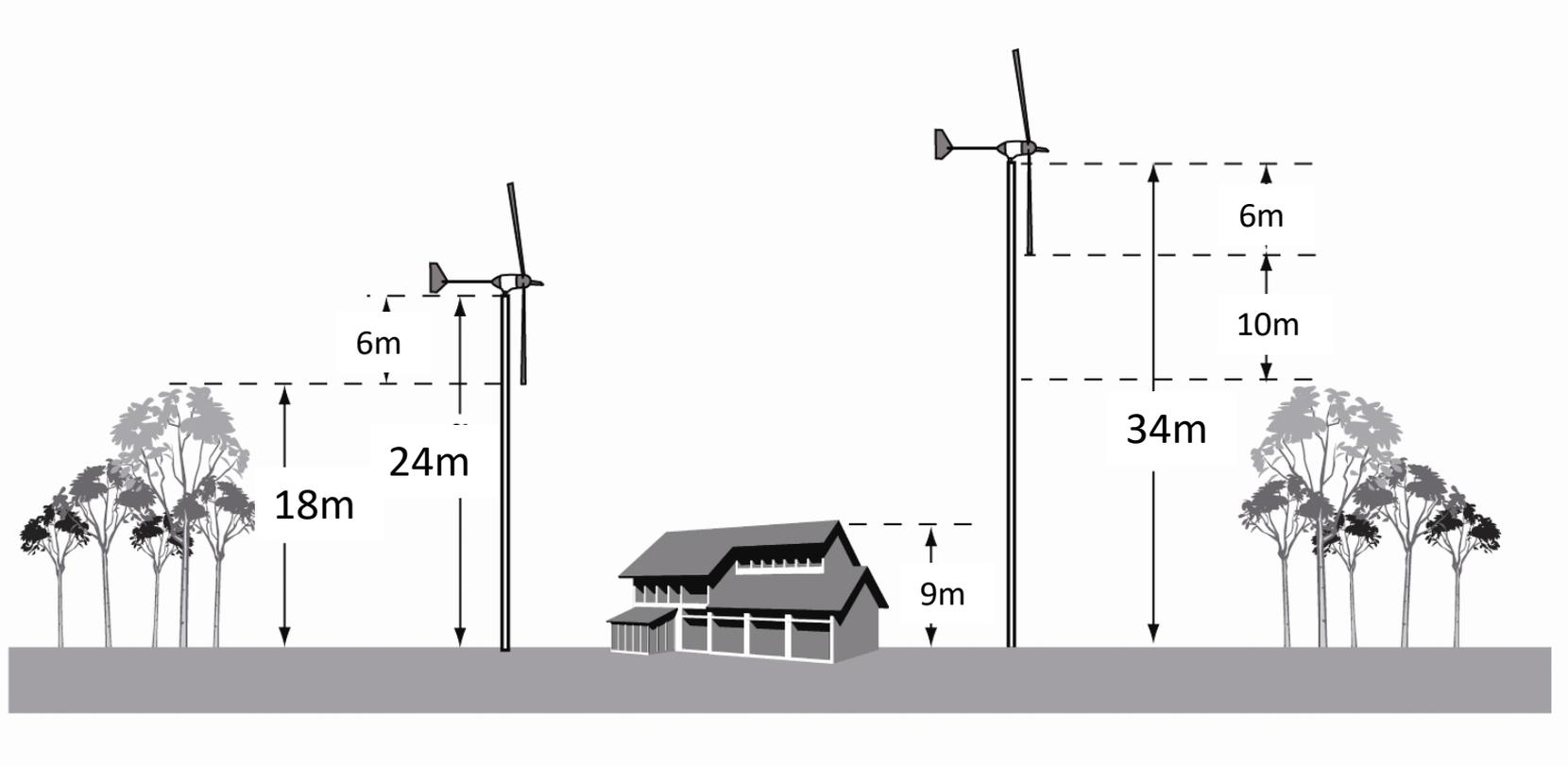
Regla para determinar la altura de la torre durante la vida útil del aerogenerador

Se debe utilizar “siempre” la torre mas alta disponible o permitida para cada instalación.

Altura mínima necesaria de la torre para un emplazamiento con árboles =

- Altura del árbol maduro para el área (altura del obstáculo) ó
- Altura del árbol en 20 a 30 años (la vida del sistema)+ Longitud de la pala + Regla de los 10 m.

Regla para determinar la altura de la torre durante la vida útil del aerogenerador



Cortesía de Dan Chiras

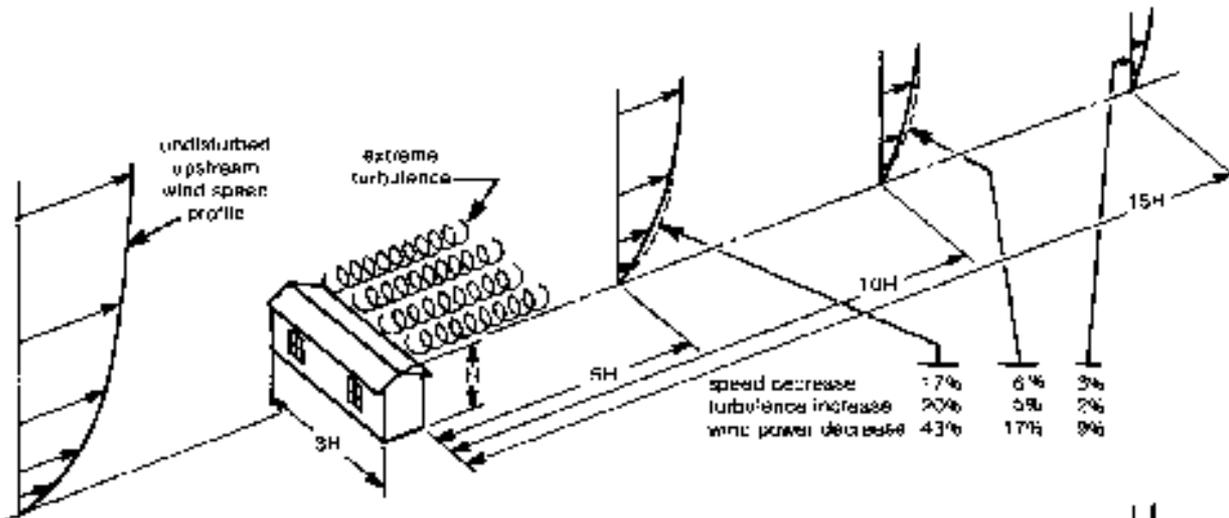
Intensidad de turbulencia (TI)

- Que es la intensidad de turbulencia?
- Matemáticamente es la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad promedio del viento en un periodo de diez minutos.

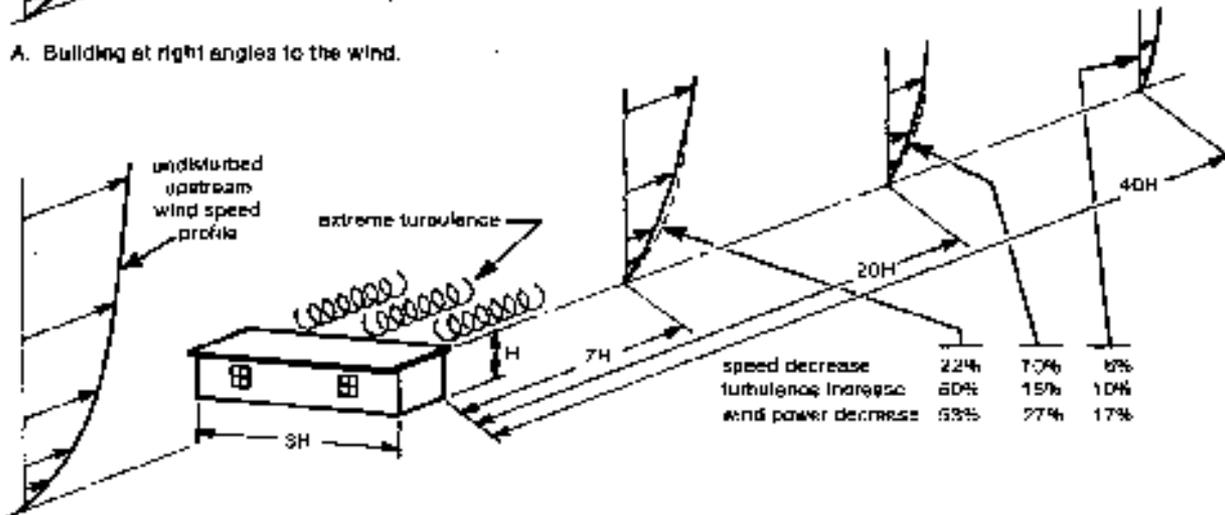
Intensidad de turbulencia = IT =
$$I = \frac{\sigma_v}{V_{10}} = \text{turbulence intensity}$$

- Si no disponemos de datos reales sobre la velocidad del viento, estimamos el TI en función de los alrededores

Turbulencia alrededor de edificios

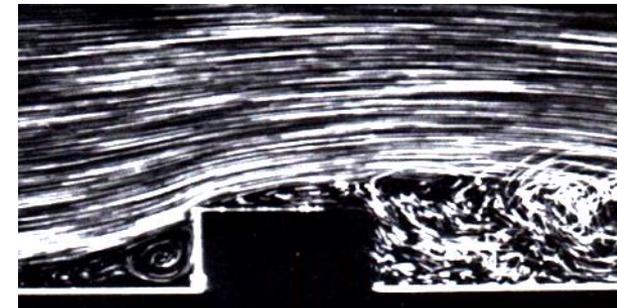


A. Building at right angles to the wind.

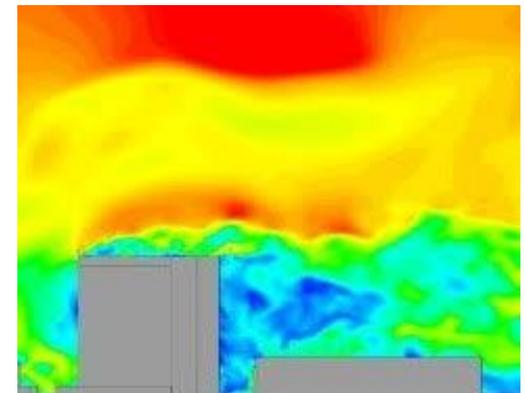


B. Flat-topped building at 45 degrees to the wind.

Modelo físico



Simulación CFD



Intensidad de turbulencia (TI)

Valores de la Intensidad de turbulencia TI estándar

- 15% = emplazamiento bien expuesto.
- 20% = suelo rugoso con obstáculos, árboles y edificios dispersos
- 25% = muchos árboles o edificios, menor elevación que los alrededores
- 30% = entorno suburbano

Consecuencias:

- Afecta a la energía obtenida por el aerogenerador reduciéndose con alta TI. **Reduce la eficiencia de los perfiles aerodinámicos.**
- Gran importancia en el diseño de aerogeneradores **(Cargas fluctuantes: fatiga)**

Consideraciones para evaluar el emplazamiento

Para evaluar el emplazamiento:

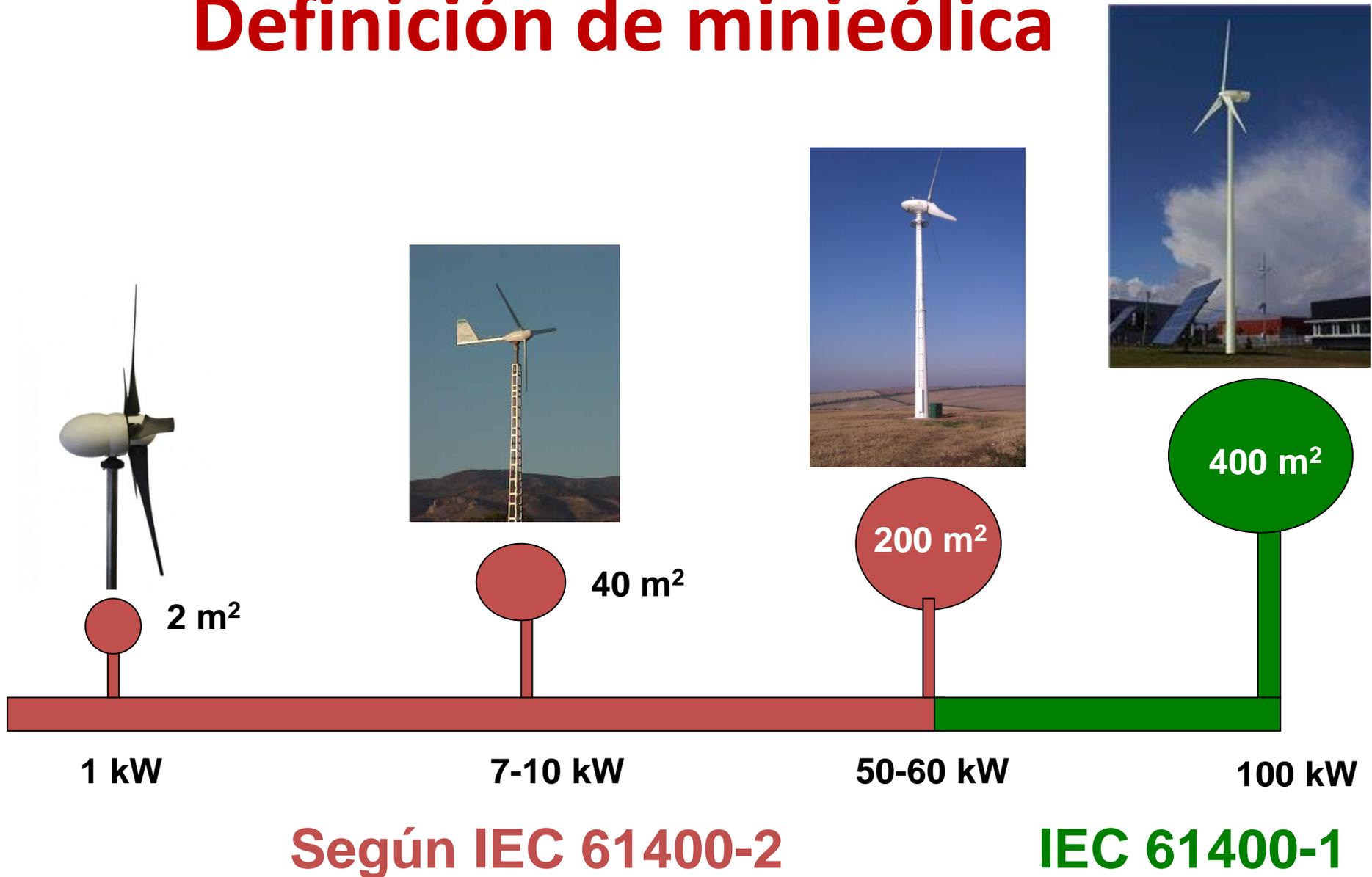
- Se recomienda establecer burbuja de turbulencia. Regla de 10 m  150 m 
- Analizar bien todos los obstáculos circundantes.
- Analizar altura de los árboles maduros en la zona.
- Establecer el diámetro del rotor de la turbina.
- Perfil vertical del viento: Establecer coeficiente de cortadura “ α ”
- Si hay bosque ..altura de desplazamiento del perfil vertical
- Dirección del viento predominante + alcance del viento (rosa de los vientos y rosa de la energía eólica)
- Mejoras, efectos o consideraciones orográficas
- Evaluar intensidad de turbulencia TI. Lo mejor es con datos medidos)

Instalación. Proceso a seguir

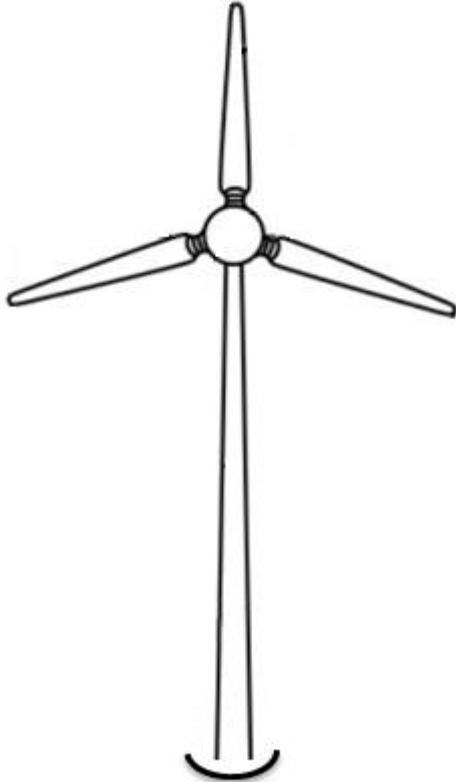
Para cuantificar el emplazamiento, considere:

- Tener en cuenta los **atlas eólicos** + Estimación de la influencia de los **obstáculos** circundantes en la velocidad del viento.
- Evaluar la energía con varias curvas de potencia de varias turbinas a poder ser **curvas certificadas**.
- Es recomendable tener en cuenta la densidad del aire temperatura, variabilidad interanual

Definición de minieólica

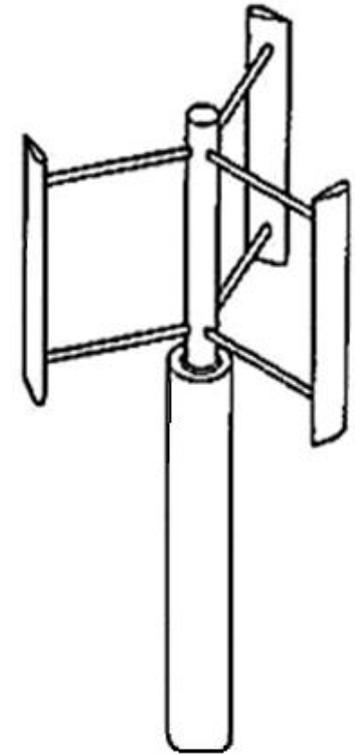


Tipos de tecnologías



EJE HORIZONTAL

<ul style="list-style-type: none">• Mas eficiente Cp hasta 0.5• Muchos modelos	<ul style="list-style-type: none">• Silenciosa• No necesita sistema de orientación• Opera mejor en alta turbulencia
<ul style="list-style-type: none">• Mas ruidosa• Necesita sistema de orientación• Dificultad para operar en alta turbulencia	<ul style="list-style-type: none">• Menor eficiencia Cp hasta 0.35• Pocos modelos



EJE VERTICAL

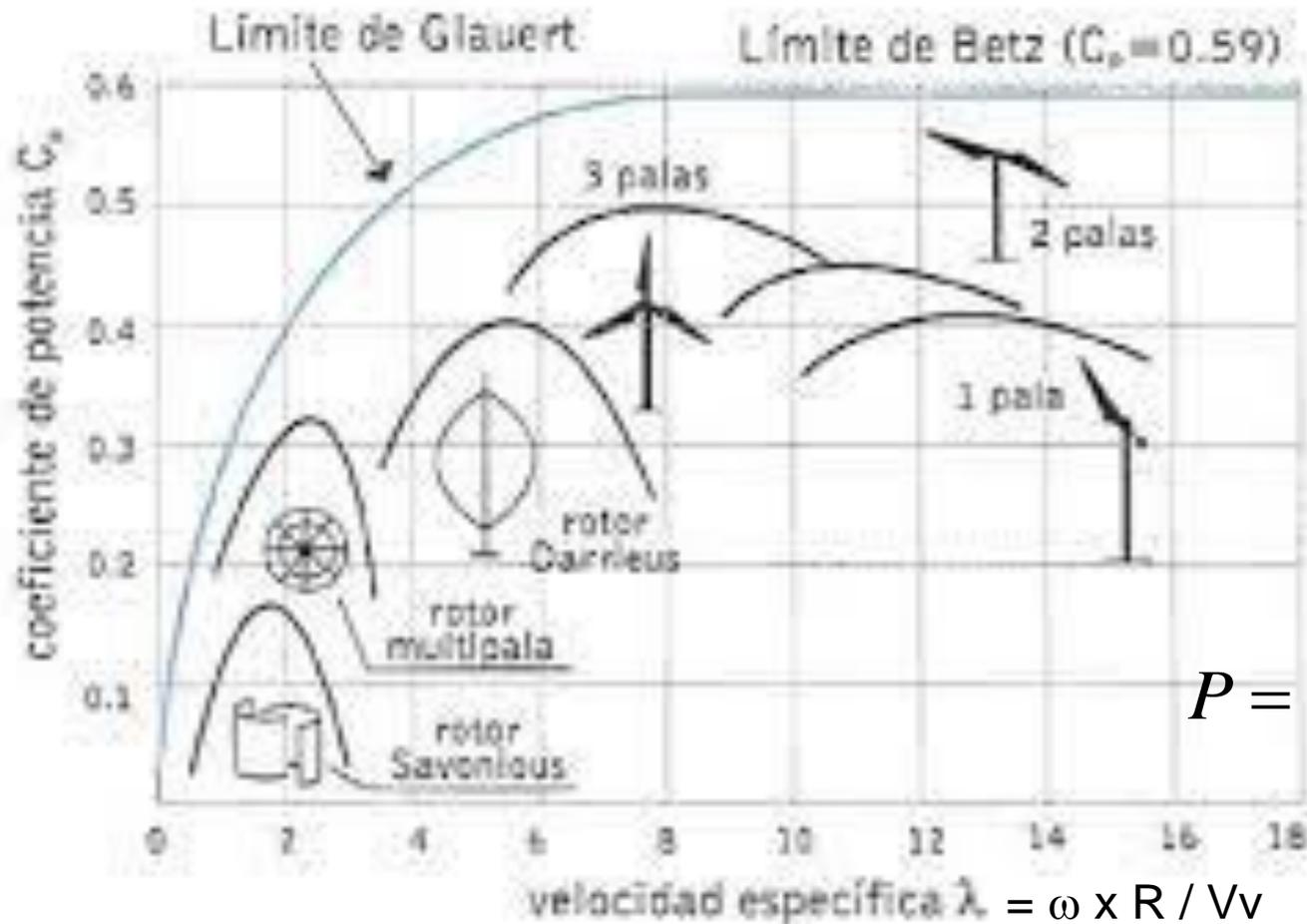


GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Rotor: Eficiencia

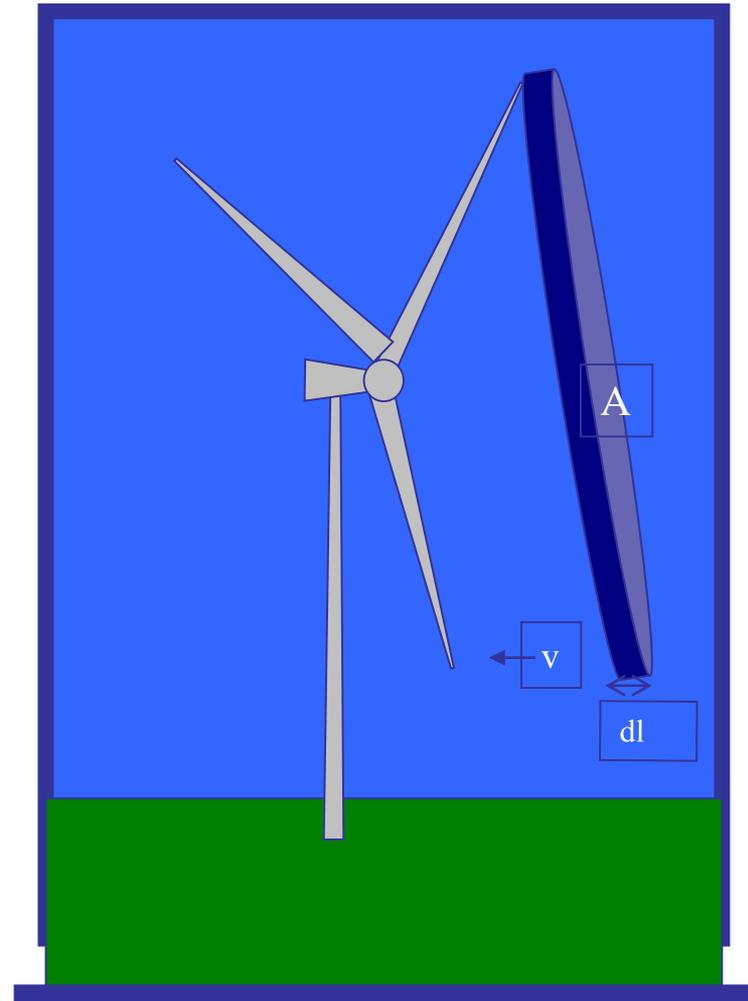


$$P = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 C_{P,Real}$$

Potencia obtenida por un aerogenerador

$$\bar{P}_a = \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 C_p$$

V[m/s]	ρ [Kg/m ³]	Densidad de potencia eólica P _v [W/m ²]
4	1.22	39.0
6	1.22	131.8
6	1.00	108.0
8	1.22	312.3
8	1.00	256.0
10	1.22	610.0



Variación de la densidad con la altura sobre e nivel del mar

- La densidad del aire disminuye con la altura sobre el nivel del mar:
- Al nivel del mar y en condiciones estándar ($T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$): $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$
- A 1500 m (s.n.m.) y $T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 1,05 \text{ Kg/m}^3$

En general, se aplica Ley de los gases perfectos:

$$\rho = p/RT$$

Donde: p es presión en Pa

T es temperatura en $^\circ\text{K}$

$R = 267 \text{ J/Kg-}^\circ\text{K}$

Recuerde que $[\text{ }^\circ\text{K}] = 273,16 + [\text{ }^\circ\text{C}]$

Que normativa existe en tecnología minieólica?

- **Normas IEC o UNE-EN**

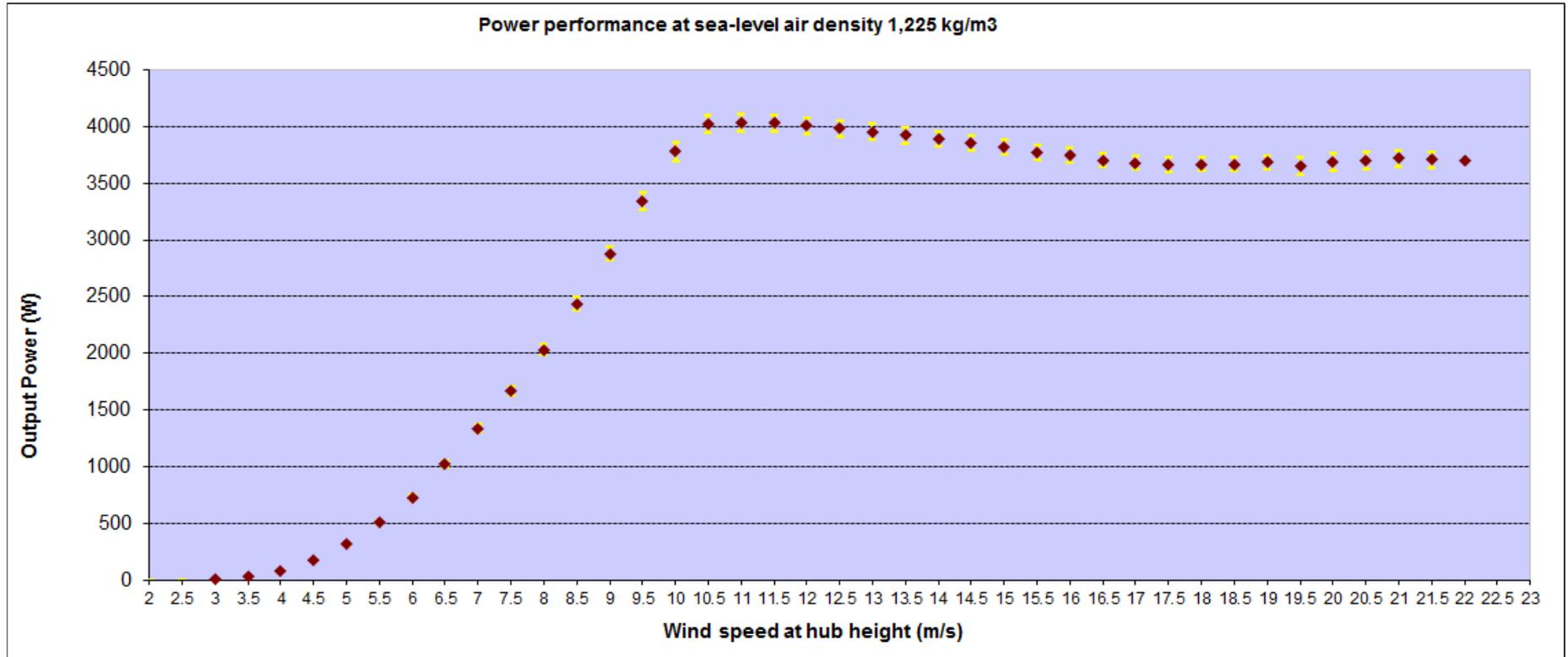
- [Norma UNE-EN 61400-2 Ed 3 \(año 2015\) “Pequeños aerogeneradores”](#).
- [Norma UNE-EN 61400-11 \(2013\). “Técnicas de medida de ruido acústico”](#)
- Norma **UNE-EN-61400-13 (2016)** Medida de cargas mecánicas.
- Norma **UNE-CLC/TS 61400-14 (2017)** “Declaración de nivel aparente de potencia acústica y los valores de tonalidad”.
- [Norma UNE-EN 61400-12-1 \(2018\). “Medida de curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad”. Anexo H específico para conexión de aerogeneradores a baterías.](#)
- Norma **UNE-EN 61400-21 (2009)** “Medida y evaluación de las características de calidad de suministro de las turbinas eólicas conectadas a la red.
- Norma **UNE-EN 61400-22 (2011)**. “Ensayos de conformidad y certificación”.
- Norma **UNE-EN 61400-23 (2014)**. “Ensayos estructurales de palas a escala real”

www.iec.ch

www.aenor.es

Característica de potencia (P-Vv)

Curva de potencia



Aerogenerador E70PRO (Cortesía de ENAIR Energy S.L.)

CURVA DE POTENCIA Densidad estándar 1.225 kg/m ³							
Bin N°	Velocidad de viento a la altura del buje V _i (m/s)	Potencia de salida P _i (W)	Cp _i (área barrida del rotor 14.5 m ²)	N° de grupos de datos N _i (1 minuto)	Incertidumbre estándar (A) S _i (W)	Incertidumbre estándar (B) U _i (W)	Incertidumbre estándar U _{c_i} (W)
2	0.545	-1.770	-1.233	873	0.041	0.262	0.265
3	1.019	-1.737	-0.185	1677	0.028	0.139	0.142
4	1.513	-1.829	-0.060	2346	0.027	0.101	0.104
5	2.010	-1.733	-0.024	2755	0.040	0.074	0.084
6	2.502	-0.568	-0.004	3182	0.131	0.020	0.132
7	3.002	5.696	0.024	3562	0.311	0.173	0.356
8	3.501	29.104	0.076	3793	0.798	0.789	1.122
9	4.004	80.781	0.142	4031	1.545	1.995	2.523
10	4.500	174.082	0.215	4075	2.502	3.989	4.709
11	5.005	313.024	0.281	4331	3.347	8.928	9.535
12	5.502	509.125	0.344	4294	4.041	13.545	14.135
13	5.994	725.949	0.380	3729	4.900	18.191	18.839
14	6.497	1020.533	0.419	3555	4.682	24.243	24.691
15	7.002	1338.796	0.439	3230	4.038	30.341	30.609
16	7.500	1669.720	0.446	3105	3.849	36.326	36.529
17	7.999	2029.790	0.447	2974	3.870	42.588	42.763
18	8.498	2437.645	0.447	2790	4.506	49.523	49.727
19	8.999	2880.435	0.445	2507	5.105	56.853	57.081
20	9.499	3343.972	0.439	2369	5.707	64.325	64.578
21	9.992	3778.565	0.427	2199	6.316	78.777	79.030
22	10.495	4613.327	0.392	1917	5.895	81.841	81.854
23	10.993	4031.846	0.342	1764	5.388	79.986	80.167
24	11.497	4029.979	0.289	1613	5.051	78.210	78.379
25	11.990	4005.162	0.262	1467	5.054	76.245	76.412
26	12.493	3984.839	0.230	1185	5.503	74.488	74.691
27	12.995	3953.423	0.203	1018	5.387	72.676	72.876
28	13.491	3921.988	0.180	810	5.518	71.010	71.224
29	13.991	3891.661	0.160	673	5.811	69.471	69.713
30	14.480	3854.091	0.143	555	6.798	67.927	68.266
31	14.987	3819.086	0.128	457	8.239	66.489	66.998
32	15.497	3772.103	0.114	407	6.626	64.926	65.263
33	15.990	3747.479	0.103	375	6.289	63.845	64.154
34	16.493	3705.181	0.093	339	6.387	62.513	62.839
35	17.009	3679.709	0.084	271	7.039	61.511	61.912
36	17.500	3664.301	0.077	261	6.728	60.753	61.124
37	17.981	3665.588	0.071	166	8.988	60.319	60.984
38	18.489	3669.586	0.065	111	10.241	59.937	60.805
39	18.999	3682.521	0.060	100	12.969	59.730	61.122
40	19.501	3652.999	0.055	67	13.031	58.872	60.297
41	19.972	3687.931	0.052	51	18.323	70.925	73.254
42	20.491	3696.947	0.048	39	19.253	70.262	72.852
43	20.973	3720.434	0.045	30	27.169	69.974	75.064
44	21.462	3708.015	0.042	20	26.291	69.040	73.876
45	22.030	3701.613	0.039	10	18.164	68.158	70.537

Característica de potencia/ Curva de potencia

Para poder comparar como potencia nominal se establece la potencia de salida a 11 m/s .

En esta turbina 4.031 kW

Aerogenerador E70PRO
(Cortesía de ENAIR Energy S.L.)

Calculo de la producción de Energía Anual

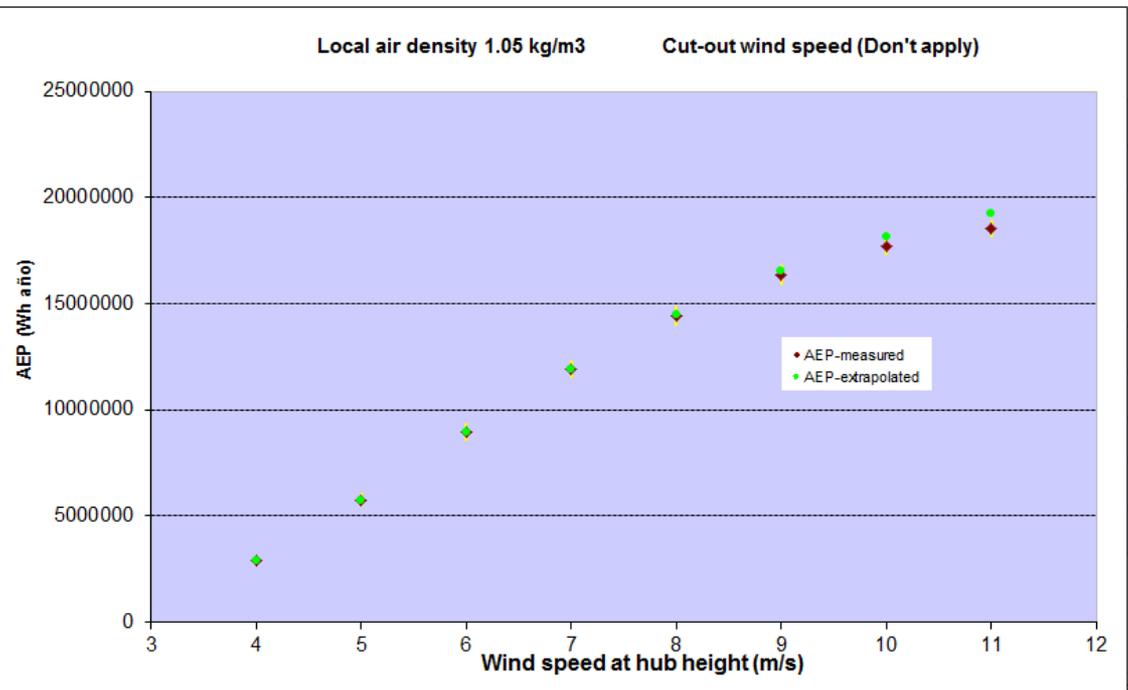
Para comparar la energía producida se utiliza la Energía Anual Producida A 5 m/s de velocidad e viento media anual.

En esta turbina son **6724 kWh**

Mediante la curva de potencia y la distribución de velocidad de viento del lugar de instalación (Rayleigh) se puede calcular la producción de energía diaria o anual

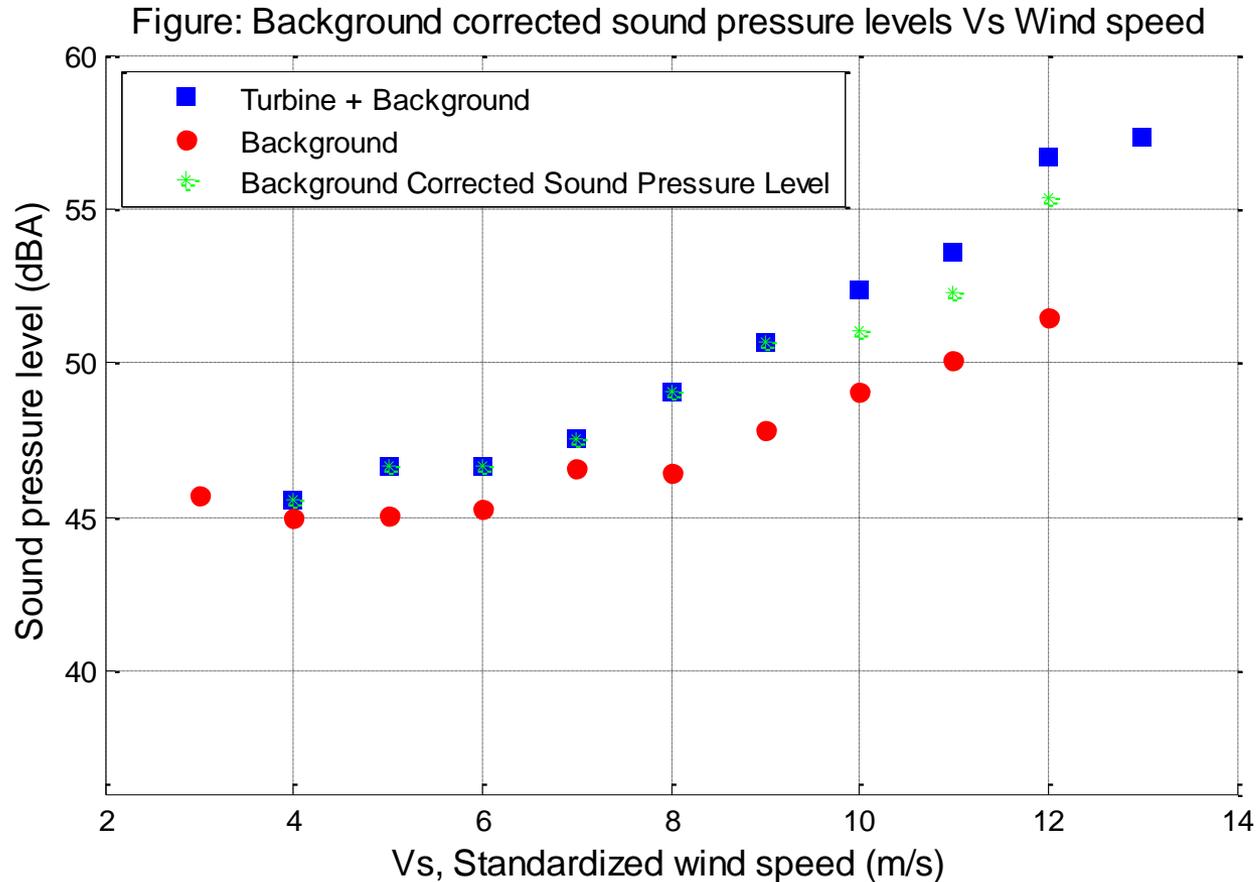
Aerogenerador E70PRO
(Cortesía de ENAIR Energy S.L.)

Producción de energía anual estimada Densidad de aire a nivel del mar 1.225 kg/m ³ Velocidad de viento de corte (no tiene) (Potencia constante extrapolada en el último bin)					
Medida anual de la Velocidad de viento a altura del buje	AEP-medida Curva de potencia medida)	Incertidumbre de la curva de potencia medida expresada en términos de desviación estándar de la AEP		AEP-extrapolada (Curva de potencia extrapolada)	Estado
		Incertidumbre combinada			
m/s	kWh	kWh	%	kWh	
4	3352	79	2	3352	Completo
5	6724	148	2	6724	Completo
6	10437	220	2	10438	Completo
7	13903	284	2	13915	Completo
8	16827	336	2	16896	Completo
9	19090	374	2	19308	Completo
10	20674	399	2	21152	Completo
11	21625	412	2	22453	Completo



Medida de la emisión de ruido por aerogeneradores de pequeña potencia

Según norma (IEC 61400-11)

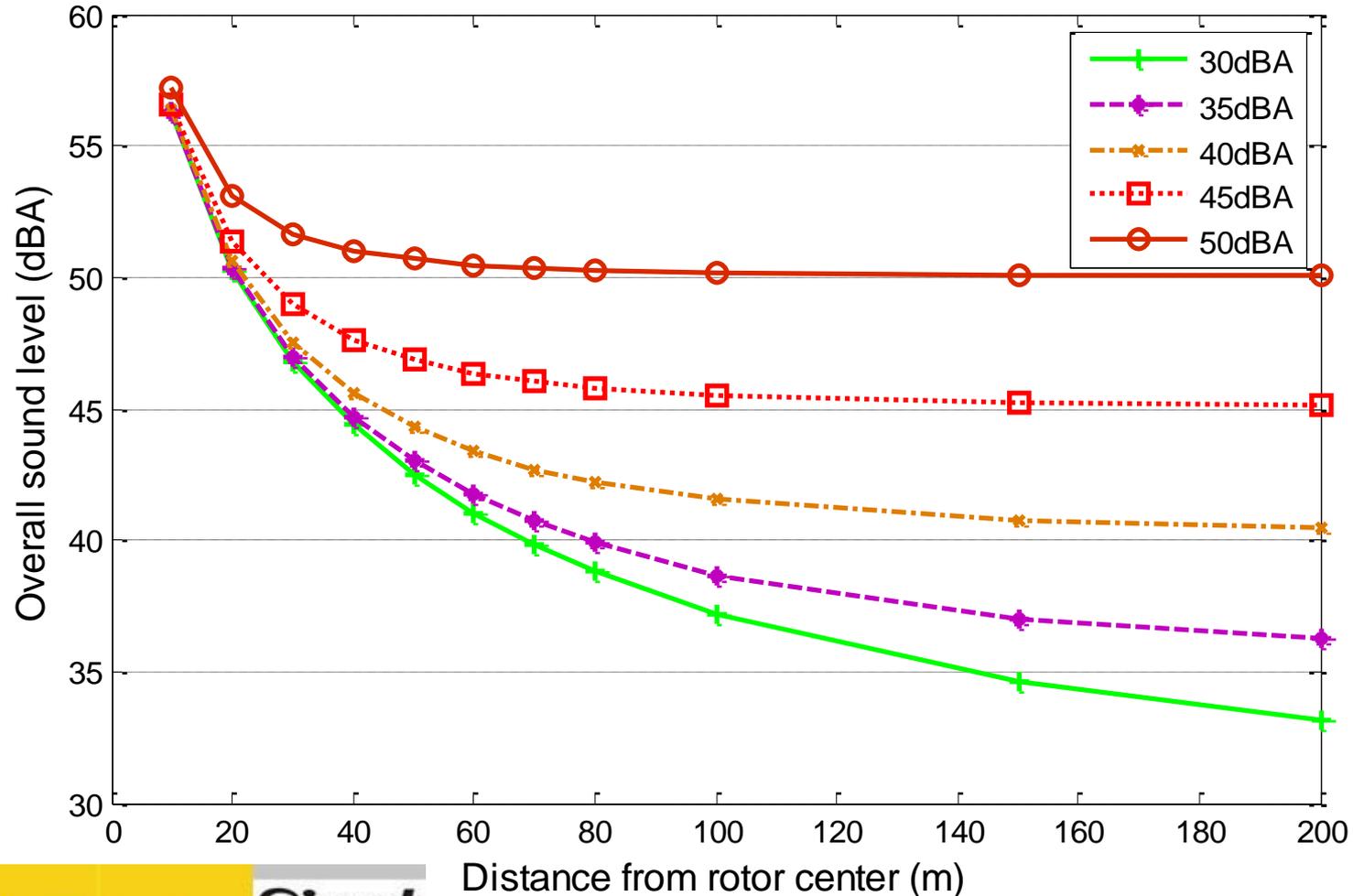


L_{AWEA} rated sound level is 40.7 dB(A)

Emisión de ruido por aerogeneradores de pequeña potencia

Según estándar de AWEA

Sound levels as a function of distance and background noise levels for AWEA rated sound level of Lawea



Hay aerogeneradores certificados?

Small Wind Certification Council SWCC (EEUU)

<https://smallwindcertification.org/>

Descarga de información sobre aerogeneradores de eje horizontal y vertical

NREL & INTERTEK

<https://www.intertek.com/wind/small/RTC/>

MCS (REINO UNIDO)

INTERTEK

<https://www.intertek.com/wind/directory/>

ClassNK (Japón)

https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/renewableenergy/en/windturbine/RE-071-03_e.pdf

Operación y mantenimiento

- Si instala una turbina minieólica, deberá realizar controles de mantenimiento cada pocos años.
- **IMPORTANTE:** Disponer de manual de instalación y operación y mantenimiento de todo el equipo.
- El coste de esta revisión es muy variable generalmente costará entre unos 200€ y 400€ dependiendo del tamaño de la turbina y lejanía del emplazamiento.
- Prácticamente será revisión visual de turbina y equipos, realizar el reapriete de tornillos y conexiones y dependiendo del emplazamiento se deberán limpiar las palas.
- Una turbina bien mantenida debería durar más de 20 años, pero es posible que deba reemplazar el inversor en algún momento durante este tiempo, con un coste de 1500 a 3000 € dependiendo de la potencia.
- Para los sistemas aislados de la red, las baterías también deberán reemplazarse, generalmente cada 6 a 10 años. El coste de reemplazar las baterías varía según el diseño y la escala de su sistema.

**MUCHAS GRACIAS
POR SU ATENCIÓN!!!**

ignacio.cruz@ciemat.es

Ciemat