

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO ACÚSTICO DE AEROGENERADORES OFF-SHORE

**Martínez Beltrán, Sonia Carolina; Velarde Suárez, Sandra;
Argüelles Díaz, Katia Maria**
uo186244@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del trabajo de investigación sobre el "Desarrollo de una metodología para la evaluación del impacto acústico de aerogeneradores off-shore" como parte del Máster Universitario en Ingeniería Energética de la Universidad de Oviedo.

En este documento se presenta la evaluación y planteamiento de dos parques eólicos off-shore que se tienen pensado realizar en el norte de España. Para ello, se ha utilizado aerogeneradores de la marca GAMESA y se han simulado sus comportamientos mediante el software de análisis acústico Odeon Room Acoustic Program v.10.

Los resultados obtenidos se han contrastado realizando cálculos de acuerdo con la Norma ISO 9613-2 sobre la propagación del sonido al aire libre.

Se ha realizado un estudio de sensibilidad para saber cómo afecta el cambio de algunas características al estudio realizado.

Con esto, se han obtenido resultados puntuales y en malla los cuales se han comprobado y analizado. Para ello, se presentan gráficas del SPL (sound pressure level o nivel de presión), del Lw (potencia acústica), tablas y mapas.

Este trabajo se ha realizado para obtener conclusiones directamente aplicables a la realidad que supone hoy en día tanto el diseño de aerogeneradores, como la ubicación de parques eólicos marinos.

ABSTRACT

This paper presents the results of the research on "Development of a methodology for the assessment of noise impact of offshore wind turbines" as part of the Master's Degree in Energetic Engineering from the University of Oviedo.

This document presents the evaluation and planning of two offshore wind farms that are about to be constructed in the north of Spain. Gamesa wind turbines have been used and their behaviors have been simulated using acoustic analysis software Acoustic Program Room Odeon v.10. The results obtained have been compared to calculations in accordance to the ISO 9613-2 on sound propagation outdoors.

Sensitivity studies have been performed to see how the change of some characteristics influences the results.

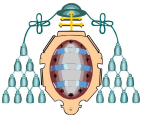
The results obtained for both the specific points and the grid have been verified and analyzed.

These have been illustrated by graphs of SPL (sound pressure level), Lw (sound power), tables and maps.

This work has been done to obtain conclusions directly applicable to the challenges facing the reality both in the design of wind turbines and in the location of offshore wind farms in nowadays.

INTRODUCCIÓN

Los parques eólicos off-shore presentan un porcentaje muy pequeño de la potencia instalada



en el mundo. Sin embargo, las instalaciones de este tipo constituyen uno de los yacimientos energéticos más importantes del futuro tal y como se expone en la Publicación interna de la Universidad de Oviedo [1]. Éstas tienen las siguientes ventajas:

- La rugosidad del agua es muy baja en comparación con el medio terrestre.
- El viento circula a mayor velocidad.
- Ausencia de turbulencia.
- Disponen de grandes superficies.
- Se reduce el impacto visual y acústico sobre la población.

Por otro lado, entre sus inconvenientes se encuentra la ausencia de infraestructuras eléctricas con los puntos de consumo, los costes de cimentación y mantenimiento. Por tanto, es muy interesante el estudio de este tipo de parques eólicos y en concreto el estudio acústico.

En el trabajo de Bolin, K. et al. [2] se estudia la propagación del sonido de un aerogenerador utilizando un estudio computacional y un cálculo numérico. También, han hecho un estudio mediante dos técnicas distintas Delaire, C. et al.[3] y Guarnaccia, C. et al. [4].

Por otro lado, Larsson, C. et al [5] han hecho un estudio para saber cómo afectan los efectos meteorológicos en la propagación del sonido.

En este trabajo se ha desarrollado y contrastado un método de cálculo para la evaluación del impacto acústico de un parque eólico marino situado en la Costa Cantábrica.

METODOLOGÍA

♦ PARQUES ESTUDIADOS:

Se ha estudiado el impacto acústico que se genera en dos plataformas off-shore concretas. Estas son:

- Plataforma en la zona de Cabo Busto.

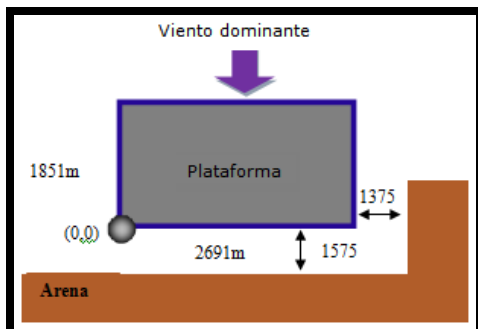


Imagen 1. Geometría de la zona de Cabo Busto.

- Plataforma en la zona de Llumeres

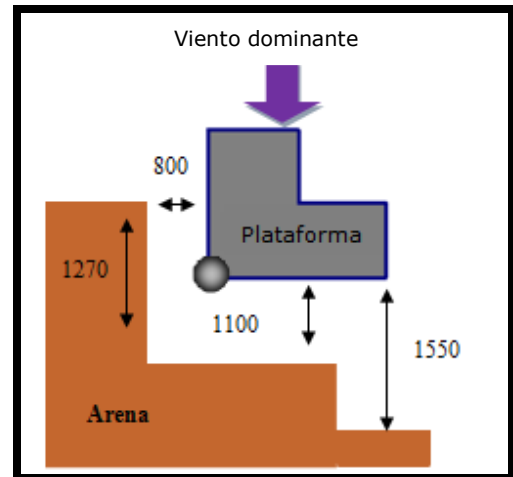


Imagen 2. Geometría de la zona de Llumeres.

Las distancias que se expresan en estas figuras están en metros.

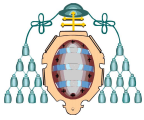
♦ AEROGENERADORES UTILIZADOS:

Se han estudiado tres aerogeneradores de la marca GAMESA que tienen las siguientes características:

AEROGENERADOR GAMESA G80	
Rotor	
Diámetro	80 m
Área barrida	5027 m ²
Velocidad	9-19 rpm
Torre	
Altura	60,67,78 y 100 m
Generador	
Potencia nominal	2000 Kw
Tensión	690V
Datos operativos	
Velocidad de rotación a 50 Hz / 60 Hz	1680 / 2016 rpm

Tabla 1. Características del aerogenerador G80.

AEROGENERADOR GAMESA G87	
Rotor	
Diámetro	87 m
Área barrida	5975 m ²
Velocidad	9-19 rpm



Torre	
Altura	67,78, 90 y 100 m
Generador	
Potencia nominal	2000 Kw
Tensión	690V
Datos operativos	
Velocidad de rotación a 50 Hz/ 60 Hz	1680 / 2016 rpm

Tabla 2. Características del aerogenerador G87.

AEROGENERADOR GAMESA G90	
Rotor	
Diámetro	90 m
Área barrida	6362 m ²
Velocidad	9-19 rpm
Torre	
Altura	60,78 y 100 m
Generador	
Potencia nominal	2000 Kw
Tensión	690V
Datos operativos	
Velocidad de rotación a 50 Hz/ 60 Hz	1680 / 2016 rpm

Tabla 3. Características del aerogenerador G90.

Nos hemos basado para realizar el estudio en el informe técnico del análisis de emisión de ruido para máquinas G8X de la empresa GAMESA [6] para obtener los datos sobre los niveles de ruido de dichos aerogeneradores.

Dicho informe realiza los cálculos de acuerdo con la Norma UNE-EN 61400-11 [7] en donde se consideran niveles de presión sonora en el intervalo de velocidades de 6 a 10m/s medidas a 10 metros de altura. En este documento, se hace un estudio para comparar distintos tipos de aerogeneradores así que todos los espectros están normalizados en tercios de octava a un nivel de ruido de referencia de 100 dB (A) utilizando la siguiente expresión:

$$NR_{\text{normalizado } i} = NR_{\text{espectro } i} + (100\text{dB} - NR_{\text{total espectro}})$$

Ecuación 1. Espectros normalizados a 100 dB(A)

En donde:

NR= nivel de ruido.

i=frecuencia nominal en tercios de octava (Hz).

Por otro lado, el informe de GAMESA presenta tres modelos normalizados para cada máquina. En este caso se utilizará el modelo medio ya que contiene el 50% de participación de los otros dos (el optimista y el pesimista).

Se necesita trasladar los espectros normalizados a 100dB (A) a los niveles de ruido de máquina, para ello, se añade a cada valor del espectro normalizado la diferencia entre el nivel de ruido para el que se desea saber la distribución del espectro y los 100dB a los que se ha normalizado utilizando la siguiente expresión:

$$NR_{\text{espectro } i} = NR_{\text{normalizado } i} + (NR_{\text{total espectro}} - 100\text{dB})$$

Ecuación 2. Traslación de los espectros normalizados a 100 dB(A)

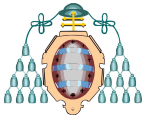
También, para la distribución de frecuencias del ruido producido hay que conocer la Ley de Control que relaciona dicho ruido producido y la velocidad del viento.

El procedimiento para calcular el espectro sonoro de una máquina es:

- 1) Se entra en la tabla correspondiente a la altura de la torre y a la ley de control para así sacar el nivel de ruido a la velocidad del viento deseada.
- 2) Se trasladan los espectros a los niveles de ruido de la máquina con la ecuación 2.

Por tanto, el estudio se puede realizar para:

- 1) Distintas alturas de torre: 67, 78 y 100 m.
- 2) Distintas leyes de ruido:
 - En aerogeneradores G80: a alturas de la torre de 67 y 78 metros se pueden realizar con leyes de ruido de 100, 101, 102, 102.5 y 104 dB(A), y en alturas de la torre de 100m con 104 dB(A).
 - En aerogeneradores G87: a 67 y 78 metros de la altura de la torre se pueden realizar con leyes de ruido de 102, 103, 104, 105 y 106 dB(A), y en alturas de la torre de 100m con 102 y 103 dB(A).



- En aerogeneradores G90: para este tipo de aerogenerador se ha utilizado el informe de GAMESA con título "Curva de Potencia y Emisión de Ruido G90 2MW 50/60Hz" [8] para calcular su espectro ya que está hecho para una ley de ruido puntual.

3) Distintas velocidades en buje:

- En aerogeneradores G80: éstas dependen de la altura de la torre y de la ley del ruido según se muestra en la siguiente tabla:

		Alturas		
		67m	78m	100m
Ws (m/s)		5,4	5,6	5,8
		6,8	7	7,3
		8,2	8,3	8,7
		9,5	9,7	10,2
		10,9	11,1	11,6
		12,2	12,5	13,1
		13,6	13,9	14,5

Tabla 4. Velocidades para el aerogenerador G80.

- En aerogeneradores G87: la velocidad tiene una variación de 3 a 16m/s.
- En aerogeneradores G90: las velocidades dependen de la altura de la torre según se muestra en la siguiente tabla:

		Alturas		
		67m	78m	100m
Ws (m/s)		4.1	4.2	4.3
		5.4	5.6	5.8
		6.8	6.9	7.2
		8.1	8.3	8.7
		9.5	9.7	10.1
		10.8	11.1	11.6
		12.2	12.5	13
		13.6	13.9	14.5

Tabla 5. Velocidades para el aerogenerador G90.

Para optimizar los cálculos, se han realizado los estudios de la siguiente manera:

- En aerogeneradores G80: se ha utilizado una ley de control de 104 dB(A) por ser común para las 3 alturas y con las velocidades de buje que se muestran en la siguiente tabla:

		Alturas		
		67m	78m	100m
Ws	Mínima	5.4	5.6	5.8
	Media	9.5	9.7	10.2
	Máxima	13.6	13.9	14.5

Tabla 6. Velocidades a una ley de ruido para el G80.

- En aerogeneradores G87: se ha utilizado una ley de control de 103 dB(A) ya que esta es común para las 3 alturas y con una velocidad del buje mínima (3m/s), máxima (16m/s) y media (10m/s).

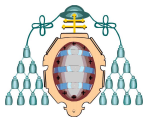
- En aerogeneradores G90: se ha utilizado el informe anteriormente expuesto ya que este está simplificado para una determinada ley de ruido. También, se utilizan las velocidades de buje que se muestran en la siguiente tabla:

		Alturas		
		67m	78m	100m
Ws	Mínima	4.1	4.2	4.3
	Media	9.5	9.7	10.1
	Máxima	13.6	13.9	14.5

Tabla 7. Velocidades a una ley de ruido para el G90.

Con esta base y con la ecuación 2 se ha calculado el espectro sonoro de la máquina. Estos cálculos se han resumido en la siguiente tabla donde se observa:

- 1) Frecuencias divididas en tercios de octava.
- 2) Valores normalizados a 100dB con el modelo medio.
- 3) Valores corregidos a un nivel de ruido de 105 dB.



▪ En aerogeneradores G80:

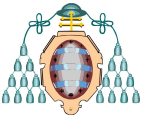
▪ En aerogeneradores G87:

	Datos para las velocidades mínimas a las distintas alturas que se citan				Datos para las velocidades medias y máximas para las 3 alturas citadas.
		67m	78m	100m	-
Velocidad del buje	-	5,4	5,6	5,8	-
Valores	100	95,4	95,9	96,7	104
Frecuencias [Hz]	dB	dB	dB	dB	dB
25	62,7	58,1	58,6	59,4	66,7
31,5	66,1	61,5	62	62,8	70,1
40	69	64,4	64,9	65,7	73
50	71,6	67	67,5	68,3	75,6
63	74,7	70,1	70,6	71,4	78,7
80	77,6	73	73,5	74,3	81,6
100	80,2	75,6	76,1	76,9	84,2
125	82,2	77,6	78,1	78,9	86,2
160	84,3	79,7	80,2	81	88,3
200	85,9	81,3	81,8	82,6	89,9
250	87,4	82,8	83,3	84,1	91,4
315	88,7	84,1	84,6	85,4	92,7
400	89,5	84,9	85,4	86,2	93,5
500	90,2	85,6	86,1	86,9	94,2
630	90,7	86,1	86,6	87,4	94,7
800	90,2	85,6	86,1	86,9	94,2
1000	89,5	84,9	85,4	86,2	93,5
1250	88,7	84,1	84,6	85,4	92,7
1600	87,5	82,9	83,4	84,2	91,5
2000	85,9	81,3	81,8	82,6	89,9
2500	84,3	79,7	80,2	81	88,3
3150	82,2	77,6	78,1	78,9	86,2
4000	79,6	75	75,5	76,3	83,6
5000	76,8	72,2	72,7	73,5	80,8
6300	73,5	68,9	69,4	70,2	77,5
8000	68,7	64,1	64,6	65,4	72,7
10000	63,3	58,7	59,2	60	67,3

Tabla 8. Espectro sonoro para el G80.

Valores validos para las 3 alturas				
Velocidad del buje	-	3m/s	10 m/s	16m/s
Valores	100	94	103	107,5
Frecuencias [Hz]	dB	dB	dB	dB
20	59,1	53,1	62,1	66,6
25	62	56	65	69,5
31,5	65,1	59,1	68,1	72,6
40	68,3	62,3	71,3	75,8
50	71,3	65,3	74,3	78,8
63	74	68	77	81,5
80	76,8	70,8	79,8	84,3
100	79,4	73,4	82,4	86,9
125	81,6	75,6	84,6	89,1
160	83,9	77,9	86,9	91,4
200	85,7	79,7	88,7	93,2
250	87,3	81,3	90,3	94,8
315	88,5	82,5	91,5	96
400	89,5	83,5	92,5	97
500	90,2	84,2	93,2	97,7
630	90,9	84,9	93,9	98,4
800	90,6	84,6	93,6	98,1
1000	90	84	93	97,5
1250	89,2	83,2	92,2	96,7
1600	87,6	81,6	90,6	95,1
2000	85,6	79,6	88,6	93,1
2500	83,3	77,3	86,3	90,8
3150	80,3	74,3	83,3	87,8
4000	76,7	70,7	79,7	84,2
5000	72,6	66,6	75,6	80,1
6300	68,2	62,2	71,2	75,7
8000	63	57	66	70,5
10000	57,9	51,9	60,9	65,4

Tabla 9. Espectro sonoro para el G87.



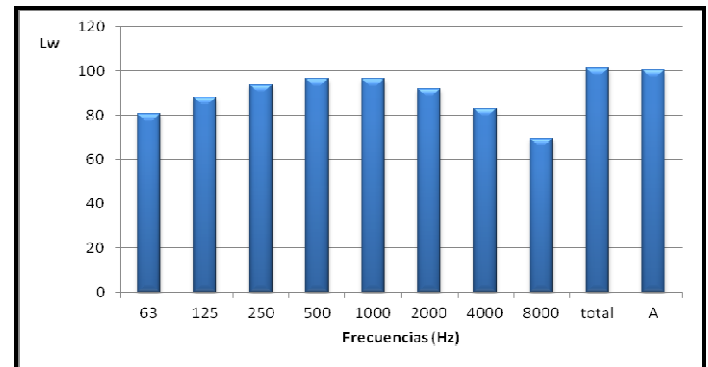
- En aerogeneradores G90:

- 3) En dicho informe existen datos de interés relativos a la máquina no disponibles en para otras.

Por tanto, se ha calculado para este aerogenerador la potencia acústica total y con ponderación A. Este cálculo se ha realizado a partir del nivel de potencia sonora que se ha calculado anteriormente. Los resultados se pueden visualizar en la siguiente gráfica:

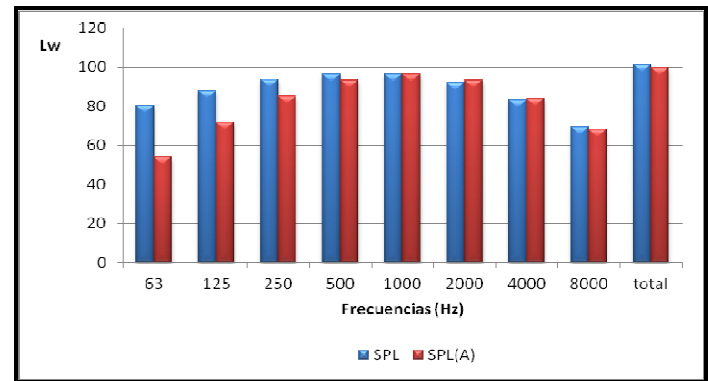
Valores validos para las 3 alturas			
Velocidad del buje	-	Mínim a	media y máxima
Valores	100	92,8	106,4
Frecuencias [Hz]	dB	dB	dB
20	59,1	51,9	65,5
25	62	54,8	68,4
31,5	65,1	57,9	71,5
40	68,3	61,1	74,7
50	71,3	64,1	77,7
63	74	66,8	80,4
80	76,8	69,6	83,2
100	79,4	72,2	85,8
125	81,6	74,4	88
160	83,9	76,7	90,3
200	85,7	78,5	92,1
250	87,3	80,1	93,7
315	88,5	81,3	94,9
400	89,5	82,3	95,9
500	90,2	83	96,6
630	90,9	83,7	97,3
800	90,6	83,4	97
1000	90	82,8	96,4
1250	89,2	82	95,6
1600	87,6	80,4	94
2000	85,6	78,4	92
2500	83,3	76,1	89,7
3150	80,3	73,1	86,7
4000	76,7	69,5	83,1
5000	72,6	65,4	79
6300	68,2	61	74,6
8000	63	55,8	69,4
10000	57,9	50,7	64,3

Tabla 10. Espectro sonoro para el G90.



Gráfica 1. Potencia acústica para el G90.

También, se ha calculado el nivel de potencia acústica para las distintas bandas de octava en ponderación A. En la siguiente gráfica se puede observar la comparativa:



Gráfica 2. Comparativa en ponderación A para el G90.

♦ LOCALIZACIÓN DE LAS FUENTES:

La localización de las fuentes es un punto muy importante ya que una turbina que se encuentre detrás de otra podrá extraer menos energía por la sombra aerodinámica de una turbina sobre otra. Por lo tanto, el tener una distancia muy pequeña entre turbinas nos permite instalar una mayor cantidad de turbinas pero se reduce la energía captada por cada turbina en el parque eólico.

Los distintos casos estudiados se han realizado con el aerogenerador G90 por las siguientes razones:

- 1) El espectro de estos aerogeneradores está calculado para una ley de ruido concreta.
- 2) El informe utilizado nos muestra los valores de la velocidad del viento a 10 m.



Las pérdidas aerodinámicas pueden reducirse optimizando la geometría del parque eólico ya que la estela puede tener diferentes efectos dependiendo del tamaño de las turbinas, del tamaño de la distribución y del espaciamiento dentro del propio parque.

En un parque eólico la separación mínima entre aerogeneradores (fuentes puntuales) es de 5 a 9 veces el diámetro del rotor en la dirección del viento dominante y de 3 a 5 veces el diámetro del rotor en la dirección perpendicular al viento dominante.

También, cuando el viento tiene frecuentes cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante los aerogeneradores se deben colocar en tresbolillo.

◆ SOFTWARE:

El software utilizado es el programa Odeon Room Acoustic Program v.10 originalmente desarrollado para modelar recintos cerrados. Por ello, en todos los casos que se han estudiado en este informe se ha realizado dicho recinto como un paralelepípedo de 2000 metros de lado y 200 metros de alto.

Para realizar la simulación se han seguido los siguientes pasos:

- 1) Mediante el "Odeon Editor" se ha realizado un programa para cargar la geometría necesaria así como las distintas superficies.
- 2) Se han situado los receptores en la localización correspondiente y a un nivel de 4 metros del suelo ya que ésta es la altura tomada como referencia en el RD 1367/2007, Anexo II [9].
- 3) Se han situado las fuentes puntuales en la localización correspondiente teniendo en cuenta la altura del aerogenerador que es de 78 metros. En este paso, se le dan al programa los datos de potencia acústica calculados anteriormente para cada banda de octava. También, en este paso se ha decidido que la propagación va a ser omnidireccional.
- 4) Se han escogido los materiales necesarios para cada superficie, estos son:

- Para la parte del suelo del recinto que es agua se ha utilizado el apartado de materiales naturales de la biblioteca de Odeon ya que dentro de estos existe uno que simula el agua.

- Para representar la costa se ha utilizado el mismo apartado de materiales naturales que en el caso anterior pero en este caso se ha dispuesto del material llamado arena.

- Para las paredes laterales y el techo del recinto de control se ha utilizado un material completamente absorbente para que las ondas no generen reflexiones y distorsionen los resultados obtenidos. Este material es uno de los materiales especiales de la biblioteca de Odeon.

Es importante destacar que estos materiales al ser incluidos en la biblioteca de Odeon tienen un coeficiente de scattering predefinido, el cual es un tanto por ciento de reflexión no especular.

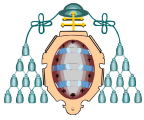
5) Se ha realizado una estimación del tiempo de reverberación con el método de las partículas del propio programa. Para ello, se ha dejado que atravesasen tantos rayos como sea necesario para que se llegue a calcular este valor en todas las bandas de octava. En este caso, se ha utilizado el método de reflexión basado en el scattering que es el método que el programa recomienda.

6) Se ha realizado una malla de receptores con un espaciado de 10 m y situada a 4 m.

7) Por último, se ha programado una tarea específica a la cual se le activa el efecto de todas las fuentes para obtener los resultados puntuales y en malla.

◆ CASOS ESTUDIADOS:

En todos los casos realizados se ha estudiado previamente la manera de distribuir las fuentes. Para el aerogenerador G90 la distancia mínima entre aerogeneradores es de 450 (5 veces el diámetro del rotor) en la dirección del viento predominante y de 270 en la dirección del viento perpendicular al dominante (3 veces el diámetro del rotor). Los aerogeneradores se han colocado en tresbolillo para tener en cuenta los frecuentes



cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante.

CASO Nº 1:

Como primer estudio se ha calculado el impacto acústico que se genera en el proyecto de Cabo Busto. Para ello, se ha utilizado como fuente puntual el aerogenerador G90 incluyendo por tanto los valores anteriormente calculados de la potencia acústica por banda de octava para la velocidad media y máxima del buje ya que estos son mayores.

El estudio se ha realizado haciendo un zoom en la geometría anteriormente descrita, y se han colocado los receptores y las fuentes puntuales de la siguiente manera:

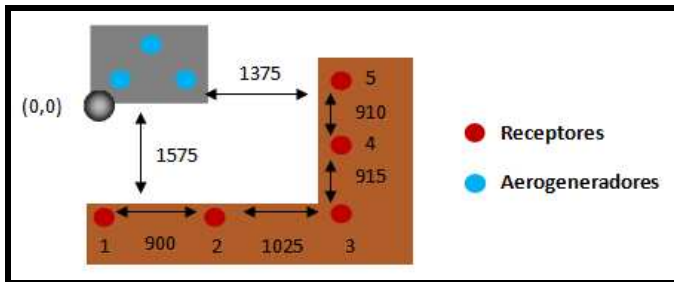


Imagen 3. Geometría y localización utilizada en Cabo Busto.

Todos los receptores están colocados a 50 metros de la costa.

Las coordenadas de las fuentes y de los receptores son las siguientes:

Fuentes:

Fuentes	Coordenadas en el eje X	Coordenadas en el eje Y
1	50	690
2	500	690
3	275	960

Tabla 11. Coordenadas de las fuentes para el caso Nº1.

Receptores:

Receptores	Coordenadas en el eje X	Coordenadas en el eje Y
1	50	-975
2	950	-975
3	1975	-975
4	1975	-60
5	1975	850

Tabla 12. Coordenadas de los receptores para el caso Nº1.

CASO Nº 2:

Como segundo estudio se ha calculado el impacto acústico que se genera en el proyecto de Llumeres. Para ello, se ha utilizado los valores de la fuente puntual para las mismas características que en el primer caso y se ha realizado también un zoom en la geometría correspondiente quedando de la siguiente manera:

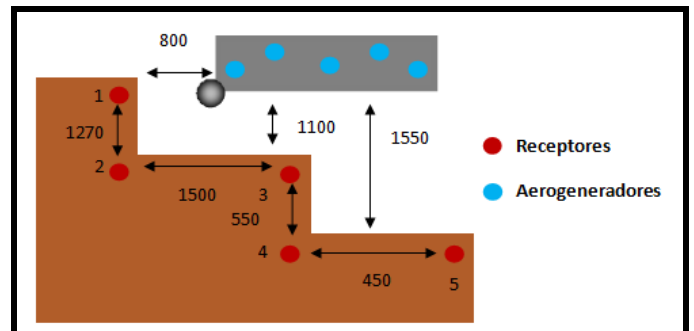


Imagen 4. Geometría y localización utilizada en Llumeres.

Todos los receptores están colocados a 50 metros de la costa.

Las coordenadas de las fuentes y de los receptores son las siguientes:

Fuentes:

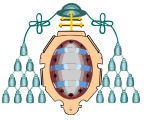
Fuentes	Coordenadas en el eje X	Coordenadas en el eje Y
1	925	675
2	1175	975
3	1425	675
4	1675	975
5	1925	675

Tabla 13. Coordenadas de las fuentes para el caso Nº2.

Receptores:

Receptores	Coordenadas en el eje X	Coordenadas en el eje Y
1	25	845
2	25	-425
3	1525	-425
4	1525	-975
5	1975	-975

Tabla 14. Coordenadas de los receptores para el caso Nº2.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CASO Nº 1:

A continuación se puede observar la imagen del mapa completo para todas las frecuencias sumadas en ponderación A.

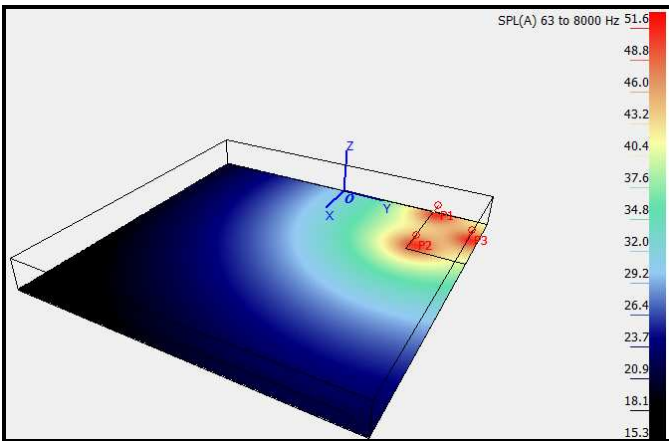
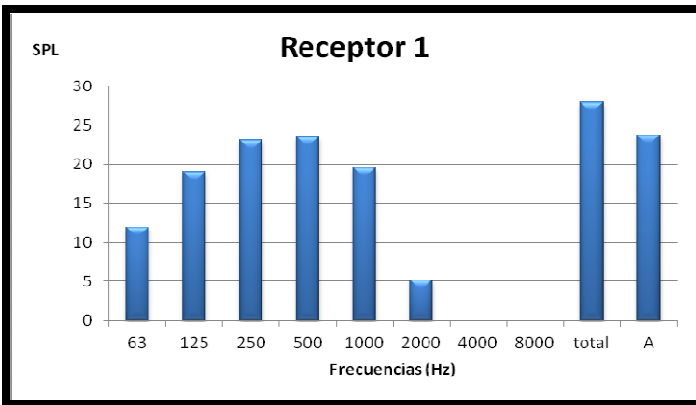
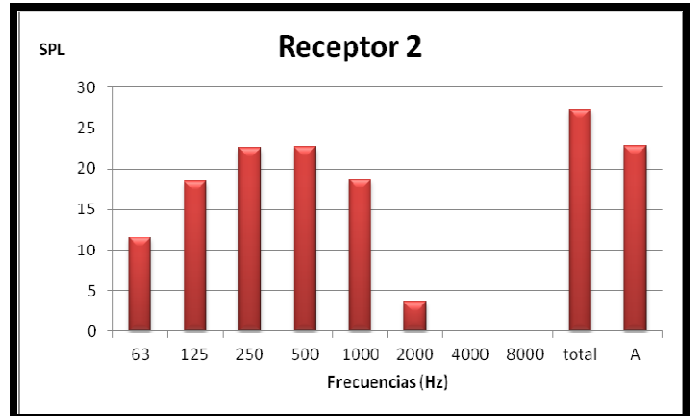


Imagen 5. Resultados del grid para el caso Nº1.

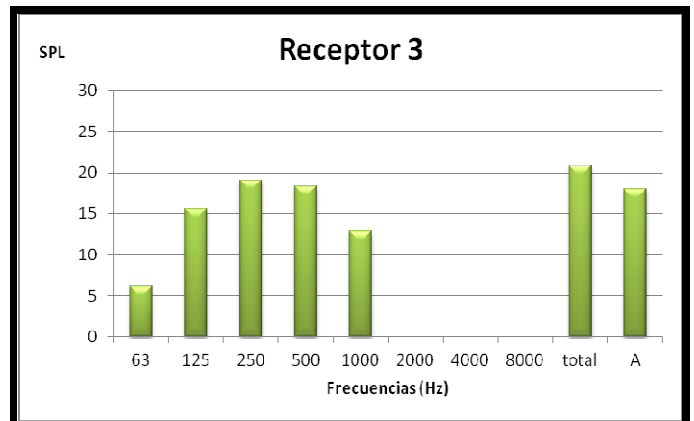
A continuación, se muestran los valores de presión acústica para cada receptor.



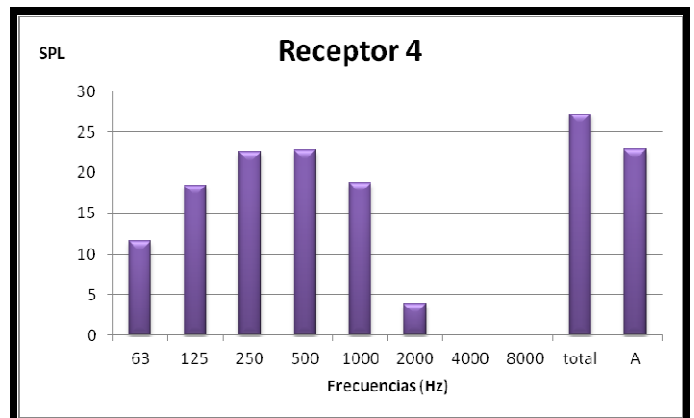
Gráfica 3. Presión acústica para el receptor 1 en el caso Nº1.



Gráfica 4. Presión acústica para el receptor 2 en el caso Nº1.



Gráfica 5. Presión acústica para el receptor 3 en el caso Nº1.



Gráfica 6. Presión acústica para el receptor 4 en el caso Nº1.

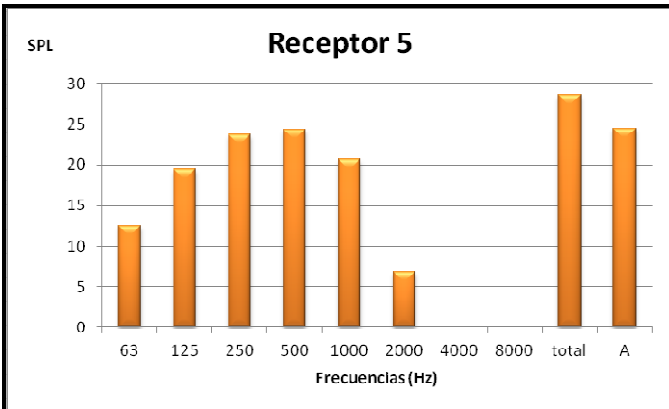
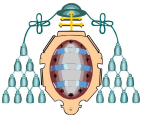


Gráfico 7. Presión acústica para el receptor 5 en el caso N°1.

Según el RD 1367/2007 [9] los valores máximos permitidos en un área residencial son de 45-55dB dependiendo de que sea horario nocturno o vespertino.

Como se puede observar en los gráficos, en este caso no se sobrepasa en ningún receptor dichos valores. También, se puede observar que hay bandas en los que el valor es cero y esto es porque se han obtenido valores inferiores a los perceptibles por el oído humano.

CASO N°2:

A continuación se puede observar la imagen del mapa completo para todas las frecuencias sumadas en ponderación A.

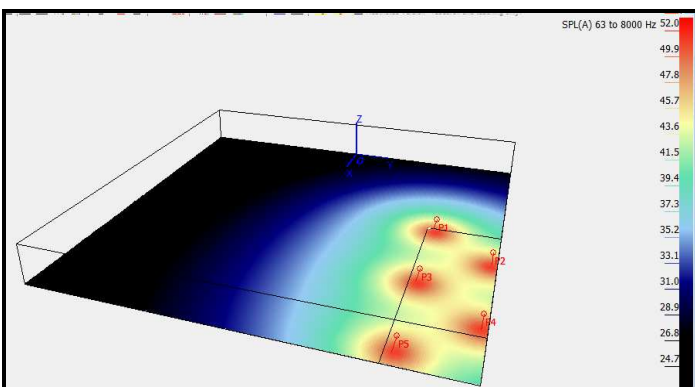


Imagen 6. Resultados del grid para el caso N°2.

A continuación, se muestran los valores de presión acústica para cada receptor.

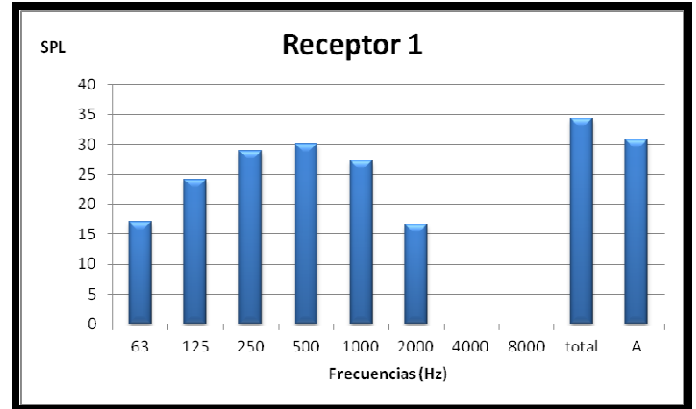


Gráfico 8. Presión acústica para el receptor 1 en el caso N°2.

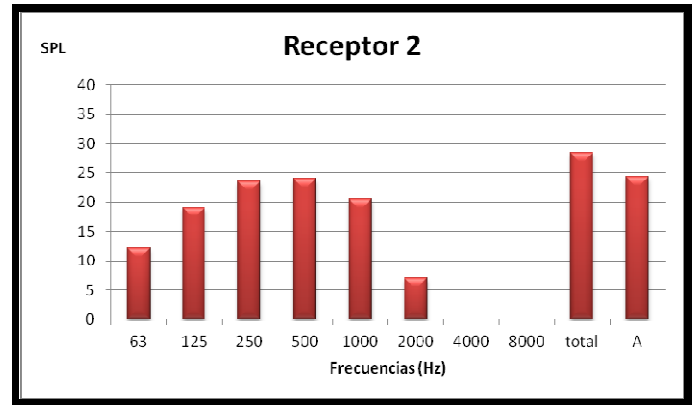


Gráfico 9. Presión acústica para el receptor 2 en el caso N°2.

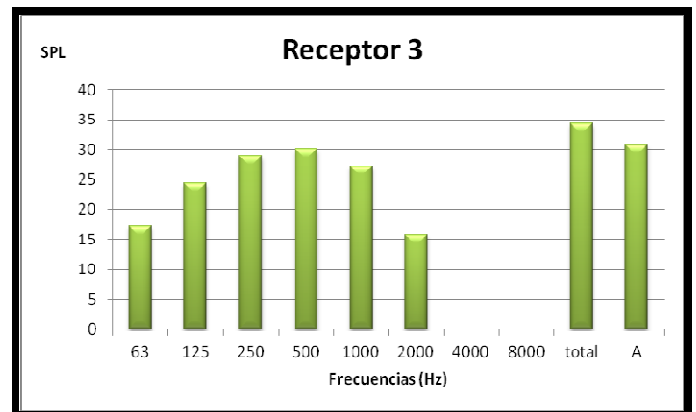
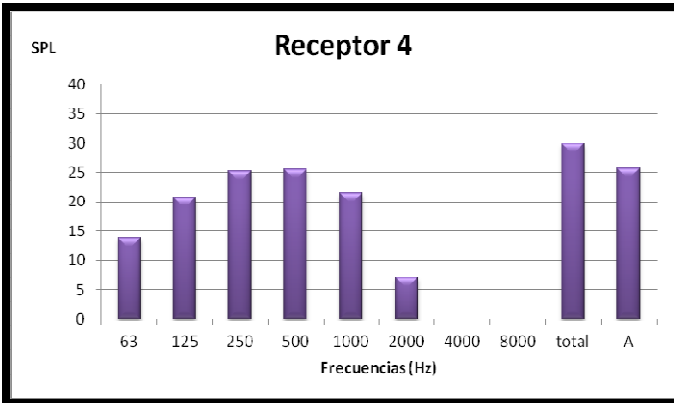
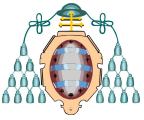
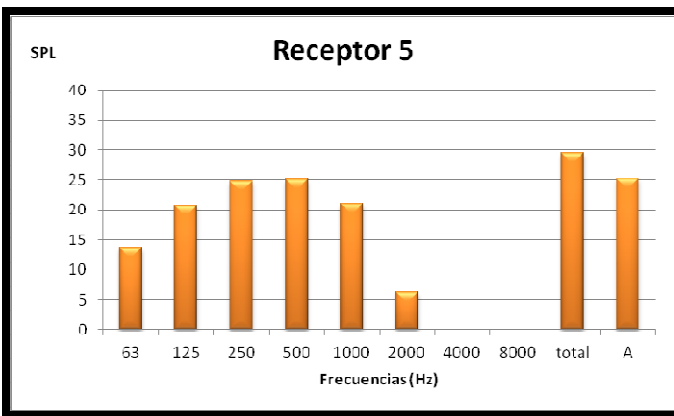


Gráfico 10. Presión acústica para el receptor 3 en el caso N°2.



Gráfica 11. Presión acústica para el receptor 4 en el caso N°2.



Gráfica 12. Presión acústica para el receptor 5 en el caso N°2.

Como vemos, en esta zona les llega a los receptores unos valores un poco más altos que en el caso de Cabo Busto, pero siguen siendo menores que los máximos permitidos.

CONTRASTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN:

Se han realizado cálculos según el método descrito en Harris [10] basado en la norma ISO 9613-2/2007 [11].

Se han elegido dos puntos: uno de los receptores del estudio y un punto muy cercano a una de las turbinas.

1) Receptor cercano al estudio:

Para la estimación del impacto acústico de un parque eólico se han de considerar los diferentes mecanismos de propagación del sonido. Estos son:

$$L_p \text{ (dB(A))} = L_w \text{ (dB(A))} - A_{div} - A_{aire} - A_{suelo} - A_{sombra} - A_{veg} - A_{barr}$$

Ecuación 3. Factores del impacto acústico.

En este caso no es necesario tener en cuenta la absorción por barreras y la absorción por vegetación.

La absorción por sombra es muy importante porque ésta es mayor mientras más elevada se encuentre la fuente con respecto al nivel del suelo. Se tendrá en cuenta junto con la absorción del suelo ya que la tabla utilizada en el cálculo de esta absorción toma en cuenta las condiciones que favorecen la propagación.

Esta contrastación se ha realizado para el receptor 1 ya que es uno de los receptores a los que más presión acústica le llega. El cálculo que se ha realizado ha sido el siguiente:

- Atenuación por divergencia:

Para calcularla se utiliza la siguiente expresión:

$$20\log(r) + 10,9 = 69,9 \text{ dB}$$

Ecuación 4. Atenuación por divergencia.

Siendo r la distancia entre la fuente y el receptor, en este caso de 900 metros. El valor obtenido es común para todas las bandas de octava.

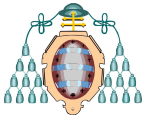
- Atenuación por aire:

Para calcular dicha atenuación se utiliza la siguiente expresión:

$$\alpha r / 1000$$

Ecuación 5. Atenuación por aire.

En donde α es un factor que varía para cada banda de octava con las condiciones ambientales. Se han consultado datos de las boyas situadas por la zona y se ha decidido utilizar una temperatura de 20°C con una humedad del 70%.



Los resultados obtenidos por banda de octava han sido los siguientes:

Frecuencia	α	Aaire
125	0,34	0,3
250	1,1	1
500	2,8	2,5
1000	5	4,5
2000	9	8,1
4000	23	20,7

Tabla 15. Valores de la atenuación por aire.

- Atenuación por suelo:

Para calcular dicha atenuación hay que tener en cuenta distintos factores. Estos son:

- Es una propagación a larga distancia por lo que existirían 3 zonas diferenciadas (fuente, media y receptor) pero en nuestro caso solo van a existir la zona del receptor y de la fuente ya que:

$30 * (hf + hs) = 2460$ y este valor es mayor que nuestra distancia entre fuente y receptor (r).

La atenuación por suelo total será la suma de la atenuación en estas dos zonas.

- Esta atenuación como su propio nombre indica tiene en cuenta el suelo mediante un factor llamado G que será distinto en la zona de la fuente y en la zona del receptor. En nuestro caso tendremos en la zona de la fuente un valor de $G = 0$ ya que lo que se tiene es agua que es totalmente reflectora. En contrario, en la zona del receptor se tendrá un valor de $G = 0,3$ ya que es parte agua y parte arena.

- También, existen unos factores que dependen de la altura de la fuente y del receptor. Estos valores se toman directamente de la tabla o se interpolan.

Los valores obtenidos para cada banda de octava han sido los siguientes:

Frecuencias	Afuente	Areceptor	A suelo
63	-15	-15	-30
125	-1,5	0	-1,5
250	-1,5	-0,9	-2,5
500	-1,6	-1,1	-2,7
1000	-1,8	-1,4	-3,2
2000	-1,9	-1,6	-3,5
4000	-1,5	0	-1,5
8000	-1,5	0	-1,5

Tabla 16. Valores de la atenuación por suelo.

Estas tres atenuaciones se suman para cada banda de octava y se comparan los resultados con los valores obtenidos por simulación, obteniendo:

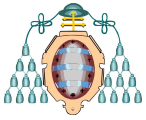
Frecuencias	Lp num	Lp sim	Diferencia
63	0	0	0
125	7,1	8,1	1
250	18,6	20,3	1,7
500	25,2	26,9	1,7
1000	25	27,3	2,3
2000	18,6	17,8	-0,8
4000	0	0	0
8000	0	0	0
total (dB(A))	29,6	30,8	1,2

Tabla 17. Comparación de los resultados.

Para calcular estos valores de presión acústica se ha tenido en cuenta que el valor de la potencia acústica emitida es de un total de 5 aerogeneradores.

Como se puede observar los valores son muy parecidos pero no exactamente iguales y esto es lo que se esperaba ya que los dos métodos utilizados se basan en diferentes características.

La simulación nos ha dado unos resultados por encima. Por tanto, es un cálculo más conservador.



2) Punto muy cercano a una de las turbinas:

Para realizar esta comprobación se ha tenido en cuenta que el nivel de presión sonora correspondiente a una distancia r desde la fuente se relaciona con el nivel de potencia sonora según:

$$L_w - 10\log(4\pi) - 20\log(r)$$

Ecuación 6. Cálculo de la presión sonora.

Se ha tomado un valor de $r=100$ y se obtiene como resultado un valor aproximado de 50 dB por lo que la simulación es correcta.

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD:

Se han realizado tres estudios de sensibilidad.

1) **CASO Nº 3:** Se ha cambiado el material en la superficie de la costa para uno que tiene parte de hormigón. Los resultados obtenidos no han variado prácticamente nada en comparación con la arena ya que solo cambia una décima en el SPL (A).

2) **CASO Nº 4:** Se ha estudiado también cambiar la fuente puntual por otro aerogenerador. Se ha utilizado la misma marca pero el modelo G87 que tiene un poco más de potencia acústica a velocidades medias y altas.

Los resultados obtenidos para el caso nº 4 han sido:

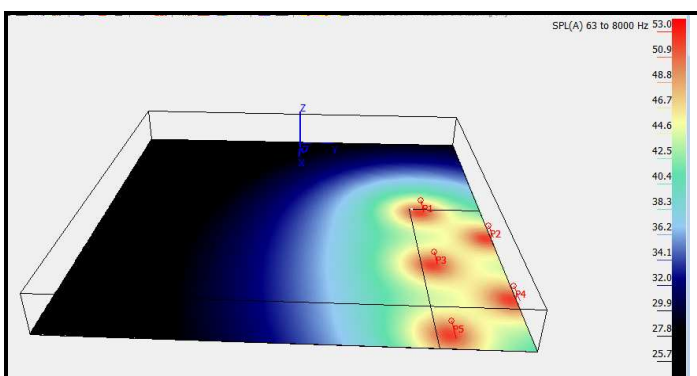
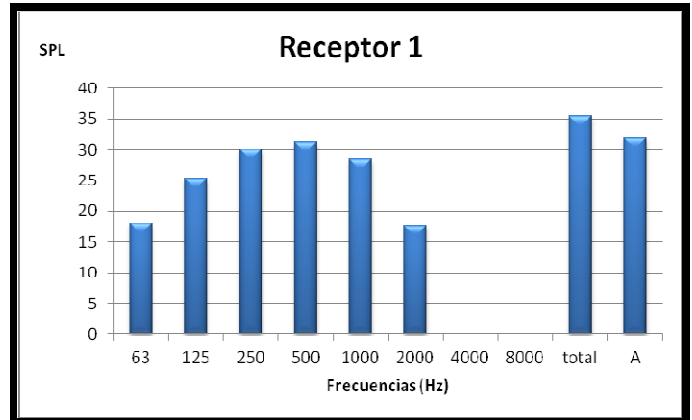
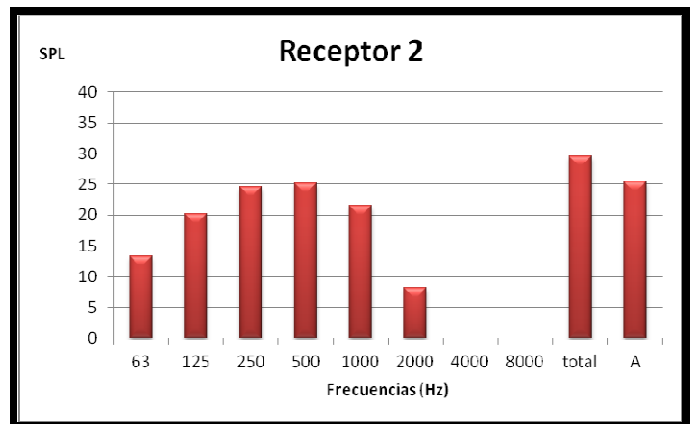


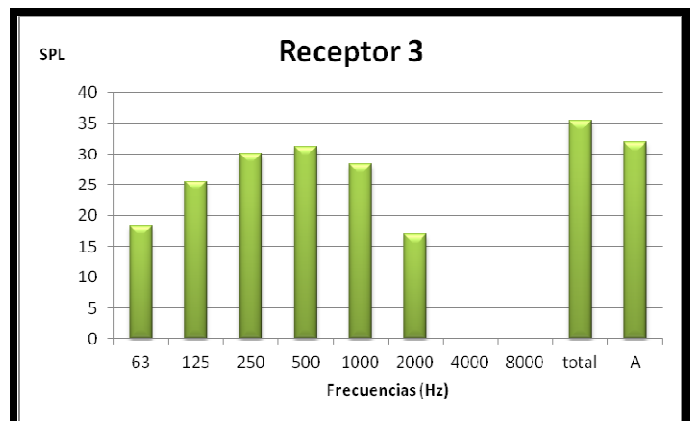
Imagen 7. Resultados del grid para el caso N°4.



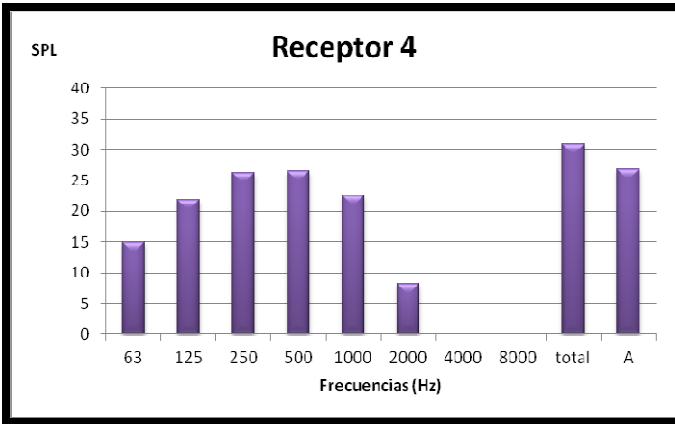
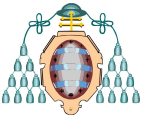
Gráfica 13. Presión acústica para el receptor 1 en el caso N°4.



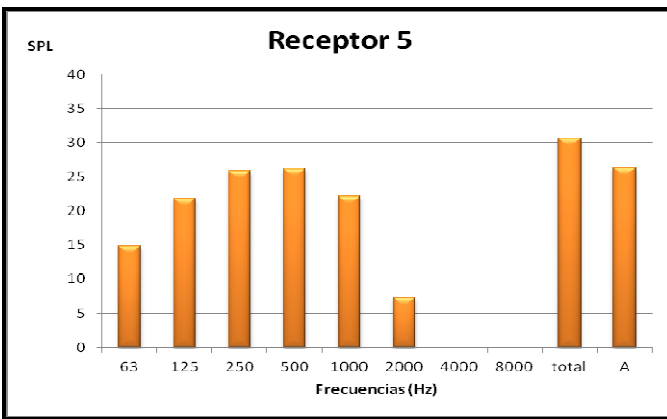
Gráfica 14. Presión acústica para el receptor 2 en el caso N°4.



Gráfica 15. Presión acústica para el receptor 3 en el caso N°4.



Gráfica 16. Presión acústica para el receptor 4 en el caso N°4.



Gráfica 17. Presión acústica para el receptor 5 en el caso N°4.

En comparativa obtenemos:

G87					
	Recep.1	Recep.2	Recep.3	Recep.4	Recep.5
Total	35,4	29,5	35,5	30,1	30,6
A	31,9	25,4	31,9	26,8	26,3

Tabla 18. Resultados con el G87.

G90					
	Recep.1	Recep.2	Recep.3	Recep.4	Recep.5
Total	34,3	28,4	34,4	29,9	29,5
A	30,8	24,3	30,8	25,7	25,2

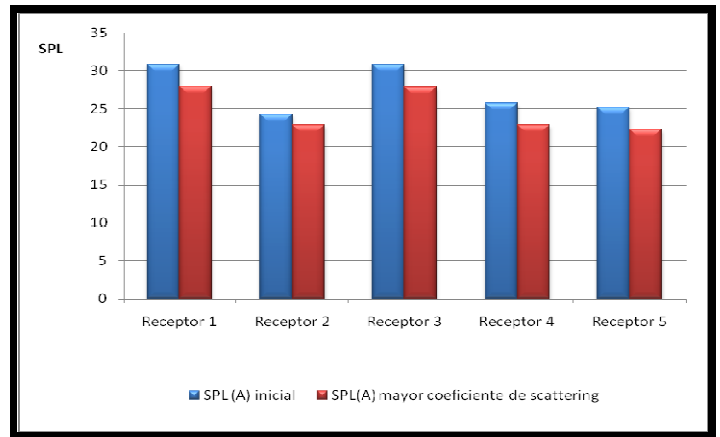
Tabla 19. Resultados con el G90.

Por tanto, la diferencia será:

Diferencia de los valores con el G87 y el G90					
	Recep.1	Recep.2	Recep.3	Recep.4	Recep.5
Total	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
A	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Tabla 20. Diferencia entre el G87 y el G90.

3) **CASO N° 5:** Se ha aumentado en la superficie del agua y de la arena el coeficiente de scattering para así simular un aumento en el oleaje y en la rugosidad. Los resultados obtenidos en comparación a los anteriores en los distintos receptores han sido:



Gráfica 18. Comparación de los resultados al variar la rugosidad y el oleaje.

A continuación se puede observar la imagen del mapa completo para todas las frecuencias sumadas en ponderación A.

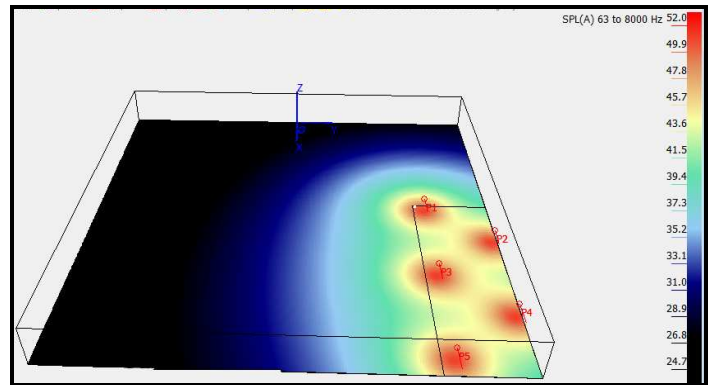
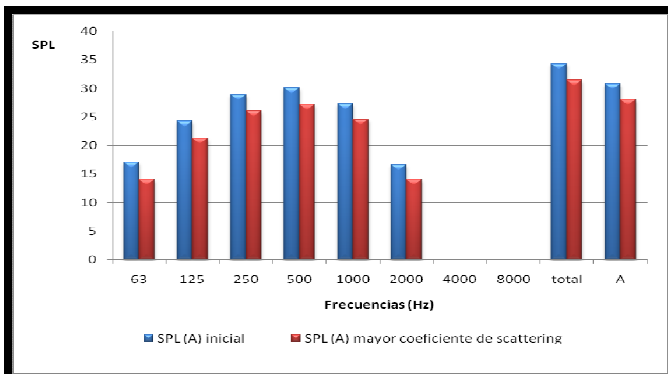
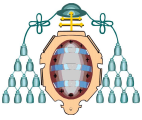


Imagen 8. Resultados del grid para el caso N°5.

Concretamente se ha estudiado para todas las bandas de octava la variación de los resultados en el receptor 1 ya que este receptor es uno de los que le llegan mayor presión sonora. Los resultados obtenidos han sido:



Gráfica 19. Comparación de los resultados en el receptor 1 al variar la rugosidad y el oleaje.

Por tanto, con los valores predefinidos del programa se obtienen unos valores más conservadores.

CONCLUSIONES

Al terminar el estudio se puede decir que las dos zonas en proyecto de ejecución cumplen perfectamente la normativa en lo que acústica se refiere ya que en ninguna de ellas se alcanzan los mayores máximos de presión sonora ni se llegan casi a conseguir.

Los resultados del cálculo numérico dan una buena concordancia con la simulación. Por tanto, para una geometría sencilla se puede utilizar el procedimiento descrito en la Norma ISO 9613-2/2007 y así abaratar los costes.

Por otro lado, se ha podido observar en el estudio de sensibilidad que al tener condiciones más "reales", es decir, mayor oleaje y rugosidad, el SPL disminuye. Por tanto, se ha tenido en cuenta la seguridad al ser un cálculo conservador.

NOMENCLATURA

SPL= nivel de presión sonora.

Lw= nivel de potencia sonora.

NR= nivel de ruido.

i= frecuencia nominal en tercios de octava (Hz).

Ws= velocidades en el buje.

Adiv= Atenuación por divergencia.

Aaire= Atenuación por absorción aérea.

Asuelo= Atenuación por absorción del suelo.

Asombra= Atenuación por refracción, por sombra.

Aveg= Atenuación por vegetación.

Abarr= Atenuación por barreras.

α = factor para la atenuación por aire.

hf= altura de la fuente.

hr= altura del receptor.

G= factor para la atenuación por suelo.

Afuente= Atenuación en la zona de la fuente.

Areceptor= Atenuación en la zona del receptor.

Lp num= SPL calculada numéricamente.

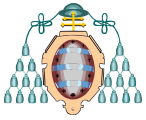
Lp sim= SPL calculada mediante simulación.

AGRADECIMIENTOS

La autora de este documento agradece al personal del Departamento de Energía de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, y en especial a las tutoras Sandra Velarde Suárez y Katia María Argüelles Díaz por su apoyo y conocimiento en el tema.

REFERENCIAS

- [1] Argüelles Díaz, K.M "Avances en centrales hidráulicas, eólicas y marinas", Universidad de Oviedo. Publicación interna del Máster Universitario en Ingeniería Energética, 2012.
- [2] Bolin, K.; Karasalo, I. "Wind Turbine Noise exposure in a complex terrain". Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, 2011.
- [3] Delaire, C.; Griffin, D.; Walsh, D. "Comparison of predicted wind farm noise emission and measured post-construction noise levels at the Portland wind energy project in Victoria, Australia". Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, 2011.
- [4] Guarnaccia, C.; Lenza, T.L.L.; Quartieri, J. "On the propagation model of wind farm noise". Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, 2011.
- [5] Larsson, C.; Öhlund, O. "Measurements of sound from wind turbines". Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, 2011.
- [6] Informe técnico del "Análisis de emisión de ruido para máquinas G8X", Gamesa Eólica, 2007.
- [7] "UNE-EN 61400-11:2003 Aerogeneradores parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico". AENOR.
- [8] Informe de la "Curva de Potencia y Emisión de Ruido G90 2MW 50/60Hz", Gamesa Eólica, 2010.
- [9] R.D 1367/2007, Boletín Oficial del Estado, 23 de octubre del 2007.
- [10] Harris, C.M; Manual de medidas acústicas y Control del Ruido (Tercera Edición), 2005.
- [11] Norma ISO 9613-2/2007. "Attenuation of sound during propagation outdoors".



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
EP de Ingeniería de Gijón
ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo

Máster Universitario en
Ingeniería Energética
Curso 2011-12



[12] Parrondo Gayo, J.L; Velarde Suárez, S.; Ballesteros Tajadura, R.; González Pérez, J.; Santolaria Morros, C.; "Acústica Ambiental". Servicio de Publicaciones. Universidad de Oviedo. Área de Mecánica de Fluidos, 2006.