

MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE RUIDO EN PARQUES EÓLICOS

PACS: 43.15.+s, 43.50.Rq, 88.50.-k

Amatriain Ormazabal, Mikel.
Isilen.com, Pamplona, Navarra, España, info@isilen.com.

Palabras Clave: Ruido, Eólica, Parque Eólico, Aerogenerador

ABSTRACT.

The evolution of size and power of wind turbines are described in an informative way, as well as the current energy and regulatory context. The fundamentals and technical references agreed in the working group PT 61400-11-2 related to the measurement of the noise characteristics of wind turbines in the receiver position are overviewed. It is a technical standard aimed to be used as a toolbox for the improvement of noise assessment in wind farms, both for regulators, developers, operators, as well as consultants, testing laboratories or researchers.

RESUMEN.

Se describen de forma divulgativa los principales aspectos en la evolución del tamaño y la potencia de los aerogeneradores, así como el contexto energético actual. Se muestra una visión general de los fundamentos y referencias técnicas acordadas en el grupo de trabajo PT 61400-11-2 relativo a la medición de las características de ruido de aerogeneradores en la posición del receptor. Se trata de un estándar técnico orientado a utilizarse como una caja de herramientas para la mejora de la evaluación del ruido en parques eólicos, tanto para reguladores, desarrolladores, operadores, como consultores, laboratorios de ensayo o investigadores.

1. INTRODUCCIÓN

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima y la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050, ha contribuido a incrementar considerablemente las solicitudes para la instalación de nuevos parques eólicos y plantas fotovoltaicas. Entre otros aspectos, el ruido de los aerogeneradores suele ser un parámetro decisivo a la hora de desarrollar un proyecto eólico. La correcta evaluación previa y la adecuada monitorización del ruido en el entorno debe asegurar la protección de las personas frente a un posible impacto debido a la contaminación acústica.

La serie de normas IEC 61400 emitidas por el TC 88 determina los estándares internacionales publicados por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) sobre Sistemas de Generación de Energía Eólica. La parte IEC 61400-11:2012 [1] presenta los procedimientos de medida que permiten caracterizar las emisiones de ruido de un aerogenerador. Los métodos descritos en el estándar IEC 61400-11 se vienen utilizando desde 1998 (Ed. 1). Son métodos reconocidos y perfeccionados en posteriores ediciones en 2006 (Ed. 2.1) y en 2012 (Ed. 3.1). La metodología está estabilizada y no se prevé revisión hasta al menos 2026.

En 2017 se propuso la elaboración de un estándar relativo a la evaluación de ruido en la posición de recepción, que fue aprobado por el TC 88 en 2018. En 2022 se finalizó el borrador del TS IEC61400-11-2, sobre la medición de las características de ruido de aerogeneradores en la posición del receptor.

2. EVOLUCIÓN Y CONTEXTO ACTUAL

2.1 Evolución tecnológica

Desde la elaboración de la primera edición de la norma IEC 61400-11 en 1998, se ha evolucionado de aerogeneradores terrestres con potencias eléctricas del orden de 100 a 600 kW y rotores de 30 a 50 metros en la segunda mitad de la década de los 90 a potencias superiores a los 5 a 7 MW en la actualidad, con rotores de entre 100 y 180 metros. De igual forma, se ha incrementado la altura de torre de 40 a 60 metros a alturas de 100 a 200 metros, con el fin de mejorar la captación del recurso eólico de cada emplazamiento y optimizar el coste de la energía.

En relación con la emisión sonora, la tecnología eólica ha tenido una constante evolución en los últimos 25 años. Expresado de forma muy genérica, se ha evolucionado de una emisión global del orden de $L_{WA}=100$ dBA para una turbina tipo de 600 kW en potencia nominal a una emisión del orden de $L_{WA}=109$ dBA para las turbinas actuales del orden de 7 MW, mejorable a alrededor de $L_{WA}=106$ dBA mediante la implementación de complementos aerodinámicos como los bordes de salida serrados en las palas.

Gracias a los avances tecnológicos, un aerogenerador moderno actual equivale a alrededor de 12 aerogeneradores antiguos en términos de potencia eléctrica, con una equivalencia de alrededor de 4 aerogeneradores antiguos en términos de potencia acústica (+6 dB). Además, los aerogeneradores modernos son mucho más versátiles al permitir diferentes modos de operación mediante sistemas de control optimizados para la reducción de ruido, activados para determinadas condiciones de viento o periodos temporales concretos.

2.2 Contexto energético

Es de esperar que para reducir el consumo de energía de origen fósil se incremente la demanda de generación eléctrica mediante energía renovable (pasando de un 20% a un 42% sobre el consumo total de la energía en 2030, y a un 97% en 2050). A finales de 2021 existían 64 GW de potencia renovable instalada en España, 28 GW de energía eólica.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, PNIEC [2], prevé para el año 2030 una potencia total instalada en el sector eléctrico de 157 GW, lo que supone añadir 59 GW adicionales de potencia renovable (22 GW de energía eólica, incluyendo entre 1-3 GW de eólica marina) y 6 GW de almacenamiento, con una presencia equilibrada de las diferentes tecnologías renovables para 2030. La Estrategia a Largo Plazo, 2021-2050, ELP [3], prevé 250 GW para el 100% de generación de energía eléctrica mediante fuentes de energías renovables en el año 2050.

De forma general, por diseño, la vida útil de los aerogeneradores es de 25 años, por lo que, en los próximos años, diversos parques eólicos llegarán al final de su vida útil, hay tener en cuenta que, en la última década, se han instalado 7 GW de energía eólica (24%), frente a unos 17 GW instalados entre 2001 y 2011 (61%), por lo que se puede decir que la flota de aerogeneradores en España está envejecida. A pesar de existir diversas opciones de prologar esta vida útil, entre 5 y 10 años adicionales en función del emplazamiento, la repotenciación de los parques eólicos debe optimizar el coste de la energía y minimizar el impacto ambiental. Durante la década 2021-2030, aproximadamente 22 GW de potencia eléctrica renovable instalada en España habrán superado su vida útil regulatoria (aproximadamente 10 GW eólica). Así, de acuerdo con el PNIC, es necesario instalar alrededor de 30 GW de potencia eólica en el periodo de 2021-2031, aproximadamente la misma que la actualmente instalada.

Es importante que estas instalaciones se realicen con el menor impacto sobre el medio ambiente y las personas y con la mayor rigurosidad posible. El ruido sobre los humanos es uno de los factores más desafiantes que afectan la aceptabilidad social de la energía eólica.

2.3 Contexto regulatorio y peculiaridad del ruido en parques eólicos

En un informe destinado a emitir recomendaciones para los gobiernos europeos, la Organización Mundial de la Salud OMS considera que el ruido "es uno de los principales riesgos tanto para la salud mental como la física y el bienestar". En el informe publicado en 2018, *Environmental Noise Guidelines for the European Region* [4], recomienda un límite L_{den} de 45 dB para el ruido de aerogeneradores. Sin embargo, el propio informe concluye que la descripción acústica del ruido de los aerogeneradores por medio de L_{den} o L_{night} puede ser una mala caracterización para esta fuente de ruido y puede limitar la capacidad de observar asociaciones entre el ruido de los aerogeneradores y los resultados para la salud. El ruido emitido por los aerogeneradores tiene otras características, destacando la modulación de amplitud, carácter repetitivo del sonido de las palas girando y la influencia atmosférica y la tonalidad, principalmente de origen mecánico, que puede ser una fuente de molestia superior a la media, además de impulsividad y baja frecuencia.

Es posible que los métodos estándar de medición del sonido, que por lo general incluyen la ponderación A, no registren las características especiales de los aerogeneradores. La conversión de L_{Aeq} a L_{den} requiere, como variable, la distribución estadística de la velocidad del viento anual a una determinada altura, que depende del tipo de aerogenerador y de las condiciones meteorológicas en un emplazamiento particular.

A pesar de las mejoras tecnológicas, los aerogeneradores son fuentes de ruido relevantes con focos situados típicamente a más de cien metros de altura sobre el suelo. La mayoría de los aerogeneradores terrestres modernos son de paso variable, de forma que se incrementa la velocidad de giro del rotor en función de la velocidad de viento. Así, la componente de la emisión de ruido aerodinámica es variable hasta una determinada velocidad a la que se diseña el aerogenerador. Por otro lado, los parques eólicos, generalmente se encuentran en entornos rurales y de igual forma, el ruido de fondo o ruido natural del emplazamiento dependerá de las condiciones meteorológicas y en especial de las condiciones de viento. Se utiliza el término sonido de fondo análogamente al ruido de fondo, por su carácter natural.

Debido a la existencia de diferentes legislaciones en materia de ruido, tanto nacionales como regionales, hacen realmente difícil establecer una metodología internacional para la evaluación de ruido en la posición de recepción, sin embargo, hay una serie de buenas prácticas que se deben considerar a la hora de la evaluación, monitorización y control de ruido en parques eólicos.

La primera consideración que se debe tener en cuenta es la dependencia de la emisión sonora del aerogenerador respecto a la velocidad de viento, así como la posible influencia del viento en la generación de ruido de fondo. Es relevante tener cuenta, sin embargo, que la referencia de viento en el punto de recepción dependerá principalmente de las condiciones cercanas a el punto de inmisión, mientras que la referencia de viento para la emisión dependerá del viento incidente en el rotor, pudiendo estar situado a una altura muy superior y a varios cientos de metros de distancia, por lo que puede no haber una correlación directa entre ambas velocidades de viento.

Existen diversas legislaciones con mayor o menor definición respecto a la evaluación del impacto de la contaminación acústica producida por los parques eólicos. En España, no existe una regulación específica respecto a la evaluación de ruido en los parques eólicos, si bien la Generalitat de Catalunya, mediante el Decreto 176/2009, sí especifica las condiciones de medida, "En el caso de mediciones de aerogeneradores de los parques eólicos, la dirección del viento debe ser $\pm 45^\circ$ desde el aerogenerador hacia el punto de medición, y la velocidad del viento, medida a 10 metros de altura, debe ser de entre 6 y 8 m/s." Si bien las condiciones de medidas pueden ser adecuadas, las condiciones representativas pueden ser mucho más amplias en función del caso en estudio, abarcando un determinado rango de velocidad de viento operativo, rango de potencia eléctrica de los aerogeneradores, condiciones específicas de dirección de viento, velocidad de viento a baja altura, periodo del día o el año, meteorología o periodos de arranque y parada.

3. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL BORRADOR IEC 61400-11-2

De forma general interesa evaluar el nivel sonoro aportado por el parque eólico y descartar el ruido o sonido de fondo, por lo que la referencia de viento en el aerogenerador es habitualmente de mayor interés, utilizándose generalmente la referencia en receptor con el propósito de filtrado.

La parte IEC61400-11-2 define los procedimientos que se utilizarán en la medición, el análisis y el reporte de las características acústicas de un parque eólico en la posición del receptor. Cabe destacar que la utilización de este estándar técnico no está enfocado a un procedimiento único, sino que está orientado a dotar de herramientas múltiples, pudiendo utilizarse partes determinadas para una casuística o problemática específica descartándose otras secciones. Los marcos regulatorios determinarán igualmente los índices y requerimientos aplicables. No se trata de una metodología única, sino un conjunto de recomendaciones y buenas prácticas. El documento puede ser utilizado por reguladores y autoridades, laboratorios de medición, desarrolladores, operadores de parque eólicos y fabricantes de aerogeneradores, así como investigadores o académicos.

Los procedimientos descritos son diferentes en algunos aspectos de los que se utilizarían para la evaluación del ruido procedente de otras fuentes de tipo industrial. Están destinados a facilitar la caracterización del sonido de los aerogeneradores con respecto a un rango de velocidades y direcciones del viento. Así, adicionalmente a las mediciones acústicas, las mediciones no acústicas caracterizan las condiciones operativas y atmosféricas durante las cuales se recopilaron los datos acústicos. La sincronización de los datos acústicos con los datos relevantes de los aerogeneradores y otra instrumentación no acústica, como datos meteorológicos, debe llevarse a cabo, en la medida de lo posible, con la mayor precisión. Las recomendaciones se aplican a todo tipo de tecnología de aerogeneradores.

3.1 Plan de ensayo y monitorización

Como paso inicial es necesario determinar el alcance requerido de la campaña de mediciones y establecer un plan de ensayo. En este plan se analizará qué datos, tanto acústicos como no acústicos son necesarios, y cómo pueden obtenerse, condiciones del emplazamiento y condiciones representativas para el objeto de estudio, así como posibles fuentes sonoras ajenas al propósito de la campaña.

La posición de medida debe evitar superficies reflectantes y debe alejarse en lo posible de la influencia del sonido inducido por la vegetación. En algunas ocasiones puede que no haya más remedio que utilizar posiciones de medida alternativas, y extrapolar mediante simulación los niveles en los puntos de recepción. Se recomienda que estas simulaciones se hagan en base a valores medidos de la potencia sonora de los aerogeneradores más cercanos. Estas mediciones servirán para la evaluación de los niveles sonoros, pero no serán aplicables a la evaluación de las características del sonido, como la tonalidad, impulsividad o modulación en amplitud.

En relación con la instrumentación, se exigen los mismos requerimientos que los establecidos en la norma IEC 61400-11. Las mediciones, para obtener una relación señal a ruido adecuada, preferiblemente se deben hacer con doble pantalla antiviento, e incluir una corrección por pérdidas de inserción. En algunas situaciones es posible montar el micrófono directamente sobre una superficie vertical de la vivienda siguiendo las recomendaciones y correcciones descritas en el Anexo B de la norma ISO 1996-2:2017 [5].

Respecto a las mediciones no acústicas, las condiciones del viento juegan un papel fundamental. Las condiciones del viento en varias posiciones pueden influir en los niveles sonoros medidos en el campo lejano. Generalmente, el sonido emitido por los aerogeneradores se correlaciona con la velocidad del viento en el buje. El ruido inducido por el viento de la vegetación se correlaciona con las cualidades físicas de la vegetación, como la altura de la vegetación, próximo a la localización del receptor.

Las velocidades del viento se pueden medir de forma directa o derivar de forma indirecta. Las velocidades del viento medidas se registran directamente a la altura deseada, mientras que las

velocidades del viento derivadas se calculan a partir de otras cantidades, como la potencia eléctrica de salida del aerogenerador. También pueden calcularse a partir de la velocidad del viento medida a una altura diferente, a partir de un perfil de viento logarítmico estandarizado o específico del emplazamiento. Las velocidades del viento se pueden usar para dos propósitos principales, ya sea agrupando los datos para permitir que los valores acústicos se promedien dentro un grupo con similar velocidad de viento (*binning*) o filtrando los datos para excluir los datos que no cumplen con las condiciones requeridas (a menudo para minimizar contribuciones del sonido de fondo).

En general, solo se debe usar una única fuente de velocidad del viento para agrupar los datos, normalmente a altura de buje o a 10 metros de altura, mientras que se pueden usar fuentes múltiples de velocidad del viento para filtrar los datos, a altura de buje, 10 metros de altura o a la altura del micrófono.

Respecto a la referencia de viento en los aerogeneradores, se toman aquellos con una aportación significativa sobre el receptor (típicamente los 2 o 3 aerogeneradores más cercanos). Igualmente, es necesario disponer de la misma referencia de viento y condiciones de medida a la hora de evaluar el sonido de fondo, no siendo posible utilizar la velocidad del viento derivada de la curva de potencia y debiéndose utilizar con cautela la velocidad del viento del anemómetro del aerogenerador. Si el sonido de fondo es relevante, se puede utilizar la velocidad del viento cercana al receptor (altura de 10 metros) como la velocidad del viento de agrupación, y se utilizarán otras velocidades del viento (altura de buje) para filtrar el funcionamiento apropiado o inapropiado de los aerogeneradores. Esta referencia es crucial para una adecuada caracterización y dependerá en gran medida de las características del emplazamiento, topografía, tipo de vegetación, condiciones de viento, etc.

Por ejemplo, un aerogenerador con una altura de buje de 120 metros puede llegar a potencia eléctrica cercana a nominal (85%) a una velocidad de viento inferior a 10 m/s, tomando como referencia la velocidad en buje, con una potencia acústica cercana al máximo de emisión y con una velocidad de viento inferior a 5 m/s próximas al suelo; para determinadas condiciones de viento, tomando como referencia el viento a 10 m y un perfil de viento alto ($\alpha=0.3$). Ver Tabla 1.

Tabla 1 – Velocidad del viento a 10 metros para diferentes perfiles

	Velocidad del viento a 10 metros para diferentes perfiles y velocidad del viento a la altura del buje (120 m)									
V(120)/alfa	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1	2,3	3,1	3,9	4,7	5,5	6,2	7	7,8	8,6	9,4
0,15	2,1	2,8	3,4	4,1	4,8	5,5	6,2	6,9	7,6	8,3
0,2	1,8	2,4	3	3,7	4,3	4,9	5,5	6,1	6,7	7,3
0,25	1,6	2,1	2,7	3,2	3,8	4,3	4,8	5,4	5,9	6,4
0,3	1,4	1,9	2,4	2,8	3,3	3,8	4,3	4,7	5,2	5,7
0,35	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,4	3,8	4,2	4,6	5
0,4	1,1	1,5	1,9	2,2	2,6	3	3,3	3,7	4,1	4,4

Las opciones para determinar la dirección del viento son mediciones directas con veletas o anemómetros direccionales (ultrasónicos), sensores remotos y con la instrumentación del propio aerogenerador. Adicionalmente, se debe registrar la precipitación (con propósito de filtrado), temperatura y humedad relativa (opcionalmente la presión atmosférica). También pueden ser de interés otros datos que permiten describir el funcionamiento del parque eólico y que deben ser

facilitados por el operador, siendo de interés los modos de operación, estado, orientación, posibles restricciones de red o revoluciones del rotor o el generador de las turbinas relevantes.

El principio básico es que todos los parámetros acústicos se agrupan y promedian con respecto a la velocidad y la dirección del viento. Intervalos de 1 m/s para la velocidad de viento y sectores de 30º para la dirección de viento. Se considera el vector entre los aerogeneradores y la posición del receptor +/- 45 grados el sector de viento a sotavento (*downwind*), como condición favorable a la propagación.

No es sencillo establecer requisitos mínimos sobre la cantidad de datos a registrar, pero es necesario tener suficientes datos para realizar un tratamiento estadístico fiable. Para determinar el nivel de presión sonora en una ubicación de campo lejano se recomiendan mediciones de larga duración, que permitan registrar condiciones variables y permitan el agrupamiento y filtrado de datos.

Las principales magnitudes acústicas evaluadas son el nivel de presión sonora equivalente, $L_{Aeq,T}$, o el nivel estadístico, niveles percentiles L_{Axx} . El intervalo de tiempo T apropiado para cada medición puede depender del resultado previsto, el índice de medición que se calcula y la variabilidad esperada de los datos. En general, se utilizan intervalos de tiempo más largos para niveles percentiles, típicamente periodos de 10 minutos para L_{A90} , frente a los 10 segundos utilizados en la evaluación de la potencia sonora (distancia de alrededor de 200 metros en turbinas modernas). Para distancias de entre 500 metros y 1000 metros es común el uso de intervalos de en 1 minuto para los registros de L_{Aeq} . La diferencia de L_{Aeq} y los niveles percentiles también es útil para detectar eventos ajenos a los aerogeneradores.

Se pueden realizar mediciones de largo o corto plazo con o sin parada del parque eólico. Las mediciones sin parada están destinadas a una situación en la que se puede verificar el cumplimiento en las ubicaciones del receptor usando mediciones simples. Implica realizar mediciones con el parque eólico operando en el estado deseado (por ejemplo, en un rango de velocidad del viento específico y deseado, o en condiciones de máxima potencia sonora o cerca de ella), mientras también se está en una condición donde los niveles de sonido de fondo se mantienen al mínimo. Si se considera que el sonido de fondo tiene una contribución significativa y medible a los niveles de sonido generales, los niveles de fondo deben medirse y cuantificarse.

El método de mediciones de corto plazo con parada de parque puede permitir la cuantificación del sonido del aerogenerador y el sonido de fondo durante un período de tiempo específico, siempre que las condiciones no cambien significativamente entre el período de marcha y parada. Las paradas para el registro del sonido de fondo serán de entre 30 y 60 minutos en una medición de 4 horas. En condiciones de subida o bajada de viento se deben intercalar las mediciones de sonido de fondo en periodos más cortos, por ejemplo, 2 horas en operación y 30 minutos de parada en diferentes secuencias.

El método de mediciones de largo plazo con paradas de parque es el que puede dar más información al cubrir diferentes condiciones del emplazamiento. Si bien la emisión no variará para diferentes estaciones del año, el cambio en la vegetación natural o de los cultivos puede variar significativamente el sonido de fondo, así como las condiciones meteorológicas pueden variar para diferentes meses del año variando los efectos en la propagación o el enmascaramiento. La medición de largo plazo permite obtener registros en condiciones menos habituales, como pueden ser direcciones de viento determinadas, perfiles de viento especialmente altos o anomalías en la operación del parque eólico.

Si el sonido total (promedio del agrupamiento por velocidad de viento) es al menos 3 dB más alto que el sonido de fondo en las mismas condiciones, se puede aplicar una corrección a ruido de fondo. En emplazamientos con niveles de sonido ambiente elevados, la evaluación se podrá hacer mediante simulación a partir de medidas de potencia acústica o valores de potencia acústica representativas. Actualmente, existen diferentes estándares de modelado de la propagación del sonido en parque eólicos. Es importante que se utilicen parámetros de modelado que reflejen los supuestos apropiados para las características de los aerogeneradores. Los dos métodos preferidos son los definidos en el estándar ISO 9613-2 [6] y en el modelo Nord2000 [7]. En

general, se adoptan una serie de parámetros ajustados a la experiencia en mediciones en parque eólicos, como por ejemplo no exceder el factor de suelo (G) en más de 0.5 para el caso del método descrito en el estándar ISO 9613-2. Actualmente la metodología de la ISO 9613-2 está en revisión, incluyendo estas mismas recomendaciones. En una fuente elevada como una turbina eólica, el suelo refleja más de lo que se considera en el método general, de forma que los terrenos porosos o mixtos, que incluyen terrenos cubiertos de hierba, árboles u otra vegetación, y terrenos agrícolas deben modelarse utilizando un máximo de $G=0.5$ (Atenuación A_{gr}). Se recomienda la utilización de factores entre $G=0$ para suelos compactos y $G=0.5$ para zonas de cultivo o bosque. Este factor estará influenciado por la altura a la que se evalúa el receptor. La Comisión Europea a través del proyecto «Métodos comunes de evaluación del ruido en Europa (CNOSSOS-EU)» [8] estableció la utilización de esta metodología como vinculante para los Estados miembros a partir de 2019, sin embargo, la metodología no define un ajuste para los parques eólicos [9].

3.2 Características especiales

En cuanto a la evaluación de la audibilidad tonal, se opta por la metodología descrita en la ISO/PAS 20065:2016 [10]. Diversos estudios han mostrado no tener grandes desviaciones respecto a la metodología para la tonalidad descrita en la norma IEC 61400-11 [11]. Ambas metodologías se basan en el análisis en banda estrecha, si bien necesitan un procesado algo superior que el análisis en tercios de octava, son procedimientos automatizables.

Para la evaluación de la modulación en amplitud, al ser el país con mayor desarrollo en esta característica, el método utilizado es una implementación del informe final del grupo de trabajo del *Institute of Acoustics* del Reino Unido, (IOAAMWG, 2016) [12].

El método recomendado para la impulsividad es el método Nordtest NT ACOU 112, 2002 [13]. La ISO ha desarrollado recientemente un método, ISO PAS 1996-3 [14], basado en el método Nordtest, para objetivamente medir la prominencia del sonido impulsivo en relación con el sonido residual y complementar la norma ISO 1996-2, método de medición para evaluación de ruido ambiental de propósito general.

En la evaluación del ruido de parques eólicos, ha existido una fuerte controversia en relación con los infrasonidos y los aerogeneradores, si bien es cierto que es posible detectar y medir los pulsos relacionados con la frecuencia de paso de pala, los niveles están muy por debajo de los considerados umbrales de audición. Las turbinas eólicas están diseñadas para reducir las fuerzas relacionadas con el paso de las palas frente a la torre, cambiándose el diseño de los primeros prototipos de los aerogeneradores del rango del megavatio, de la década del 80 y del 90. Existen diversos estudios realizados al respecto, destacando el realizado en 2016 por el gobierno canadiense [15], y en ninguno se han encontrado evidencias que confirman que los niveles de sonido en el rango de los infrasonidos (4-20 Hz) atribuibles a las turbinas eólicas sean lo suficientemente altos como para tener algún efecto cuantificable sobre la salud de las personas.

En relación con la baja frecuencia, se considera que la medición de la baja frecuencia es factible cerca de los aerogeneradores, sin embargo, al alejarse de los aerogeneradores, resulta más difícil una medida directa. Se opta por un método basado en la predicción del sonido en tercios de octava entre 10 y 200 Hz, considerando el tipo de suelo y la absorción del aire (Nord2000) y teniendo en cuenta el aislamiento acústico en fachada y la tipología del edificio para realizar una evaluación en el interior. No se incluye como una corrección principal en la evaluación del ruido en parques eólicos, sino que se incluye como un anexo informativo.

En relación con las correcciones por tono, modulación o impulsividad, se considera aplicable una única característica a la vez y no la adición de varias correcciones por diferentes características. Habitualmente, tal y como especifica el Decreto 1367/2007 en España, los ajustes de nivel se realizan para el período de tiempo de ocurrencia de la característica corregida. Para los parques eólicos, es más habitual que estas características vengan relacionadas con la velocidad y dirección del viento o el funcionamiento de las turbinas eólicas que con la hora específica del día.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de parques eólicos en España es una pieza fundamental del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, PNIEC. Donde se plantea la instalación de 28 GW de energía eólica, principalmente en eólica terrestre. La transición energética planeada por la Comisión Europea [16] propone la descarbonización del sistema energético de la UE para alcanzar los objetivos climáticos para 2030 (reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % de aquí a 2030, en comparación con los niveles de 1990) y la estrategia a largo plazo de la UE de lograr la neutralidad en emisiones de carbono para 2050.

El ruido producido por los aerogeneradores es uno de los principales aspectos ambientales y sociales a tener en cuenta en la generación de energía eólica, entre otros impactos, la instalación de un parque eólico altera el paisaje visual y sonoro.

Existe en la actualidad una metodología aceptada internacionalmente para la cuantificación de la emisión de ruido, la norma IEC 61400-11:2012, adaptada en la norma UNE-EN 61400-11:2013. Se han mejorado las técnicas de medición y predicción mediante cálculo, siendo la principal entrada de los modelos de predicción la potencia sonora medida del aerogenerador. Esta potencia sonora puede variar respecto a la especificada por el fabricante y puede incluir características sonoras especiales, siendo las más comunes la tonalidad y la modulación en amplitud. La IEC 61400-11-2 pretende recopilar diferentes recomendaciones para la evaluación del ruido proveniente de los aerogeneradores a larga distancia, en la posición de recepción.

La evaluación del ruido en aerogeneradores es compleja y debe ir siempre unida a una referencia de viento. Esta referencia puede tomarse en la fuente emisora, centrada a la altura del rotor del aerogenerador o puede tomarse en el receptor, tomando como referencia una altura de 10 metros. Los parques eólicos pueden operar en diferentes condiciones de viento, principalmente diferente velocidad y dirección de viento, tanto la emisión como la propagación del sonido puede variar en función de estas condiciones por lo que habitualmente son recomendables mediciones de larga duración o mediciones cortas en condiciones específicas, agrupando los registros sonoros para condiciones específicas y homologables de viento tanto para el parque eólico en operación como el sonido ambiente.

Existen técnicas de mitigación, como la instalación de bordes de salida serrados o la operación en modos con potencia reducida que permiten atenuar y controlar el ruido dentro de los niveles exigidos por la normativa. Los principales fabricantes de aerogeneradores industriales han desarrollado y optimizado el diseño de sus productos con el fin de permitir la minimización del impacto acústico, al suponer un aspecto clave en el desarrollo eólico en emplazamiento habitados, especialmente en el mercado europeo.

Hay diversos campos que necesitan mayores investigaciones como pueden ser los relacionados con la percepción y la corrección de las características especiales del ruido en parques eólicos.

Mediante un análisis de la emisión y recepción del ruido de los parques eólicos es posible minimizar el impacto sobre las personas y mejorar la aceptación social. Permite verificar las predicciones realizadas previas a la construcción de la instalación, comprobar el cumplimiento normativo, así como la detección de posibles anomalías o fallos a lo largo de la vida útil de los aerogeneradores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el trabajo realizado a los miembros del grupo [PT 61400-11-2](#).

REFERENCIAS

- [1] IEC 61400-11:2012+AMD1:2018+Cor1:2019 Wind turbines — Acoustic noise measurement techniques, edition 3.1
- [2] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. MITECO, 2020
- [3] Estrategia a Largo Plazo para una economía española moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050. MITECO, 2020
- [4] World Health Organization. Environmental Noise Guidelines for the European Region. World Health Organization Europe Copenhagen, Denmark, 2018.
- [5] ISO 1996-2:2017 Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part2: Determination of sound pressure levels.
- [6] ISO 9613-2:1996 Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation
- [7] Nord2000 – Prediction of Outdoor Sound Propagation. Amendments to Report AV1106/07 revised 2014 Performed for The Danish Road Directory. Force Technology, 2019
- [8] Official Journal of the European Union - Commission Directive (EU) 2015/996: establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council, 2015.
- [9] Vitor Rosão, et. Al. Necessary adjustments in ISO 9613-2 and CNOSSOS (industries) methods for noise forecasting in Wind Farms. Euronoise 2021
- [10] ISO/PAS 20065:2016 Acoustics — Objective method for assessing the audibility of tones in noise — Engineering method
- [11] L. S. Søndergaard, C. Thomsen, and T. H. Pedersen, “Prominent tones in wind turbine noise - Round-robin test of the IEC 61400-11 and ISO/PAS 20065 methods for analysing tonality content,” in 8th International Conference on Wind Turbine Noise, 2019
- [12] Amplitude Modulation Working Group Final Report: A Method for Rating Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise. UK Institute of Acoustics. IOAAMWG, 2016
- [13] NT ACOU112:2002 Acoustics: Prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq.
- [14] ISO/PAS 1996-3:2022 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 3: Objective method for the measurement of prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq
- [15] Michaud et al. Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects, J. Acoust. Soc. Am., 2016
- [16] Clean planet for all: A European long term strategic vision for a prosperous, modern, competitive, and climate neutral economy. COM/2016/860 final, Brussels: European Commission, 2018.