

PARQUES EÓLICOS OFFSHORE. FACTORES QUE DETERMINAN, EN EL MAR, SU IMPACTO ACÚSTICO MEDIOAMBIENTAL

Carlos Ranz Guerra

Instituto de Acústica-CSIC
C/ Serrano 144. 28006 MADRID. iacd300@csic.es

Resumen

Este trabajo analiza el impacto de los Parques Eólicos offshore. Se presenta la situación de este tipo de instalaciones en nuestro entorno más próximo, y se describen las razones que hacen que estas instalaciones crezcan en número. El trabajo continúa analizando el entorno afectado por la instalación de estos Parques, o sea, en la actualidad la zona marina de aguas poco, o muy poco profundas. Las diferentes fuentes se identifican en el apartado siguiente teniendo en cuenta toda la vida útil de las instalaciones: montaje, producción y desmontaje. En un apartado posterior se describen los métodos y técnicas de medida y evaluación del ruido, su control junto a los procesos propios de mantenimiento y las técnicas disponibles, en la actualidad para reducir o mitigar su impacto. El trabajo termina con unas breves conclusiones.

Palabras-clave: Ruido marino, aguas marinas poco y muy poco profundas, parques eólicos offshore.

Abstract

The paper presents a summary of the noise characteristics that are present in the offshore windfarms that could have influence on the shallow and very shallow water environment where the windfarms are located. First, there is a presentation of the windparks installations in the EU, and the reason that justifies why they are becoming so popular. The specific marine environment where the turbines are installed is described. The following paragraph goes into the description of the noise sources of the Park along the three steps of their productive life: installation, production and decommissioning. Some results are also presented, compared with the background noise. A review follows on the methods to measure and evaluate the noise from the wind mill sources as well as the mitigation measures that could be taken to lower the noise impact. A brief set of conclusions ends the presentation of this paper.

Keywords: Marine noise, shallow and very shallow marine waters, offshore windfarms.

1 Introducción

Se sabe que el ruido en el mar tiene efectos sobre la vida marina. La regulación del Ruido Marino, generado por actividades humanas, además de ser una materia compleja, tiene, a veces, implicaciones

que enfrentan no sólo a comunidades de intereses sino, también a colectivos nacionales. El ruido generado en un punto del medio marino es capaz de propagarse a distancias de cientos de Km en determinadas circunstancias oceanográficas y determinadas frecuencias.

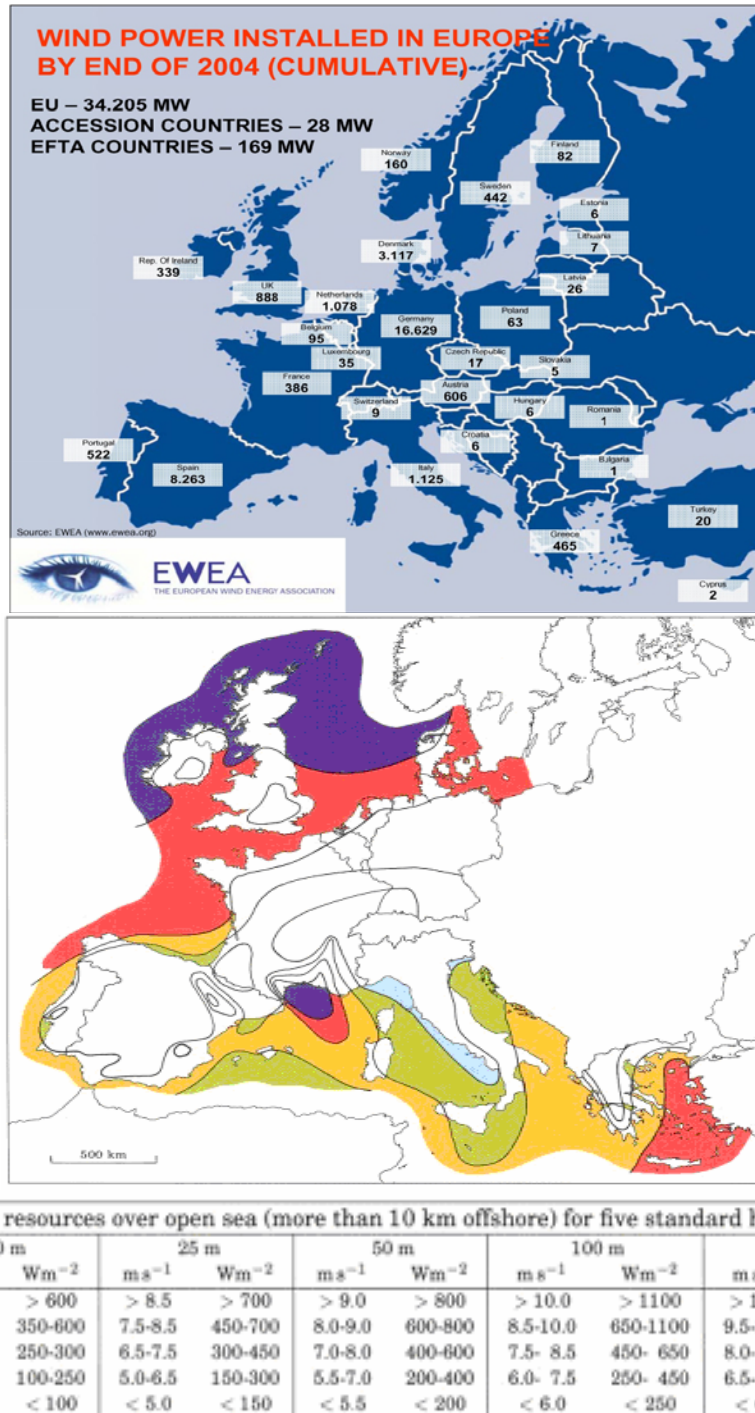


Figura 1. La parte superior presenta los MW de origen eólico (por países). La parte inferior ilustra sobre la potencialidad (eólica) de las aguas, abiertas, de los mares europeos, frente a la altura del generador y la velocidad del viento

Este trabajo presenta algunos datos en relación con los Parques Eólicos Offshore. Se les evalúa como fuentes de ruido y se estima su impacto en el entorno de las aguas poco y muy poco profundas.

La figura 1, en su parte superior, presenta unos datos referidos a 2005 y en los que aparecen los MW de origen eólico generados por los países de la Unión. La figura 1, en su parte inferior, presenta la potencialidad de las aguas europeas para generar electricidad de origen eólico. Este último dato aparece frente a dos parámetros: la altura sobre el agua y la velocidad del viento. En estos datos destacan por el número de MW de origen eólico tres países. Alemania, España y Dinamarca. En 2007 la electricidad de origen eólico alcanzó una cifra que superó los 70000 MW. La energía generada cubrió el 20% de las necesidades de Dinamarca, el 11%, con picos de hasta el 30% en España, y el 7% en Alemania. La eficacia (rendimiento) de un parque eólico, tanto “inshore” como “offshore” depende de la rugosidad del entorno sobre el que se asienta, y en consecuencia de la estabilidad del flujo de viento, cada vez mayor a medida que nos elevamos en altura, reduciéndose además las turbulencias, las ráfagas, y la viscosidad del aire. La rugosidad de la superficie del mar es significativamente menor que la de la superficie terrestre. De este resultado se infiere, en gran parte, el interés despertado por los Parques Eólicos offshore en USA y en la UE. Así, pueden citarse como próximas realizaciones los proyectos, en marcha, tales como : el London Array, de 1GW de potencia, el Greater Gabbard, de 0.5 GW, en el Reino Unido, o los Parques proyectados, para 2012, en España con una potencia global generada de hasta 2.7 GW.

.La potencia útil extraída, P_w , por el aerogenerador depende, para una misma altura, del área barrida por las palas, de la velocidad del viento v , y de la densidad del aire, ρ , según la expresión

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3$$

donde R es la longitud de las palas. La ley de Betz's, sin embargo pone un límite a la conversión de energía cinética en mecánica, situándole en el 59% [1]. A pesar de esta drástica reducción, la dependencia con la tercera potencia de la velocidad del viento hace que regímenes en los que la velocidad media supere los 5 m/s, sean rentables. Por otra parte, el viento está constantemente variando tanto de dirección como de módulo, Figura 2.

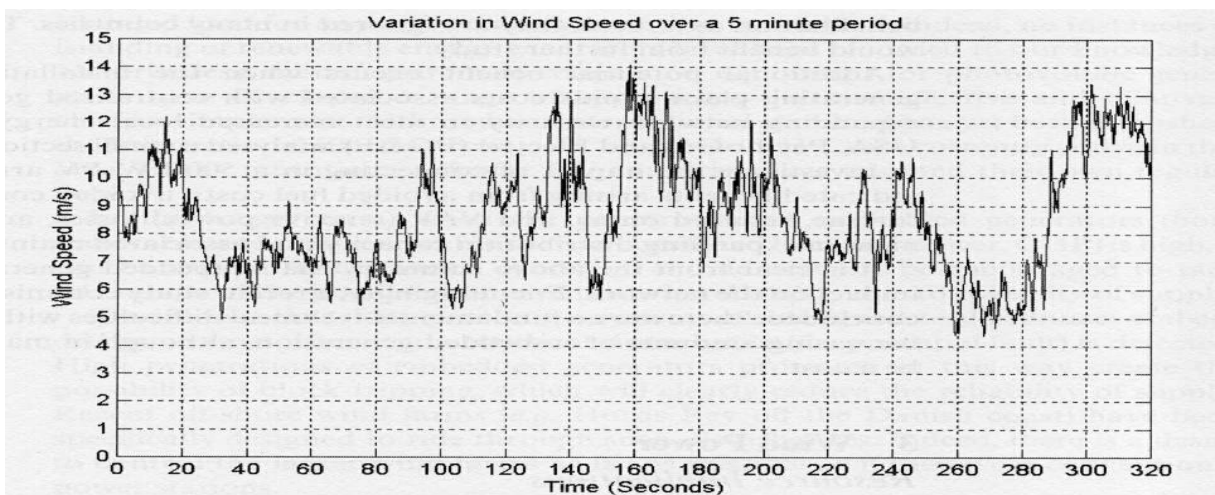


Figura 2. Valor del módulo del viento (velocidad), cada cinco minutos, durante un periodo de más de cinco horas

Aunque una dirección o una banda de direcciones, es, en cualquier punto predominante, el viento varía según diferentes ritmos: anual, estacional, sinóptico (según el paso de frentes meteorológicos), diurno, y turbulento (variación de segundo a segundo). Las fluctuaciones rápidas de módulo pueden traducirse en variaciones de muy corta duración, en los outputs generados, lo que reduce la eficacia del proceso conversor a no ser que se agrupen las turbinas. El agrupamiento de turbinas tiene el efecto estadístico de ‘agregación’, por el cual resulta un output ‘suavizado’. Para que esto sea verdad se asume que las fluctuaciones creadas por el movimiento individual, de corta duración, en cada turbina no está correlacionado con el de las otras; en consecuencia la variación del output resultante de la agregación varía (cae) según la ley $1/\sqrt{N}$, donde N es el número de turbinas en el grupo.

Un Parque Eólico offshore esta formado por una serie, (varios cientos incluso) de aerogeneradores montados sobre estructuras verticales ancladas en el fondo. Es precisamente el proceso de fijado en el fondo (y desanclado en su momento) los que generan mayor impacto ruidoso en el entorno marino. La ingeniería más reciente dice que la solución definitiva frente al impacto del ruido sobre humanos y sobre la vida marina, e impacto visual, vendrá de turbinas flotantes, como muestra la figura 3. Estas estructuras, sin embargo son, ahora, enormemente costosas en realización, mantenimiento y conservación y sólo un precio muy alto de la energía podría justificar soluciones de este cariz.



Figura 3. Solución flotante de aerogenerador offshore

El número y dimensiones de los Parques Eólicos offshore se esta incrementando de manera significativa. El impacto del ruido de todas las turbinas, en funcionamiento, así como el ruido generado, de carácter antropogénico, durante las fases de instalación o su desmontaje, necesita ser considerado, regulado, medido y mitigado, si fuera necesario Este ruido habrá que distinguirlo, en su caso, del ruido natural originado en procesos propios del entorno marino. Sólo el ruido de origen humano, (p.e. el ruido introducido por la instalación y funcionamiento de un Parque Eólico offshore), necesita ser regulado. Como, ya hemos señalado brevemente, a razones medioambientales se superponen razones políticas y económicas que pueden limitar o polarizar tales regulaciones. Existen, sin embargo, bases legales sobre las que apoyar cualquier acción que pueda permitir, o en su caso actuar para reducir el impacto del ruido. Un ejemplo de base legal está en la Convención de Naciones

Unidas de 1982 sobre la Ley del Mar (1982 UN LOS Convention), que abarca todos los aspectos relacionados con la contaminación por radiación (e.l.m., radiactiva, térmica, etc.). ¿Es el ruido un contaminante del medio marino? De acuerdo con la LOS Convention, contaminación es: “La introducción, por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o **energía** dentro del medio marino, incluyendo estuarios, que ocasiona, o puede ocasionar efectos nocivos o daño a los recursos y vida marina, riesgo a la salud humana, obstaculizar las actividades marinas incluyendo la pesca o cualquier otro uso legítimo del mar, deterioro en la calidad de los usos del agua marina o reducción de su disfrute”. La misma Ley (Artículo 240) dice: “Los Estados tienen como deber reforzar la observancia, la medida, la evaluación y el análisis, por métodos científicos reconocidos, de los riesgos y efectos de la contaminación marina, bien directamente o bien a través de Organizaciones Internacionales de probada capacidad y competencia”. De todo lo anterior se puede concluir que, al menos, existe una ley Internacional que apoya la lucha contra la contaminación acústica, ya que el sonido como una forma de energía, cae dentro de la definición de contaminación del entorno marino. Para no ser exhaustivos sobre este tema, animo al lector a acudir a algunos de los trabajos recientemente publicados y que resumen adecuadamente el estado de la cuestión en estos momentos. Desde estos trabajos el lector puede ser dirigido a multitud de otras aportaciones en forma de Informes, Libros, Publicaciones, etc, [2, 3, 4, 5, 6].

Este trabajo analiza las fuentes de ruido que surgen con motivo de la presencia de un Parque Eólico Offshore en todas sus fases. Una primera parte está dedicada a la descripción del entorno natural en el que se instalan estos parques, o sea las aguas poco o muy poco profundas. Una segunda parte revisa, más detenidamente las fuentes de ruido propias, así como su impacto sobre las especies marinas del entorno. Con posterioridad se presentan, someramente, los métodos de medida y evaluación del ruido junto con algunos de los recursos existentes para mitigar el efecto de este tipo de fuentes. Es importante declarar que los efectos, o implicaciones legales no serán objeto de análisis, en este trabajo, a ningún nivel.

2 Entorno de aguas poco o muy poco profundas.

2.1 Propagación sonora.

Las aguas muy poco profundas son una parte de la región o zona de aguas poco profundas. Están limitadas por la profundidad de 30 m. y por la línea de rompientes. Con esta definición se entiende que, en el presente nivel tecnológico, la práctica totalidad de Parques Eólicos offshore están situados en la zona de aguas muy poco profundas. Acústicamente, las aguas muy poco profundas son aquellas en las que la profundidad equivale a un pequeño número de longitudes de onda. En estos casos, la naturaleza ondulatoria de la radiación acústica, decide cuando una señal puede, o no puede propagarse, lo que equivale a preguntarse si existe un número suficiente de modos (cada uno de ellos asociado a una determinada incidencia angular sobre las superficies límites), para que la perturbación mecánica se propague tal como es o lo haga “filtrada” o no se propague. El número de modos depende, por lo tanto, de la profundidad y de la calidad del fondo marino. Aquellos modos cuyo ángulo horizontal de propagación sobrepase al ángulo crítico, sólo se propagarán a distancias inferiores a varias veces la profundidad, [7].

Las fluctuaciones aleatorias naturales, [8, 9], en el entorno de las aguas muy poco profundas, incrementan las dificultades en la propagación sonora. El proceso de propagación deja de ser, en muchos casos, un proceso determinista para pasar a ser un proceso estadístico. A este carácter

aleatorio contribuye, de manera especial, la rugosidad del perfil de la superficie marina, y también, en otros casos, la rugosidad del fondo. El sonido se refleja y se dispersa en un gran número de direcciones, el oleaje con su movimiento ascendente y descendente hace que el proceso de detección sea impredecible. Se conoce desde mucho tiempo atrás el efecto sobre el sonido de las nubes de burbujas creadas por el paso del oleaje, o si se quiere, por la acción del viento, muy en especial para velocidades superiores a 5 m/s, [10, 11].

2.2. El ruido y su impacto en la vida marina.

El hombre es consciente del potencial daño que el ruido, antropogénico, puede causar a los animales marinos, [12]. La presión, es tan fuerte que incluso la Marina de los EEUU, a pesar de la autorización del Presidente Bush, ha tenido que limitar el nivel de emisión de sus sónares durante los ejercicios de entrenamiento, en los últimos años. La Unión Europea a través de su Parlamento ha solicitado y conseguido, desde 2004 una moratoria en el uso de fuentes sonoras de alta intensidad, independiente de su origen. La vida útil de un Parque Eólico comienza con su fase de instalación, que ha significado unas tareas de exploración geofísica, seguida de una serie de procesos de “clavado”, (piling), en el fondo marino, de los soportes de los aerogeneradores. Esta es la fase más ruidosa del proceso y la que ha merecido la mayor atención frente a su posible impacto en la vida marina. La información ha de complementarse identificando cual es la vida marina afectada: mamíferos, reptiles, pesca, etc., y en que grado y cómo lo es: daño auditivo, daño sobre tejidos internos, muerte, etc., o si ese proceso ruidoso influye sobre otros procesos en el comportamiento de los animales: enmascaramiento de la comunicación entre individuos, [13], desorientación para localizar alimentos o frente a los depredadores, falta de reposo, apareamiento, desplazamiento de especies que pueden explicar las drásticas reducciones de capturas en la industria pesquera, o influir en la cadena alimentaría según han demostrado recientes experimentos en acuarios, en los que el ruido se traduce en una disminución tanto del número como del tamaño de las especies en la base de la cadena trófica, [14].

La investigación científica, más reciente, sobre el impacto del ruido en la fauna marina, cubre varios aspectos. En primer lugar se ha intentado aumentar el conocimiento acerca de los criterios y umbrales, en relación con problemas fisiológicos y de comportamiento, localización y abundancia de las especies marinas afectadas. Una segunda etapa ha estudiado las características de las fuentes y las posibles vías y modos de propagación. Esto que es válido para el entorno marino en general, tiene una especial significación para los Parques Eólicos offshore y las aguas muy poco profundas, en particular. Una tercera línea de investigación es el resultado de la integración de grandes series de datos numéricos, de importantes grupos de investigadores, consecuencia de los cuales son, entre otros, los modelos de respuesta de especies concretas a estímulos con distinta gradación, y con los que una predicción adecuada puede ser factible, ayudando a una sostenible planificación medioambiental, incluyendo además caminos acústicos entre fuentes y grupo de animales, así como monitoreado y técnicas de mitigación. Existen algunos modelos que cubren aspectos parciales, [15], aunque es un campo muy abierto en el que, en la actualidad, no hay resultados concluyentes. [16]. En relación con el primer grupo de trabajos realizados, la cuantificación de los efectos, sobre la audición, de la exposición al ruido es uno de los que mayor interés ha despertado. El efecto del ruido sobre la capacidad auditiva de mamíferos marinos y peces, se valora a través de la elevación del umbral de audición, cambio que puede ser temporal (TTS, ‘Temporal Threshold Shift’), o permanente, (PTS, ‘Permanent Threshold Shift’), [17]. La figura 4 presenta, los niveles de presión sonora, SPL, capaz de provocar TTS en especies concretas: delfines (bottlenose), y ballenas blancas, y para distintas fuentes: cañones de aire, ruido de banda limitada, onda continua, etc.; la duración de las señales aparece en el eje de abcisas. A la derecha, en la misma figura aparecen las curvas de umbral de audición para algunos mamíferos marinos.

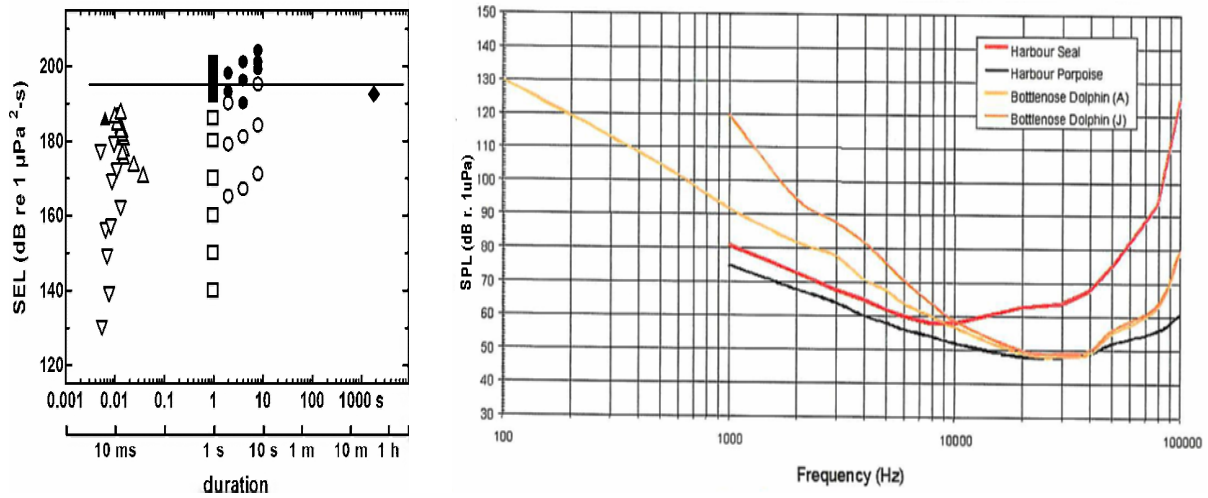


Figura 4. Nivel de exposición sonora, SEL, capaz de originar TTS (en negro), en delfines bottlenose y ballenas blancas, en función de la duración de la señal y de su tipo (izquierda), (Ref. [6], Fig 1). Umbral de audición en cuatro especies de mamíferos marinos, (derecha).

En Relación con los peces, los datos existentes son de otra naturaleza y en cierta manera son poco concluyentes. El fundamental trabajo de Hasting y Popper [18], aporta algunos resultados pero referidos a señales tipo impulsivas como las que se encuentran en procesos de inserta de pilotes en el fondo marino, (puertos, plataformas, parques eólicos, etc...). Otros datos, [19], revelan que especies como la trucha arcoiris se recupera bien a pesar de haber sufrido TTS estando inmersa en señales de sonar de baja frecuencia y de alto nivel; la extrapolación de estos resultados a otros tipos de señales antropogénicas como las señales de tipo transitorio (piling, o cañones de aire), no es inmediata. Así disparos con cañones de aire con niveles de fuente de hasta 200 dB, o superiores, provocan desplazamientos en los umbrales de audición que se recuperan en pocas horas (lucios, y lake chub), o impactos auditivos ligeros (pescado blanco), [20].

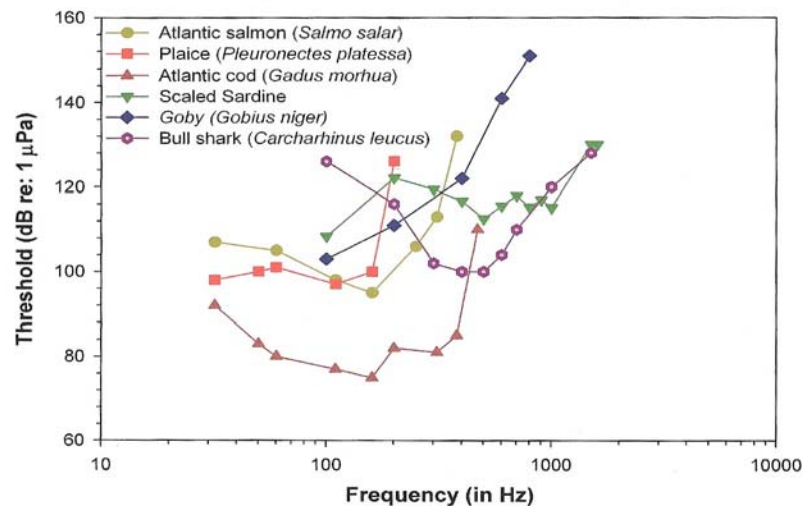


Figura 5. Umbral de audición de diversas especies de peces, incluidas algunas de interés en pesca.

En especies de interés pesquero es necesario incrementar la experimentación, muy especialmente en poblaciones libres, aunque se puede afirmar que el ruido, sin ninguna duda, afecta a las capturas; así después de una serie de disparos de cañones de aire, en zona de pesca, la cantidad recogida disminuye siempre. La pesca siente aversión al ruido, [21].

Hay aspectos, sin embargo, bien establecidos y conocidos desde los años 1970, y para fuentes explosivas, en los que se correlaciona directamente el tamaño, (masa) del espécimen con la cantidad de energía necesaria para producir efectos irreversibles, incluida la muerte, [22]. De estos y otros trabajos se concluye que esta correlación no depende del valor de pico de la señal sino más bien de la energía sonora total recibida. La figura 5 presenta los umbrales de audición de diversas especies de peces, incluidas algunas de explotación pesquera.

2.3. Ruido de fondo.

Cualquier perturbación, por ruido, que introduzca la presencia de un Parque Eólico Offshore, será una perturbación que ocurre en un entorno en el que ya existe un ruido de origen oceánico previo al Parque. El ruido submarino es multidimensional. El ruido submarino no se caracteriza por una única faceta medible, por el contrario es una serie de factores, diferentes, los que le caracterizan: frecuencia, ancho de banda, duración, intensidad, estructura temporal, además de ser una función directa del punto de medida y del camino entre fuente y receptor (las pérdidas en la propagación dependen de la profundidad del agua, de la estructura térmica de la columna de agua, de la absorción del fondo y de sus propiedades reflectivas y pueden alcanzar incrementos/disminuciones cifrables en un orden de magnitud).

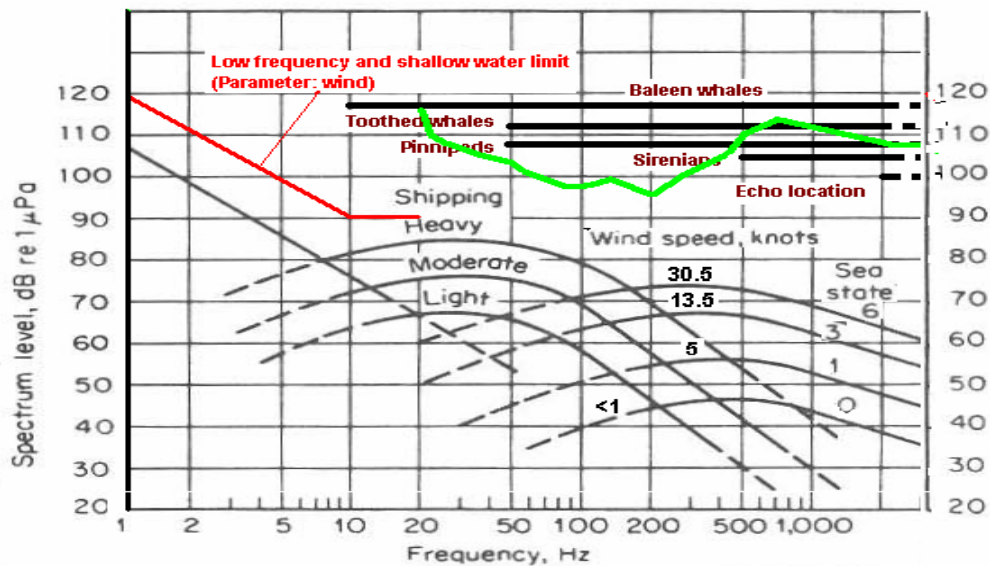


Figura 6. Ruido ambiente en aguas profundas (negro), aguas poco profundas (rojo), y aguas muy poco profundas (13 m. y SS=3), (verde). Se muestran las zonas de audición de algunos mamíferos marinos.

El ruido ambiente es la suma del ruido de fondo más el ruido generado por la actividad humana. Su origen se sitúa, por lo tanto, en muy diversas fuentes: viento (altura de ola), lluvia, hielo,

vida marina, actividad sísmica, profundidad de la zona, hora del día, época del año, a las que se añaden las fuentes de origen humano: transporte marítimo, aéreo, dragado, perforación, trabajo civil, exploración y explotación de recursos minerales, exploración geofísica, emisiones de sonar, comunicaciones, alarmas, explosiones, investigación marina, etc... La figura 6 presenta el ruido ambiente en tres tipos de zonas. Los datos de aguas profundas y poco profundas son de Urlick, [23], mientras que los datos en verde (aguas muy poco profundas son medidas reales llevadas a cabo en un entorno en el que se prevé instalar un Parque Eólico Offshore en España, [24]. Se han superpuesto las bandas en las que algunos mamíferos se comunican.

La imagen tan variable del “fondo” ruidoso explica, además de lo reseñado en el apartado anterior, porque es necesaria una representación físico-matemática de tipo estadístico, más que determinístico. Esto es tanto más real cuanto menos profunda es la zona marina de interés como es el caso de las aguas muy poco profundas, [25].

Como resumen se puede afirmar que en ausencia del tráfico local y en algunos casos de ruido biológico local, muy pronunciado, el ruido de fondo en aguas muy poco profundas viene dictado, en toda la banda de frecuencias de interés, por la acción del viento. La razón más importante para esta conclusión es el efecto pantalla de la poca profundidad a señales que proceden de largas distancias (bajas frecuencias principalmente). Este hecho ha sido confirmado por numerosas experiencias en todos los mares de la Tierra. Uno de los trabajos más interesantes, y pioneros, sobre este punto lo encontramos en Piggott, en aguas poco profundas de Escocia, [26].

3. Parques Eólicos Offshore. Fuentes de ruido.

Al tratar de identificar las posibles fuentes de ruido en un Parque Eólico Offshore, que pudieran presentar conflictos con el entorno marino es adecuado analizar la vida útil de esas instalaciones. Se calcula una vida útil de producción de unos 25 años. A este espacio de tiempo habrá que añadir el tiempo empleado en el montaje e instalación, durante el cual se simultaneará esta actividad con la producción de energía a medida que las nuevas unidades se van poniendo en actividad. Finalmente la vida útil termina con el desmontaje del Parque en cuya tarea habrá que atender al almacenamiento adecuado de los restos, como a la eliminación de las bases de las torres soporte de las góndolas, que han permanecido sumergidas y enterradas en el fondo. Cada una de estas fases genera un ruido específico, que intentaremos describir.

3.1. Instalación y desinstalación.

Durante el periodo de instalación el ruido perturbador procede de tres fuentes distintas. En primer lugar está el ruido de tráfico de los barcos auxiliares transportando u operando en la zona, figura 7. En lo que se refiere a transporte a plena carga, el ruido que se genera presenta un espectro de picos (típico) en la banda de 5Hz a 500Hz, aunque también puede extenderse hasta los 2 kHz, [27]. Un segundo tipo de fuente, con características propias, es el procedente de todo el proceso de clavado, en el fondo marino, de las bases o pilotes que han de soportar las estructuras sobre las que montar la góndola y las palas del aerogenerador. Es sin duda el proceso más ruidoso y más perturbador del entorno. Una última fuente de ruido en el proceso de instalación es la que procede de la elaboración de la infraestructura de conexionado de todos los aerogeneradores con la estación central y de esta con tierra. Esta infraestructura implica la construcción de las trincheras sobre las que irán los cables de conducción eléctrica y señales correspondientes. Los tres tipos de fuentes sonoras concentran, en gran parte, su energía en las bajas frecuencias y el entorno afectado, no se olvide, es la parte más

biológicamente productiva del océano lo cual implica que superar un determinado nivel de presión sonora puede acarrear daños irreversibles, [28].



Figura 7. Etapas de montaje y transporte de las palas giratorias (izquierda); una idea del tamaño se observa comparándolo con los operarios. A la derecha aparece el barco plataforma que se encargará de montar la estructura en la torre soporte.

El ruido procedente de los barcos auxiliares implicados en este proceso es bien conocido en Acústica Marina. Son muchos los trabajos publicados en la literatura actual y es un campo amplísimo. Existen algunos trabajos que resumen muy bien todo lo básico y concerniente a el conocimiento del espectro radiado y sus niveles típicos, [29,30].

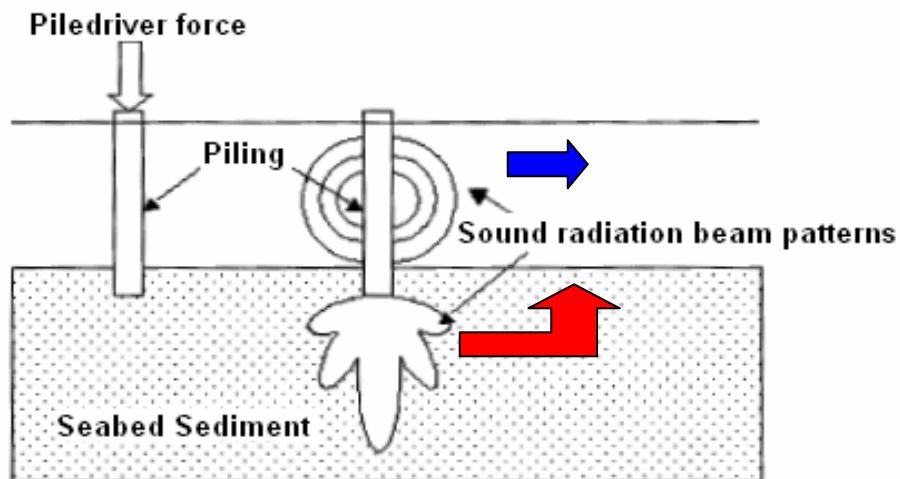


Figura 8. Esquema del proceso más general de clavado de la base sustentadora de un aerogenerador en aguas muy poco profundas. En rojo el sonido que vuelve al mar desde el fondo. En azul la radiación directa

El análisis del segundo tipo de fuente sonora necesitará una profundización mayor. La figura 8 esquematiza el proceso de clavado. Se sabe que el ruido de impacto es el resultado de una rápida descarga de energía cuando dos masas chocan, cuyas propiedades mecánicas caracterizarán el tipo de señal acústica generada. El impacto genera una onda en el aire y un transitorio que se propaga a lo largo de la estructura del pilote, además el impacto crea una onda flexural, o transversal que se transmite por la pared del pilote y acoplada al agua se transmite por ella (azul en Figura 8). Por otra

parte el pulso que se propaga por el pilote se acopla al fondo y se propaga según el diagrama correspondiente; parte de esta señal que penetra en el fondo (señal roja), puede resurgir al agua interfiriendo, a veces, con la señal directa (azul). La figura 9 muestra la señal impulsiva en un caso real, [31], y se la compara con el modelo matemático de Hamernick and Hsueh [32].

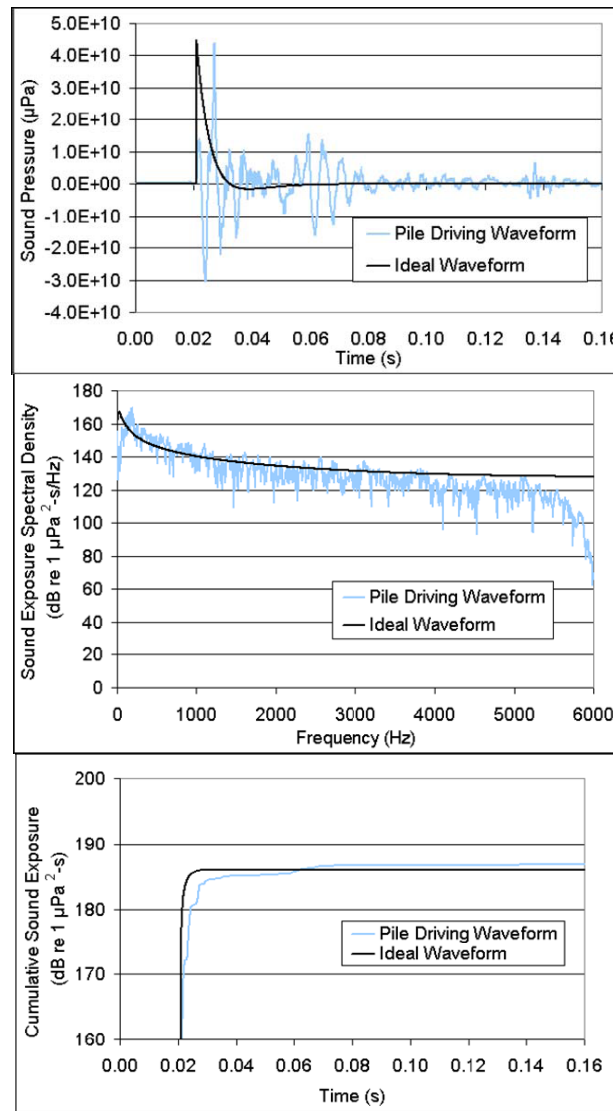


Figura 9. Comparación entre medidas experimentales del ruido de clavado de pilotes en un puerto de la costa californiana (azul), y los resultados de un modelo (negro). Las gráficas presentan la señal temporal, su espectro y la exposición sonora acumulada, o presión sonora al cuadrado

El ruido impulsivo generado por el impacto del martillo sobre el pilote puede ser expresado, según el modelo referenciado más arriba, por la expresión,

$$P(t) = P_p (1 - (t - t_{rt})/t_z) \exp(-(t - t_{rt})/t_z)$$

en la que P_p , es la presión máxima alcanzada, t_{rt} , es el tiempo en que la señal alcanza su primer máximo, en segundos, y t_z , es el tiempo que transcurre hasta que de nuevo la presión alcanza, el valor

ceros, y que coincide con mucha aproximación con el tiempo en que la curva de energía acumulada cambia de vertical a horizontal. (figura 9, parte inferior y curva en negro), [31, Apéndice A]. En ambos casos: medida experimental y modelo, el SEL obtenido está entre 186 y 187 dB (ref. $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$). El proceso de enclavado de los pilotes para un Parque Eólico Offshore, responde a lo analizado más arriba. La única diferencia reseñable es que en el caso de los Parques Eólicos las bases o pilotes son en general de mayor diámetro (entre 4 y 10 m, dependiendo de la potencia, MW, del aerogenerador), que el que se encuentra en la construcción de muelles, barreras o plataformas. Figura 10. El impacto del martillo hidráulico por lo general, sobre el pilote genera impactos cuyos niveles de fuente pueden alcanzar los 230 dB (ref $1\mu\text{Pa}$ 1m). Cuando es factible (menor potencia del aerogenerador) la estructura soporte no es del tipo monopile, sino del tipo trípode (de acero y hormigón), o tipo base plataforma; entonces el ruido generado en su instalación es claramente inferior.



Figura 10. Infraestructura de transporte y clavado de pilotes en un Parque Offshore.

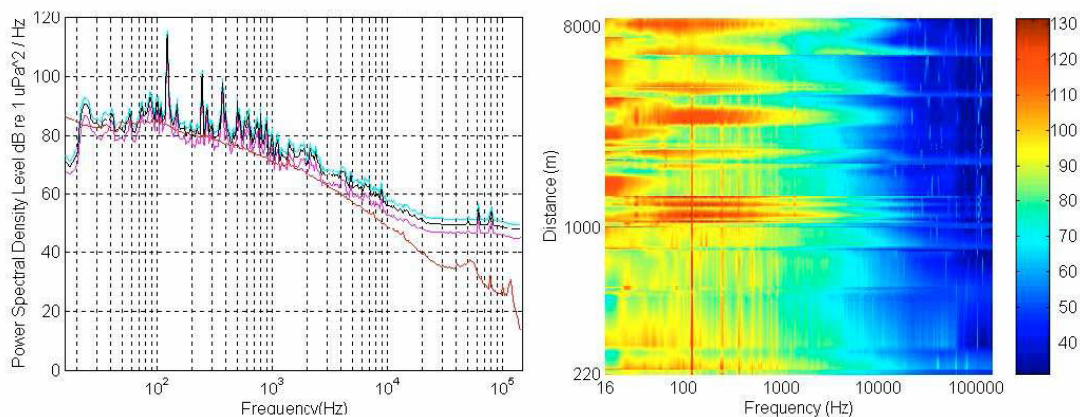


Figura 11. Densidad de potencia espectral generada en un proceso de perforación del fondo marino (izquierda) y mapa de propagación del sonido función de la frecuencia y de la distancia (derecha), en el que se observa el las zonas de mayor intensidad a distancias alejadas, resultado de un proceso de interferencia (veasé figura 8)

En lo visto no se ha analizado el caso que se presenta cuando el fondo marino no permite el clavado directo del pilote, p.e., cuando el fondo es rocoso; entonces se requiere acudir a dispositivos capaces

de generar un orificio donde ubicar el pilote. Dado el diámetro de los pilotes no es una tarea fácil; es además una tarea muy ruidosa capaz de impactar fuertemente en el entorno. Figuras 11 y 12., [32,33]



Figura 12. Infraestructura de perforado de fondo para instalación de pilotes soporte de aerogeneradores en un Parque Eólico Offshore.

Existe una importante variedad de pilotes que, a su vez, son, enclavados con distintos tipos de martillos y en diferentes entornos marinos, siempre en aguas muy poco profundas, que generan distintos impactos acústicos. Existen datos experimentales de procesos de clavado de una importante cantidad de pilotes empleados, en su mayoría en obra civil: muelles, plataformas, etc., [34], sin embargo son escasos los datos experimentales correspondientes a enclavado de pilotes en parques Eólicos Offshore. Un resultado experimental aparece en la figura 13 y recoge los datos, [35, 36], de

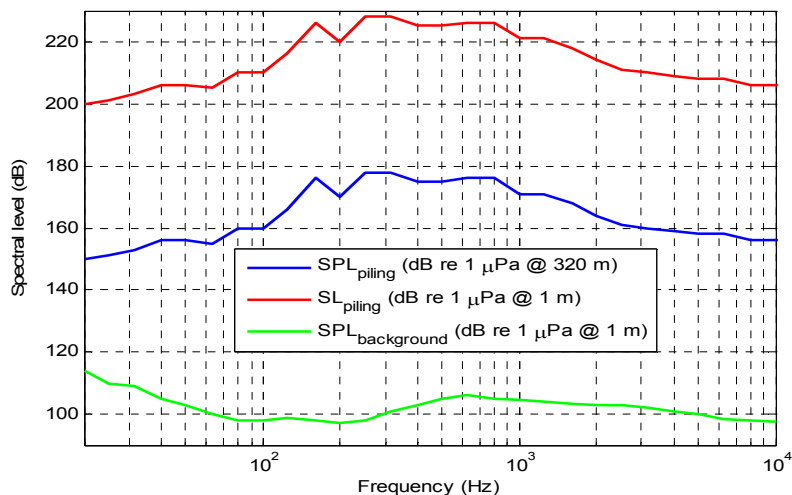


Figura 13. Nivel de fuente, y a una distancia de 320 m, de un proceso de enclavado de pilote para un Parque Eólico en la costa sueca, [35] comparado con el nivel de ruido de fondo en una posición apropiada para instalación de un Parque Eólico Offshore en la costa mediterránea española (verde). Mackenzie y Maxon.

En resumen se puede afirmar que el proceso de enclavado es el más ruidoso en la etapa de instalación. Es, desde luego, el más importante en el rango de 10 Hz a 20 kHz. Para frecuencias por bajo de 1 kHz, es donde gran parte de la energía acústica se concentra, rango en el que se pueden identificar datos tonales a determinadas frecuencias. En el margen de 1 kHz a 4 kHz el ruido de clavado presenta la menor diferencia con el ruido de fondo, y será esta banda el primer candidato a ser enmascarada por el ruido ambiental. En el rango de 4 kHz a 20 kHz, la diferencia de nivel con el ruido de fondo, puede alcanzar hasta, en algunas zonas, los 60 dB, [37].

En algunos casos es necesario acudir a voladuras con explosivos de zonas de roca. El uso de explosivos es poco frecuente en esta fase, aunque sí lo es en la fase de desinstalación. Es conocido el efecto de las explosiones sobre la fauna marina, (un ejemplo evidente es el de la pesca furtiva) y ha sido recogido en numerosas publicaciones científicas. En resumen podemos decir que la forma de onda típica de una explosión, presenta un pico, cuyo valor puede superar en varios órdenes de magnitud al obtenido en los procesos de enclavado, así como tiempos de subida y caída mucho más cortos, seguida de numerosas oscilaciones de presión (positivas y negativas). Hasta hace pocos años se creía que únicamente el valor de la presión de pico era el que dictaba el mayor o menor efecto sobre los seres vivos. Recientemente algunos estudios han demostrado que la densidad de flujo de energía es un parámetro apropiado para estimar el mayor o menor daño sobre la fauna, en el caso de explosiones. En medios en los que el efecto puede verse perturbado por la presencia de superficies límites, como son la superficie del mar y el fondo, el SEL, ‘Sound Exposure Level’, ya citado, es mejor parámetro indicativo que la densidad de flujo. De este modo el valor frontera para la densidad de flujo de energía situado en 300 Julios por metro cuadrado, y que puede ocasionar un 50 % de mortalidad, en entornos sin superficies límite reflectoras, se pasa a un valor del SEL de aproximadamente de 207 dB (ref $1\mu\text{Pa}^2\text{-s}$), para entornos con frontera. [38].

Se ha señalado que la tercera fuente de ruido en la etapa de instalación es la originada en la elaboración de la infraestructura de conexionado de todos los aerogeneradores con la estación central del Parque y de esta con tierra. Figura 13, [39].



Figura 14. Parque Eólico frente al estuario del Támesis y la zona de cableado desde el Parque a Tierra.

Esta etapa implica el excavado de las trincheras sobre las que irán los cables de conducción eléctrica y señales correspondientes. Este es un proceso lento y costoso pues es necesario recorrer distancias importantes sobre un fondo marino con diferentes cualidades. Una primera fase implica un levantamiento geofísico de los primeros metros del fondo identificando las zonas más fáciles de excavar. En esta tarea se emplean sonares especiales de exploración somera que no implica poner en juego altas energías ya que la penetración es poca; estos dispositivos pueden perturbar a la fauna preexistente en la zona pero la experiencia dice que su efecto será muy limitado. La segunda fase es el dragado del fondo para crear las trincheras. La figura 14 presenta la densidad espectral de potencia del ruido generado en el dragado de las trincheras en un Parque Eólico Offshore, [32], comparado con el ruido de fondo en la zona. Se observa que en la banda que discurre entre los 100 Hz y los 70 kHz el ruido de fondo esta por bajo del ruido de dragado, alcanzando, alrededor de los 500 Hz diferencias superiores a los 20 dB. Se puede comparar estas diferencias y las bandas correspondientes con la figura 5 que nos proporciona los umbrales de audición de algunas especies de peces.

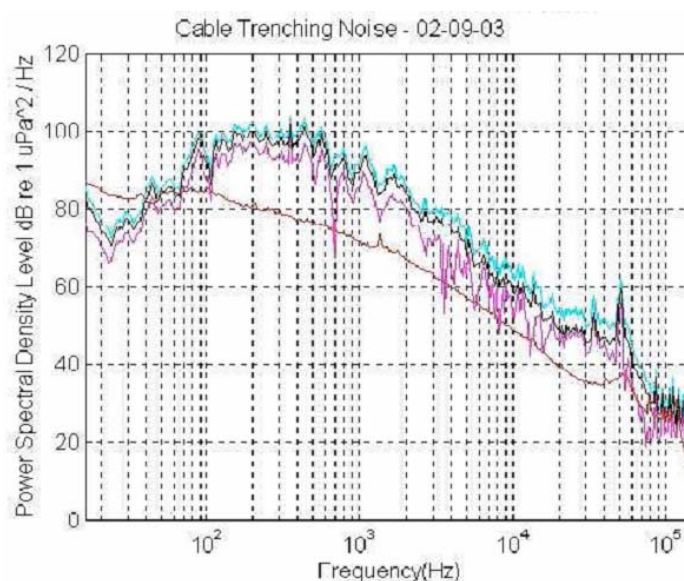


Figura 14. Densidad espectral de potencia medida en un proceso de dragado de trincheras en el fondo marino comparado con el ruido ambiental en la misma zona (color marrón).

El ruido del dragado de trincheras es mezcla de ruido de banda ancha, tonales asociados a la maquinaria y transitorios asociados al proceso de ruptura del material del fondo marino (de mayor nivel cuanto mas consolidado esté, p.e., roca). Efectivamente este tipo de ruido es bastante variable según sean las capas sedimentarias afectadas. Los datos de la Figura 14 son de los pocos existentes correspondientes a un Parque Eólico. No obstante se estima que esos datos responden a características presentes en los procesos de dragado en el fondo marino para los que sí existen más datos, [27]. Richardson y colaboradores señalan el haberse alcanzado niveles de fuente de 187 dB (ref. 1µPa a 1 m). Niveles de ruido de este valor pueden ser audibles, incluso en aguas muy poco profundas, a distancias de varios Km por algunas especies de peces, y entre 15 y 20 Km para algunas especies de mamíferos marinos. Hay que decir, sin embargo, que debido a la capacidad de huir de las fuentes que provocan molestia, es posible que las especies de peces afectadas se alejen lo suficiente de estas fuentes, y evitar daños, (TTS y/o PTS), para volver a la misma zona una vez que el proceso de dragado ha finalizado. Esto quiere decir que el efecto sobre la fauna (peces y también mamíferos marinos) es insignificante, o muy bajo.

3.2. Ruido en el periodo de producción.

El viento hace que las palas de cada plataforma, se muevan y roten. El ruido producido por un aerogenerador es de dos tipos: tipo mecánico, procedente de las transmisiones, tipo aerodinámico, procedente de las palas de la turbina. La figura 15, presenta un espectro típico de ruido de un aerogenerador en producción, comparado con el ruido de fondo en aguas muy poco profundas, (13 m.) y Estado de Mar 3, [24].

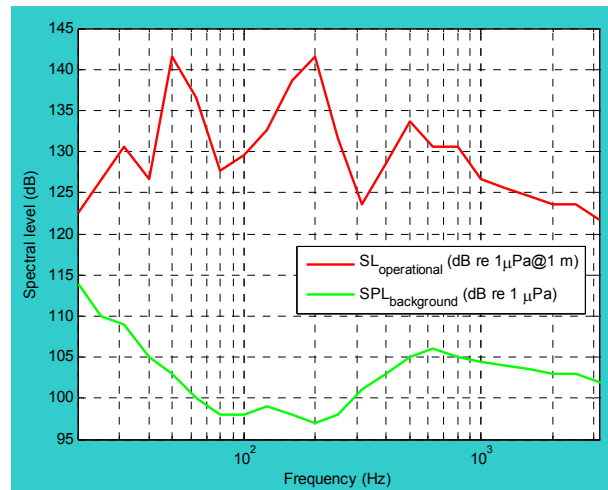


Figura 15. Ruido captado en el agua procedente de un aerogenerador offshore. En rojo aparece el Nivel de Fuente y en verde el ruido ambiente en una zona de inetrés, [24].

Hay casos en que el ruido mecánico, en general de características tonales, predomina, aunque los diseños mas actuales han reducido este tipo de ruido.

La componente aerodinámica del ruido, es por su misma naturaleza, ruido de banda ancha, muy similar al ruido de fondo. La rugosidad del entorno que rodea a la base influye en el mayor o menor nivel de ruido aerodinámico. El que la superficie marina presente una menor rugosidad, por regla general, hace que en los Parques Offshore, esta componente sea menos significativa frente a la componente de origen mecánico.

El ruido mecánico predomina en el rango de 50 Hz a 500 Hz. El ruido aerodinámico presenta mayor incidencia en el margen entre 1 y 2 kHz, e incluso puede expandirse a una banda mayor (600 Hz – 8 kHz). El sonido transmitido por la torre al mar predomina sobre el sonido transmitido a través de otros caminos, p.e., el transmitido por vía aérea, aunque este, dados los niveles habituales, confirman su limitado efecto en el interior del mar, [40, 41]. Por otro lado el sonido transmitido a través de la estructura de la torre, y antes de que llegue al mar se atenúa en la interface entre el mecanismo interno y las paredes de la estructura, reduciendo el acoplamiento y la resonancia del conjunto. De esta manera se alcanza una radiación bastante pequeña de manera que para frecuencias por encima de los 100 Hz el nivel del sonido generado está por bajo del ruido ambiente. Para frecuencias inferiores a 100 Hz, el ruido mecánico puede incrementarse (p.e., para velocidades de viento de 8 m/s y distancias de 500 m, el ruido captado se sitúa entre los 75 y 95 dB. La vibración de la estructura soporte, en ciertas circunstancias, es de tal nivel que domina la zona de bajas frecuencias, hasta los 500 Hz. Por encima de lo 500 Hz y por bajo de los 10 kHz, los niveles radiados decaen a un ritmo de unos 10 dB/octava.

El ruido radiado por la base de una turbina y originado en vibraciones, se puede modelizar. Figura 16.

:

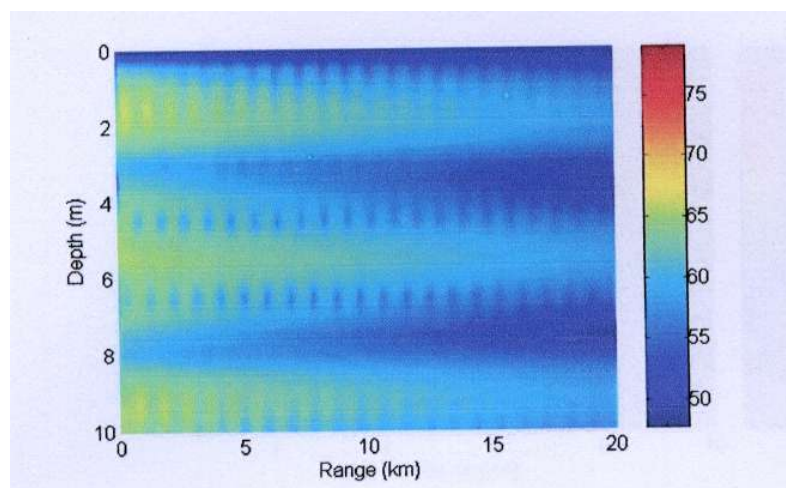


Figura 16. Modelización del sonido radiado, a 400 Hz, por la vibración de la base soporte de un aerogenerador offshore, en función de la profundidad de medida y de la distancia. Los niveles aparecen en dB re $1\mu\text{Pa}$, [42]

En la figura 16 se observa que el sonido radiado puede ser oído por la fauna marina a distancias importantes, según la profundidad. No obstante esto es bastante excepcional ya que a otras frecuencias los niveles radiados caen por bajo del umbral de audición de casi todas las especies a tan solo pocos metros de distancia, [42].

En lo dicho se ha supuesto un aerogenerador con una base tipo monopilote. Cuando la base difiere del tipo monopilote, por ejemplo pasa a ser del tipo trípode, los datos de ruido radiado cambian al igual que cambian cuando la potencia de la turbina varía, o incluso cuando varía el régimen de viento (velocidad y dirección). Existen pocos datos que se puedan referenciar, sólo se puede, en algunos casos dejar constancia de este hecho. Al ruido propio de los aerogeneradores radiado al agua, habrá que añadir, en zonas próximas a cada una de las turbinas el ruido transmitido por vía aérea y que acaba penetrando en el agua. Finalmente todo Parque Eólico Offshore cuenta, para su servicio y mantenimiento, con una o varias embarcaciones auxiliares. No habrá que despreciar su efecto.

Por último podemos preguntarnos cual puede ser el efecto acumulado de todos los aerogeneradores funcionando simultáneamente. El Parque hay que considerarlo como una fuente extensa, como un multirray en tres dimensiones. Estamos hablando de instalaciones con cientos de aerogeneradores. Para resolver este problema es adecuado el acudir a modelos matemáticos de propagación. Uno de ellos desarrollado en el Instituto de Acústica-CSIC, [24]. Es un modelo de modos normales en el que se muestrea la columna de agua y se obtiene cada modo aplicando diferencias finitas, [43]. La obtención de los autovalores se consigue introduciendo dos condiciones límites en la superficie y en el fondo. Las pérdidas por scattering en la superficie marina se tienen también en cuenta de acuerdo con Kuperman e Ingenito, [44], indirectamente este factor viene proporcionado por la velocidad del viento que es otro parámetro a considerar; finalmente se supone un fondo marino elástico, [45]. Este modelo ha demostrado ser muy útil en la resolución de problemas de propagación sonora en aguas muy poco profundas. Un ejemplo de esa capacidad nos la presenta los resultados del modelo en el caso de un Parque Eólico como una fuente extensa de sonido. Figuras 17 y 18. La

primera de ellas esquematiza las posiciones de las diversas fuentes en un Parque Eólico con los resultados, en curvas de nivel, alrededor del Parque y la última presenta los resultados cuando el punto de observación (medida) se mueve a lo largo de la trayectoria recta que se muestra en la figura 17 izquierda, en rojo.

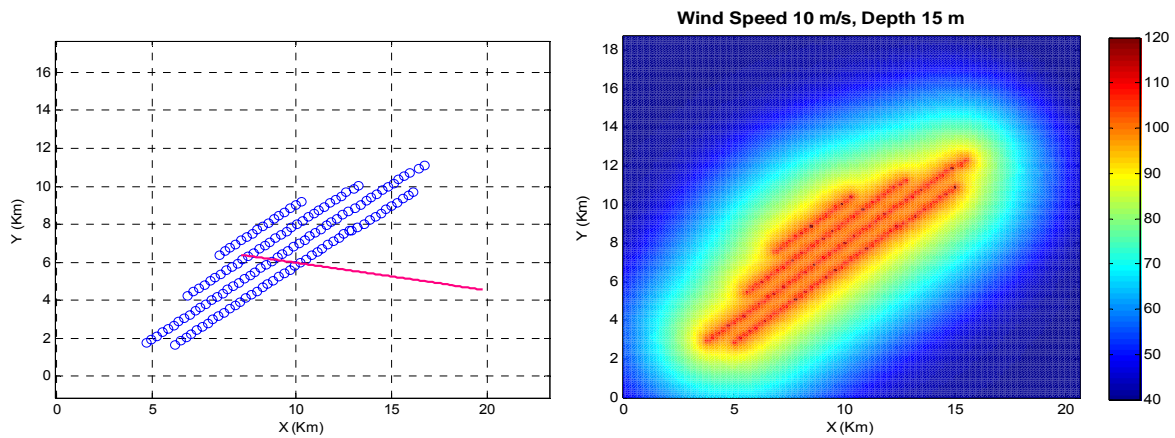


Figura 17. Esquema de un Parque Eólico distribuido en cuatro alineaciones. Cada círculo representa una fuente (aerogenerador). A la derecha aparece el campo acústico alrededor del Parque cuando se supone que todas las fuentes son iguales y que radian a una profundidad media., 7.5 m y velocidad del viento de 10 m/s.

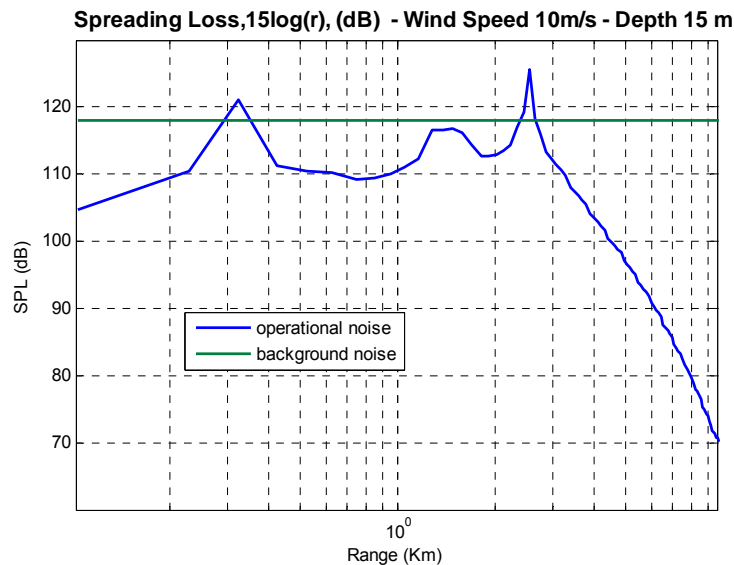


Figura 18. Estimación del nivel radiado por el Parque como fuente extensa al moverse según una determinada dirección. Se observa que sólo aquellos puntos en los que la trayectoria se mueve cercana a una fuente, el nivel radiado del conjunto, puede superar al ruido de fondo en la zona (línea verde).

Los resultados nos indican que sólo en circunstancias muy precisas como puede ser la proximidad a un aerogenerador (menos de 100 m), los niveles globales del Parque no superan a los del ruido de fondo. Esto significa que la fauna que pueda estar afectada le bastaría evitar la proximidad a los aerogeneradores para reducir a niveles inocuos el efecto del ruido.

4. Monitorización y Mantenimiento en Parques Eólicos Offshore.

A lo largo de la vida útil de un Parque Eólico Offshore, se requieren establecer una serie de acciones que permitan el buen funcionamiento de todo el conjunto. Esto también es cierto en el aspecto acústico. Un mal funcionamiento de uno cualquiera de los aerogeneradores implica, con una alta probabilidad, que la emisión sonora radiada varíe. Es pues, el control de funcionamiento del Parque un método (requisito) para que su actividad sea rentable técnicamente y económicamente. Una detección precoz implica ahorro. La pregunta es: ¿es suficiente un control (monitorización) periódico de algunas variables, o, por el contrario es necesario un control (monitorización) permanente de las mismas u otras variables? En el caso de los Parques Eólicos Offshores, como en otros tantos sistemas complejos, hay razones para adoptar cualquiera de las dos soluciones. Sin embargo recientes resultados, que han implicado complejos programas de simulación, aconsejan que la actividad de control sea un monitorizado constante, [46]. Hoy en día gran número de los componentes de los aerogeneradores, como las palas, la torre soporte, los bobinados, transformadores, motores, ejes, etc., poseen sensores de vibraciones, de temperatura, ópticos, de viscosidad, u otros, capaces de reaccionar y proponer soluciones en el caso de eventuales malfuncionamientos, [47, 48, 49]. El mundo del ruido puede, también, proporcionar indicios del estado del Parque y/o de cada uno de sus componentes

El paraguas acústico acoge tanto a señales de ruido como a cualquier otra perturbación de tipo acústico, como son las vibraciones. Será necesario un sistema de medida con suficiente ancho de banda y se procura que vía software, además, el sistema proporcione información espectral en el ancho de banda que sea necesario. Quiere esto significar que si a una determinada frecuencia, o en una determinada banda de frecuencias, los niveles sobrepasan unos límites establecidos, el sistema de monitorizado debe ser capaz de desencadenar un aviso, una alarma, etc., que disponga lo adecuado para prevenir consecuencias de mayor trascendencia. Es fácil entender que cualquier malfuncionamiento puede detectarse a través de vibraciones no esperadas. Un registro de referencia es fácil de incorporar a las tareas de control. Una parte importante del monitorizado del Parque deberá residir en hidrófonos, estratégicamente distribuidos, de modo que todo el Parque pueda ser “escuchado”. Los sistemas de escucha de ruido submarino están asociados a unos determinados aerogeneradores y su señal se transmite al centro de control de manera permanente o aleatoriamente durante un determinado espacio de tiempo. Este control acústico submarino implica también un control del ruido de fondo ambiental. Dado que ha de existir un stock de señales de referencia de todos los tipos, cualquier alarma puede suscitarse cuando los niveles esperados (por ejemplo el nivel de ruido de fondo esperado para la velocidad de viento en ese instante), no correspondan a las condiciones oceanográficas de ese entorno en ese momento. La detección de navegación no autorizada, o la detección de la presencia de los barcos necesarios para el mantenimiento es factible controlarla con los sistemas de escucha submarina. Cada aerogenerador podrá ser identificado acústicamente mediante transpondedores ad-hoc. El sistema de hidrófonos, si fuera preciso, podría sustituirse por uno, o varios, arrays o sistemas permanentes de escucha, montados en boyas. Queda finalmente un control del ruido aéreo radiado por cada aerogenerador. Este último proceso de monitorizado se hace mediante un micrófono y un sistema que analice los ruidos captados comparándolos con los que están en la base de datos, una de estas comparaciones se hará precisamente con el ruido de fondo aéreo esperado para la zona, con la velocidad de viento y oleaje (las olas golpean la base del aerogenerador), presentes en ese instante; este sistema tiene que estar directamente relacionado con el que ha analizado las vibraciones en toda la estructura. Se mantienen registros de cualquier eventualidad. En todas las medidas y registros, la velocidad del viento será un parámetro de referencia. Queda por citar el registro permanente, que se hará en varios puntos del Parque (o sea en varios aerogeneradores seleccionados adecuadamente), de la temperatura del agua y su variación con la profundidad, a través de sensores térmicos, desde la superficie al fondo marino, a lo largo de la

columna del aerogenerador de que se trate. Este dato facilita la modelización del ruido submarino radiado en el entorno de influencia del Parque.

Resumiendo puede decirse que en el monitorizado del Parque Eólico Offshore, es necesario contar con una buena base de datos previa, también con una selección de los puntos de medida tanto dentro como fuera del Parque (en su zona de influencia cercana), así como con los sensores que van a actuar (hidrófonos, micrófonos, acelerómetros); todos estos datos deberán complementarse con informaciones adicionales: velocidad y dirección del viento, valores medios y desviación estándar altura de ola (estado de mar), tiempos de medida, y finalmente tener los equipos de medida debidamente calibrados y adaptados, y es aconsejable, hacer calibraciones “in-situ” antes y después de la medida. Si el monitorizado se lleva a cabo en un esquema periódico, se ha de procurar que el proceso incluya, siempre, una misma velocidad de viento; en este caso la velocidad de 8 m/s, se empieza a considerar una referencia muy adecuada, [39, 46]. El control y monitorizado del impacto del ruido en el entorno marino afectado por un Parque Eólico Offshore interesa además como proceso de mejora de la Evaluación del Impacto Ambiental, (Environmental Impact Assessment, EIA), así como de todos los procedimientos de gestión medioambiental y de toma de decisión.

5. Medidas para reducir el impacto medioambiental del ruido del Parque.

Las medidas tendentes a mitigar el efecto, sobre el entorno, del ruido generado por un Parque Eólico Offshore son muy variadas y de eficacia variable también. El esfuerzo deberá realizarse en aquellos momentos en que el ruido es importante y capaz de interactuar, fuertemente, con el entorno biológico principalmente, o cuando el cambio de status es tal que puede clasificarse en un hecho inesperado y por tanto también de efecto imprevisible.

De lo anterior se deduce que la selección del sitio en el que se instalará en Parque Eólico Offshore es de vital importancia. Se deberá analizar las características especiales del tal entorno, bajo todos los aspectos que puedan verse afectados por su presencia. En lo que se refiere al ruido, el entorno deberá ser objeto de varias campañas de medida de ruido de fondo, de estimación del régimen de vientos, que proporcionará un dato básico sobre el oleaje y sobre el estado de mar dominante y su ruido de fondo asociado. También deberá conocerse el tipo de fondo marino, y un estudio batimétrico de la zona afectada, (el Parque y la zona de influencia). La fauna marina y las características de la vegetación que exista, serán objeto de estudio y valoración. Esto último permitirá prever el efecto que el ruido vaya a tener en el habitat faunístico y decidir qué medidas se tomarán para alejar a las especies a distancias de salvaguardia, antes de comenzar los trabajos, y en especial los trabajos de enclavado de las bases de los aerogeneradores. Estos dispositivos disuasorios pueden ser de carácter acústico como los que han venido usándose durante años, por ejemplo para alejar a especies marinas de zonas de aspiración de aguas en Centrales generadoras de energía. Recientemente en el Reino Unido se han desarrollado algunos sistemas AHD, (High Intensity Acoustic Harassment Devices), en la banda de los 10 kHz, que se han demostrado eficaces, [50].

Las medidas, posibles, mitigadoras del ruido submarino hemos señalado que son muy variadas. Una muy empleada, cuando los niveles de ruido son muy elevados, p.e., en los procesos de montaje de pilotes, es el uso de cortinas de burbujas. Por ejemplo en Dinamarca, pionera en la instalación de Parques Eólicos Offshore, desde 1991, las cortinas de burbujas significaron una reducción, de 10 a 30 dB, en nivel de ruido captado. Otros ejemplos proceden de la experiencia en la construcción, en Sha Chau del aeropuerto de Hong Kong, en el que su construcción y, sobre todo, el enclavado de pilotes, fueron aislados mediante cortinas de burbujas, [51]. En Hong Kong, se han reportado reducciones entre 8 y 10 dB para ruido de banda ancha (400 Hz a 800 Hz); esta reducción se incrementa a entre 15

y 20 dB en la banda de 1600 Hz a 6400 Hz. El efecto sobre la fauna marina del entorno del aeropuerto se comprobó en delfines típicos de la zona (*Sousa Chinensis*) cuyo comportamiento una vez establecida la cortina de burbujas no presento variación noticiable excepto, quizás, cuando el ruido contenía muy bajas frecuencias a las que la eficacia de la cortina era menor, y que se traducía en una mayor velocidad de movimiento del mamífero. El efecto de la cortina de burbujas, bajo un punto de vista espectral, se muestra en la figura 19, en donde se presentan los espectrogramas de las señales acústicas medidas a un lado y otro de la zona de clavado de un pilote, para dos “golpes” sucesivos, cuando no existe, y cuando si está presente la cortina de burbujas, [52].

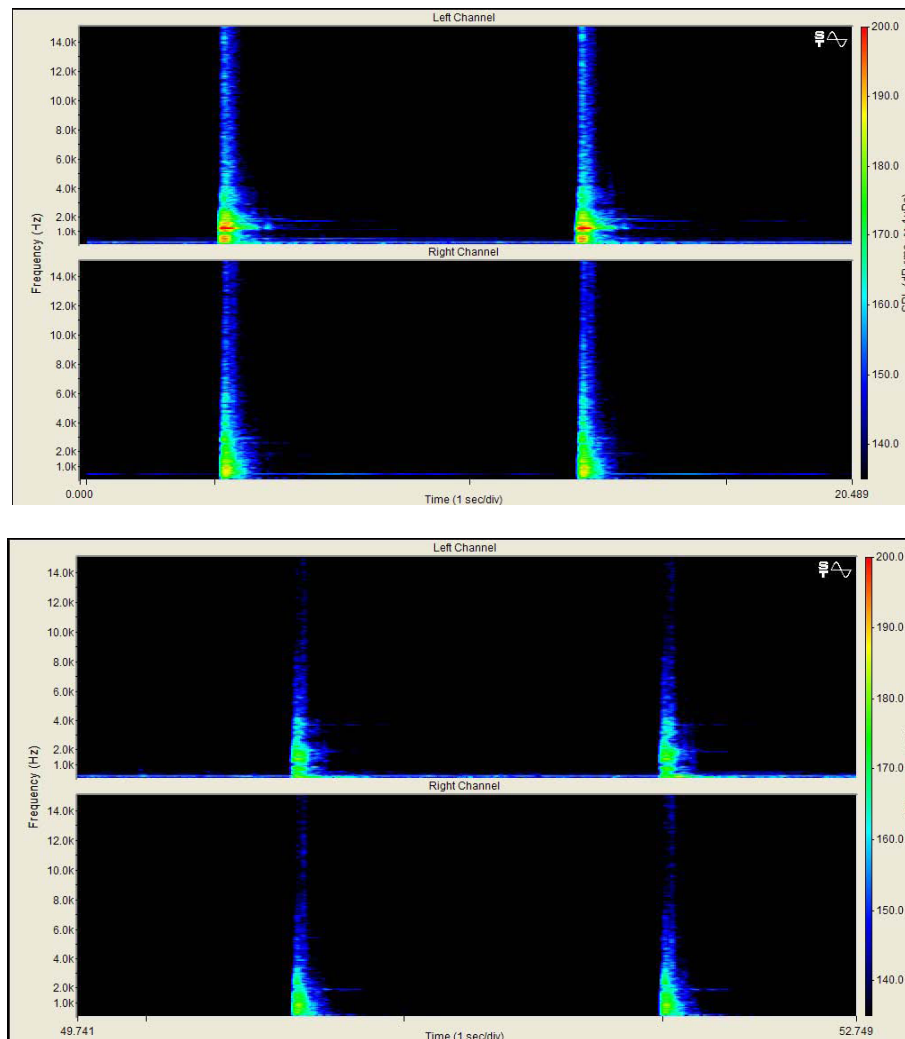


Figura 20. Espectrogramas de dos procesos de clavado, sucesivos, cuando no existe (arriba) y cuando sí existe la cortina de burbujas. [52].

El trabajo anterior, sin embargo, concluye que a pesar de los espectrogramas que muestran el efecto absorbente de la cortina de burbujas, la fauna piscícola se ve poco o nada afectada por su presencia, lo que sorprende pues la zona absorbida por la cortina se sitúa en las que gran parte de los peces tienen, aún, sensible su sistema auditivo (vease la figura 5). Por el contrario las cortinas de burbujas sí son eficaces, de acuerdo con Welton y colaboradores, [53], en otros casos, en especial cuando se trata de alevines.

Hay que tener en cuenta que la vida útil de un Parque Eólico puede extenderse hasta lo 30 años. Sin embargo, en esa vida útil hay que contar con el tiempo de exploración geotécnica, la etapa de construcción y finalmente la etapa de desmontaje, como las más ruidosas y por lo tanto las que necesitarán de un cuidado muy especial y puntual de mitigación. Pero también es cierto que la etapa de producción del Parque arrastra actividades muy continuadas, desde luego menos ruidosas que las antes citadas, pero muchas veces el estar sometido a una radiación continua, aunque débil, puede implicar, a largo plazo efectos no queridos sobre el entorno. Todo esto implica que una buena medida de reducción de ruido es un monitorizado continuo, (o si se quiere, periódico), partiendo de hidrófonos fijos o móviles, sobre el estado de funcionamiento, acústico, del Parque.

6. Conclusiones

La energía de origen eólico, dada la acuciante escasez de los combustibles fósiles, presenta para muchos países una solución muy apropiada. No es de extrañar que cada año que pasa, el número de Parques Eólicos, se incrementa, en especial en Europa y en los EEUU. En paralelo a este incremento ha crecido, también, la preocupación por parte de los conservacionistas, sobre la influencia en el medioambiente, de todas estas infraestructuras. El medioambiente puede verse afectado de varias maneras: visual, faunístico, biológico, ruido, seguridad, etc.. En este trabajo hemos hecho innapié en el aspecto de cómo el ruido puede impactar en el entorno situado alrededor de un parque Eólico Offshore.

Por sus características especiales un Parque Eólico incrementa su eficacia cuando la rugosidad de su entorno es baja, ya que entonces el flujo del viento es más uniforme y menos variable. El mar tiene menos rugosidad que la tierra de modo que situar un Parque Eólico en el mar tiene el plus de un mayor rendimiento.

Los Parques Eólicos de cualquier tipo los forman un elevado número de aerogeneradores. De esta manera, por agregación, la energía aportada, lo es de manera más uniforme.

El impacto acústico de un Parque sobre su entorno, es un aspecto de la contaminación medioambiental a la que se debe prestar atención según lo exige las legislaciones nacionales y la internacional más significadas, Naciones Unidas. El sonido es energía que el hombre introduce en el medio marino. El hombre debe paliar cualquier efecto que esa introducción de energía en forma de sonido pueda causar.

Un Parque Eólico Offshore, en el estado actual de la Tecnología ha de instalarse en lo que se conoce con el nombre de Aguas muy poco profundas. Esta singularidad hace que el ruido se propague según unas determinadas características, que en general impiden su propagación, aunque a veces, también puede ocurrir lo contrario. El ruido impacta en la vida marina en tanto en cuanto la banda de frecuencias de la perturbación sónica, coincide con la banda de frecuencias en la que las especies marinas tengan su mayor sensibilidad. Es motivo de estudios profundos el conocimiento de estas zonas de sensibilidad, en especial para aquellas especies de interés en la industria pesquera. En relación con el entorno marino afectado por un Parque Eólico offshore, es necesario conocer el ruido ambiente, en él. Contaminación será cualquier sonido que aparezca sobre el nivel de fondo promediado, a lo largo de un cierto tiempo, y para distintos regímenes de viento y su estado de mar asociado. El viento, en aguas muy poco profundas, es el que dicta el tipo: características y nivel, del ruido de fondo.

Las fuentes esperables de ruido en un Parque Eólico Offshore son varias. Durante su Proyecto y Construcción son las que se derivan de la exploración geofísica y del transporte y enclavado de los pilotes soporte de los aerogeneradores. Estos dos tipos de perturbaciones se pueden caracterizar sin dificultad. Sus niveles pueden alcanzar valores peligrosos para la fauna que se encuentre a distancias cortas. En relación con el proceso de instalación hay que tener en cuenta el ruido generado por el dragado del fondo marino en la elaboración de las trincheras donde hay que sepultar a los cables que unen cada aerogenerador con la Estación de Control Central, y de esta con tierra para unirse a la red de distribución de energía eléctrica. También este ruido está caracterizado y puede ser de un nivel importante. La etapa de desmontaje del Parque puede implicar explosiones controladas de la infraestructura. Esta actividad es muy peligrosa para la fauna y habrá que hacerla con exquisito cuidado. Durante el periodo de producción el nivel de ruido generado por cada aerogenerador individual, es muy poco significativo y aunque la perturbación está presente parece que la fauna se habitúa con facilidad a él. La combinación de todos los aerogeneradores, como fuentes sumadas, sólo pueden ser importantes y superar el ruido de fondo en las zonas próximas a determinadas turbinas.

En todas las etapas de la vida de un Parque Eólico Offshore, se requiere monitorizar su status de ruido de una manera, al menos, periódica, aunque es deseable que este control sea o bien permanente, aleatorio o siempre que concurran determinadas circunstancias. Es deseable también un registro permanente que permita un promediado de referencia cada vez más fiable.

Finalmente, es necesario acudir a técnicas mitigadoras del impacto del ruido sobre el entorno. Estas técnicas de apantallamiento han sido bastante estudiadas y experimentadas, y aunque no existe unanimidad acerca de su eficacia, por ejemplo, en el caso de las pantallas de burbujas, sí parece ser que hay un efecto de ayuda y disuasorio para la fauna al atravesar esas cortinas. Otros métodos inhibidores del ruido están formados por sistemas que radian unas determinadas señales auyentadoras, eficaces, en otros casos no lo son, de determinadas especies de peces. Hay que insistir que el más eficaz método de apantallamiento consistirá siempre en un buen programa de monitorizado.

7. Referencias

- [1] L. Bairstow. “*Applied Aerodynamics*”, Longmans, Green & Co. London, pp 130-131.1939.
- [2] H.M. Dominga, A.D. Oude Elferink, “Acoustic Pollution in the Ocean, The Search for Legal Standards”, *Ocean Development and International Law*. **3**, 151-171. 2000.
- [3] Elena McCarthy. “International Regulation of Underwater Sound. Establishing Rules and Standards to Address Ocean Noise Pollution.”. *Kluwer Academic Publishers*. Boston. 2004
- [4] R.E. Hester and R.M. Harrison, Editors. “Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Resources”, *The Royal Society of Chemistry*. London. 2003.
- [5]. Ocean Studies Board, “Ocean Noise and Marine Mammals”, *National Academic Press*. Washington DC. 2003.
- [6]. M. C. Hastings, “Coming in terms with the effects of Ocean Noise on Marine Animals” *Acoustics Today*. Vol. 4, Nº 2. April, 2008.
- [7]. C. Ranz. “Very Shallow Waters in Underwater Acoustics. Limiting Factors in Signal Propagation”. *Revista de Acústica*. **38**, 1 and 2. pp 16-27. 2007
- [8] D. E. Weston. “On shallow water sound fluctuations, with speculations upon an April evening”. *NATO Advance Study Institute on Problem on Sound Propagation*. Sept . 1967.
- [9] R. J. Urick. “Sound Propagation in the Sea”. Chap. 12. *Peninsula Pub.*. Los Altos. California. 1982.
- [10] R. J. Urick, Op. Cit. « Sound Prop », Chap. 10.

- [11] R. J. Urick. "Processes of Sound Scattering at the Ocean Surface and Bottom". *Journal of Marine Research*, 15, 134, 1956.
- [12] D. Wartzok, et al. "Factors affecting the responses of marine mammals to acoustic disturbance" *Mar. Tech. Soc. J.*, 37 (4), pp: 6-15, 2004..
- [13] W.C Cummings and P.O.Thomson. "Underwater Sound from the Blue Whale", *J. Acoust. Soc. Am.* **50**, 1193-1198. 1971.
- [14]. A. Price, "The Marine Food Chain in Relation to Biodiversity", *The Scientific World Journal.* **1**, 579-587, 2001.
- [15]. Ch. Erbe and S. Carr. "Assessing the impact of underwater noise on marine fauna: a software tool". *International Congress on Sound and Vibration. ICSV 14.* Cairns, July 2007.
- [16] A. N. Popper, et al. « Sound detection mechanism and capabilities of teleost fishes ». In "Sensory Processing in Aquatic Environments" Ed. by S.P. Collins and N.J. Marshall. Springer Verlag. New York. Pp 3-38. 2003.
- [17]. J.J. Finneran, et al. "Temporary Threshold Shift (TTS) in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones" *J. Acoust. Soc. Am.* 118, pp 2696-2705, 2005.
- [18], M.C. Hastings, and A.N. Popper. "Effects of Sound on fish". *Report to California Department of Transportation.* Veasé en la Web, la página: http://www.dot.ca.gov/hq/env/bio/files/Effects_of_Sound_on_Fish23Aug05.pdf
- [19]. A. N. Popper et al.. "The effect of high intensity, low frequency active sonar on rainbow trout" *J. Acoust. Soc. Am.* 122, (1), pp: 623-635. 2007
- [20]. A. N. Popper et al.. "Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species". *J. Acoust. Soc. Am.* 117, (6), pp: 3958-3971. 2005.
- [21] . A. Hassel et al.. "Influence of seismic shooting on the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*)" *ICES, J. Mar. Sci.*, 61, pp: 1165-1173. 2004.
- [22]. J. T. Yerverton et al. « The relationship between fish size and their response to underwater blast » *Report DNA 3677T, Director, Defense Nuclear Agency, Washington DC.* 1975
- [23]. R. J. Urick. "Principles of Underwater Sound". *McGraw Hill Book Co.* New York. Pp, 86-97. 1983.
- [24]. P. Cobo, J. Korman, C. Ranz. "Underwater noise impact of offshore wind farms during construction and operation phases". *International Congress on Sound and Vibration.. ICSV14.* Cairns. July 2007.
- [25] C. Ranz. "Very Shallow Waters. Acoustic methods to explore the environment". Invited Conference. *6th EAA Conference on Hydroacoustics.* Leba. Poland. May 2007.
- [26]. C. L. Piggott, "Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian shelf". *J. Acoust. Soc. Am.* 36, pp: 2152-2159, 1964.
- [27]. W. J. Richardson et al. "Marine mammals and noise ». *Academic Press.* London. 1995
- [28]. E. Cudahy et al. "Summary Report on the Bioeffects of Low Frequency Water Borne Sound". *Department of the Navy Technical Report 3.* Washington DC. March 1999.
- [29]. R. J. Urick. Op. Cit. "Principles ...". Chapter 10. 1983.
- [30] D. Ross. "Mechanics of Underwater Noise". *Pergamon Press.* New York. 1979.
- [31]. M. C. Hastings and A. N. Popper. Op. Cit. "Effects of ...". Figure 2. p. 67. 2005.
- [31] R. P. Hamernick and K. D. Hsueh. "Impulse noise: some definitions, physical acoustics and other considerations". *J. Acoust. Soc. Am.* 90, pp: 189-196. 1991.
- [32]. J. Nedwell et al. "Measurement of underwater noise during construction of offshore wind farm, and comparison with background noise" *Report 544 R 0411. COWRIE.* London. 2004
- [33]. London Array Ltd. "Environmental Statement" Vol 1. *Offshore Works. Part 5. Project.* Page 46.. www.londonarray.com. . June 2005.
- [34]. M. C. Hastings and A. N. Popper. Op. Cit. "Effects of ...". *Apéndice B (Revisado).* Tabla B1. 2005.

- [35]. C. McKenzie Maxon, "Offshore wind turbines construction." *Report No. 00.877*, Odegaard&Danneskiold-Samsøe A/S, 2000.
- [36]. P. Cobo, J. Korman y C. Ranz. Op. Cit. "Underwater Noise impact ...," 2007
- [37]. C. Ranz. "Very shallow water noise impact of offshore windfarms. Parameters to be considered". *ICSV15*. Daejeon. Julio. 2008.
- [38]. G. L. Hempen and T. M. Keevin. "Underwater blasting effects models. A critical evaluation of I-blast". *Proceedings of the 21st Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques*. Nashville. Tennessee. International Soc. Of Explo. Engin. Cleveland. Ohio. Pp: 236-247. 1995.
- [39]. London Array Ltd. "Environmental Statement Site" Vol 1. *Site Selections. Part 4. Project*. Page 46.. www.londonarray.com. . June 2005.
- [40]. Dulce Churro et al. "Parques Eólicos. Estudo dos Impactos no Ambiente Sonoro. I.- Influência no Ruído Local". *Acústica 2004*. Guimarães. Paper 184. 2004.
- [41]. M. João Zambujo et al. "Parques Eólicos. Estudo dos Impactos no Ambiente Sonoro. II.- Configuração Optimizada de Potências Sonoras". *Acústica 2004*. Guimarães. Paper 185. 2004.
- [42]. P.D. Ward and S.G. Healy. "Sound Propagation Modelling and Environmental Impact Mitigation Strategy for Rhyl Wind Farm". *Hayes-McKenzie Partnership. Report . SSDW4/57. 2002*
- [43]. M. Porter and E.L. Reiss, "A numerical method for ocean-acoustic normal modes." *J. Acoust. Soc. Am.* **76**, pp: 244-252. 1984.
- [44]. W.A. Kuperman, and F. Ingenito, "Attenuation of the coherent component of sound propagating in shallow water with rough boundaries." *J. Acoust. Soc. Am* **61**, pp: 1178-1187. 1977.
- [45]. M. Porter and E.L. Reiss, "A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes." *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, pp: 1760-1767. 1985.
- [46]. D. MacMillan, y G. W. Aula. "Quantifications of condition Monitoring benefit for offshore wind turbines". *Wind Engineering*, 31, n° 4, pp: 267-285. 2007.
- [47]. L. W. M. M. Rademakers et al. « Condition Monitoring for lowering maintenance costs of offshore wind turbines » *International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Pp: 3943-3952. 2004.
- [48]. P. Caselits y J. Gieghardt. "Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters". *Transactions of the ASME. Journal of Solar Energy Engineering*. 127, n° 2, pp: 253-262. 2005.
- [49]. M. A. Sanz-Bobí, M. C. García, y J. del Pico. "Intelligent system for predictive maintenance. Application to the health condition monitoring of a wind turbine gearbox". *Computers in Industry*. 57, n° 6, pp: 553-568. 2005.
- [50]. Newborough, D., Goodson, A.D. and Woodward, B., "Beacon Mode Deterrents for Gill Nets", *11th Annual Conference of the European Cetacean Society*, II, P. Evans, E. Parsons and S. Clark, Kiel University, Stralsund, Germany, pp 34-36. March 1997.
- [51]. Wursig, B. et al. "Development of fan air bubble curtain to reduce underwater noise of percussive piling". *Marine Environmental Research*. **49**, pp: 79 – 93. 2000.
- [52]. F. Petri. "Experience with bubbles curtains: Purpose, Hardware and Use". *Summer Meeting Conference on Transportation Research. Board AD640. Noise and Vibration Committee*. 2005.
- [53]. J. S. Welton et al. « The efficiency of air, sound and acoustics bubbles screens in deflecting atlantic salmon, *Salmo Salar*, smolts in the River From". UK. *Fish Management and Ecology*. 9, n° 1, pp: 11 – 18. 2002.

