



ANÁLISIS DEL EFECTO SUELO EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO SOBRE PROYECTOS HÍBRIDOS DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y EÓLICA

Mikel Amatriain Ormazabal¹

¹ RWE Renewables Iberia
Mikel.Amatriain@rwe.com

Resumen

En un proyecto de hibridación coexisten en un único punto de conexión varias tecnologías de generación renovable, con o sin almacenamiento (BESS). La hibridación no está muy extendida en España y Portugal, pero recientemente se ha iniciado tramitación y construcción de numerosos proyectos que hibridan la energía solar fotovoltaica con la eólica.

La inclusión de grandes áreas de paneles fotovoltaicos puede alterar las condiciones del suelo, podría aumentar las reflexiones y favorecer la propagación del sonido. Analizamos el efecto suelo en la propagación sonora de la coexistencia de las tres tecnologías, eólica, solar fotovoltaica y almacenamiento para diferentes localizaciones, configuraciones y condiciones..

Palabras clave: Ruido, hibridación, eólica, fotovoltaica, BESS.

Abstract

In a hybrid project, several renewable generation technologies, with or without storage (BESS), coexist in a single connection point. Hybridization is not widespread in Spain and Portugal, but recently has begun permitting and construction of numerous projects that hybridize solar photovoltaic with wind.

The inclusion of large areas of photovoltaic panels can alter ground conditions, could increase reflections and favour sound propagation. We analysed the ground effect on the sound propagation of the coexistence of the three technologies, wind, solar photovoltaic and storage for different layouts, locations and conditions.

Keywords: Noise, hybridisation, wind, photovoltaic, BESS.

PACS n°. 43.50.Rq, 43.50.Vt, 88.50.-k, 88.40.-j

1 Introducción

En una planta de generación híbrida pueden coexistir diferentes tecnologías con un mismo punto de conexión a la red, de manera que se comparten infraestructuras como la subestación y la línea de evacuación, terrenos actualmente arrendados y caminos de acceso para la operación, así como relaciones con los organismos locales tanto administrativos como sociales, permitiendo una mejor aceptación social.

En el caso de España y Portugal, al disponer de unas condiciones privilegiadas en recurso eólico y solar, permite optimizar los puntos de conexión de forma eficiente y estable. Después de Chipre; Andalucía, Murcia, Canarias y Algarve son las regiones que disponen de los mayores potenciales en recurso solar de toda Europa.

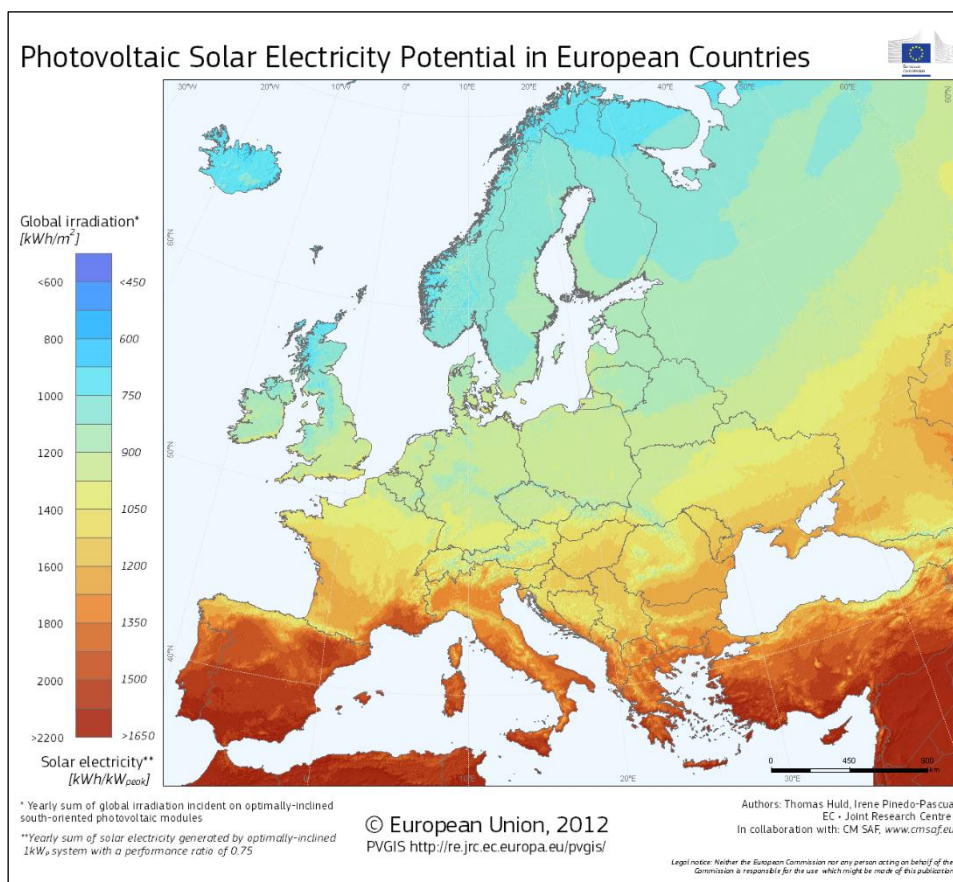


Figura 1 – Potencial fotovoltaico en Europa [1].

El Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica, habilita la hibridación, esto es, el acceso a un mismo punto de la red de instalaciones que empleen distintas tecnologías de generación siempre que esto resulte técnicamente posible. Se modifica la Ley 24/2013, de 26 de diciembre para permitir la autorización de instalaciones con una potencia instalada superior a la potencia de acceso y conexión otorgada. Se introduce además una modificación a la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, para incluir la definición de instalaciones de almacenamiento, las cuales podrán ser titularidad de distintos sujetos del sistema

eléctrico. La adición de elementos de almacenamiento de energía no implicará que se modifique la tecnología de la instalación.

Puesto que el recurso no tiene por qué coincidir temporalmente, la hibridación permite optimizar la evacuación de energía, logrando así un mayor aprovechamiento de la red existente, una mejor utilización del recurso renovable y unas mayores sinergias ambientales.

El Ministerio holandés de Infraestructura y Gestión del Agua investigó en 2020 el uso de la energía fotovoltaica mediante paneles solares en las proximidades de sus carreteras y autopistas. Uno de los temas de investigación fue el efecto de los paneles sobre la propagación sonora del ruido del tráfico rodado, ya que las propiedades acústicas del suelo cambian [2]. En este estudio se realizaron mediciones en un campo de paneles solares con altavoz y micrófonos a 4,5 m de altura. Se utilizó un terreno de referencia de similares características junto a la instalación fotovoltaica para la comparación del efecto del suelo. Los resultados mostraron tanto un aumento como una disminución de los niveles de banda de octava de más 10 dB. Los resultados numéricos demostraron que el efecto acústico es sensible, en particular, a la altura del receptor.

Ante la posibilidad de proyectos de hibridación, junto con la adición de sistemas de almacenamiento, principalmente en parques eólicos existentes, sugiere la necesidad de investigar el efecto del suelo en fuentes a diferentes alturas.

2 Implicaciones acústicas de la hibridación

2.1 Principales fuentes de ruido

Aunque los paneles solares en sí son en gran medida silenciosos, la infraestructura en torno a los proyectos comerciales fotovoltaicos más grandes generan sonido [3].

Las baterías son células electroquímicas que pueden convertir la electricidad en energía química (y por lo tanto, almacenarla) y viceversa. Se dividen en diferentes tipos con respecto a su composición química. Cada batería tiene diferentes características siendo los parámetros más importantes: su tamaño, densidad energética, ciclo de vida y costo. En cuanto a su integración con los sistemas de energías renovables, las baterías tienen que ser recargables para poder ser utilizadas repetidamente. Los tres tipos más comunes de baterías recargables son el plomo-ácido, el níquel-cadmio y el litio-ion.

La adición de elementos de almacenamiento supone la inclusión de fuente de ruido importantes dada la necesidad de refrigeración de estos elementos. Existen diferentes tecnologías de almacenamiento y refrigeración, con una constante evolución tecnológica. Sin embargo, a escala industrial, la necesidad de refrigeración es un punto común en todas las tecnologías actuales.

En función de la cantidad de la potencia de almacenamiento instalada, esta aportación puede ser relevante, ya que en proyectos a gran escala se pueden instalar cientos de unidades en superficies relativamente pequeñas.

Los inversores (en cadena o centrales) son también una fuente importante de ruido. Tanto una instalación fotovoltaica, como una instalación de almacenamiento, necesita de inversores para convertir la corriente continua en corriente alterna. Sin embargo el número de inversores por instalación es menor que el de unidades de almacenamiento. Además, en plantas fotovoltaicas, estas fuentes se encuentran distribuidas

en la superficie de la instalación, reduciendo su impacto y pudiendo ser apantalladas por los propios paneles solares.

Otros elementos como seguidores, en caso de haberlos, son elementos que permiten orientar los paneles a la orientación del sol. No son fuentes relevantes y generalmente, están apantalladas por los propios paneles fotovoltaicos.

Es necesario que la maquinaria o equipamiento esté correctamente determinada mediante estándares como los definidos en las series ISO 3740, como la ISO 3744 [4] o mediante métodos de ingeniería como la ISO 8297 [5] para la determinación de los niveles de potencia acústica de las instalaciones industriales de múltiples fuentes.

En las hibridaciones se incluirán nuevos transformadores de media tensión y los transformadores principales de la instalación operaran a plena carga en periodos de tiempo superiores a las instalaciones con un único recurso.

2.2 Modificación de las condiciones de contorno, efecto de suelo y apantallamiento

La inclusión de grandes superficies de paneles fotovoltaicos modifica las condiciones de suelo pudiendo resultar en una mayor reflexión en el ruido proveniente de los aerogeneradores.

Por otro lado, el uso combinado de paneles fotovoltaicos puede servir de apantallamiento sobre elementos situados a baja altura como son los armarios o contenedores de almacenamiento, los inversores, o los seguidores. Los paneles solares se pueden configurar situándolos estratégicamente para mejorar la mitigación del ruido.

La ocupación de la superficie por paneles fotovoltaicos reduce la vegetación en la zona. Si la vegetación es lo suficientemente densa como para bloquear la línea de visión entre la fuente y el receptor puede atenuar el sonido, principalmente en frecuencias más altas, ISO 9613-2 [6]. En el modelado del ruido de los aerogeneradores, debido a que las turbinas eólicas suelen estar a mayor altura que los receptores, hay poca influencia real entre la fuente y el receptor.

2.3 Modificación de los tiempos de operación de distintas tecnologías

La combinación de diferentes tecnologías de producción y almacenamiento puede permitir la reducción o incremento de la carga en diferentes periodos del día. Esta flexibilidad puede ser aprovechada para minimizar el impacto acústico de una instalación, por ejemplo reduciendo la potencia de un aerogenerador frente a otro con menor impacto acústico o adaptando las cargas y descargas en un sistema de almacenamiento limitando la emisión en periodo nocturno.

3 Configuraciones fotovoltaicas

La configuración más común en las instalaciones fotovoltaicas a escala industrial es con orientación sur. Existen otras configuraciones como la Este-Oeste, que pueden incorporar un gran número de paneles con una menor separación, ofreciendo una ventaja en lugares donde la disponibilidad de terreno es limitada. Es más común encontrar este tipo de configuración en cubiertas de edificios, si bien también se pueden encontrar en infraestructuras como carreteras o fotovoltaica flotante. La instalación agro

voltaica es también de gran interés al compaginar explotaciones agrícolas con instalaciones fotovoltaicas. Los paneles se sitúan con mayor separación y mayor elevación, normalmente en orientación sur.



Figura 2 – Configuraciones de instalaciones fotovoltaicas.

4 Atenuación del suelo en parques eólicos

La atenuación del suelo, A_{gr} , es principalmente el resultado del sonido reflejado por la superficie del suelo interfiriendo con el sonido que se propaga directamente de la fuente al receptor. La ISO 9613-2 define dos métodos de cálculo, el método general y el método simplificado.

Para el método general se especifican tres regiones distintas para la atenuación del suelo: región de la fuente, región del receptor y región intermedia. La región de la fuente se extiende a lo largo de una distancia de la fuente hacia el receptor de 30 veces la altura de la fuente. Los aerogeneradores están caracterizados como fuentes puntuales a la altura de buje, por lo que en parques eólicos modernos, con alturas de buje superiores a 100 metros, la región de la fuente se extiende a distancias superiores a 3 Km. La región del receptor se extiende a 30 veces la altura del receptor, siendo esta de 120 metros para una altura de receptor de 4 metros (altura mínima recomendada para predicciones). De forma general, las regiones fuente y receptora se superponen, al superar la distancia entre fuente y receptor, por lo que no hay región media.

Las propiedades acústicas de cada región se consideran a partir del factor de suelo G. Si una región se caracteriza por N secciones, se realiza un promediado de G para las N secciones.

Para alturas de fuente (o receptor) elevadas, y distancias entre fuente y receptor inferiores a $30 \cdot (h_s + h_r)$ la atenuación por suelo se simplifica para todas las contribuciones en bandas de octava a $A_{gr} = -1.5$ dB independientemente del valor de G para las bandas igual o menores a 1000 Hz y entre 0 y -1.5 dB para las bandas superiores en función del valor de G, independientemente de la altura de fuentes y receptores. Una atenuación negativa significa un incremento en los niveles sonoros calculados.

Para el método simplificado la influencia del suelo es independiente del tipo de suelo y sus propiedades acústicas. Para una altura media h_m de la trayectoria de propagación por encima del suelo, expresada en metros y una distancia d expresada en metros la atenuación se calcula mediante la fórmula (1)

$$A_{gr} = 4,8 - \left(\frac{2h_m}{d}\right) \left[17 + \left(\frac{300}{d}\right)\right] \geq 0 \text{ dB}, \quad (1)$$

Para un terreno llano, considerando una altura de la fuente de 100 metros y un receptor a 4 metros, los valores de A_{gr} serán 0 dB para distancias inferiores a 390 metros y la atenuación del suelo será de 3 dB para una distancia de 1000 metros.

La corrección K_{geo} (2) es la corrección de la geometría debido a las relaciones distancia-altura, para h_s la altura de la fuente sobre el suelo, h_r la altura del receptor sobre el suelo y d_p la distancia entre la fuente y el receptor, todas expresadas en metros. Para distancias superiores a 500 metros, la corrección debido a la geometría tiende a 1.

$$K_{geo} = \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2}, \quad (2)$$

Cuando la atenuación del suelo se calcula utilizando el método simplificado, se debe incluir una corrección de directividad D_{Ω} . Esta corrección tiene en cuenta el aumento aparente del nivel de potencia acústica de la fuente debido a la reflexión del suelo sin pérdida de reflexión y tiende a 3 dB para distancias superiores a 500 metros.

$$D_{\Omega} = 10 \lg(1 + K_{geo}) \text{ dB}, \quad (3)$$

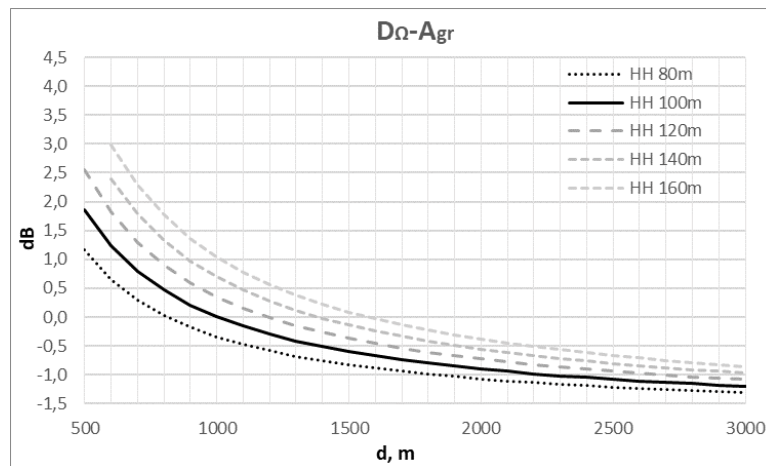


Figura 3 – Corrección de directividad menos atenuación del suelo para método simplificado considerando diferentes alturas de buje.

Los receptores cercanos a un parque eólico habitualmente se encuentran a distancias de entre 500 y 1000 metros. Se puede ver cómo, con el método simplificado, la corrección para un aerogenerador con altura de torre de 100 metros, es de 0 dB para una distancia de 1000 metros, teniendo una corrección positiva para distancias inferiores. Para una altura de buje de 160 metros para distancias inferiores a 600 metros los resultados muestran una atenuación del suelo de 0 dB, resultado en una corrección constante de 3 dB debido a la corrección por directividad.

El método posiblemente no es el más adecuado para una fuente de ruido a gran altura. Se podría pensar en ajustar la corrección en base a otros criterios, como los métodos utilizados en ruido de aviación, como el FLULA2 suizo [7], S. Pietrzko desarrolló una fórmula de atenuación del ruido de los aviones a partir de consideraciones teóricas y comparaciones con los valores de nivel calculados y medidos en las estaciones de monitorización, en el que la atenuación por el suelo tiene en cuenta el ángulo de elevación β entre la fuente y el receptor, siendo la corrección de 0 dB para ángulos inferiores a 15° . Para un aerogenerador con altura de buje de entre 100 y 120 metros, en terreno llano, este ángulo se sobrepasa

para distancias inferiores a, entre 400 y 500 metros. En general, se podría establecer una distancia de 4 veces la altura del buje del aerogenerador como límite para valorar el efecto del suelo.

El factor suelo tiene un impacto relevante en los niveles de sonido modelados. La consideración de un suelo de tipo blando o poroso ($G=1$) resulta en niveles sonoros menores a los resultados obtenidos al considerar un suelo de tipo duro o reflectante ($G=0$). Las instalaciones renovables, normalmente se encuentran en regiones de tipo forestal o agrícola, por lo que cabría pensar que el tipo de suelo a considerar es de tipo blando con un factor de suelo cercano a $G=1$. Sin embargo, muchos estudios han demostrado que el uso de un factor suelo muy blando subestima los niveles de sonido reales [8]. Kaliski y Duncan [9] encontraron que el uso de $G=1$ sobre las tierras agrícolas subestima en una media de 5 dB los niveles de inmisión reales, mientras que un estudio del centro de Energía Limpia y el Departamento de Protección Ambiental de Massachusetts encontró una subestimación de hasta 7 dB [10].

El Grupo de Trabajo sobre el ruido de los aerogeneradores del Instituto de Acústica del Reino Unido (IoA) recomendó la no utilización de un factor de $G=1$ en la evaluación de parques eólicos. Recomendando el uso de factores entre $G=0$ y $G=0.5$ en función de la consideración del ajuste por la incertidumbre en la emisión de los aerogeneradores [11].

La reciente actualización de la ISO 9613-2 incluye un anexo relativo a la aplicación del método en tecnología eólica siguiendo la misma línea de recomendación del IoA. Igualmente, la recientemente publicada IEC TS 61400-11-2 [12], relativa a las técnicas y métodos normalizados aplicables a la medición de la inmisión de ruido en sistemas de generación de energía eólica sigue estas recomendaciones.

Para los requisitos de cálculo operativo de la metodología CNOSSOS, la absorción acústica de un suelo está representada por un coeficiente adimensional G , entre 0 y 1. G es independiente de la frecuencia. En la Tabla 1 figuran los valores G para el suelo al aire libre. En general, el promedio del coeficiente G sobre una trayectoria toma valores entre 0 y 1. Aquí la media G representa la fracción absorbente a lo largo de la trayectoria.

Tabla 1 – Valores de G para diferentes tipos de suelo recomendados para el método CNOSSOS-EU [13].

Descripción	Tipo	Valor G
Muy blando (con nieve o con hierba)	A	1
Suelo forestal blando (con brezo corto y denso o musgo denso)	B	1
Suelo blando no compacto (césped, hierba o suelo mullido)	C	1
Suelo no compacto normal (suelo forestal y suelo de pastoreo)	D	1
Terreno compactado y grava (césped compactado y zonas de parques)	E	0,7
Suelo denso compactado (carretera de grava o aparcamientos)	F	0,3
Superficies duras (hormigón y asfaltado convencional)	G	0
Superficies muy duras y densas (asfalto denso, hormigón y agua)	H	0

En general, los valores de la absorción del terreno son muy elevados en comparación con las recomendaciones para parques eólicos. Esta sobreestimación de la absorción del terreno se debe principalmente a la altura de la fuente, situada a alturas superiores a los 100 metros en los aerogeneradores modernos. La emisión de los aerogeneradores se caracteriza como una fuente puntual a altura de buje, a partir de mediciones de acuerdo a la IEC 61400-11 [14].

En el caso del modelo Nord2000 [15], es un modelo más sofisticado, la clasificación de las superficies del suelo se define por la impedancia acústica normalizada Z y por el parámetro de rugosidad del suelo σ_r . Cada segmento de terreno recto en el modelo de terreno simplificado se le asigna un valor de Z (o mezcla de valores) y de σ_r . El parámetro de rugosidad se utiliza para cuantificar el desnivel de cada

segmento del terreno. El suelo se caracteriza generalmente por la resistividad del flujo del suelo y la impedancia del suelo se calcula utilizando el modelo de impedancia de un parámetro de Delany y Bazley [16]. A partir de la resistividad al flujo se calcula la impedancia para diferentes frecuencias (en tercios de octava). La impedancia del suelo Z se utiliza para calcular el coeficiente Q de reflexión esférica para propagación coherente y el coeficiente R de reflexión para propagación incoherente.

Podemos ver en la Tabla 2, como existen similares criterios de clasificación del factor de suelo para las tres metodologías de cálculo: ISO9613-2, CNOSSOS y Nord2000.

Tabla 2 – Clasificación de impedancia para resistividad al flujo y factor G [17].

Clase de Impedancia	Resistividad al flujo ($kNsm^{-4}$)	Equivalencia ISO9613-2	Equivalencia CNOSSOS	Clase de Resistividad al flujo (NordTest)	Descripción
A	12.5	1	1	10 - 16	Muy blando (nieve)
B	31.5	1	1	25-40	Suelo forestal (arbusto, musgo)
C	80	1	1	63-100	Tierra suelta, campo labrado, césped
D	200	1	1	160-250	Suelo normal no compactado
E	500	0	0.7	400-630	Suelo compactado
F	2000	0	0.3	2000	Suelo muy compactado, gravilla
G	20000	0	0	20000	Superficie dura (asfalto)
H	200000	0	0	200000	Superficie muy dura (hormigón, agua)

5 Comparación de diferentes modelos para las tres tecnologías a estudio

Se realiza el modelado de una planta de hibridación con 2 aerogeneradores de 6 MW situados al norte y sur de una parcela de unas 20 hectáreas de terreno llano, junto con una planta fotovoltaica de aproximadamente la misma potencia con una superficie en paneles de unas 10 hectáreas. Se incluye además un sistema de almacenamiento con una capacidad de 12 MWh situado al oeste de la parcela.

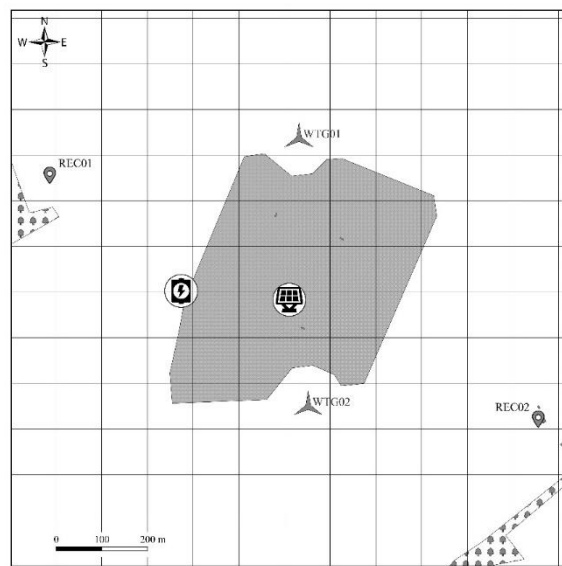


Figura 4 – Esquema de localización de fuentes y receptores.

Se comparan los resultados para tres metodologías ISO 9613-2, CNOSSOS-EU y Nord2000. Para la modelización de las fuentes se utilizan fuentes puntuales para los aerogeneradores, inversores en cadena y transformadores de media tensión para la instalación fotovoltaica y dos refrigeradores por contenedor además de la estación de potencia para el sistema de almacenamiento. A la emisión del almacenamiento

se le incluye un factor de directividad de tipo cardioide al situarse las fuentes en una de la cara de los contenedores.

Se realiza la simulación de cada una de las tecnologías por separado considerando diferentes factores de suelo, tanto como factor general del modelo con factores de $G=0$, 0.5 y 1 , así como para la región ocupada por los paneles solares, considerando un $G=0$ para la superficie de los paneles y para la superficie ocupada por los mismos (incluyendo separaciones y caminos).

La evaluación se realiza sobre dos puntos de control, uno situado al este de la instalación (R02) y el otro situado al oeste (R01). Ambos puntos se encuentran aproximadamente a 500 metros de cada aerogenerador con una región de paneles fotovoltaicos de similares dimensiones. El sistema de almacenamiento se sitúa al oeste de la planta fotovoltaica, de manera que la trayectoria desde la fuente de ruido del almacenamiento al punto R01 no atraviesa la región ocupada por los paneles, mientras que en la trayectoria desde el almacenamiento al punto R02 los paneles ocupan alrededor del 50% del trayecto.

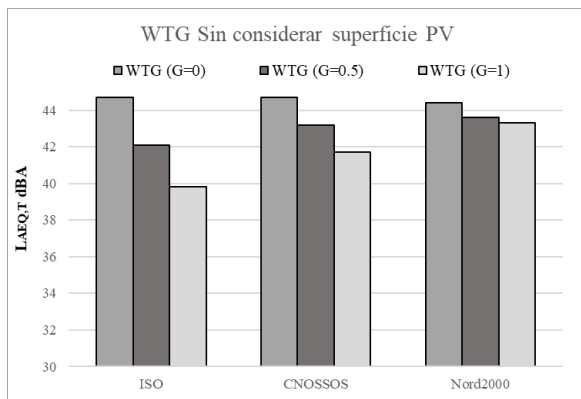


Figura 5 – Comparativa de la aportación de los aerogeneradores en R02 para diferentes factores de suelo y métodos de cálculo

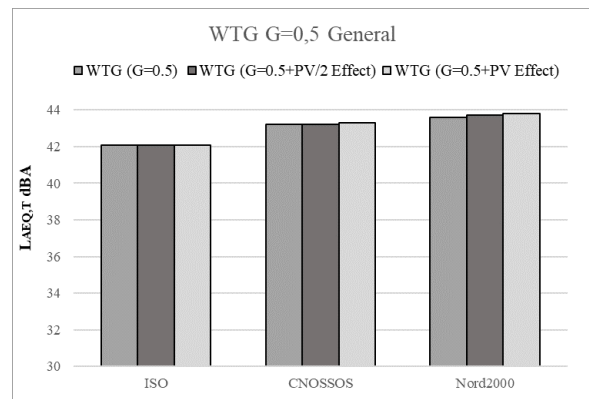


Figura 6 – Comparativa del efecto de los paneles sobre la aportación de los aerogeneradores para R02

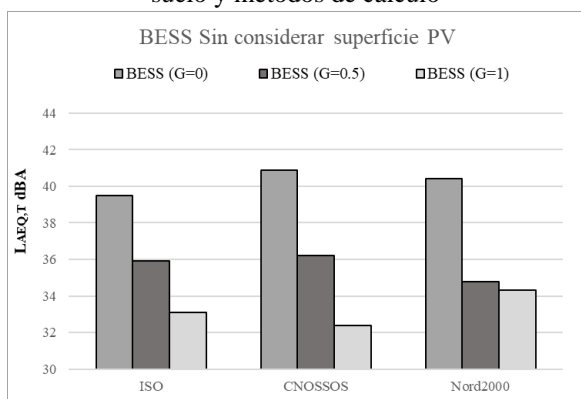


Figura 7 – Comparativa de la aportación de las baterías en R02 para diferentes factores de suelo y métodos de cálculo

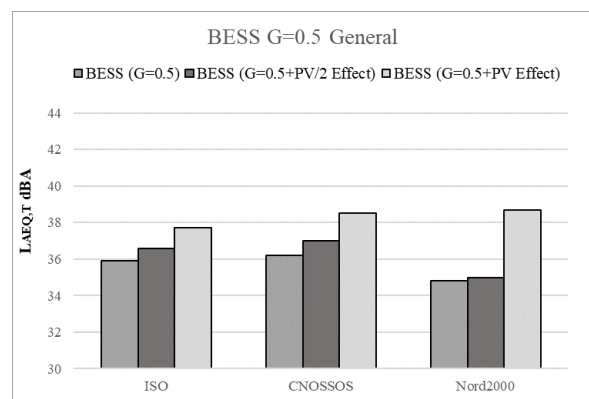


Figura 8 – Comparativa del efecto de los paneles sobre la aportación de las baterías para R02

Podemos apreciar que el método ISO 9613-2 es el más sensible a la variación del factor de suelo general al evaluar la aportación de los aerogeneradores con una diferencia de hasta 5 dB entre $G=0$ y $G=1$. Estos resultados muestran una diferencia similar a la mencionada en el apartado 4. El método CNOSSOS muestra una diferencia máxima de 3 dB y el método Nord2000 es el menos sensible con una diferencia de 1.1 dB, con niveles en el rango superior si se comparan con el método ISO 9613-2. Al comparar la

aportación del sistema de almacenamiento para diferentes factores de suelo, podemos observar diferencias de hasta 8.5 dB para el modelo CNOSSOS entre comparando un factor $G=0$ con $G=1$.

Al modelar el efecto de los paneles fotovoltaicos sobre la propagación del ruido de los aerogeneradores, con una fuente puntual situada a 115 metros, el efecto de la inclusión de la región reflectante es mínimo con diferencias máximas de 0.2 dB para el modelo Nord2000 y nulas para el modelo ISO 9613-2, independientemente del factor de suelo utilizado. Sin embargo al comparar la aportación de los contenedores de almacenamiento, con una fuente puntual situada a 1.6 metros (altura media de los ventiladores), se aprecia que el método más sensible a la inclusión de los paneles fotovoltaicos y la región reflectante es el modelo Nord2000 con un incremento de hasta 3.9 dB. El método CNOSSOS se encuentra en niveles intermedios con un incremento de 2.3 dB, mientras que el método ISO 9613-2 es el menos sensible con un incremento de 1.8 dB.

El modelado del sistema de almacenamiento con un único factor de suelo general de $G=0.5$, sin considerar la región ocupada por los paneles fotovoltaicos, resulta en los mismos niveles sonoros que el modelado del sistema con un $G=1$ general y una región reflectante representativa de la zona de paneles fotovoltaicos con una factor de $G=0$. Sin embargo, la utilización de un factor de suelo de $G=1$ resultará en una disminución de la aportación de los aerogeneradores de hasta 5 dB.

6 Conclusiones

La sensibilidad de la variación del tipo de suelo, está directamente relacionada con la altura de la fuente y el receptor. El uso de factores de suelo blandos en el modelado de parques eólicos es una práctica no recomendada, al subestimar los niveles reales de inmisión para fuentes de ruido elevadas. Siendo los factores recomendados entre $G=0$ y $G=0.5$. El factor del suelo puede ser un parámetro determinante en los modelos de propagación sonora, con diferencias de entre 5 y 8.5 dB para diferentes tecnologías y tipos de suelo utilizados.

El desarrollo de aerogeneradores de mayores dimensiones con fuentes de ruido a mayor altura puede implica la necesidad de replantear los métodos de cálculo de la propagación del sonido. Con los métodos comparados, ISO 9613-2, CNOSSOS-EU y Nord2000, al incluir diferentes tecnologías, incluyendo fuentes a gran altura y fuentes cercanas al suelo se ha de buscar un equilibrio en la atenuación del suelo, al poder subestimar la aportación de unas fuentes y a la vez sobrestimar la aportación de otras.

En los modelos no se incluye el posible efecto resonador de los paneles fotovoltaicos. La adaptación de las distancia entre los paneles puede resultar en una disminución de determinadas frecuencia por efecto resonador bajo los paneles fotovoltaicos. Es un fenómeno que debe ser investigado más a fondo ya que podría ayudar a atenuar las bajas frecuencias en parques eólicos. En función del tipo de instalación fotovoltaica, los paneles solares de ubican a mayor y menor altura incluso en orientación vertical, permitiendo utilizarse como pantallas acústicas.

La adición de grandes superficies de paneles fotovoltaicos puede alterar las propiedades de absorción e incrementar los niveles sonoros provenientes de otras fuentes como tráfico rodado o ferroviario. Igualmente un diseño específico puede atenuar mediante apantallamiento la aportación de estas fuentes.

Es necesario contrastar los modelos con mediciones in situ con el fin de estudiar el efecto del suelo en distintas configuraciones, así como en terrenos más complejos.

Referencias

- [1] Huld, T. (2017). PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas. *Solar Energy*. 142. pp. 171-181.
- [2] van Der Eerden, F., Salomons, E., Eisses, A. (2020). Effects of solar panel fields on sound propagation. *Forum Acusticum*, Dec 2020, Lyon, France. pp.857-861.
- [3] Kaliski, K., Old, I., Duncan, E. (2020). An overview of sound from commercial photovoltaic facilities. *NOISE-CON 2020*, New Orleans, Louisiana.
- [4] International Organization for Standardization. (2010). Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane (ISO Standard No. 3744:2010).
- [5] International Organization for Standardization. (1994). Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment - Engineering method (ISO Standard No. 8297:1994).
- [6] International Organization for Standardization. (2024). Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors (ISO Standard No. 9613-2:2024).
- [7] Empa, the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. (2010). FLULA2 Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Dübendorf, Switzerland.
- [8] Kaliski, K., Bastasch, M., O'Neal, R. (2018) Regulating and predicting wind turbine sound in the U.S. *Inter-Noise 2018*. Chicago, Illinois.
- [9] Kaliski, K., Duncan, E. (2008). Propagation Modeling Parameters for Wind Power Projects. *Sound & Vibration*, Vol. 24 no. 12, December 2008. pp. 12-15.
- [10] RSG, Epsilon Associates, Northeast Wind. (2016). Massachusetts Study on Wind Turbine Acoustics. White River Junction, Vermont. Massachusetts Clean Energy Center and Department of Environmental Protection.
- [11] Institute of Acoustics. (2013). A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise. Hertfordshire, UK.
- [12] International Electrotechnical Commission. (2024). Wind energy generation systems - Part 11-2: Acoustic noise measurement techniques - Measurement of wind turbine sound characteristics in receptor position (IEC Technical Standard No. 61400-11-2:2024).
- [13] MITERD-CEDEX. (2022). Guía básica de recomendaciones para la aplicación de los métodos comunes de evaluación del ruido en Europa (CNOSSOS-EU). Madrid, Spain.
- [14] International Electrotechnical Commission. (2018). Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques (IEC Standard No. 61400-11:2012+AMD1:2018 CSV).
- [15] B. Plovsing, B., Kragh, J. (2006). Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction, Report AV 1849/00 (revised). DELTA Acoustics & Vibration (now FORCE Technology). Hørsholm, Denmark.
- [16] Delany, M.E. and Bazley, E.N. (1970) Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. *Applied Acoustics*, 3, 105-116.
- [17] Kephelopoulos S, et al. (2014). Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping. *Science of the total environment*. pp. 482-483; pp. 400-410. JRC86997