



4.4.

## Impacto acústico de parques eólicos

Josep Martí

Director de Ingeniería - dBplus consultores acústicos

[jmarti@dBplusacoustics.com](mailto:jmarti@dBplusacoustics.com)



Documentación:

Josep Martí Carceller

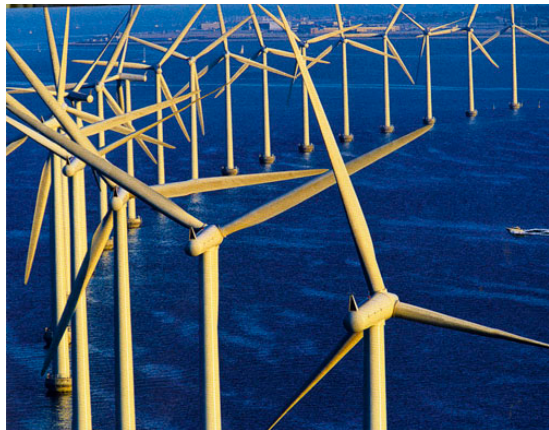
## **Impacto acústico de los parques eólicos:**

1. Introducción / Motivación.
2. Descripción i caracterización acústica de los aerogeneradores.  
Breve explicación técnica, funcionamiento, características de ruido, etc.
3. Medida de ruido de aerogeneradores.  
Complejidad de la medida, UNE-EN ISO 61400-11.
4. Medida de impacto acústico de un parque eólico.  
Caracterización y evaluación.
5. Modelos de predicción del impacto acústico de un parque eólico.

## **Introducción / Motivación**

- La demanda de fuentes energéticas sostenibles provoca una creciente implantación de parques eólicos en España.
- Aparece la necesidad de evaluar todo lo que se refiere al control del impacto acústico de los aerogeneradores.
- Aumentan los casos de estudios de impacto fallidos y los parques eólicos que son motivo de queja por la contaminación acústica.
- Estas fuentes de ruido tienen una complejidad específica muy alta, en relación a:
  - Caracterización acústica de la fuente (basada en normativas ISO).
  - Evaluación y predicción del impacto acústico del parque eólico.

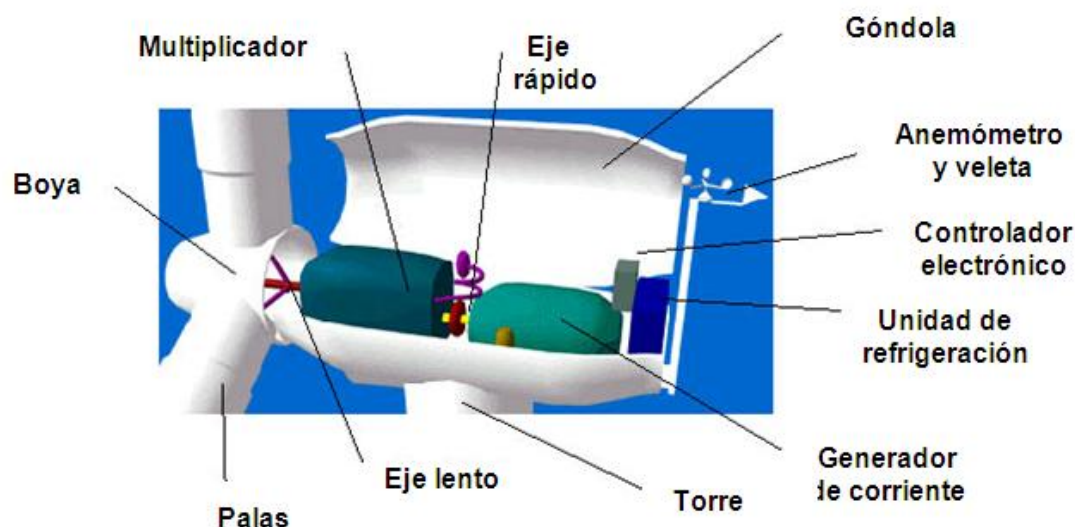
- **Aerogenerador**: Tipo de aeromotor capaz de aprovechar la energía eólica para generar electricidad.
- **Parque eólico**: Central eléctrica que aprovecha la energía del viento, cuyo elemento fundamental es un *aerogenerador*.



## Descripción i caracterización acústica de los aerogeneradores

### Funcionamiento de los aerogeneradores:

- Compuesto básicamente por un *rotor*, un *multiplicador mecánico* y un *generador eléctrico* situados encima de una torre de unos 55m de altura.



- El aerogenerador se activa cuando detecta una velocidad del viento mayor a **3m/s**. El régimen correcto de funcionamiento es hasta unos **25m/s**.
- El *rotor* tiene una *boya* solidaria al *eje lento*, dónde se unen las palas del aerogenerador.
- Un circuito controla el ángulo de orientación de las palas en relación al viento, controlando la fuerza que se transmite al eje.
- El *eje lento* provoca el giro de los engranajes que conforman el *multiplicador mecánico* y que gobiernan el *eje rápido*.
- Este *eje rápido*, que normalmente gira a unas 1500 r.p.m., está conectado al *generador eléctrico* que convierte la energía mecánica en eléctrica.
- Sistemas de control adicionales:
  - *Sistema de orientación*: posicionan el rotor en la dirección de interés ( $v = 0,5^\circ/s$ ).
  - *Sistema de frenada del rotor*: detienen el giro cuando hay exceso de viento.
  - *Sistema de refrigeración*: ventiladores que hacen circular aire dentro de la góndola.

## Características de ruido de los aerogeneradores:

- Cuando los aerogeneradores están parados:
  - *Ruido de posicionamiento*: se produce aleatoriamente cuando la veleta detecta un cambio en la dirección del viento. Dura unos 5s y tiene una componente tonal cercana a 200Hz.
  - *Ruido aerodinámico*: aunque el aerogenerador esté parado, el viento provoca un movimiento en las palas que produce este tipo de ruido.
  - Cuando los aerogeneradores entran en funcionamiento estos ruidos quedan enmascarados y son imperceptibles.

- Cuando los aerogeneradores están en funcionamiento:
  - Aunque existen varias fuentes de ruido en la góndola y la torre, dominan claramente dos tipos de ruido:
    - *Ruido de turbina*: ruido continuo de baja frecuencia con componentes tonales de alta frecuencia.
    - *Ruido aerodinámico*: causado por el movimiento de las palas. Es un ruido periódico de baja frecuencia, que se produce cada vez que una de las palas pasa por delante de la torre.
  - Aunque estos ruidos se producen a gran altura, se transmiten a través del interior de la torre y se percibe un alto nivel de presión sonora en la puerta de acceso a ésta.
  - A medida que nos alejamos de los molinos estos ruidos son más difíciles de distinguir y predomina el ruido aerodinámico (aunque se reduce su periodicidad).



### **Subestación transformadora:**

- Adapta la energía eléctrica producida en los molinos para que se pueda transmitir a través de la red de transporte.
- La tensión de salida del generador es de unos 690VAC, pero se añade un transformador para incrementarla a los 20KVAC de la red de transporte.
- Las emisiones sonoras de la subestación son variables en función del grado de aislamiento que presenta frente al exterior, y se caracterizan por tener componentes tonales marcadas derivadas de la frecuencia de la red eléctrica.
- Generalmente, en toda medida sonométrica, deberemos considerar otras fuentes de ruido del entorno, como infraestructuras de transporte o las propias de la naturaleza.

## **Medida de ruido de aerogeneradores**

- El procedimiento de medida se describe en el estándar: **UNE-EN ISO 61400-11: Aerogeneradores, Parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico.**
- Permite obtener la potencia acústica aparente de la fuente (un aerogenerador individual), con ponderación A, a velocidades del viento de referencia ( $h=10\text{m}$ ) de 6 a 10m/s. Permite extender el estudio a: directividad, infrasonido, baja frecuencia e impulsividad.
- La norma expone las condiciones a seguir para una medida correcta (*in situ*):
  - Condiciones de velocidad de viento: (se debe medir a 6, 7, 8, 9 y 10 m/s).
  - Altura y distancia de ubicación del sonómetro (protegido del viento, altura en relación a la distancia de medida y la altura del rotor).
  - Número de medidas (mínimo 30 medidas de ruido de fondo y ruido de aerogenerador).
  - Se citan otros factores a tener en cuenta, como la rugosidad del terreno y la protección antiviento del equipo de medida.

•

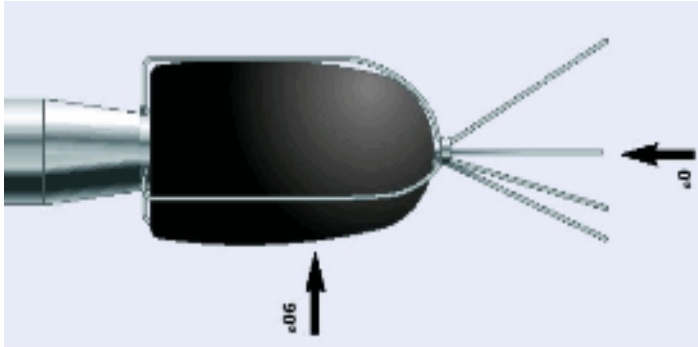
## **Particularidades ISO 61400-11**

- Ruido de fondo: debe medirse inmediatamente antes y después de la medida de nivel ( $T_{min} = 1'$ ), evitando intrusiones de corta duración.
- Medida de la velocidad del viento:
  - Debe medirse simultáneamente a las medidas de presión sonora, para obtener la relación *velocidad – SPL*.
  - La norma proporciona formulas para corregir la velocidad del viento respecto a la altura de referencia ( $h=10m$ ).
  - Instrumentación adicional: anemómetro, veleta, termómetro, barómetro, higrómetro.
- **Se trata de una medida larga, rigurosa y exigente.**

## **Medida de impacto acústico de un parque eólico**

### **Evaluación del impacto acústico**

- Un parque eólico sólo genera ruido (sólo trabaja) cuando la velocidad del viento está entre 3m/s y 25m/s, condiciones en las que generalmente se desecharían las medidas.
- El exceso de viento provoca un “*pseudo-ruido*” debido a la sobrepresión que sufre el micrófono. Para evitar este falseamiento se recomienda:
  - Utilizar técnicas de correlación entre dos micrófonos iguales que recojan el mismo ruido de forma sincronizada.
  - Utilizar micrófonos ultra-direccionales.
  - Utilizar una segunda pantalla antiviento de dimensiones grandes.
  - Montar el micrófono sobre una superficie reflejante protegiendo el sonómetro del viento (posteriormente se deben corregir 3dB por reflexión).



- El uso de una segunda pantalla protectora anti-viento extra-grande es la protección más extendida, ya que aumenta los niveles de señal/ruido especialmente a baja frecuencia.
- Cuando la velocidad del viento supere los 15m/s se recomienda usar más de un sistema de protección.
- La dirección y la velocidad del viento afectan sobremanera a la propagación del sonido en exterior. Cuando el factor viento aparece la influencia de la temperatura en la velocidad de propagación del sonido se vuelve irrelevante.

- Cuando las condiciones de viento no son favorables (viento en dirección contraria al receptor o *up wind*), apenas se perciben molestias.

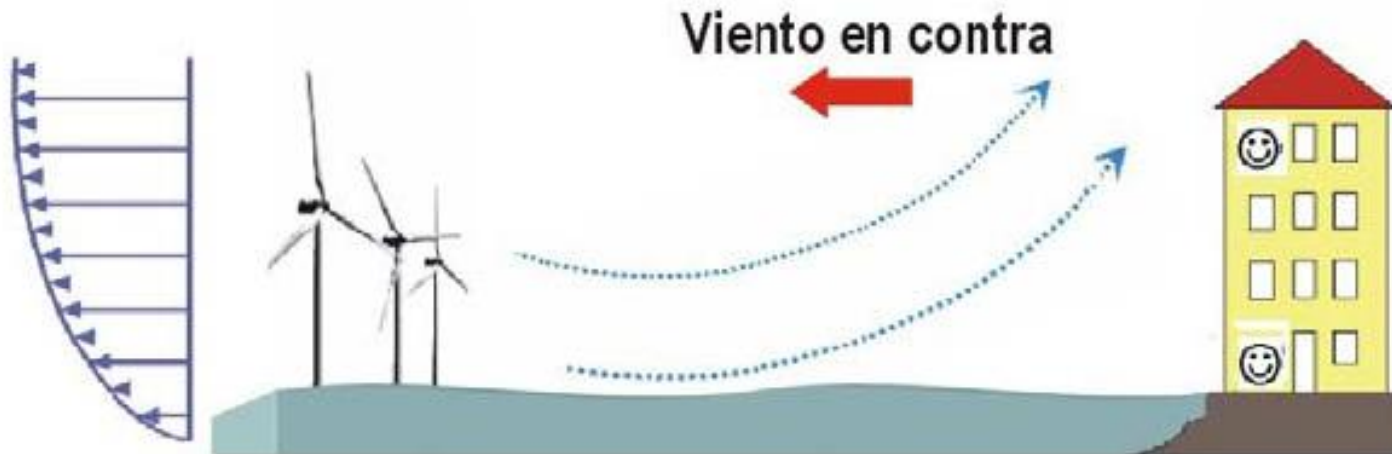


Figura 1: Propagación del sonido up-wind

- Cuando las condiciones de viento son favorables (viento en dirección al receptor o *down wind*), se forman canales por reflexión y la propagación del sonido puede llegar a distancias muy lejanas.

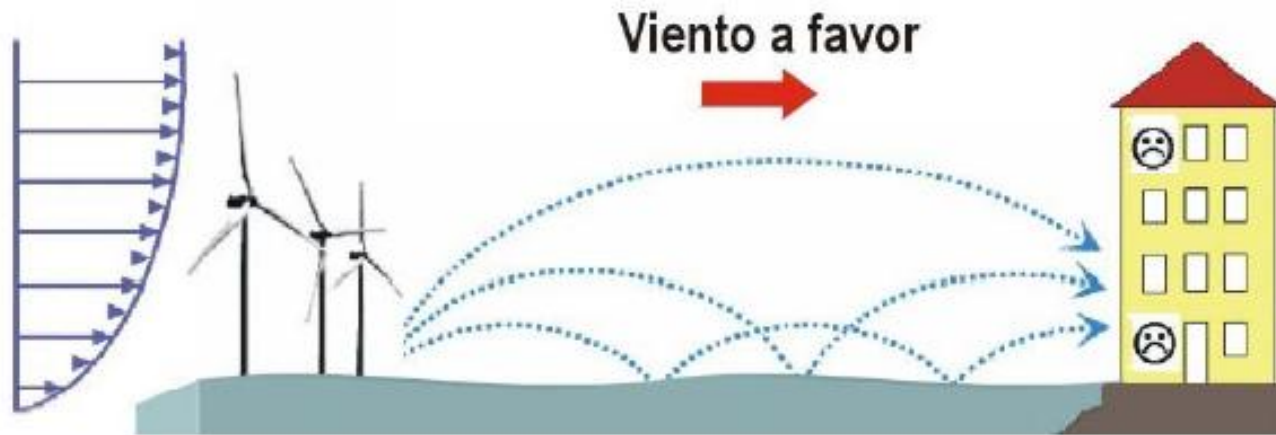


Figura 2: Propagación del sonido down-wind

- En consecuencia es imprescindible que se disponga de los datos de viento de estaciones meteorológicas de la zona. Se puede considerar suficiente contar con 5 años de datos.

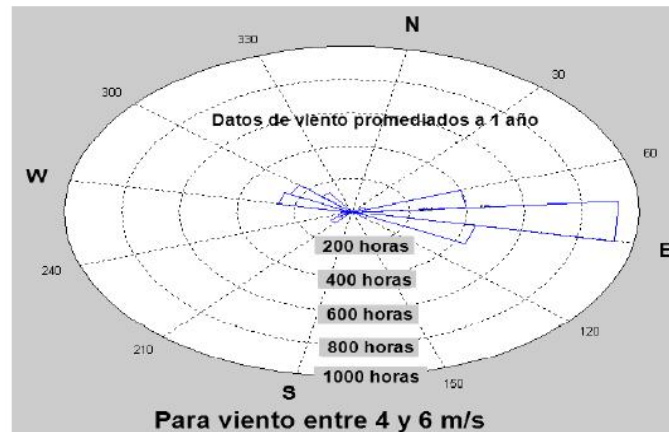


Figura 3: Número de horas anuales y dirección en la que el viento toma velocidades entre 4 y 6 m/s

- El mismo viento que hace funcionar el parque eólico produce ruido a su paso a través de obstáculos. Por tanto se recomienda medir el viento y el ruido de manera simultánea, a distintas velocidades y en un intervalo de tiempo concreto. Los datos se correlacionan obteniendo la relación entre ambas magnitudes.



- Cuando se miden niveles de inmisión es difícil distinguir el ruido de turbina del ruido aerodinámico (de los molinos o de obstáculos orográficos) y el ruido residual.
- La diferenciación entre las distintas fuentes se complica a medida que nos alejamos del parque eólico, aunque predomina el ruido aerodinámico.
- Es importante concretar que fuentes se consideran ruido de fondo.



- Con la *UNE EN ISO 61400-11* no es suficiente para evaluar los niveles de inmisión sonora, ya que estos dependen del clima y la ubicación del parque, sin embargo la norma es válida para la caracterización de un aerogenerador ( $L_{wA}$ ).
- Para realizar el estudio será necesario tener control total sobre los aerogeneradores, y en casos particulares, sobre otras fuentes de ruido próximas que no formen parte integrante del parque eólico.
- Los nuevos anexos que desarrollan la Ley 16/2002 (D. 176/2009), en su revisión de la norma anterior, contemplan las medidas de nivel de inmisión en parques eólicos en su anexo nº 3: *inmisión sonora en el ambiente exterior causado por las actividades y el vecindario*, y indica:
  - La dirección del viento debe ser de  $\pm 45^\circ$  des del aerogenerador hasta el punto de medida (*down wind*).
  - La velocidad del viento, referenciada a 10m de altura, debe estar comprendida entre 6 y 8 m/s.

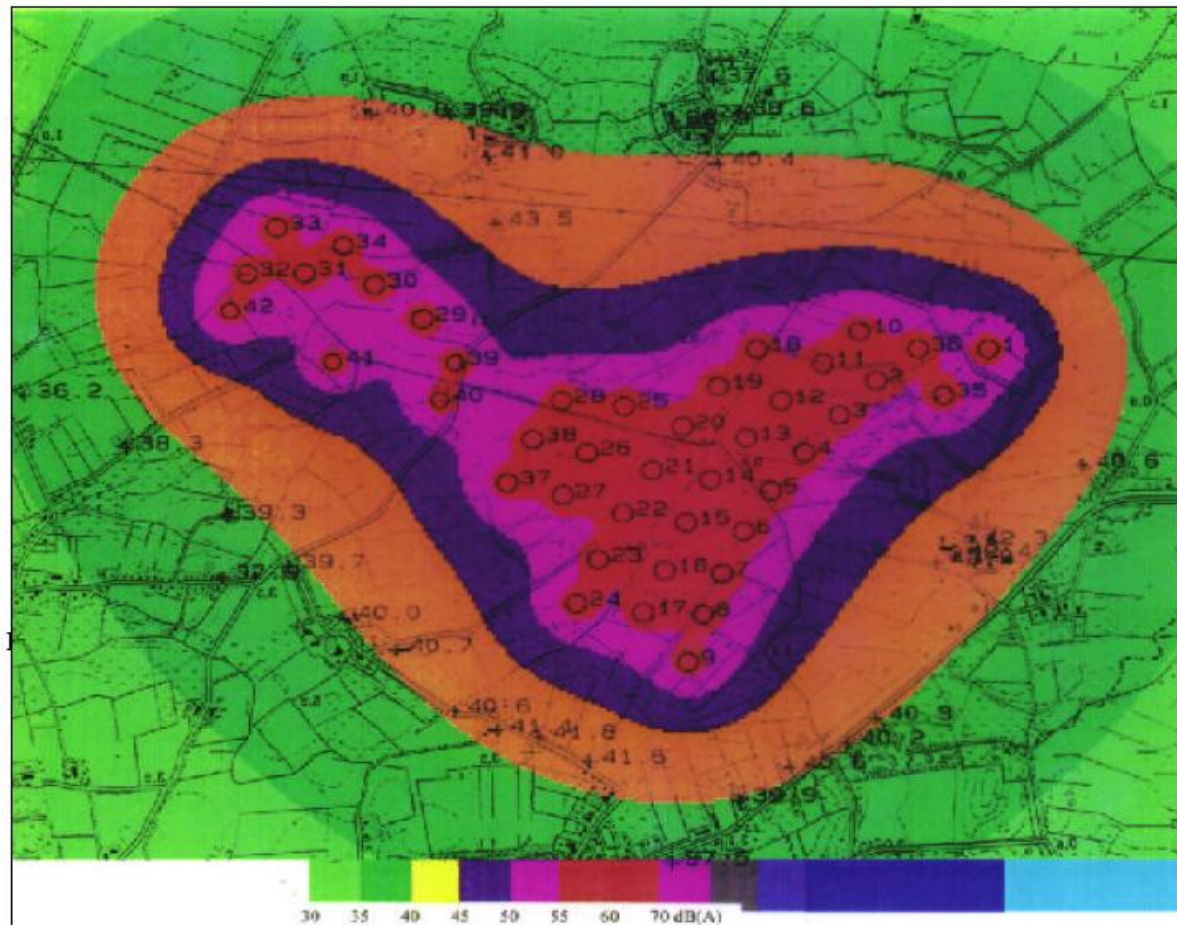
- La ley 16/2002 define que aquellas viviendas situadas en el medio rural deben ser consideradas como *zonas de alta sensibilidad acústica*.

Usos del sòl	Valors límit d'immissió en dB(A)		
	$L_d(8\text{ h} - 21\text{ h})$	$L_e(21\text{ h} - 23\text{ h})$	$L_n(23\text{ h} - 8\text{ h})$
<b>ZONA DE SENSIBILITAT ACUSTICA ALTA: A</b>			
(A2) Predomini del sòl d'ús sanitari, docent i cultural	50	50	40
(A3) Habitatges situats al medi rural	52	52	42
(A4) Predomini del sòl d'ús residencial	55	55	45

- Sin embargo, hay que considerar que en las zonas que por su singularidad se cree conveniente conservar la calidad acústica, se consideran como ZEPQA (*Zona d'Especial Protecció de la Qualitat Acústica*). Algunas de estas zonas todavía no están declaradas y los límites permitidos pueden ser mucho más restrictivos (parques naturales, zonas especialmente singulares, etc...).

### **Modelos de predicción o simuladores**

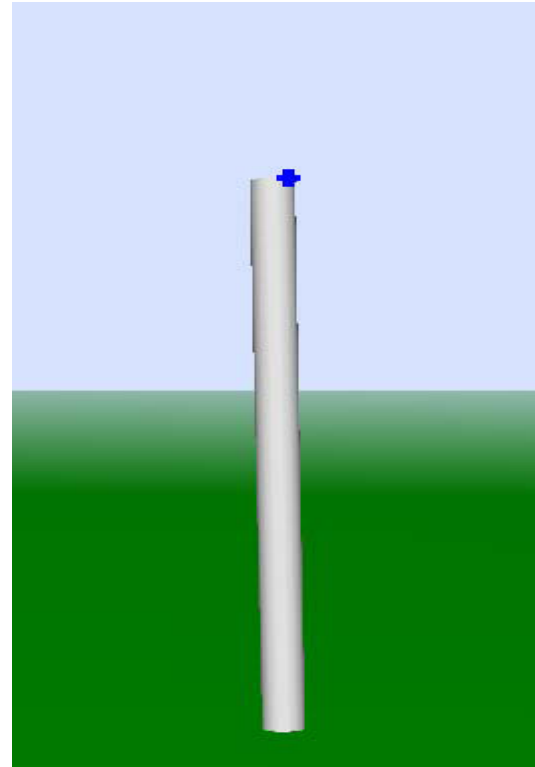
- Generalmente, se basan en la acústica geométrica y consideran el aerogenerador como una fuente puntual (visto desde suficiente distancia), y no siempre se pueden introducir datos de viento en el modelo.
- Los resultados no siempre son correctos, depende de la fiabilidad de los datos de entrada, los cuales pueden ser difíciles de obtener porque falta información por parte del fabricante o de las autoridades competentes.
- Existe mucha bibliografía sobre la propagación del sonido considerando la dirección del viento, pero no hay un estado del arte consolidado sobre modelos de predicción y no se han incorporado teorías de dinámica de fluidos en la propagación de ondas de presión.
- Aunque ciertos modelos de propagación permiten introducir una rosa de los vientos en el modelado, una orografía complicada puede provocar problemas en la simulación y dar resultados inciertos, ya que no se tienen en cuenta las turbulencias que se generan.



## **Modelado de la fuente en software de predicción:**

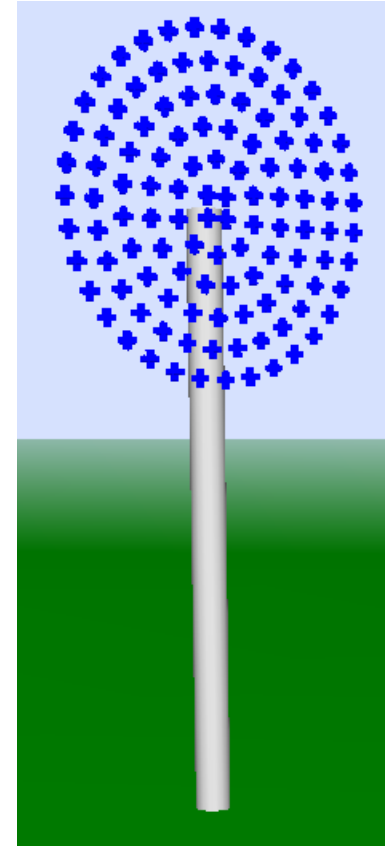
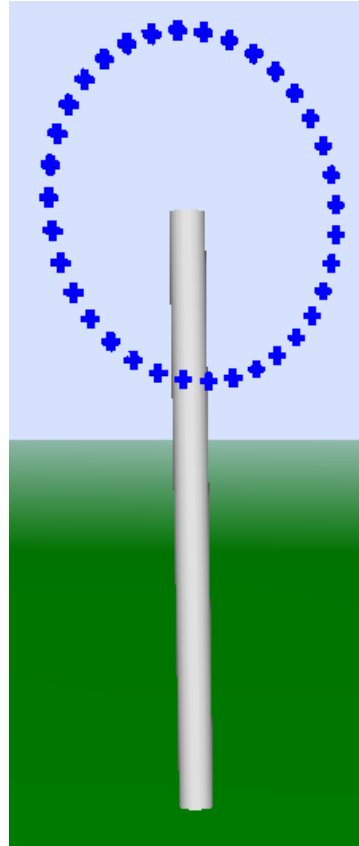
- *Fuente puntual:*

- Tratamiento más habitual y viable (a partir de medidas).
- Se puede obtener la potencia y directividad de la fuente con la ISO 61400-11.
- No se debe modelar el mástil, porque el efecto de “screening” que sucede con el rotor real no coincide con el mismo efecto para una fuente puntual.



- *Fuente anillo o disco:*

- Teóricamente más preciso.
- La potencia acústica de un diferencial o “trozo” de pala aumenta conjuntamente con el radio del rotor (ruido aerodinámico).
- Muy complicado obtener la potencia de cada diferencial
- En este caso se modela también el mástil.





## Modelos matemáticos de propagación:

- **ISO 9613-2:**

- Predicción del Nivel Continuo Equivalente Ponderado A, a largo plazo,  $\underline{LA_T(LT)}$ , a partir de:

- Nivel Continuo Equivalente Ponderado A, con condiciones de viento a favor (down wind),  $\underline{LA_T(DW)}$ .

- Corrección meteorológica  $\underline{C_{met}}$ .

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met}$$

where  $C_{met}$  is the meteorological correction described in clause 8.

$$C_{met} = C_0 \left[ 1 - 10(h_s + h_r) / d_p \right] \quad \text{für } d_p > 10(h_s + h_r)$$

$$C_{met} = 0 \quad \text{sonst.}$$

with

$h_s$  source height (m)

$h_r$  receiver height (m)

$d_p$  distance (m) between the source and receiver projected to the horizontal ground plane

$C_0$  factor (in dB) which depends on local meteorological statistics for wind speed and direction and temperature gradients



$$C_0 = -10 \times \lg \left( \frac{T_m}{100} \times 10^{-\frac{K_m}{10}} + \frac{T_q}{100} \times 10^{-\frac{K_q}{10}} + \frac{T_g}{100} \times 10^{-\frac{K_g}{10}} \right)$$

with

$T_m$       annual part in % of meteorological conditions for downwind and calm

$K_m$       deviation of sound level according to downwind conditions in dB

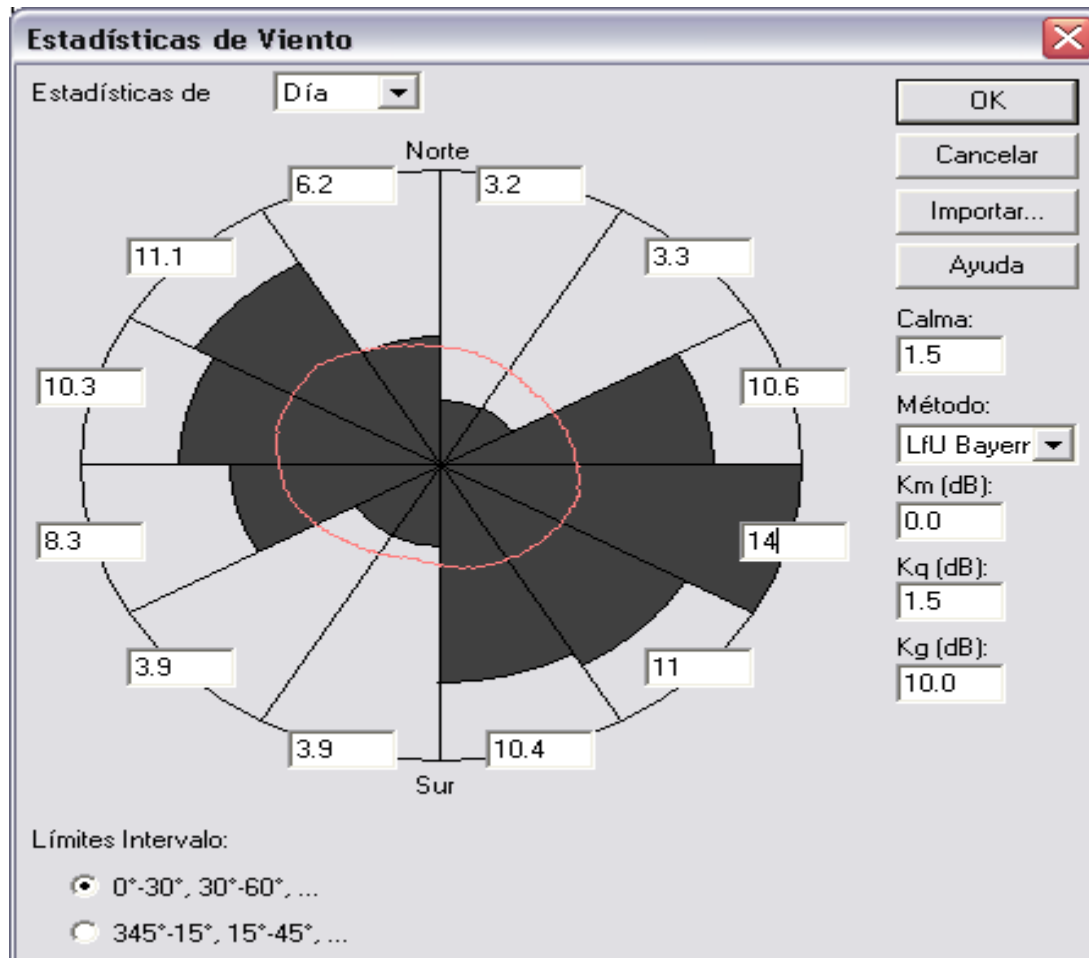
$T_q$       annual part of crosswind conditions in %

$K_q$       deviation of sound level with crosswind relative to downwind conditions in dB

$T_g$       annual part of headwind conditions in %

$K_g$       deviation of sound level with headwind relative to downwind conditions in dB

- La determinación de  $T_m$ ,  $T_q$  y  $T_g$  se lleva a cabo a partir de la distribución de frecuencias de las distintas direcciones el viento, que se clasifica en 12 clases distintas (sectores de orientación de  $30^\circ$  cada uno) y una clase de viento en calma.
- Los tres grandes grupos de viento están definidos de la siguiente forma:
  - Viento a favor (down wind):  $\pm 45^\circ$  en la dirección de la propagación (equivalente a un sector de  $90^\circ$ ), y viento en calma.
  - Viento cruzado (cross wind): desde  $45^\circ$  hasta  $135^\circ$ , y de  $225^\circ$  hasta  $315^\circ$  en la dirección de la propagación.
  - Viento en contra (up wind):  $\pm 45^\circ$  en contra de la dirección de propagación del sonido.
- Se trata de una corrección de niveles a partir de las condiciones de viento, pero no contempla teoría de dinámica de fluidos.



Se requiere un Co  
distinto para los  
periodos *Day*,  
*Evening* y *Night*

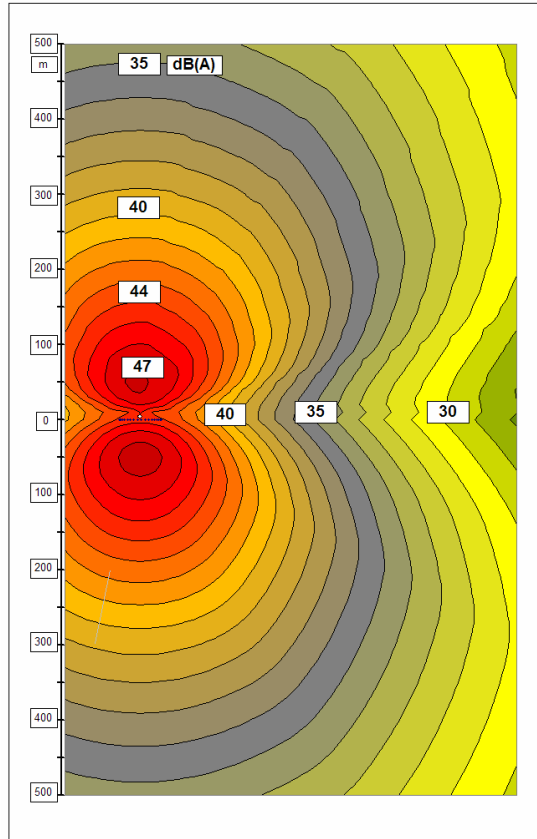
- ***Ljud Van Vindkraftverk:***

- Método sueco.
- Responsabilidad del usuario introducir la potencia correcta (no implementa correcciones por altura).
- Distancia < 1000m: Obtiene el parámetro LAeq.
- Distancia > 1000m: Obtiene el espectro en frecuencia.
- Sólo contempla dos tipos de suelo:
  - Hierba
  - Agua
- No contempla gradientes verticales de condiciones meteorológicas (viento y temperatura).

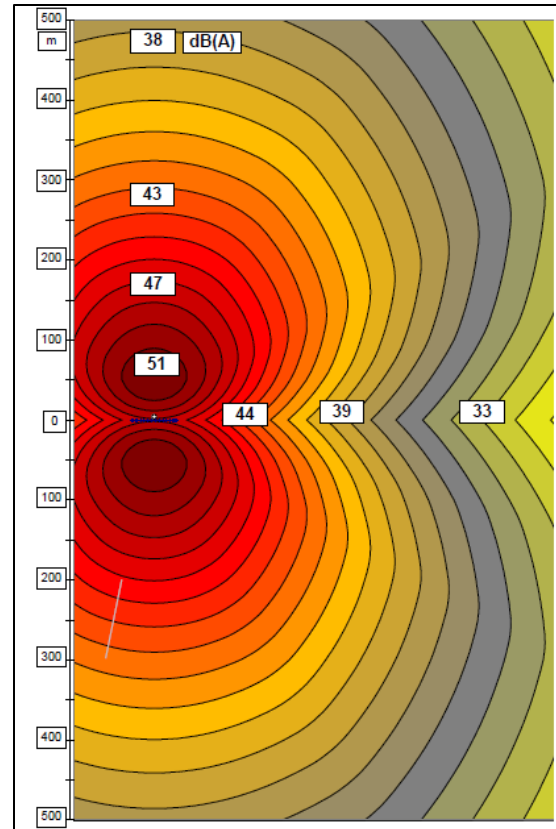
- ***Harmonoise engineering model***

- Método más sofisticado.
- Se tiene en cuenta el espectro frecuencial, la impedancia del suelo y la topografía.
- Contempla dirección y velocidad del viento a distintas alturas.
- Modela la “curvatura” (o desviación) de los rayos de acuerdo con los patrones de velocidad del sonido.
- Contempla las condiciones meteorológicas a partir de 5 situaciones estándar de propagación preestablecidas.

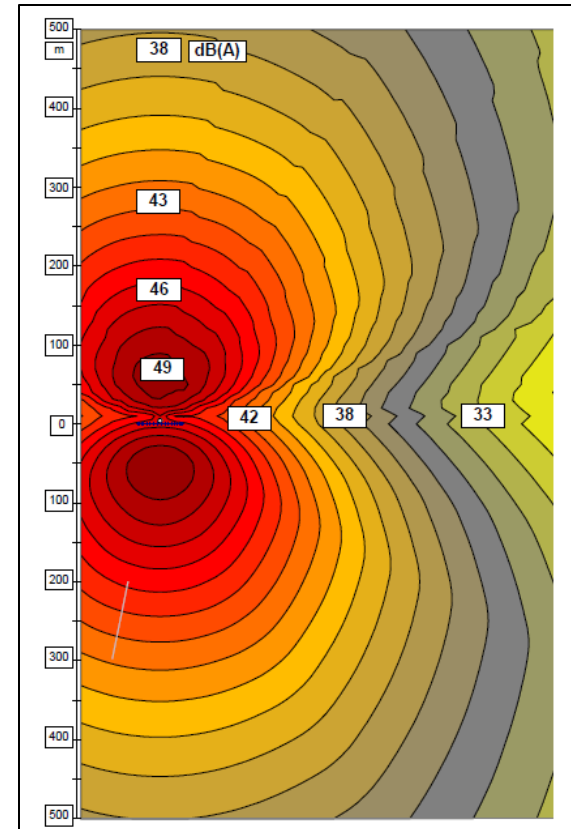
**Comparativa:** suelo de hierba, condiciones DW, corte a 4m de altura,  $v = 8\text{m/s}$



ISO 9613-2



Ljud Van Vindkraftwerk



Harmonoise

### **Bibliografía**

- [1] Helmut Klug (2005). A Review of Wind Turbine Noise. First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control. Berlín
- [2] UNE-EN 61400-11:2004. Aerogeneradores. Parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico. Versión española de la norma IEC 61400-11:2002
- [3] Cueto Ancela, José Luis; Rivas Calvete, Silvia; Hernández Molina, Ricardo. Metodología para la evaluación del impacto sonoro producido por los parques eólicos en Andalucía. Tecniacústica Gandía 2006.
- [4] ETSU W/13/00403/REP; Noise Immission from Wind Turbines. 1999. National Engineering Laboratory.
- [5] H. Klug (2002). Noise from wind turbines standards and noise reduction procedures. Forum Acusticum 2002, Sevilla.
- [6] G.P. Van den Berg. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. Journal of Sound and Vibration, September 2003.

### **Bibliografía**

- [7] T. Neumann, Standards for the Assessment of Acoustic Emissions of Offshore Wind Farms. DEWI MAgazin, Nr.26 February 2005.
- [8] Lisa Johansson, KTH Summary of IEA Topical Expert Meeting on Noise Immission November 2000, FFA, Stockholm, Sweden.
- [9] Yoshinori Nii, Hikaru Matsumiya and Tetsuya Kogaki. Acoustic performances of a vertical board for wind turbine noise Immission measurements. Acoust. Sci. & Tech. 24, 2 (2003).