



EL IMPACTO ACÚSTICO DE LAS TURBINAS EÓLICAS SOBRE LAS PERSONAS Y COLECTIVOS: MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y CONTROL

María José Aguilar García¹, Sandra Velarde Suárez², Katia María Argüelles Díaz²

[¹] Alumno; [²] Tutores
uo39339@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En este trabajo se estudia el impacto acústico que las turbinas eólicas tienen sobre personas y colectivos. Para ello se analizan los efectos de las turbinas eólicas sobre las personas. En concreto qué características hacen especialmente molesto a este ruido y qué efectos provoca en la salud de las personas (desde las molestias comunes y trastornos del sueño hasta otros efectos consecuencia de los anteriores). Finalmente se aborda la percepción de los infrasonidos y sus efectos sobre seres humanos.

Para evaluar el ruido de un proyecto de aerogeneradores en un emplazamiento concreto es necesario considerar el ruido de fondo para poder compararlo con el nivel de presión sonora del ruido de la turbina y ver que se encuentra dentro de unos márgenes que lo hacen admisible.

Para determinar el nivel de presión sonora (nivel de inmisión) se parte del ruido emitido por la turbina (nivel de potencia sonora) y considerando distintos parámetros del emplazamiento se aplican modelos de propagación que permiten su cálculo.

Se analiza la medición y predicción de estos factores. Se considera la emisión de distintos tipos de ruido (aerodinámico, mecánico, modulación de la amplitud) así como el nivel de inmisión calculado a partir de modelos de propagación teniendo en cuenta los distintos escenarios y terrenos en los que se puede colocar el parque eólico.

Por último se hace una revisión de las normativas en distintos países para realizar mediciones y determinar niveles de inmisión de presión sonora que cumplan unos criterios que hagan admisible su impacto acústico sobre personas y colectivos.

INTRODUCCIÓN

En este documento en primer lugar se tratan los efectos de las turbinas eólicas sobre las personas. Para ello:

- Se analizan las molestias que provoca el ruido de las turbinas eólicas y qué peculiaridades tiene ese ruido que lo hacen molesto.
- Se investigan los efectos que provoca en la salud de las personas. El principal efecto del ruido durante el día es *molestia*. El efecto por la noche es la *alteración del sueño* que puede conducir a enfermedades relacionadas con el *estrés* en algunas personas. Estos efectos llevan a establecer unos límites en los niveles de ruido de los parques eólicos.
- Asimismo se tiene en cuenta la percepción de infrasonidos, analizando cómo el oído interno responde a ellos y si son realmente una importante fuente de emisión de ruido de turbinas eólicas.

A continuación se trata la evaluación del impacto acústico de las turbinas eólicas. Para la cual es necesario considerar el *ruido de fondo* del lugar en el que se va a colocar la turbina para compararlo con el *nivel de presión acústica* del ruido de la turbina y ver que cumple con unos criterios.

El nivel de propagación acústica (nivel de inmisión) se calcula mediante *modelos de propagación* en los que es necesario considerar el *ruido emitido* por la turbina entre otros factores.

Se analizan distintos métodos de medida y posteriormente métodos de predicción del nivel de inmisión de presión sonora de un parque eólico. Para ello se estudia el nivel de emisión de la turbina y el modelo de propagación para el cálculo del nivel de inmisión de presión sonora.

En cuanto a la *emisión de ruido* de la turbina se consideran el ruido mecánico, el aerodinámico y la modulación de amplitud (peculiaridad del ruido de turbinas eólicas).

Por último se exponen las regulaciones en materia de ruido de los parques eólicos. Se tienen en cuenta las normas de medición acústica (y en concreto el estándar internacional IEC614000-11) y las normas para determinar los niveles de presión



sonora que varían según el país. Se hace una revisión de normativas en distintos países.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1 EFECTOS DE LAS TURBINAS EÓLICAS SOBRE LAS PERSONAS Y COLECTIVOS

El principal efecto del ruido de turbina eólica durante el día es *molestia*. El efecto por la noche es la *alteración del sueño*. Esto puede conducir a enfermedades relacionadas con el *estrés* en algunas personas.

Se analiza qué peculiaridades tiene este ruido que lo hacen molesto (1.1), los efectos que tiene sobre la salud (1.2) y la percepción de infrasonidos (1.3).

1.1 MOLESTIAS

En este apartado se muestran:

- desde los factores que determinan el impacto acústico del ruido y las peculiaridades que lo hacen especialmente molesto [1]. (Su modulación de la amplitud o AM que no puede mitigarse por completo).
- un estudio basado en pruebas objetivas de las características especiales del ruido para informar sobre las molestias del ruido y el hecho de basar la normativa en niveles de sonido con ponderación A (para reflejar la respuesta del oído humano con la frecuencia) [2]. (Entre otras cosas confirma la presencia de sonidos de baja frecuencia en las casas cercanas a las turbinas eólicas).
- hasta a modo casi anecdótico (ya que afectaría al juicio global en la evaluación de parques eólicos) un estudio de cómo los efectos visuales pueden afectar a la evaluación de las molestias de ruido[3].

D. Bowdler [1] aborda los factores que determinan el impacto del ruido de turbina, qué peculiaridades tiene este ruido que hacen que sea molesto y en definitiva por qué molesta el ruido de turbina.

Los factores que determinan el impacto de ruido se pueden resumir en:

- 1) Volumen(dB), sobre todo en comparación con el ruido ya existente.
- 2) Carácter del ruido, es decir, principalmente si tiene cualquier *tonalidad*, y cómo el ruido *varía con el tiempo*.
- 3) La percepción del oyente del ruido.

El primer factor engloba la intensidad y la sonoridad particular en relación al ruido de fondo antes del desarrollo del parque y en términos de molestia cuánto según este factor afecta la proximidad del parque a la vivienda.

El segundo factor es el carácter del ruido. Sin tener en cuenta la tonalidad del ruido y otras características que casi siempre pueden ser

mitigadas, la característica dominante de ruido de la turbina que *no puede ser mitigada por completo* es la modulación de la amplitud o AM.

Este tipo de ruido se percibe como *más molesto* que si el ruido no tiene ningún tipo de modulación, pudiendo llegar a ser imposible no darse cuenta del ruido.

Un tipo de ruido de amplitud modulada es el denominado ruido swish o de silbido. Todas las turbinas grandes y modernas muestran AM cuando el observador se encuentra cerca de las turbinas y en mayores distancias en *direcciones específicas* (efecto de directividad y amplificación del ruido Doppler) [4]. Si está *a favor* del viento se reduce bastante rápidamente con la distancia, sin embargo se ha demostrado que si el viento es *cruzado* se puede proyectar en distancias mayores.

Sin embargo hay otro tipo de AM, 'ruido sordo en la base' (thump), que se ha sugerido que tiene un tiempo de subida más rápido que el de silbido, pudiendo ser esta la diferencia fundamental entre ambos tipos. El ruido de golpe presentaría una componente de baja a media frecuencia (125 a 250 Hz) que el ruido swish no tendría. No obstante en el momento de la investigación no se puede afirmar con certeza. Se están llevando a cabo investigaciones al respecto [5]. Lo que si se sabe subjetivamente por las descripciones de la gente es que el swish sería peor, más molesto.

W. Palmer [2] ofrece un examen basado en pruebas objetivas de las características especiales del ruido con el fin de informar sobre las molestias del impacto del ruido de turbinas eólicas. Tras unas mediciones y análisis espectral de las mismas se evalúa el *impacto de las características especiales* del sonido cíclico de turbinas de viento para estudiar el hecho de basar la normativa de sonido en niveles de sonido A-ponderados.

Descripción de las mediciones: Se utilizó un micrófono calibrado con una respuesta plana en todo el espectro audible protegido por pantallas de viento para recopilar una serie de lecturas en todas las estaciones que fueron digitalizadas y registradas para las ubicaciones aprobadas por los reguladores que cumplen con los criterios de sonido A-ponderado.

También se realizaron mediciones en lugares bajo condiciones ambientales similares (velocidad del viento, el terreno, temperatura y humedad) a 5 km de distancia de los aerogeneradores.

Se realizó un análisis espectral de las mediciones digitales para comparar el sonido *no ponderado* con el sonido *con ponderación A* para el cálculo de L_{eq} en octavas desde 16 Hz hasta 8000 Hz.

En conclusión, el análisis muestra que las casas cercanas a las turbinas eólicas aprobadas por los



reguladores con niveles de sonido A-ponderados de 40 dBA o menos, presentan niveles de sonido de todas las octavas *por debajo de 1000 Hz* que son entre 15 y 20 dB mayores que una casa a una distancia de 5000 metros de las turbinas eólicas en *condiciones ambientales similares*.

Este trabajo confirma la *presencia* de sonidos de *baja frecuencia* en las casas cerca de las turbinas eólicas.

M. Masullo y otros [3] estudian la influencia de la visión en la evaluación del ruido molesto de los parques eólicos. En este estudio se encuentra que distintos estímulos pueden influir en la percepción auditiva y cómo la visión puede llegar a modificar el juicio global del parque.

Concretamente el objetivo de este estudio es determinar la contribución de algunos factores visuales en la percepción del ruido y la molestia de parques eólicos.

Se utilizan como estímulos en una prueba de laboratorio cuatro tipos de factores visuales (cantidad de turbinas, la diferencia de color de las palas del rotor, la velocidad del rotor y la forma de la turbina eólica) que se presentan a una muestra de personas a las que luego se les pide evaluar la calidad del ruido a través de cuestionarios de auto-informe.

Se concluye que los resultados del análisis de varianza, muestran que la combinación de la cantidad (Q), el color de las palas del rotor (C) y la velocidad del rotor (V) con diferentes estímulos sonoros juegan un papel significativo de la *intensidad* relativa percibida, mientras que no tiene ningún efecto la forma (F).

En lo que se refiere a *molestia* relativa del ruido la combinación de la velocidad del rotor con diferentes estímulos de sonido, así como la forma de rotor, juegan un papel significativo, no habiendo resultados de los efectos de la cantidad y el color de las palas del rotor. Más pruebas ayudarían a entender los aportes específicos de estos factores.

1.2 EFECTOS SOBRE LA SALUD

A lo largo de este apartado:

- Se ofrece una visión de los efectos del ruido de turbina sobre las personas [6]. Se analiza cuáles son estos efectos (molestia, trastornos del sueño, sobre la presión arterial, el aprendizaje o rendimiento, el estrés entre otros) y se plantean medidas para mitigar la molestia del ruido.
- Se trata de evaluar los efectos sanitarios adversos en la salud del ruido de baja frecuencia [7].
- Se ve que el ruido puede degradar aspectos de la salud y se establecen límites de ruido nocturnos conservadores, así como distancias de retranqueo superiores a 2 km [8].

- Se examinan las directrices de ruido basadas en salud en los Países Bajos viendo que hace falta una buena comprensión de los principios básicos y de datos fiables de la exposición y los posibles efectos sanitarios [10].
- Finalmente se presenta un estudio médico en el que se examina una selección de medidas para evaluar los trastornos del sueño por ruido de turbina eólica [11], viendo que
 - el propio informe de alteración del sueño no es adecuado,
 - las medidas en base tecnológica (medios de instrumentación) pueden ser útiles,
 - los cuestionarios (tales como PSQI y SSE) se correlacionan bien con las pruebas de laboratorio además de ser una fuente económica por lo que son un punto interesante a estudiar más a fondo.

F. Van den Berg [6] presenta una visión de los efectos del ruido de turbina eólica sobre la salud residencial. El ruido de la turbina eólica parece ser un sonido relativamente preocupante cuando se compara con otras fuentes de ruido más importantes. Factores acústicos y no acústicos puede explicar esto. Tal vez el más importante es el carácter silbante o golpeante del sonido. Otros factores relevantes relacionados la molestia del sonido son su imprevisibilidad o la percepción de falta de control.

- *Molestias y trastornos del sueño* son los efectos más comunes ya que pueden ocurrir a niveles de sonido relativamente bajos.

- Efectos sobre la *presión arterial*, el *aprendizaje* o en el *rendimiento*, el *estrés* y *factores psicológicos* son, en cierta medida consecuencia de las molestias y los trastornos del sueño, y en su mayoría se producen en niveles de sonido superiores.

Un efecto importante en la salud a tener en cuenta son los trastornos del sueño pero se requieren más investigaciones para cuantificar la relación entre este efecto y el ruido de la turbina eólica.

Entre las medidas para mitigar la molestia del ruido de las turbinas eólicas están la reducción del nivel sonoro en las viviendas de los residentes (especialmente de noche) y disminuir el nivel de modulación.

G.F. Hessler y otros [7] (aún no siendo expertos en salud) realizan una serie de medidas independientes en distintas turbinas para ver los efectos sanitarios del ruido de *baja frecuencia* de las grandes turbinas eólicas. Comparan el espectro de potencia sonora calculado con criterios de molestia y con una fuente de ruido de baja frecuencia que no ha reportado efectos de salud tras ser aplicada. En base a los resultados obtenidos, el ruido de baja frecuencia no sería un gran problema a debatir en cada proyecto eólico.



Los opositores a proyectos de turbinas eólicas declaran que existe exceso de LFN (ruido de baja frecuencia) que puede ser causa de efectos adversos para la salud, aunque señalan el hecho de que no hay pruebas creíbles que muestren estos efectos adversos. *Hessler y otros* [7] basándose en estudios científicos abordan los efectos sanitarios del ruido de baja frecuencia atribuible a aerogeneradores modernos.

Para ello se desarrolla la potencia sonora de grandes aerogeneradores utilizando las mediciones independientes de 45 turbinas eólicas. Se calculan los espectros de la presión, tanto en exteriores como en interiores, para la turbina eólica más grande disponible en la actualidad a distancias típicas de un proyecto eólico.

Los espectros se comparan con los criterios de molestia de ruido de baja frecuencia desarrollados científicamente. Además, los espectros de los aerogeneradores se comparan con una fuente común de ruido de baja frecuencia a la que han estado expuestos hombres, mujeres y niños de todas las edades durante miles de millones de horas *sin efectos de enfermedad informados*.

En base a los datos de este estudio el ruido de baja frecuencia en energía eólica no sería un gran problema a debatir en cada proyecto eólico.

Un estudio hecho en Nueva Zelanda (**D. Shepherd y otros** [8]) arroja resultados de que el ruido de turbina eólica puede degradar aspectos de salud relacionados con la calidad de vida llegando a la conclusión de que durante la noche los límites de ruido de la turbina eólica se deben establecer de manera conservadora para minimizar el daño y, en base a los datos, sugieren distancias de retranqueo superiores a dos kilómetros.

La capacidad de oír permite a los humanos detectar amenazas en el entorno y comunicarse con los demás. Sin embargo, el *sonido no deseado* tiene la capacidad de evocar respuestas reflejas y emocionales y puede actuar como factor de *estrés*. La Organización Mundial de la Salud clasifica el ruido como un contaminante ambiental que degrada el sueño, la calidad de vida y la salud en general.

Investigaciones anteriores proporcionan la evidencia de una relación entre el ruido de turbina eólica y las molestias y los trastornos del sueño. Sin embargo las turbinas eólicas son una fuente relativamente nueva de ruido en la comunidad y, como tal, sus efectos sobre la salud aún no se han descrito con detalle.

Los datos del estudio proporcionan pruebas de que el ruido de turbinas eólicas puede degradar aspectos de salud relacionados con la calidad de vida y las comodidades. Con esta evidencia, las

instalaciones de aerogeneradores deben situarse con cuidado y considerar el impacto del ruido sobre la CVRS (calidad de vida relacionada con la salud) para tratar de evitar efectos adversos en la salud de los residentes cercanos.

Al igual que otros autores [9] en este estudio se llega a la conclusión de que durante la *noche* los *límites de ruido* de la turbina eólica se deben establecer de *manera conservadora* para minimizar el daño y, sobre la base de los datos, sugieren que las *distancias de retranqueo* deben ser *superiores a dos kilómetros*.

M. Van den Berg [10] muestra las directrices basadas en criterios de salud para el ruido de turbina eólica en los Países Bajos.

La derivación de las pautas basadas en salud para el ruido de la turbina eólica no debe ser diferente de las de otros ruidos lo que significa que la evaluación de las relaciones dosis-efecto para los pertinentes efectos de salud se haga utilizando indicadores adecuados de ruido, seguido de un análisis costo-beneficio. La posterior elección en base a estos criterios es lo que ofrece el nivel de protección adecuado.

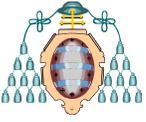
La experiencia en los Países Bajos muestra que hacer la elección de algunos factores no acústicos (e incluso no científica) puede influir. *Las directrices resultantes se basan en salud, pero el resultado exacto debe atribuirse a la política*.

Entre las directrices que se establecieron en los Países Bajos están:

- Valor límite de L_{den} 47 dB(A).
- No está previsto el ruido de fondo.
- Nuevo método de cálculo basado en la velocidad del viento en la altura de buje.
- Cada nuevo aerogenerador debe presentar un informe acústico a la autoridad competente.
- Las mediciones sólo se utilizan para controlar la potencia de sonido.
- El propietario de la turbina debe llevar un registro de producción de energía de sonido.

La preparación de la normativa neerlandesa sobre el ruido de turbina eólica demuestra que, incluso en un campo político difícil, una discusión racional sobre los límites de ruido es posible. Lo que hace falta es una buena comprensión de los principios básicos y de datos fiables acerca de la exposición y sobre los posibles efectos sanitarios.

C. Hanning y otros [11], investigadores médicos de universidades de Estados Unidos y Reino Unido, examinan una selección de medidas para evaluar los trastornos del sueño por ruido de turbina eólica.



La mayoría de los estudios hasta la fecha se han basado en informes subjetivos de despertares o dificultad para conciliar el sueño.

Son mucho más comunes los *micro-despertares* (cortos fragmentos de sueño no reparador que no se recuerdan y por tanto de mala calidad). Se pueden detectar electrofisiológicamente mediante efectos cardiovasculares secundarios o movimientos corporales. Para ello se requiere instrumentación y varias noches de grabación. Por otro lado, los cuestionarios se utilizan en medicina y se correlacionan bien con las medidas de laboratorio. Son un medio rápido y económico.

Tras este estudio se concluye que el propio informe de la alteración del sueño es una medida de resultado inadecuado para valorar los efectos sobre el sueño del ruido de turbina eólica.

Si bien las medidas de base *tecnológica* pueden ser útiles en la investigación de la causalidad y en la confirmación de las relaciones causales, los *cuestionarios simples*, tales como el *PSQI* y el *SEE* proporcionan un medio económico y eficaz de la evaluación de los efectos del ruido sobre el sueño y merecen mayor investigación.

1.3 PERCEPCIÓN DE INFRASONIDOS

A continuación se dan unos conceptos básicos sobre la percepción de infrasonidos por los seres humanos. Para más adelante explicar recientes estudios médicos de cómo el oído interno responde a infrasonidos [12] y de si esos sonidos realmente son una fuente importante de emisión de ruido de las turbinas eólicas [13].

En resumen se ve que el infrasonido continúa como un problema en la percepción del público pero no ha habido ninguna evidencia clara que apoye esto a pesar de los nuevos estudios de cómo el oído responde a los infrasonidos.

Introducción

Algunas de las características de la percepción humana del infrasonido y el sonido de baja frecuencia son las siguientes:

- El sonido de baja frecuencia y de infrasonido (2-100 Hz) se percibe como mezcla de sensaciones auditivas y táctiles.
- Las frecuencias más bajas deben ser de una magnitud superior(dB) para ser percibidas (por ejemplo el umbral de audición a 10 Hz es de alrededor de 100 dB).
- La tonalidad no puede ser percibida por debajo de alrededor de 18 Hz.
- El infrasonido no parece estar viniendo de un lugar específico debido a sus longitudes de onda largas.

La principal respuesta humana a los infrasonidos que se perciben es *molestia* (con el resultado de

efectos secundarios). Los niveles de molestia por lo general dependen de otras características del infrasonido, incluyendo la intensidad, las variaciones con el tiempo (tales como impulsos, sonido más fuerte, periodicidad entre otros). El infrasonido tiene tres *mecanismos* de molestia:

- Una sensación de presión estática.
- Los efectos de ocultación periódicos en las frecuencias medias y superiores.
- Ruidos de fuertes componentes de baja frecuencia.

Los efectos en humanos varían según la intensidad de la percepción del infrasonido y se pueden agrupar en estos rangos aproximados:

- 90 dB o inferior: No hay evidencia de efectos adversos.
- 115 dB: apatía, fatiga, síntomas abdominales, hipertensión arterial en algunos seres humanos.
- 120 dB: umbral aproximado de dolor a 10 Hz.
- 120 a 130 dB y superior: la exposición durante 24 horas provoca daños fisiológicos

No hay evidencia fiable de que los infrasonidos por debajo del umbral de percepción produzcan efectos fisiológicos o psicológicos.

A.N. Salt y otros [12], médicos del departamento de otorrinolaringología de la universidad de medicina de Washington, estudian la respuesta del oído interno al infrasonido.

Sus estudios muestran que el efecto de los infrasonidos sobre el oído humano no puede ser descartado por el simple hecho de que no se encuentre dentro del rango audible.

Hay muchos aspectos que deben ser entendidos mejor en la complejidad de la respuesta del oído a los infrasonidos antes de descartarlos como insignificantes.

Para sonidos de alta frecuencia, los estímulos acústicos en el oído se suman. En contraste, las respuestas del oído interno a infrasonidos son suprimidas por la presencia de estímulos de frecuencias muy altas, es decir, que la presencia de sonidos de alta frecuencia suprime algunos aspectos de la respuesta del oído a los infrasonidos lo que significa que en condiciones donde los niveles de infrasonidos son altos mientras que los sonidos ambientales son bajos, el oído puede ser afectado máximamente por el infrasonido. Esto puede ser *relevante* a la exposición en un *ambiente de escucha silenciosa* (por ejemplo, un dormitorio).

A la vista de estos estudios es prematuro afirmar que la exposición a largo plazo no pueda tener ningún efecto fisiológico en las personas.

C.P. Turnbull y otros [13] buscan examinar el nivel de infrasonidos de un parque eólico con respecto a niveles producidos por otras fuentes artificiales o naturales. Para ello realizan una serie de



medidas del infrasonido en las que emplean una metodología específica que desarrollan y testan.

El motivo de desarrollar una metodología específica es que la medición de infrasonido se ve fácilmente afectada por el viento en el micrófono. El método empleado se basa en mediciones realizadas por debajo de la superficie de la tierra en una cámara de prueba cuadrada que reduce la influencia de los vientos en los resultados.

Los niveles medidos de infrasonido en dos parques eólicos de Australia se han comparado con otras fuentes de ruido naturales (una playa y un acantilado costero) y provocadas por el hombre (ciudad y estación de energía) y todas las mediciones a su vez se han comparado con los umbrales de audibilidad reconocidos.

El método muestra que las turbinas eólicas *generan infrasonidos* y que *cerca* de las turbinas eólicas el nivel de *infrasonidos* está *muy por debajo del umbral de audibilidad de 85 dB(G)*. También demuestra una tasa de atenuación de 6 dB al duplicarse la distancia de una sola turbina.

Por otro lado se ve que los niveles de infrasonidos producidos por una *turbina* eólica son *similares* a los niveles producidos por *otras fuentes artificiales* o *naturales*, es decir, que el nivel de infrasonido medido cerca de una turbina eólica es frecuente en los entornos urbanos y costeros.

2 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE TURBINAS EÓLICAS: MÉTODOS DE MEDIDA Y PREDICCIÓN

Para la evaluación de ruido de un proyecto de aerogeneradores es de gran interés la propuesta anticipada del ruido de las instalaciones de turbinas eólicas. Un estudio de evaluación del ruido adecuado implica:

- 1) Una estimación o estudio de los actuales niveles ambientales de *ruido de fondo* en el emplazamiento en el que se va a colocar.
- 2) Predicción (o medición) de los *niveles de ruido* de la turbina(s) *en y cerca* del sitio.
- 3) La identificación de un *modelo de propagación* del sonido (el software de modelado de sonido incluye un modelo de propagación).
- 4) *Comparar* los niveles de presión sonora calculados de las *turbinas* eólicas con los niveles de presión sonora de *fondo* en los lugares de interés.

En definitiva, para la evaluación del impacto acústico de un parque eólico es necesario considerar el *ruido de fondo* del lugar en el que se va a colocar para *compararlo* con el nivel de presión acústica del *ruido de la turbina* y ver que cumple unos criterios que lo hacen admisible o adecuado para la instalación del mismo.

➤ El nivel de presión acústica (nivel de inmisión) se calcula mediante modelos propagación del ruido en los que es necesario tener en cuenta el ruido emitido por la turbina en cuestión (nivel de potencia acústica emitido).

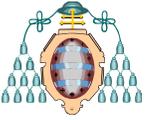
– Emisión. El ruido causado por las turbinas puede tener dos fuentes: mecánicas o aerodinámicas. En función de cada una de ellas produce un determinado tipo de ruido y existen en la actualidad una serie de modelos o métodos estudiados y empleados para reducir el impacto de los mismos, como se detalla en apartados posteriores (2.2.1).

– Propagación. Además de la emisión de ruido han de considerarse otra serie de parámetros que afectan a la propagación del ruido emitido por la turbina y que hacen que ésta varíe con la distancia de una manera determinada. Considerando estos factores se corrigen y mejoran los modelos de propagación del ruido para calcular los límites de presión acústica en función de la distancia a la que se hallen de la turbina generadora. Estos factores son entre otros la absorción del aire que es función de la frecuencia, los efectos del suelo y el entorno, bloqueos de sonido y los efectos meteorológicos como son la velocidad del viento, su dirección o la temperatura. En definitiva, factores meteorológicos y del entorno en el que están situados los parques. Una revisión bibliográfica y estudio de estos factores se hace más adelante (2.2.2).

2.1 MÉTODOS DE MEDIDA

A lo largo de este epígrafe se explican varios métodos de medida y monitoreo investigados recientemente. Se plantea una monitorización a *largo plazo* [14], la medición del *infrasonido* de parques eólicos y otras fuentes [13] (ya comentado en el apartado 1.3). Se estudia la monitorización *continua* de ruido de turbina eólica [15] y finalmente se abordan mediciones SODAR de viento como medio para perfeccionar el análisis acústico de proyectos eólicos [16]. Asimismo en el apartado 2.2.1.3 se examinan métodos de medida para la modulación de la amplitud en el ruido [17,18,19]. Se aborda la medición de ruido 'swish' (clase de ruido AM) [17,18] y un método que permite distinguir entre los distintos tipos de ruido AM ('swish' y 'thump') [19].

P. McDonald y otros [14] plantean un sistema automatizado de monitoreo a largo plazo del ruido turbinas en parques eólicos basado en tecnología de sensores robustos y de visualización vía web que presentan como una solución integral que ofrece un método sencillo y fiable para la gestión del ruido de parques eólicos. Los monitores de ruido puede ser desplegados in situ y funcionar de forma *autónoma* durante *largos períodos* de tiempo. Los resultados se



almacenan localmente y además pueden ser controlados de forma remota. Las herramientas de análisis del sistema y la visualización basada *en web* permiten la consolidación de la velocidad del viento, el clima y los datos de ruido. Esta solución integral ofrece un método sencillo y fiable para la gestión del ruido de parques eólicos con las siguientes ventajas:

- Su uso ayuda a la implementación efectiva de la nueva legislación y los métodos de evaluación del ruido. Mediante el monitoreo de los niveles de ruido durante las etapas de planificación, desarrollo y funcionamiento de la instalación de turbinas eólicas puede ofrecer una solución de ciclo de vida completo para asegurar el cumplimiento con las regulaciones.
- Puede ser utilizado por consultores acústicos para analizar los datos de niveles de ruido.

C.P. Turnbull y otros [13] estudian la medición del infrasonido de los parques eólicos. El infrasonido se ve afectado fácilmente por el viento en el micrófono lo que lleva a desarrollar y testar una metodología específica consistente en realizar mediciones por debajo de la superficie de la tierra en una cámara de prueba para reducir la influencia de los vientos en los resultados de infrasonidos. Se prueba la metodología confirmando que los niveles de infrasonido por encima del suelo y en la cámara son iguales en ausencia de vientos superficiales al medir una fuente conocida y constante de infrasonido. De esta manera se muestra con éxito un método para medir infrasonidos.

M. Dijkstra y otros [15] estudian la monitorización continua de ruido de turbina eólica. La regulación de sonido de turbinas eólicas en los Países Bajos ha cambiado recientemente pasando de usarse un nivel de ruido corregido (L_{eq}) para una noche representativa de 40 dB a un promedio anual (L_{den}) de 47 dB por lo que plantean una monitorización continua para conseguir el promedio anual. Se usan tres micrófonos colocados (según la norma IEC 6400-11) a una distancia de la turbina no muy grande para que sea factible la monitorización continua, concretamente se elige la misma que la altura del buje. Los datos que proporcionan se procesan automáticamente de modo que durante las mediciones se pueden obtener resultados de la relación entre el nivel de potencia sonora y la velocidad del viento a 10 metros, la velocidad del viento a la altura del buje, la dirección del viento y otros factores. Con estos resultados se pueden adquirir los efectos de la directividad y la cizalladura del viento. A la vista de los mismos se ve que la cizalladura del viento en condiciones atmosféricas estables puede ser un factor relevante, aunque el efecto sobre la inmisión de ruido es pequeño. Por otro lado el efecto del cambio en la ley depende del

tipo de turbina y del posicionamiento de la misma. Asimismo los resultados de la medición durante un periodo superior al año muestran diferencia entre emplazamientos cerca del mar e interiores.

M. Gianni y otros [16] estudian mediciones de viento SODAR como medio para perfeccionar el análisis acústico de proyectos eólicos. Investigan el efecto de la variabilidad de la cizalladura del viento sobre la emisión acústica de una turbina eólica. Demuestran que, incluso en un caso con orografía sencilla, los efectos térmicos de la capa límite atmosférica pueden provocar una variabilidad significativa en la cizalladura del viento (con una marcada diferencia entre los perfiles del día y de la noche). Dependiendo de la cizalladura del viento, puede haber diferentes velocidades del viento a nivel del suelo y a la altura del buje lo que hace que ruido total emitido por la turbina varíe y consecuentemente el ruido total en una casa cerca de la turbina también varía. El dispositivo SODAR puede transportarse fácilmente y utilizarse para medir el perfil del viento hasta la altura del buje. Permite discriminar efectos orográficos sobre el perfil vertical del viento e incluir de esta manera los efectos de cizalladura del viento en el análisis acústico por lo que su uso se hace especialmente atractivo en terrenos complejos.

2.2 MÉTODOS DE PREDICCIÓN

En este apartado para la predicción del nivel de presión sonora de un parque eólico se van a considerar dos puntos básicos. Por un lado el nivel de emisión de la turbina para lo que se tiene en cuenta el ruido emitido mecánica y aerodinámicamente, así como la peculiaridad del ruido de turbina eólica que es su modulación de la amplitud. Por otro lado el modelo de propagación del ruido para el cálculo del nivel de inmisión de presión sonora acústica (2.2.2).

2.2.1 NIVEL DE EMISIÓN DE RUIDO DE LA TURBINA

Hay cuatro tipos de sonido que pueden ser generados por el funcionamiento del aerogenerador:

1. Tonal. Es el sonido en frecuencias discretas. Es causado por componentes tales como engranajes, inestabilidades no aerodinámicas que interactúan con la superficie de la pala del rotor, inestabilidades de los flujos sobre los agujeros o ranuras o un borde romo.
2. Banda Ancha. Es un sonido caracterizado por una distribución continua de la presión sonora con frecuencias superiores a 100 Hz. Es causado a menudo por la interacción de los álabes de la turbina eólica con la turbulencia atmosférica y también se describe como una característica 'silbido' (swishing).
3. De baja frecuencia. Es un sonido con frecuencias en el rango de 20 a 100 Hz y se asocia sobre todo



con los rotores de las turbinas (con el rotor en el lado de sotavento de la torre). Se produce cuando el álabe de turbina se encuentra con deficiencias localizadas del flujo debido al flujo alrededor de una torre.

4. Impulsivo. Es descrito por impulsos acústicos cortos o sonidos retumbantes que varían en amplitud con el tiempo. Se produce por interacción de álabes de turbina con flujo de aire perturbado alrededor de la torre de una máquina a favor del viento.

Las fuentes de los sonidos emitidos por las turbinas eólicas en operación se pueden dividir en dos categorías: 1. sonidos mecánicos a partir de la interacción de los componentes de turbina y 2. sonidos aerodinámicos producidos por el flujo de aire sobre las palas. Por otro lado la característica dominante de ruido de turbina eólica que no puede ser mitigada por completo es la modulación de la amplitud o AM, siendo un problema que subsiste en el ruido de turbina. El ruido modulado tiene la particularidad de ser percibido como más molesto que si no tuviera ningún tipo de modulación.

2.2.1.1 SONIDOS MECÁNICOS

Los sonidos mecánicos se originan en el movimiento relativo de los componentes mecánicos y la respuesta dinámica entre ellos. Las fuentes de este tipo de sonidos incluyen: la caja de cambios, el generador, el ángulo de guiñada, ventiladores de refrigeración y equipos auxiliares (por ejemplo, hidráulica).

Dado que el sonido emitido se asocia con la rotación de equipos mecánicos y eléctricos, tiende a ser *tonal* (de una frecuencia común), aunque puede tener una componente de *banda ancha*. Por ejemplo, tonos puros pueden ser emitidos en las frecuencias de rotación de los ejes y generadores y a las frecuencias de la caja de cambios. Además, el buje, el rotor y la torre pueden actuar como altavoces: se transmite el sonido mecánico y se irradia. La vía de transmisión del sonido puede ser por el aire o a través de la estructura.

2.2.1.2 SONIDOS AERODINÁMICOS

En este apartado se revisan estudios y modelos de los distintos tipos de ruido aerodinámico con el fin de poder reducir su efecto. La importancia de reducir el impacto acústico de sonido de banda ancha aerodinámica es que normalmente es el mayor componente de las emisiones acústicas de la turbina eólica. Una característica de este sonido es que aumenta generalmente con la velocidad del rotor. Los sonidos aerodinámicos son producidos por el flujo de aire alrededor de las palas. Un gran número de fenómenos de flujo complejos pueden ocurrir pudiendo cada uno de ellos generar un sonido. Se pueden clasificar en tres grupos considerando los

diversos mecanismos aerodinámicos de generación de sonido:

1. Sonido de baja frecuencia. El sonido en la parte de baja frecuencia del espectro se genera cuando la pala giratoria se encuentra con deficiencias localizadas del flujo debido al flujo alrededor de una torre, a los cambios de velocidad del viento o a que se desprenden estelas de otras palas.
2. Sonido de entrada de la turbulencia. Depende de la cantidad de turbulencia atmosférica que resulta en fuerza local o fluctuaciones locales de presión alrededor de la pala.
3. Ruido propio de la superficie sustentadora. Este grupo incluye el sonido generado por el flujo de aire justo a lo largo de la superficie de sustentación. Es típicamente de *banda ancha*, pero pueden ocurrir componentes *tonales* debidas a borde de salida desafilado o flujo sobre ranuras y agujeros.

2.2.1.2.1 RUIDO DE BAJA FRECUENCIA

Introducción

El ruido de baja frecuencia es causado por los cambios en la velocidad del viento experimentados por las palas debidos a la presencia de la torre o cizalladura. Aunque este efecto es muy pronunciado a favor del viento, también es significativo con las máquinas contra el viento. El espectro del ruido está dominado por la frecuencia de paso de la pala típicamente de hasta 3 Hz y sus armónicos (de hasta 150 Hz). El filtro de ponderación A a estas frecuencias se atenúa en gran medida, por lo que esta fuente no tiene una importante contribución al ruido audible. Sin embargo, se informó que turbinas a favor del viento provocaron vibraciones de baja frecuencia en edificios adyacentes. Para turbinas eólicas *contra* el viento se reduce este efecto incrementando la separación entre las palas y la torre.

Se muestran a continuación recientes estudios sobre el ruido de baja frecuencia en las turbinas eólicas. En primer lugar se hace una evaluación del ruido de baja frecuencia y la modulación de amplitud en turbinas eólicas buscando indicadores de ruido óptimos [20]. Se ve como afecta el ruido a las viviendas cercanas y su percepción en interiores [21]. Se presentan medidas espectrales para la evaluación del ruido de baja frecuencia [22]. Para ya por último analizar la audibilidad del mismo [23] y a título anecdótico su monitorización y mitigación para el caso concreto de sismos en el que las vibraciones son importantes [24].

D. Siponen [20] evalúa el ruido de baja frecuencia y la modulación de amplitud de turbinas eólicas. Analiza y evalúa el uso de una ponderación A como un indicador de ruido de la turbina eólica. Al



ver que no considera los aspectos de estudio propone indicadores de ruido adicionales.

En la actualidad, casi todas las normas existentes de mediciones del ruido de turbinas eólicas utilizan el nivel de ruido con ponderación A en las estimaciones de potencia sonora lo que lleva a una *subestimación de la molestia* del ruido de las grandes turbinas eólicas modernas (debido a las características de este tipo de ruido), aumentando así el riesgo de molestia del ruido y los efectos adversos del ruido para la salud de los residentes que viven cerca. El uso de niveles de ponderación A no indica la cantidad de variaciones temporales y el ruido de baja frecuencia que la señal medida contiene por lo que no es un indicador suficiente. Por esta razón propone indicadores de ruido adicionales que tienen que cumplir tres requisitos importantes: 1. Ser lo bastante simples para que se puedan calcular con los medidores de nivel de sonido existentes y por lo tanto que no requieran ninguna mejora hardware. 2. Deben ser usados correctamente para evitar descuidar aspectos perjudiciales del ruido y 3. No incluir modificaciones drásticas en las regulaciones actuales de niveles de inmisión de ruido en los países. Un indicador de ruido podría ser el nivel de presión total de sonido L_{Ceq} C-ponderado. Sin embargo este indicador de ruido puede no ser el óptimo ya que prácticamente todas las regulaciones de inmisión de ruido se basan en un nivel total de presión acústica L_{Aeq} A-ponderado. El indicador de ruido que cumple todos los requisitos es una corrección del nivel de ruido de turbinas eólicas basada en la diferencia entre ponderación C y A, $L_{Ceq-Aeq} = L_{Ceq} - L_{Aeq}$, teniéndose en cuenta que este indicador de ruido se debe calcular en el punto de inmisión, no en el punto de emisión.

P. Lindkvist y otros [21] analizan el ruido de baja frecuencia en interiores para ello comparan espectros de frecuencia de mediciones de ruido de turbina con el aislamiento sonoro de las viviendas, llegando a la conclusión de que no excediendo los límites de nivel de presión acústica de ruido marcados por la normas en Suecia (40 dBA) se puede considerar suficiente el aislamiento de las viviendas para estas frecuencias de ruido. En residencias típicas las primeras frecuencias propias ocurren entre 30-60 Hz aproximadamente. En bandas de tercios de octava de 31,5-100 Hz, los niveles de ruido de la turbina eólica pueden ser de varios dB por debajo de las directrices de interior. Por tanto, el *aislamiento de fachadas* en estas frecuencias en la mayoría de los casos *no es de preocupación*. Se recomienda en las mediciones de baja frecuencia en la habitación un método que reconozca el patrón de onda estacionaria que aparece en bajas frecuencias.

M. Terlich [22] considera la medición espectral de niveles de ruido ambiente en la evaluación de parques eólicos. El uso de este método permite evaluar el contenido de baja frecuencia y confirmar la relación entre la velocidad del viento y el nivel de ruido ambiental sin influencia del ruido biológico de temporada. Utiliza registradores de ruido de tercios de octava colocados en combinación con medidas meteorológicas a dos alturas de referencia diferentes para evaluar el contenido de baja frecuencia de los registros de ruido base, así como la contribución de ruido biológico estacional episódico. Examina los efectos del perfil de velocidad del viento en los niveles de ruido ambiental medidos. Las evaluaciones de niveles de ruido de fondo con registradores de ruido de *banda ancha* pueden resultar en una sobreestimación de los niveles de ruido ambiente de hasta 17 dBA. Mientras que el registro de ruido espectral permite la identificación y eliminación de contribuciones ajenas con un mayor grado de confianza, usando algoritmos matemáticos para extraer o eliminar las contribuciones de las bandas de frecuencia específica y el nuevo cálculo de los niveles de ruido total agregado que forman el ruido de base (ABL o RBL). El uso de este método de mediciones de ruido espectrales permite confirmar la relación entre la velocidad del viento y el nivel de ruido ambiental de parques eólicos sin la influencia del ruido biológico de temporada, que podría de otro modo distorsionar la relación evaluada. Asimismo se prevé de ayuda con las quejas de ruido al conocerse el contenido espectral antes y después, lo que permite una evaluación más rigurosa del ruido de baja frecuencia y de cualquier tonalidad identificada.

M.A. Swinbanks [23] investiga la audibilidad de baja frecuencia mediante simulación dinámica en el dominio del tiempo de la respuesta del oído, llegando a concluir que los infrasonidos de las turbinas eólicas y los ruidos de baja frecuencia pueden ser perceptibles a niveles significativamente más bajos que lo que hasta ahora se ha reconocido. Se investiga un riguroso método de definición de los límites inferiores de la audibilidad o percepción basado en la integración acumulada de espectros de banda ancha arbitrarios. Se ha demostrado que para espectros típicos de turbinas eólicas, el límite superior de frecuencia asociada con este criterio se corresponde con la intersección de niveles de 1/3 de octava con el umbral convencional de la audición. Este criterio sin embargo no tiene en cuenta niveles de pico mucho mayores que se producen en los campos de sonido reales de turbinas eólicas. Las configuraciones de rotor contra el viento de turbinas eólicas modernas pueden dar lugar a patrones de sonido impulsivo de muy baja frecuencia, efecto que se cree es debido a



los gradientes de viento y sombras por las obstrucciones y se transmite para turbinas de rotor a barlovento. Con los resultados obtenidos, se considera que una señal limpia impulsiva de baja frecuencia puede ser *audible* a *niveles 8-11 dB* por *debajo del umbral* definido conforme a la energía media cuadrática. Como en la banda de banda ancha el ruido se mezcla cada vez más con el espectro limpio, este margen se reduce progresivamente a un valor de aproximadamente *5 dB* por debajo del umbral convencional. Como consecuencia la baja frecuencia y el ruido de infrasonidos de turbinas a favor del viento puede ser audible en niveles de ruido significativamente más bajos de lo que hasta ahora se ha reconocido.

P. Styles y otros [24] tratan el monitoreo y mitigación de ruido de baja frecuencia para un caso concreto (seísmos) en el que las vibraciones son importantes. Llevan a cabo una monitorización microsísmica y de la vibración en un parque de Escocia. La tecnología abordada en esta investigación también tiene potencial para su aplicación en instalaciones críticas como el LIGO o el LHC del CERN y el 'Observatorio Gravitacional Battelle' en EE.UU.

2.2.1.2.2 RUIDO DE ENTRADA DE TURBULENCIA

La entrada de turbulencia crea ruido de *banda ancha* cuando las palas interactúan con los remolinos causados por la turbulencia atmosférica. Genera frecuencias *de hasta 1000 Hz*, que son percibidas por un observador como un 'silbido' de ruido. Este ruido está influido por la *velocidad de la pala*, *sección de perfil aerodinámico* y la *intensidad de la turbulencia*.

Wagner, Bareis y Guidati (1996) describen este fenómeno con cierto detalle, señalando que aún *no está completamente entendido*.

2.2.1.2.3 RUIDO PROPIO DE LA SUPERFICIE SUSTENTADORA

El ruido propio de la superficie sustentadora es generado por la propia superficie de sustentación, incluso en flujo constante sin turbulencia. Es típicamente de *banda ancha*, aunque las imperfecciones en la superficie de la pala pueden generar *componentes tonales*. Los principales tipos de ruido propio de la superficie sustentadora son: ruido del borde de salida, ruido en la punta, efectos de entrada en pérdidas, ruido del borde salida desafilado e imperfecciones superficiales.

A continuación se muestran dos estudios sobre este tipo de ruido ([25,26]) para posteriormente analizar los distintos tipos de ruido propio de la superficie sustentadora.

S. Xue y otros [25] realizan un modelado aeroacústico de la pala/superficie de sustentación.

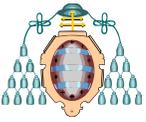
Desarrollan un sistema de simulación aeroacústica exhaustivo de turbinas eólicas.

El ruido computado de la superficie de sustentación y del rotor en dominios de tiempo y frecuencia se correlaciona con los datos obtenidos en test en túneles de viento con cámara anecoica para el ruido aeroacústico de la pala de sustentación y con un nuevo test de campo para el ruido aeroacústico del rotor. Esta comparación permite la validación del modelo. Esta herramienta será utilizada para llevar a cabo la optimización de la turbina mediante diseño avanzado de la pala/superficie de sustentación y el control del rotor. Los mecanismos clave en la generación aeroacústica de ruido de turbina eólica y que son evaluados mediante estudios paramétricos incluyen: RPM, la interacción de la pala con la torre, el ruido de banda ancha de superficie de sustentación, el diseño de la pala (como barrido de punta), las entradas de control del rotor y la turbulencia atmosférica.

Se ha encontrado que el ruido de la turbina eólica tiene un fuerte acoplamiento con la aerodinámica y la dinámica del rotor. Así, la reducción de ruido se puede lograr con la optimización del diseño y control del rotor teniendo en cuenta tanto el rendimiento de la turbina eólica como el ruido al mismo tiempo. También se encuentra que la tecnología de pruebas de campo de serie acústica es una herramienta eficaz para suprimir el ruido de fondo y separar el ruido del rotor en función del ruido mecánico de la góndola por lo que se considera interesante continuar trabajando en esta tecnología.

B. Petitjean y otros [26] abordan tecnologías de mitigación de ruido de la pala de una turbina eólica. Ofrecen una visión general de los estudios más recientes de GE en tecnologías de álabes de turbina eólica de bajo ruido para el vórtice de la punta y la mitigación del ruido de borde de salida.

Se prueban *varias geometrías de punta* en una plataforma de aerogeneradores de GE 2,5 MW. Los resultados muestran que las formas de punta pueden afectar significativamente al ruido de la pala, particularmente en el rango de *frecuencia más alta*. Las *formas integrales* de puntas de bajo ruido proporcionan una disminución de 6.5 dB(A) en el nivel aparente de potencia acústica en comparación con una punta desafilada. Tras numerosas pruebas de túnel de viento se seleccionan una serie de conceptos de reducción de ruido de borde de salida que se muestran a continuación. Las *estrías* fueron seleccionadas para las pruebas de campo a gran escala y adaptadas en tres plataformas diferentes de viento con diferentes diseños de palas. Las *palas de sierra* ofrecen una disminución de 2-4 dB(A) en el nivel aparente de potencia acústica en comparación



con el original (sin sierra). Tanto las formas de bajo ruido de punta como la tecnología dentada se han aplicado en los diseños de pala GE más recientes. La combinación de estas tecnologías de bajo ruido para el ruido de vórtice de punta y del borde de salida representa un avance importante hacia unas turbinas eólicas mejor aceptadas y *más silenciosas*.

2.2.1.2.3.1 Ruido del borde de salida

El ruido del borde de salida se percibe como un sonido *silbante de banda ancha* con frecuencias en el rango de 750-2000 Hz. Es debido a la interacción de la capa límite turbulenta con el borde posterior de la pala. Es una *fente importante de ruido de alta frecuencia* en las turbinas eólicas.

M. Kamruzzaman y otros [27] abordan la implementación y verificación de una herramienta de análisis acústico de la pala de los aerogeneradores. Concretamente desarrollan una herramienta de simulación aeroacústica (IAGNoise) basándose en la mejora del modelo de predicción de ruido del borde de salida TNO-Blake. El modelo consiste en dividir las palas de la turbina eólica en dos secciones bidimensionales de la superficie de sustentación y en la predicción de la emisión de ruido total como la suma de la contribución de cada elemento de la pala. La principal entrada para el modelo de predicción de ruido son las distribuciones normales de los parámetros de la capa límite turbulenta de la pared. El cálculo de estos parámetros con los códigos de simulación aerodinámica requiere las características locales de entrada a las palas. Para predecir estas cantidades se emplea la técnica de 'impulso de elemento de pala'. Por otra parte la herramienta de simulación incorpora tres esquemas distintos de predicción 2D: Xnoise, XEnoise y Rnoise, cada uno de los cuales usa diferentes métodos de cálculo aerodinámico XFOIL, código de diferencias finitas EDDYBL y solver RANS FLOWer respectivamente. El modelo de esta herramienta de predicción ha sido probado mediante aerogeneradores Bonus de 300 kW a una velocidad del viento de 8 m/s. Los espectros de las fuentes de ruido del borde de salida se determinan y comparan con las mediciones realizadas. La comparación de los espectros de ruido total del borde de salida con el conjunto de las mediciones del ruido del rotor muestra un claro offset de aproximadamente 6-10 dB. Al examinar la predicción del modelo BPM, todos los espectros de la fuente de ruido presentan ruido de entrada en turbulencia como dominante. Sin embargo las predicciones BPM y Xnoise del espectro de ruido del borde de salida concuerdan con otros resultados de código de predicción. La predicción RANS basada en el código Rnoise ofrece resultados prometedores en 2D, que se implementarán en el futuro en el marco

de 3D. Por tanto el estudio de sensibilidad sobre distintos parámetros de diseño llevado a cabo arroja resultados primarios alentadores.

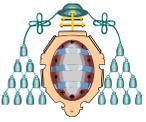
A. Wolf y otros [28] estudian la reducción del ruido del borde de salida por control de flujo activo. Este método permite reducir el ruido del borde de salida y aumentar el rendimiento de la turbina. Consideran la *aspiración constante* y muestran mediante simulación CFD el impacto en varios parámetros de la capa límite (como la longitud de escala, la energía cinética turbulenta y el perfil de velocidad que conduce a una reducción significativa de las fluctuaciones de presión dentro de la capa límite) que influyen en la emisión de ruido del borde de salida. Las mediciones aeroacústicas en el túnel de viento laminar de la Universidad de Stuttgart muestran que el ruido del borde de salida se puede *reducir por medio de succión distribuida* alrededor de 5 dB. Por lo que los resultados numéricos y experimentales confirman que la *aspiración constante* conduce a una *reducción significativa de ruido del borde de salida*.

S. Lee y otros [29] abordan el modelado en el tiempo del ruido aerodinámico de turbinas eólicas, considerando el ruido del borde de salida la principal fuente de ruido de la turbina eólica e incluyendo únicamente esta fuente en la predicción. Presentan un estudio *numérico* para *modelar la amplitud de modulación* del ruido aerodinámico de una turbina eólica genérica de 2,5 MW. Las palas del rotor se modelan como la combinación de una delgada placa rectangular plana que se supone que se mueve con ángulo de ataque nulo. La presión acústica radiada por la superficie de la pala se calcula utilizando el término de carga de 'Formulación 1A de Farassat'. Se deriva analíticamente una distribución de la superficie de presión inestable del modelo propuesto por Amiet. La validación del modelo de predicción numérica también se lleva a cabo mediante la comparación con un estudio experimental.

Como conclusión, mediante la aplicación de este método numérico al modelo del rotor, se predijo con éxito la presión acústica radiada desde el álabe de turbina eólica. Además con el uso de la presión acústica predicha pueden ser obtenidos los espectros de la banda de 1/3 octava y su profundidad de modulación a una distancia lejos de la turbina. El resultado mostró que la *modulación de amplitud* es *mayor en la dirección de viento cruzado*, pero no existe en dirección a barlovento y sotavento. También se encontró que a *distancias grandes* la *profundidad de modulación no disminuye con el aumento de la distancia*.

2.2.1.2.3.2 Ruido en la punta

La literatura no es clara en cuanto a si los efectos tridimensionales de la punta son un importante



contribuyente al ruido de turbina eólica. Sin embargo, la mayoría del ruido de la pala, así como la potencia de la turbina, emana desde el 25 por ciento exterior de la pala y por ello ha habido una considerable investigación en puntas de pala nuevas para reducir el ruido. Las imperfecciones en la forma de la pala debidas 'tip-brakes' (frenos de punta) o en otras superficies de control son otra fuente potencial de ruido.

2.2.1.2.3.3 Efectos de entrada en pérdidas

La pala parada causa flujo inestable alrededor de la superficie de sustentación que puede dar lugar a la radiación de *banda ancha* de sonido.

2.2.1.2.3.4 Ruido del borde salida desafilado

Un borde romo puede dar lugar a desprendimiento de vórtices y ruido *tonal*. Se puede evitar afilando el borde de salida, pero esto tiene implicaciones en la fabricación y montaje.

2.2.1.2.3.5 Imperfecciones Superficiales

Las imperfecciones superficiales tales como las causadas por el daño durante el montaje debido a la caída de rayos pueden ser una fuente importante de ruido *tonal*.

2.2.1.3 MODULACIÓN DE LA AMPLITUD

Introducción

La característica dominante de ruido de turbina eólica que *no* puede ser *mitigada por completo* es la modulación de la amplitud o AM, siendo un problema que subsiste en el ruido de la turbina. El ruido modulado tiene la particularidad de ser percibido como *más molesto* que si el ruido no tuviera ningún tipo de modulación. Existen dos tipos de ruido de amplitud modulada: ruido de 'silbido' (swish) y ruido sordo en la base (thump).

Los métodos estándar utilizados para medir el ruido de las turbinas eólicas emplean el nivel de sonido ponderado L_{aeq} . Debido a las características de ruido de turbina eólica, este no es un indicador suficiente ya que no muestra la cantidad de variaciones temporales y el ruido de baja frecuencia que la señal medida contiene.

Los ruidos con modulación de la amplitud son los problemas que subsisten en el ruido de la turbina eólica. Sin embargo, ha habido un verdadero desarrollo en la comprensión de éstos. En este apartado se muestran recientes estudios sobre la AM. En primer lugar se analizan las causas de este ruido [13] y posteriormente se plantean tres métodos para su medición. Los dos primeros se centran en el estudio del tipo de ruido 'swish' [17,18] y el último en la medición de AM [19], siendo este último de particular interés a parte de por sus numerosas ventajas por ser

capaz de permitir distinguir entre los tipos de ruido AM ('swish' y 'thump').

Causas de ruido AM

A. Bullmore y otros [30] tratan de entender las causas de la modulación de la amplitud de las turbinas eólicas. Abordan los mecanismos que causan mayor AM para poder minimizar mediante diseño el riesgo de que tenga lugar (antes de la instalación) y tomar medidas correctivas eficaces si se presenta después de la instalación. Un posible mecanismo causante de AM es la *variación cíclica de la carga de la hoja* causada por el flujo aerodinámico de la entrada no uniforme a través del disco del rotor, posiblemente como resultado de la cizalladura del viento, error de orientación o la turbulencia atmosférica de gran escala. En un receptor lejano, la percepción de AM también puede estar influenciada por los efectos de propagación resultantes de los factores *atmosféricos*, los cambios en los niveles de *ruido de fondo* o la interacción entre el ruido de modulación de una serie de turbinas.

Métodos de medida del ruido de 'silbido' (swish)

G. Lundmark [17] propone un nuevo método para la medida del ruido swish. Entre los diferentes factores que afectan a la modulación se encuentran: distintos diseños de la turbina, la regulación de potencia y las condiciones meteorológicas. Con los métodos de medida estándar no es posible distinguir el ruido swish de la turbina eólica. Concretamente el estándar de medida IEC 61400-11 que da una descripción detallada de cómo realizar las medidas sólo menciona el análisis de este ruido como opcional. La idea principal del método es manejar la señal de tiempo con el mismo tiempo de integración que el oído. La medición del ruido swish constaría de dos pasos: en primer lugar el registro de niveles de presión acústica instantánea muestreada a 8 veces/s (constante de tiempo=125 ms) y en segundo el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la serie numérica de tiempo para identificar y cuantificar la modulación de amplitud, frecuencia y fuerza. Las mediciones se pueden hacer con medidor de nivel de sonido y el cálculo de la FFT con funciones del Analysis ToolPak de Excel.

El método sugerido parece funcionar bien ya que permite establecer una diferencia evidente entre el ruido sin modular y el ruido modulado de la turbina pudiendo ser un buen punto de partida para futuras investigaciones de AM que ayuden al desarrollo de aerogeneradores con características de ruido menos molestas con el mismo nivel de dB(A). Por otro lado, el método es susceptible de mejorar (FFT de cálculo, promedio del espectro AM).



T.H. Pedersen y otros [18] proponen un método de medida de los tonos en el ruido y un método de evaluación del ruido *swish* basado en principios psicoacústicos. El ruido de la turbina eólica debido a sus características especiales puede ser escuchado a través del ruido de fondo. Las principales características son el contenido tonal de las partes mecánicas, el ruido silbante aerodinámico de las aspas y en cierta medida el ruido de baja frecuencia. Un método objetivo para la importancia de los tonos que enmascara el ruido de banda ancha se describe en la norma ISO 1996-2 Anexo C. Se ha demostrado que el método se correlaciona bien con la prueba de audición (también en bajas frecuencias) y pruebas de aptitud para el método muestran que diferentes laboratorios son capaces de obtener resultados similares dentro de tolerancias aceptables.

Si el ruido silbante es considerado como modulación de amplitud psicoacústica conocida es posible predecir si este fenómeno está enmascarado por el ruido de fondo. Basándose en esto describen una métrica para la característica silbante *swish*. Se compara un análisis de frecuencia del ruido de banda ancha con el nivel de audición para intentar determinar si el ruido es audible. Por lo general, se ignora el ancho de banda del analizador, aunque el uso de diferentes anchos de banda puede desplazar el espectro sobre 20-25 dB.

En conclusión, un método basado en principios psicoacústicos permite comparar el ruido de banda ancha de baja frecuencia con el umbral de audición tal que da los mismos resultados independientemente del analizador de ancho de banda.

Método de medida del ruido AM

D. McLaughlin [19] presenta un método basado en la medición del espectro de modulación de ruido de banda ancha que presenta numerosas ventajas entre ellas que permite distinguir entre los distintos tipo de AM (*swish* y *thump*).

La medición del espectro de modulación de ruido de banda ancha es bien conocida en la comunidad sonar. Es un método que se ha demostrado durante muchos años que puede ser utilizado en tiempo real y que proporciona una medida objetiva de la modulación de amplitud. Una descripción simplificada del método es: 1. Filtrar los datos muestreados para el rango de frecuencias del ruido de banda ancha, 2. Cuadrar los datos filtrados, 3. Realizar un análisis espectral de la salida por Transformada Rápida de Fourier (FFT). El resultado de este proceso es el espectro de modulación (una gráfica de modulación de amplitud de la frecuencia). Este procedimiento tiene muchas ventajas entre las que están:

– La modulación aperiódica queda excluida automáticamente.

- La modulación periódica se detecta como un pico o picos en el espectro de modulación.
- El ruido modulado se espera que ocurra en la frecuencia de paso de la pala y sus armónicos.
- Si la frecuencia del eje de rotación está presente, esto sugiere que la fuente puede ser debida a una hoja más que las otras.
- Si la amplitud en el tiempo no sigue una senoide lisa, sino que varía de alguna manera periódica, esto se reflejará en un espectro de modulación con múltiples picos en los armónicos de la frecuencia fundamental.
- Los tipos de AM como '*swish*' y '*thump*' pueden ser distinguidos por diferentes armónicos en el espectro de modulación o por diferencias en el espectro de frecuencia del ruido de fondo que es modulado. La diferencia entre *swish* y *thump* parece estar principalmente en las frecuencias en que el ruido es modulado, con *swish* predominante en la octava de 1 kHz y *thump* en las octavas de 250 Hz. Una mejor comprensión de las diferentes características de los diferentes tipos de AM ayuda a los operadores de parques eólicos en la gestión de sus activos y a los fabricantes de turbinas eólicas en el perfeccionamiento de sus productos.

2.2.2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO PARA LA PREDICCIÓN DEL NIVEL DE INMISIÓN DE PRESIÓN SONORA

Tras una introducción, se presentan cuatro estudios de modelos de propagación del sonido. Uno analiza el modelo en un terreno complejo [31], otro en terreno forestal [32]. El siguiente a partir de mediciones a largo plazo intenta mejorar el modelo de propagación [33] y el último integra aspectos teóricos, experimentales y de software [34].

Introducción

Con el fin de predecir el nivel de presión sonora a una distancia desde la fuente con un nivel de potencia sonora conocida, se debe determinar cómo las ondas sonoras se propagan, es decir, aplicar un modelo de propagación del sonido. En general, a medida que se aleja el sonido (cuando se propaga sin obstrucción desde una fuente puntual) el nivel de presión sonora disminuye. La energía inicial en el sonido se distribuye sobre un área mayor y mayor con el aumento de la distancia desde la fuente. El desarrollo de un modelo de propagación del sonido debe incluir generalmente los siguientes factores:

- Características de la fuente (directividad, altura).
- Distancia de la fuente del observador.
- Absorción del aire (que depende de la frecuencia).
- Efectos del suelo (la reflexión y la absorción de sonido en el suelo que depende de la altura de la



fuerza, cobertura del terreno, propiedades del suelo y frecuencia).

- Bloqueo de sonido por obstrucciones y terreno irregular.
- Los efectos del tiempo (la velocidad del viento, su variación o la temperatura con la altura).
- La dirección predominante del viento puede causar diferencias en los niveles de presión del sonido entre posiciones de barlovento y sotavento.
- La forma de la tierra (si puede enfocar el sonido).

Un modelo simple utilizado a menudo se basa en la suposición de la propagación del sonido hemisférica sobre una superficie reflectante, incluyendo la absorción de aire. Matemáticamente sería:

$$L_p = L_w - 10 \log_{10}(2\pi R^2) - \alpha R$$

dónde L_p es el nivel de presión sonora, una distancia R de una fuente de sonido radiante en un nivel de potencia L_w y α es el coeficiente de absorción del sonido dependiente de la frecuencia. Esta ecuación puede utilizarse con cualquiera de los niveles de potencia sonora de banda ancha. El total del sonido producido por múltiples turbinas eólicas se calcula mediante la suma de los niveles sonoros debidos a cada turbina en un lugar específico utilizando esta fórmula. Para aplicar el modelo de propagación del sonido en un entorno determinado habría que determinar parámetros de entrada (absorción del suelo y del aire) y usar el modelo corregido.

K. Bolin y otros [31] presentan los resultados de un estudio *computacional* de la propagación del ruido de turbina eólica en un terreno *complejo* con diferentes alturas del terreno y condiciones de superficie al norte de Suecia. El objetivo del estudio es investigar las variaciones de la exposición de dosis de ruido en el suelo con las condiciones atmosféricas y terrestres a escalas de tiempo que se extienden desde la diurna a la estacional. Se usan dos modelos diferentes de propagación de sonido basados respectivamente en: una aproximación de ecuación parabólica y una técnica híbrida 'ray-tracing/Gaussian beam'. Como entradas de los modelos de propagación se utilizan: entradas meteorológicas del modelo de pronóstico HIRLAM, datos geográficos de la altitud y el tipo de terreno de los mapas digitales. Los resultados se comparan con la exposición al ruido obtenido suponiendo una propagación esférica como en la norma ISO 9613.

Como ventajas, este procedimiento permite (además de calcular una dosis de ruido nominal como la norma ISO 9613) el cálculo de los mapas de ruido reales y las distribuciones de ruido que se espera puedan dar una mejor comprensión y predicciones más precisas en la estimación de la molestia causada

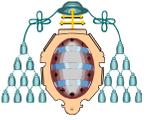
por las turbinas eólicas. Además, este método daría cálculos mejores que las estimaciones inexactas dadas por la norma ISO 9613, actualmente de amplio uso.

E. Johansson y otros [32] tratan la amplificación del ruido en *terrenos forestales*. Tras observar que el nivel sonoro en el interior de un bosque era mayor de lo esperado, analizan las causas posibles. Se desarrolla un método de cálculo que se compara con las mediciones realizadas en distintos lugares y condiciones meteorológicas.

Se establecen como posibles causas del aumento sonoro: la *reverberación* en el bosque, la *refracción del clima* y efecto de *dispersión de los troncos de los árboles* que contribuye a la reverberación (pero también reduce la atenuación del efecto suelo). Se realizan mediciones de estos parámetros en distintos momentos, lugares y condiciones meteorológicas. El método de cálculo ha integrado un modelo utilizado dentro de una sala de acústica para combinar la reverberación con el nivel de presión sonora en el bosque. De este modo, el bosque ha sido considerado como una habitación. Su debilidad es que es difícil determinar las dimensiones de la 'sala de los bosques'.

Los autores han demostrado que la *reverberación* en bosques aumenta con la distancia lo que se relaciona con una mayor cantidad de energía sonora dispersa y un aumento del volumen de la 'sala de los bosques'. La *retrodispersión de los troncos* de los árboles reduce el efecto del suelo en las frecuencias medias y bajas, cuando el sonido dispersado perturba la coherencia entre el sonido reflejado y directo. Sin embargo, la razón más fuerte para el aumento del nivel de presión sonora es probablemente, el *microclima* en el interior del bosque causante de la baja refracción del sonido. Asimismo los resultados de los cálculos muestran que puede haber un aumento considerable del nivel de presión sonora dentro de los bosques, pero sobre todo para las frecuencias bajas y medias. El efecto del suelo puede no aumentar el nivel de presión sonora más de 6 dB. Para las ondas sonoras que pasan a través de un bosque, el sonido se atenúa más que si el bosque no estuviera.

C. Larsson y otros [33] realizan mediciones a largo plazo del sonido de turbinas eólicas en distintos emplazamientos con el fin de mejorar el conocimiento de la propagación del sonido y por tanto el modelo usado para la misma. Con estas mediciones se valida y mejora el modelo de propagación del sonido Nord2000 para terreno y condiciones climáticas variables. Asimismo se usa un modelo de capa límite meteorológica para producir datos de entrada al modelo de propagación del



sonido para una localización geográfica específica lo que permite mejorar el modelo de propagación del sonido.

Las mediciones a largo plazo (continuas durante 1-2 años), para establecer los efectos meteorológicos sobre la propagación del sonido de las turbinas eólicas, se realizan en tres sitios representativos de las condiciones típicas de Suecia (superficie forestal, una bahía de aguas y un terreno heterogéneo). Estas mediciones dan una distribución fiable del nivel de sonido según las condiciones meteorológicas durante el año, pero deben ser cuidadosamente analizadas para excluir perturbaciones de otras fuentes. La altura de buje de los aerogeneradores estudiados varía desde 80 hasta 138 metros y se investiga el efecto de las alturas de origen en la propagación del sonido. Se obtiene que la propagación del sonido en bosque y terreno montañoso es muy compleja y los parámetros meteorológicos se comportan de manera diferente a campo abierto y terreno llano.

Con estas predicciones a largo plazo en diferentes terrenos y condiciones climáticas se pueden mejorar modelos de propagación del sonido como el modelo Nord2000. Además para mejorar aún más el modelo de propagación se puede usar para producir los datos meteorológicos de entrada un modelo de capa límite meteorológica como el modelo MIUU.

C. Guarnaccia y otros [34] muestran un modelo de propagación del ruido de parque eólico que integra *cuestiones teóricas, experimentales y de software*. Se centran en la caracterización del ruido procedente de parques eólicos ya en funcionamiento o en construcción (desde el punto de vista predictivo).

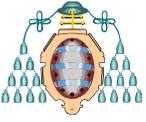
A partir de los datos geométricos y técnicos de la finca analizan el *nivel de potencia* de sonido de la turbina. Con los datos de viento (dirección y velocidad) en una zona determinada realizan la caracterización de la *fuentes*. El punto crucial es la elección del modelo de propagación. Los autores analizan el impacto del ruido de turbina por medio de modelos de propagación diferentes en comparación con un mapa de ruido de software comercial y las medidas experimentales. La turbina se caracteriza y aproxima a una fuente puntual. Esta hipótesis conduce a un modelo de propagación de ruido teórico específico. La función es similar a Lorenz y puede ser estudiada analíticamente. El modelo teórico ha sido puesto a prueba con el software predictivo Canda y comparado con las mediciones experimentales. Estas mediciones se han utilizado para ajustar los parámetros de las simulaciones, lo que lleva a los autores a obtener un mapa de ruido total del área a investigar. Una vez que el nivel de la fuente de alimentación se ha ajustado, se puede realizar fácilmente la predicción de situaciones diferentes.

En conclusión, este estudio se ha realizado en términos de un enfoque teórico, un análisis experimental y las simulaciones predictivas de software para la propagación del ruido de parque eólico, lo que supone una integración de cuestiones teóricas, experimentales y de software. Muy a menudo estos elementos no se consideran en conjunto.

2.2.3 CONTROL (Y REDUCCIÓN) DEL RUIDO EMITIDO POR LA TURBUNA

Como técnicas para reducir el ruido aerodinámico se plantean: 1. El enfoque obvio de disminuir la velocidad de rotación del rotor, aunque esto puede resultar en cierta pérdida de energía. La capacidad de reducir el ruido en condiciones de baja velocidad del viento es un gran beneficio de los aerogeneradores de velocidad variable o de dos velocidades. 2. Una técnica alternativa sería reducir el ángulo de ataque de la pala, aunque de nuevo con una pérdida potencial de energía. Bestialidad y otros (1993) ofrecen una descripción completa de *métodos de control de ruido* que se aplican a un aerogenerador de 300 kW. La *caja de cambios* fue identificada como una fuente importante de ruido *tonal*, mecánico. Las medidas de control incluyen modificaciones detalladas en el diseño y la fabricación de los engranajes y una cubierta aislante adicional sobre la caja de cambios. El ruido del *motor* mecánico fue minimizado por el cierre total de la góndola y el cuidadoso diseño de pantallas acústicas en las aberturas de ventilación. El ruido *estructural* se redujo por montaje de caucho en la caja de engranajes y en el generador y usando de un acoplamiento de caucho en el eje de alta velocidad. El largo del eje de baja velocidad reduce las vibraciones (del tren de accionamiento) transmitidas al rotor. El ruido *en la punta* fue minimizado por el uso de un 'torpedo' en la punta para controlar vórtices en la punta. El ruido *del borde salida* se controló mediante la especificación de un espesor de 1-2 mm detrás del borde. El ruido *de entrada en pérdidas* se redujo mediante el uso de una tira 'tabulador' en el borde de ataque de las hojas cerca de la punta que inició la entrada en pérdidas de una manera controlada.

En general estas medidas se tradujeron en una reducción del nivel de potencia acústica de 3-4 dB y en la eliminación de tonos significativos. Los métodos de control de ruido más importantes resultaron ser la modificación en la punta, la entrada en pérdidas controlada y las mejoras en la caja de cambios. El nivel de potencia sonora de la turbina eólica mejorada medido fue de 96 dB(A) a una velocidad del viento de 8 m/s (medida a 10 m de altura).



3 REGULACIONES, NORMATIVAS Y POLÍTICAS DE PLANIFICACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

3.1 NORMAS DE MEDICIÓN DE NIVELES DE POTENCIA ACÚSTICA

Existen normas para la medición de los niveles de potencia acústica de las turbinas eólicas a escala comercial, así como normas locales o nacionales para los niveles de potencia de ruido aceptables.

El estándar aceptado internacionalmente para asegurar medidas coherentes y comparables de los niveles de escala de servicios públicos de aerogeneradores de potencia acústica es el Estándar *IEC 61400-11: Sistemas de Aerogeneradores - Parte 11: técnicas de medición de ruido acústico*. En la norma IEC 61400-11 se definen:

- La calidad, el tipo y la calibración de los instrumentos que se utilizarán para medir la velocidad de sonido y el viento.
- Los lugares y tipos de mediciones a realizar.
- Reducción de datos y presentación de informes.

La norma requiere mediciones de banda ancha de sonido, los niveles de sonido en bandas de tercios de octava y la tonalidad. Estas mediciones se usan para determinar el nivel de potencia sonora de la turbina eólica en la góndola y la existencia de cualquier frecuencia específica de sonido dominante. Las mediciones deben hacerse cuando las velocidades del viento a una altura de 10 m son 6, 7, 8, 9 y 10 m/s.

Las mediciones de la *directividad* del ruido, *infrasonido* (<20 Hz), el ruido de *baja frecuencia* (20-100Hz) y la *impulsividad* (una medida de la magnitud de los ruidos sordos) son *opcionales*.

Los niveles de potencia sonora de las turbinas eólicas son función de la *potencia* eléctrica nominal. Las emisiones de sonido de las turbinas eólicas aumentan en general con el *tamaño* de la turbina.

La *nueva versión* de la norma de medición ha mejorado de forma significativa, especialmente en el análisis y la parte de tratamiento de datos. Esta nueva norma es más genérica en cuanto a escalas se refiere, es decir, considera turbinas de gran tamaño y dedica un *anexo* a las turbinas de *pequeño tamaño* [35].

B. Desenvergar [35] evalúa la nueva versión de la norma IEC 61400-11.

La norma se ha mejorado de forma significativa, especialmente en la parte de análisis y tratamiento de datos dando como resultado una norma más amplia y compleja.

La nueva norma es capaz de hacer frente a situaciones en las que la edición anterior de la norma no puede dar resultados, por ejemplo con mucho ruido de fondo y con curvas de potencia con el carácter gradual.

Asimismo considera distintas escalas de turbinas, dedicándole el texto general a turbinas de gran tamaño e incluyendo un anexo para turbinas de pequeño tamaño que en la anterior norma no existía.

El ensayo también muestra que el método aparentemente no funciona para el anemómetro de mástil montado y, posiblemente, tendrá que ser cambiado.

3.2 NORMAS PARA DETERMINAR NIVELES ACEPTABLES DE PRESIÓN ACÚSTICA

➤ En la actualidad no existen normas comunes de ruido o reglamentos internacionales para determinar los niveles de presión sonora. Sin embargo en la mayoría de los países las regulaciones de ruido definen los límites superiores para el ruido a los que la gente puede estar expuesta. Estos límites dependen del país e incluso dentro de un país pueden variar de acuerdo a condiciones de planificación locales. Generalmente son diferentes para el día y la noche y pueden variar según el entorno en el que se localice el parque. Se muestran a continuación niveles de ruido para distintos países europeos.

País	Comercial	Mixta	Residencial	Rural
Dinamarca			40	45
Alemania				
(día)	65	60	55	50
(noche)	50	45	40	35
Países Bajos				
(día)		50	45	40
(noche)		40	35	30

Límites de Nivel de Presión Sonora L_{eq} dB(A) en países europeos

▪ En *Alemania, Países Bajos y Dinamarca* los límites se expresan en términos de un valor máximo permitido de nivel de presión sonora en diferentes lugares.

▪ Por el contrario, la propuesta de la norma ETSU-R-97 de *Reino Unido* consiste en basar el nivel de ruido permitido de un parque eólico en un aumento de 5 dB(A) del nivel de presión sonora $L_{A90,10minutos}$ por encima del ruido de fondo. También propone un límite inferior fijo de 35 a 40 dB(A) durante el horario diurno y de 43 dB(A) durante la noche. La selección del límite diurno de 35 o 40 dB(A) se hace considerando: el número de viviendas en el barrio del parque eólico, el efecto de los límites de ruido en el número de kWh generado y la duración y el nivel de exposición. Asimismo hay una penalización por tonos audibles que se eleva a un máximo de 5 dB.

➤ En *EE.UU.*, aunque no existen normas federales de ruido, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido pautas de ruido. La mayoría de los estados no tienen regulaciones de ruido, pero muchos gobiernos locales han promulgado



ordenanzas de ruido para controlar los niveles de ruido en la comunidad.

3.3 NORMATIVAS EN DISTINTOS PAÍSES

En este apartado se tratan ciertas consideraciones de las distintas normativas en varios países.

Italia

A. Bartolillo y otros [36] abordan un estado del arte de la normativa italiana en materia de ruido en parques eólicos.

En Italia, las directrices para el control de ruido se encuentran en 'DPCM 03/01/1991' y en 'L. 447/1995'. Esta ley no es específica para la industria eólica y contiene algunas normas que están en conflicto abierto con la tecnología de turbinas eólicas. Como por ejemplo la limitación para evaluar el ruido de viento de hasta 5 m/s en el observador.

Los autores analizan los defectos y limitaciones de la regulación de ruido italiana y cuáles son los posibles efectos de estas carencias.

Abordan las técnicas de medición, parámetros característicos y frecuencias de muestreo más útiles para adoptar. Por último analizan las técnicas para cumplir con uno de los problemas más importantes de las normas de hoy en día: la evaluación del ruido de fondo con un gran número de receptores. Evalúan cuáles son las posibilidades de crear modelos de mapa de ruido de fondo para las zonas de gran tamaño.

F. Artom y otros [37] examinan la regulación en Italia con el fin de llegar a un estándar que regule la contaminación acústica en el país en lo que se refiere a parques eólicos ya que no hay regulaciones específicas para ello. Por lo tanto, todas las pruebas se realizan de acuerdo con los requisitos generales nacionales establecidos por *Decreto del Ministerio de Medio Ambiente 16/03/98*.

En la UNI (Organización Italiana de Normalización) se creó un grupo de trabajo en 2008 con el objetivo de *preparar una especificación técnica* para hacer frente a esta necesidad específica y apoyar el proceso de evaluación. La especificación técnica proporciona una medición personalizada y los métodos de procesamiento de datos. En ella se abordan:

- 1) las mediciones del ruido cerca de los lugares receptores en la fase pre-operativa para la caracterización del ruido residual,
- 2) evaluación de los ruidos, cumplimiento de los límites de un parque eólico existente
- 3) los cálculos de impacto de ruido de los parques eólicos previstos.

En conclusión, la especificación técnica (TS) de ruido de parque eólico:

- se refiere a la medición del ruido de inmisión cerca de los lugares receptores y el cálculo de ruido de impacto.

- presenta algunos de los métodos de medición y cálculo adecuado del impacto del ruido para el parque eólico con el objetivo de apoyar el procedimiento de evaluación, con referencia al marco legislativo vigente.

Algunos temas están aún en discusión, por ejemplo, el procedimiento detallado para la evaluación de los niveles de ruido en relación con la zonificación acústica, la detección de componentes tonales y temas sobre la estimación del impacto del ruido.

F. Serpilli y otros [38] estudian la aplicación de la norma *IEC 61400-11* en Italia. Este estudio es motivado debido a que los emplazamientos para los que fue diseñada la norma (Países Nórdicos) tienen características diferentes a los de Italia, lo que hace que la norma no pueda ser aplicada correctamente, concretamente en zonas de montaña y con velocidades promedio del viento de 6.5 m/s, bajas con respecto al criterio para el que fue diseñada.

Los autores aplicaron la norma *IEC 61400-11* (que proporciona la metodología para el análisis de ruido emitido por sistemas de aerogeneradores eólicos) en una situación que representa las instalaciones de parques eólicos que a menudo se pueden encontrar en territorio italiano, tras aparecer una serie de problemas con los *límites de aplicabilidad* de la legislación en determinadas condiciones ambientales. La norma estándar *IEC 61400-11*, como ya se ha mencionado, *no puede ser ejecutada íntegramente* en el país italiano, por lo que debe adaptarse a las situaciones reales que se pueden encontrar en instalaciones eólicas. En particular, la norma *IEC* es *difícil de aplicar en las zonas de montaña*. El territorio italiano se caracteriza por los vientos que llegan durante todo el año en un promedio de velocidad del viento de 6.5 m/s que se refiere a 10 m de altura. Con velocidades de *velocidades de viento bajas* la *IEC* *no se puede aplicar correctamente*. Estas condiciones contrastan con las características de los países nórdicos para los que fue diseñada: generalmente áreas planas y con vientos sostenidos de más de 8 m/s de durante todo el año.

Australia

P. Teague y otros [39] abordan el ruido eólico en Australia. El proceso de evaluación del ruido de los parques eólicos se está perfeccionando a medida que se instalan más desarrollos de parques en Australia. Los autores abordan las necesidades actuales y las cuestiones prácticas relacionadas con el monitoreo acústico, modelado, validación y



cumplimiento para los desarrollos de parques eólicos. Discuten aspectos relevantes de la nueva norma australiana y las Directrices de ruido revisadas de la EPA SA de Parques Eólicos. Se discuten requisitos de *medición de datos* y bases de datos estadísticamente relevantes para la caracterización de ruido de fondo en la etapa de planificación y de evaluación del cumplimiento posterior a la instalación. De particular importancia es la *robustez del análisis de regresión del ruido del viento para* determinar los criterios de ruido o comprobar el cumplimiento. Se evalúan *algoritmos de propagación* de ruido en el contexto de su uso y aplicación a diferentes sitios y la consideración de los peores escenarios de propagación a través de diferentes distancias. Las limitaciones del modelo resultante y la precisión se comparan sobre la base de la validación después de la instalación de la turbina en una serie de sitios de parques eólicos. Se investigan la aplicación práctica de los requisitos de evaluación y la gama de cuestiones técnicas y logísticas y sus implicaciones para el desarrollo de parques eólicos. Esto incluye el examen y la evaluación de la probabilidad de características sonoras especiales (como la tonalidad y la modulación de amplitud) y el efecto de las variaciones en las condiciones del terreno y de la atmósfera (tales como la estabilidad del sitio y los efectos de cizalladura del viento).

Países Bajos

D. Vrolijk y otros [40] estudian los efectos de la antigua y de la nueva regulación de los Países Bajos aplicadas al parque on-shore de 500 MW NOP.

Durante la planificación del parque eólico NOP, se cambiaron las regulaciones de ruido de los Países Bajos. El antiguo reglamento usa un nivel de ruido L_{eq} para *una noche* representativa, mientras que la nueva regulación emplea un *promedio anual* de L_{den} basado en las estadísticas del viento a la altura del buje. El real Instituto Meteorológico de Holanda ha hecho una base de datos de las estadísticas de viento anuales para una altura de 80 a 120 m de la totalidad de los Países Bajos con la que se puede estimar.

Se concluye del estudio que la nueva y vieja normativa neerlandesa para el ruido de turbinas eólicas da más o menos las mismas restricciones para el parque eólico NOP.

La nueva regulación evita el factor de incertidumbre de la cizalladura del viento en condiciones atmosféricas estables.

El nuevo Reglamento introduce un nuevo factor de incertidumbre que consta de las estadísticas de viento KNMI para grandes alturas. Estos valores son válidos para un promedio de largo plazo, mientras que el L_{den} del parque eólico será diferente de un año

a otro. Se espera que este efecto sea de 1 dB o menos.

Nueva Zelanda

M. Hunt y otros [41] describen el desarrollo de la versión actualizada del *estándar NZS6808:2010 de ruido de parque eólico* de Nueva Zelanda. Se ha considerado la revisión técnica de *NZS6808:1998* que tuvo lugar entre 2008 y 2010 y dio lugar a una nueva norma para la medición y evaluación del ruido de parques eólicos en Nueva Zelanda.

El desarrollo de la nueva norma se traduce en una serie de enmiendas técnicas que mejoran la evaluación del ruido de parques eólicos en el país. Las modificaciones incluyen un *nuevo límite de ruido* 'Servicios de alta' (permite a los límites de cumplimiento que se recomiendan bajar a 35 dB) que mejora la evaluación del parque eólico que contiene *características acústicas especiales audibles* y una *mejor integración* con los procedimientos de planificación de Nueva Zelanda. Aplicando los límites de ruido recomendados en NZS 6808:2010 se ayudará a evitar efectos negativos del ruido de los parques eólicos, aunque el ruido puede ser audible en algunas ocasiones.

Inglaterra

R.A. Perkins y otros [42] abordan la aplicación de las políticas de planificación en Inglaterra.

Con *ETSU-R-97* haciendo frente a las llamadas para su revisión, las metodologías de evaluación en constante evolución y las decisiones de planificación aparentemente contradictorias, las autoridades de planificación en Inglaterra tienen una tarea difícil en la revisión de nuevas aplicaciones para emplazamientos de turbinas eólicas para garantizar su adecuación.

La mayoría de las aplicaciones están sujetas a las *evaluaciones del impacto ambiental* (EIA) incorporadas a la legislación del Reino Unido según la *Directiva 85/337/CEE* que requiere una evaluación exhaustiva de los impactos de un proyecto.

Sin embargo, a pesar de que la *Orientación de Planificación PPS22* en Inglaterra aparece para dar una conducción clara a las autoridades locales sobre el nivel de impacto aceptable, hay una variabilidad en la forma en que ha sido aplicada.

CONCLUSIONES

Lo que hace peculiar al ruido de una turbina eólica y que lo hace especialmente molesto es su modulación en amplitud que no puede ser mitigada por completo.

El principal efecto que provoca la turbina eólica sobre las personas y colectivos durante el día es molestia y durante la noche es la alteración del



sueño. Esto puede conducir a enfermedades relacionadas con el estrés, el aprendizaje o el rendimiento o a efectos sobre la presión arterial.

El infrasonido continúa como un problema en la percepción del público pero no ha habido una evidencia clara que apoye esto a pesar de los nuevos estudios de cómo responde el oído interno a los infrasonidos. Por otro lado se ha visto que las turbinas eólicas generan infrasonidos y que cerca de ellas el nivel producido sería similar a otras fuentes naturales o artificiales, es decir, el nivel de infrasonido medido cerca de una turbina eólica es frecuente en entornos urbanos y costeros.

Para evaluar el impacto acústico de un parque eólico es necesario comparar el nivel de presión sonora de las turbinas con el ruido de fondo del emplazamiento. Para determinar el nivel de inmisión de presión sonora de la turbina hay que considerar el ruido emitido por la misma y el modelo de propagación del sonido. Se analizan a lo largo del trabajo métodos de medida y predicción.

Para perfeccionar el análisis acústico de proyectos eólicos es interesante usar mediciones SODAR que permiten discriminar efectos orográficos sobre el perfil vertical de velocidad del viento e incluir la cizalladura del viento en el análisis acústico, permitiendo así un mejor análisis en terrenos complejos.

En cuanto a predicción de nivel de emisión de la turbina se consideran distintos modelos para poder llegar a reducir el ruido aerodinámico de la turbina.

Por otro lado estudiando la modulación de amplitud del ruido de turbina, problema que subsiste en el ruido de turbina eólica, se establecen como posibles causas del mismo: la variación cíclica de la carga de la hoja (causada por el flujo aerodinámico de la entrada no uniforme a través del disco del rotor y debido posiblemente a cizalladura del viento, error de orientación o turbulencia atmosférica) o los efectos de propagación (debidos a factores atmosféricos, cambio de nivel de ruido de fondo o interacción entre el AM de una serie de turbinas).

Ya que con métodos estándares (basados en niveles con ponderación A) no es posible distinguir el ruido de amplitud modulada y en el estándar de medida IEC 61400-11 aparece como medida opcional, se abordan varios métodos de medida de ruido AM. Uno se basaría en manejar la señal de tiempo con el mismo tiempo de integración que el oído, otro en principios psico-acústicos y finalmente un método basado en la medición del espectro de modulación de banda ancha. Este método permite establecer la diferencia entre los dos tipos de ruido AM (swish y thump) que estaría en la frecuencia a

que el ruido es modulado, con swish predominante en la octava de 1KHz y thump en octavas de 250 Hz.

En lo referente a modelos de propagación se consideran distintos escenarios y terrenos en que se puede colocar el parque eólico: desde un terreno complejo con diferentes alturas hasta un terreno forestal. En el interior del bosque se observa mayor nivel de potencia sonora sobre todo a frecuencias medias y bajas, siendo la causa de esto la retrodispersión de los troncos y el microclima que causa la baja refracción del sonido.

Finalmente se expone la normativa existente para la evaluación y control del impacto acústico de los parques eólicos. Para medir la emisión de ruido acústico de la turbina existe un estándar internacionalmente aceptado que es el IEC 61400-11. Sin embargo para determinar los niveles de presión sonora no hay estándares o reglamentos internacionales. A pesar de ello en la mayoría de los países las regulaciones de ruido definen los límites superiores a los que la gente puede estar expuesta. Estos límites varían de un país a otro e incluso dentro de un país de acuerdo a condiciones de planificación locales. Generalmente son distintos para el día y la noche y pueden variar según el entorno en que se localice el parque.

NOMENCLATURA

WTN = Wind Turbine Noise

REFERENCIAS

- [1] D. Bowdler, *Why Turbine Noise Annoys*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [2] W. Palmer, *Evidence Based Study of Noise Impacting Annoyance*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [3] M. Masullo, G. Lannace, S. Basturk, L. Maffei, V.P. Senese, F. Ruotolo, *The influence of vision on noise annoyance evaluation of wind farms*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [4] S. Oerlemans, G. Schepers, *Prediction of wind turbine noise directivity and swish*, Third International Meeting on WTN, 2009.
- [5] Bass, Bowdler, McCaffery, Grimes, *Fundamental Research in Amplitude Modulation—a Project by RenewableUK*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [6] F. Van den Berg, *An overview of residential health effects in relation to wind turbine noise*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [7] G.F. Hessler Jr., *A Note on the Debate about Health Effects from Low Frequency Noise (LFN) from Modern Large Wind Turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.
- [8] D. Shepherd, D. McBride, D. Welch, K.N. Dirks, E. M. Hill, *Wind turbine noise and health-related quality of*



life of nearby residents: a cross-sectional study in New Zealand, Fourth International Meeting WTN, 2011.

[9] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, J. Bouma, *Response to noise from modern wind farms in The Netherlands*, J Acoust Soc Am 2009;126:634-643.

[10] M. Van den Berg, *Health based guidelines for wind turbine noise in the Netherlands*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[11] C. Hanning, M. Nissenbaum, *Selection of outcome measures in assessing sleep disturbance from wind turbine noise*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[12] A.N. Salt, J.T. Lichtenhan, *Responses of the Inner Ear to Infrasound*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[13] C.P. Turnbull, J.P. Turner, *Measurement of Infrasound from Wind Farms and Other Sources*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[14] P. McDonald, D. Geraghty, I. Humphreys, *A Long Term Noise Measurement System for Wind Farms*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[15] M. Dijkstra, T. Kerkers, *Continuous noise monitoring of wind turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[16] M. Gianni, A. Bartolazzi, M. Mariani, L. Imperato, *SODAR wind measurements as a mean to refine acoustic analysis of wind projects*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[17] G. Lundmark, *Measurement of Swish Noise. A new method*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[18] T.H. Pedersen, S. Von-Hunerbein, S. Legarth, *Methods for assessment of the characteristics of wind turbine noise*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[19] D. McLaughlin, *Measurement of amplitude modulation frequency spectrum*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[20] D. Siponen, *The assessment of low frequency noise and amplitude modulation of wind turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[21] P. Lindkvist, M. Almgren, *Indoor low frequency noise from wind turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[22] M. Terlich, *The Case for Spectral Measurements of Ambient Noise Levels in the Assessment of Wind Farms*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[23] M.A. Swinbanks, *The Audibility of Low Frequency Wind Turbine Noise*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[24] P. Styles, R.F. Westwood, S.M. Toon, M.P. Buckingham, B. Marmo, B. Carruthers, *Monitoring and Mitigation of Low Frequency Noise from Wind Turbines to Protect Comprehensive Test Ban Seismic Monitoring Stations*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[25] S. Xue, J. Wu, M. Summers, *Integrated Airfoil/Blade Aeroacoustics Modeling and Validation*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[26] B. Petitjean, R. Drobietz, K. Kinzie, *Wind Turbine Blade Noise Mitigation Technologies*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[27] M. Kamruzzaman, T. Lutz, K. Nübler, E. Krämer, *Implementation and Verification of an Aeroacoustic Wind Turbine Blade Analysis Tool*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[28] A. Wolf, T. Lutz, W. Würz, O. Stalnov, A. Seifert, *Trailing Edge Noise Reduction of Wind Turbine Airfoils by Active Flow Control*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[29] S. Lee, S. Lee, S. Lee, *Time domain modeling of aerodynamic noise from wind turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[30] A. Bullmore, M. Jiggins, M. Cand, M. Smith, S. Von-Hunerbein, R. Davis, *Wind Turbine Amplitude Modulation: Understanding as to its Cause & Effect*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[31] K. Bolin, I. Karasalo, *Wind turbine noise exposure in a complex terrain*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[32] E. Johansson, M. Almgren, *The wind turbine sound amplifying forest*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[33] C. Larsson, O. Öhlund, *Measurements of Sound from Wind Turbines*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[34] C. Guarnaccia, T.L.L. Lenza, J. Quartieri, *On the Propagation Model of Wind Farm Noise*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[35] B. Søndergaard, *Testing the new version of IEC 61400-11*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[36] A. Bartolazzi, M. Mariani, *Italian regulations on wind farm noise: A state of the art*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[37] F. Artom, R. Betti, A. Carmagnini, P. Lenzuni, L. Lodi Rizzini, A. Marchisio, G. Marsico, R. Ziliani, *Towards a national standard to support the assessment of the noise impact of wind farms*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[38] F. Serpilli, G. Cesini, V. Lori, *Application of IEC 61400-11 in Italian land*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[39] P. Teague, A. Leonard, *Prediction, Validation, Assessment & Compliance of Wind Farm Noise in Australia*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[40] D. Vrolijk, M. Dijkstra, *500 MW on-shore wind park 'NOP' the Netherlands*, Fourth International Meeting on WTN, 2011

[41] M. Hunt, S. Chile, *Assessment of Wind Turbine Noise Using NZ Standard NZS6808:2010-Fit For Purpose*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.

[42] R.A. Perkins, G.A. Parry, *Application of policy by local authorities to wind turbine noise applications in England*, Fourth International Meeting on WTN, 2011.