

# **PREDICCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS ASOCIADOS A LOS PARQUES EÓLICOS**

**Tesis Doctoral**

**Elaborada por:  
Carlos Alberto Echeverri Londoño**

**Dirigida por:  
Alice Elizabeth González Fernández  
Ph. D. en Ingeniería Ambiental**



**UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA**

**Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería Ambiental**

**Montevideo, enero de 2017**





*“No se puede mejorar lo que no se conoce”*







---

## DEDICATORIA

*A mi esposa Nancy, a mis hijas Valentina y Mariana,  
y a la memoria de mi madre, Ligia Londoño*







Fuente: <http://www.donquijote.cc/>

*“En esto descubrieron treinta o cuarenta molinos de viento que hay en aquel campo, y así como Don Quijote los vio, dijo a su escudero: la ventura va guiando nuestras cosas mejor de lo que acertáramos a desear; porque ves allí, amigo Sancho Panza, donde se descubren treinta o poco más desaforados gigantes con quien pienso hacer batalla, ...”*

*Fragmento de El Ingenioso Hidalgo de Don Quijote de la Mancha  
Miguel de Cervantes Saavedra*





## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

**ALICE ELIZABETH GONZÁLEZ FERNÁNDEZ**

Profesora Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República

**NÉSTOR HINCAPIÉ VARGAS**

Rector  
Universidad de Medellín

**CARLOS EDUARDO LÓPEZ BERMEO**

Decano Facultad de Ingenierías  
Universidad de Medellín

**ALEJANDRO ACOSTA RAMÍREZ**

Magíster en Ingeniería Urbana de la Universidad de Medellín

**EDUARDO DE LA VALLE**

Capataz  
Hacienda La Magdalena (San José, Uruguay)

**MARCOS LISBOA**

Ingeniero Civil de la Universidad de la República







## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	9
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. LOS AEROGENERADORES COMO FUENTE DE EMISIÓN DE RUIDO	11
3.2. RUIDO AERODINÁMICO DE LOS AEROGENERADORES	16
3.2.1 Fuentes de ruido aerodinámico en los aerogeneradores	20
3.2.2 Modelos de predicción para los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores	27
3.2.2.1 Modelos clase I	29
3.2.2.2 Modelos clase II	31
3.3. PREDICCIÓN DEL RUIDO ASOCIADO A LOS AEROGENERADORES	61
3.3.1 Teoría general de la propagación del sonido	63
3.3.2 Teoría general de la propagación del sonido en campo libre	64
3.3.3 Consideraciones para estimar el ruido generado por los aerogeneradores	80
3.3.4. Aportes para estimar los factores de atenuación	85
4. METODOLOGÍA	117
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	117
4.1.1. Descripción de los aerogeneradores	120
4.2. MEDICIONES DE CAMPO	123
4.2.1. Niveles de potencia sonora	123
4.2.2. Medición de los niveles de presión sonora	128
4.2.3. Medición de las variables meteorológicas	132
4.2.4. Determinación de la estabilidad atmosférica	133
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	137
5.1. ESPECTRO	137
5.2. EVALUACIÓN DE LA NORMA ISO 9613 PARTE 2	141
5.3. ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA	145
5.4. FACTOR DE DIRECCIONALIDAD	155
5.5. ATENUACIÓN POR EFECTOS DEL SUELO	156
5.6. MODELO DE PROPAGACIÓN PROPUESTO	156



6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	171
6.1.	ESPECTRO	171
6.2.	NORMA ISO 9613 Parte 2	172
6.3.	ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA	173
6.4.	FACTOR DE DIRECCIONALIDAD	174
6.5.	ATENUACIÓN POR EFECTOS DEL SUELO	174
6.6.	MODELO DE PROPAGACIÓN PROPUESTO	175
6.7.	GENERALES	178
6.8.	POSIBLES FUENTES DE ERROR	179
7.	RECOMENDACIONES	185
8.	BIBLIOGRAFÍA	187





## LISTA DE TABLAS

	Página
1. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora emitido por un aerogenerador de 2 MW	15
2. Expresiones usadas para calcular la contribución de la atenuación del suelo $A_s$ , $A_r$ , y $A_m$ en bandas de octava	79
3. Patrón de direccionalidad de otros tipos de ruido provenientes de los aerogeneradores	92
4. Constantes para determinar la atenuación por efectos del suelo en el método de CONCAWE	98
5. Clasificación de los tipos de impedancia del suelo	102
6. Resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo para diferentes superficies del suelo	103
7. Valores del exponente en función de la estabilidad atmosférica y diversos terrenos	107
8. Categorías de estabilidad atmosférica de Parkin y Scholes	111
9. Constantes para determinar la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica en el método de CONCAWE	112
10. Nivel de potencia sonora de los aerogeneradores Vestas V90-2,0 MW	120
11. Especificaciones técnicas del sonómetro CEL-633C	130
12. Especificaciones técnicas del analizador multiparámetro EN 300 EXTECH Instruments	134
13. Categoría de estabilidad atmosférica en función del gradiente de temperatura en la atmósfera	135
14. Nivel de presión sonora residual del método de predicción de la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento	142
15. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y velocidad del viento	150
16. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y velocidad del viento	152
17. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y velocidad del viento	154
18. Ajustes y/o modificaciones propuestas al método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2	157
19. Clases de estabilidad atmosférica	160
20. Constantes para los coeficientes de propagación según la clase de estabilidad atmosférica	161
21. Nivel de presión sonora residual del método de predicción propuesto para todas las frecuencias, discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento	165



---

22.	Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtros de ponderación frecuencial Z y A	167
23.	Estadísticos del residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente	169





## LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Componentes de un aerogenerador	3
2. Parque eólico	4
3. Espectro de ruido de los aerogeneradores	12
4. Espectro de ruido de baja frecuencia de los aerogeneradores	13
5. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora emitido por un aerogenerador de 2 MW	14
6. Nivel de potencia sonora en la superficie de un aspa a una velocidad del viento de 7 m/s	17
7. Flujo viento abajo del rotor y la torre de un aerogenerador	18
8. Fotografía acústica que muestra el movimiento de las aspas de un aerogenerador y su emisión de ruido	19
9. Fuentes de ruido visualizadas en el plano del rotor en función de la frecuencia	20
10. Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro de ruido total calculado de acuerdo a los métodos de Grosveld para un aerogenerador de gran porte con rotor viento arriba	21
11. Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida	23
12. Desprendimiento de los vórtices en un borde de salida romo	23
13. Desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida	24
14. Separación <i>stall</i>	25
15. Formación del vórtice en la punta del aspa	25
16. Flujo turbulento incidente	26
17. Ángulos utilizados en los factores de direccionalidad	33
18. Factores de escala estimados en función de la frecuencia	46
19. Patrón de direccionalidad	71
20. Absorción de aire para una distancia de 500 m	74
21. Regiones para la determinación de la atenuación del suelo	78
22. Propagación del sonido con el viento en contra y a favor	84
23. Nivel de presión sonora en diferentes posiciones del observador	87
24. Nivel de presión sonora en diferentes posiciones del observador presentado como un diagrama de puntos	88
25. Factor de direccionalidad en diferentes posiciones del observador	89
26. Factores de direccionalidad medidos en diferentes posiciones del observador y varias velocidades del viento	90
27. Factor de direccionalidad del nivel de potencia sonora en el borde de salida para el caso de alta frecuencia	91
28. Propagación sobre terreno plano	99

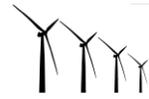


29.	Perfil de velocidad medio en función de la estabilidad	106
30.	Ubicación geográfica del parque eólico de Kentilux S.A.	118
31.	Distribución de los aerogeneradores en el parque eólico de Kentilux S.A.	119
32.	Dimensiones de los aerogeneradores Vestas V90	121
33.	Espectro de potencia sonora normalizado con filtro de ponderación A para aerogeneradores entre 1 y 2 MW de potencia nominal	122
34.	Sonómetro Casella CEL 63X	131
35.	Medición de los niveles de presión sonora	132
36.	Medición de la temperatura y la humedad relativa	135
37.	Nivel de presión sonora continuo equivalente ( $L_{Zeq}$ ) a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador y a diferentes velocidades del viento a 10 m de altura	138
38.	Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en banda ancha sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para diferentes velocidades del viento	146
39.	Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en banda ancha teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para diferentes velocidades del viento	148
40.	Niveles de presión sonora estimados por el modelo de predicción propuesto versus los niveles medidos	164
41.	Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtro de ponderación frecuencial Z	168
42.	Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtro de ponderación frecuencial A	168
43.	Espectro promedio de los niveles de presión sonora cerca de los aerogeneradores	182
44.	Ruido de fondo en un parque eólico en función de la velocidad del viento	183



## LISTA DE ANEXOS

	Página
A Mediciones de campo	197
B Coeficiente de absorción atmosférica (ISO 9613 Parte 1)	211
C Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia	217
D Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores	239
E Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores discriminado por estabilidad atmosférica	253
F Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia	283
G Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado (divergencia esférica y cilíndrica) discriminado por estabilidad y frecuencia	305
H Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio (promedio entre la propagación esférica y cilíndrica) discriminado por estabilidad y frecuencia	327
I Ruido estimado con el modelo propuesto discriminado por estabilidad y frecuencia	349
J Modelo de cálculo para las contribuciones relativas de los diferentes componentes de la emisión de energía acústica a la potencia sonora de un aerogenerador	369





## 1. INTRODUCCIÓN

El viento ha sido una de las fuentes de energía más utilizada por el hombre a través de su historia, aprovechándolo desde la navegación a vela, pasando por diferentes aplicaciones con los llamados molinos de viento, en labores como molienda de grano, bombeo de agua y sistemas de fuerza motriz, hasta llegar en la actualidad a la generación de energía eléctrica desde sistemas individuales de baja potencia, hasta sistemas de gran potencia conectados a las redes nacionales de energía [68].

Con la llegada del uso generalizado del petróleo se abandona el viento como fuente energética. El interés por los molinos persiste tan sólo en los periodos de guerra, cuando el suministro de crudo escasea. Pero con las diferentes crisis energéticas que se han presentado a lo largo de la historia, numerosos países han emprendido nuevamente el estudio y el aprovechamiento de la energía eólica, y construyen desde aparatos de uso doméstico hasta centrales de gran potencia [56].

La energía eólica es la energía que posee el viento y que puede ser aprovechada directamente o transformada a otros tipos de energía como, por ejemplo, la energía eléctrica. Hoy en día puede transformarse la energía eólica a electricidad con gran eficiencia, gracias a los aerogeneradores, también denominados turbinas de viento o turbinas eólicas [45].

Este siglo se caracteriza por el desarrollo de las energías verdes y renovables. La energía eólica es un recurso abundante, renovable y limpio, y es una alternativa clara al cambio climático al contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar fuentes de energía a base de combustibles fósiles. La energía eólica es un componente importante del complejo escenario del desarrollo sostenible.

La energía eólica, sin duda, se ha convertido en una de las fuentes de energía renovables que ha sufrido un aumento progresivo y constante durante las últimas décadas. Por el contrario, las fuentes tradicionales y más contaminantes de energía tales como petróleo, carbón o nuclear han disminuido en un ritmo más lento como consecuencia de la gran demanda de energía existente en todo el mundo [30].



El futuro de la utilización de la energía eólica es muy interesante debido a que tiene muchas ventajas, tales como la no contaminación del aire y la no necesidad de utilizar combustibles fósiles durante la operación. Sin embargo, con el rápido aumento del desarrollo de la energía eólica, también aumentan los problemas relativos a la aceptación pública de la misma. La energía eólica tiene varios detractores, principalmente debido a la molestia del ruido, el impacto visual, el paisaje y la afectación a la fauna [35].

El ruido de los aerogeneradores, especialmente el aerodinámico, puede ser molesto para las personas que viven en los alrededores y es uno de los mayores obstáculos para el uso generalizado de la energía eólica [66, 83 y 102]. Algunos de los residentes que viven a más de 1 km de los parques eólicos han afirmado que sufren alteraciones del sueño causadas por el ruido de los aerogeneradores [54]. Diferentes propiedades del sonido, que no están completamente descritas por el nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A, pueden estar relacionadas con la percepción y la molestia por el ruido de los aerogeneradores [35].

Un aerogenerador está formado por un conjunto de aspas (normalmente tres) conectadas a un rotor que, mediante un sistema de engranajes, está conectado a un generador eléctrico. Toda esta maquinaria (aerogenerador) se coloca en la cima de un mástil o torre donde hay más influencia del viento [45]. La energía del viento se convierte en energía mecánica al girar las aspas y el generador eléctrico convierte la energía mecánica en energía eléctrica [88]. En la figura 1 se presenta un esquema de los principales elementos que componen un aerogenerador.

Para conseguir un buen rendimiento es necesario que la ubicación de los aerogeneradores esté en una región con vientos la mayoría de días del año y con una velocidad media anual superior a los 3,6 m/s. La longitud de las aspas definirá el diámetro del área de barrido de las mismas y, para una velocidad del viento dada, cuanto mayor sea esta área, mayor será la potencia que puede producir un aerogenerador [45].

El montaje de los aerogeneradores está precedido por la evaluación del impacto ambiental de los mismos. El ruido generado por un aerogenerador es un elemento relevante que debe ser considerado y estudiado debido al creciente interés por las energías renovables. Por lo tanto, es importante



tener conocimiento con base científica de cómo el sonido de los aerogeneradores se produce, se propaga y se percibe con el fin de garantizar que este sonido no afecte negativamente a la salud de los residentes en la zona [85]. El impacto ambiental de estas estructuras en los alrededores ha sido investigado profundamente, especialmente desde el punto de vista acústico y paisajístico [36].

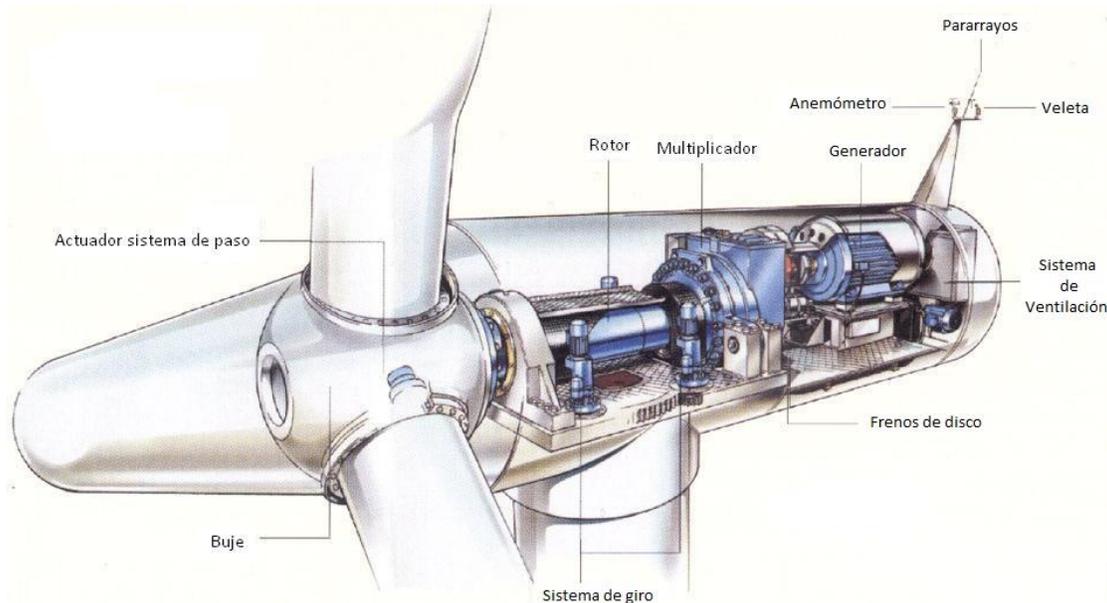


Figura 1. Componentes de un aerogenerador

Fuente: <http://www.renovables-energia.com>

Cuando la energía eólica se introdujo en varios países a finales de 1990, había muy poca información acerca de cómo los residentes en las áreas cercanas a los parques eólicos se verían afectados (ver figura 2). Había incertidumbre sobre qué tan cerca de una vivienda podría ser colocado un aerogenerador sin ocasionar molestias. Aunque los niveles de presión sonora asociados a los aerogeneradores son relativamente bajos y generalmente estos se encuentran ubicados en entornos rurales donde existen pocas fuentes de ruido, en algunos sitios esporádicamente se presentaron quejas por el ruido percibido. Sin embargo, hasta hace pocos años no había estudios sistemáticos sobre la relación entre los niveles de



presión sonora inducidos por el funcionamiento de aerogeneradores y las molestias que éstos podían producir [85].

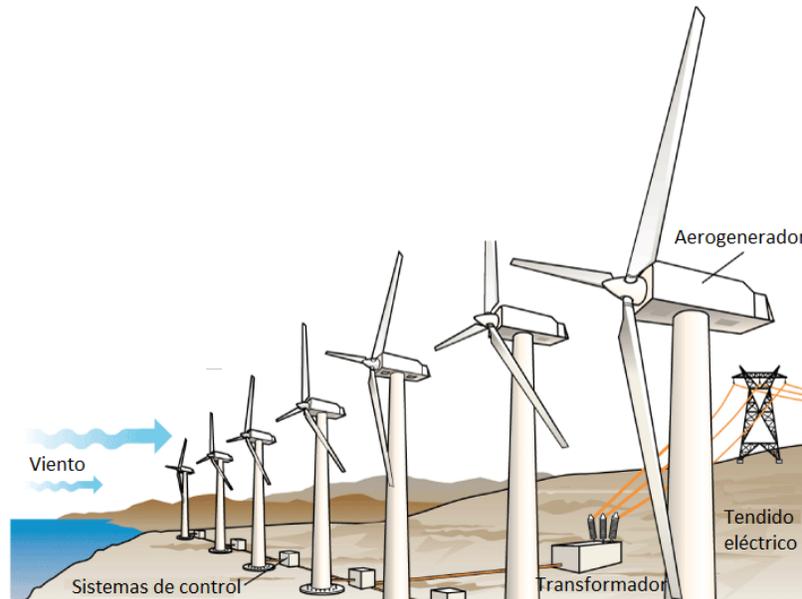
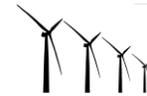


Figura 2. Parque eólico

Fuente: <http://www.kalipedia.com>

Se sabe que el ruido ambiental en el entorno doméstico (por ejemplo, del tráfico vehicular y las industrias cercanas) afecta el bienestar. La gente juzga el ruido proveniente de los aerogeneradores como más molesto que el ruido proveniente de los aviones, el tráfico vehicular o el ferroviario [78]. Sin embargo, mucha gente no logra identificar el ruido proveniente de los aerogeneradores.

El ruido de los aerogeneradores se produce principalmente por la turbulencia alrededor de las aspas del rotor cuando el viento interactúa con las mismas. El ruido tiene un carácter silbante y varía con la rotación de las aspas. Estos cambios son inevitables, dadas las diferencias en la velocidad del viento a diferentes alturas sobre el suelo y el hecho de que la torre en sí disminuye la velocidad del viento. Un sonido con amplitud modulada como éste es fácil de percibir y se ha encontrado que es más molesto que los sonidos con un carácter más uniforme [85]. La causa más común de las



quejas relacionadas con el ruido de los parques eólicos no se asocia con el ruido de baja frecuencia, sino con la modulación audible del ruido aerodinámico, especialmente por la noche [70].

Cuando la planificación de un parque eólico se vuelve un debate público, se analiza su operación desde una perspectiva diferente. Los aerogeneradores bien diseñados normalmente son silenciosos, y si se compara con el ruido del tráfico vehicular, de los trenes o del transporte aéreo, por nombrar sólo algunas actividades humanas, el ruido que producen es muy bajo [82]. Sin embargo, tiene un carácter repetitivo molesto, especialmente durante la noche, cuando es más perceptible.

En situaciones en las que se regula la emisión de ruido en ciertas zonas, es necesario estimar a través de modelos de predicción cuáles serán los niveles de presión sonora, ya que no es posible realizar mediciones directas antes de que el parque sea instalado. Estos cálculos requieren el conocimiento del nivel de potencia sonora de la fuente de ruido y de la propagación del sonido desde la fuente a los alrededores.

Hay dos tipos de enfoques que son necesarios para abordar los posibles problemas de ruido asociados con el funcionamiento de los aerogeneradores. En primer lugar, se debe continuar profundizando en la reducción del ruido generado y segundo, se necesita determinar el grado de impacto del ruido para poder plantear medidas de control o de mitigación que sean realistas y efectivas. Para ello, es necesario hacer un análisis del ruido generado y establecer un modelo adecuado para estimar su propagación.

Existen diferentes normas nacionales e internacionales con el objetivo de evaluar el ruido asociado a los parques eólicos. Sin embargo, fallan en la precisión con que pueden predecir los niveles de presión sonora [25].

Hay muchos modelos de propagación de ruido que se utilizan para calcular el ruido proveniente de los aerogeneradores. La mayoría de estos modelos han sido desarrollados para estimar el ruido proveniente de las industrias, con velocidades del viento inferiores a 5 m/s y condiciones favorables a su propagación [84]. Hasta ahora hay muy pocos modelos que se puedan aplicar para la propagación del sonido proveniente de los aerogeneradores y la mayoría de ellos arrojan resultados poco precisos.



La norma ISO 9613 Parte 2 especifica un método de ingeniería para el cálculo de la atenuación del sonido durante su propagación al aire libre a fin de predecir los niveles de presión sonora a cierta distancia de una variedad de fuentes [44]. Emplear el método de esta norma supone asumir que el sonido del aerogenerador puede considerarse como una fuente puntual y que la inmisión sonora en cualquier receptor se puede predecir con razonable exactitud bajo condiciones favorables a su propagación [22].

La mayoría de las personas dan demasiadas cosas por sentado. Se supone que si algo aparece en una norma nacional o internacional debe estar en lo cierto, y si se les ha enseñado a hacer algo de una manera particular, entonces ésa es la manera correcta de hacerlo. Pocas personas están dispuestas a oponerse a un método por el temor de hacer el ridículo en público al atreverse a sugerir que los expertos internacionales pueden estar equivocados [22].

Sin embargo, los resultados de los estudios de Van den Berg publicados a partir de 2006 demostraron que esta metodología de cálculo no sólo conduce a subestimaciones importantes en los niveles sonoros esperables en el receptor, sino que éstas se dan principalmente en condiciones de estabilidad atmosférica. Además, como los aerogeneradores cada vez son más altos, la diferencia entre los niveles de presión sonora real y estimado aumenta considerablemente [96].

La incertidumbre en la predicción de los niveles de presión sonora utilizando los modelos analíticos o empíricos actuales puede ser significativa y puede hacer que valiosos recursos eólicos puedan perderse o dejar de explotarse por evitar los posibles conflictos que se podrían presentar debido al ruido generado. Si fuera posible calcular con mayor precisión los niveles de presión sonora asociados a los parques eólicos, la aceptabilidad ambiental de los proyectos propuestos podría evaluarse en forma más adecuada en la etapa de planificación [6].

Desafortunadamente, el problema de la propagación del ruido con respecto a los parques eólicos no es sencillo. Las mediciones alrededor de parques eólicos en operación a menudo revelan fluctuaciones significativas en los niveles de presión sonora. Gran parte de esta variación puede atribuirse a la potencia sonora que emite el aerogenerador y que es una función de la velocidad del viento, pero también se sabe que algunas de las fluctuaciones



resultan de los cambios en las trayectorias de propagación del sonido desde los aerogeneradores al receptor [6].

Según van den Berg, para obtener una mejor predicción de la propagación del sonido se debe incluir la variación de la estabilidad atmosférica [94]. Por lo tanto, se necesita un modelo para la propagación del ruido, que incluya los efectos de la estabilidad atmosférica, con el fin de describir y predecir con mayor exactitud los niveles de presión sonora asociado a los aerogeneradores.

El objetivo principal de esta tesis es promover la comprensión de la generación y propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores, particularmente lo que concierne a la influencia de la estabilidad atmosférica. El objetivo final consiste en establecer un modelo de predicción aplicable a la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores a través de un procedimiento de cálculo que sea lo más preciso posible pero que sea fácil de implementar. El modelo de predicción que se propone es semi-empírico y se basa en el análisis de los fenómenos relacionados con la generación y propagación de los niveles sonoros y las mediciones de campo.







---

## **2. OBJETIVOS**

Proponer un modelo para predecir los niveles de presión sonora en campo libre a diferentes distancias y condiciones atmosféricas debido a la energía acústica emitida por aerogeneradores de eje horizontal.

Estudiar la influencia de los factores meteorológicos en la propagación del sonido emitido por los aerogeneradores para definir cómo se deben incluir en el cálculo de los niveles de inmisión de sonido.







### 3. MARCO TEÓRICO

El sonido emitido por los aerogeneradores se irradia por encima del suelo, por lo general entre 50 y 150 m de altura. A medida que el sonido se propaga, frecuentemente se reduce cuanto más lejos del aerogenerador se encuentra el receptor. El tipo de suelo y las condiciones meteorológicas influyen en la atenuación del sonido con la distancia. En el cálculo de los niveles de presión sonora en una vivienda, es común que se empleen diferentes velocidades del viento y alturas en los receptores. En Suecia, por ejemplo, se utiliza una velocidad del viento de 8 m/s a una altura de 10 metros, viento abajo del aerogenerador al receptor. En algunos países, los entes gubernamentales han recomendado determinados cálculos para estimar los niveles de presión sonora. Sin embargo, el algoritmo simplificado no tiene en cuenta las variaciones meteorológicas tales como la temperatura y la humedad relativa (que influyen en la absorción de aire), y en su lugar asume una situación media. Un perfil de velocidad del viento que no sea el perfil real podría conducir a una propagación inadecuada del sonido dando como resultado niveles de presión sonora mayores o menores que los esperados. El modelo simplificado utilizado hoy en día debe ser validado con las mediciones de los niveles de presión sonora y contrastado con otros modelos de cálculo [85].

#### 3.1. LOS AEROGENERADORES COMO FUENTE DE EMISIÓN DE RUIDO

El sonido de los aerogeneradores implica una serie de mecanismos de producción de sonido relacionados con diferentes interacciones entre las aspas del rotor y el aire [95]. La emisión de ruido de los aerogeneradores puede tener dos orígenes diferentes: el ruido mecánico y el ruido aerodinámico [56].

En funcionamiento normal, el ruido mecánico se produce por el movimiento de engranajes y accesorios, y por lo general es de baja frecuencia como se muestra en las figuras 3 y 4. La emisión de ruido se encuentra determinada no sólo por las características del aerogenerador sino también por su estado de mantenimiento [13].

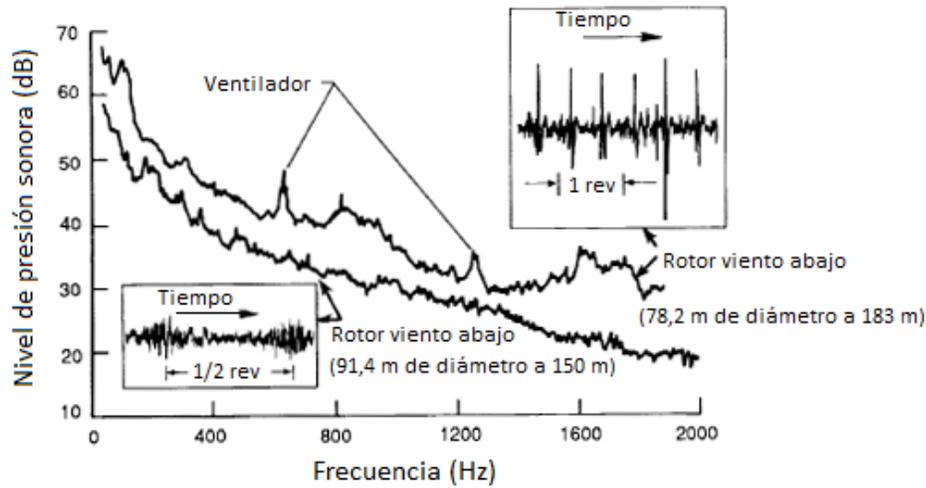


Figura 3. Espectro de ruido de los aerogeneradores

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

El ruido producido por las partes mecánicas tiene una energía dominante en el intervalo de frecuencias comprendido entre 100 y 1000 Hz y puede contener componentes tonales discretos. El ruido tonal es conocido por ser más molesto que el ruido sin tonos [55 y 86].

Los aerogeneradores de principios de los ochenta o antes emiten ruido de tipo mecánico, que puede ser oído en los alrededores del aerogenerador, o en el peor de los casos incluso a distancias de hasta 200 m. Sin embargo, un estudio realizado en 1995 sobre las prioridades en investigación y desarrollo de los fabricantes daneses de aerogeneradores mostraba que ninguno de los fabricantes consideraba ya que el ruido mecánico fuese un problema, por lo que no era necesario seguir investigando en esa área. La razón era que en un plazo de tres años los niveles de emisión de ruido se habían reducido a la mitad, debido a los avances tecnológicos [56]. El tamaño de los aerogeneradores ha aumentado y el ruido mecánico no aumenta tan significativamente con las dimensiones del aerogenerador como lo hace el ruido aerodinámico [86].

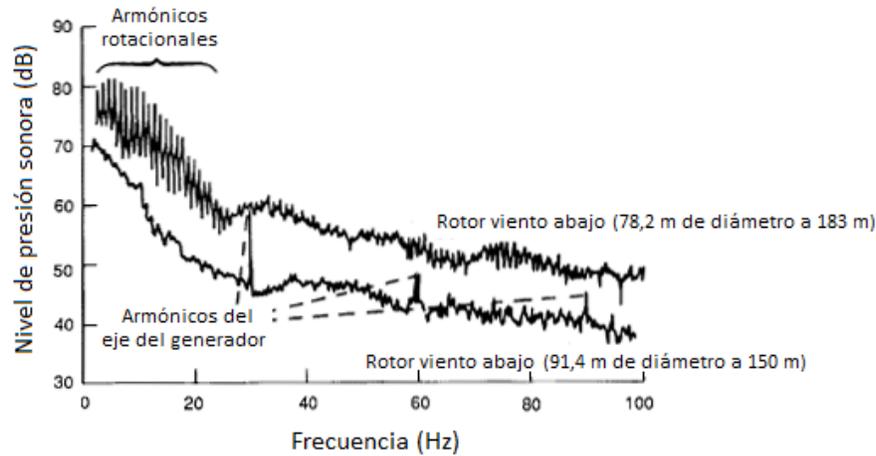


Figura 4. Espectro de ruido de baja frecuencia de los aerogeneradores

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

Se han obtenido logros cuantificables en cuanto a la reducción del ruido mecánico en los aerogeneradores de gran tamaño (> 1 MW). Entre ellos se destaca el aislamiento acústico de la góndola, y los sistemas de amortiguación de vibraciones y cargas [13].

Por otra parte, los picos espectrales que aparecen en la figura 3, asociados con las emisiones acústicas debido a la operación de los ventiladores para la refrigeración del generador, se pueden eliminar si el aerogenerador utiliza un radiador de aceite en lugar del ventilador. Los aerogeneradores pequeños (< 1 MW) no suelen tener este tipo de mejoras y probablemente tendrán una mayor contribución de esta fuente [13].

El ruido mecánico tiene un patrón de radiación que puede ser asimétrico y altamente direccional, lo que permite identificar claramente esto en un espectro. En resumen, el ruido mecánico es de carácter tonal y por lo general, se puede desprestigiar [13].



El ruido aerodinámico se produce cuando el viento interactúa con diferentes objetos. Las aspas del rotor producen un ligero sonido con carácter silbante que puede oírse a cierta distancia del aerogenerador a velocidades de viento relativamente bajas. La interacción entre las aspas y el viento produce ruido [56]. La mayor parte de la energía acústica se debe a la turbulencia de entrada.

El ruido aerodinámico de las aspas se considera generalmente que es la fuente de ruido dominante. Se trata de un ruido de banda ancha inherente a la operación del aerogenerador, que se produce en la interacción de la corriente de aire y el rotor [53, 66 y 86]. La parte principal del ruido aerodinámico se produce en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 y 2000 Hz [55].

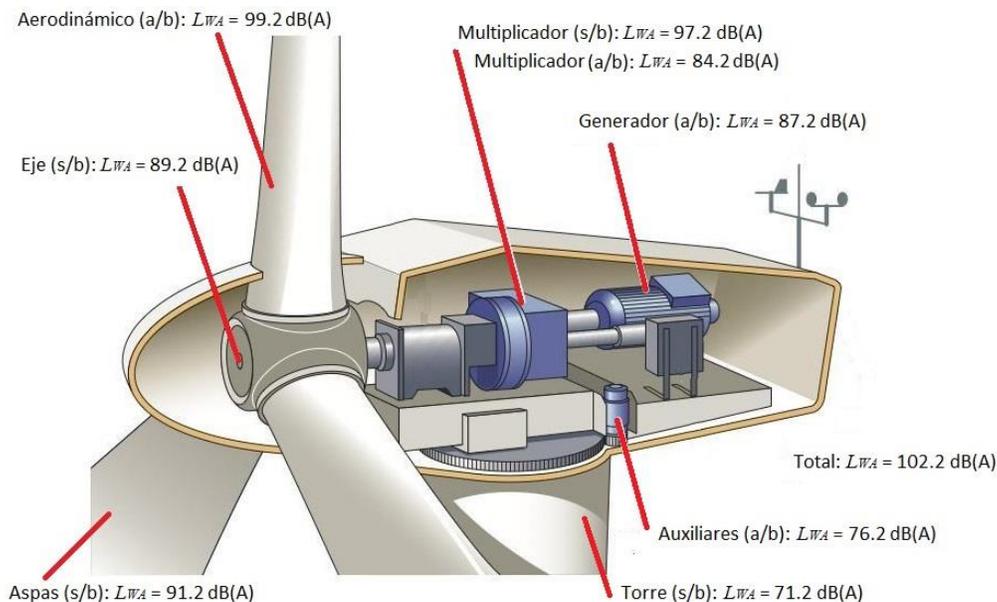


Figura 5. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora emitido por un aerogenerador de 2 MW.

Nota: a/b indica transmisión aérea;  
s/b indica transmisión por vía sólida a través de la estructura y luego por vía aérea

Fuente: Adaptado de Wagner, S. *et al.* Wind Turbine Noise. European Commission (DGXII), EUR 16823. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 1996.



En la figura 5 se esquematizan las fuentes de ruido de un aerogenerador de 2 MW y se indican los niveles de potencia sonora [expresados en dB(A)] de cada una de ellas, las que luego se resumen en la tabla 1 [98 y 103].

Tabla 1. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora emitido por un aerogenerador de 2 MW.

Fuente	$L_{WA}$ [dB(A)]	Vía de transmisión
Generador	87,2	a/b
Eje	89,2	a/b
Multiplicador	84,2	a/b
Multiplicador	97,2	s/b
Torre	71,2	s/b
Auxiliares	76,2	a/b
Aspas	91,2	s/b
Aspas (aerodinámico)	99,2	a/b
Emisión total	102,2	

Nota: a/b indica transmisión aérea;  
s/b indica transmisión por vía sólida a través de la estructura y luego por vía aérea

Fuente: Wagner, S., *et al.* Wind Turbine Noise. European Commission (DGXII), EUR 16823. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 1996.

De acuerdo con los estándares internacionales, los fabricantes de aerogeneradores suelen especificar niveles de potencia sonora teóricos de acuerdo a la norma IEC 61400 considerando que todo el sonido se origina en un punto central, aunque por supuesto, en la práctica se origina en toda la superficie del aerogenerador. El nivel de potencia sonora así calculado oscila alrededor de 100 dB(A). La cifra en sí misma carece de interés, pues no hay un solo punto donde se pueda experimentar ese nivel de potencia sonora. Sin embargo, resulta útil para predecir los niveles de presión sonora a diferentes distancias del aerogenerador [56].

Los avances tecnológicos han permitido incrementar la potencia de los aerogeneradores, emplear torres de mayor altura y aspas de mayor diámetro, mejorar el diseño de las aspas y reducir el ruido aerodinámico que se produce durante el funcionamiento de los aerogeneradores.



El nivel de potencia sonora emitido por los aerogeneradores aumenta con la potencia nominal y, por ende, con el tamaño de los mismos. Este aumento es menor para el grupo de aerogeneradores con una potencia nominal superior a 1 MW que para el grupo de aerogeneradores con una potencia nominal por debajo de 1 MW [17].

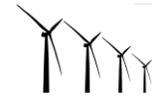
### **3.2. RUIDO AERODINÁMICO DE LOS AEROGENERADORES**

El ruido puede ser de carácter tonal o de banda ancha, y puede ser causado por varios mecanismos, tales como la turbulencia que se produce en la capa límite que se desarrolla sobre la superficie del aspa [98]. El ruido debido al flujo turbulento incidente y el ruido debido al borde de salida del perfil aerodinámico pueden contribuir globalmente en los niveles de potencia sonora de un aerogenerador [66].

Cuando el aerogenerador está en operación, el ruido que se emite debido a la interacción entre el flujo del aire y las aspas depende de las características de las mismas. Debido a que la superficie de las aspas suele tener un acabado liso, una buena parte del ruido se origina en el borde de salida de las mismas. En su generación inciden también las condiciones ambientales, como la velocidad del viento a la altura del eje, el gradiente de temperatura y la humedad del aire [96].

El flujo turbulento incidente es uno de los principales responsables de la generación de ruido. Gran parte del nivel de potencia sonora total se produce en el lado de presión. El nivel de presión sonora debido al flujo turbulento incidente se percibe por el oído humano [46].

El nivel de potencia sonora emitido desde el lado de succión se ve incrementado con la velocidad del viento debido al aumento de la turbulencia. El nivel de potencia sonora emitido desde el lado de presión es mayor en las proximidades del borde de salida. La separación del flujo en el lado de succión para velocidades de viento mayores genera otras fuentes de ruido adicionales, como lo son el desprendimiento de la capa límite turbulenta y de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida [46].



Una importante contribución al nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento incidente se debe a la rápida variación del flujo de aire cuando el aspa pasa por la torre (interacción aerodinámica entre la torre y las aspas). Cuando el aspa se desplaza a través de la región del flujo afectada por la presencia de la torre, el ángulo de ataque del flujo de aire incidente se modifica y se aparta del valor que optimiza el funcionamiento del aerogenerador [66 y 81].

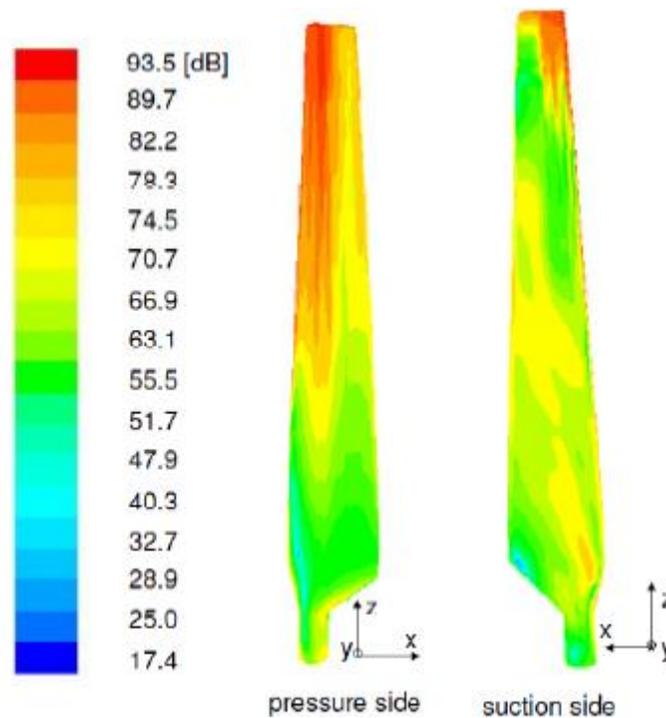


Figura 6. Nivel de potencia sonora en la superficie de un aspa a una velocidad del viento de 7 m/s

Fuente: Iwan, A. Wind turbine acoustic noise. Case Western Reserve University.

La modificación del ángulo de ataque afecta significativamente los niveles de potencia sonora que se generan, aun para ángulos de ataque pequeños ( $\alpha < 5^\circ$ ), y se incrementa a razón de aproximadamente 1,7 dB/grado hasta llegar a ser de unos 9,4 dB para  $\alpha = 5^\circ$  [96].



Las características del ruido de baja frecuencia difieren de las de frecuencias más altas sobre todo porque la longitud de las ondas de baja frecuencia es mayor que la longitud de las ondas de alta frecuencia. Entre las características del ruido de baja frecuencia cabe señalar [55]:

- Es menos atenuado por paredes y cerramientos.
- Puede hacer vibrar paredes y objetos.
- Puede enmascarar las frecuencias más altas.
- Puede atravesar grandes distancias sin pérdida importante de energía debido a la atenuación atmosférica y del suelo.
- Puede causar reacciones subjetivas en humanos.

En la figura 7 se presenta un esquema del flujo que se desarrolla alrededor de la torre de un aerogenerador, en tanto que en la figura 8 se muestra el movimiento de las aspas de un aerogenerador y su emisión de ruido.

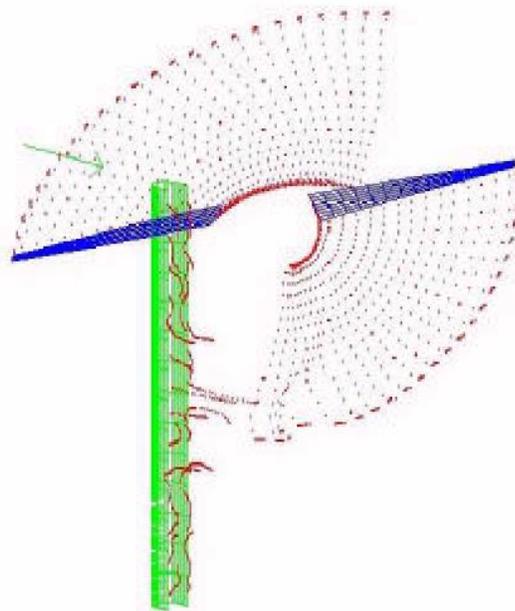


Figura 7. Flujo viento abajo del rotor y la torre de un aerogenerador

Fuente: Zhu, W. Modelling of noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2004.



La figura 9 muestra cómo se irradia la onda acústica en función de su frecuencia. Es desde esta región que las ondas acústicas son emitidas de forma predominante. A medida que la frecuencia aumenta, la zona de emisión se aleja del aerogenerador [53]. La frecuencia y la audibilidad de los tonos varían con la velocidad del viento [17].



Figura 8. Fotografía acústica que muestra el movimiento de las aspas de un aerogenerador y su emisión de ruido

Fuente: Oerlemans, S. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. En: Journal of sound and vibration, 2006.

Una de las características más complejas del ruido emitido por los aerogeneradores es que se trata de una señal de amplitud modulada, en la que la intensidad del sonido está variando en el transcurso de muy pocos segundos. Teóricamente estas fluctuaciones en el nivel de potencia sonora serían claramente perceptibles para el oído humano y, en la práctica, es lo



que se verifica: los habitantes próximos a un parque eólico coinciden en notar que, en la tarde o por la noche, el ruido de los aerogeneradores, especialmente de los de gran altura (> 80 metros), adquiere un carácter de golpeteo cuyo ritmo coincide con la frecuencia de paso de las aspas. El funcionamiento de otros aerogeneradores puede contribuir a amplificar aún más este efecto [1].

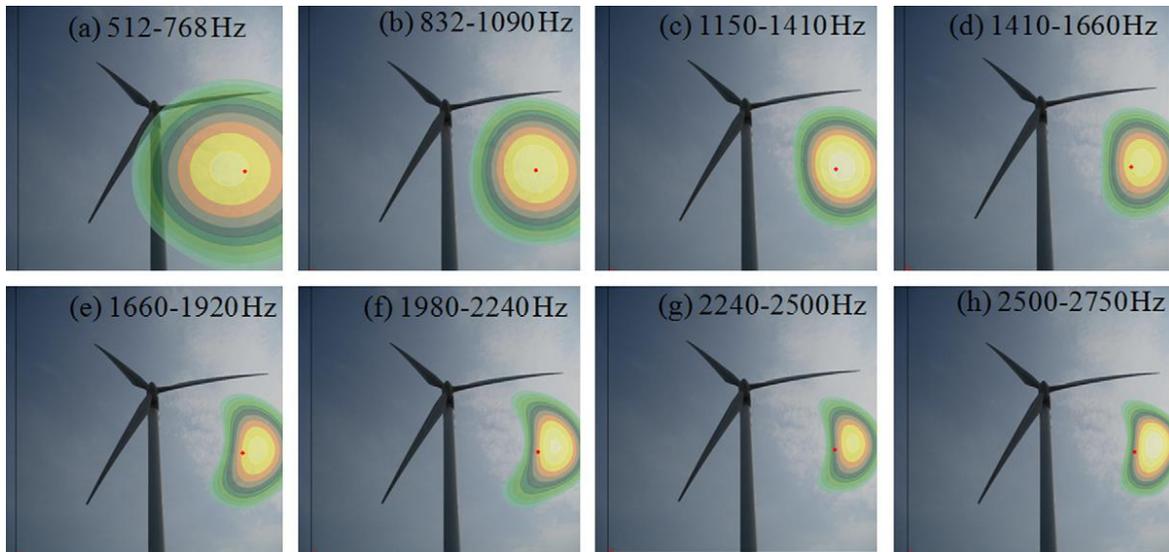


Figura 9. Fuentes de ruido visualizadas en el plano del rotor en función de la frecuencia

Fuente: Lee, G. *et al.* A case study of localization and identification of noise sources from a pitch and a stall regulated wind turbine. En: *Applied Acoustics*. Vol. 73. 2012.

**3.2.1. Fuentes de ruido aerodinámico en los aerogeneradores.** Las mediciones realizadas identifican tres fuentes principales de ruido en los aerogeneradores [63]:

- Flujo turbulento incidente: Producido por las fluctuaciones de carga aerodinámicas causadas por la turbulencia del flujo de aire incidente al interactuar con las aspas.
- Desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida: Producido por el flujo turbulento desarrollado en la capa límite sobre la superficie aerodinámica del aspa al desprenderse en el borde de salida.



- Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida: Producido por los vórtices causados por la turbulencia en el borde de salida.

Otra posible fuente de ruido es la formación de vórtices en la punta del aspa. Esta fuente no es tan significativa como las tres listadas anteriormente. Sin embargo, geometrías inusuales relacionadas con la punta del aspa, podrían resultar en un ruido mucho más importante [63].

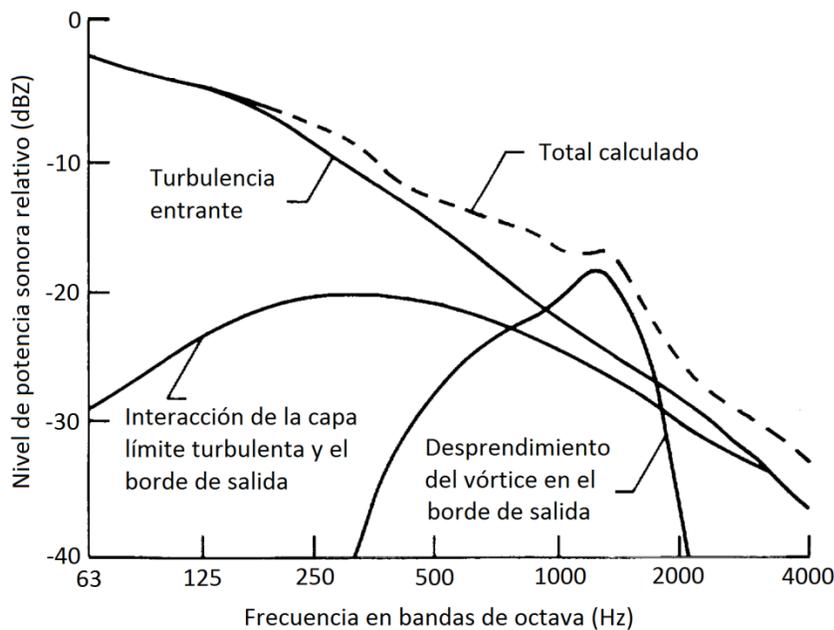


Figura 10. Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro de ruido total calculado de acuerdo a los métodos de Grosveld para un aerogenerador de gran porte con rotor viento arriba

Fuente: Grosveld, F. Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines. En: Journal of Propulsion and Power. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Virginia, 1985.

La figura 10 muestra las contribuciones relativas de las fuentes de ruido al espectro de ruido total calculado de acuerdo a los métodos de Grosveld para un aerogenerador de gran tamaño con rotor viento arriba. Los cálculos están en bandas de tercios de octava para cada una de las diferentes fuentes de ruido identificadas. También se incluye la suma de las contribuciones de



estos componentes [34 y 63]. Como se observa en esta figura, el flujo turbulento incidente contribuye al ruido total en todo el intervalo de frecuencias y domina el espectro a frecuencias por debajo de aproximadamente 500 Hz.

De acuerdo con las características del ruido emitido, un aerogenerador puede tener los siguientes tipos de emisión de ruido [13]:

- **Emisión de ruido debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida:** A números de Reynolds bajos ( $R_e < 10^5$ ), se desarrolla en gran medida una capa límite laminar sobre la superficie aerodinámica del aspa, cuya inestabilidad produce el desprendimiento de los vórtices y el ruido asociado al borde de salida [62].

Para los aerogeneradores esta fuente puede o no ser relevante dado que la velocidad de la punta del aspa es diferente de la velocidad de la base. Este hecho es aún más relevante para los aerogeneradores de gran tamaño (envergadura del aspa  $\approx 40$  m), donde el flujo laminar difícilmente podría existir en la punta, pero si puede ocurrir en la base [13].

Esta fuente de ruido depende de la forma y el espesor del perfil aerodinámico del borde de salida (ver figura 11). Si el espesor del borde de salida es mayor que el espesor de la capa límite en el borde posterior, esta fuente será dominante en el ruido global. Por esta razón, para reducir los niveles de potencia sonora, deben utilizarse los bordes de salida aerodinámicos en las aspas de los aerogeneradores [13].

- **Emisión de ruido debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:** Es el ruido producido por la interacción entre la capa límite turbulenta y el borde de salida del aspa [62 y 66]. El ruido es generado por la convección de la capa límite turbulenta adjunta al aspa dentro de la estela de la superficie aerodinámica y que en el borde de salida se desprende [63].

La capa límite turbulenta toma lugar con un número de Reynolds alto y/o ángulos moderados de ataque [13]. A números de Reynolds altos, la capa límite turbulenta se desarrolla sobre la mayor parte de la superficie



aerodinámica. El ruido se produce a medida que esa capa límite turbulenta se desprende desde el borde de salida [62].

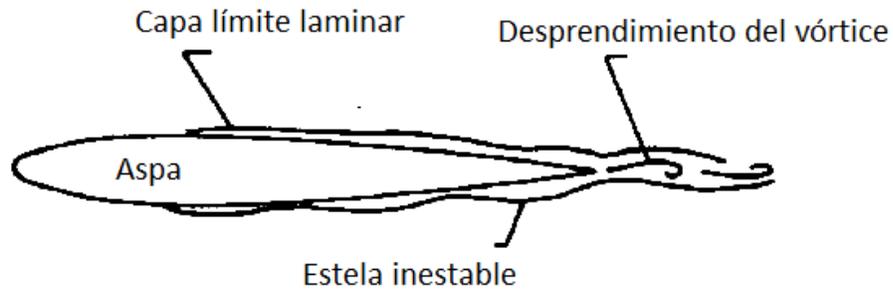


Figura 11. Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

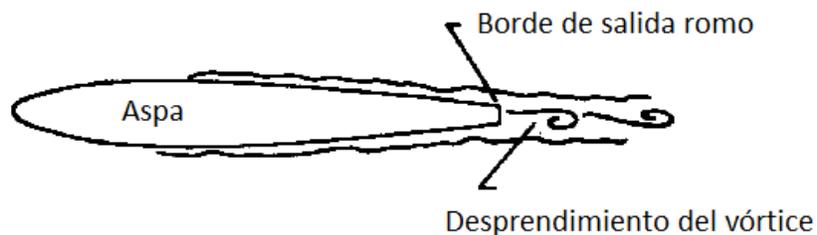


Figura 12. Desprendimiento de los vórtices en un borde de salida romo

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

La figura 13 muestra el desprendimiento de la capa límite en el borde de salida del perfil aerodinámico.

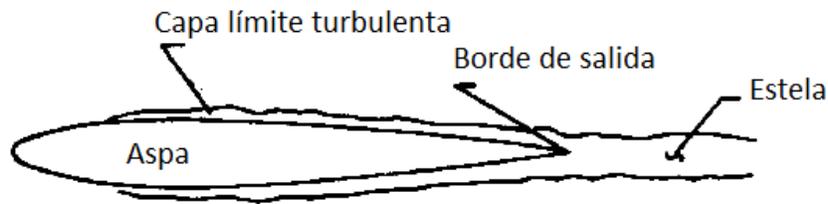


Figura 13. Desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

Cuando la superficie aerodinámica del asa se desplaza con ángulos de ataque altos ocurre la separación de la capa límite, y se le denomina nivel de potencia sonora debido a la separación *stall* (ver figura 14). En el lado de succión de la superficie aerodinámica, bajo el espesor de la capa límite, las estructuras turbulentas se forman y dominan la producción de ruido. En condiciones de parada, el ruido puede ser 10 dB más alto que el irradiado por la capa límite turbulenta a ángulos de ataque bajos [13].

- **Emisión de ruido debido a la formación del vórtice en la punta del asa:** Dado que no existen límites alrededor de la punta del asa, el flujo asume una característica tridimensional en esta región promovida por el diferencial de presión entre las superficies aerodinámicas. El flujo converge desde el lado de presión hacia el lado de succión formando un vórtice en la punta como se muestra en la figura 15. Este vórtice presenta un núcleo turbulento que reforzará la emisión de ruido al conducir esta turbulencia sobre el borde hacia la región de la estela del rotor [13].
- **Emisión de ruido debido al flujo turbulento incidente:** Aunque esta fuente de ruido es intrínsecamente aerodinámica, tiene que ver más con la capa límite atmosférica y las condiciones de flujo viento arriba, que con el propio perfil aerodinámico. Por esta razón se considera aparte de las otras fuentes aerodinámicas [13].

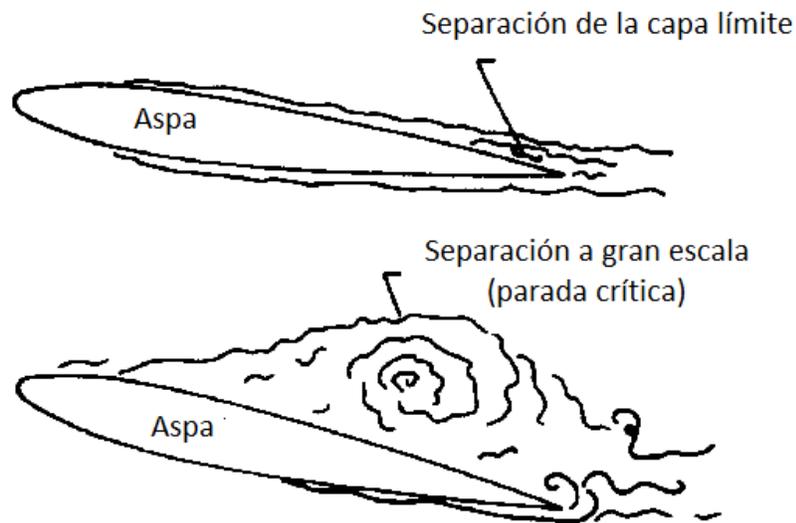


Figura 14. Separación *stall*

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

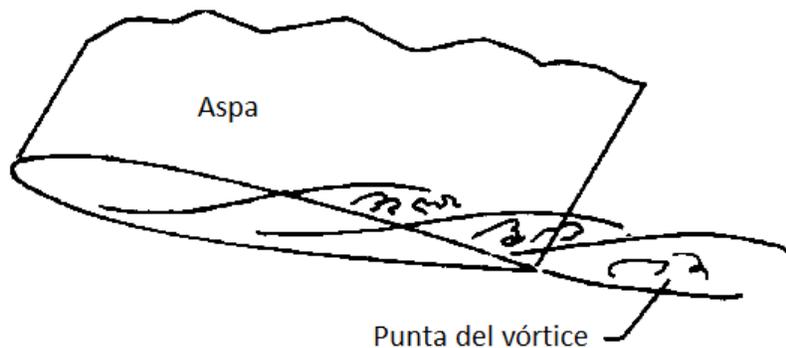


Figura 15. Formación del vórtice en la punta del aspa

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008



Este ruido, que depende de las condiciones atmosféricas, es causado por la interacción entre las aspas y el flujo turbulento del viento [66 y 93]. La turbulencia atmosférica provoca variaciones del ángulo de ataque en las aspas de los aerogeneradores y esto a su vez causa fluctuaciones en las fuerzas de sustentación y resistencia [63].

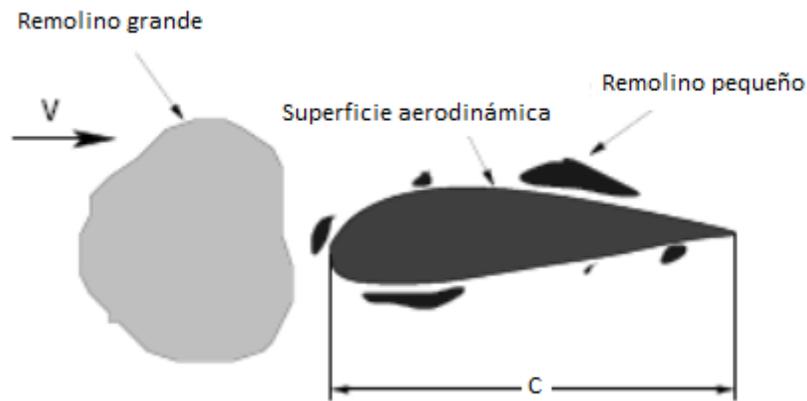


Figura 16. Flujo turbulento incidente

Fuente: Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008

Las escalas de longitud e intensidad de la turbulencia son una función del gradiente de temperatura (condiciones atmosféricas) y la interacción con la superficie del suelo (condiciones locales); y varían con la altura sobre el suelo [13 y 63]. La variación de la turbulencia induce la formación de vórtices. Cuando estos vórtices inciden sobre el borde de ataque de las aspas, interactúan de diferentes formas en función de su escala espacial relativa a las dimensiones del perfil. El ruido de baja o de alta frecuencia se produce a continuación, si el tamaño del vórtice es mayor o menor, respectivamente, que la longitud de la cuerda del segmento, lo que significa que la cuerda es un parámetro importante. El flujo de aire incidente da lugar a la producción del ruido de banda ancha [13].



Se trata de un ruido de banda ancha que comprende un amplio intervalo de frecuencias con un nivel máximo en aproximadamente 10 Hz y una pendiente de 3 a 6 dB por octava. La mayor emisión de ruido se produciría en las partes externas de las aspas, que tienen alta velocidad [93]. Se describe como un sonido con carácter silbante.

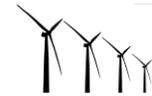
Varios efectos aumentan la amplitud de las fluctuaciones con carácter silbante y están relacionados con el aumento de la estabilidad atmosférica. Para que sea audible (reconocible), debe corresponder a un cambio en el nivel sonoro de por lo menos 1 dB. Según Van den Berg [95], se estima que, al pasar por la torre, el nivel de potencia sonora varía aproximadamente en  $2,1 \pm 0,4$  dB. Esto se debe, en parte, a la menor velocidad del viento que se tiene corriente arriba de la torre y que afecta el flujo en el extremo inferior del aspa.

La mayor cantidad de energía se encuentra en las frecuencias más bajas. Sin embargo, la mayor parte de este sonido no es perceptible para el oído humano. El sonido en las frecuencias más altas se absorbe mejor durante la propagación a través de la atmósfera [95].

**3.2.2. Modelos de predicción para los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores.** Se han identificado las principales fuentes de ruido en los aerogeneradores y propuesto modelos para su predicción. También se han realizado comparaciones de los datos estimados con los datos experimentales disponibles [63].

Algunos de los modelos para predecir los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores son relaciones sencillas entre los parámetros necesarios en cada modelo para estimar los diferentes tipos de ruido aerodinámico, mientras que otros requieren insumos más complicados para reproducir toda la gama de frecuencias [103].

Según Lawson (citado por Zidan), los diferentes modelos de predicción se pueden clasificar en tres clases. Los modelos clase I son predicciones que dan una estimación del nivel global en banda ancha como una función algebraica sencilla de los parámetros básicos del aerogenerador. Estos modelos requieren parámetros de entrada simples, como el diámetro del rotor, la potencia y la velocidad del viento. Los modelos clase II son



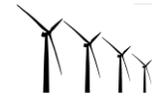
predicciones que consideran en forma separada los diversos mecanismos que causan el ruido en los aerogeneradores, utilizan parámetros de entrada seleccionados más complejos y proponen estimar el nivel de potencia sonora en bandas de frecuencias. Los modelos clase III son modelos más refinados cuyas predicciones utilizan información completa acerca de los mecanismos de ruido relacionados con una descripción detallada de la geometría del rotor y la aerodinámica. Hasta ahora, no hay modelos de este tipo que estén disponibles para su implementación [103].

Los modelos clase I son fáciles de implementar y la información necesaria es fácil de conseguir. Sin embargo, los niveles de potencia sonora estimados son valores en banda ancha y no permiten calcular la dependencia que éste tiene con la frecuencia. Los modelos clase II son mucho más difíciles de aplicar debido a la cantidad de información que se requiere. Sin embargo, son capaces de predecir el ruido producido en bandas de frecuencia [103].

Se puede elegir el modelo a utilizar en función de la descripción que se requiere hacer del ruido y de la cantidad de información disponible acerca del aerogenerador para suministrar al modelo. Los modelos de clase I se pueden utilizar como una estimación preliminar de ruido esperado de los aerogeneradores. Sin embargo, los estudios detallados requieren la aplicación de modelos de clase II.

Después de investigar los diferentes modelos de predicción para estimar el nivel de potencia sonora en banda ancha, Zidan concluye que existe una variación considerable entre los resultados de los primeros tres modelos simples que se incluyen para la clase I (ecuaciones 1, 2 y 3) y el resto de los modelos que requieren más parámetros de entrada para su aplicación. Los niveles de potencia sonora estimados con los modelos de clase I no difieren mucho de un modelo a otro [103].

Por otro lado, los resultados de los diferentes modelos de clase II muestran grandes desviaciones que pueden ser atribuidas a las diferentes fuentes de ruido consideradas y la estimación inexacta de algunos parámetros de entrada [103].



**3.2.2.1. Modelos clase I.** Los siguientes son algunos modelos para la predicción de ruido de un aerogenerador que pueden ser clasificados en la categoría de clase I.

- Modelo de Lawson: Ha sido desarrollado como un método muy simple para obtener el nivel de potencia sonora total con parámetros de entrada simples [103].

$$L_W = 10 \log(P_W) + 50 \quad (1)$$

En la cual:

$L_W$  = Nivel de potencia sonora, dB(A)

$P_W$  = Potencia nominal del aerogenerador, vatios

Sólo se requiere como parámetro entrada para este modelo la potencia nominal del aerogenerador.

- Modelo de Hau: Ecuación desarrollada para estimar el nivel de potencia sonora total [103].

$$L_W = 22 \log(\phi) + 72 \quad (2)$$

En la cual:

$L_W$  = Nivel de potencia sonora, dB(A)

$\phi$  = Diámetro del rotor, m

Este modelo requiere sólo el diámetro del rotor como parámetro de entrada.

- Modelo de Hagg (I): Desarrollado para estimar el nivel de potencia sonora total teniendo en cuenta un parámetro mucho más importante como lo es la velocidad en la punta del aspa del rotor [103].

$$L_W = 50 \log(U_{punta}) + 10 \log(\phi) - 4 \quad (3)$$

En la cual:

$L_W$  = Nivel de potencia sonora, dB(A)

$U_{punta}$  = Velocidad en la punta del aspa del rotor, m/s

$\phi$  = Diámetro del rotor, m



- Modelo de Van den Berg (I): Modelo desarrollado para estimar el nivel de potencia sonora total a partir de la velocidad de giro del aerogenerador [94 y 96].

$$L_W = 67,1 \log(N) + 15,4 \quad (4)$$

En la cual:

$L_W$  = Nivel de potencia sonora, dB(A)

$N$  = Velocidad rotacional del aerogenerador, rpm

- Modelo de Van den Berg (II): Es otro modelo para estimar el nivel de potencia sonora total pero esta vez en función de la velocidad del viento a la altura del eje [96].

$$L_W = -0,022 U_{eje}^4 + 0,78 U_{eje}^3 - 10 U_{eje}^2 + 55,3 U_{eje} - 12,3 \quad (5)$$

En la cual:

$L_W$  = Nivel de potencia sonora, dB(A)

$U_{eje}$  = Velocidad del viento a la altura del eje, m/s

La ecuación fue desarrollada para un aerogenerador Vestas 80 y es válida para una velocidad del viento a la altura del eje comprendida entre 4 y 12 m/s.

- Modelo de Hagg (II): Sirve para estimar el nivel de presión sonora total tomando en consideración muchos más parámetros de los aerogeneradores [103].

$$L_P = 63,3 \log(U_{punta}) + 11,5 \log\left(n_a \frac{A_a}{A_r}\right) + 2,5 \log(C_{fa}) + 20 \log\left(\frac{\phi}{r}\right) - 10 \log(\phi) - 27,5$$

En la cual:

$L_P$  = Nivel de presión sonora, dB(A)

$U_{punta}$  = Velocidad en la punta del aspa del rotor, m/s

$n_a$  = Número de aspas

$A_a$  = Área del aspa, m<sup>2</sup>

$A_r$  = Área del rotor, m<sup>2</sup>



- $C_{fa}$  = Coeficiente de fuerza axial  
 $\phi$  = Diámetro del rotor, m  
 $r$  = Distancia entre el eje del rotor y el receptor, m

Este modelo ha sido desarrollado para estimar el nivel de presión sonora total a cierta distancia del aerogenerador.

**3.2.2.2. Modelos clase II.** Los siguientes son algunos modelos para la predicción de los niveles de presión sonora debido a un aerogenerador que pueden ser clasificados en esta categoría. En estos modelos, el aspa del aerogenerador está dividida en segmentos, cada uno tiene su propia cuerda, longitud, ángulo de ataque, velocidad de flujo libre (no perturbado), y por lo tanto cada segmento tiene su propia contribución al nivel de presión sonora total emitido. Los niveles de presión sonora de los diferentes segmentos del aspa tienen que ser sumados para producir el nivel de presión sonora de cada una de las fuentes de ruido. El número de segmentos del aspa se decide de acuerdo con el cambio de la geometría a lo largo del tramo. El nivel de presión sonora estimado está en bandas de tercios de octava [103].

El nivel de presión sonora permite calcular el nivel de potencia sonora utilizando la ecuación 7 o en su defecto, estimando el nivel de presión sonora lo más cerca posible del eje del aerogenerador [103].

$$L_W = L_p + 10 \log(r^2) + C \quad (7)$$

En la cual:

- $L_W$  = Nivel de potencia sonora en bandas de tercios de octava, dB  
 $r$  = Distancia entre el eje del rotor y el receptor, m  
 $C$  = Factor de corrección, dB

$C$  es la suma de algunos factores de corrección que dependen de las características de la fuente, la direccionalidad del sonido, el efecto de la distancia, la absorción del aire y del suelo, efectos meteorológicos, la atenuación de las zonas circundantes, barreras acústicas, además de la reflexión. Suponiendo algunos valores para estos factores,  $C$  se toma igual a 11 dB [103].

Modelos como el de Brooks, Pope y Marcolini [13]; y el de Lawson [103] requieren de una buena cantidad de datos de entrada, que además de ser



muy específicos, son de difícil consecución. Por otro lado, modelos como el de Grosveld [34] requieren de menos datos de entrada y algunos de ellos son un poco más fáciles de conseguir.

El modelo semi-empírico desarrollado por Brooks, Pope y Marcolini para estimar el ruido producido por los aerogeneradores se basa en la interacción entre el perfil aerodinámico del aspa y la turbulencia inducida por sí mismo. Los autores establecieron los procedimientos de cálculo para cinco fuentes de ruido después de realizar varios experimentos en un túnel de viento con un perfil aerodinámico NACA0012 [13].

- **Ecuaciones generales.** Para todas las fuentes de ruido consideradas, las siguientes ecuaciones son el resultado de escalar y/o de normalizar algunos parámetros con el fin de que coincida con los modelos desarrollados a partir de los datos experimentales. Las ecuaciones estiman los valores del nivel de presión sonora en bandas de tercios de octava [13].

Los parámetros,  $\overline{D}_h$  y  $\overline{D}_l$ , que en repetidas ocasiones aparecerán en las ecuaciones, se llaman “factores de direccionalidad”. Estas funciones, pueden corregir los valores de los niveles de presión sonora de acuerdo con la posición del observador respecto a la fuente. Como resultado, en algunas direcciones el nivel de presión sonora tendrá un valor más bajo que en otras [13].

Una fuente sonora es direccional cuando emite con mayor amplitud en una dirección (dos direcciones en caso de una fuente dipolar, y así sucesivamente), en tanto en otras direcciones la emisión tiene un cierto grado de reducción [13]. Con el fin de determinar si la amplificación convectiva y la direccionalidad pueden explicar cuantitativamente la fuerte asimetría en la distribución de la fuente medida, se han propuesto ecuaciones para determinar el factor de direccionalidad para el ruido de alta frecuencia del borde de salida y las fuentes de ruido de baja frecuencia en los aerogeneradores [61 y 66]. Estas ecuaciones son función de los ángulos de direccionalidad y el número de Mach.

Este concepto lo introducen Brooks, Pope y Marcolini con el ejemplo de un observador estacionario y un aspa en movimiento, tal como se muestra en la figura 17, donde el aspa es la fuente de ruido a ser considerada [13,



61 y 102]. Además, se presenta un sistema de coordenadas local con  $\theta$  y  $\phi$ , siendo los ángulos de direccionalidad mientras  $r$  es la distancia entre el aspa y la posición del observador [13]. Por lo tanto, el factor de direccionalidad del sonido puede ser normalizado por el ruido de borde de salida emitido en la posición  $\theta = 90^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$  [102].

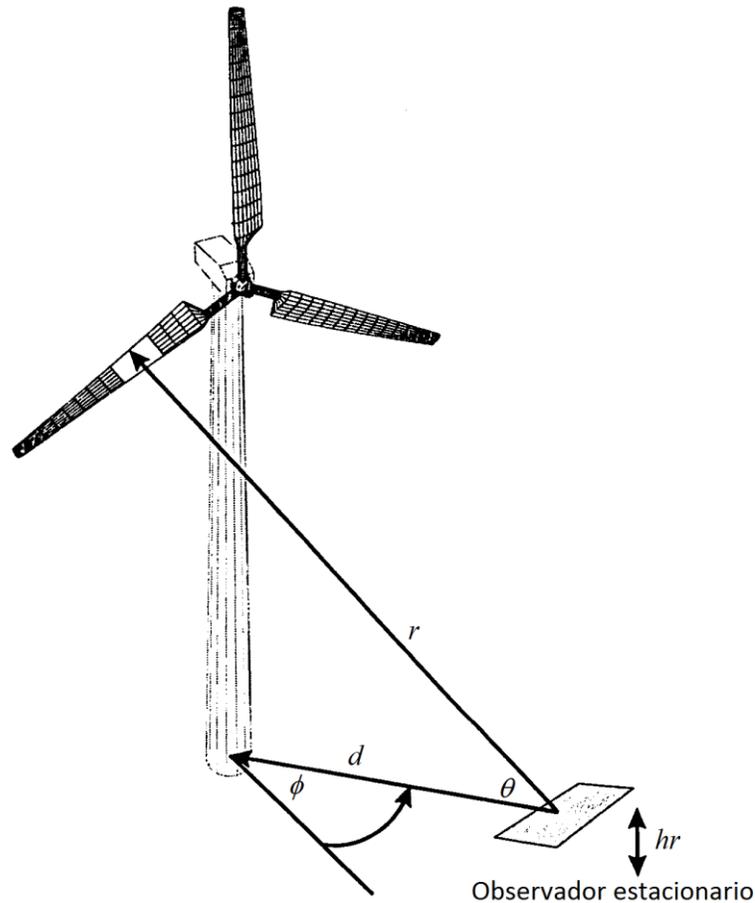


Figura 17. Ángulos utilizados en los factores de direccionalidad

Fuente: Risø National Laboratory. Implementation and verification of an aeroacoustic noise prediction model for wind turbines. Roskilde, 1996.

Para altas frecuencias, el factor de direccionalidad del sonido se expresa como [13, 61 y 102]:



$$\overline{D}_h(\theta, \phi) = \frac{2 \sin^2(\theta/2) \sin^2(\phi)}{(1+M \cos \theta)[1+(M-M_c) \cos \theta]^2} \quad (8)$$

En la cual  $M$  es el número de Mach de la superficie de sustentación en movimiento,  $M_c$  ( $M_c = 0,8M$ ) es el número de Mach convectivo basado en el flujo junto al borde de salida y  $\theta$  y  $\phi$  son ángulos de direccionalidad como se muestra en la figura 17.

El factor de direccionalidad del sonido para las bajas frecuencias es [13 y 66]:

$$\overline{D}_l(\theta, \phi) = \frac{\sin^2(\theta/2) \sin^2 \phi}{(1+M \cos \theta)^4} \quad (9)$$

El efecto inmediato de esta normalización es el hecho de que un observador situado a lo largo del eje  $z$  experimentará niveles de presión sonora más altos debido a  $D = 1$ . Por otro lado, si el observador se coloca en el plano  $xy$ , el factor de direccionalidad del sonido se convertirá en cero [13]. Nótese que para  $\theta = 90^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ , ambos factores de direccionalidad son iguales a 1 [61].

El número de Mach es la relación entre la velocidad del viento y la velocidad del sonido, y se puede hallar con la siguiente expresión [31]:

$$M = \frac{U}{c} \quad (10)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad del segmento del aspa, m/s

$c$  = Velocidad de propagación del sonido, m/s

La velocidad del segmento del aspa es una función de la velocidad angular de las aspas ( $\omega$ ) y está dada por:

$$U = \omega r = \left(\frac{2\pi\omega}{60}\right)r \quad (11)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad del segmento del aspa, m/s

$\omega$  = Velocidad angular de las aspas, rpm



La velocidad de propagación del sonido depende de la densidad (temperatura y presión) y se puede hallar a través de la siguiente ecuación [7]:

$$C = 20,05\sqrt{T} \quad (12)$$

En la cual:

$T$  = Temperatura ambiente, K

El número de Reynolds se calcula como:

$$Re_c = \frac{U c \rho_{aire}}{\mu_{aire}} \quad (13)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad del segmento del aspa, m/s

$c$  = Longitud de la cuerda del aspa, m

$\rho_{aire}$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

$\mu_{aire}$  = Viscosidad del aire, kg/m·s

La densidad del aire, en función de la temperatura y la presión, también se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\rho_{aire} = \frac{1,293}{1+0,00367 t} \left( \frac{P}{101325} \right) \quad (14)$$

En la cual:

$P$  = Presión atmosférica, Pa

$t$  = Temperatura, °C

La viscosidad del aire, en función de la temperatura, se puede estimar con la ecuación de Sutherland [13]:

$$\mu_{aire} = 1,458 \times 10^{-6} \frac{T^{3/2}}{T+114} \quad (15)$$

En la cual:

$T$  = Temperatura, K



Por otro lado, el número de Strouhal se utiliza para describir los mecanismos de flujo oscilantes para cada fuente de ruido. El número de Strouhal se define como [13]:

$$S_t' = \frac{f \delta_p}{U} \quad (16)$$

En la cual:

$f$  = Frecuencia, Hz

$\delta_p$  = Espesor de la capa límite en el lado de presión del aspa, m

$U$  = Velocidad del segmento del aspa, m/s

Todas las fuentes de ruido que se presentan a continuación, excepto la del nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta del aspa, dependen de la forma en que la capa límite se desarrolla en la proximidad del borde de salida. Por esta razón, es importante calcular con precisión los parámetros integrales de la capa límite de acuerdo con la geometría del perfil aerodinámico y las condiciones que presenta el flujo a través del aspa, tales como la velocidad y el ángulo de ataque [13].

En un primer paso, el método utilizado calcula el espesor de la capa límite ( $\delta$ )<sup>1</sup> y el espesor de desplazamiento ( $\delta^*$ ) para un ángulo de ataque cero, y los normaliza por el valor del segmento de la cuerda [13].

En el segundo paso estos valores se utilizan para escalar los parámetros correspondientes al lado de succión y al lado de presión de la sección de perfil aerodinámico. Las ecuaciones de la capa límite son funciones exclusivamente del número de Reynolds ( $R_{e_c}$ ) y del ángulo de ataque ( $\alpha_*$ ). Por último, se imponen condiciones para que la capa límite se desprenda o no [13].

---

1. distancia de la superficie aerodinámica, donde la velocidad media alcanza 99% de la velocidad de la corriente de flujo potencial



La capa límite que no se ha desprendido consta de un flujo laminar o de una transición natural de flujo laminar a turbulento. En cualquier caso, se trata de números de Reynolds bajos. La condición de desprendimiento, sin embargo, consiste en forzar esta transición obligando a que el flujo se vuelva turbulento antes. También, puede ocurrir una condición de desprendimiento moderado y se refiere a una capa límite ligeramente desprendida [13].

Las siguientes ecuaciones se derivan de los datos experimentales obtenidos en pruebas realizadas en un túnel de viento con modelos de perfil aerodinámico NACA0012 con bordes de salida muy afilados [13].

Los parámetros integrales<sup>2</sup> de la capa límite se calculan de la siguiente manera [13]:

Para la capa límite no desprendida:

$$\frac{\delta_0}{c} = 10^{[1,6569 - 0,9045 (\log Re_c) + 0,0596 (\log Re_c)^2]} \quad (17)$$

Para la capa límite desprendida:

$$\frac{\delta_0^*}{c} = 10^{[3,0187 - 1,5397 (\log Re_c) + 0,1059 (\log Re_c)^2]} \quad (18)$$

$$\frac{\delta_0^*}{c} = 0,0601 Re_c^{-0,114} \quad Re_c \leq 0,3 \times 10^6 \quad (19)$$

$$\frac{\delta_0^*}{c} = 10^{[3,411 - 1,5397 (\log Re_c) + 0,1059 (\log Re_c)^2]} \quad Re_c > 0,3 \times 10^6 \quad (20)$$

En las cuales:

$Re_c$  = Número de Reynolds

$c$  = Longitud de la cuerda del aspa, m

Con estas ecuaciones, se pueden calcular los parámetros de la capa límite para ángulos de ataque diferentes de cero.

2. los subíndices cero indican ángulo de ataque cero



Para el lado de presión de la superficie aerodinámica para la capa límite no desprendida y desprendida:

$$\frac{\delta_p}{\delta_0} = 10^{[-0,04175 \alpha_* + 0,00106 \alpha_*^2]} \quad (21)$$

$$\frac{\delta_p^*}{\delta_0^*} = 10^{[-0,0432 \alpha_* + 0,00113 \alpha_*^2]} \quad (22)$$

Para el lado de succión de la superficie aerodinámica para la capa límite no desprendida:

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 10^{0,0679 \alpha_*} \quad 0^\circ \leq \alpha_* \leq 7,5^\circ \quad (23)$$

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 0,0162 \times 10^{0,3066 \alpha_*} \quad 7,5^\circ < \alpha_* \leq 12,5^\circ \quad (24)$$

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 52,42 \times 10^{0,0258 \alpha_*} \quad 12,5^\circ < \alpha_* \leq 25^\circ \quad (25)$$

Para el lado de succión de la superficie aerodinámica para la capa límite desprendida:

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 10^{0,0679 \alpha_*} \quad 0^\circ \leq \alpha_* \leq 5^\circ \quad (26)$$

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 0,381 \times 10^{0,1516 \alpha_*} \quad 5^\circ < \alpha_* \leq 12,5^\circ \quad (27)$$

$$\frac{\delta_s^*}{\delta_0^*} = 14,296 \times 10^{0,0258 \alpha_*} \quad 12,5^\circ < \alpha_* \leq 25^\circ \quad (28)$$

En las cuales:

$\alpha_*$  = Ángulo de ataque

Para la capa límite ligeramente desprendida, algunas variables se corrigen con los coeficientes apropiados (los valores de  $\delta_0$  y  $\delta^*$  deben ser multiplicados por 0,6 y el valor de  $\delta_p^*$  multiplicado por 1,48) [13].



El control de muchas de las variables independientes sólo se puede lograr en ensayos realizados en un túnel de viento.

- **Modelos propuestos.** Los siguientes son algunos de los modelos que se han desarrollado para predecir los niveles de presión sonora, con base a la contribución de cada una de las fuentes de emisión identificadas.

Estos modelos se derivan de los datos experimentales obtenidos en pruebas realizadas en un túnel de viento y se basa en ajustes numéricos entre las principales variables aerodinámicas y los niveles de presión sonora medidos.

Algunos de los parámetros, que presentan varias opciones para su cálculo a través de diferentes ecuaciones según el intervalo en el que se encuentre la variable asociada a él, son sólo ajustes numéricos y no corresponden a un fenómeno físico que pueda interpretarse directamente. Es importante resaltar que las variables asociadas a estos parámetros cambian de acuerdo al espesor de la capa límite para cada segmento del aspa debido a la longitud de la cuerda y al cambio de velocidad a lo largo de la longitud del aspa, lo cual hace que el número de Reynolds varíe en cada segmento.

Además, se puede observar que en estos modelos no se tienen en cuenta mecanismos de atenuación que han demostrado tener una influencia significativa en la propagación del sonido para estimar el nivel de presión sonora como lo son la absorción atmosférica y la absorción y/o reflexión del suelo.

Por último, en estos modelos el factor de direccionalidad se utiliza para calcular la amplitud (intensidad) del sonido y no para tener en cuenta la distribución desigual de la emisión de ruido.

- **Nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida.**

El nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida está dado por [13 y 103]:

$$L_{Pdvcllbs} = 10 \log \left( \frac{\delta_p M^5 L \overline{D_h}}{r^2} \right) + G_1(e) + G_2(d) + G_3(\alpha_*) \quad (29)$$



En la cual:

- $\delta_p$  = Espesor de la capa límite para el lado de presión, m
- $M$  = Número de Mach
- $L$  = Escala de longitud de la turbulencia, m
- $\overline{D_h}$  = Factor de direccionalidad del sonido para altas frecuencias
- $r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m
- $\alpha_*$  = Ángulo de ataque
- $G_1, G_2$  y  $G_3$  = Funciones de forma para el ajuste de los datos experimentales

El término más relevante en esta ecuación es el argumento del logaritmo dado que los otros términos son funciones de forma para el ajuste de los datos experimentales. Sin embargo, si se analiza el valor numérico que podría tomar el argumento del logaritmo, se observa que es inferior a la unidad (debido en gran parte al número de Mach) y, por lo tanto, el valor resultante del logaritmo de este término tiene un signo negativo.

La escala de longitud de turbulencia está dada por [13]:

$$L = 25z^{0,35}z_0^{-0,063} \quad (30)$$

En la cual:

- $L$  = Escala de longitud de turbulencia, m
- $z$  = Altura de interés, m
- $z_0$  = Rugosidad de la superficie, m

Para Zidan,  $L$  es la longitud del segmento del aspa y no la escala de longitud de la turbulencia [103].

Los términos  $G_1, G_2$  y  $G_3$  son funciones de forma para el ajuste de los datos experimentales y vienen dadas por:

$$G_1(e) = 39,8 \log(e) - 11,12 \quad e \leq 0,5974 \quad (31)$$

$$G_1(e) = 98,409 \log(e) + 2,0 \quad 0,5974 < e \leq 0,8545 \quad (32)$$

$$G_1(e) = -5,076 + \sqrt{2,484 - 506,25[\log(e)]^2} \quad 0,8545 < e \leq 1,17 \quad (33)$$

$$G_1(e) = -98,409 \log(e) + 2,0 \quad 1,17 < e \leq 1,674 \quad (34)$$



$$G_1(e) = -39,8 \log(e) - 11,12 \quad 1,674 < e \quad (35)$$

En las cuales:

$$e = \frac{S_t'}{S_t'_{pico}} \quad (36)$$

El número de Strouhal pico se halla a través de:

$$S_t'_{pico} = S_t'_1 \quad (37)$$

En la cual:

$$S_t'_1 = 0,18 \quad R_{ec} \leq 1,3 \times 10^5 \quad (38)$$

$$S_t'_1 = 0,001756 R_{ec}^{0,3931} \quad 1,3 \times 10^5 < R_{ec} \leq 4,0 \times 10^5 \quad (39)$$

$$S_t'_1 = 0,28 \quad 4,0 \times 10^5 < R_{ec} \quad (40)$$

$$G_2(d) = 77,852 \log(d) + 15,328 \quad d \leq 0,3237 \quad (41)$$

$$G_2(d) = 65,188 \log(d) + 9,125 \quad 0,3237 < d \leq 0,5689 \quad (42)$$

$$G_2(d) = -114,052 [\log(d)]^2 \quad 0,5689 < d \leq 1,7579 \quad (43)$$

$$G_2(d) = -65,188 \log(d) + 9,125 \quad 1,7579 < d \leq 3,0889 \quad (44)$$

$$G_2(d) = -77,852 \log(d) + 15,328 \quad 3,0889 < d \quad (45)$$

En las cuales:

$$d = \frac{R_{ec}}{(R_{ec})_0} \quad (46)$$



El número de Reynolds de referencia es:

$$(R_{ec})_0 = 10^{0,215\alpha_*+4,978} \quad \alpha_* \leq 3,0 \quad (47)$$

$$(R_{ec})_0 = 10^{0,120\alpha_*+5,263} \quad 3,0 < \alpha_* \quad (48)$$

$$G_3(\alpha_*) = 171,04 - 3,03\alpha_* \quad (49)$$

El nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida depende de la forma y el espesor del perfil aerodinámico del borde de salida. Sólo en los casos de bordes de salida romos o de gran espesor, esta fuente puede dominar el ruido total [95]. Para bordes de salida romos o de gran espesor en las aspas de los aerogeneradores, el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida está dado por [13 y 103]:

$$L_{Pdvcllbs} = 10 \log \left( \frac{M^{5,5} t L \overline{D_h}}{r^2} \right) + G_4 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*}, \psi \right) + G_5 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*}, \psi, \frac{St'''}{St_{peak}'''} \right) \quad (50)$$

En la cual:

- $M$  = Número de Mach
- $t$  = Espesor del borde de salida, m
- $L$  = Escala de longitud de la turbulencia, m
- $\overline{D_h}$  = Factor de direccionalidad del sonido para altas frecuencias
- $r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m
- $\psi$  = Ángulo sólido entre las superficies inclinadas viento arriba del borde de salida (ángulo del borde de salida)
- $St'''$  = Número de Strouhal
- $\delta_{avg}^*$  = Espesor de desplazamiento medio, m
- $G_4$  y  $G_5$  = Funciones de forma

Las definiciones del número de Strouhal en este caso son:

$$St''' = \frac{ft}{U} \quad (51)$$



$$St_{pico}''' = \frac{0,212 - 0,0045\psi}{1 + 0,235\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}\right)^{-1} - 0,0132\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}\right)^{-2}} \quad 0,2 \leq \frac{t}{\delta_{avg}^*} \quad (52)$$

$$St_{pico}''' = 0,1\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}\right) + 0,095 - 0,00243\psi \quad \frac{t}{\delta_{avg}^*} < 0,2 \quad (53)$$

El espesor del desplazamiento medio está dado por:

$$\delta_{avg}^* = \frac{\delta_p^* + \delta_s^*}{2} \quad (54)$$

Las funciones de forma  $G_4$  y  $G_5$  se obtienen a través de:

$$G_4\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}, \psi\right) = 17,5 \log\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}\right) + 157,5 - 1,114\psi \quad \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 5 \quad (55)$$

$$G_4\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}, \psi\right) = 169,7 - 1,114\psi \quad 5 < \frac{t}{\delta_{avg}^*} \quad (56)$$

$$G_5\left(\frac{t}{\delta_{avg}^*}, \psi, \frac{St'''}{St_{peak}'''}\right) = (G_5)_{\psi=0^\circ} + 0,0714\psi[(G_5)_{\psi=14^\circ} - (G_5)_{\psi=0^\circ}] \quad (57)$$

En la cual:

$$(G_5)_{\psi=14^\circ} = m\eta + k \quad \eta < \eta_0 \quad (58)$$

$$(G_5)_{\psi=14^\circ} = 2,5\sqrt{1 - (\eta/\mu)^2} - 2,5 \quad \eta_0 \leq \eta < 0 \quad (59)$$

$$(G_5)_{\psi=14^\circ} = \sqrt{1,5625 - 1194,99\eta^2} - 1,25 \quad 0 \leq \eta < 0,03616 \quad (60)$$

$$(G_5)_{\psi=14^\circ} = -155,543\eta + 4,375 \quad 0,03616 < \eta \quad (61)$$

Con el fin de calcular  $G_5$  se requieren las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \log\left(\frac{St'''}{St_{pico}'''}\right) \quad (62)$$



$$\mu = 0,1221 \quad \frac{t}{\delta_{avg}^*} < 0,25 \quad (63)$$

$$\mu = -0,2175 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) + 0,1755 \quad 0,25 \leq \frac{t}{\delta_{avg}^*} < 0,62 \quad (64)$$

$$\mu = -0,0308 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) + 0,0596 \quad 0,62 \leq \frac{t}{\delta_{avg}^*} < 1,15 \quad (65)$$

$$\mu = 0,0242 \quad 1,15 \leq \frac{t}{\delta_{avg}^*} \quad (66)$$

$$m = 0 \quad \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 0,02 \quad (67)$$

$$m = 68,724 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) - 1,35 \quad 0,02 < \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 0,5 \quad (68)$$

$$m = 308,475 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) - 121,23 \quad 0,5 < \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 0,62 \quad (69)$$

$$m = 224,811 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) - 69,35 \quad 0,62 < \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 1,15 \quad (70)$$

$$m = 1583,28 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) - 1631,59 \quad 1,15 < \frac{t}{\delta_{avg}^*} \leq 1,2 \quad (71)$$

$$m = 268,344 \quad 1,2 \leq \frac{t}{\delta_{avg}^*} \quad (72)$$

$$\eta_0 = -\sqrt{\frac{m^2 \mu^4}{6,25 + m^2 \mu^2}} \quad (73)$$

$$k = 2,5 \sqrt{1 - \left( \frac{\eta_0}{\mu} \right)^2} - 2,5 - m \eta_0 \quad (74)$$

Para calcular  $(G_5)_{\psi=0^\circ}$ , se deben utilizar de nuevo las ecuaciones 58 a 61 haciendo la siguiente corrección:

$$\left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right)' = 6,724 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right)^2 - 4,019 \left( \frac{t}{\delta_{avg}^*} \right) + 1,107 \quad (75)$$



El modelo de Grosveld para estimar el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices en el borde de salida es el siguiente [34 y 63]:

$$L_{Pdvcllbs} = 10 \log \left( \frac{n_a U_r^{5,3} t l \sin^2(\theta/2) \sin^2 \phi}{(1+M \cos \theta)^3 [1+(M-M_c) \cos \theta]^2 r^2} \right) + K_c \quad (76)$$

En la cual:

$n_a$  = Número de aspas

$U_r$  = Velocidad resultante en el segmento del aspa, m/s

$t$  = Espesor del borde de salida, m

$l$  = Longitud del segmento del aspa, m

$\theta$  = Ángulo formado entre la línea en un punto del aspa y el receptor, y su proyección en el suelo en la dirección del viento, radianes

$\phi$  = Ángulo formado entre la línea de la base del mástil del aerogenerador y el receptor y su proyección en el eje paralelo a la dirección del viento, radianes

$M$  = Número de Mach

$M_c$  = Número Mach por convección, (0,8  $M$ )

$r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m

$K_c$  = Factor de escala, dB

El factor de escala  $K_c$  tiene su valor máximo cuando  $f$  alcanza la  $f_{pico}$  (ver figura 18). Los niveles de presión sonora se obtienen mediante la integración de las contribuciones de todas las fuentes acústicas sobre la longitud del aspa [34 y 63].

La frecuencia pico es:

$$f_{pico} = \frac{0,1 U_r}{t} \quad (77)$$

En la cual:

$f_{pico}$  = Frecuencia pico, Hz

$U_r$  = Velocidad resultante en el segmento del aspa, m/s

$t$  = Espesor del borde de salida, m



El número de Mach para la ecuación 76 es:

$$M = \frac{U_r}{c} \quad (78)$$

En la cual:

$U_r$  = Velocidad resultante en el segmento del aspa, m/s

$c$  = Velocidad de propagación del sonido, m/s

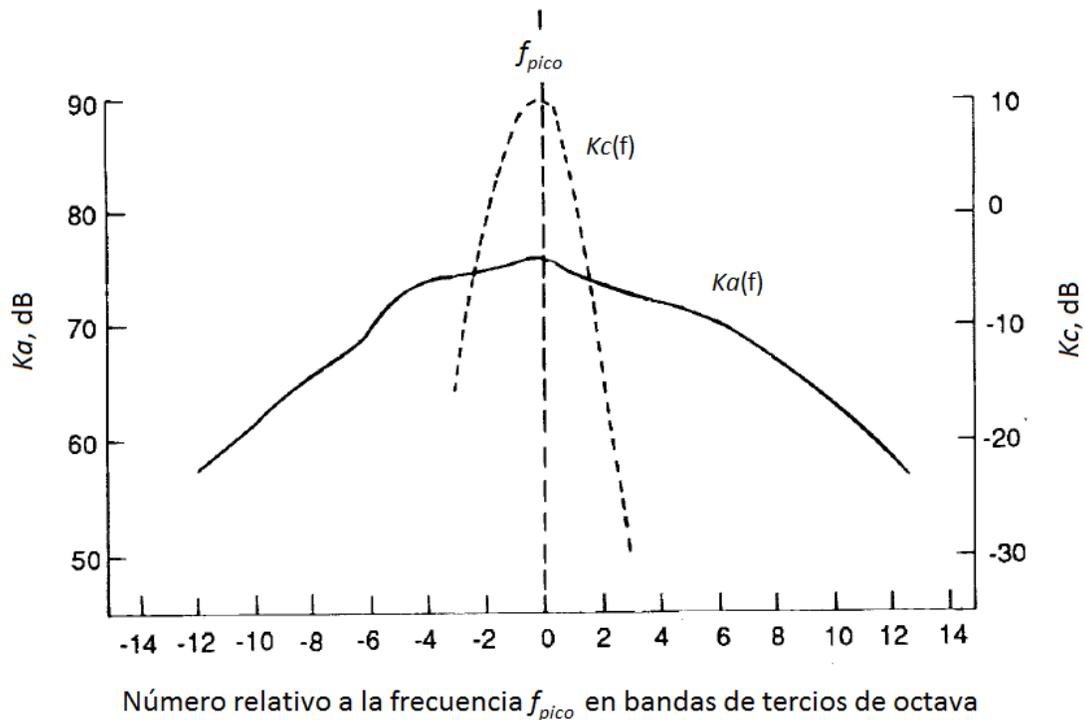


Figura 18. Factores de escala estimados en función de la frecuencia

Fuente: Nasa. Wind turbine acoustics. Hampton, 1990

- **Nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida.** Para este caso, Brooks, Pope y Marcolini determinaron una relación proporcional empírica entre el espesor del desplazamiento de la capa límite turbulenta y el ruido emitido por la superficie aerodinámica. Además, desarrollaron modelos para el lado de presión y el lado de succión de la superficie aerodinámica como



función del número de Reynolds y el ángulo de ataque, y según si la capa límite se ha desprendido o no [13].

Aunque el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y el nivel de presión sonora debido a la separación *stall* son dos fenómenos producidos físicamente en forma diferente, tienen leyes de escala idénticas. Por esta razón aparecen juntos en esta sección [13].

El nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y el nivel de presión sonora debido a la separación *stall* están dados por [13 y 103]:

$$L_{Pbsclt} = 10 \log(10^{L_{Pp}/10} + 10^{L_{Ps}/10} + 10^{L_{P\alpha}/10}) \quad (79)$$

En la cual  $L_{Pp}$  y  $L_{Ps}$  son las contribuciones en el lado de presión y en el lado de succión del nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y  $L_{P\alpha}$  la contribución del nivel de presión sonora debido a la separación *stall*, es decir, cuando el ángulo de ataque es alto.

$$L_{Pp} = 10 \log\left(\frac{\delta_p^* M^5 L \overline{D_h}}{r^2}\right) + A \left(\frac{St_p}{St_1}\right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (80)$$

$$L_{Ps} = 10 \log\left(\frac{\delta_s^* M^5 L \overline{D_h}}{r^2}\right) + A \left(\frac{St_s}{St_1}\right) + (K_1 - 3) \quad (81)$$

$$L_{P\alpha} = 10 \log\left(\frac{\delta_s^* M^5 L \overline{D_h}}{r^2}\right) + B \left(\frac{St_s}{St_2}\right) + K_2 \quad (82)$$

En las cuales:

- $\delta_p$  = Espesor de la capa límite para el lado de presión, m
- $\delta_s$  = Espesor de la capa límite para el lado de succión, m
- $M$  = Número de Mach
- $L$  = Escala de longitud de la turbulencia, m
- $A$  = Función de forma espectral
- $\overline{D_h}$  = Factor de direccionalidad del sonido para altas frecuencias
- $r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m
- $K_1$  y  $K_2$  = Funciones de amplitud



$\Delta K_1$  = Término correctivo para la contribución del lado de presión para ángulos de ataque diferentes a cero

Nuevamente, el término más relevante en estas ecuaciones es el argumento del logaritmo y el valor numérico que podría tomar sería inferior a la unidad (debido en gran parte al número de Mach) y, por lo tanto, el valor resultante del logaritmo de este término tendría un signo negativo. Hay un valor para el espesor de la capa límite para cada segmento del aspa debido a la variación de la longitud de la cuerda y el cambio de velocidad a lo largo de la longitud del aspa, y por lo tanto el número Reynolds varía en cada segmento.

Para Zidan [103],  $L$  es la longitud del segmento del aspa en las ecuaciones 80 a 82 y no la escala de longitud de la turbulencia, y en la ecuación 82, el factor de direccionalidad del sonido es  $\overline{D}_l$  en vez de  $\overline{D}_h$  como consideran Brooks *et al.*, citados por Conceição [13].

La separación dominará la generación de ruido si cualquiera de estas condiciones se da:

$$\alpha_* > 12,5^\circ \quad (83)$$

$$\alpha_* > \gamma_0 \quad (84)$$

Siendo:

$$\gamma_0 = 23,43M + 4,651 \quad (85)$$

Las ecuaciones 79 y 82 se utilizan cuando el ángulo de ataque es  $\leq 12,5^\circ$  o  $\leq \gamma_0$ . Para ángulos de ataque por encima de  $12,5^\circ$  o de  $\gamma_0$ , se debe utilizar la ecuación 88 en su lugar. Así, sólo  $L_{P\alpha}$  cuenta, y  $L_{Pp}$  y  $L_{Ps}$  serán iguales a  $-\infty$  [13 y 103].

$$L_{P\alpha} = 10 \log \left( \frac{\delta_s^* M^5 L \overline{D}_l}{r^2} \right) + A' \left( \frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \quad (86)$$

En la cual  $A'$  es la misma función que  $A$  (ver ecuaciones 96, 106, 107 y 108) pero con un valor de  $R_{e_c}$  igual a tres veces el valor real [13 y 103].



Las definiciones del número de Strouhal para este caso son:

$$St_p = \frac{f \delta_p^*}{U} \quad (87)$$

$$St_s = \frac{f \delta_s^*}{U} \quad (88)$$

$$St_1 = 0,02M^{-0,6} \quad (89)$$

$$St_2 = St_1 \quad \alpha_* < 1,33^\circ \quad (90)$$

$$St_2 = St_1 \times 10^{0,0054(\alpha_* - 1,33)^2} \quad 1,33^\circ \leq \alpha_* \leq 12,5^\circ \quad (91)$$

$$St_2 = 4,72 St_1 \quad 12,5^\circ < \alpha_* \quad (92)$$

$$\bar{St}_1 = \frac{St_1 + St_2}{2} \quad (93)$$

$A$  y  $B$  son funciones de forma espectral dada por:

$$A(a) = A_{min}(a) + A_R(a_0)[A_{max}(a) - A_{min}(a)] \quad (94)$$

$$B(b) = B_{min}(b) + B_R(b_0)[B_{max}(b) - B_{min}(b)] \quad (95)$$

Las curvas de interpolación en las que se basa  $A$  son:

$$A_{min}(a) = \sqrt{67,552 - 886,788a^2} - 8,219 \quad a < 0,204 \quad (96)$$

$$A_{min}(a) = -32,665a + 3,981 \quad 0,204 \leq a \leq 0,244$$

$$A_{min}(a) = -142,795a^3 + 103,656a^2 - 57,757a + 6,006 \quad 0,244 < a \quad (98)$$

$$A_{max}(a) = \sqrt{67,552 - 886,788a^2} - 8,219 \quad a < 0,13 \quad (99)$$

$$A_{max}(a) = -15,901a + 1,098 \quad 0,13 \leq a \leq 0,321$$

$$A_{max}(a) = -4,669a^3 + 3,491a^2 - 16,699a + 1,149 \quad 0,321 < a \quad (101)$$



En las cuales  $a$  es el valor absoluto de la relación logarítmica del número Strouhal ( $St = St_p$  o  $St_s$ ) y el número Strouhal pico ( $St_{pico} = St_1, \bar{St}_1$  o  $St_2$ ):

$$a = \left| \log \left( \frac{St}{St_{pico}} \right) \right| \quad (102)$$

El coeficiente de interpolación  $A_R$  está dado por:

$$A_R(a_0) = \frac{-20 - A_{min}(a_0)}{A_{max}(a_0) - A_{min}(a_0)} \quad (103)$$

Por último,  $a_0$  se determina así:

$$a_0(R_{ec}) = 0,57 \quad R_{ec} < 9,52 \times 10^4 \quad (104)$$

$$a_0(R_{ec}) = -9,57 \times 10^{-13} (R_{ec} - 8,57 \times 10^5)^2 + 1,13 \quad 9,52 \times 10^4 \leq R_{ec} \leq 8,57 \times 10^5$$

$$a_0(R_{ec}) = 1,13 \quad 8,57 \times 10^5 < R_{ec} \quad (106)$$

Las curvas de interpolación en las que se basa  $B$  son:

$$B_{min}(b) = \sqrt{16,888 - 886,788b^2} - 4,019 \quad b < 0,13 \quad (107)$$

$$B_{min}(b) = -83,607b + 8,138 \quad 0,13 \leq b \leq 0,145$$

$$B_{min}(b) = -817,810b^3 + 355,21b^2 - 135,024b + 10,619 \quad 0,145 < b$$

$$B_{max}(b) = \sqrt{16,888 - 886,788b^2} - 4,019 \quad b < 0,10 \quad (110)$$

$$B_{max}(b) = -31,330b + 1,854 \quad 0,10 \leq b \leq 0,187$$

$$B_{max}(b) = -80,541b^3 + 44,174b^2 - 39,381b + 2,344 \quad 0,187 < b \quad (112)$$



En la cual  $b$  es la relación del número Strouhal:

$$b = \left| \log \left( \frac{St_s}{St_2} \right) \right| \quad (113)$$

La interpolación del coeficiente  $B_R$  está dada por:

$$B_R(b_0) = \frac{-20 - B_{min}(b_0)}{B_{max}(b_0) - B_{min}(b_0)} \quad (114)$$

Por último,  $b_0$  se determina a través de:

$$b_0(R_{ec}) = 0,30 \quad R_{ec} < 9,52 \times 10^4 \quad (115)$$

$$b_0(R_{ec}) = -4,48 \times 10^{-13} (R_{ec} - 8,57 \times 10^5)^2 + 0,56 \quad 9,52 \times 10^4 \leq R_{ec} \leq 8,57 \times 10^5$$

$$b_0(R_{ec}) = 0,56 \quad 8,57 \times 10^5 < R_{ec} \quad (117)$$

$K_1$  es una función de amplitud y está dada por:

$$K_1 = -4,31 \log(R_{ec}) + 156,3 \quad R_{ec} < 2,47 \times 10^5 \quad (118)$$

$$K_1 = -9,0 \log(R_{ec}) + 181,6 \quad 2,47 \times 10^5 \leq R_{ec} \leq 8,0 \times 10^5 \quad (119)$$

$$K_1 = 128,5 \quad 8,0 \times 10^5 < R_{ec} \quad (120)$$

$\Delta K_1$  es un término correctivo para la contribución del lado de presión para ángulos de ataque diferentes a cero:

$$\Delta K_1 = \alpha_* \left[ 1,43 \log(R_{e_{\delta_p^*}}) - 5,29 \right] \quad R_{e_{\delta_p^*}} \leq 5000 \quad (121)$$

$$\Delta K_1 = 0 \quad R_{e_{\delta_p^*}} > 5000 \quad (122)$$



$K_2$  es otra función de amplitud, pero con respecto al nivel de presión sonora debida a la separación y está determinado por:

$$K_2 = K_1 - 1000 \quad \alpha_* < \gamma_0 - \gamma \quad (123)$$

$$K_2 = K_1 + \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^2 (\alpha_* - \gamma_0)^2 + \beta_0} \quad \gamma_0 - \gamma \leq \alpha_* \leq \gamma_0 + \gamma \quad (124)$$

$$K_2 = K_1 - 12 \quad \gamma_0 + \gamma < \alpha_* \quad (125)$$

En la cual:

$$\gamma = 27,094M + 3,31 \quad (126)$$

$$\gamma_0 = 23,43M + 4,651 \quad (127)$$

$$\beta = 72,65M + 10,74 \quad (128)$$

$$\beta_0 = -34,19M - 13,82 \quad (129)$$

Nuevamente, los niveles de presión sonora se obtienen mediante la integración de las contribuciones de todas las fuentes acústicas sobre la longitud del aspa.

El modelo de Grosveld para el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida para una sección de perfil aerodinámico es [34, 63 y 103]:

$$L_{Pbsclt} = 10 \log \left\{ \frac{\delta_s U^5 D(\theta) n_a}{r^2} \right\} + K_2(f) + C_2 \quad (130)$$

$$K_2(f) = 10 \log \left\{ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^4 \left[ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^{1,5} + 0,5 \right]^{-4} \right\} \quad (131)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad de flujo libre (no perturbado) en cada cuerda, m/s

$D(\theta)$  = Factor de direccionalidad, dB

$\delta_s$  = Espesor de la capa límite para el lado de succión, m

$n_a$  = Número de aspas



- $r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m
- $S_t$  = Número de Strouhal
- $S_{tmax}$  = Número de Strouhal máximo (igual a 0,1)
- $C_2$  = Constante del factor de escala (5,5 dB)

Llama la atención que el  $S_{tmax}$  sea igual a 0,1 dado que se pueden obtener valores más altos para el número de Strouhal. Grosveld [34], el cual fue tomado como referencia por Zidan [103] y el documento técnico de la Nasa elaborado por Hubbard y Shepherd [63], denomina a  $S_{tmax}$  como el número de Strouhal pico, el cual está asociado con el nivel de presión sonora debido al borde de salida. Él indica que aunque hay un valor diferente reportado en un documento técnico de la Boeing Engineering and Construction, adopta el valor reportado por Schlinker y Fink. Se trata de un valor para el número de Strouhal en el cual el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida alcanza su valor más alto.

El factor de direccionalidad para la ecuación 130 es:

$$D(\theta) = \frac{\sin^2(\theta/2)}{(1+M \cos \theta)[1+(M-M_c) \cos \theta]} \quad (132)$$

En la cual:

$\theta$  = Ángulo de incidencia de la onda sonora proyectado en el eje  $x$  (eje paralelo a la dirección del viento), radianes

$M$  = Número de Mach

$M_c$  = Número Mach por convección (0,8  $M$ )

El número de Mach del perfil aerodinámico es:

$$M = \frac{U}{c} \quad (133)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad de flujo libre (no perturbado) en cada cuerda, m/s

$C$  = Velocidad de propagación del sonido, m/s



El número de Strouhal para la ecuación 130 es:

$$St = \frac{f\delta_s}{U} \quad (134)$$

En la cual:

$f$  = Frecuencia, Hz

$\delta_s$  = Espesor de la capa límite para el lado de succión, m

$U$  = Velocidad de flujo libre (no perturbado) en cada cuerda, m/s

El espesor de la capa límite es:

$$\delta_s = \frac{0,37c}{Re^{0,2}} \quad (135)$$

En la cual:

$c$  = Longitud de la cuerda del aspa, m

$Re$  = Número de Reynolds

Los niveles de presión sonora se obtienen mediante la integración de las contribuciones de todas las fuentes acústicas sobre la longitud del aspa [63].

El modelo de Lawson para estimar el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida se basa en revisión del modelo de Brooks, Pope y Marcolini y los datos medidos [103]:

$$L_{pbsclt} = 10 \log \left( \frac{\delta_s M^5}{r^2} G_6(f) \right) + 128,5 \quad (136)$$

$$G_6(f) = \frac{4 \left( \frac{f}{f_{pico}} \right)^{2,5}}{\left[ 1 + \left( \frac{f}{f_{pico}} \right)^{2,5} \right]^2} \quad (137)$$

En las cuales:

$M$  = Número de Mach

$\delta_s$  = Espesor de la capa límite para el lado de succión, m

$r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m



$G_6$  = Función de forma  
 $f_{pico}$  = Frecuencia pico

La frecuencia pico se obtiene con la siguiente ecuación:

$$f_{pico} = \frac{0,02 U M^{-0,6}}{\delta} \quad (138)$$

En la cual:

$U$  = Velocidad de flujo libre (no perturbado) en cada cuerda, m/s

– **Nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta del aspa.**

El nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta del aspa está dado por [13]:

$$L_{Pfvpa} = 10 \log \left( \frac{M^2 M_{max}^3 h^2 \overline{D_h}}{r^2} \right) - 30,5 [\log(St'') + 0,3]^2 + 126 \quad (139)$$

En la cual:

$M$  = Número de Mach

$M_{max}$  = Número de Mach máximo del flujo dentro o alrededor de la región de flujo separado en el borde de salida

$h$  = Extensión de los vórtices en la punta del aspa, m

$\overline{D_h}$  = Direccionalidad del sonido para altas frecuencias

$r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m

$St''$  = Número de Strouhal

El número de Strouhal se define como:

$$St'' = \frac{fl}{U_{max}} \quad (140)$$

y

$$U_{max} = CM_{max} \quad (141)$$



Siendo  $M_{max}$  el número de Mach máximo del flujo dentro o alrededor de la región de flujo separado en el borde de salida y se define como:

$$\frac{M_{max}}{M} \approx (1 + 0,036\alpha_{punta}) \quad (142)$$

Para puntas redondeadas, la extensión de los vórtices en la punta del aspa,  $h$ , es:

$$\frac{h}{c} \approx 0,008\alpha_{punta} \quad (143)$$

Las dos últimas ecuaciones se utilizan para el caso de referencia de un aspa sin torsión en un flujo uniforme.

Para los diferentes casos, que suelen ser la regla y no la excepción, la formación del vórtice en la punta debe ser corregida de la siguiente manera:

$$\alpha'_{punta} = \left[ \left( \frac{\delta L' / \delta y}{(\delta L' / \delta y)_{ref}} \right)_{y \rightarrow punta} \right] \alpha_{punta} \quad (144)$$

Para las aspas de punta plana, la extensión de los vórtices en la punta del aspa está dada por:

$$\frac{h}{c} = 0,0230 + 0,0169\alpha'_{punta} \quad 0^\circ \leq \alpha'_{punta} \leq 2^\circ \quad (145)$$

$$\frac{h}{c} = 0,0378 + 0,0095\alpha'_{punta} \quad 2^\circ < \alpha'_{punta} \quad (146)$$

El término más relevante en esta ecuación es el argumento del logaritmo dado que los otros términos se emplean para hacer un ajuste a los datos experimentales. Sin embargo, si se analiza el valor numérico que podría tomar este término, se observa que sería inferior a la unidad (debido en gran parte al número de Mach) y, por lo tanto, el valor resultante del logaritmo de este término tendría un signo negativo.



- **Nivel de presión sonora debido al flujo turbulento incidente.** Se pueden encontrar diferentes modelos para predecir el nivel de presión sonora debido al flujo turbulento incidente en un aerogenerador, siendo uno de los más recientes, el modelo propuesto por Amiet y corregido por Lawson, y citado por Conceição y Zidan [13 y 103].

$$L_{Pfte} = 10 \log \left[ \overline{D}_h \rho_{aire}^2 C^2 L \frac{\Delta l}{r^2} M^3 I^2 \hat{k}^3 (1 + \hat{k}^2)^{-7/3} \right] + 10 \log \left( \frac{K_c}{1+K_c} \right) + 58,4$$

En la cual:

$\overline{D}_h$  = Factor de direccionalidad del sonido para altas frecuencias

$\rho_{aire}$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

$C$  = Velocidad de propagación del sonido, m/s

$L$  = Escala de longitud de la turbulencia, m

$\Delta l$  = Longitud del segmento del aspa, m

$M$  = Número de Mach

$I$  = Intensidad de la turbulencia, %

$r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m

$\hat{k}$  = Número de onda local normalizado

$K_c$  = Factor de corrección para frecuencias bajas

Se asume que la intensidad de la turbulencia es 1 % para una turbulencia baja, 5 % para una turbulencia media, y entre 10 % y 20 % para turbulencia alta [103].

El término más relevante en esta ecuación es el argumento del logaritmo dado que los otros términos se emplean para hacer un ajuste a los datos experimentales. Sin embargo, si se analiza el valor numérico que toma este término, se observa que es inferior a la unidad (debido en gran parte al número de Mach) y, por lo tanto, el valor resultante del logaritmo de este término tiene un signo negativo.

El factor de corrección para frecuencias bajas está dado por:

$$K_c = 10S^2 M \frac{\hat{k}^2}{\beta^2} \tag{148}$$



La función de esfuerzo cortante compresible está dada por:

$$S^2 = \left[ \frac{2\pi\hat{k}}{\beta^2} + \left(1 + 2,4 \frac{\hat{k}}{\beta^2}\right)^{-1} \right]^{-1} \quad (149)$$

En la cual:

$$\beta^2 = 1 - M^2 \quad (150)$$

El número de onda local normalizado que se calcula como:

$$\hat{k} = \frac{\pi f c}{U_{rel}} \quad (151)$$

En la cual:

$U_{rel}$  = Velocidad relativa, m/s

$f$  = Frecuencia, Hz

$c$  = Longitud de la cuerda del aspa, m

En el caso del nivel de presión sonora debido al flujo de entrada,  $M$  y  $C$  son propiedades de flujo relacionadas con el movimiento del aspa y no con el flujo del viento entrante.

La velocidad del viento en cada segmento del aspa está determinada por:

$$U_i = U_0 \left( \frac{Z_i}{Z_0} \right)^\gamma \quad (152)$$

En la cual  $U_0$  es la velocidad medida del viento a  $Z_0$ ,  $Z_i$  es la altura a la que  $U_i$  [m/s] se desconoce y  $\gamma$  es un exponente.  $U_i$  se utilizará para calcular la velocidad normal del aspa [13].

El exponente está dado por:

$$\gamma = 0,24 + 0,096 \log(z_0) + 0,016[\log(z_0)]^2 \quad (153)$$

En la cual:

$z_0$  = Rugosidad de la superficie, m



El modelo de Grosveld para estimar el nivel de presión sonora debido al flujo turbulento incidente es [34, 63 y 103]:

$$L_{pfte} = 10 \log \left( \frac{\sin^2 \theta \rho_{aire}^2 c R \sigma^2 U^4 n_a}{(r c)^2} \right) + K_a(f) + C_1 \quad (154)$$

En la cual:

- $\theta$  = Ángulo de incidencia de la onda sonora proyectado en el eje y (eje perpendicular a la dirección del viento), radianes
- $\rho_{aire}$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>
- $c$  = Longitud de la cuerda del aspa, m
- $R$  = Radio del rotor, m
- $\sigma$  = Desviación estándar de la velocidad del viento, m/s
- $U$  = Velocidad del aspa, m/s
- $n_a$  = Número de aspas
- $r$  = Distancia entre el segmento del aspa y el receptor, m
- $K_a$  = Factor de escala, dB
- $C_1$  = Factor de corrección, dB

La velocidad del aspa es [63]:

$$U = R\Omega \quad (155)$$

En la cual:

- $\Omega$  = Velocidad angular del rotor

De acuerdo al documento técnico de la Nasa escrito por Hubbard y Shepherd, la velocidad del aspa y la longitud de la cuerda del aspa se evalúan a 0,7 del radio [63]. En este caso la velocidad del aspa a 0,7 del radio sería:

$$U_{0,7} = 0,7R\Omega \quad (156)$$

En la deducción de la ecuación 154 se supone que la turbulencia es isotrópica y que la categoría de estabilidad atmosférica es neutra. Además, se considera que el rotor del aerogenerador es una fuente puntual dipolo, y que la longitud de onda del sonido radiado es mucho más corta que la distancia al receptor [34 y 63].



El aerogenerador se puede asemejar a una fuente puntual dipolo dado que se caracteriza por tener dos fuentes puntuales próximas, alineadas en la dirección perpendicular al rotor, que vibran con la misma amplitud y en la misma frecuencia, pero de fase opuesta (un desfase de 180°), es decir que mientras una perturba el aire que la circunda aumentando su presión, la otra lo hace disminuyéndola.

Para tener en cuenta las diferentes alturas del eje, así como los diferentes diámetros de rotor, se emplea la frecuencia pico que se determina a través de la siguiente ecuación [34]:

$$f_{pico} = \frac{16,6 U}{Z_{eje} - 0,7R} \quad (157)$$

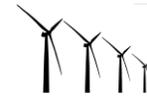
En la cual:

- $f_{pico}$  = Frecuencia a la que  $K_a$  es máxima, Hz
- $U$  = Velocidad de un segmento del aspa, m/s
- $R$  = Radio del rotor, m
- $Z_{eje}$  = Altura del eje del aerogenerador, m

En esta frecuencia se obtiene un pico que corresponde al valor máximo de  $K_a(f)$  en la figura 18. El factor de escala en función de la frecuencia en la figura 18 se ha determinado empíricamente a partir de los espectros de frecuencia medidos para un rotor en el cual el ruido es causado en gran parte por la turbulencia de entrada [63].

Este modelo considera que la fuente de ruido se representa como un punto situado en el eje del aerogenerador y es válido sólo para frecuencias bajas, donde la escala de longitud de la turbulencia es mayor que la cuerda del aspa [103].

El modelo de Grosveld para estimar el nivel de presión sonora debido a la turbulencia de entrada es complejo de aplicar debido a la dificultad de conseguir valores confiables de algunos parámetros de entrada [103].



### **3.3. PREDICCIÓN DEL RUIDO ASOCIADO A LOS AEROGENERADORES**

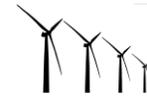
Debido al aumento de la energía eólica es de esperarse un incremento en el número de personas que pueden enfrentarse a la perspectiva de vivir cerca de parques eólicos, y tienen razón para preguntar y tal vez estar preocupados por su impacto ambiental.

El cálculo del nivel de presión sonora asociado a los aerogeneradores es importante para obtener la licencia de construcción y el permiso de funcionamiento por parte de las autoridades públicas para la instalación de parques eólicos en áreas con una gran densidad de población. De forma general, en la práctica es mucho más fácil calcular el nivel de presión sonora que medirlo, pues este análisis debe hacerse antes de instalar el parque eólico. Así pues, en casi todo el mundo, las autoridades públicas se apoyan en los cálculos a la hora de conceder la licencia de construcción de un parque eólico [19].

Calcular los niveles de presión sonora a partir de modelos de predicción de ruido representa una gran ventaja dado que, en situaciones reales, durante la realización de las mediciones las condiciones cambian y se presentan otros sonidos que interfieren en las mediciones. Debido a esto, evidentemente los modelos de predicción se han convertido en una de las herramientas más importantes para evaluar los niveles de presión sonora. Sin embargo, un modelo de predicción nunca se ajusta plenamente a la realidad. Incluso un modelo de predicción perfecto no reproduce la realidad, si los valores de entrada no concuerdan con ella.

La gestión de los riesgos asociados con el uso de modelos de predicción acústica requiere una comunicación clara de los aspectos pertinentes entre los profesionales y los usuarios finales de la información. Por tanto, es necesario que todas las partes involucradas tengan alguna apreciación de lo que se trata cuando se utilizan modelos de predicción de ruido y la diversidad de enfoques que se pueden adoptar [64].

Los modelos de predicción han sido desarrollados para estimar los niveles de presión sonora en un sitio específico como consecuencia de la emisión de ruido de una fuente específica para una serie de condiciones determinadas. Los modelos de predicción describen el proceso de estimación teórica de los



niveles de presión sonora dentro de una región de interés. Es importante reconocer que los datos de salida de un modelo de predicción de ruido sólo representan una estimación de los niveles de presión sonora reales que pueden ocurrir en el tiempo y el espacio, considerando un cierto período de tiempo en que todos los fenómenos son estacionarios [64].

Una parte fundamental de la evaluación es el método utilizado para predecir los niveles de presión sonora asociados a los aerogeneradores en los receptores sensibles ubicados en las inmediaciones del parque eólico. Si un método de predicción subestima los niveles de presión sonora, aunque sea marginalmente, podría llevar a suspender el funcionamiento del parque eólico durante la fase operacional con el fin de lograr el cumplimiento de los niveles permisibles de ruido. Por el contrario, un método de predicción que sobreestime los niveles de presión sonora puede hacer que el suelo disponible para la producción de energía eólica sea subutilizado [29].

Los modelos de predicción son necesarios para prevenir situaciones conflictivas. Estos modelos ayudan a estimar el impacto acústico sobre la población (impacto ambiental por ruido) de una actividad existente o no en su etapa operacional, y que viene corroborada por campañas de medición. A los niveles de presión sonora de la zona de estudio (ruido de fondo) se le añade el aportado por la actividad. O sea, se valora el efecto acumulativo que la incorporación de la fuente de ruido tiene en el ambiente.

Los modelos de predicción de ruido son herramientas que, manejadas cuidadosamente, permiten entender mejor los impactos de las fuentes de contaminación acústica en el medio que las rodea. Se dispone desde modelos sencillos que se pueden procesar manualmente, hasta modelos computacionales que comprenden complejos algoritmos matemáticos y exigen información adicional más detallada.

En cualquier esfuerzo para predecir los niveles de presión sonora se hace constantemente una comparación entre simplicidad y precisión. El verdadero mundo físico es complejo; normalmente no se pueden tener modelos con mucha precisión sin que ellos sean complejos. Generalmente un modelo preciso no es simple y un modelo simple no es preciso. Se hace todo lo posible para producir una modelación que produzca resultados más precisos. Frecuentemente se debe escoger entre modelos complejos de muy buena precisión y modelos simples con menor precisión.



La mayoría de los modelos de predicción utilizan una aproximación matemática relativamente simple para estimar los niveles de presión sonora en un receptor como resultado de una o varias fuentes de emisión de ruido. Para poder hacer una evaluación confiable del ruido generado por los aerogeneradores en el entorno es necesario disponer de métodos adecuados y confiables para determinar la emisión de ruido y los fenómenos de propagación [93]. Cualquier modelación de ruido tiene una serie de limitaciones que afectan la precisión y la incertidumbre de los niveles de presión sonora estimados [79].

**3.3.1. Teoría general de la propagación del sonido.** Si un sonido es irradiado desde una fuente puntual uniformemente en todas las direcciones en campo libre (lejos de todas las superficies reflectantes o absorbentes), la intensidad del sonido en un punto, con la distancia  $r$  desde el punto de emisión, es igual a [23, 37, 72 y 100]:

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (158)$$

El nivel de intensidad sonora, expresado en dB, se obtiene a través de la siguiente ecuación [100]:

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{W}{S} \cdot \frac{S_0}{W_0} \right) \quad (159)$$

$$L_I = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) - 10 \log(S) + 10 \log(S_0) \quad (160)$$

$$L_I = 10 \log \left( \frac{W}{4\pi r^2} \right) = 10 \log(W) - 10 \log(4\pi r^2) \quad (161)$$

La cual da como resultado la siguiente expresión [100]:

$$L_I = L_W - 10 \log(4\pi r^2) = L_W - 10 \log(4\pi) - 10 \log(r^2) \quad (162)$$

La cual a su vez permite determinar el nivel de presión sonora [37 y 100]:

$$L_P = L_W - 11 - 20 \log(r) \quad (163)$$

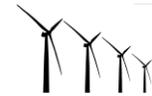


Esta expresión corresponde a la propagación o divergencia esférica del sonido. Según esta ley de atenuación, cada vez que se duplica la distancia se produce una atenuación de 6 dB [100].

Cuando el nivel de potencia sonora se ha determinado, el siguiente paso es calcular qué cantidad de energía acústica llegará al receptor. En contraste con la condición de propagación esférica, la propagación exterior es mucho más compleja debido a la influencia de las condiciones climáticas, la vegetación, la forma del terreno y los diferentes tipos de suelo. El efecto total de las condiciones climáticas sobre la propagación del sonido puede dar lugar a diferencias en el nivel de presión sonora de hasta 20 a 25 dB. Cuanto más largo sea el camino de transmisión del sonido, mayores serán estas diferencias [100].

La propagación del sonido en campo libre generalmente se ha estudiado desde una base experimental y de cualificación de sus propiedades de tal manera que la rigurosidad cuantitativa se ha dificultado un poco por la gran complejidad del fenómeno de propagación sonora y de la gran cantidad de variables que intervienen en el problema. Esto hace que en la actualidad no se cuente con un único modelo de predicción de la propagación del sonido en espacios abiertos. Se cuenta con modelos específicos para cada una de las necesidades particulares que lo requieran, como los estudios de impacto ambiental objeto de la construcción de obras civiles como carreteras y vías férreas, o bien, en centros urbanos en donde las condiciones geométricas del entorno determinan la intensidad del sonido propagado o en su defecto las atenuaciones ocasionadas por esas condiciones [58].

**3.3.2. Teoría general de la propagación del sonido en campo libre.** La propagación del sonido en espacios abiertos está sujeta a múltiples influencias físicas de la trayectoria de propagación. Independiente del método utilizado para la predicción (modelo empírico o analítico), se necesitan datos de entrada precisos para calcular las pérdidas en la propagación. Para distancias menores de 100 metros, para lo cual los efectos meteorológicos desempeñan un papel de menor importancia, las propiedades del suelo, generalmente dadas por la impedancia de la superficie, son las más importantes [51].



Los fenómenos de propagación de las ondas sonoras en campo libre son muy complejos y se deben considerar un gran número de parámetros. Los principales están relacionados con las características físicas del medio de propagación (aire) y las condiciones de entorno. Por lo tanto, el proceso de modelación requiere la consideración de muchos mecanismos diferentes, tales como: la divergencia geométrica, la absorción molecular del aire, procesos de reflexión en las superficies, la influencia de la temperatura, el perfil de velocidad del viento, y finalmente, la influencia de la turbulencia atmosférica [8].

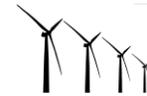
Cuando se considera la propagación del sonido en espacios abiertos, el nivel de presión sonora en un receptor específico resulta condicionado por una serie de factores que dependen del medio de propagación. Muchos de estos factores son variables en el tiempo y dificultan la determinación precisa del nivel sonoro en la práctica [28].

Reconociendo que la modelación es un medio para estimar el nivel de presión sonora para un conjunto de condiciones específicas, la atención se dirige ahora a la definición de cuáles son estas condiciones. Las condiciones fundamentales que un modelo de predicción de ruido requiere son [64]:

- Una aproximación de la fuente o fuentes de ruido para las cuales los niveles de presión sonora asociados a ellas son de interés.
- Una aproximación del ambiente físico a través del cual el sonido va a transmitirse desde la(s) fuente(s) de ruido al sitio o región de interés. Esto incluye el terreno, el entorno construido y las condiciones atmosféricas (por ejemplo, viento, temperatura, humedad).
- Una aproximación de la forma en que el sonido va a viajar desde la fuente de ruido, a través del ambiente físico, hasta el receptor o región de interés.

Por lo tanto, construir un modelo para estimar el nivel de presión sonora implica definir una serie de fuentes de ruido que serán objeto de estudio, describir las características acústicamente significativas del ambiente a través del cual el sonido se propagará al receptor, y luego aplicar un método de cálculo que tenga en cuenta estas descripciones para estimar el nivel de presión sonora en un lugar o región de interés [64].

En la práctica, los modelos para estimar el nivel de presión sonora a menudo pueden ser más complejos, involucrando múltiples fuentes de ruido, la



transmisión a través de múltiples vías de transmisión complejas y varios receptores específicos o regiones de interés [64].

Es importante que se utilicen los modelos de predicción de ruido respetando sus limitaciones. Esto puede significar que sus descripciones sólo se utilizan para estimar los niveles de presión sonora para un conjunto de condiciones específicas o cierto grado de incertidumbre. En algunos casos se pueden corregir los valores estimados cuando es posible cuantificar las limitaciones. En otros casos, sin embargo, puede ser necesario desechar los resultados obtenidos por los métodos de ingeniería o métodos analíticos y buscar métodos de predicción alternativos [64].

Los algoritmos predictivos varían ampliamente en sofisticación desde los métodos de ingeniería empleados comúnmente (con base empírica) hasta los métodos científicos más complejos que se emplean sobre todo para aplicaciones en investigaciones especializadas. Los métodos de ingeniería ofrecen el beneficio de un cálculo práctico y robusto, pero en general se limitan a la predicción de los niveles de presión sonora a largo plazo y presentan un aumento de la incertidumbre cuando se trata de evaluar los campos de ruido con fuentes y/o condiciones de propagación complejas. En el extremo opuesto del espectro, los métodos científicos pueden proporcionar significativamente mayor exactitud para situaciones complejas, pero por lo general sólo para escenarios muy específicos y limitados, y son computacionalmente intensivos en la medida que limita su viabilidad como una herramienta de evaluación práctica [64].

La metodología adoptada por los métodos prácticos de ingeniería implica el cálculo de los niveles de presión sonora sumando las contribuciones específicas que cada factor de atenuación de sonido tiene en la propagación del ruido. El factor común en todos estos modelos es que se basan principalmente en resultados empíricos. En general, son simples y fáciles de usar [64].

Los métodos semi-analíticos conservan la misma estructura práctica como los métodos de ingeniería, pero se basan en soluciones analíticas simplificadas de la ecuación de onda acústica en lugar de resultados empíricos. Mientras que los métodos prácticos de ingeniería sólo tienen en cuenta efectos meteorológicos promediados, estos métodos permiten un mejor seguimiento de la influencia de las condiciones meteorológicas



específicas en los niveles de presión sonora, tales como situaciones en contra o a favor del viento. Sin importar el modelo que se utilice, las predicciones serán tan buenas como sean los datos de entrada [51].

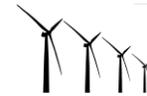
La complejidad de las condiciones atmosféricas y la imposibilidad de medir todos los parámetros ambientales pertinentes a lo largo de la ruta de propagación del sonido exige que se adopten varias suposiciones y simplificaciones en los modelos. Este conjunto de hipótesis y aproximaciones ha dado lugar a la existencia de una variedad de métodos para representar matemáticamente la propagación del sonido [64].

El valor de un modelo de predicción de ruido no puede juzgarse por la exactitud *per se*, sino más bien por su fiabilidad como una herramienta en la toma de decisiones, y esto debe hacerse de acuerdo a la aplicación específica y la situación bajo consideración [64].

Siempre que los modelos se utilicen teniendo en cuenta los beneficios relativos y las limitaciones de las predicciones, estos estudios pueden proporcionar una base fiable para la toma de decisiones [64].

La representación exacta de las dimensiones físicas de todas las características significativas acústicamente de una zona de estudio potencialmente grande puede ser muy problemático. El desafío adicional es entonces la asignación de propiedades acústicas a las superficies que absorben, reducen y reflejan el sonido. Tener en cuenta las complejidades del entorno del terreno y construir un ambiente por lo general requiere la simplificación de los supuestos que se hagan con el fin de que puedan ser incluidas en un modelo de predicción de ruido. Factores sutiles y variaciones en algunos de los parámetros de entrada que no son tenidos en cuenta en el momento de hacer los cálculos pueden generar diferencias significativas entre los niveles de presión sonora estimados y reales, sobre todo cuando la influencia de ciertas características ambientales no puede considerarse de forma separada [64].

La atmósfera es todo menos uniforme. Las cambiantes condiciones meteorológicas fácilmente pueden causar fluctuaciones en los niveles de presión sonora de 10 a 20 dB durante períodos de tiempo de unos cuantos minutos. Cuanto más larga sea la trayectoria de transmisión, mayores serán las fluctuaciones en los niveles [52].



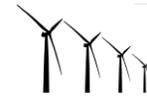
El desarrollo de un modelo de propagación de ruido preciso generalmente debe incluir los siguientes factores [74]:

- Características de la fuente (por ejemplo, direccionalidad, altura, etc.).
- Distancia entre la fuente y el observador.
- Absorción del aire, la cual depende de la frecuencia.
- Efectos del suelo (es decir, la reflexión y la absorción del sonido en el suelo, lo cual depende de la altura de la fuente, la superficie del terreno, las propiedades del terreno, la frecuencia, etc.).
- Presencia de barreras y terreno irregular.
- Efectos meteorológicos (es decir, velocidad del viento, perfil de velocidad del viento y gradiente de temperatura con la altura). La dirección predominante del viento puede causar diferencias en los niveles de presión sonora entre las posiciones contra el viento y en la dirección del viento.
- La topografía del terreno.

Debido a que la realidad es muy compleja, siempre tienen que hacerse suposiciones y, por lo tanto, algunos de los algoritmos sólo son aplicables a ciertas situaciones. Algunos algoritmos también asumen algunos valores para la descripción de los parámetros físicos [100].

La influencia de la mayoría de los parámetros que afectan a la propagación del sonido al aire libre es generalmente bien entendida desde un punto de vista teórico. Sin embargo, el problema de la predicción de la propagación del ruido sobre distancias considerables en un entorno al aire libre es que las propiedades del medio a través del cual se propaga el sonido están en constante fluctuación. Esto conduce a que las condiciones de propagación no sean estacionarias y la posibilidad de que los niveles de presión sonora en lugares distantes pueden variar significativamente con el tiempo, incluso cuando el nivel de potencia de sonido de la fuente permanece constante. Estos efectos sólo pueden ser analíticamente modelados a cualquier grado de precisión si se conoce el estado de la atmósfera a través del cual las ondas de sonido se propagan [6].

Las herramientas que suelen aplicarse en la predicción de los niveles de presión sonora asociados a fuentes fijas responden por lo general al método de cálculo que propone la norma ISO 9613 Parte 2, que a su vez está estrechamente relacionado con la propuesta que contiene el Reporte 4/81 de Acoustic Technology Limited para Oil Companies European Association



for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution (CONCAWE), más concretamente con una de las simplificaciones a la metodología general que el propio reporte avala y que consiste en no tomar en cuenta explícitamente las condiciones meteorológicas.

La norma ISO 9613 Parte 2 establece un método de ingeniería para el cálculo de la atenuación del sonido durante propagación al aire libre a fin de predecir los niveles de presión sonora a cierta distancia de una variedad de fuentes. El método predice el nivel de presión sonora bajo condiciones meteorológicas favorables para la propagación de la emisión de ruido de las fuentes [44]:

- Las condiciones para la propagación con el viento soplando desde la fuente al receptor, dentro de un ángulo de  $\pm 45^\circ$  con la dirección que conecta el centro de la fuente sonora dominante y el centro de la región de recepción de interés.
- La velocidad del viento está entre 1 y 5 m/s medida a una altura comprendida entre 3 y 11 m por encima de la superficie del suelo.
- Condiciones de inversión térmica moderada bien desarrollada, como suele ocurrir en noches calmas y despejadas.

El parámetro estimado por el método es el nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A en banda de octavas (frecuencias entre 63 Hz y 8 kHz) para las condiciones meteorológicas antes especificadas. El método consiste específicamente en algoritmos para el cálculo de la atenuación del ruido que proviene de una fuente puntual o un conjunto de fuentes puntuales. La fuente o fuentes pueden ser móviles o fijas [44].

Los términos específicos de atenuación considerados en los algoritmos son los siguientes [44]:

- Divergencia geométrica
- Absorción atmosférica
- Efectos del suelo
- Reflexión de las superficies
- Presencia de obstáculos

La atenuación debido a la absorción atmosférica para tonos puros está especificada en términos de un coeficiente de atenuación como función de cuatro variables: frecuencia del sonido, temperatura, humedad y presión del



aire. Los coeficientes de atenuación calculados son suministrados generalmente en forma de tablas para los intervalos de las variables comúnmente encontrados en la predicción de la propagación del sonido al aire libre [43]:

- Frecuencia de 50 Hz a 10 kHz
- Temperatura de -20 °C a 50 °C
- Humedad relativa de 10% a 100% y
- Presión de 101,325 kPa

El método de la norma ISO 9613 Parte 2 se aplica para una atmósfera con condiciones meteorológicas uniformes. Puede además usarse para determinar los ajustes necesarios que se le deben aplicar a los niveles de presión sonora medidos con el fin de tener en cuenta las diferencias debido a las pérdidas por absorción atmosférica bajo condiciones meteorológicas diferentes [43]. Parte del método está basado empíricamente y otra parte teóricamente [88].

El nivel de presión sonora continuo equivalente viento abajo en bandas de octava para un receptor específico a cierta distancia de la fuente de sonido puede ser calculado a través de la siguiente ecuación [44]:

$$L_p = L_W + D - \sum A \quad (165)$$

En la cual:

$L_p$  = Nivel de presión sonora en bandas de octava en un receptor específico, dB

$L_W$  = Nivel de potencia sonora en bandas de octava producido por una fuente sonora puntual, dB

$D$  = Factor de direccionalidad, dB

$A$  = Atenuación en bandas de octava que se produce durante la propagación desde la fuente sonora puntual hasta el receptor, dB

El nivel de presión sonora recibido en un punto a cierta distancia de la fuente de ruido es una función del nivel de potencia sonora de la fuente y los diversos mecanismos de atenuación. Es posible separar los factores dominantes que afectan la atenuación del sonido y examinar la contribución de cada uno individualmente [12 y 44].



- **Factor de direccionalidad.** El factor de direccionalidad ( $D$ ) se define como la diferencia entre el nivel de presión sonora en una dirección determinada en campo libre alejado de la fuente y el nivel medio de presión sonora en ese campo [37].

La mayoría de las fuentes de sonido exhiben características direccionales definidas; es decir, irradian más sonido en algunas direcciones que en otras. Esto se ilustra en la figura 19, que muestra el nivel de presión sonora, a una distancia determinada, en función del ángulo. A este diagrama se le denomina patrón de direccionalidad [37].

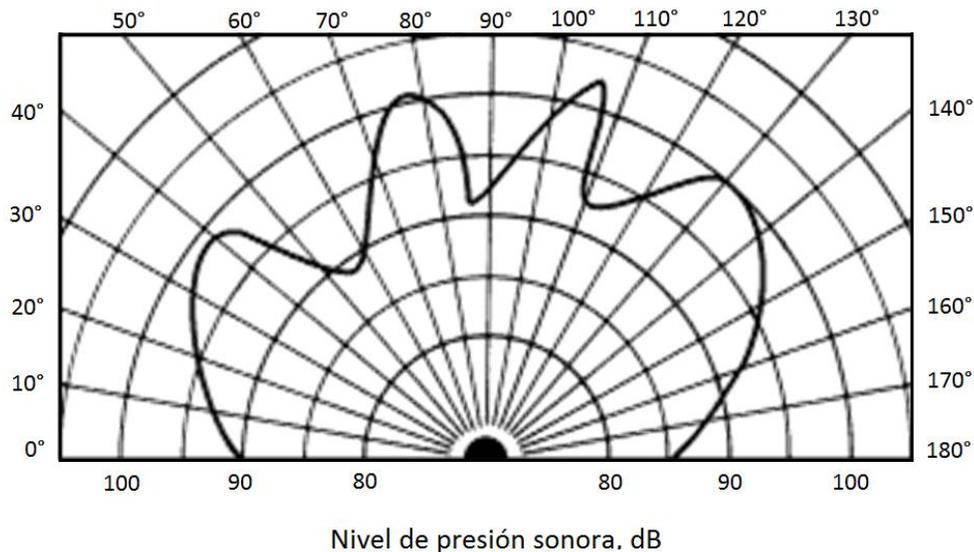


Figura 19. Patrón de direccionalidad

Fuente: Adaptado de Harris, C. Manual de medidas acústicas y control de ruido. Mc Graw-Hill. Madrid, 1995.

Aunque los patrones de respuesta direccional de las distintas fuentes de sonido varían considerablemente, suelen exhibir las siguientes características generales [37]:

- Cuando la longitud de onda del sonido emitido es muy grande en comparación con las dimensiones de la fuente, el sonido se irradia uniformemente en todas las direcciones; la fuente no es direccional.



- Cuando la longitud de onda es pequeña comparada con las dimensiones de la fuente, el sonido irradiado desde la superficie de la fuente tiende a confinarse en un haz relativamente estrecho; así cuanto mayor es la frecuencia, más estrecho es el haz.

El factor de direccionalidad se requiere para tener en cuenta la distribución desigual de la intensidad de sonido en función de la dirección en un punto determinado, permitiendo hacer un ajuste donde el sonido radiado en la dirección de interés es mayor o menor que el nivel de presión sonora especificado [52].

En este caso, el nivel de presión sonora se mide en una dirección viento abajo, que corresponde a la peor condición de propagación considerada por la norma ISO 9613 Parte 2 y no requiere ajustes adicionales. Para una fuente puntual omnidireccional radiando en el espacio libre se considera que  $D = 0$  dB [44].

El valor del factor de direccionalidad  $D$  depende de las características de la fuente y el entorno de la fuente. En los alrededores algo reverberantes, se recomienda un valor de  $D = 0$  dB como una primera aproximación. Para una fuente ubicada en un plano,  $D = 3$  dB [13].

Los parámetros de atenuación que forman el término  $\sum A$  se derivan de una combinación de relaciones determinadas teóricamente y empíricamente, que se describen a continuación:

- **Atenuación por divergencia geométrica.** La divergencia geométrica es la forma cómo se irradia la energía sonora de una fuente en campo libre en función de la distancia [36]. Se refiere a la propagación de la energía del sonido como resultado de la expansión de los frentes de onda [88]. Generalmente el nivel sonoro producido por una fuente decrece con la distancia [37].

La divergencia geométrica es independiente de la frecuencia y tiene un efecto importante en casi todas las situaciones de propagación del sonido. Las dos leyes más comunes de divergencia geométrica son la propagación esférica y la propagación cilíndrica [89].



La forma más básica del modelo de propagación, y que es considerada por la norma ISO 9613 Parte 2, se describe como divergencia esférica o semi-esférica. Este modelo representa simplemente la reducción en la intensidad del sonido como un frente de onda que se propaga sobre un área esférica o semi-esférica más grande [64].

En este caso, la fuente puntual emite energía en todas las direcciones con igual intensidad, no privilegia ninguna región del espacio y distribuye la energía en forma de frentes de onda esféricos [33].

Para una fuente puntual y propagación esférica, la atenuación por divergencia geométrica es [37 y 44]:

$$A_{geo} = 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) + 11 \quad (166)$$

En la cual  $r$  es la distancia desde la fuente al receptor, en metros y  $r_0$  es la distancia de referencia (1 m).

Para ciertos tipos de fuentes de ruido en situaciones relativamente simples, como puede ser el caso en el que las distancias de separación son relativamente pequeñas y no hay estructuras que intervienen para impedir la propagación del ruido, este tipo de modelo es a menudo suficiente para estimar los niveles de presión sonora en un receptor específico [64].

- **Atenuación por absorción atmosférica.** A medida que el sonido se propaga a través de la atmósfera, su energía se convierte gradualmente en calor mediante varios procesos moleculares denominados absorción atmosférica [37 y 102].

La atenuación debido a la absorción atmosférica tiene en cuenta la atenuación lineal con la distancia de la fuente de sonido sobre el espectro de frecuencias de acuerdo a la siguiente ecuación [44]:

$$A_{atm} = \frac{\alpha r}{1000} \quad (167)$$

En la cual:



$\alpha$  = Coeficiente de atenuación atmosférica para cada banda de octava en la frecuencia central, dB/km.

$r$  = Distancia entre la fuente de emisión y el receptor, m.

Para una banda de octava dada, el máximo valor que puede alcanzar no debe exceder 15 dB [44].

La absorción del sonido por la atmósfera puede ser considerada debido a tres mecanismos: absorción clásica (debido a la viscosidad, la conductividad térmica, la difusión de masa y difusión térmica dentro del medio), la absorción rotacional (causada por la relajación de la energía de rotación de las moléculas), y la relajación vibracional de las moléculas de nitrógeno y oxígeno en el aire [12]. La absorción atmosférica provoca una disminución de la amplitud de la onda de sonido. También tiene un efecto sobre la velocidad de la onda de sonido [25].

El coeficiente de absorción atmosférica depende en gran medida de la frecuencia del sonido y la humedad relativa del aire y, en menor medida, de la temperatura ambiente. También depende ligeramente de la presión atmosférica, lo suficiente para notarse con cambios de altitud grandes (miles de metros), pero no con cambios climatológicos [37 y 44].

La absorción atmosférica del sonido resulta significativa para altas frecuencias (por encima de 1000 Hz) y grandes distancias entre la fuente y el receptor (mayores a 300 m) [28]. La absorción generalmente disminuye con el aumento de la humedad [52]. En general, la absorción atmosférica se debe tener en cuenta para la propagación del sonido en distancias superiores a 100 m [25].

Para el cálculo del nivel de presión sonora en campo libre a distancias grandes (mayores a 100 m), donde la atenuación por absorción atmosférica es significativa para todas las frecuencias, se deben tener en cuenta las frecuencias a la temperatura y humedad relativa especificadas [37 y 44].

La tabla B1 del anexo B presenta los valores del coeficiente de atenuación atmosférica para una presión de referencia de 101,325 kPa para la propagación del sonido en campo libre.

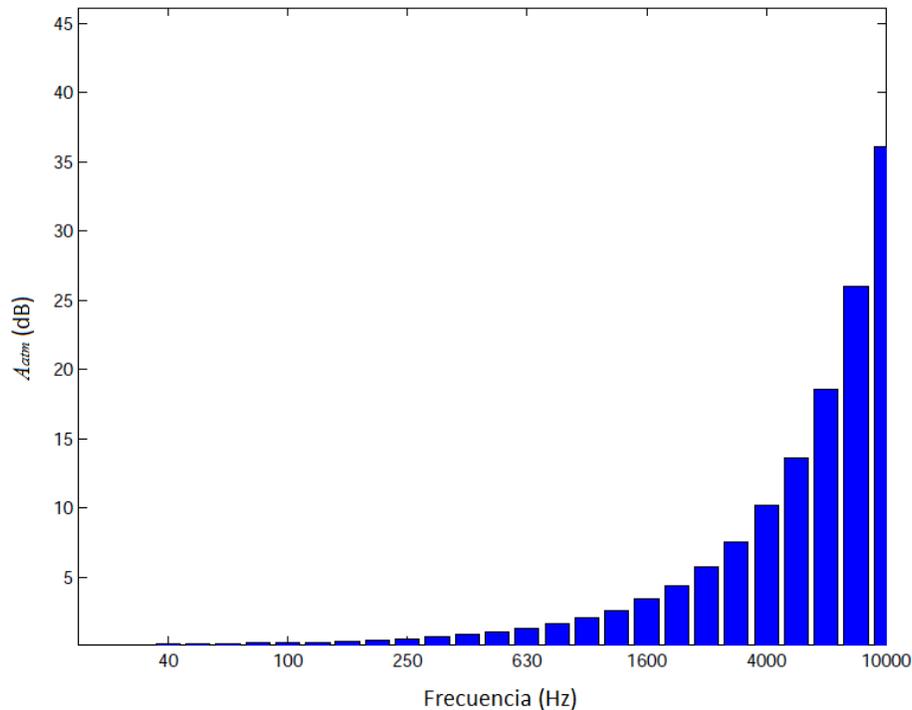
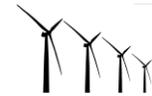


Figura 20. Absorción de aire para una distancia de 500 m

Fuente: Zhu, W. Modelling of noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2004.

- **Atenuación por efectos del suelo.** La atenuación por efectos del suelo es principalmente el resultado del sonido reflejado por la superficie del suelo que interfiere con la propagación de sonido directamente desde la fuente al receptor. La atenuación por efectos del suelo es intrínsecamente compleja y depende de la altura de la fuente, la altura del receptor, el ángulo de incidencia, la frecuencia del sonido, las condiciones del terreno y la impedancia de la superficie [3, 37, 44, 50, 71 y 73].

Una buena aproximación para lograr cuantificar el efecto producido por las reflexiones sobre el suelo, puede ser obtenida asumiendo que el sonido que llega al receptor está compuesto por el sonido directo desde la fuente y una onda reflejada en el suelo que se suma energéticamente. Hay que tener en cuenta que la onda reflejada puede producir interferencia



destruktiva (atenuación sonora) o interferencia constructiva (amplificación sonora). La amplitud de la onda reflejada es calculada asumiendo medios totalmente independientes y conociendo la impedancia del suelo [2].

Para fuentes y receptores que se encuentran localizados cerca del suelo, además de la energía sonora por vía directa, el receptor puede recibir la energía sonora que es reflejada por el suelo. Cuando el terreno es relativamente duro y plano, la energía reflejada puede añadirse al ruido por vía directa y aumentar el nivel de presión sonora en el receptor. Sin embargo, cuando el terreno es poroso o acústicamente blando, puede haber una inversión de fase en la reflexión de modo que el ruido reflejado por el suelo puede interferir destructivamente con el ruido por vía directa resultando en una reducción significativa en los niveles de presión sonora en el receptor [52 y 91]. Lo anterior depende de las fases y amplitudes relativas de las ondas sonoras reflejadas que son modificadas por la impedancia de la superficie del suelo [52].

La superficie sobre la cual se propaga el sonido rara vez puede considerarse perfectamente rígida o totalmente reflectante (con la posible excepción de agua, hielo o concreto). Superficies del suelo con o sin vegetación tienden a absorber la energía de las ondas acústicas incidentes. La predicción precisa de los efectos del suelo requiere el conocimiento de las propiedades de absorción y de reflexión (impedancia acústica) de la superficie [52].

La superficie del terreno en sí también proporciona una ruta importante para la transmisión de la energía acústica, particularmente en ángulos de incidencia pequeños y frecuencias bajas. La energía acústica incidente se transforma en energía vibracional y es transmitida a lo largo de la capa superficial. Esta perturbación vibracional puede propagarse a través de distancias considerables, antes de disiparse o volverse a radiar como sonido. A distancias significativas, la transmisión de sonido de baja frecuencia puede ser dominada por este mecanismo de onda superficial [52].

Cerca del suelo, en superficies consideradas acústicamente como duras o no porosas, como el asfalto o el hormigón no poroso, la presión sonora más o menos se duplica en un amplio intervalo de frecuencias audibles.



Por otro lado, en superficies porosas, como tierra, arena, suelo con presencia de vegetación o nieve, el aumento de nivel sonoro tiende a ocurrir en las frecuencias bajas, en las cuales la onda sonora es de mayor longitud y por tanto presenta menor capacidad para penetrar en los poros; sin embargo, a frecuencias altas, la onda sonora es capaz de penetrar en el terreno poroso por lo que la reflexión en el suelo, puede presentar un cambio en la amplitud y fase de la onda sonora [80].

Para la propagación a gran distancia (más de 100 m), la atenuación se calcula asumiendo que las condiciones atmosféricas son favorables a la propagación, lo que significa que el rayo desde la fuente al receptor es refractado hacia abajo. La atenuación del suelo sigue siendo fundamentalmente el resultado de la interferencia entre el rayo directo y el reflejado por el suelo, pero el rayo curvado asegura que la atenuación está determinada fundamentalmente por las superficies del suelo cerca de la fuente y del receptor [37].

Para suelos duros como el hormigón y asfalto, que poseen poca porosidad, la atenuación es baja en comparación de suelos cubiertos con árboles, hierbas y terrenos arados [71].

La atenuación por efectos del suelo, es a lo sumo de 3 dB al duplicar las pérdidas de propagación por distancia para una fuente lineal de ruido y sólo se produce por encima de suelo absorbente blando (tal como tierra normal y suelo con vegetación). Sobre un terreno duro (como hormigón, roca y tierra muy compactada), estos efectos no ocurren. Estos efectos son más evidentes para los receptores cerca del piso y disminuye rápidamente a medida que aumenta la altura del receptor sobre suelo [46].

Las superficies del suelo pueden clasificarse, para el caso de ángulos de incidencia ( $\theta$ ) inferiores a  $20^\circ$ , de acuerdo con sus propiedades acústicas de la siguiente manera [37]:

- Suelo duro: Asfalto, hormigón, agua, hielo y todas las demás superficies con baja porosidad.
- Suelo blando: Suelo cubierto por hierba, árboles u otro tipo de vegetación y todos los suelos porosos adecuados para el crecimiento de vegetación.



- Suelo mixto: Una superficie que incluye áreas duras y blandas. El factor del suelo en este caso es igual a la proporción del suelo que es blando.

De acuerdo a la norma ISO 9613 Parte 2, las condiciones del terreno se describen de acuerdo al factor  $G$  del suelo que varía entre 0 para suelo “duro” y 1 para suelo “blando”. Para calcular la atenuación del suelo para una banda de octava específica, primero se calcula el componente de atenuación  $A_s$  para la región cercana a la fuente especificada por el factor  $G_s$ ,  $A_r$  para la región cercana al receptor especificada por el factor  $G_r$ , y  $A_m$  para la región media la fuente y el receptor entre especificada por el factor  $G_m$ , usando las expresiones de la tabla 2 [37 y 44].

La atenuación total de suelo para una banda de octava específica se obtiene con la siguiente ecuación [44]:

$$A_{suelo} = A_s + A_r + A_m \quad (168)$$

Este método de cálculo para la atenuación del suelo sólo es aplicable a un terreno que es aproximadamente plano, horizontal o con una pendiente constante [44].

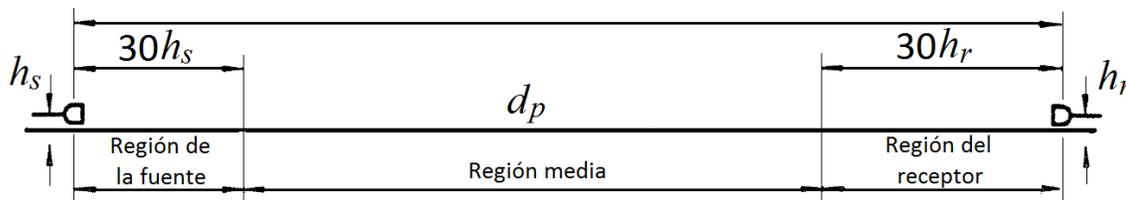


Figura 21. Regiones para la determinación de la atenuación del suelo

Fuente: International Organization for Standardization. ISO 9613. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. Geneva, 1996.



Tabla 2. Expresiones usadas para calcular la contribución de la atenuación del suelo  $A_s$ ,  $A_r$ , y  $A_m$  en bandas de octava.

Frecuencia (Hz)	$A_s$ o $A_r$ (dB)	$A_m$ (dB)
63	-1,5	-3q
125	$-1,5 + G a'(h)$	$-3q(1 - G_m)$
250	$-1,5 + G b'(h)$	
500	$-1,5 + G c'(h)$	
1000	$-1,5 + G d'(h)$	
2000	$-1,5(1 - G)$	
4000	$-1,5(1 - G)$	
8000	$-1,5(1 - G)$	

Notas:

$$a'(h) = 1,5 + 3,0e^{-0,12(h-5)^2} \left(1 - e^{-dp/50}\right) + 5,7e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} dp^2}\right)$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-dp/50}\right)$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0e^{-0,9h^2} \left(1 - e^{-dp/50}\right)$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0e^{-0,9h^2} \left(1 - e^{-dp/50}\right)$$

Para calcular  $A_s$  se toma  $G = G_s$  y  $h = h_s$

Para calcular  $A_r$  se toma  $G = G_r$  y  $h = h_r$

$q = 0$  cuando  $dp \leq 30 (h_s + h_r)$

$$q = 1 - \frac{30 (h_s + h_r)}{dp} \text{ cuando } dp > 30 (h_s + h_r)$$

$dp$  es la distancia entre la fuente y el receptor (m), proyectado en el plano del suelo

Fuente: International Organization for Standardization. ISO 9613. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. Geneva, 1996.

- **Atenuación por barreras.** El efecto de cualquier barrera entre la fuente de ruido y la posición del receptor es que el ruido se reducirá de acuerdo con las alturas relativas de la fuente, el receptor y la barrera, y el espectro de frecuencia del ruido. La norma ISO 9613 Parte 2 contiene el



procedimiento para determinar la atenuación por barreras [44]. Este procedimiento no se describe en esta sección dado su escasa aplicación al caso de aerogeneradores de gran tamaño. Además, en el parque eólico que se escogió para el estudio no hay presencia de barreras.

- **Reflexiones.** Las reflexiones se consideran aquí en términos de fuentes imaginarias. Estas reflexiones son de superficies más o menos verticales, como las fachadas de los edificios, que pueden aumentar los niveles de presión sonora en el receptor. La norma ISO 9613 Parte 2 contiene el procedimiento para determinar la reflexión de superficies que pueden considerarse como una interferencia en la propagación del sonido [44]. Este procedimiento no se describe en esta sección por las mismas razones en lo que concierne a barreras acústicas. Además, en el parque eólico que se escogió para el estudio no hay presencia de superficies, diferentes a la superficie del suelo, que puedan reflejar el sonido.

**3.3.3. Consideraciones para estimar el ruido generado por los aerogeneradores.** Todavía no se cuenta con un procedimiento estándar aplicable directamente para estimar el ruido generado por los aerogeneradores [21, 27 y 102]. La mayoría de los cálculos predictivos de los niveles de presión sonora asociados a los aerogeneradores se hacen aplicando modelos empíricos. Generalmente los modelos empíricos no producen buenos resultados para fuentes de gran altura como los aerogeneradores. Además, para muchos de los modelos empíricos se han fijado las condiciones meteorológicas.

Dada la extensa variedad de usos que tiene un modelo de predicción de ruido, así como la amplia variedad de factores que influyen en los niveles de presión sonora en campo abierto, no existe un procedimiento para definir un modelo detallado que sea adecuado para cada aplicación. El proceso de desarrollo de un modelo detallado a menudo consiste en el perfeccionamiento gradual de las predicciones del análisis inicial. Dado que las limitaciones prácticas y técnicas a menudo impiden la aproximación al modelo ideal, el diseño detallado debe identificar las mejoras más efectivas que logren un buen compromiso entre los recursos que se requieren para construir el modelo y la fiabilidad de los resultados para fines de toma de decisiones [64].



La propagación del ruido de los aerogeneradores es compleja y la exactitud del modelo depende de las hipótesis y los métodos utilizados [20]. El cálculo de los niveles de presión sonora en campo libre a cierta distancia de los parques eólicos requiere dos pasos principales. En primer lugar, se debe conocer el nivel de potencia sonora que emite el aerogenerador en todo el intervalo operacional de velocidades del viento. En segundo lugar, se debe conocer la manera en la que el sonido se atenúa a medida que se propaga desde el aerogenerador hasta el receptor [6].

Las variaciones meteorológicas son importantes para la propagación del sonido y, por ende, para la estimación de los niveles de potencia sonora de la fuente, dado que es el mayor elemento de incertidumbre en los cálculos. Los estudios muestran que los niveles de potencia sonora varían con la velocidad del viento, y que el sonido de los aerogeneradores podría ser escuchado a velocidades del viento en las cuales éste debería ser enmascarado por otros sonidos inducidos por el viento [85].

Por otro lado, para estimar el nivel de presión sonora a cierta distancia de la fuente con un nivel de potencia conocido, hay que determinar cómo se propagan las ondas sonoras. En general, a medida que el sonido se propaga desde una fuente, el nivel de presión sonora disminuye. La energía inicial en el sonido se distribuye sobre un área más grande a medida que la distancia desde la fuente aumenta [74].

La importancia relativa de estos factores depende de la distancia. Para distancias en el orden de un kilómetro o más, las condiciones atmosféricas tendrán regularmente mayor influencia. Por otro lado, para distancias de 100 metros o menos, la propagación se ve influenciada fuertemente por los efectos del suelo. Además, la atenuación total depende de la frecuencia, dado que el sonido de baja frecuencia experimenta menos atenuación [51].

Durante la realización de las campañas de medición de ruido, al igual que para realizar la posterior estimación de los niveles de presión sonora, se deben tener en cuenta diversos escenarios relativos a las distintas configuraciones posibles del viento, la ubicación de las fuentes de ruido lejanas y su afectación hacia los diferentes posibles receptores [15]. Son *et al.* recomiendan tener en cuenta, además, el relieve de la zona, la refracción de la onda producto del gradiente de temperatura y la variación de la



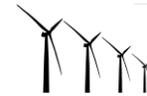
velocidad del viento que se consideran factores relevantes y que aún no han sido estudiados [83].

Los resultados de los estudios de Van den Berg publicados a partir de 2006 demostraron que la metodología de cálculo definida en la norma ISO 9613 Parte 2 no sólo conduce a subestimaciones importantes en los niveles de presión sonora que se esperan en el receptor, sino que éstas se dan principalmente en condiciones de estabilidad atmosférica. Además, como los aerogeneradores cada vez son más altos, la discrepancia entre los niveles de presión sonora real y estimado aumenta [96].

Kalinski *et al.* señalan que entre las limitaciones que presenta el método de la norma ISO 9613 Parte 2 están que no considera alturas de la fuente superiores a 30 metros y que no se tiene en cuenta la variación atmosférica a través de grandes distancias ( $> 1$  km). También señalan que los aerogeneradores suelen ser modelados como fuentes puntuales y que esto puede causar una subestimación a cortas distancias ( $< 1$  km). Además, indican que un aerogenerador es más que una fuente puntual simple [38 y 48].

La variabilidad de los aerogeneradores, en especial la de sus fuentes de ruido y las cualidades del mismo, hacen que el sonido producido por ellos sea muy diferente al de casi cualquier otra fuente de ruido. En particular, el nivel de presión sonora proveniente de los aerogeneradores está fuertemente afectado por la velocidad del viento, un factor que no influye en los niveles sonoros de otras fuentes de ruido, lo cual introduce una variabilidad intrínseca que afecta la respuesta en los receptores [16].

Hay una clara diferencia audible entre el ruido del aerogenerador durante la noche y el día a cierta distancia de los aerogeneradores. En un día de verano con un viento moderado o fuerte, los aerogeneradores sólo se pueden oír dentro de unos cuantos cientos de metros. Sin embargo, en noches tranquilas el parque eólico se puede escuchar a distancias de hasta varios kilómetros cuando los aerogeneradores giran a alta velocidad. En estas noches, sin duda alguna se puede escuchar un sonido parecido a un “golpeteo” a una distancia de 500 a 1000 m del parque eólico con una frecuencia de repetición de un segundo (que coincide con la frecuencia de paso de las aspas por el mástil del aerogenerador). Durante el día este sonido



no suele ser audible y por lo tanto es menos intrusivo, incluso con fuertes vientos, debido a los altos niveles sonoros del ambiente [96].

La estimación del nivel de presión sonora para un receptor específico a cierta distancia de la fuente de sonido normalmente puede incluir una variedad de condiciones meteorológicas que pueden ser favorables o no para la propagación del sonido. Los efectos de las condiciones meteorológicas sobre la propagación del sonido no son significativos para distancias cortas y para distancias mayores, cuando la altura de la fuente y el receptor sea considerable.

Los factores meteorológicos afectan la propagación del ruido en la atmósfera y el viento (su velocidad y dirección), es el factor que más preponderancia tiene. Cuando el factor viento aparece, la importancia de la temperatura en la propagación del sonido se hace irrelevante. Lo anterior se debe al efecto que este tiene en la propagación (sobre todo a bajas frecuencias), la relación que tiene con el funcionamiento de los aerogeneradores y por su repercusión sobre el ruido de fondo [15].

En situaciones con el viento a favor el sonido se refracta hacia abajo, y se crean condiciones muy propicias para la propagación del sonido a largas distancias, produciéndose además reflexiones que luego se refractan [15].

Los niveles de presión sonora son más altos en condiciones de estabilidad atmosférica [94]. En una atmósfera estable, el nivel de presión sonora proveniente de los aerogeneradores es superior al que se espera de la producción de sonido basado en la simple extrapolación logarítmica a partir de las velocidades del viento de referencia. El efecto de la disminución de la intensidad de la turbulencia es que el nivel de presión sonora en flujo turbulento también disminuye [95].

El perfil de viento logarítmico basado sólo en la rugosidad de la superficie no se aplica a la atmósfera durante la noche en una atmósfera estable y no siempre en una atmósfera neutra. Sin embargo, se ha evidenciado que las condiciones atmosféricas influyen directamente en la generación y propagación de los niveles de presión sonora en los aerogeneradores [94].

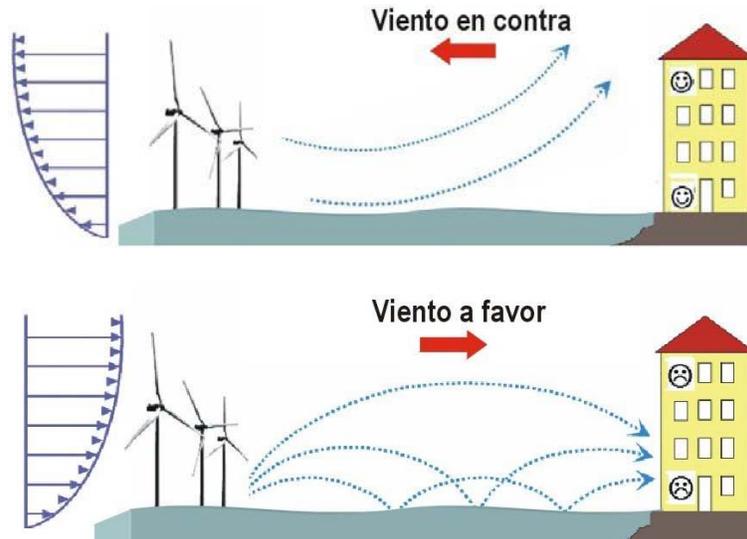
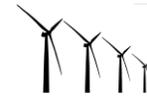


Figura 22. Propagación del sonido con el viento en contra y a favor

Fuente: Cueto, J. *et al.* Metodología para la evaluación del impacto sonoro producido por los parques eólicos en Andalucía. En: Tecniacustica, Gandia, 2006.

La principal causa para que los residentes en las inmediaciones de un parque eólico perciban altos niveles de presión sonora se debe a que la velocidad del viento durante la noche puede, a 100 m de altura, ser sustancialmente mayor de lo esperado si se asume que la atmósfera es neutra. Como consecuencia, un aerogenerador produce más ruido [94]. Como los aerogeneradores cada vez son más altos, la discrepancia entre los niveles real y estimado crece y las quejas pueden aumentar.

Tickell *et al.* compararon tres modelos diferentes de uso comercial para predecir el ruido ambiental proveniente de un aerogenerador [87]. Los modelos evaluados fueron: ENM (Environmental Noise Model), CadnaA (Computer Aided Noise Abatement) y WiTuProp. Se consideraron diferentes escenarios para cada modelo. Ellos encontraron una diferencia significativa entre los resultados estimados utilizando un modelo de ruido diseñado para fuentes industriales estáticas, en comparación con los algoritmos o modelos diseñados específicamente para aerogeneradores. La diferencia entre los resultados del ENM y los del WiTuProp es grande. Esta diferencia varía entre 20 dB a 500 m y de 30 dB a 5000 m. Según ellos, la diferencia principal parece ser la altura de la fuente.



Según Kaliski y Duncan, la metodología de la norma ISO 9613 Parte 2 no es apropiada para la modelación de la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores, dado que los parámetros de modelación deben ajustarse de manera adecuada para tener cuenta de las características únicas de esta fuente [47]. Entre los ajustes que deben tenerse en cuenta están las restricciones para distancias superiores a 100 m, donde el nivel de presión sonora depende de las condiciones atmosféricas y en el modelo se restringen a condiciones favorables a la propagación del sonido (propagación con viento descendente o bajo una inversión térmica).

La variación entre estos resultados hace que sea difícil evaluar el impacto real de los parques eólicos. Por lo tanto, un modelo diseñado específicamente para aerogeneradores permitirá una mejor evaluación del impacto acústico de los parques eólicos.

**3.3.4. Aportes para estimar los factores de atenuación.** A continuación, se presentan algunos aportes realizados por diferentes autores para estimar los factores de atenuación con el propósito de calcular el nivel de presión sonora que proviene de una fuente a cierta distancia. Algunos de ellos están directamente relacionados con los aerogeneradores.

- **Factor de direccionalidad.** Muchos tipos de fuentes de ruido tienen características direccionales tales que el nivel de presión sonora observado a una distancia constante de la fuente varía de acuerdo con la orientación de la fuente. Estas características a menudo no son evidentes y por lo general es muy difícil establecer la medida en que el nivel de presión sonora en una dirección particular puede variar desde el valor promedio citado [64].

La distribución de los componentes individuales de las fuentes de ruido asociados con una fuente de ruido compleja afectará el patrón del campo acústico emitido por ella. Esto es relevante para la direccionalidad de la fuente y con la forma en la cual el campo de la fuente de sonido va a interactuar con el ambiente circundante. Al igual que con la direccionalidad, a menudo es muy difícil establecer la distribución de las fuentes de sonido sobre una fuente compleja a partir de los datos de emisión disponibles [64].



La distribución local de la dirección del viento y la velocidad causan diferentes niveles de inmisión sonora a distancias considerables del aerogenerador y el efecto estimado en el entorno es de  $\pm 3$  dB [39].

En condiciones inestables, el pequeño gradiente de velocidad del viento con la altura hace que los fenómenos de refracción atmosférica sean menos notorios. En consecuencia, los rayos sonoros se curvan menos y están menos apantallados por el suelo a gran distancia y el efecto estimado en el entorno es de 2 dB [39].

Para los aerogeneradores, el nivel de presión sonora en banda ancha medido en un punto con dirección de viento cruzado es de 2 o 3 dB menor que el nivel de presión sonora en el punto de referencia en función de la velocidad del viento. El sonido de borde de salida tiene una característica de direccionalidad dipolo y por lo tanto varía (disminuye) rápidamente en función de la dirección. Para el intervalo de frecuencias del nivel de potencia sonora del borde de salida la diferencia es 3 o 4 dB variando con la velocidad del viento [31].

Según Wondollek, los aerogeneradores no son fuentes puntuales omnidireccionales tal como lo propone el modelo de la ISO 9613 Parte 2 [100]. El nivel de presión sonora cambia con las posiciones del receptor por efecto de la direccionalidad del sonido [36, 101 y 102]. La radiación del ruido producido por un aerogenerador se comporta como una fuente de sonido dipolo. Debido al efecto dipolo del sonido irradiado por el aerogenerador, la inmisión de sonido es menor en dirección perpendicular al eje y el efecto estimado en el entorno es de  $\pm 2$  dB [39]. La figura 23 muestra esta propiedad para el caso de un único aerogenerador [101 y 102].

Debido a que las aspas están inclinadas, el patrón de direccionalidad dipolo tiene una forma no simétrica. Esto es una consecuencia de la inclinación del aspa que lleva hacia atrás el borde de salida y el borde de ataque hacia adelante. Además, debido a que el borde de salida se coloca detrás del plano del rotor las posiciones contra el viento van a sufrir una mayor reducción del ruido en comparación con posiciones a favor del viento [31].

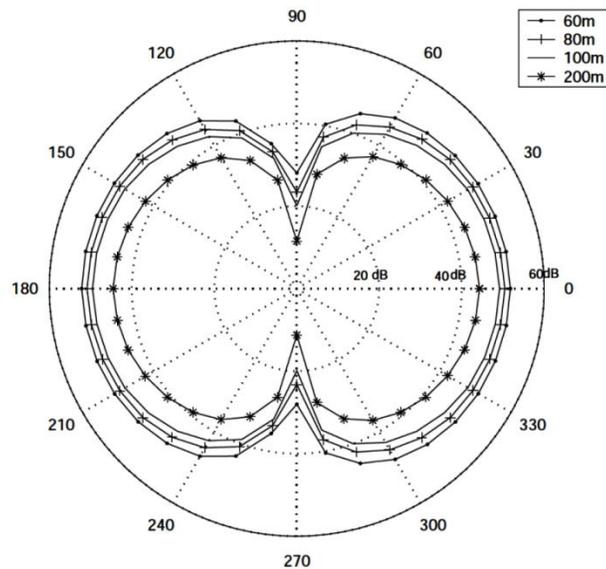


Figura 23. Nivel de presión sonora en diferentes posiciones del observador

Fuente: Zhu, W. Modelling of noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2004. and Zhu, W. *et al.* Modeling of aerodynamically generated noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2005.

El círculo de la figura 23 también se puede presentar a lo largo de un eje recto como en la figura 24 con dos “entradas” que corresponden a la dirección de viento cruzado o a los niveles de presión sonora en los puntos de medición en los costados. En ella se observa que hay una diferencia de 5 dB entre las dos “entradas”, lo cual se debe a que el sonido radiado hacia el suelo es más fuerte cuando el rotor está girando hacia abajo en comparación de cuando está girando hacia arriba [31].

En la figura 25 se muestra la direccionalidad del sonido en diferentes posiciones del observador. Las curvas se basan en los niveles de presión sonora corregidos por el ruido de fondo para todos los puntos de medición. En esta figura se hizo la suposición de que el nivel de presión sonora a 270° es el mismo que a 90°. Esto no es cierto porque esencialmente la simetría no se puede asumir (ver figura 24). Sin embargo, se da una mejor comprensión de la direccionalidad general alrededor del aerogenerador [31].

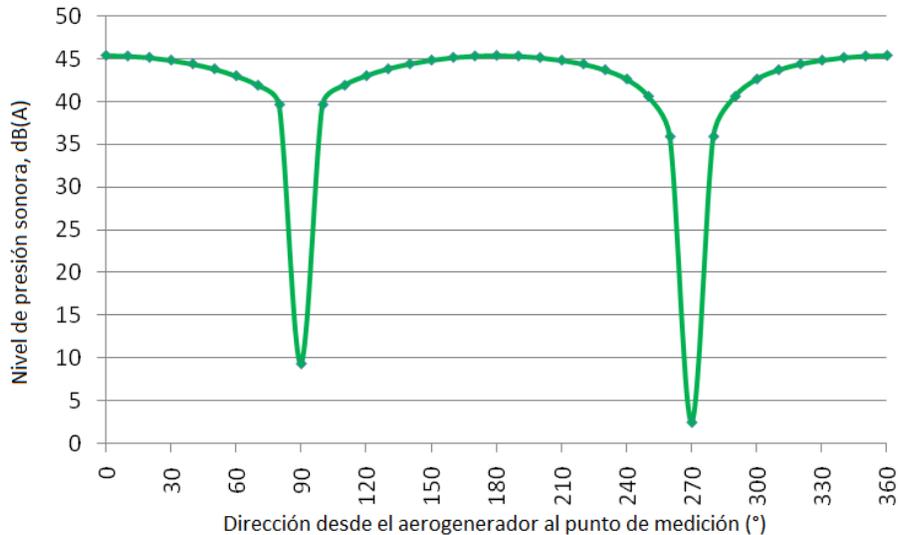


Figura 24. Nivel de presión sonora en diferentes posiciones del observador presentado como un diagrama de puntos

Fuente: Friman, M. Directivity of sound from wind turbines. A study on the horizontal sound radiation pattern from a wind turbine. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research. Stockholm, 2011.

En la figura 25 se observa cómo el nivel de presión sonora es diferente dependiendo de la posición del observador y la velocidad del viento. Se asume que el viento sopla desde los  $180^\circ$  a los  $0^\circ$ : el ángulo de  $0^\circ$  corresponde a la posición viento abajo del aerogenerador y el ángulo de  $180^\circ$  a la posición viento arriba. El ángulo de  $90^\circ$  es perpendicular a la dirección del viento (viento cruzado) [31].

En la figura 26 se observa los factores de direccionalidad medidos en diferentes posiciones del observador y varias velocidades del viento medidos entre 250 y 800 Hz [31].

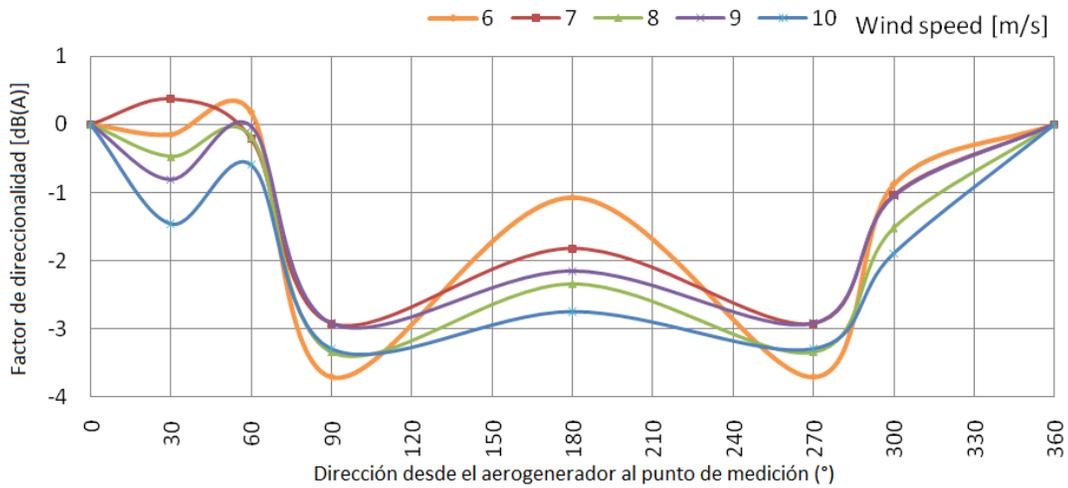


Figura 25. Factor de direccionalidad en diferentes posiciones del observador

Fuente: Friman, M. Directivity of sound from wind turbines. A study on the horizontal sound radiation pattern from a wind turbine. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research. Stockholm, 2011.

Una cualidad importante del ruido del borde de salida es su factor de direccionalidad, que es diferente al de una fuente monopolo o dipolo. La figura 27 ilustra el factor de direccionalidad del nivel de potencia sonora en el borde de salida, suponiendo que la frecuencia del sonido emitido desde el borde de salida es lo suficientemente alta de modo que la superficie de sustentación puede ser considerada como un medio plano semi-infinito [24].

Buena parte del sonido se irradia viento abajo del plano del rotor (con lo que se conoce como un patrón de direccionalidad cardioide), en la dirección de rotación, mientras que poco se irradia viento arriba. Esto explica el carácter silbante del ruido del aerogenerador por el que un observador en tierra recibirá periódicamente fluctuaciones en la energía acústica a medida que el aspa gira [24].

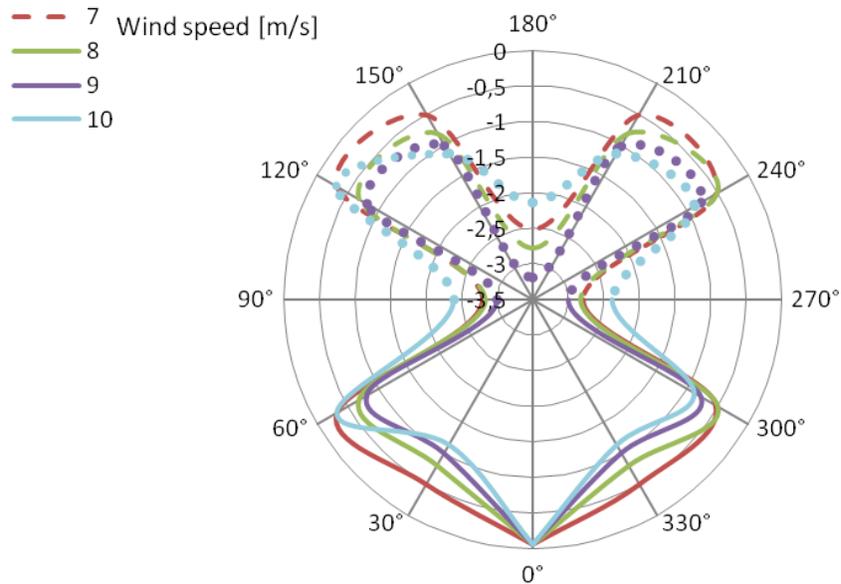


Figura 26. Factores de direccionalidad medidos en diferentes posiciones del observador y varias velocidades del viento

Fuente: Friman, M. Directivity of sound from wind turbines. A study on the horizontal sound radiation pattern from a wind turbine. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research. Stockholm, 2011.

La señal acústica recibida tiene tanto un carácter de alta frecuencia (debido a la turbulencia en la capa límite del aspa) y una modulación de la amplitud de baja frecuencia (debido a la combinación de la direccionalidad y la amplificación convectiva del sonido debido a la rotación del aspa) [24].

La tabla 3 presenta el patrón de direccionalidad y los mecanismos que producen otros tipos de ruido provenientes de los aerogeneradores.

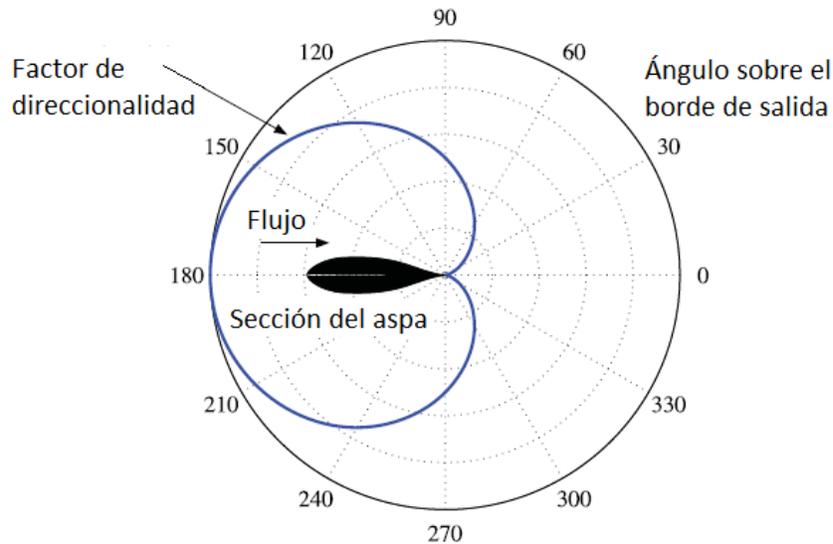
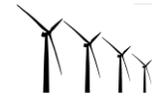


Figura 27. Factor de direccionalidad del nivel de potencia sonora en el borde de salida para el caso de alta frecuencia

Fuente: Doolan, C., Moreau, D. and Brooks, L. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. En: Acoustics Australia. Vol. 40, No. 1. Sidney, 2012.

Las ecuaciones 8 y 9 han sido desarrolladas para determinar el factor de direccionalidad para el ruido del borde de salida de alta frecuencia y las fuentes de ruido de baja frecuencia en los aerogeneradores, respectivamente [61 y 66]. La ecuación 132 ha sido desarrollada para determinar el factor de direccionalidad para el nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida en los aerogeneradores [63].

Estas ecuaciones son función de los ángulos de direccionalidad y el número de Mach, lo cual coincide con lo expresado por Friman y Hoogzaad [31 y 39], en cuanto a que la direccionalidad del sonido no sólo es función de la posición del receptor respecto a la fuente, sino también de la velocidad del viento.



Tabla 3. Patrón de direccionalidad de otros tipos de ruido provenientes de los aerogeneradores.

Tipo	Patrón de direccionalidad	Mecanismo
Ruido por la interacción en el borde de entrada	Dipolo	Turbulencia atmosférica que incide sobre el borde de salida del rotor
Ruido del borde de salida	Cardiode	Capa límite turbulenta pasando sobre el borde de salida del rotor
Ruido por la interacción torre-aspas	Dipolo	Aspa del rotor pasa a través del flujo perturbado por la torre
Ruido de la punta	Cardiode	Turbulencia interactuando con la punta del rotor
Ruido tonal aerodinámico	Cardiode	Desprendimiento de los vórtices/o circuito de retroalimentación resonante en la capa límite del aspa del rotor

Fuente: Doolan, C., Moreau, D. and Brooks, L. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. En: Acoustics Australia. Vol. 40, No. 1. Sidney, 2012.

Los factores de direccionalidad estimados con las ecuaciones 8, 9 y 132 se utilizan en el argumento del logaritmo de las ecuaciones 29, 50, 80, 81, 82, 86, 130, 139 y 147 para calcular la amplitud (intensidad) del sonido y no para tener en cuenta la distribución desigual de la emisión de sonido.

- **Atenuación por divergencia geométrica.** En los casos en que las fuentes de ruido son más complejas y/o debe tenerse en cuenta la influencia de las características significativas del ambiente físico, se necesita información más sólida y detallada para describir la propagación del ruido. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los métodos de ingeniería proporcionarán la base más adecuada para predecir los niveles de presión sonora en campo libre. Los métodos se basan en una combinación de principios acústicos y el conocimiento empírico para proporcionar un medio para estimar la influencia de una serie de fenómenos [64].

Según Van den Berg, Zhu y Guarnaccia *et al.*, los aerogeneradores se comportan como una fuente puntual que se encuentra ubicada a la altura del eje del aerogenerador y la disminución de los niveles sonoros con la



distancia corresponde a la propagación esférica [36, 96 y 102]. Para Zhu, esta suposición es válida siempre y cuando la distancia entre el receptor y el aerogenerador sea de por lo menos 2,5 veces el diámetro del rotor [101]. Mientras que para Van den Berg este comportamiento se logra sin tener en cuenta la atenuación debido a la absorción [96]. Sin embargo, Guarnaccia *et al.* sólo hicieron mediciones en banda ancha con distancias entre la fuente y el receptor inferiores a 30 m [36].

Wondollek indica que suponer una propagación esférica es contradictorio y da como resultado niveles de presión sonora más bajos en el punto de inmisión, especialmente para distancias considerables. Una debilidad del modelo ISO 9613 Parte 2 es que sólo ha sido validado para alturas de la fuente y el receptor de hasta 30 m para distancias de hasta 1000 m con una precisión de 3 dB [100].

Martín Bravo *et al.* encontraron que la propagación del sonido de los aerogeneradores se asemeja más a un modelo de fuente lineal que puntual. Esto, sin tener en cuenta otros factores de atenuación [57].

La fuente lineal emite energía con igual intensidad desde todos sus puntos distribuyendo la energía en forma de frentes de onda cilíndricos [28]. La relación de la variación de la energía sonora en función de la distancia es:

$$A_{geo} = 10 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) + 8 \quad (169)$$

Hubbard y Shepherd observaron que, en ciertas condiciones atmosféricas, por ejemplo, con inversión térmica, la propagación más allá de una cierta distancia se parece más a la propagación cilíndrica, que sólo da 3 dB de reducción al duplicar la distancia [40].

Por encima del nivel del mar, las directrices suecas generalmente asumen la propagación cilíndrica más allá de una distancia de 200 m, de acuerdo a los resultados obtenidos por Bolin *et al.* Con base en esto, Møller, H. and Sejer, C. obtuvieron mejores resultados empleando una propagación esférica hasta los 200 m y una propagación cilíndrica más allá de una distancia de 200 m para el caso de un aerogenerador como fuente de sonido [60].



Con la propagación cilíndrica más allá de 200 m, se aplica la siguiente ecuación (para distancias superiores a 200 m) [60]:

$$A_{geo} = 20 \log\left(\frac{200}{r_0}\right) + 10 \log\left(\frac{r}{200}\right) + 11 \quad (170)$$

En la cual  $r$  es la distancia desde la fuente al receptor, en metros y  $r_0$  es la distancia de referencia. A este modelo de propagación se le conoce como divergencia combinada.

Lo anterior concuerda bastante bien con los resultados analíticos y experimentales obtenidos por Guarnaccia *et al.* en cuanto a la forma como decae del nivel de intensidad sonora a cortas distancias entre la fuente y el receptor para el caso de un aerogenerador como fuente de sonido [36].

Los dos modelos de propagación (esférico y cilíndrico), a cierta distancia entre la fuente y el receptor se comportan como ondas planas, y en ambos casos, la atenuación por divergencia geométrica es independiente de la frecuencia.

Lo anterior lleva a la conclusión de que se deben explorar ambos modelos para la atenuación por divergencia geométrica en la predicción de los niveles sonoros asociados a los parques eólicos, así como la combinación de los mismos.

- **Atenuación por efectos del suelo.** El efecto del suelo en la propagación acústica ha sido investigado a fondo en las últimas décadas. Un gran número de trabajos teóricos se han publicado sobre este tema con una amplia gama de resultados y conclusiones diferentes, y se han desarrollado un sinnúmero de modelos empíricos para ayudar en la predicción del nivel de presión sonora [50].

Los modelos de predicción desarrollados para incluir una estimación de las pérdidas por absorción del suelo en la atenuación del sonido se basan en una combinación de consideraciones teóricas y empíricas. Ellos varían en complejidad y pueden proporcionar valores del efecto del suelo que varían ampliamente. Las condiciones de propagación en términos de parámetros atmosféricos pueden ser responsables de una variación



relativamente grande en los resultados obtenidos usando diferentes modelos [50].

Independientemente del tipo de suelo entre la fuente y el receptor y su composición (homogénea o mixta), su influencia en la atenuación de la onda sonora a lo largo de la trayectoria de propagación es importante. Esta atenuación depende de la frecuencia, el ángulo de incidencia y la distancia de propagación. A menor ángulo de incidencia y mayor frecuencia, más fuerte es la atenuación. Este principio general se puede aplicar en gran medida a superficies absorbentes naturales. Por lo tanto, no es equivalente para determinadas estructuras porosas con una estructura interna rígida. En ese caso, los fenómenos particulares relacionados con la onda superficial pueden inducir amplificaciones de nivel de presión sonora para frecuencias superiores a 1 kHz y ángulos de incidencia mayor a 10 grados [8].

Para la propagación a corta distancia (menos de 100 m), donde los rayos acústicos pueden aproximarse a líneas rectas, Harris presenta valores de la atenuación del suelo para diferentes frecuencias y clasificación de las superficies del suelo, para el caso de diferentes alturas de la fuente (0,01; 0,3 y 1,2 m) y una altura del receptor de 1,8 m [37].

La atenuación en posiciones intermedias puede obtenerse mediante interpolación de los valores que propone. Para la propagación por encima de un suelo mixto, la atenuación del suelo es el valor resultante de acuerdo con la proporción de suelo blando y duro [37].

Guarnaccia *et al.* indican que el suelo se puede considerar como si fuera completamente absorbente dado que por lo general los parques eólicos están diseñados y construidos en entornos rurales [36].

Sólo tener como opción elegir entre dos tipos diferentes de suelo es un enfoque muy simplificado a la hora de predecir el efecto suelo. En otras palabras, el método carece de un modelo de impedancia que tenga en cuenta la resistividad de flujo del suelo y la frecuencia de las ondas de sonido en consideración [100].

Las ecuaciones de la tabla 2 muestran que, por ejemplo, si la fuente es de 80 m de altura (altura del eje) y el receptor es colocado a 1,6 m de



altura, con una distancia de 500 m entre los dos, sobre un suelo duro,  $A_{suelo}$  sería constante e igual a -3 dB (63-8000 Hz) y 4,3 dB para suelo poroso (500 Hz). Por encima de 125 Hz,  $A_{suelo}$  será de aproximadamente 0 dB para suelo poroso. Así, un suelo poroso podría en este caso, producir una atenuación del suelo igual a cero, mientras que un suelo duro podría ocasionar la amplificación (nótese el cambio de signo cuando los valores se introducen en la ecuación 168). También se debe tener en cuenta que la altura de la fuente no tiene ninguna influencia en el efecto del suelo cuando es superior a 10 m, y el efecto del suelo es independiente del tamaño de la región media [100].

Si la altura del eje es de 80 m y la distancia proyectada es inferior a 2.445 m la atenuación del suelo sería cero para suelo poroso y de 3 dB para suelo duro. Por lo tanto, queda implícito que el tamaño de la región media no juega ningún papel en la atenuación del suelo para el modelo de la norma ISO 9613 Parte 2. Por otra parte, después de 10 m, la altura de la fuente no tiene ninguna influencia sobre la atenuación de suelo, lo cual también suena poco realista. Estos son otros ejemplos de cómo el modelo de la norma ISO 9613 Parte 2 no es aplicable para distancias considerables y cuando la fuente y el receptor están o tienen una altura significativa [100].

Kaliski y Duncan mostraron que la norma ISO 9613 Parte 2 se adapta mejor cuando la atenuación del suelo no se tiene en cuenta [47]. Esto también es válido para el método de CONCAWE [12].

De acuerdo al boletín 2 de marzo de 2009 del Institute of Acoustics, el uso de  $G = 0,5$  y una altura del receptor de 4 m por lo general da lugar a estimaciones realistas de los niveles de presión sonora en los receptores en la dirección del viento de los aerogeneradores [69 y 72]. En un estudio realizado en dos parques eólicos de Portland se encontró que el método de predicción de la norma ISO 9613 Parte 2, usando una absorción del suelo del 50% da una mejor correlación entre los niveles de presión sonora medidos y estimados [29].

La Autoridad de Protección Ambiental de Australia recomienda utilizar un enfoque conservador para predecir el ruido de los parques eólicos mediante el cálculo de los niveles de presión sonora en bandas de



octava en el intervalo de 63 a 4000 Hz usando la atenuación para suelo duro [27].

Si bien la metodología de la norma ISO 9613 Parte 2 específicamente recomienda la atenuación espectral del suelo para terreno plano o con pendiente constante con  $G = 1$ , en este caso, se subestiman los niveles de presión sonora. Esto puede deberse a la altura del aerogenerador en comparación con las fuentes de ruido típicas. Es decir, las ondas de sonido pueden no interactuar significativamente con el suelo sobre esa distancia. También puede deberse al hecho de que el sonido de los aerogeneradores no viene desde un único punto. Generalmente se asume un solo punto a la altura del eje, pero es más probable que se asemeje a una fuente de área circular. Por último, los aerogeneradores a menudo operan con velocidades de viento superiores a las estipuladas por la norma ISO 9613 Parte 2. La combinación de altas velocidades de viento y una fuente de ruido elevada puede resultar en una mayor refracción hacia abajo [47].

Un análisis de los datos experimentales de Parkin y Scholes provee una serie de curvas que describen la variación de la atenuación con la distancia para suelo blando en función de las frecuencias en bandas de octava en el intervalo de 63 Hz a 4 kHz [12].

La ecuación general para determinar la atenuación por efectos del suelo en el método de CONCAWE es [12]:

$$A_{suelo} = a + b(\log r) + c(\log r)^2 + e(\log r)^3 \quad (171)$$

En la cual:

$a, b, c$  y  $e$  = Son constantes que dependen de la estabilidad y la frecuencia.

$r$  = Distancia entre la fuente y el receptor, m.

La tabla 4 presenta las constantes del método de CONCAWE para determinar la atenuación por efectos del suelo.



Tabla 4. Constantes para determinar la atenuación por efectos del suelo en el método de CONCAWE.

Frecuencia (Hz)	Constantes			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>
63	33,4	-35,04	9,159	-0,3508
125	8,96	-35,8	20,4	-2,85
250	-64,2	48,6	-9,53	0,634
500	-74,9	82,23	-26,921	2,9258
1000	-100,1	104,68	-34,693	3,8068
2000	-7,0	3,5		
4000	-16,9	6,7		

Nota: No usar para distancias inferiores a 100 m.

Fuente: Elaboración propia basado en las ecuaciones del método de CONCAWE.

La propagación del sonido en la atmósfera cerca del suelo es sensible a las propiedades acústicas de la superficie del suelo, así como a las condiciones meteorológicas [4]. De acuerdo con Embleton, las condiciones meteorológicas en climas templados, principalmente la inversión térmica y el viento, reducen considerablemente los efectos del suelo [50].

La propagación del sonido cerca del suelo depende de la impedancia de la superficie [3]. Las superficies porosas permiten que el sonido penetre y por lo tanto sea a la vez absorbido, sometiéndolo a un cambio de fase a través de la fricción y los intercambios térmicos [4]. Sobre las superficies porosas, en las frecuencias bajas, se presenta el mismo comportamiento que sobre una superficie acústicamente dura ya que las longitudes de onda más largas son menos capaces de penetrar en los poros. La porosidad tiene su influencia principal en las frecuencias más altas (> 1 kHz) [3].

El comportamiento de la propagación del sonido sobre un suelo de impedancia finita se deriva de la analogía con la teoría de las ondas electromagnéticas. La geometría de esta situación se ilustra en la figura



28. Cuando el sonido se propaga cerca del suelo, la onda de sonido transmitida directamente desde el receptor interactúa con el sonido reflejado desde el suelo. La parte reflejada de la onda deja la superficie en el ángulo de incidencia, con su amplitud y fase modificadas por la impedancia de la superficie. La onda reflejada se propaga hacia el receptor, junto con la onda directa de la fuente [52]. La atenuación y el desplazamiento de la fase se expresan por el llamado coeficiente de reflexión esférica de la onda. El coeficiente de reflexión de la onda esférica depende de la distancia  $R_2$ , el ángulo de incidencia  $\theta$  y la impedancia del suelo. Debido a la diferencia en la distancia de desplazamiento y el desplazamiento de la fase desde la reflexión, habrá una diferencia en la fase entre las ondas de sonido directa y reflejada. En general, la diferencia de fase aumenta con la frecuencia [18].

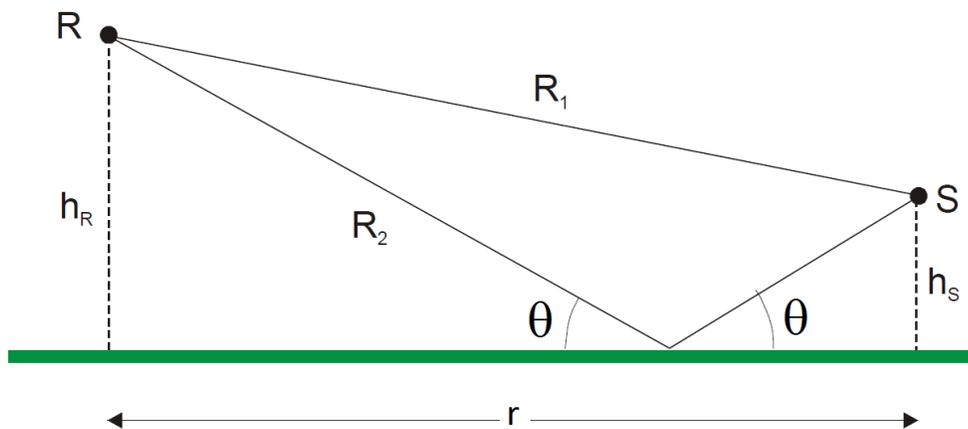


Figura 28. Propagación sobre terreno plano

Fuente: Danish Electronics, Light & Acoustics. Nordic environmental noise predictions methods, Nord2000. Lyngby, 2001.

Dependiendo de sus fases relativas y amplitudes, se pueden añadir interferencias positivas o negativas [52]. A frecuencias muy bajas, la diferencia de fase es pequeña, y la presión sonora combinada se duplica con relación a la presión de sonido sin el suelo produciendo un efecto del suelo de 6 dB. A una frecuencia más alta, la diferencia de fase se incrementará a  $180^\circ$  (fases opuestas) en cuyo caso los campos directo y reflejado tienden a anularse entre sí. Sin embargo, debido a diferencias



relativamente pequeñas en la amplitud causadas por la desigualdad entre la distancia de desplazamiento y la atenuación en la reflexión, el campo de sonido no está totalmente cancelado. Aumentando más la frecuencia, la diferencia de fase llega a ser  $360^\circ$  (en fase) creando otra interferencia positiva con un efecto del suelo cercano a 6 dB. Este patrón, donde las interferencias positivas y negativas se reemplazan unas a otras continúa en las frecuencias más altas. Sin embargo, como el patrón se repite aproximadamente en una escala de frecuencia lineal, debido a un promedio dentro de las bandas, a menudo no se observa a altas frecuencias cuando los resultados se muestran como espectros en bandas de tercios de octava [18].

Las propiedades acústicas de la superficie del suelo se determinan por la impedancia característica normalizada. Sin embargo, la impedancia se define indirectamente mediante la resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo (relacionada con el inverso de la permeabilidad). La resistividad del flujo es un parámetro que describe qué tan acústicamente blando es el suelo. A medida que la resistividad del flujo es más pequeña, más “acústicamente blando” resulta ser el suelo. Un terreno totalmente reflectante corresponde a una resistividad de flujo infinita [18].

La atenuación del suelo se calcula a través del coeficiente de reflexión esférica de la onda sonora como [69]:

$$A_{suelo} = 20 \log \frac{1}{|Q|} \quad (172)$$

El coeficiente de reflexión esférica se relaciona con el coeficiente de reflexión de la onda plana  $R_p$  a través de la siguiente ecuación [5, 58, 69 y 77]:

$$Q = R_p + (1 - R_p)F \quad (173)$$

En la cual  $F$  es el coeficiente de pérdidas en el límite de la interacción del frente de onda con la superficie de impedancia finita, el cual es una función de la distancia, la impedancia del suelo y el ángulo de incidencia.



Cuando el ángulo de incidencia es mayor de  $5^\circ$ , entonces,  $F \rightarrow 0$ , lo que significa que la orbicularidad del frente de onda no necesita tenerse en cuenta [76]. El coeficiente de reflexión de onda plana se determina a partir de la relación [33, 52, 77 y 100]:

$$R_p = \frac{\sin \theta - Z_{\text{aire}}/Z_{\text{suelo}}}{\sin \theta + Z_{\text{aire}}/Z_{\text{suelo}}} \quad (174)$$

En la cual:

$\theta$  = Ángulo de incidencia de la onda sonora,  $^\circ$

$Z_{\text{aire}}$  = Impedancia característica del aire a  $20^\circ\text{C}$  ( $415 \text{ Ns/m}^3$ )

$Z_{\text{suelo}}$  = Impedancia compleja del suelo,  $\text{Ns/m}^3$

Aunque se han propuesto modelos más complejos, se ha encontrado que es suficiente utilizar un solo parámetro, la resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo, para describir las propiedades de absorción de una superficie. El modelo de resistividad flujo sólo es válido para las superficies de porosidad constante [52].

Diferentes aproximaciones se han formulado para determinar la impedancia suelo [69]. El modelo de Delany-Bazley se caracteriza por su sencillez, dado que requiere sólo un parámetro, la resistividad de flujo. Se trata de un modelo empírico procedente de un análisis de regresión de las propiedades acústicas y resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo [51].

La impedancia se calcula a partir de la resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo por medio del modelo de impedancia de Delany-Bazley [33, 51, 52, 77 y 100]:

$$Z_{\text{suelo}}/Z_{\text{aire}} = 1 + 9,08 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,75} + i11,9 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,73} \quad (175)$$

En la cual:

$f$  = Frecuencia, Hz

$\sigma$  = Resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo,  $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$

Generalmente, la impedancia de las superficies porosas disminuye al aumentar la frecuencia [3].



La resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo y la rugosidad del suelo pueden ser definidas por las descripciones verbales, como se muestra en la tabla 5, para diferentes tipos de suelo [18].

Tabla 5. Clasificación de los tipos de impedancia del suelo.

Clase de suelo	Resistividad representativa del flujo de aire en el suelo $g/(s \cdot cm^2)$	Descripción de la superficie
A	12,5	Muy suave (nieve o musgo)
B	31,5	Suelo de bosque suave (corto, similar a arbustos densos o musgo espeso)
C	80	Suelo sin compactar, suelto (Césped, hierba, tierra suelta)
D	200	Suelo normal sin compactar (Suelo de bosques, pastizales)
E	500	Terreno compactado y grava (Césped compacto, zona de parqueo)
F	2000	Suelo denso compacto (Camino de grava, estacionamiento)
G	20000	Superficie dura (Asfalto denso, concreto, agua)

Fuente: Danish Electronics, Light & Acoustics. Nordic environmental noise predictions methods, Nord2000. Lyngby, 2001.

Algunos valores típicos de la resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo para diferentes superficies se muestran en la tabla 6.

- **Atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica.** La estabilidad atmosférica tiene un efecto fuerte sobre el perfil vertical del viento y la fuerza de la turbulencia atmosférica [96]. La variación de la temperatura tiene influencia sobre la densidad del aire y, por lo tanto, sobre la velocidad de propagación de las ondas sonoras.

Hace relativamente poco tiempo que se empezó a tener en cuenta la estabilidad atmosférica en la propagación del sonido proveniente de los aerogeneradores. Debido a las alturas que los aerogeneradores modernos están alcanzando, el tema se ha vuelto cada vez más importante. Se ha demostrado que en una atmósfera estable el nivel de presión sonora



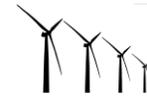
debido a los aerogeneradores es más alto que el esperado de la producción de sonido basado en una simple extrapolación logarítmica a partir de las velocidades del viento de referencia [95].

Tabla 6. Resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo para diferentes superficies del suelo.

Descripción de la superficie	Resistividad representativa del flujo de aire en el suelo $g/(s \cdot cm^2)$
Suelo arado sin vegetación	10 - 20
Nieve recién caída y seca	15 - 30
Nieve blanca	25 - 50
Campo sembrado	50 - 70
En el bosque, pino o abeto	20 - 80
Suelo con malezas, vegetación de 30 cm de altura aproximadamente y de 1 a 2 mm de diámetro	90 - 95
Arena	100 - 140
Hierba, pasto áspero	150 - 300
Suciedad en carretera, mal definida, pequeñas rocas de hasta 10 cm de diámetro	300 - 800
Tierra compacta y dura	400 - 500
césped mojado	700 - 850
Sedimentos de arena, compactada	800 - 2500
Trozos de piedra caliza limpia, capa gruesa (malla 12-25 mm)	1500 - 4000
Tierra, expuesta y llena de lluvia	4000 - 8000
Polvo de cantera, fino, compactado muy duro por los vehículos	5000 a 20.000
Asfalto, sellado por el polvo y en uso	> 20000
Concreto	10000 - 100000

Fuente: Lamancusa, J. S. Engineering Noise Control; y González, J. *et al.* Comparative analysis of several acoustic impedance measurements.

Las condiciones atmosféricas juegan un papel determinante en el nivel de presión sonora debido a un aerogenerador en un lugar determinado en un momento dado. Los modelos de predicción consideran los efectos atmosféricos de diferentes maneras. La norma ISO 9613 Parte 2 considera condiciones de propagación durante a una inversión térmica moderada viento abajo simultáneamente en todas las direcciones (es decir, el modelo favorece la propagación del sonido desde una fuente a cualquier receptor en cierto grado). Sin embargo, no tiene en cuenta la situación ambiental absoluta en el peor de los casos y, por consiguiente, puede haber



momentos en los que el impacto real supera al previsto, debido a condiciones ambientales poco frecuentes o extremas [16].

La estabilidad atmosférica no sólo es relevante para los niveles de presión sonora producidos por un aerogenerador, sino también por el carácter del sonido. En condiciones donde la atmósfera es estable, los aerogeneradores a cierta distancia pueden producir un sonido parecido al de un “golpeteo” que no es evidente durante el día [96].

La refracción del sonido debido a la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica tiene un efecto importante en el nivel de presión sonora recibido. La atenuación es función de la frecuencia, la distancia y la estabilidad atmosférica [12].

El incremento de la velocidad del viento a medida que aumenta la altura hace que el fenómeno de propagación no resulte simétrico con respecto a la fuente, dando lugar a zonas de sombra o reforzamiento acústico. La gran variabilidad en la dirección y velocidad del viento hace muy difícil evaluar su influencia en la práctica [28].

En condiciones estables se presentan los niveles de presión sonora más altos y en condiciones neutras, el nivel de presión sonora es superior al esperado en la mayor parte del tiempo. El efecto de pasar de una atmósfera inestable a una estable es que, en relación con una velocidad del viento a 10 m de altura durante el día, por la noche hay una velocidad del viento superior a la altura del eje del aerogenerador y por lo tanto un mayor nivel de potencia sonora [96]. La magnitud de los efectos al aumentar la estabilidad depende de las propiedades de los aerogeneradores tales como la velocidad de giro, diámetro del rotor y altura [95].

Según Van den Berg, los perfiles de viento varían significativamente dependiendo de la estabilidad atmosférica. En su trabajo se refirió a las deficiencias asociadas con la realización de la evaluación basada en velocidades del viento a una altura de referencia de 10 metros sobre el nivel del suelo, y como para una velocidad dada del viento a 10 metros, los niveles de inmisión de sonido pueden variar hasta en 15 dB entre el día y la noche [94].



Los aerogeneradores son cada vez de mayor tamaño y a menudo se instalan en torres de 80, 90 y más metros. La velocidad del viento a esta altura en comparación con la velocidad del viento a 10 metros de altura podría ser subestimada. En un informe publicado por Rijksuniversiteit Groningen se encontró que la velocidad del viento a 80 metros era 4,9 veces más alta que a 10 metros durante la noche y no 1,4 veces como fue calculada [86].

Según Dawson, B. and Mackenzie, N., la velocidad del viento a la altura del eje permitiría una predicción precisa de los niveles de presión sonora a nivel del suelo en condiciones de estabilidad atmosférica, dado que la velocidad del viento (y el ruido de fondo correspondiente) puede ser significativamente inferior al nivel del suelo [20].

El perfil de velocidad de viento y las condiciones de turbulencia afectan la potencia y el ruido generado por el aerogenerador y se ven afectados por el terreno, topografía local, y la estabilidad atmosférica [20].

La velocidad del viento a una altura  $z_1$  se puede deducir de la velocidad del viento a una altura  $z_2$  con una ley potencial [20, 88, 92 y 96]:

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^p \quad (176)$$

La ecuación 176 es una fórmula de ingeniería que permite expresar el grado de estabilidad en un solo número (el exponente  $p$ ), pero no tiene una base física [96]. La figura 29 muestra el efecto que tiene la estabilidad atmosférica sobre el perfil de la velocidad medio.

El exponente de la ley de potencia  $p$  generalmente varía desde aproximadamente 0,1 en una tarde soleada hasta aproximadamente 0,6 durante una noche despejada. Cuanto más grande es el exponente de la ley de potencia, mayor será el gradiente vertical de la velocidad del viento. Aunque la ley de potencia es una aproximación útil de ingeniería para determinar el perfil medio de la velocidad del viento, el perfil real se desviará de esta relación [88].

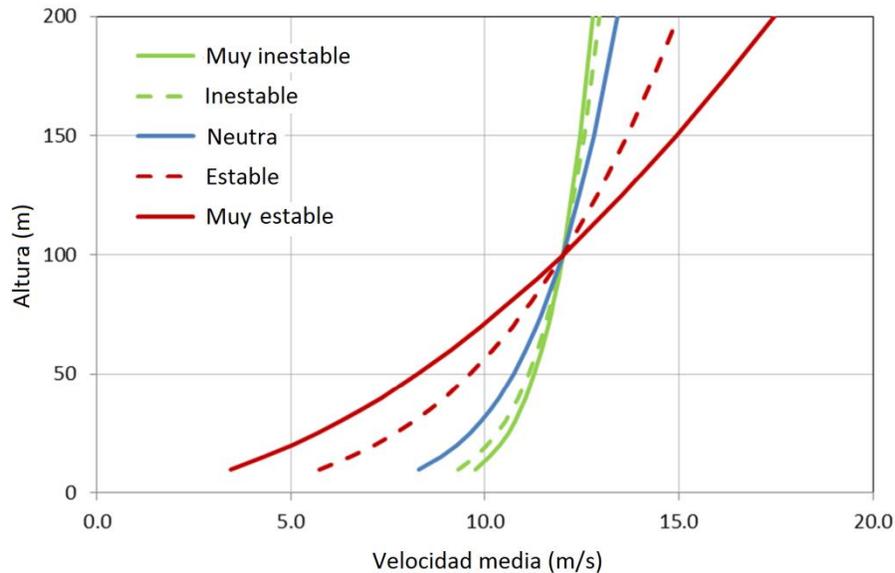


Figura 29. Perfil de velocidad medio en función de la estabilidad

Fuente: Dawson, B. and Mackenzie, N. Meteorological stability impacts on wind turbine noise assessments. Australian Acoustical Society. Proceedings of Acoustics 2013. Victor Harbor, 2013.

Los valores del exponente de la ley de potencia para un sitio específico se pueden determinar con datos de velocidad del viento a dos alturas diferentes mediante la siguiente ecuación [88]:

$$p = \frac{\ln(u_2) - \ln(u_1)}{\ln(z_2) - \ln(z_1)} \quad (177)$$

El exponente de la ley de potencia es una función de la estabilidad, la rugosidad de la superficie y el intervalo de alturas sobre el cual se determinan las velocidades del viento. La estabilidad se refiere al estado de la atmósfera cerca de la tierra. Una atmósfera inestable se produce cuando el suelo calienta el aire más bajo durante el día y el aire superior permanece frío. Esta es una situación inestable debido a que el aire caliente, siendo menos denso, es propenso a levantarse y ser reemplazado con el aire frío superior que, al ser más denso, gravita hacia abajo para reemplazarlo. Este movimiento vertical y mezcla de aire desestabiliza el patrón de flujo de aire horizontal y hace que la velocidad del viento sea



menos variable con la altura. Al ponerse el sol, el suelo se enfría rápidamente y el aire adyacente también enfría [88].

El aire más caliente, al ser menos denso, se dispersa gradualmente a las zonas altas. La mezcla vertical descrita anteriormente disminuye y ahora la situación llega a ser estable (el aire caliente en los niveles superiores y el aire frío en los niveles inferiores). Esto se conoce como inversión térmica. En una atmósfera estable, el flujo de aire horizontal es laminar (es decir, se mueve esencialmente en forma horizontal sobre el suelo) y, en ausencia de perturbaciones verticales, es capaz de desarrollar un fuerte gradiente de cizallamiento horizontal con el aire superior moviéndose más rápido que el de aire inferior. Sin embargo, los fuertes vientos pueden romper una inversión térmica debido a los efectos de mezcla [88].

La rugosidad superficial también es un factor que afecta el exponente de la ley de potencia. En términos generales, a mayor rugosidad mayor será el exponente de la ley de potencia. Como la estabilidad y la rugosidad de la superficie varían dependiendo de la dirección del viento y la estación del año, deben ser determinados de forma independiente para cada una de esas categorías de tiempo. Los valores típicos del exponente de la ley de potencia que se producen en diversas situaciones de estabilidad se dan en la tabla 7.

Tabla 7. Valores del exponente en función de la estabilidad atmosférica y diversos terrenos.

Estabilidad	Condición	$p$	
		Urbana	Rural
A	Muy inestable	0,15	0,07
B	Moderadamente inestable	0,15	0,07
C	Ligeramente inestable	0,20	0,10
D	Neutra	0,25	0,15
E	Ligeramente estable	0,30	0,35
F	Estable	0,30	0,55

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications. North Carolina, 2000.



El estándar ampliamente utilizado para cuantificar la emisión de ruido de los aerogeneradores se basa implícitamente en un perfil del viento específico. Este perfil no es correcto durante la noche, y justamente la noche es el período crítico para la evaluación del ruido proveniente de los aerogeneradores [96].

Las inversiones de temperatura que ocurren dentro de los primeros 100 m de la atmósfera pueden aumentar los niveles de presión sonora medidos a nivel del suelo. La inversión térmica es causada comúnmente por el enfriamiento debido a la radiación del suelo por la noche que conduce al enfriamiento del aire en contacto con el suelo. Esto es especialmente frecuente en las noches despejadas con poco viento ocasionando condiciones muy estables [20].

El grado en que el sonido es aumentado o atenuado depende del gradiente vertical de temperatura. Cuanto mayor es el gradiente, mayor será el efecto. Por lo tanto, en los días soleados, el sonido se reduce generalmente y en las noches claras el sonido aumenta. Los efectos combinados de la velocidad del viento y el gradiente de temperatura sobre el ruido son aditivos [88].

Hay tres factores que influyen en el nivel del silbido de las aspas cuando la atmósfera se vuelve más estable: el perfil de velocidad del viento, el gradiente de dirección del viento, y la turbulencia a gran escala [95].

- a) Perfil de velocidad del viento. La velocidad de rotación está determinada por la velocidad promedio del viento en el rotor. Con el aumento de la estabilidad atmosférica la diferencia entre la velocidad del viento en la parte superior e inferior del rotor aumenta [95].

El cambio en el perfil de viento provoca un cambio en el ángulo de ataque de las aspas del aerogenerador. Esto aumenta el nivel potencia sonora de espesor, así como el nivel de potencia sonora del borde de salida, especialmente cuando el aspa pasa por la torre [95].

El nivel de potencia sonora del borde de salida es modulado a la frecuencia de paso de las aspas, pero es un sonido de alta frecuencia, audible y es el componente más dominante del nivel de potencia sonora global del aerogenerador [95 y 66].



Cuando el aspa pasa por el mástil en el punto inferior de su trayectoria, hay una mayor discrepancia entre el ángulo óptimo y efectivo de ataque  $\alpha$  porque ya había un cambio en el ángulo de ataque relacionado con el déficit de la velocidad del viento en frente del mástil. El cambio asociado en el nivel de potencia sonora del borde de salida del aspa es de  $3,1 \pm 0,7$  dB para una atmósfera estable y  $5,0 \pm 0,8$  dB para una atmósfera muy estable en comparación de  $1 \pm 0,5$  dB en una atmósfera inestable [95].

- b) Gradiente de dirección del viento. En una atmósfera estable las masas de aire a diferentes altitudes sólo están unidas por la turbulencia a pequeña escala y, por tanto, son relativamente independientes las unas de las otras. Además de un perfil de velocidad mayor también es posible un gradiente de dirección del viento mayor, y con el aumento de la altura la dirección del viento puede cambiar significativamente. Este cizallamiento en la dirección del viento cambia el ángulo de ataque con la altura. Suponiendo que el viento a la altura del eje es normal al rotor, el ángulo de ataque disminuye por debajo y aumenta por encima de la altura del eje (o viceversa). Este efecto, sin embargo, es pequeño: si se supone un cambio en la dirección del viento de  $20^\circ$  sobre la altura del rotor a una velocidad del viento de 10 m/s, el cambio en el ángulo de ataque entre las posiciones extremas de las aspas a 20 rpm es sólo  $0,25^\circ$ ; lo cual resulta insignificante [95].
- c) Turbulencia. El incremento en el nivel de silbido del aspa se puede explicar debido a la sincronización de dos o tres secuencias de impulsos procedentes de dos o tres aerogeneradores cercanos. En una atmósfera estable los aerogeneradores pueden funcionar casi sincrónicamente, ya que la ausencia de turbulencia a gran escala conduce a una menor variación superpuesta sobre la velocidad del viento en cada aerogenerador. En condiciones inestables la velocidad del viento en ambos aerogeneradores será igual, pero las velocidades del viento local serán diferentes debido a la presencia de remolinos turbulentos en una escala igual a la distancia que existe entre los dos aerogeneradores. En una atmósfera estable la escala de turbulencia disminuye con un factor de hasta 10, en relación a la atmósfera neutra y aún más en relación con una atmósfera inestable. En condiciones estables los aerogeneradores experimentan por lo tanto un viento muy similar y como consecuencia sus velocidades



instantáneas son casi iguales. Otro efecto de la disminución de la fuerza de turbulencia es que el nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento también disminuye. La diferencia de fase entre los aerogeneradores determina donde se produce esta amplificación [95].

Teóricamente se puede concluir que en condiciones estables el sonido del aerogenerador puede ser escuchado a mayores distancias y es de frecuencia baja debido a la absorción y el desplazamiento de la frecuencia del nivel del silbido. Por lo tanto, es un sonido más fuerte como un “golpeteo”, de baja frecuencia y menos silbante que el observado en inmediaciones del aerogenerador durante el día [95].

Parkin y Scholes definieron seis “categorías meteorológicas” con base en la velocidad del viento y el gradiente de temperatura atmosférica para determinar la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica. Las curvas de corrección para proporcionar la atenuación se obtienen restando los datos registrados durante condiciones atmosféricas neutras a los datos registrados en las otras categorías atmosféricas [12].

En la definición de las “categorías meteorológicas”, Parkin y Scholes se basaron en un reagrupamiento de las categorías de estabilidad de Pasquill de acuerdo a la velocidad del viento. Las categorías propuestas por ellos se muestran en la tabla 8, indicando su relación con las clases de estabilidad de Pasquill [12].

La ecuación general para determinar la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica en el método de CONCAWE es [12]:

$$A_{met} = a + b(\log r) + c(\log r)^2 + e(\log r)^3 \quad (178)$$

En la cual:

$a, b, c$  y  $e$  = Constantes que dependen de la estabilidad y la frecuencia

$r$  = Distancia entre la fuente y el receptor, m

La tabla 9 presenta las constantes del método de CONCAWE para determinar la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica.



Tabla 8. Categorías de estabilidad atmosférica de Parkin y Scholes.

Categoría Meteorológica	Categorías de Estabilidad de Pasquill		
	A, B	C, D, E	F, G
1	$V < -3,0$	-	-
2	$-3,0 < V < -0,5$	$V < -3,0$	-
3	$-0,5 < V < 0,5$	$-3,0 < V < -0,5$	$V < -3,0$
4*	$0,5 < V < 3,0$	$-0,5 < V < 0,5$	$-3,0 < V < -0,5$
5	$V > 3,0$	$0,5 < V < 3,0$	$-0,5 < V < 0,5$
6	-	$V > 3,0$	$0,5 < V < 3,0$

Decrece la atenuación ↓

Nota: Categoría con influencia meteorológica asumida igual a cero.

Fuente: CONCAWE. The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighboring communities. Den Haag, 1981.

Kaliski y Duncan hicieron más de 60 mediciones de diez minutos de duración para los niveles de presión sonora provenientes de los aerogeneradores sobre tierras de cultivo planas. Ellos encontraron que al hacer ajustes meteorológicos utilizando el método CONCAWE mejoraban la exactitud del modelo, pero con una tendencia a sobreestimar los niveles reales [47 y 48].

Según la norma ISO 9613 Parte 2, el uso de la ecuación 165 conduce directamente a un nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A en el receptor para condiciones meteorológicas que son favorables para la propagación del sonido desde la fuente al receptor [44].

Cuando se requiere un nivel de presión sonora promedio con filtro de ponderación A a largo plazo, en el que el intervalo de tiempo es de varios meses o un año la norma ISO 9613 Parte 2 recomienda el uso de una corrección meteorológica  $C_{met}$  dado que dicho período puede incluir una variedad de condiciones meteorológicas, tanto favorables como desfavorables para la propagación [44].

El valor para  $C_{met}$  puede ser calculado utilizando las ecuaciones 179 y 180 para el caso de una fuente puntual de sonido con una salida que es efectivamente constante con el tiempo [44]:



Tabla 9. Constantes para determinar la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica en el método de CONCAWE.

Categoría Meteorológica	Frecuencia (Hz)	Constantes			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>e</i>
1	63	-38,9	26,4	-2,84	-0,234
	125	-137	142	-46,8	5,14
	250	-104	100	-30,3	3,03
	500	-20,9	3,86	6,39	-1,43
	1000	-54,3	39	-4,92	-0,239
	2000	-69,9	63,6	-16,9	1,43
	4000	-126	128	-40,4	4,24
2	63	16,1	-28,43	14,4	-2,1
	125	-23,2	19,53	-4,646	0,3358
	250	-84,8	91,93	-30,873	3,4295
	500	-133,7	142,63	-47,851	5,3118
	1000	-148,2	164,99	-56,287	6,3422
	2000	-143,0	142,18	-44,509	4,6195
	4000	-125,4	124,74	-38,807	4,017
3	63	-4,0	2,0		
	125	-3,0	1,5		
	250	-100,6	101,23	-32,352	3,4306
	500	-96,8	102,98	-34,868	3,9016
	1000	-150	160,95	-54,786	6,1604
	2000	-116,3	120,85	-39,944	4,378
	4000	-127,5	135,12	-45,709	5,1113
5	63	3,35	-2,26	0,407	-0,0572
	125	6,8	-3,4		
	250	7,4	-4,2		
	500	7,4	-4,2		
	1000	104,6	-108,03	35,295	-3,8227
	2000	60,3	-64,07	21,458	-2,3784
	4000	28,7	-20,1	2,68	0,0957
6	63	69,3	-73,2	24,688	-2,7531
	125	29,5	-25,62	6,286	-0,4904
	250	31,7	-23,81	4,055	-0,1043
	500	19,8	-8,8	-2,035	0,6747
	1000	123,4	-127,6	42,017	-4,584
	2000	82,3	-90,98	31,444	-3,584
	4000	66,4	-60,77	16,409	-1,4457

No usar para distancias inferiores a 100 m.

Fuente: Elaboración propia basado en las ecuaciones del método de CONCAWE.



Si  $dp \leq 10 (hs + hr)$

$$C_{met} = 0 \quad (179)$$

Si  $dp > 10 (hs + hr)$

$$C_{met} = C_0 \left[ 1 - \frac{10 (hs + hr)}{dp} \right] \quad (180)$$

En la cual:

$hs$  = Altura de la fuente, m

$hr$  = Altura del receptor, m

$dp$  = Distancia entre la fuente y el receptor proyectado en el plano horizontal al suelo, m

$C_0$  = Factor que depende de las estadísticas meteorológicas locales para la velocidad y dirección del viento y los gradientes de temperatura, dB

Los efectos de las condiciones meteorológicas en la propagación del sonido no son significativos para distancias cortas, y para distancias mayores son tan relevantes en la medida que las alturas de la fuente y el receptor sean considerables [44].

Según la norma ISO 9613 Parte 2, los valores de  $C_0$  en la práctica se encuentran entre 0 y 5 dB, siendo excepcionales los valores superiores a 2 dB. Se necesitan estadísticas muy elementales de la meteorología local para una precisión de  $\pm 1$  dB en  $C_0$  [44].

El hacer una corrección con un valor medio de  $C_{met}$  para una variedad de condiciones meteorológicas se debe a que la norma ISO 9613 Parte 2 sólo es aplicable para una condición meteorológica especial. Sin embargo, como la fuente de sonido de un aerogenerador está por lo menos a 80 m de altura, la distancia entre la fuente y el receptor tiene que ser mayor de 815 m, de acuerdo con la ecuación 180, para que  $C_{met}$  sea diferente de cero [100].

Según la norma ISO 9613 Parte 2,  $C_0$  puede determinarse utilizando estadísticas meteorológicas locales. Sin embargo, no es claro cómo se debe determinar dicho valor. Por otra parte, tampoco está claro con



qué frecuencia se ha demostrado que este valor en la práctica se encuentra entre 0 y 5 dB y que los valores superiores a 2 dB son excepcionales [100].

Para proporcionar un modelo para la predicción que tenga en cuenta al menos parcialmente el efecto de la estabilidad atmosférica en la propagación del ruido, Bowdler *et al.* (citados por Dawson y Mackenzie) proponen que la propagación del ruido de los parques eólicos se evalúe a través de la norma ISO 9613 Parte 2 considerando el suelo completamente duro y totalmente reflectante para la atenuación del suelo, es decir, considerando un aumento de 3 dB en los niveles de presión sonora en el receptor [20].

- **Atenuación por efectos de altura de la fuente y/o receptor.** Parkin y Scholes, y Piercy *et al.*, entre otros, han demostrado que el efecto de suelo es modificado por el ángulo de incidencia del rayo reflejado en el suelo recibido por un observador, el cual es, en sí, una función de la distancia y las alturas de la fuente y el receptor. Esto es importante cerca de una fuente, en particular cuando está elevada a una altura del orden de 10 a 20 m [12].

Según Piercy *et al.*, el efecto del suelo disminuye exponencialmente con el aumento de ángulo de incidencia de 0° a 5°, llegando a ser cero en 5°. El procedimiento de la Oil Companies Materials Association aconseja una reducción lineal en el efecto del suelo llegando a cero para una relación entre la altura de la fuente y la distancia fuente-receptor de 3:100, que para la mayoría de los propósitos prácticos se aproxima a un ángulo de 2° [12].

La atenuación debido a la altura de fuente, donde ésta es mayor de 2 m, se puede obtener a través de la siguiente relación [12]:

$$\text{Para } (A_{\text{suelo}} + A_{\text{met}}) > -3 \text{ dB}$$

Entonces:

$$A_{\text{alt}} = (A_{\text{suelo}} + A_{\text{met}} + 3)(\gamma - 1) \text{ dB} \quad (181)$$



En la cual  $\gamma$  se obtiene como una función del ángulo de incidencia  $\theta$ :

Si  $h_s \leq 2$  m,

Entonces:

$$\gamma = 1 \quad (182)$$

Si  $h_s \geq 2$  m,

Entonces:

$$\gamma = 1 - 0,478\theta + 0,068\theta^2 - 0,0029\theta^3 \quad (183)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{h_s + h_r}{r} \right] \quad (184)$$

En la cual  $h_s$  y  $h_r$  son las alturas de la fuente y el receptor, respectivamente.

Cuando  $(A_{suelo} + A_{met}) < -3$  dB

Entonces:

$$A_{alt} = 0 \quad (185)$$

El modelo para la atenuación ha sido validado para una altura del receptor de 1,2 m. Los niveles de presión sonora para elevaciones mayores se pueden calcular usando la fórmula anterior [12].

Cuando la propagación es para un receptor situado sobre una colina, o a través de un valle, el valor de  $A_{alt}$  debe reducirse hasta en 3 dB para tener en cuenta las reflexiones múltiples de la ladera [12].

- **Filtro de ponderación frecuencial.** Se ha debatido acerca de cuál es el filtro de ponderación más adecuado para la evaluación de ruido de los aerogeneradores [9]. Aunque hay varios filtros de ponderación que se usan para diferentes fines técnicos, el filtro de ponderación A, según algunos autores, proporciona el mejor indicador para la composición espectral de los sonidos percibidos por el oído humano y es por eso que



se utiliza ampliamente en todo el mundo para la evaluación del impacto del ruido ambiental en las personas. Sin embargo, este filtro de ponderación subestima los niveles de presión sonora de muchas fuentes de ruido en las frecuencias bajas, y aunque no está claro lo que representaría en términos de la percepción humana, no parece haber ninguna justificación técnica para el uso del filtro de ponderación *A* en la evaluación de la aceptabilidad del ruido de los aerogeneradores en las personas.



## **4. METODOLOGÍA**

La fase inicial del estudio incluyó una revisión de la literatura y del estado actual de los conocimientos teóricos y experimentales sobre la propagación del sonido a distancias considerables, cerca del suelo. La validez y la pertinencia de la información obtenida en esta investigación han sido evaluadas y se ha utilizado para preparar un procedimiento de ingeniería para predecir los niveles de presión sonora proveniente de los aerogeneradores en un receptor específico a cierta distancia para una amplia gama de condiciones meteorológicas.

La siguiente etapa de la investigación consistió en un programa experimental diseñado para probar la exactitud de la técnica de predicción desarrollada a partir del estudio inicial. Esto comprendió la medición de los niveles de presión sonora en determinadas condiciones meteorológicas al interior de un parque eólico y compararlos con los niveles estimados.

El último paso consistió en analizar el efecto de la estabilidad atmosférica en la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores. El ajuste del modelo de predicción a los datos experimentales condujo a mejoras y al perfeccionamiento del mismo. Luego, éste se utilizó para predecir los niveles de presión sonora en un receptor específico cerca del parque eólico para una amplia gama de condiciones meteorológicas. Esto proporciona un método para establecer el impacto ambiental de nuevos parques eólicos. Se seleccionó el modelo de predicción propuesto por la norma ISO 9613 Parte 2 como base de este trabajo debido a que comprende los principales mecanismos de atenuación de los niveles de presión sonora, pero son susceptibles de mejorar.

### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El parque eólico de la empresa Kentilux S.A. se ubica en el Departamento de San José (Uruguay), en el kilómetro 41 de la ruta nacional número 1, cerca del Paraje de Punta del Tigre [49]. Específicamente se encuentra dentro del predio de la Hacienda La Magdalena.



Figura 30. Ubicación geográfica del parque eólico de Kentilux S.A

Fuente: Kentilux S.A. Proyecto de generación de energía eólica conectada a la red. Mayo, 2010.

El parque de generación eólica constituye una instalación de 18 MW de potencia total instalada. Está integrado por 9 aerogeneradores con una potencia nominal de 2,0 MW cada uno, con una altura del eje de 80 metros. Son del tipo tripala, con control pitch, con generador asíncrono de doble alimentación. La figura 31 muestra la distribución de los aerogeneradores en el parque eólico de Kentilux S.A. [49].

Este parque fue elegido para el estudio principalmente por sus características topográficas, la accesibilidad al predio y la excelente disposición de sus propietarios en cuanto a las mediciones a realizar. Además, su distancia con respecto a Montevideo no era excesiva.



Figura 31. Distribución de los aerogeneradores en el parque eólico de Kentilux S.A.

Fuente: Google Earth 2015.

En la zona donde se encuentra el parque eólico existen diversas actividades de carácter agrícola-ganadero. Las parcelas de campo la mayoría de las veces se encuentran cultivadas y hay actividad frecuente de maquinaria y equipos de riego. También hay presencia de ganado. Esto determinó en cierta medida las posibilidades reales para poder realizar las mediciones de los niveles de presión sonora asociados al parque eólico.

En la zona se constató además la presencia de una gran diversidad de animales característicos de la zona. Entre ellos, se pudo apreciar lechuzas, halcones, gran variedad de aves canoras, vacas y otros animales de corral, zorros y liebres, entre otros.

Las mediciones se realizaron en época de pos cosecha, lo cual permitió el desplazamiento por todo el parque eólico. Se seleccionaron diferentes sitios de medición, todos ellos viento abajo de los aerogeneradores, buscando la mejor alineación posible de los aerogeneradores.



**4.1.1. Descripción de los aerogeneradores.** Las características técnicas de los aerogeneradores del parque eólico de Kentilux S.A. son [49 y 97]:

Marca:	Vestas
Modelo:	V90-2,0 MW
Altura de eje:	80 m
Clase:	IEC IIIA
Diámetro de rotor:	90 m
Longitud de las aspas:	44 m
Cuerda (valor máximo):	3,5 m
Área barrida:	6.362 m <sup>2</sup>
Velocidad nominal:	14,5 rpm
Potencia nominal:	2,00 kW
Frecuencia:	50 Hz/60 Hz
Voltaje de la red:	33 KV
Velocidad de conexión:	4 m/s
Velocidad nominal:	12 m/s
Velocidad de corte:	25 m/s

La emisión sonora de los aerogeneradores Vestas V90, y en general de cualquier aerogenerador, es función de la velocidad del viento.

Tabla 10. Nivel de potencia sonora de los aerogeneradores Vestas V90-2,0 MW.

Velocidad del viento (m/s)	Nivel de potencia sonora dB(A)
4	94,4
5	99,4
6	102,5
7	103,6
> 8	104,0

Nota: Nivel de potencia sonora referido a una velocidad del viento a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo, una altura del eje de 80 m y una densidad del aire de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

Fuente: <http://www.vestas.com>.

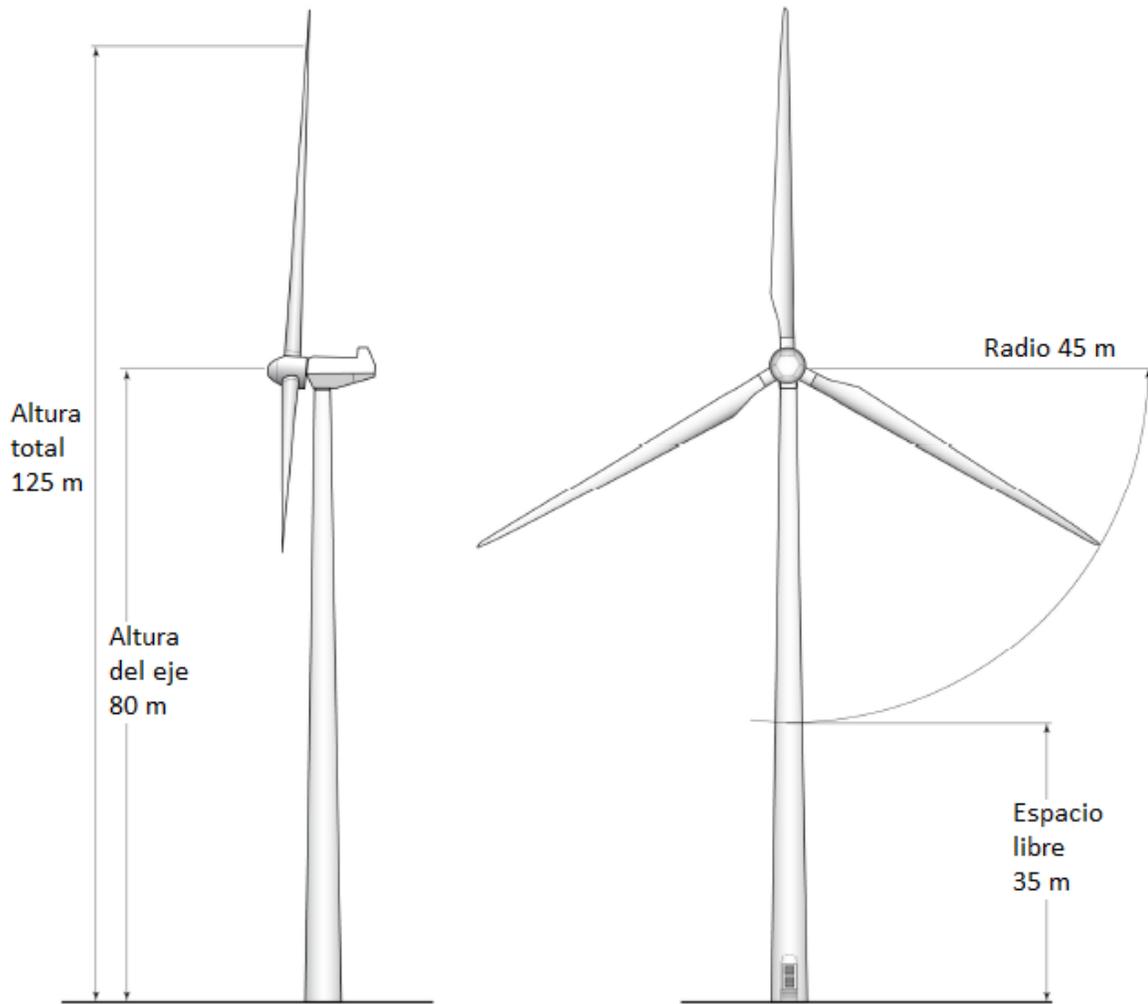


Figura 32. Dimensiones de los aerogeneradores Vestas V90.

Fuente: <http://www.vestas.com>.

La curva de potencia sonora de los aerogeneradores se mide de acuerdo a la norma IEC 61400-11, que prescribe condiciones ideales. Estas condiciones suelen estar presentes durante la medición para la declaración de la emisión de ruido, pero las condiciones de operación son variables. Por lo tanto, la curva de potencia sonora cambia y también la relación viento-potencia sonora [84].



El nivel de potencia sonora radiado en varias direcciones alrededor del aerogenerador no cambia significativamente en la dirección viento abajo. Esto se aplica al comportamiento espectral, así como al nivel total. En la dirección viento arriba el comportamiento espectral se desvía de la posición de referencia, pero no como una regla general. Las variaciones en las frecuencias más bajas pueden deberse a la influencia del ruido de fondo en las posiciones de medición [17].

En la figura 33 se presenta el espectro de potencia sonora normalizado con filtro de ponderación A para aerogeneradores entre 1 y 2 MW de potencia nominal para una velocidad del viento de 8 m/s a 10 m sobre el nivel del suelo.

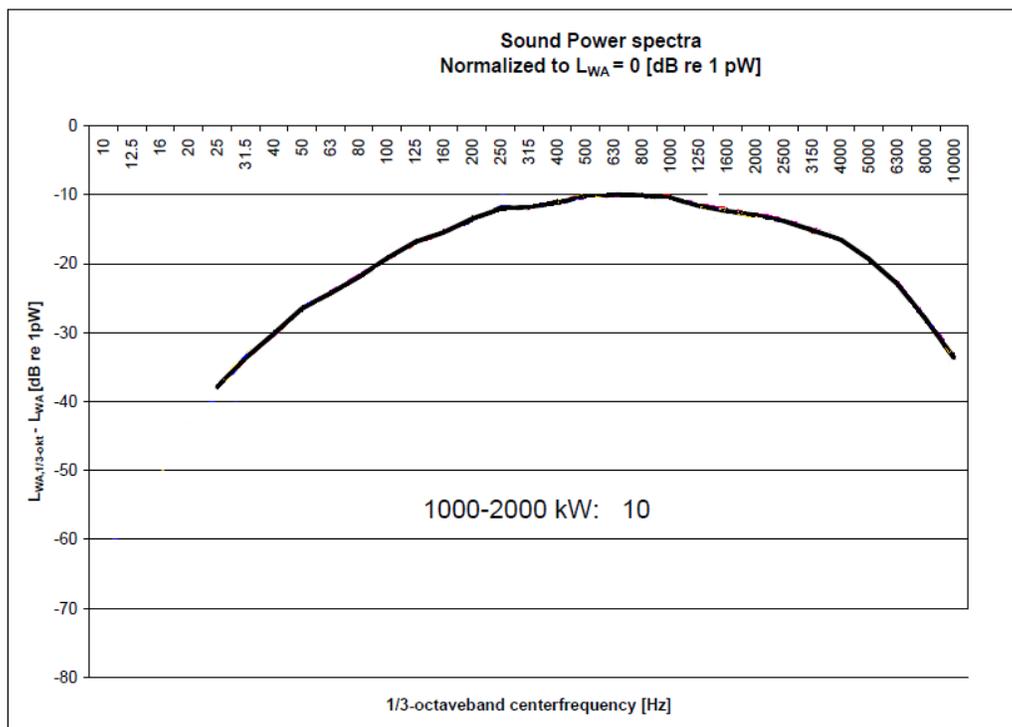


Figura 33. Espectro de potencia sonora normalizado con filtro de ponderación A para aerogeneradores entre 1 y 2 MW de potencia nominal.

Fuente: Danish Electronics, Light & Acoustics. Low frequency noise from large wind turbines: Results from sound power measurements. Hørsholm, 2008.



## 4.2. MEDICIONES DE CAMPO

Este paso incluye las campañas de medición de los niveles de presión sonora para un receptor específico a cierta distancia del aerogenerador, así como de las variables meteorológicas que permiten determinar la estabilidad atmosférica. En el parque eólico se buscó la mejor alineación posible de los aerogeneradores, evitando la interferencia de otras fuentes sonoras, incluso de los mismos aerogeneradores. Se estimaron las distancias entre los puntos de medición suficientes como para apreciar un descenso en los niveles sonoros y la distancia máxima de influencia del aerogenerador.

Los niveles de presión sonora y las variables meteorológicas se midieron de manera simultánea, promediando ambas magnitudes durante un intervalo de tiempo de 10 minutos o a veces más. Los datos de velocidad promedio del viento y los niveles de presión sonora obtenidos simultáneamente se correlacionaron para deducir la relación entre las variaciones de ambas magnitudes.

**4.2.1. Niveles de potencia sonora.** Para predecir el nivel de presión sonora en un receptor específico a cierta distancia del aerogenerador fue necesario determinar los niveles de potencia sonora del aerogenerador para distintas velocidades de viento.

Con base en las variables propuestas en los diferentes modelos se realizó un análisis estadístico detallado de los niveles de potencia en bandas de octava con los grupos de parámetros (variables independientes). Los niveles de potencia sonora del aerogenerador se calcularon a partir de las especificaciones técnicas del aerogenerador (tabla 10), el espectro de potencia sonora normalizado (figura 33) y las contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido según Hubbard y Shepherd [63].

- **Nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento incidente.** La expresión para el ruido inducido por la turbulencia de entrada:

$$Lw_{fte} = 27,8802 - 0,256685 Lw_1 + 0,776152 K_1(f) + 0,979926 Lw_2 - 0,00134543 f$$



En la cual:

- $Lw_1$  = Nivel de potencia sonora en función de la velocidad del viento y la frecuencia, dB(Z)
- $K_1(f)$  = Parámetro en función de la frecuencia, dB(Z)
- $Lw_2$  = Nivel de potencia sonora en función de la velocidad del viento, dB(Z)
- $f$  = Frecuencia, Hz

El nivel de potencia sonora  $Lw_1$  en función de la velocidad del viento y la frecuencia está dado por:

$$Lw_1 = 10 \log(\delta_s U_{10}^5 n_a) + K_1(f) + 7,04 \quad (187)$$

En la cual:

- $\delta_s$  = Parámetro integral de la capa límite, m
- $U_{10}$  = Velocidad del viento a 10 metros de altura, m/s
- $n_a$  = Número de aspas

Los parámetros integrales de la capa límite están dados por:

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 14,296 \times 10^{0,0258\alpha} \quad (188)$$

$$\frac{\delta_0}{c_{max}} = 10^{[3,411 - 1,5397(\log Re_c) + 0,1059(\log Re_c)^2]} \quad (189)$$

En la cual:

- $\alpha$  = Ángulo de ataque (se asume igual a 15)
- $c_{max}$  = Longitud máxima de la cuerda del aspa, m
- $Re_c$  = Número de Reynolds

El número de Reynolds está dado por:

$$Re_c = \frac{c_{max} U_{10} \rho}{\mu} \quad (190)$$

En la cual:

- $\rho$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>
- $\mu$  = Viscosidad del aire, kg/m·s
- $c_{max}$  = Longitud máxima de la cuerda, m



Densidad del aire:

$$\rho = \frac{1,293}{(1+0,00367t)} \quad (191)$$

Viscosidad del aire:

$$\mu = 0,00001716 \left( \frac{t+273,15}{273} \right)^{0,763} \quad (192)$$

El parámetro  $K_1(f)$  en función de la frecuencia está dado por:

$$K_1(f) = 10 \log \left\{ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^4 \left[ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^{1,5} + 0,5 \right]^{-4} \right\} \quad (193)$$

En la cual:

$S_t$  = Número de Strouhal

$S_{tmax}$  = Número de Strouhal máximo (igual a 0,1)

El número de Strouhal está dado por:

$$S_t = \frac{f \delta_s}{U_{10}} \quad (194)$$

El nivel de potencia sonora  $Lw_2$  en función de la velocidad del viento está dado por:

$$Lw_2 = -0,0073 U_{10}^4 + 0,2987 U_{10}^3 - 4,5549 U_{10}^2 + 30,6407 U_{10} + 43,2753$$

- **Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida.** La expresión resultante es la siguiente:

$$Lw_{bsclt} = 47,628 + 214,23 K_2(f) - 0,438903 U_{10}^2 - 0,32683 Lw_2 \\ + 0,405141 K_3(f) + 37,3317 \log(U_{10}^3) - 0,00143337 f \\ + 4,432 \log(f)$$

En la cual:

$K_2(f)$  = Parámetro en función de la frecuencia, dB(Z)

$K_3(f)$  = Parámetro en función de la frecuencia, dB(Z)



El parámetro  $K_2(f)$  en función de la frecuencia está dado por:

$$K_2(f) = \frac{4\left(\frac{f}{f_{pico}}\right)^{2,5}}{\left[1+\left(\frac{f}{f_{pico}}\right)^{2,5}\right]^2} \quad (197)$$

En la cual:

$f_{pico}$  = Frecuencia pico, Hz

La frecuencia pico está dada por:

$$f_{pico} = \frac{0,02 U_{10} M^{-0,6}}{\delta_s} \quad (198)$$

En la cual:

$M$  = Número de Mach

El número de Mach es:

$$M = \frac{U_{10}}{c} \quad (199)$$

En la cual:

$C$  = Velocidad de propagación del sonido, m/s

La velocidad de propagación del sonido se puede hallar a través de:

$$C = 20,05\sqrt{T} \quad (200)$$

En la cual:

$T$  = Temperatura ambiente, K

El parámetro  $K_3(f)$  en función de la frecuencia está dado por:

$$K_3(f) = -[1,446 \ln(f) - 8,9915]^2 \quad (201)$$



- **Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida.** La expresión para el ruido del borde de salida es la siguiente:

$$LW_{dvclbs} = -22,3209 - 0,652198 \log(K_2(f)) - 6,74579 e^{\left[\frac{-(f-315)^2}{2f\sigma}\right]} + 0,00242912 f + 0,0718905 \frac{(f-1600)^2}{2f\sigma} + 1,02093 LW_3 + 2,68552 K_4(f)$$

En la cual:

$\sigma$  = Desviación estándar geométrica de la frecuencia, Hz

$LW_3$  = Nivel de potencia sonora en función de la velocidad del viento y la frecuencia, dB(Z)

$K_4(f)$  = Parámetro en función de la frecuencia, dB(Z)

La desviación estándar geométrica de la frecuencia está dada por:

$$\sigma = e^{\left[\sqrt{\frac{\sum(\ln(f) - \overline{\ln(f)})^2}{(n-1)}}\right]} \quad (203)$$

El nivel de potencia sonora  $LW_3$  en función de la velocidad del viento y la frecuencia está dado por:

$$LW_3 = LW_2 - 9,38034 \log(f) - 0,00105866 f + 8,07483 \quad (204)$$

El parámetro  $K_4(f)$  en función de la frecuencia está dado por:

$$K_4(f) = -[1,446 \ln(f) - 9,9915]^2 \quad (205)$$

El nivel de potencia sonora total en bandas de octava se obtiene mediante la integración de las contribuciones de todas las fuentes acústicas:

$$LW_{total} = 10 \log \left[ 10^{\left(\frac{LW_{fte}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LW_{cltbs}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LW_{dvbs}}{10}\right)} \right] \quad (206)$$

El Anexo J presenta el modelo de cálculo para estimar las contribuciones relativas de los componentes de ruido para la frecuencia de 500 Hz. Los



cálculos están en bandas de octava para cada uno de los componentes identificados. También se incluye la suma de los componentes.

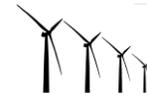
**4.2.2. Medición de los niveles de presión sonora.** Hay que tener en cuenta que el parque eólico sólo funciona (y por tanto sólo genera ruido aerodinámico) cuando la velocidad del viento supera cierto valor, por lo general 4 m/s a la altura del eje (velocidad de conexión). Además, la potencia sonora emitida por el propio aerogenerador depende de la velocidad del viento (en general aumenta cuando aumenta ésta).

Esto representa un problema ya que habitualmente se establecen unas condiciones de viento por encima de las cuales se deben desechar las mediciones o simplemente detener el ensayo. Este umbral se sitúa en una velocidad del viento de 4 m/s. Por encima de esta velocidad se genera el llamado pseudo-ruido que crea en el micrófono como un sonido ficticio consecuencia de la presión ejercida por el viento. Por lo tanto, debe usarse una pantalla protectora contra el viento para reducir o eliminar el ruido inducido sobre el micrófono en condiciones extremas de viento debido a la turbulencia del viento.

En la medición de los niveles de presión sonora se caracterizó el área de estudio espacial y temporalmente, siguiendo las prescripciones de la norma ISO 1996 [42]:

- La ubicación y cantidad de posiciones de las mediciones dependen de la resolución espacial requerida del ambiente que es motivo de estudio.
- La altura del micrófono debe seleccionarse según la altura actual o esperada del receptor.
- Los intervalos de tiempo de medición se deben seleccionar de modo que se cubran todas las variaciones importantes de la emisión y transmisión de ruido.

El ruido proveniente de los aerogeneradores se registró y midió (inmisión de ruido o niveles de presión sonora) con el micrófono ubicado a una altura de 1,2 m del suelo y a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador (desde 100 hasta 900 m). El sonido se registró en forma continua por lo menos durante 10 minutos. En la tabla A1 del anexo A están registrados los niveles de presión sonora obtenidos en las diferentes campañas de medición.



Las mediciones de los niveles de presión sonora se llevaron a cabo para una variedad de condiciones meteorológicas durante la noche y durante el día. Un “espectro de inmisión” es el resultado de un registro de 10 minutos o a veces más. En todos los casos se han producido variaciones significativas en la velocidad del viento en el momento de la medición. El sonido medido incluye el ruido de fondo ambiental. El ruido de fondo ambiental no se pudo determinar por separado en el mismo sitio de medición debido a que los aerogeneradores no pueden ser detenidos.

Ningún paisaje está en silencio completamente. Por ejemplo, las aves y las actividades humanas emiten sonidos y, a velocidades del viento alrededor de 4 m/s y superiores, el ruido del viento en las hojas, arbustos y árboles puede “enmascarar” gradualmente el ruido proveniente de los aerogeneradores. Esto hace que la medición del ruido de los aerogeneradores, de forma precisa, sea muy difícil [19].

El ruido de fondo es el ruido total de todas las fuentes de ruido, excepto el ruido del aerogenerador bajo consideración en el momento de las mediciones.

La contribución del ruido de fondo es un problema importante que puede afectar los resultados de medición de los aerogeneradores. Para hacer frente a esto, cada punto de medición se seleccionó de modo que estuviera lo más lejos posible de las fuentes potenciales de ruido de fondo (por ejemplo, árboles), de modo que el nivel de presión sonora en el lugar estuviera controlado por el ruido del aerogenerador.

Según Ljunggren (citado por Ducosson), el ruido de fondo se debe medir con el aerogenerador apagado inmediatamente antes o después de la medición del ruido del aerogenerador en los puntos de medición [25]. Esta recomendación no puede seguirse porque las condiciones meteorológicas son cambiantes y pueden no ser representativas del momento en el que se hicieron las mediciones y, además, porque no hay injerencia sobre el funcionamiento del parque eólico.

El uso del nivel de permanencia 90% (percentil 90) para medir el sonido de fondo es cuestionado Dickinson; él sugiere que no debe usarse para el ruido proveniente de fuentes industriales [22].



Según Ducosson, la forma más segura de tener en cuenta el ruido de fondo es hacer caso omiso de cualquier medición en la que el nivel de presión sonora no sea por lo menos 6 dB más alto que el nivel de fondo. De este modo, suponiendo que los niveles de presión sonora de fondo no tienen ninguna influencia sobre los niveles medidos conduce a un error inferior a 1 dB [25]. Este criterio se utilizó aquí.

Las mediciones se llevaron a cabo con un sonómetro Casella CEL 633C clase 1 y el parámetro registrado fue el nivel de presión sonora continuo equivalente,  $L_{eq}$ , con filtro de ponderación Z. El equipo se calibró antes y después de cada serie de mediciones. Las especificaciones técnicas del sonómetro se encuentran en la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones técnicas del sonómetro CEL-633C.

Especificaciones	Descripción
Intervalo de medición	0 a 140 dB
Ponderaciones de frecuencia	Simultáneas A, C y Lineal (Z)
Resolución	0,1 dB
Clase	1
Modos de operación*	$L_{XY}$ , $L_{XYmax}$ , $L_{XYmin}$ , $L_{Xeq}$ , $L_{Xpeak}$ , $L_{avg}$ , $LC-LA$ , $L_{XLeq}$ , $LTM3$ , $LTM5$ , $LAE$
Ponderaciones en tiempo	Simultáneas lento, rápido e impulso
Intervalo de frecuencias	11 bandas octava 16Hz a 16kHz 33 bandas 1/3 octava 12Hz a 20kHz
Micrófono	CEL-251 (Clase 1)
Filtros de corrección	Incorporados para micrófono de incidencia aleatoria
Temperatura de operación	-10 a 50 °C
Humedad relativa	5 a 90%
Presión	65 a 108 kPa
Tamaño	72 x 229 x 31 mm
Peso	295 g

Nota: X es la ponderación de frecuencia A, C o Z e Y representa las ponderaciones de tiempo rápido (fast, F), lento (slow, S) o impulso (impulse, I). Todas las ponderaciones se miden simultáneamente.

Fuente: <http://www.casellameasurement.com>



Figura 34. Sonómetro Casella CEL 633C

Fuente: <http://www.casellameasurement.com>

Los registros de ruido se realizaron cuando se juzgó que el nivel de presión sonora sólo provenía del aerogenerador y cuando no se produjeron eventos transitorios, como actividades agrícolas y aviones que sobrevolaban la zona. Aparte del posible sonido inducido por el viento en la vegetación otras fuentes relevantes fueron las aves canoras.

Las distancias cubiertas en las mediciones se vieron afectadas por configuración conformada entre las condiciones climáticas (dirección del viento) y los límites del parque eólico. Sólo se consideraron para el análisis los niveles de presión sonora medidos que se encontraban sobre la línea trazada desde el aerogenerador y el punto de medición viento abajo del aerogenerador.

El control primario de las distancias de los puntos de medición se llevó a cabo a través de la apreciación del ruido producido por otros aerogeneradores; el aerogenerador más cercano debe ser la fuente dominante; de lo contrario, no se realizaba la medición.



Figura 35. Medición de los niveles de presión sonora

Con el fin de realizar un análisis significativo de estos datos, había que garantizar que los niveles de presión sonora utilizados para el estudio se referían únicamente al aerogenerador y no a cualquier otro ruido extraño. Mediciones que se vieron afectadas por fuentes de ruido extrañas fueron excluidas del análisis.

**4.2.3. Medición de las variables meteorológicas.** Al intentar validar un modelo de predicción de ruido es importante disponer de mediciones de las variables meteorológicas que estén relacionadas con las mediciones de ruido. Los principales factores que influyen en la atenuación meteorológica son la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.



Es imprescindible disponer de las variables meteorológicas de estaciones que se ubiquen en las proximidades de la zona de estudio o en el mismo parque eólico. Para tener en cuenta el efecto de las condiciones meteorológicas en la propagación del sonido, es necesario obtener datos para diferentes estados meteorológicos típicos. Sin embargo, hay que señalar que la medición durante los períodos de lluvia no es práctica y por lo tanto estas condiciones fueron omitidas.

Los parámetros registrados incluyeron la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura a dos alturas. Es importante la sincronización del tiempo entre las mediciones de ruido y las variables meteorológicas con el fin de poder correlacionar estas variables.

Las variables meteorológicas se tomaron de una estación meteorológica ubicada dentro del parque eólico que cuenta con sensores ubicados a 40 y 80 metros de altura. Los datos relativos a dirección y velocidad del viento se registraron en forma continua por lo menos durante 10 minutos. En la tabla A1 del anexo A están registradas las variables meteorológicas obtenidas en las campañas de medición. En la misma tabla está la condición de estabilidad, que es un parámetro calculado a partir de los datos de campo.

Las mediciones de humedad relativa se llevaron a cabo con un analizador multiparámetro EN 300 EXTECH Instruments. Las especificaciones técnicas del analizador multiparámetro se encuentran en la tabla 12.

**4.2.4. Determinación de la estabilidad atmosférica.** Existen diversas metodologías para determinar la estabilidad atmosférica y de ello dependen las variables meteorológicas que se deben medir. En este caso, la estabilidad atmosférica se determinó por medio del gradiente vertical de temperatura atmosférica. Es conveniente definir el gradiente vertical de temperatura como el gradiente en el que la temperatura de la atmósfera cambia con la altura.

El gradiente de temperatura elegido para el análisis de resultados es la diferencia de temperatura dividido por la diferencia de altura entre las mediciones a 80 m y a 40 m.



Tabla 12. Especificaciones técnicas del analizador multiparámetro EN 300 EXTECH Instruments.

Especificaciones	Descripción
Parámetros	Velocidad del viento, humedad relativa, luminosidad, temperatura y nivel sonoro
Intervalo de medición	
Humedad	10 a 95%
Temperatura	0 a 50 °C
Velocidad del aire	0,4 a 30 m/s
Luminosidad	0 a 2.200 Lux
Nivel sonoro	35 a 130 dB
Resolución	
Humedad	0,1%
Temperatura	0,1 °C
Velocidad del aire	0,1 m/s
Luminosidad	1 Lux
Nivel sonoro	0,1 dB
Tamaño	248 x 70 x 34 mm
Peso	335 g

Fuente: <http://www.extech.com.es/instruments>

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_{80} - T_{40}}{0,04} \quad (207)$$

La tabla 13 presenta la categoría de estabilidad atmosférica en función del gradiente de temperatura en la atmósfera medido entre 20 y 120 m de altura [32 y 90].



Tabla 13. Categoría de estabilidad atmosférica en función del gradiente de temperatura en la atmósfera.

$(dT/dz)_{\text{ambiental}}$ (°C/km)	Estabilidad	Categoría
< -19	A	Muy inestable
-19 a -17	B	Moderadamente inestable
-17 a -15	C	Ligeramente inestable
-15 a -5	D	Neutra
-5 a 15	E	Ligeramente estable
> 15	F	Estable

Fuente: Turtós, L. *et al.* Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.



Figura 36. Medición de la temperatura y la humedad relativa





## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. ESPECTRO

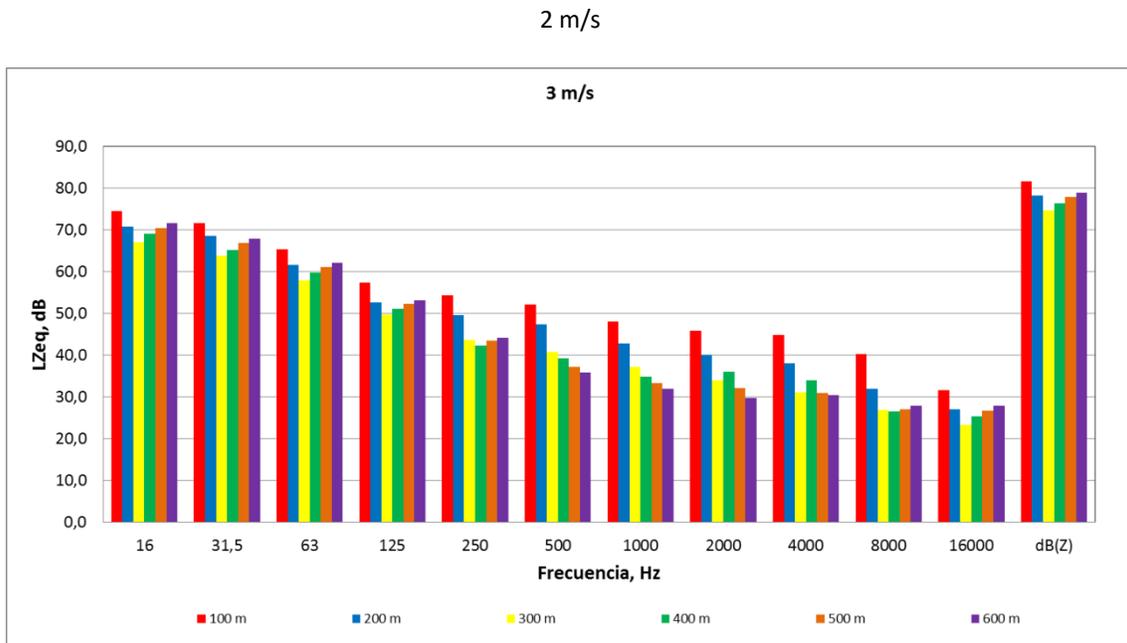
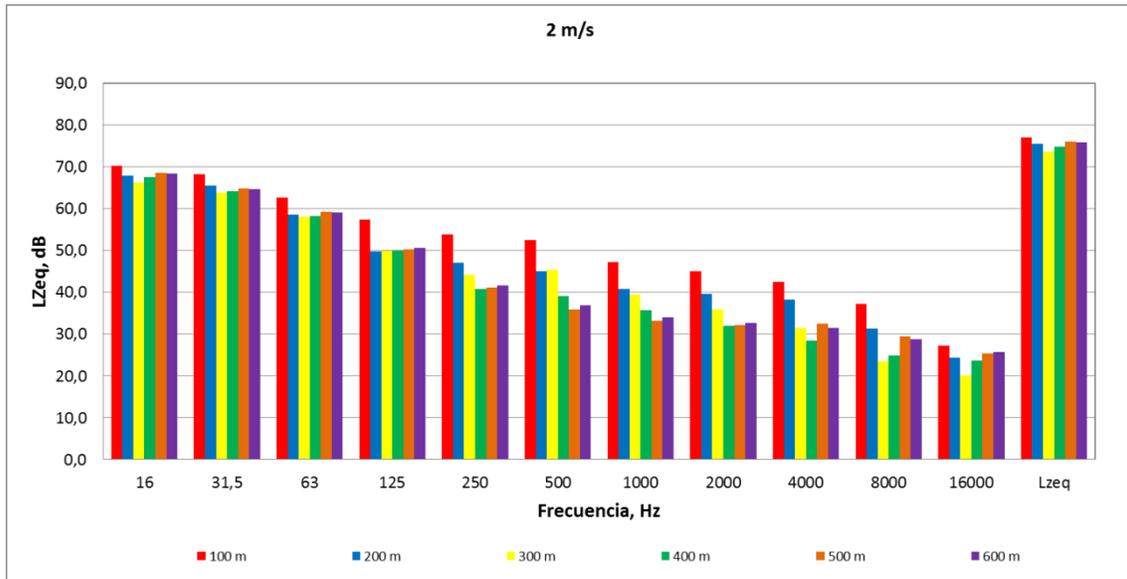
En la figura 37 se presenta el espectro de ruido en bandas de octava, medido a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador y diferentes velocidades del viento a 10 metros de altura.

Las gráficas de la figura 37 dan una idea de la distribución frecuencial de los niveles de presión sonora producidos por los aerogeneradores. Los aerogeneradores tienen un espectro de ruido caracterizado por componentes de baja y mediana frecuencia que hace que exista gran diferencia en el nivel de presión sonora en banda ancha, según se exprese en dB(Z) o en dB(A).

Los componentes de baja frecuencia son relativamente importantes, al haber niveles altos en bandas de frecuencia por debajo de 125 Hz. También se observa que carecen de componentes impulsivos y tonos puros al no destacarse ninguna banda sobre sus adyacentes.

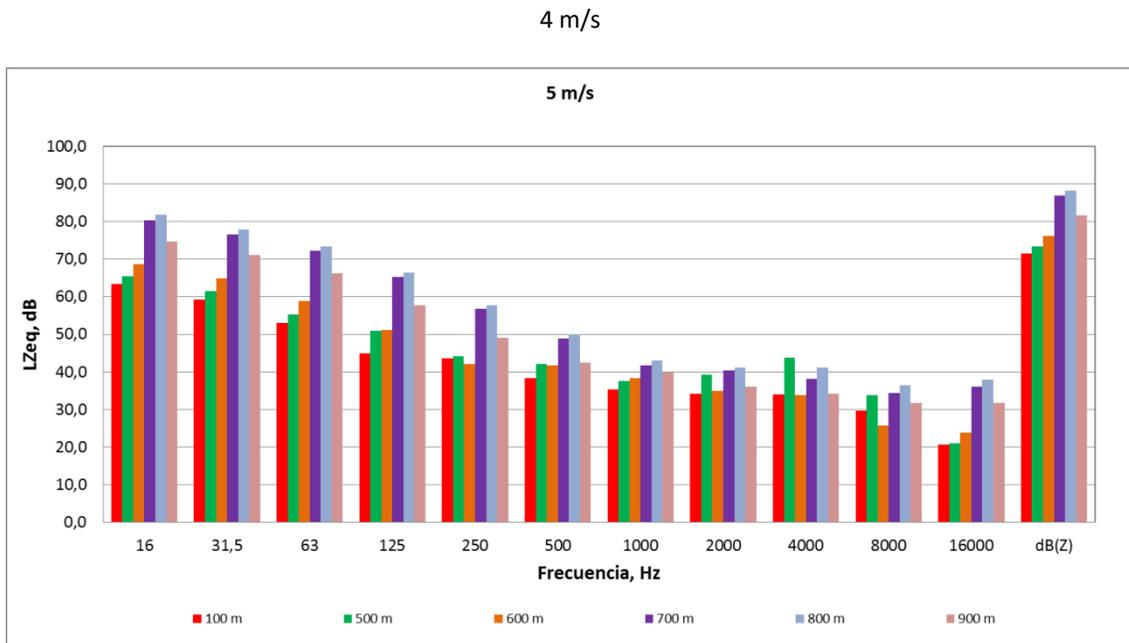
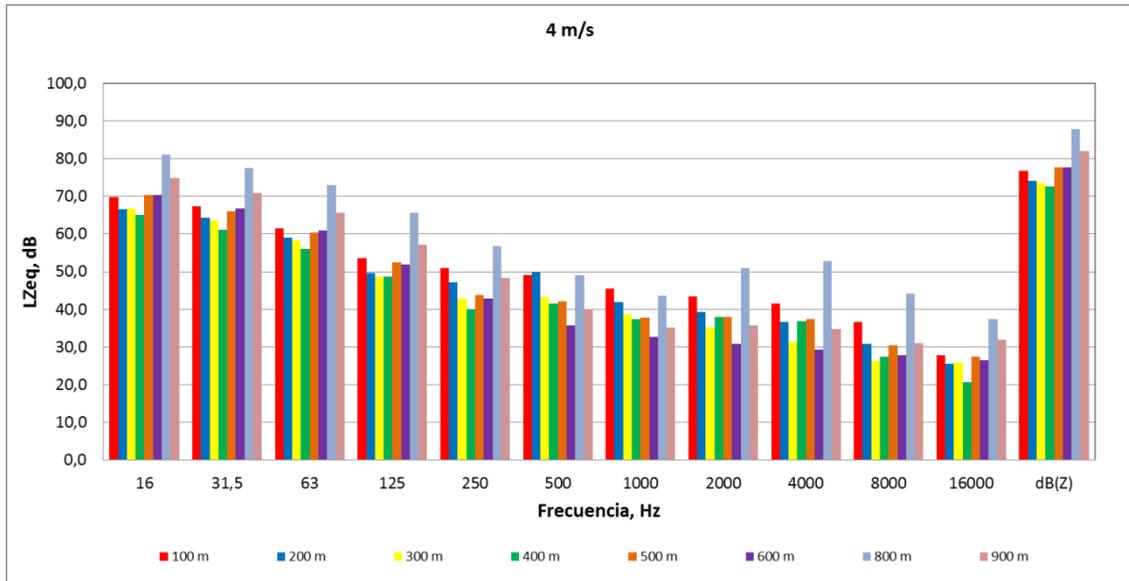
Los niveles de presión sonora equivalentes medidos fluctuaron entre 60,5 y 92,1 dB(Z). El primero de ellos corresponde a una distancia de 100 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 1,6 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica F (estable). El segundo corresponde a una distancia de 300 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 8,2 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable).

Con el filtro de ponderación frecuencial A, los niveles de presión sonora equivalentes medidos fluctuaron entre 33,3 y 60,9 dB(A). El primero de ellos corresponde a una distancia de 500 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 1,5 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable). El segundo corresponde a una distancia de 300 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 8,2 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable).



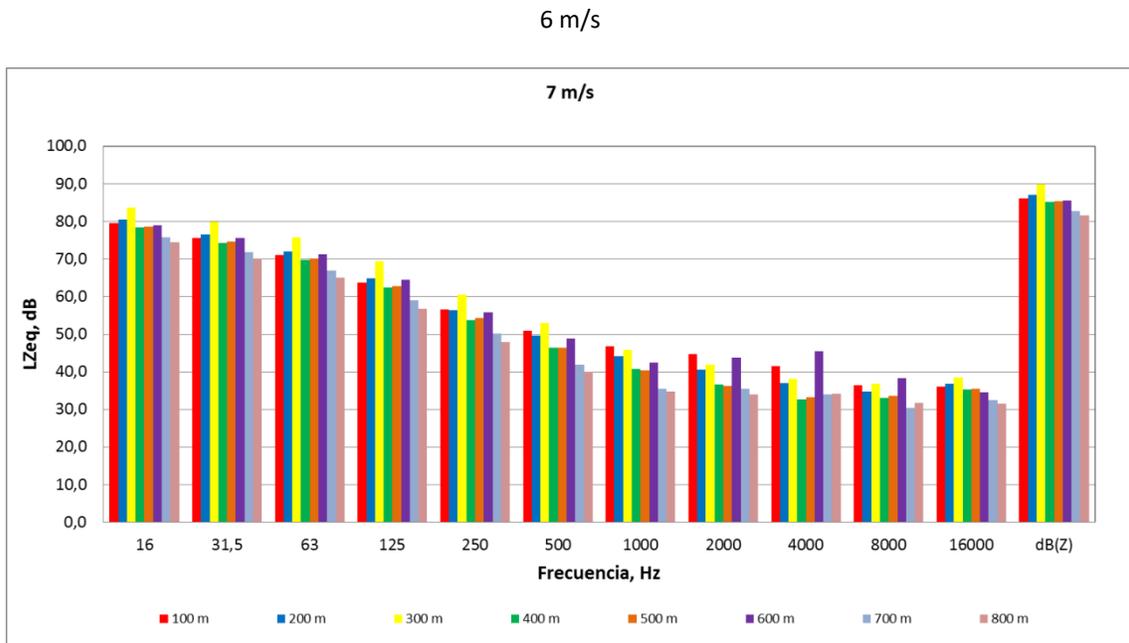
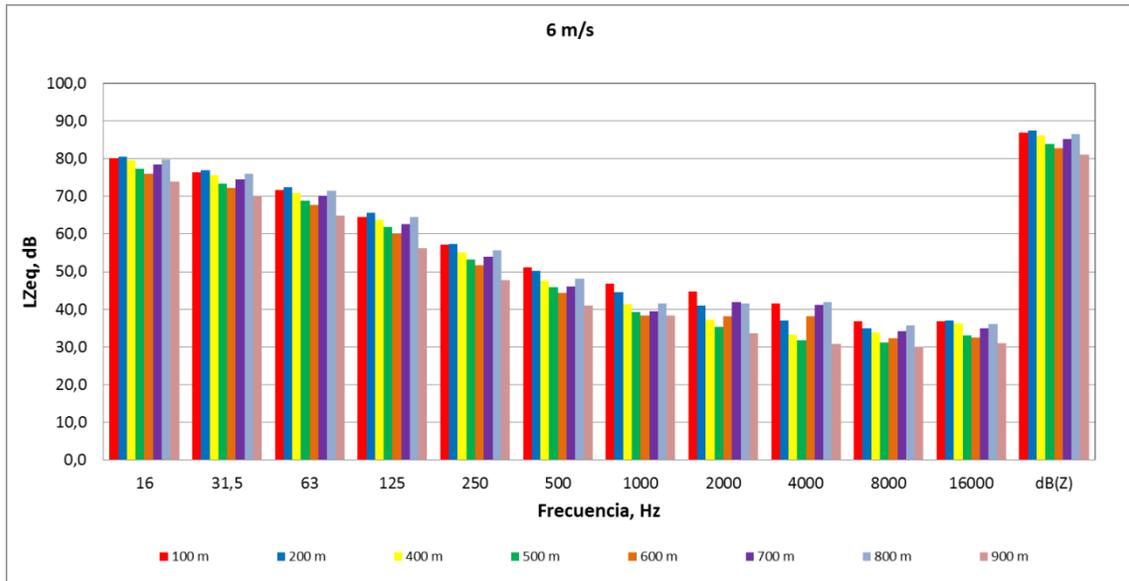
3 m/s

Figura 37. Nivel de presión sonora continuo equivalente ( $L_{Zeq}$ ) a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador y a diferentes velocidades del viento a 10 m de altura.



5 m/s

Figura 37. Nivel de presión sonora continuo equivalente ( $L_{Zeq}$ ) a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador y a diferentes velocidades del viento a 10 m de altura (continuación).



7 m/s

Figura 37. Nivel de presión sonora continuo equivalente ( $L_{Zeq}$ ) a diferentes distancias viento abajo del aerogenerador y a diferentes velocidades del viento a 10 m de altura (continuación).



En una revisión detallada de la figura 38 se puede observar que el nivel de presión sonora en bandas de octava puede aumentar o disminuir sustancialmente en función de la distancia viento abajo del aerogenerador. La tendencia general es que, para una frecuencia determinada, los niveles de presión sonora van disminuyendo a medida que la distancia aumenta para todas las velocidades del viento, excepto para las velocidades de 4 y 5 m/s.

Según Prospathopoulos, este fenómeno se da debido a la turbulencia atmosférica que otros aerogeneradores pueden producir, aumentando la modulación de la amplitud y de ese modo generando un mayor nivel de potencia sonora [69]. Además, viento abajo el sonido se refracta hacia abajo, y se crean condiciones muy propicias para la propagación del sonido a largas distancias. Sin embargo, existe la posibilidad de la presencia de eventos anómalos en las mediciones que no se pudieron retirar al no contar con la serie temporal de datos de las mediciones y que pueden estar también modificando los niveles medidos en algunas bandas.

## 5.2. EVALUACIÓN DE LA NORMA ISO 9613 PARTE 2

En estadística se le llama residuo a la diferencia entre el valor observado  $Y_i$  y el valor estimado por el modelo y es el error en el ajuste del modelo en el  $i$ -ésimo dato [99]. Consecuentemente con lo anterior, en este documento se llamará nivel de presión sonora residual a la diferencia entre el nivel de presión sonora medido y el nivel de presión sonora obtenido por el modelo de predicción de ruido.

La tabla 14 presenta el nivel de presión sonora residual del método de predicción de la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento. Un valor positivo indica una subestimación en la predicción de los niveles de presión sonora, mientras que un valor negativo indica una sobrestimación. El nivel de presión sonora residual oscila entre -8,6 y 72,6 dB(Z), con una mediana de 25,7 dB(Z) para todas las estabildades, frecuencias y puntos de medición.



Tabla 14. Nivel de presión sonora residual del método de predicción de la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2	A	43,6	72,6	25,8
	B	41,6	60,3	34,0
	C			
	D	42,4	62,9	33,6
	E	37,2	57,2	26,9
	F	37,1	61,7	18,7
	Todas	39,1	72,6	18,7
3	A	28,8	58,3	9,3
	B			
	C			
	D	26,6	40,6	20,1
	E	26,1	41,6	17,6
	F	25,2	48,3	11,7
	Todas	27,1	58,3	9,3
4	A	14,4	46,4	0,6
	B	12,1	53,8	-5,7
	C	25,0	46,3	17,5
	D	26,8	59,8	1,0
	E	19,6	36,9	11,5
	F	16,5	42,4	-0,5
	Todas	19,0	59,8	-5,7
5	A	20,5	46,9	7,8
	B	13,6	52,8	-8,6
	C	21,1	42,1	11,6
	D	27,8	55,3	8,3
	E			
	F			
	Todas	19,4	55,3	-8,6
6	A	22,6	49,4	7,3
	B	20,2	49,2	6,1
	C			
	D	21,5	52,7	1,7
	E			
	F	21,8	44,6	9,8
	Todas	21,3	52,7	1,7



Tabla 14. Nivel de presión sonora residual del método de predicción de la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento (continuación).

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
7	A	20,8	44,5	5,1
	B	22,8	40,8	8,3
	C			
	D	20,4	49,7	0,7
	E	22,1	43,5	9,2
	F			
	Todas	20,8	49,7	0,7
8	A	21,5	42,5	6,4
	B			
	C			
	D	15,0	37,6	4,1
	E	24,1	43,7	12,4
	F			
	Todas	20,2	43,7	4,1
9	A	15,7	38,1	4,5
	B			
	C			
	D			
	E			
	F			
	Todas	15,7	38,1	4,5

El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha expresado en dB(Z) oscila entre 1,0 y 56,5 dB(Z), con una mediana de 29,6 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 55,5 dB(Z).

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A), el residuo oscila entre -4,4 y 37,7 dB(A), con una mediana de 20,5 dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 42,1 dB(A).

Se observa, en términos generales que, para velocidades bajas del viento y condiciones estables, se presenta los valores más bajos para el nivel de presión sonora residual. Alrededor de 4 m/s parece haber un punto de



inflexión o transición y de allí en adelante el nivel de presión sonora residual se hace mayor para condiciones estables. En este punto, los valores más altos para el nivel de presión sonora residual se encuentran en las estabildades medias (C y D). También se puede apreciar que a medida que aumenta la velocidad del viento, el nivel de presión sonora residual va disminuyendo.

En el anexo C se presenta el nivel de presión sonora residual discriminado por estabilidad y frecuencia para cada punto de medición. Generalmente se observa que a medida que aumenta la distancia, también aumenta el nivel de presión sonora residual. Además, para condiciones estables, independientemente de la distancia, el nivel de presión sonora residual es mayor.

En términos generales, el nivel de presión sonora residual en función de la frecuencia es una curva con tres puntos de inflexión que se asemeja a una “W” en la que los valores más altos se presentan en los extremos y la mitad del intervalo de frecuencias.

Sabiendo que el método está desarrollado para estimar el nivel de presión sonora bajo condiciones meteorológicas favorables para la propagación de la emisión de ruido, es decir, bajo un sistema de inversión térmica moderada bien desarrollado y una velocidad del viento entre 1 y 5 m/s medida a una altura comprendida entre 3 y 11 m por encima de la superficie del suelo, se observa que para estas condiciones de estabilidad (estabilidad E) y velocidades del viento, el nivel de presión sonora residual aumenta a medida que disminuye la velocidad del viento.

Para la estabilidad E y velocidades del viento inferiores a 5 m/s, el nivel de presión sonora residual oscila entre 11,5 y 57,2 dB(Z), para un valor promedio de 27,0 dB(Z) para todas frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre 18,4 y 45,7 dB(Z), con una mediana de 27,9 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 27,3 dB(Z).

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A) para la estabilidad E y velocidades del viento inferiores a 5 m/s, el residuo oscila entre 15,9 y 29,0 dB(A), con una mediana de 20,9



dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 13,1 dB(A).

En la tabla 22 y las figuras 42 y 43 se presenta la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos y estimados, en banda ancha y con filtros de ponderación frecuencial Z y A, para el modelo de propagación propuesto en la norma ISO 9613.

### 5.3. ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

Idealmente el nivel sonoro producido por una fuente decrece con la distancia. Las dos leyes más comunes de divergencia geométrica son la propagación esférica y la propagación cilíndrica. La figura 38 presenta el comportamiento de la propagación del ruido en banda ancha de los aerogeneradores en función de la velocidad del viento y sin tener en cuenta los demás factores de atenuación.

En la figura 38 se representaron varios modelos que fueron comparados con los niveles medidos en banda ancha. Los modelos de propagación representados fueron: propagación esférica, propagación cilíndrica, el promedio entre la esférica y la cilíndrica y una combinación de ambas.

Como puede apreciarse, se observa que la atenuación con la distancia de los niveles de presión sonora en banda ancha de los aerogeneradores se aproxima al modelo de propagación cilíndrica. A mayor velocidad del viento, mejor es el ajuste del modelo. A una velocidad de 2 y 3 m/s, el modelo de propagación coincide cualitativamente, pero no cuantitativamente. Es decir, el residuo es mucho mayor.

En el anexo D se presenta el comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en función de la frecuencia y la velocidad del viento. Aunque la divergencia geométrica es independiente de la frecuencia, se observan algunas diferencias entre los valores medidos y los calculados en función de la misma.

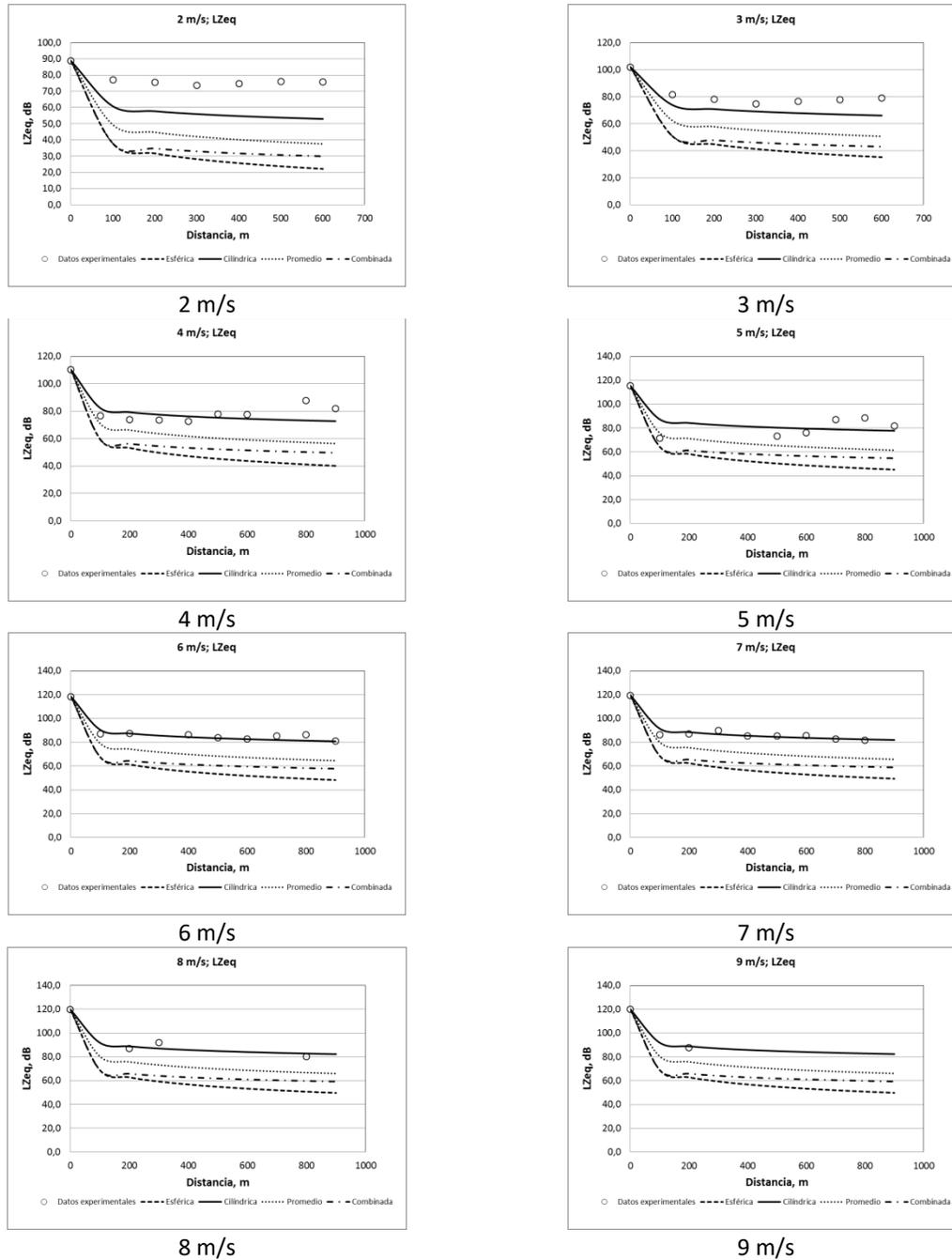


Figura 38. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en banda ancha sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para diferentes velocidades del viento.



A una velocidad del viento de 2 m/s, la atenuación del sonido se ajusta al modelo de propagación cilíndrica. Las frecuencias que se encuentran entre 125 y 4000 Hz son las que el modelo ajusta mejor. En las frecuencias bajas (16 a 63 Hz) y las altas (8 a 16 kHz) el modelo de propagación coincide cualitativamente, pero no cuantitativamente. Es decir, el nivel de presión sonora residual es mucho mayor. Sin embargo, los niveles medidos en estas frecuencias se acercan más al modelo de propagación cilíndrica que al modelo de propagación esférica.

En términos generales, para velocidades del viento por encima de 3 m/s, la atenuación del sonido se ajusta más al modelo de propagación cilíndrica. A diferencia de lo que ocurre con una velocidad del viento de 2 m/s, las frecuencias bajas (16 a 63 Hz) y las altas (16 kHz) son las que el modelo ajusta mejor. En las frecuencias medias (125 a 8000 Hz) se observa una mayor atenuación de los niveles sonoros, haciendo que el modelo de propagación se ajuste entre el cilíndrico, que sólo da 3 dB de reducción al duplicarse la distancia, y el promedio entre el esférico y el cilíndrico, que da 4,5 dB. No obstante, la tendencia no está muy bien definida y se puede utilizar cualquiera de los dos. Incluso, algunas frecuencias comprendidas entre 125 y 8000 Hz se ajustan al modelo de propagación combinado, pero nunca al modelo de propagación esférica.

Al igual que en la figura 37, en la figura 38 y en el anexo D se puede observar que el nivel de presión sonora equivalente ( $L_{zeq}$ ) puede aumentar o disminuir en función de la distancia viento abajo del aerogenerador para ciertas velocidades del viento. Posibles causas para que ello ocurra fueron enunciadas en la sección 5.1.

La figura 39 presenta el comportamiento de la propagación del ruido en banda ancha de los aerogeneradores en función de la velocidad del viento teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica.

Al igual que en la figura 38, se observa que la atenuación de los niveles de presión sonora en banda ancha de los aerogeneradores se aproxima al modelo de propagación cilíndrica. A mayor velocidad del viento, mejor es el ajuste del modelo. A una velocidad de 2 y 3 m/s, el modelo de propagación coincide cualitativamente, pero no cuantitativamente.

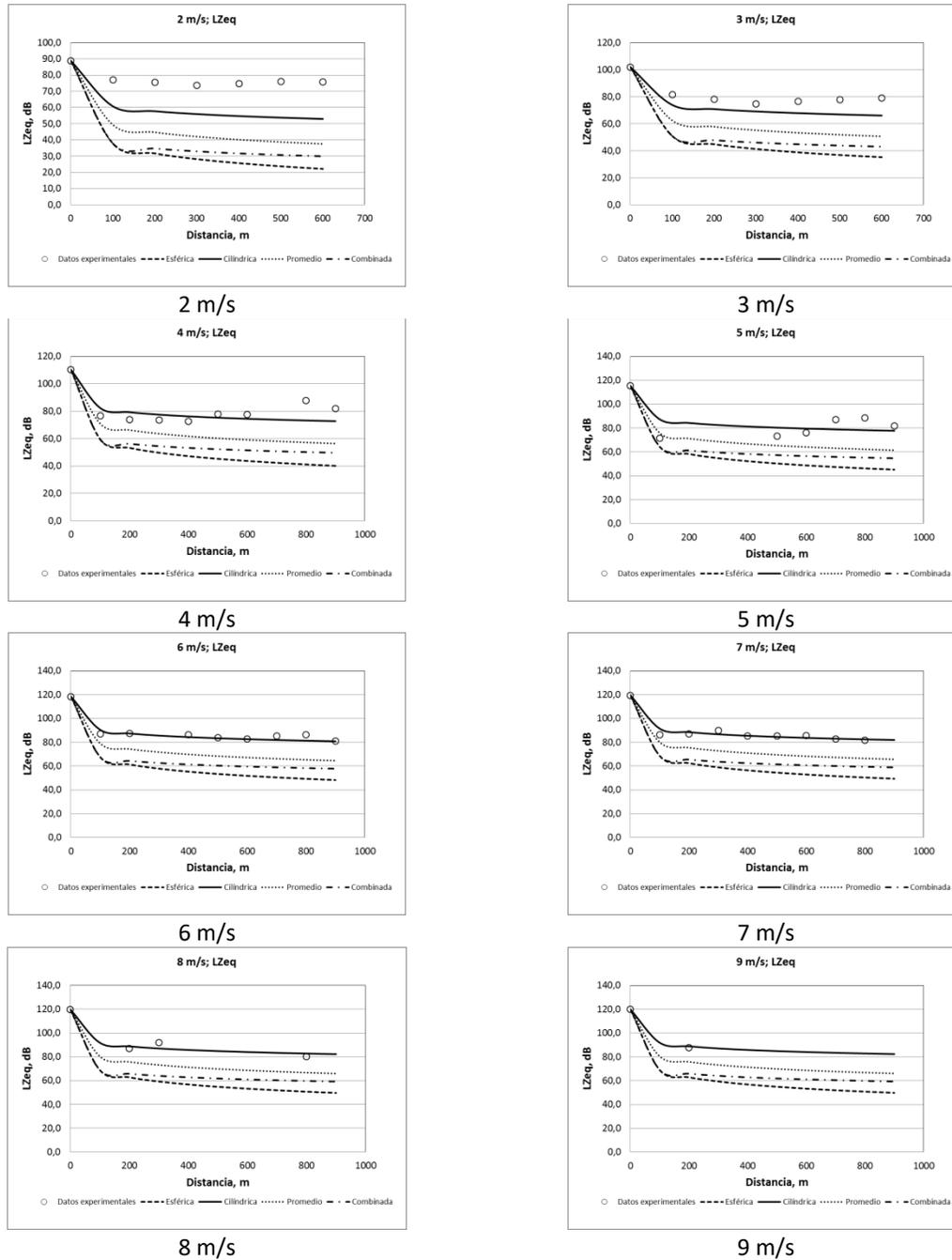


Figura 39. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en banda ancha teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para diferentes velocidades del viento.



En el anexo E se presenta el comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores en función de la frecuencia y la velocidad del viento teniendo en cuenta la estabilidad atmosférica. Se presenta exactamente el mismo comportamiento que en el caso anterior en el que no se tiene en cuenta la absorción atmosférica. Aunque ligera, se presenta una mayor atenuación para condiciones estables a velocidades del viento bajas (2 y 3 m/s). Para velocidades del viento mayores, la mayor atenuación se presenta para condiciones inestables. El nivel de presión sonora residual aumenta en las frecuencias comprendidas entre 8 y 16 kHz.

Al tener en cuenta la atenuación por absorción atmosférica las frecuencias comprendidas entre 2000 y 8000 Hz presentan un mejor ajuste al modelo de propagación cilíndrica. En la frecuencia de 16 kHz el nivel de presión sonora residual aumenta.

La tabla 15 presenta el nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento. El nivel de presión sonora residual oscila entre -31,6 y 41,9 dB(Z), con una mediana de -2,7 dB(Z) para todas las estabildades, frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -22,0 y 25,7 dB(Z), con una mediana de 1,1 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 47,7 dB(Z).

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A), el residuo oscila entre -27,4 y 13,6 dB(A), con una mediana de -7,2 dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 41,0 dB(A).

En el anexo F se presenta el nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para cada punto de medición.



Tabla 15. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2	A	14,3	41,9	-0,3
	B	10,8	29,5	3,2
	C			
	D	12,0	32,9	3,6
	E	7,6	28,1	-3,1
	F	9,9	35,7	-4,3
	Todas	11,0	41,9	-4,3
3	A	0,3	27,7	-15,1
	B			
	C			
	D	-2,5	11,6	-8,9
	E	-2,5	13,8	-11,0
	F	-1,2	23,6	-16,1
	Todas	-0,6	27,7	-16,1
4	A	-11,6	15,6	-23,0
	B	-14,6	21,2	-28,7
	C	-4,9	16,3	-12,5
	D	-3,2	27,7	-22,0
	E	-9,5	7,9	-17,5
	F	-8,9	14,9	-23,5
	Todas	-8,4	27,7	-28,7
5	A	-10,6	15,5	-23,0
	B	-14,2	20,2	-31,6
	C	-9,4	12,1	-18,4
	D	-3,7	23,3	-21,7
	E			
	F			
	Todas	-10,2	23,3	-31,6
6	A	-8,9	17,3	-24,6
	B	-10,8	17,1	-24,6
	C			
	D	-7,5	20,6	-26,5
	E			
	F	-7,3	15,6	-19,2
	Todas	-8,6	20,6	-26,5



Tabla 15. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y velocidad del viento (continuación).

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
7	A	-10,9	12,5	-26,9
	B	-8,0	10,0	-22,5
	C			
	D	-8,2	18,6	-22,3
	E	-5,7	15,8	-18,5
	F			
	Todas	-9,2	18,6	-26,9
8	A	-10,6	10,4	-25,6
	B			
	C			
	D	-11,0	11,5	-21,9
	E	-3,7	15,9	-15,4
	F			
	Todas	-8,4	15,9	-25,6
9	A	-10,3	12,0	-21,5
	B			
	C			
	D			
	E			
	F			
	Todas	-10,3	12,0	-21,5

La tabla 16 presenta el nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado y los niveles medidos discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento. El nivel de presión sonora residual oscila entre -8,6 y 64,9 dB(Z), con una mediana de 20,7 dB(Z) para todas las estabilidades, frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre 1,0 y 48,7 dB(Z), con una mediana de 24,6 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 47,7 dB(Z).

En el anexo G se presenta el nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para cada punto de medición.



Tabla 16. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2	A	37,3	64,9	22,7
	B	33,8	52,5	26,2
	C			
	D	35,0	55,9	26,6
	E	30,6	51,1	19,9
	F	32,9	58,7	18,7
	Todas	34,0	64,9	18,7
3	A	23,3	50,7	7,9
	B			
	C			
	D	20,5	34,6	14,1
	E	20,5	36,8	12,0
	F	21,8	46,6	6,9
	Todas	22,4	50,7	6,9
4	A	11,4	38,6	0,0
	B	8,4	44,2	-5,7
	C	18,1	39,3	10,5
	D	19,8	50,7	1,0
	E	13,5	30,9	5,5
	F	14,1	37,9	-0,5
	Todas	14,6	50,7	-5,7
5	A	12,4	38,5	0,0
	B	8,8	43,2	-8,6
	C	13,6	35,1	4,6
	D	19,3	46,3	1,3
	E			
	F			
	Todas	12,8	46,3	-8,6
6	A	22,6	49,4	7,3
	B	18,4	49,2	0,1
	C			
	D	15,5	43,6	-3,5
	E			
	F	15,7	38,6	3,8
	Todas	17,4	49,4	-3,5



Tabla 16. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y velocidad del viento (continuación).

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
7	A	12,1	35,5	-3,9
	B	15,0	33,0	0,5
	C			
	D	14,8	41,6	0,7
	E	17,3	38,8	4,5
	F			
	Todas	13,8	41,6	-3,9
8	A	12,4	33,4	-2,6
	B			
	C			
	D	12,0	34,5	1,1
	E	19,3	38,9	7,6
	F			
	Todas	14,6	38,9	-2,6
9	A	12,7	35,0	1,5
	B			
	C			
	D			
	E			
	F			
	Todas	12,7	35,0	1,5

La tabla 17 nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio (el promedio entre la propagación esférica y cilíndrica) discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento. El nivel de presión sonora residual oscila entre -20,1 y 57,2 dB(Z), con una mediana de 11,6 dB(Z) para todas las estabilidades, frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -10,5 y 43,2 dB(Z), con una mediana de 15,5 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 53,7 dB(Z).

En el anexo H se presenta el nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para cada punto de medición.



Tabla 17. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2	A	28,9	57,2	12,8
	B	26,2	44,9	18,6
	C			
	D	27,2	47,9	18,6
	E	22,4	42,6	11,9
	F	24,0	53,6	7,2
	Todas	25,3	57,2	7,2
3	A	14,6	42,9	-2,2
	B			
	C			
	D	12,1	26,1	5,6
	E	11,8	27,7	3,5
	F	12,0	35,2	-2,2
	Todas	13,2	42,9	-2,2
4	A	1,4	31,0	-10,9
	B	-1,3	37,5	-17,2
	C	10,0	31,3	2,5
	D	11,8	43,8	-10,5
	E	5,1	22,4	-3,0
	F	3,8	28,5	-12,0
	Todas	5,3	43,8	-17,2
5	A	4,9	31,2	-7,6
	B	-0,3	36,5	-20,1
	C	5,8	27,1	-3,4
	D	12,0	39,3	-6,7
	E			
	F			
	Todas	4,6	39,3	-20,1
6	A	6,8	33,4	-8,6
	B	4,7	33,2	-9,3
	C			
	D	7,0	36,7	-11,5
	E			
	F	7,3	30,1	-4,7
	Todas	6,3	36,7	-11,5



Tabla 17. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y velocidad del viento (continuación).

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
7	A	4,9	28,5	-10,9
	B	7,4	25,4	-7,1
	C			
	D	6,1	34,0	-10,8
	E	8,2	29,6	-4,7
	F			
	Todas	5,8	34,0	-10,9
8	A	4,0	18,3	-9,6
	B			
	C			
	D	0,5	10,6	-8,9
	E	8,9	16,3	-1,5
	F			
	Todas	4,5	18,3	-9,6
9	A	2,7	25,1	-8,5
	B			
	C			
	D			
	E			
	F			
	Todas	2,7	25,1	-8,5

#### 5.4. FACTOR DE DIRECCIONALIDAD

La radiación del ruido producido por un aerogenerador se comporta como una fuente de sonido dipolo y por lo tanto el nivel de presión sonora cambia con las posiciones del receptor por efecto de la direccionalidad del sonido [101 y 102].

Siguiendo las recomendaciones de Brooks, Pope y Marcolini [13, 61 y 102], se utilizaron las ecuaciones para la direccionalidad del sonido propuestas por ellos (ecuaciones 8 y 9). Estas ecuaciones coinciden con lo expresado por Friman y Hoogzaad [31 y 39], en cuanto a que la direccionalidad del



sonido no sólo depende de la posición del receptor respecto a la fuente, sino también de la velocidad del viento. En este caso la ecuación 8 se utilizó para frecuencias altas ( $\geq 500$  Hz) y la ecuación 9 para frecuencias bajas ( $< 500$  Hz).

El residuo resultante de calcular el nivel de presión sonora con las ecuaciones para la direccionalidad se reduce ligeramente con respecto al calculado con  $D = 0$  dB.

## 5.5. ATENUACIÓN POR EFECTOS DEL SUELO

Se ha encontrado que la resistividad del flujo de aire en la superficie del suelo es un parámetro suficiente para describir la capacidad de absorción del suelo [47]. Por lo tanto, la atenuación por efectos del suelo se calculó a través de la impedancia acústica a través del modelo de Delany-Bazley (ecuaciones 172 a 175).

## 5.6. MODELO DE PROPAGACIÓN PROPUESTO

La pregunta que debe responderse es si la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos y calculados se podría atribuir sistemáticamente a un mecanismo físico. Si éste fuera el caso, y si el mecanismo físico se puede identificar positivamente, entonces sería posible desarrollar un modelo teórico capaz de calcular con precisión los efectos de la propagación del ruido. Por lo tanto, se realizó un análisis estadístico detallado de los datos registrados en campo para investigar la dependencia del nivel de presión sonora residual con los demás parámetros monitoreados (variables independientes) durante las mediciones.

Para el análisis de los datos se utilizó el software estadístico Statgraphics Centurion XVI versión 16.1.11 con el propósito de obtener el modelo matemático. Las variables que se ingresaron al modelo matemático se seleccionaron a través del software estadístico XLSTAT 2009.1.02 por medio de un Análisis de Componentes Principales (ACP). Se introdujeron una a una las variables en el modelo matemático que mostraron una correlación con el nivel de presión sonora residual (positiva o negativa y de mayor a



menor) hasta logra una ecuación que explicara la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos y estimados.

Se realizó una regresión múltiple para analizar la correlación de los datos medidos en la que la variable dependiente es el nivel de presión sonora residual arrojado por el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2 con los siguientes ajustes, de acuerdo a lo tratado en el numeral 3.3.4:

Tabla 18. Ajustes y/o modificaciones propuestas al método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2.

Ítem	Método norma ISO 9613 Parte 2	Ajuste	Motivo
Filtro de ponderación frecuencial	A	Z	Para no subestimar el aporte energético en las frecuencias bajas
Divergencia geométrica	Esférico	Cilíndrico	Observación experimental
Factor de direccionalidad	Igual a cero	Modelo propuesto por Brooks, Pope y Marcolini	La direccionalidad del sonido no sólo depende de la posición del receptor respecto a la fuente, sino también de la velocidad del viento
Atenuación del suelo	Atenuación por regiones de acuerdo a las condiciones del terreno.	Modelo de impedancia acústica de Delany-Bazley	El método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2 para estimar la atenuación por efectos del suelo no es aplicable para distancias significativas y cuando la fuente y el receptor están a una altura considerable

A partir de las mediciones y la comparación de estas con los niveles estimados, se desarrolló un procedimiento de cálculo para predecir el ruido proveniente de los aerogeneradores. El método de cálculo incluye esos parámetros que demostraron tener influencia en los niveles de presión sonora.

Este análisis ofrece la ecuación del modelo ajustado para la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica. Se procesaron los datos determinando las correlaciones entre el nivel de presión sonora residual con la velocidad



del viento, frecuencia, estabilidad atmosférica, distancia y ángulo de incidencia entre otros.

El modelo ajustado muestra la dependencia o relación que existe entre la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica y las demás variables independientes.

El estadístico  $R^2$  indica el porcentaje en que el modelo explica la variabilidad de la variable dependiente. El error estándar de la estimación puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

Para decidir la simplificación del modelo, se tiene en cuenta el *p-value* más alto en las variables independientes. Si el *p-value* es inferior a 0,05; hay una relación estadísticamente significativa entre las variables en un nivel de confianza del 95,0%. Por tanto, no se debe quitar ninguna variable del modelo.

Los resultados arrojados por el modelo son los siguientes:

$R^2$ :	92,5 %
$R^2$ (ajustado):	92,4 %
Error estándar:	3,8 dB
Error absoluto medio:	2,9 dB
<i>p-value</i> :	0,00

Dado que el *p-value* en el análisis de varianza es inferior a 0,05; hay una relación estadísticamente significativa entre las variables en un nivel de confianza del 95,0 %. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo fijado explica el 92,5 % de la variabilidad del nivel de presión sonora residual.

Al eliminar el 5,0 % de los datos al considerarse atípicos por tener residuos estudentizados mayores de 2, el modelo fijado explica el 94,7 % de la variabilidad del nivel de presión sonora residual y un error absoluto medio de 2,1 dB. Los residuos estudentizados miden cuántas desviaciones estándar de cada valor observado del nivel de presión sonora residual se desvían del modelo ajustado utilizando todos los datos.

Con este modelo, la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica se obtiene a partir de la siguiente ecuación:



$$\begin{aligned}
 A_{est} = & 4,08123 C_{est} - 0,390491 \theta C_{est} + 0,0217051 \left(\frac{Z_{eje}}{\sigma_z}\right)^2 - 4674,33 \left(\frac{1}{\sigma_y}\right) + \\
 & 55,3053 \left(\frac{Z_{eje}}{\sigma_y}\right) + 5,00644 e^{-\left(\frac{Z_{eje}}{\sigma_y}\right)^2} - 0,000253954 C_{est} r U_{80} + 1636,98 \left(\frac{C_{est}}{r}\right) + \\
 & 0,00948312 \theta^4 + 439,414 \delta_s + 540,19 f_{pico} - 0,0000603146 R_{e_{10}} - \\
 & 0,832957 A_{suelo} + K(Lw) + K(S_t) + K_6(f) + K(U) + K(r) + K(rU) + K(aire)
 \end{aligned}$$

En la cual:

- $C_{est}$  = Clase de estabilidad atmosférica
- $Z_{eje}$  = Altura del eje del aerogenerador, m
- $\sigma_z$  = Coeficiente de propagación vertical, m
- $\sigma_y$  = Coeficiente de propagación horizontal, m
- $\theta$  = Ángulo de incidencia de la onda sonora, °
- $K(Lw)$  = Parámetro en función de los niveles de potencia sonora, dB(Z)
- $K(S_t)$  = Parámetro en función del número de Strouhal, dB(Z)
- $K_6(f)$  = Parámetro en función de la frecuencia, dB(Z)
- $K(U)$  = Parámetro en función de la velocidad del viento, dB(Z)
- $K(r)$  = Parámetro en función de la distancia, dB(Z)
- $K(rU)$  = Parámetro en función de la distancia y la velocidad del viento, dB(Z)
- $K(aire)$  = Parámetro en función de las propiedades del aire, dB(Z)
- $\delta_s$  = Parámetro integral de la capa límite (ecuación 189), m
- $f_{pico}$  = Frecuencia pico (ecuación 199), Hz
- $R_{e_{10}}$  = Número de Reynolds a 10 m de altura
- $A_{suelo}$  = Atenuación del suelo, dB(Z)

La tabla 19 presenta las clases de estabilidad atmosférica y su relación con las categorías de estabilidad de Pasquill.

Para calcular los coeficientes de propagación horizontal  $\sigma_y$  y vertical  $\sigma_z$  empleando un modelo matemático se puede utilizar el propuesto por McMullen, a través de la siguiente ecuación [59]:



Tabla 19. Clases de estabilidad atmosférica.

Estabilidad	Calificación	$C_{est}$
A	Muy inestable	1
B	Moderadamente inestable	2
C	Ligeramente inestable	3
D	Neutra	4
E	Ligeramente estable	5
F	Estable	6

Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma = e^{\left[ I+J \ln\left(\frac{r}{1000}\right) + K \left(\ln\left(\frac{r}{1000}\right)\right)^2 \right]} \quad (209)$$

En la cual:

$\sigma$  = Coeficiente de propagación, m

$r$  = Distancia entre el aerogenerador y el receptor, m

$I, J, K$  = Constantes empíricas para cada clase de estabilidad

Haciendo una comparativo con la dispersión de los contaminantes atmosféricos y su relación con la estabilidad atmosférica se introdujeron los coeficientes de dispersión horizontal y vertical del modelo de dispersión gaussiano en la regresión múltiple arrojando una correlación positiva entre los coeficientes y el nivel de presión sonora residual del método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2. De ahora en adelante se les llamará coeficientes de propagación en este documento a los coeficientes de dispersión.

Los coeficientes de propagación representan el grado de dispersión vertical y horizontal del ruido. Altos valores de desviación estándar se derivan de una atmósfera inestable y turbulenta, mientras que los valores bajos se producen en condiciones atmosféricas menos turbulentas. La tabla 20 presenta el valor de las constantes para la ecuación de McMullen.



Tabla 20. Constantes para los coeficientes de propagación según la clase de estabilidad atmosférica.

Estabilidad	$\sigma_y$ (m)			$\sigma_z$ (m)		
	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>
A	5,357	0,8828	-0,0076	6,035	2,1097	0,2770
B	5,058	0,9024	-0,0096	4,694	1,0629	0,0136
C	4,651	0,9181	-0,0076	4,110	0,9201	-0,0020
D	4,230	0,9222	-0,0087	3,414	0,7371	-0,0316
E	3,922	0,9222	-0,0064	3,057	0,6794	-0,0450
F	3,533	0,9181	-0,0070	2,621	0,6564	-0,0540

Fuente: Molina, F. Modelo de dispersión gaussiano de contaminantes atmosféricos. Universidad de Antioquia. Medellín, 1990.

El parámetro en función de los niveles de potencia sonora está dado por:

$$K(Lw) = 5,09679 Lw_{total} + 2,02835 Lw_{dvcllbs} - 3,19802 Lw_{fte} - 0,557573 Lw_1 - 7199,64$$

En la cual:

$Lw_1$  = Nivel de potencia sonora en función de la velocidad del viento y la frecuencia (ecuación 187), dB(Z)

$Lw_{total}$  = Nivel de potencia sonora total (ecuación 206), dB(Z)

$Lw_{fte}$  = Nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento incidente (ecuación 186), dB(Z)

$Lw_{dvcllbs}$  = Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida (ecuación 202), dB(Z)

El parámetro en función del número de Strouhal está dado por:

$$K(S_t) = 0,00125789 S_t - 3,01897 (\log S_t)^2 \quad (211)$$

En la cual:

$S_t$  = Número de Strouhal (ecuación 192)



El parámetro en función de la frecuencia está dado por:

$$K_5(f) = 23,2998 e^{-(f-315)^2} - 1,16688 \times 10^6 \frac{1}{f^4} + K_6(f) \quad (212)$$

En la cual:

$f$  = Frecuencia, Hz

- Para frecuencias  $\leq 500$  Hz:

$$\begin{aligned} K_6(f) = & 1366,91(-3,394 \ln f + 10,388) + 1369,65(0,0001 f^2 - 0,0745 f + 1,5649) \\ & - 2735,39 \left( \frac{-3,394 \ln f + 0,0001 f^2 - 0,0745 f + 11,9529}{2} \right) \\ & + 5,97159(-1,452 \ln f + 9,0156) \end{aligned}$$

- Para frecuencias  $> 500$  Hz:

$$\begin{aligned} K_6(f) = & 1366,91(11,912 \ln f - 93,986) \\ & + 1369,65(-0,0000001 f^2 + 0,0043 f - 13,095) \\ & - 2735,39 \left( \frac{11,912 \ln f - 0,0000001 f^2 + 0,0043 f - 107,081}{2} \right) \\ & + 5,97159(1,4427 \ln f - 8,9658) \end{aligned}$$

El parámetro en función de la velocidad del viento está dado por:

$$\begin{aligned} K(U) = & 534,504 (\log U_{10})^4 - 889,371 (\log U_{10})^3 + 9,05361 U_{80} - 10,1495 U_{80}^2 \\ & + 0,216593 U_{80}^3 + 541,524 (\log U_{80})^5 + 2357,86 \log(U_{80}) \\ & - 709,713 \log(M_{80}^3) \end{aligned}$$

En la cual:

$U_{10}$  = Velocidad del viento a 10 m de altura, m/s

$U_{80}$  = Velocidad del viento a 80 m de altura, m/s

$M_{80}$  = Número de Mach a 80 m de altura



El parámetro en función de la distancia está dado por:

$$K(r) = 0,0000842316 r^2 + 1,61373 \times 10^{14} r^{-5} - 3,42167 \times 10^{12} r^{-4} - 2,34375 \times 10^7 r^{-2} - 458,682 \log(r)$$

En la cual:

$r$  = Distancia entre el aerogenerador y el receptor, m

El parámetro en función de la distancia y velocidad del viento está dado por:

$$K(rU) = -9,28719 \times 10^{-18} (r U_{10})^5 + 8,22292 \times 10^{-14} (r U_{10})^4 - 7,93307 \times 10^{-7} (r U_{10})^2$$

El parámetro en función de las propiedades del aire está dado por:

$$K(\text{aire}) = 1577,85 \rho - 8,24959 \times 10^6 \mu + 0,079548 HR + 5,51666 t \quad (218)$$

En la cual:

$\rho$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad del aire, kg/m·s

$HR$  = Humedad relativa, %

$t$  = Temperatura ambiente, °C

El número de Reynolds a 10 m de altura está dado por:

$$R_{e_{10}} = \frac{c_{max} U_{10} \rho}{\mu} \quad (219)$$

En la cual:

$c_{max}$  = Longitud máxima de la cuerda, m

$U_{10}$  = Velocidad del viento a 10 m de altura, m/s

$\rho$  = Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad del aire, kg/m·s

La figura 40 presenta los niveles de presión sonora estimados por el modelo de predicción propuesto versus los niveles medidos. Se intentó correlacionar el residuo arrojado por el modelo de predicción propuesto para el nivel de presión sonora con otras variables medidas y no se logró una correlación que mejorara el modelo propuesto.

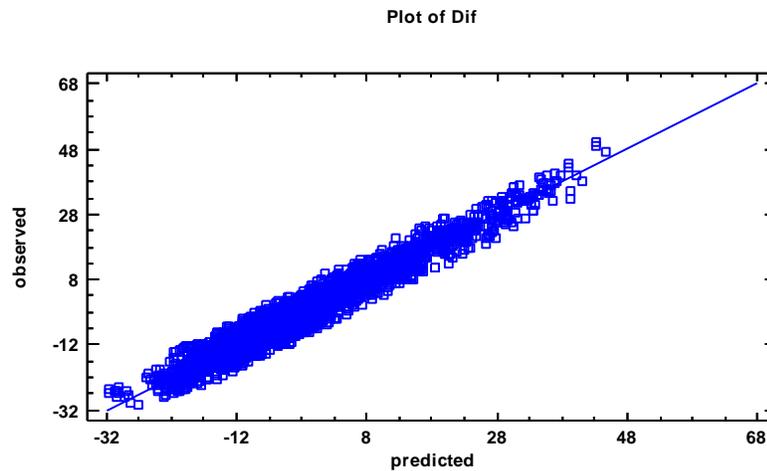
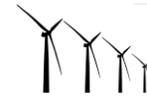


Figura 40. Niveles de presión sonora estimados por el modelo de predicción propuesto versus los niveles medidos.

También se llevó a cabo un análisis dimensional (método pi de Buckingham) para intentar reducir el número de las magnitudes físicas en forma de variables independientes que intervienen en la descripción del fenómeno de propagación del sonido con el propósito de tener una nueva visión para su solución.

El método arrojó como parámetro adimensional importante el número de Strouhal. Este parámetro se tuvo en cuenta en la regresión múltiple realizada dado que el *p-value* obtenido fue menor a 0,05. Eso quiere decir que este término tiene una relación estadísticamente significativa con la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica en un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, el número de variables independientes no se pudo reducir.

La tabla 21 presenta el nivel de presión sonora residual que se obtiene con el modelo de predicción propuesto, para todas las frecuencias, discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento. Un valor positivo indica una sobrestimación en la predicción de los niveles de presión sonora, mientras que un valor negativo indica una subestimación.



Tabla 21. Nivel de presión sonora residual del método de predicción propuesto para todas las frecuencias, discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2	A	-0,9	13,8	-14,9
	B	-4,8	1,5	-10,7
	C			
	D	0,1	13,7	-8,4
	E	-0,1	3,1	-3,9
	F	-5,2	21,4	-17,8
	Todas	-3,3	21,4	-17,8
3	A	-2,3	27,0	-15,7
	B			
	C			
	D	-0,7	3,2	-5,5
	E	-2,7	7,4	-11,2
	F	-3,8	5,8	-17,0
	Todas	-2,9	27,0	-17,0
4	A	-3,8	1,7	-14,8
	B	9,5	28,8	-11,4
	C	2,2	4,1	0,0
	D	0,8	15,3	-13,2
	E	-1,9	9,8	-9,2
	F	4,6	27,3	-19,9
	Todas	2,2	28,8	-19,9
5	A	-2,1	3,1	-6,2
	B	-0,8	8,2	-7,3
	C	-3,0	19,2	-12,3
	D	-0,7	6,3	-8,6
	E			
	F			
	Todas	-1,3	19,2	-12,3
6	A	-1,1	6,6	-11,2
	B	-0,2	19,2	-9,6
	C			
	D	-0,2	9,4	-8,0
	E			
	F	0,6	4,9	-4,3
	Todas	-0,3	19,2	-11,2



Tabla 21. Nivel de presión sonora residual del método de predicción propuesto para todas las frecuencias, discriminado por estabilidad atmosférica y velocidad del viento (continuación).

Velocidad del viento (m/s)	Estabilidad	Nivel de presión sonora residual (dB)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
7	A	-0,2	10,8	-9,8
	B	6,8	25,1	-0,5
	C			
	D	-1,7	5,5	-8,3
	E	-6,7	0,0	-13,7
	F			
	Todas	-1,2	25,1	-13,7
8	A	1,2	2,9	-7,4
	B			
	C			
	D			
	E	-5,8	0,2	-13,8
	F			
	Todas	-2,6	13,4	-13,8

El nivel de presión sonora residual oscila entre -19,7 y 27,3 dB(Z), con una mediana de -1,8 dB(Z) para todas las estabildades, frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -15,0 y 14,1 dB(Z), con una mediana de 2,2 dB(Z). En el anexo I se presenta el nivel de presión sonora residual discriminado por estabilidad y frecuencia para cada punto de medición.

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A), el residuo oscila entre -15,0 y 14,7 dB(A), con una mediana de -1,9 dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 29,7 dB(A).

Se observa, en términos generales que, para velocidades bajas del viento y condiciones estables, se presenta los valores más bajos para el nivel de presión sonora residual. Además, el nivel de presión sonora residual promedio aumenta a medida que la frecuencia aumenta.

Descartando la frecuencia de 16000 Hz se logra reducir el nivel de presión sonora residual en el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda



ancha. El motivo para descartar esta frecuencia se debe a que el ruido de fondo en esta frecuencia, a varios cientos de metros del aerogenerador, por lo general supera los niveles de presión sonora que provienen del aerogenerador y, debido a los efectos de la medición, puede hacer que su valor sea mayor que el nivel real.

En la tabla 22 y las figuras 41 y 42 se presenta la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos y estimados, en banda ancha y con filtros de ponderación frecuencial Z y A, para el modelo de propagación propuesto y el modelo ISO 9613 en su versión original y con algunas variaciones.

Tabla 22. Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtros de ponderación frecuencial Z y A.

Nivel de presión sonora continuo equivalente	Porcentaje de datos (%)			
	$\leq 3$ dB	3 – 6 dB	6 – 9 dB	$> 9$ dB
$L_{Zeq}$ método ISO 9613	0,9	1,7	0,9	96,5
$L_{Zeq}$ método ISO 9613 cilíndrico	21,6	25,0	19,0	34,4
$L_{Zeq}$ método ISO 9613 combinado	0,9	2,6	1,3	95,2
$L_{Zeq}$ método propuesto	36,0	28,0	23,0	13,0
$L_{Zeq}$ método propuesto sin 16000 Hz	48,3	20,2	14,3	17,2
$L_{Aeq}$ método ISO 9613	1,3	4,3	4,3	90,1
$L_{Aeq}$ método ISO 9613 cilíndrico	15,1	12,9	17,7	54,3
$L_{Aeq}$ método propuesto	61,1	20,7	5,6	12,6
$L_{Aeq}$ método propuesto sin 16000 Hz	61,1	20,7	5,6	12,6

En la tabla 22 y las figuras 41 y 42 se observa que el modelo de propagación propuesto presenta mayor exactitud que el método de la norma ISO 9613 Parte 2, especialmente cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se calcula con filtro de ponderación frecuencial A.

El nivel de presión sonora residual disminuye al descartar la frecuencia de 16000 Hz cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se calcula con filtro de ponderación frecuencial Z, pero no sucede lo mismo cuando este se calcula con filtro de ponderación frecuencial A.

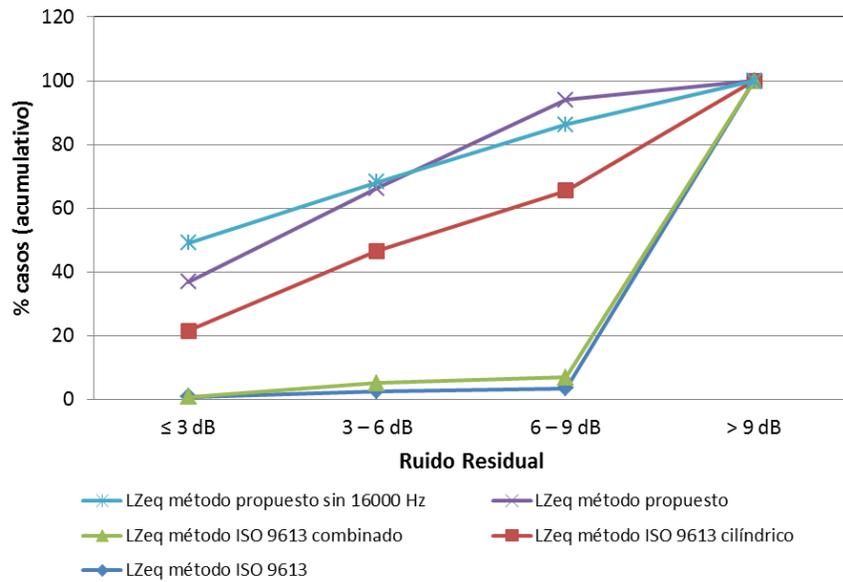


Figura 41. Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtro de ponderación frecuencial Z.

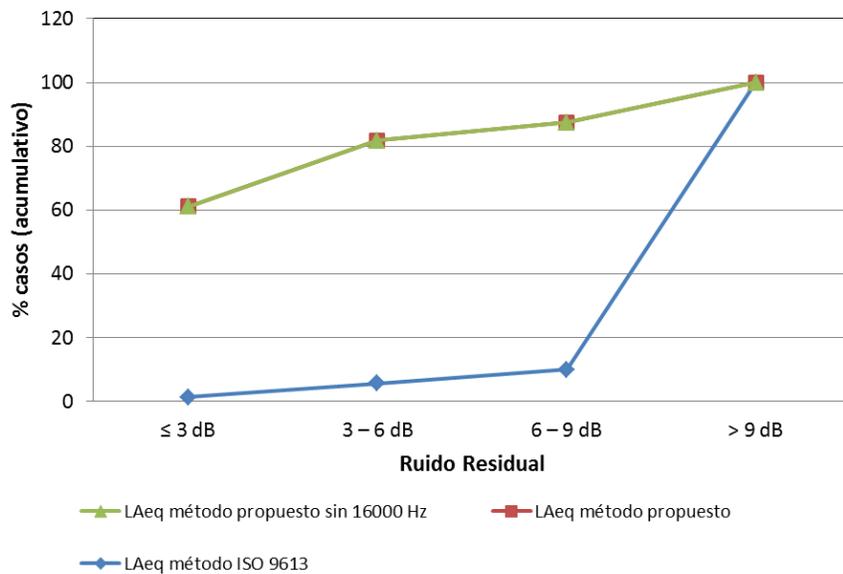


Figura 42. Diferencias entre niveles de presión sonora estimados y medidos, en banda ancha y con filtro de ponderación frecuencial A.



La tabla 23 presenta los estadísticos para la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos y estimados, en banda ancha y con filtros de ponderación frecuencial Z y A, para el modelo de propagación propuesto y el modelo ISO 9613 en su versión original y con algunas variaciones.

Tabla 23. Estadísticos del residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente.

Nivel de presión sonora continuo equivalente	Nivel de presión sonora residual (dB)			
	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
$L_{Zeq}$ método ISO 9613	29,6	56,6	1,0	10,6
$L_{Zeq}$ método ISO 9613 cilíndrico	1,2	25,7	-22,0	9,7
$L_{Zeq}$ método ISO 9613 combinado	24,6	48,7	1,0	9,7
$L_{Zeq}$ método propuesto	2,2	14,1	-15,0	5,7
$L_{Zeq}$ método propuesto sin 16000 Hz	-2,2	14,4	-15,0	5,7
$L_{Aeq}$ método ISO 9613	20,5	37,7	-4,4	8,6
$L_{Aeq}$ método ISO 9613 cilíndrico	-7,2	13,6	-27,4	9,3
$L_{Aeq}$ método propuesto	-1,9	14,7	-15,0	4,8
$L_{Aeq}$ método propuesto sin 16000 Hz	-1,9	14,7	-15,0	4,8

En la tabla 23 se observa que el modelo de propagación propuesto presenta una mediana y una desviación estándar en el nivel de presión sonora residual más bajas que el método de la norma ISO 9613 Parte 2, especialmente cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se calcula con filtro de ponderación frecuencial A.

Descartando la frecuencia de 16000 Hz, el residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -15,0 y 14,4 dB(Z), con una mediana de -2,2 dB(Z).

Con el filtro de ponderación frecuencial A, el residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -15,0 y 14,7 dB(Z), con una mediana de -1,9 dB(Z).





## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con el aumento del desarrollo de la energía eólica se crea la necesidad de evaluar el impacto de los aerogeneradores en el entorno en el que van a ser instalados. Uno de los aspectos importantes del impacto ambiental está vinculado a su emisión de ruido. Por lo tanto, se requiere estimar el nivel de potencia sonora de los aerogeneradores y el nivel de presión sonora resultante con el fin de evaluar el impacto acústico. Hay una serie de investigaciones y métodos que se ocupan de este problema, sin embargo, algunos de los modelos son difíciles de implementar debido a los parámetros de entrada que requieren y las desviaciones entre ellos son bastante considerables.

### 6.1. ESPECTRO

Los aerogeneradores tienen un espectro de ruido caracterizado por componentes de baja y media frecuencia. También se observa que carecen de componentes impulsivos y tonos puros al no destacarse ninguna banda sobre sus adyacentes.

Los niveles de presión sonora equivalentes medidos fluctuaron entre 60,5 y 92,1 dB(Z). El primero de ellos corresponde a una distancia de 100 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 1,6 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica F (estable). El segundo corresponde a una distancia de 300 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 8,2 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable).

Con el filtro de ponderación frecuencial A, los niveles de presión sonora equivalentes medidos fluctuaron entre 33,3 y 60,9 dB(A). El primero de ellos corresponde a una distancia de 500 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 1,5 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable). El segundo corresponde a una distancia de 300 m, una velocidad del viento a 10 m de altura de 8,2 m/s y a una categoría de estabilidad atmosférica E (ligeramente estable).



El nivel de presión sonora puede aumentar o disminuir en función de la distancia viento abajo del aerogenerador para ciertas velocidades del viento. El nivel de presión sonora puede aumentar con la distancia debido a la turbulencia atmosférica que otros aerogeneradores pueden producir, y a la reflexión del sonido hacia abajo. Otra posibilidad es la refracción atmosférica, que tiende a curvar los rayos acústicos hacia abajo.

## 6.2. NORMA ISO 9613 Parte 2

El método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2 es un modelo general para predecir los niveles de presión sonora en un receptor específico a partir de fuentes de ruido conocidas. Es general en el sentido de que se puede aplicar a una amplia variedad de fuentes de ruido y cubre la mayor parte de los principales mecanismos de atenuación. El método predice el nivel de presión sonora con filtro de ponderación *A* promediado a largo plazo utilizando bandas de octava. El modelo asume la condición viento abajo y un gradiente de temperatura positivo moderado con vientos que van de 1 a 5 m/s, medidos entre 3 y 11 m de altura.

Este método no es adecuado para estimar los niveles de inmisión debido a la emisión sonora de aerogeneradores o parques eólicos, dado que los niveles de presión sonora estimados para los parques eólicos generalmente son conservadores y tiende a subestimar los niveles de presión sonora en banda ancha asociados a los parques eólicos. En este sentido, se encontraron diferencias entre los niveles de presión sonora estimados y medidos de hasta 56,5 dB(Z), con un valor medio de 29,6 dB(Z). El nivel de presión sonora residual arrojado por la norma ISO 9613 Parte 2 para los aerogeneradores es mayor para las frecuencias altas que para las frecuencias bajas.

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A), el residuo oscila entre -4,4 y 37,7 dB(A), con una mediana de 20,5 dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 42,1 dB(A).

Es importante señalar que los aerogeneradores representan una situación sui géneris dado que la fuente de ruido se encuentra a una altura superior a 80 metros por encima del suelo. Los métodos de predicción como



CONCAWE e ISO 9613 Parte 2 generalmente no se han desarrollado o probado teniendo en cuenta fuentes de ruido con esta altura. Por otro lado, los aerogeneradores son fuentes de ruido que operan a velocidades de viento mayores de las permitidas por la norma ISO 9613 Parte 2. En términos generales, las características de los aerogeneradores y las condiciones de funcionamiento son muy diferentes a las que se detallan en la norma ISO 9613 Parte 2.

Por otro lado, a medida que aumenta la distancia entre la fuente y el receptor aumenta el nivel de presión sonora residual, lo cual concuerda con lo reportado por Thorne. Él sugiere que los intervalos normales de error en la predicción aumentan con la distancia y los efectos climatológicos adversos [16]. Esta diferencia se debe en gran medida al considerar la propagación esférica del sonido en el modelo de predicción de ruido. Además, a medida que aumenta la velocidad del viento disminuye el nivel de presión sonora residual.

Dickinson indica que este método no fue formulado para los parques eólicos y que los aerogeneradores no cumplen con las citadas limitaciones de este método. Él propone modelar los parques eólicos como fuentes lineales (propagación cilíndrica), lo que daría lugar a una atenuación de 3 dB con una duplicación de la distancia [22].

### 6.3. ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

De acuerdo con la teoría de la divergencia geométrica, los niveles de presión sonora disminuyen al aumentar la distancia desde la fuente. A diferencia de lo establecido en el método de la norma ISO 9613 Parte 2 para estimar los niveles sonoros de inmisión debido a una fuente fija, el modelo de propagación para los aerogeneradores no es el esférico.

El modelo de propagación que más se ajusta para la atenuación del ruido de los aerogeneradores con la distancia es el de propagación cilíndrica, lo cual concuerda con lo reportado por Martín *et al.* [57], y es precisamente este modelo, el que presenta un nivel de presión sonora residual menor.



Según Møller y Pedersen, las frecuencias más bajas parecen decaer en más de 3 dB al duplicarse la distancia (propagación cilíndrica), en lugar de 6 dB (propagación esférica) como se supone en la mayoría de los modelos de propagación de sonido. Esto puede generar niveles de presión sonora más altos de lo esperado a distancias más allá de unos cuantos cientos de metros. A distancias mayores, el sonido que en su mayoría es de baja frecuencia, puede ser uno de los principales problemas para los vecinos de parques eólicos en el interior de sus hogares [16].

Según Wondollek la propagación esférica sólo es válida para velocidades del viento moderadas (hasta 5 m/s) e inversión térmica [100].

#### **6.4. FACTOR DE DIRECCIONALIDAD**

El factor de direccionalidad tiene en cuenta la dirección en la que la mayor parte del ruido se irradia desde una fuente. Las ecuaciones propuestas por Brooks, Pope y Marcolini coinciden con lo expresado por Friman y Hoogzaad, en cuanto a que la direccionalidad del sonido no sólo depende de la posición del receptor respecto a la fuente, sino también de la velocidad del viento [13, 20, 31, 39 y 102].

El nivel de presión sonora residual resultante de calcular el nivel de presión sonora con las ecuaciones para la direccionalidad se reduce ligeramente con respecto al calculado con  $D = 0$  dB y no mejora la predicción de los niveles de presión sonora arrojados por el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2, pero su utilización es más coherente al tener en cuenta la posición del receptor respecto a la fuente y la velocidad del viento.

#### **6.5. ATENUACIÓN POR EFECTOS DEL SUELO**

Según Wondollek, el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2 para estimar la atenuación por efectos del suelo no es aplicable para distancias significativas y cuando la fuente y el receptor están a una altura considerable [100].



Emplear el modelo de Delany-Bazley para describir la capacidad de absorción del suelo no mejora la predicción de los niveles de presión sonora arrojados por el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2, pero su utilización es más coherente al manejar distancias considerables entre la fuente y el receptor y fuentes de una altura significativa como es el caso de los aerogeneradores.

## **6.6. MODELO DE PROPAGACIÓN PROPUESTO**

Como resultado de un amplio ejercicio de medición y análisis, se ha propuesto un modelo semi-empírico para el cálculo de los niveles de presión sonora a diferentes distancias proveniente de fuentes de ruido elevadas como es el caso de los aerogeneradores que predice mejor la realidad, o por lo menos, se acerca más a ella. Los resultados han arrojado un modelo bastante satisfactorio para predecir el ruido proveniente de los aerogeneradores hasta distancias de 900 m, mejorando en gran medida lo obtenido hasta el momento por el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2.

Lo más importante, el trabajo proporciona un enfoque semi-empírico que combina el modelado teórico y empírico para resolver el problema de la propagación del ruido a partir de las observaciones y los datos medidos. El modelado teórico busca el entendimiento del fenómeno de propagación del ruido aplicando sistemáticamente las leyes que rigen dicho fenómeno. Sin embargo, es imposible capturar perfectamente todos los detalles del comportamiento real del proceso a través de ecuaciones matemáticas. El modelado empírico busca entonces contribuir a representar algunas relaciones que no se ha logrado aún describir adecuadamente a través de funciones matemáticas, usando la información recogida experimentalmente, especialmente cuando el proceso es demasiado complejo.

Se emplearon nuevos enfoques sobre algunos parámetros específicos en la propagación del ruido con el fin mejorar la predicción en la propagación de los niveles de presión sonora o por lo menos hacerlos más coherentes con la realidad.



La realidad es muy compleja y los métodos analíticos tienen sus limitaciones. El modelo propuesto ofrece un compromiso entre la simplicidad y exactitud en la predicción de los niveles de presión sonora asociado a los aerogeneradores.

El nivel de presión sonora residual obtenido con el modelo de propagación propuesto oscila entre -19,3 y 28,4 dB(Z), con una mediana de 0,8 dB(Z) para todas las estabildades, frecuencias y puntos de medición. El residuo para el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha oscila entre -14,3 y 17,9 dB(Z), con una mediana de 3,9 dB(Z). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 32,2 dB(Z).

Cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se expresa en dB(A), el residuo oscila entre -15,0 y 14,7 dB(A), con una mediana de -1,9 dB(A). El rango en que varía el nivel de presión sonora residual en banda ancha es de 29,7 dB(A).

Hay una relación estadísticamente significativa entre las variables en un nivel de confianza del 95,0 %. El modelo propuesto explica el 92,5 % de la variabilidad del nivel de presión sonora residual y tiene un error absoluto medio de 2,9 dB. Al eliminar el 5,0 % de los datos por considerarlos atípicos, el modelo propuesto explica el 94,7 % de la variabilidad del nivel de presión sonora residual con un error absoluto medio de 2,5 dB.

El modelo de propagación propuesto presenta una mediana y una desviación estándar en el nivel de presión sonora residual más bajas que el método de la norma ISO 9613 Parte 2, especialmente cuando el nivel de presión sonora continuo equivalente en banda ancha se calcula con filtro de ponderación frecuencial A.

El nivel de presión sonora residual arrojado por el modelo propuesto es pequeño comparado con el método establecido en la norma ISO 9613 Parte 2, especialmente teniendo en cuenta las distancias involucradas. Se puede concluir que el modelo de predicción acústica propuesto es bastante satisfactorio para una fuente de sonido ubicada muy por encima del nivel del suelo.

De acuerdo a lo anterior, la estabilidad atmosférica debe tenerse en cuenta tanto en las mediciones como en la modelación del ruido asociado a los



aerogeneradores. En el modelo propuesto, la estabilidad atmosférica se considera a través de las clases de estabilidad y los coeficientes de propagación horizontal y vertical, los cuales mostraron tener una mayor relevancia para distancias entre la fuente y el receptor menores o iguales a 200 m.

El número de parámetros ha aumentado en comparación con los componentes básicos del modelo establecido en la norma ISO 9613 Parte 2. La mayoría de los parámetros de entrada del modelo son similares y algunos se han hecho más complejos, dando como resultado un modelo mucho más preciso. Los parámetros básicos del modelo incluyen la distancia, la altura y el nivel de potencia sonora del aerogenerador, la velocidad y dirección del viento, la temperatura y humedad del aire. Algunos datos de entrada del modelo más complejos incluyen la absorción del suelo, la estabilidad atmosférica y el factor de direccionalidad.

Algunos parámetros tienen más influencia que otros. El principal parámetro es la estabilidad atmosférica. El segundo es la velocidad del viento, que afecta tanto al nivel de potencia sonora del aerogenerador como a la propagación del ruido.

La estabilidad atmosférica juega un papel importante en la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores. Como era de esperar, las condiciones estables ocurren predominantemente durante la noche, mientras que es más probable que las condiciones inestables ocurran durante el día. Los datos experimentales muestran la tendencia general de aumento de la estabilidad durante los períodos nocturnos.

Los procesos físicos de la atmósfera no pueden ser estudiados por separado debido a que interactúan entre sí. Por tanto, se deben estudiar todos estos parámetros simultáneamente porque de otro modo se obtendría una subestimación o sobreestimación en los niveles de presión sonora. De hecho, en la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica aparecen varios de los parámetros que ya se han contemplado en otras formas de atenuación.

Es habitual en la estimación del ruido proveniente de los aerogeneradores considerar solamente la velocidad del viento a una altura de referencia (10 m). Sin embargo, el modelo propuesto para la atenuación por efectos de la



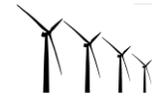
estabilidad atmosférica requirió de la velocidad del viento a la altura de la fuente (80 m). La principal causa de la variación observada en los niveles de presión sonora es la dependencia sistemática del nivel de presión sonora con la velocidad del viento. Los niveles de presión sonora generalmente aumentan con el aumento de la velocidad del viento en la dirección viento debajo de la fuente.

El estudio realizado muestra que el modelo de predicción establecido en la norma ISO 9613 Parte 2 no es adecuado en la estimación del ruido generado por los parques eólicos. El parque eólico estudiado muestra que los niveles de presión sonora medidos son superiores a los calculados. La variación en los niveles de presión sonora se debe en buena parte a los cambios en las condiciones meteorológicas y a la altura de la fuente de emisión de ruido.

El modelo desarrollado está bien definido y es relativamente fácil de usar. Puede ser considerado como un “sub-modelo” o una variante del modelo ISO 9613 Parte 2. Siempre y cuando los factores de corrección sugeridos se apliquen a la salida del modelo propuesto en la norma ISO 9613 Parte 2, los niveles de presión sonora estimados han mostrado un alto grado de ajuste con los niveles medidos.

## **6.7. GENERALES**

Se destaca a lo largo del documento, los aportes realizados por diversos investigadores al tratar de definir un modelo ideal para una situación específica, lo cual, es el paso esperado en la unificación de criterios que permitan describir el fenómeno de propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores de manera confiable y práctica pero, esta labor es bastante ardua pues, las condiciones de frontera y su objeto de aplicación suelen variar de acuerdo a las necesidades pre-establecidas, más sin embargo, teniendo en cuenta que el transporte de energía y los procesos de transferencia y difusión de la misma son contemplados de alguna manera en cada uno de ellos, puede afirmarse con gran certeza que cada modelo puede ser complementado a tal medida que se convierta en una explicación válida del fenómeno de transporte y propagación de ondas sonoras en la atmósfera, sin más restricciones que las establecidas por la simplificación o complejidad de los usuarios de cada uno de ellos.



El desarrollo de un modelo unificado para la predicción de la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores se encuentra en evolución debido a los diversos aportes fisicomatemáticos contemplados en los trabajos llevados a cabo, que tienen por finalidad suplir las falencias de cada uno de los modelos existentes.

Las aproximaciones para considerar los factores geométricos y atmosféricos simultáneamente son escasas, más no insignificantes pues, prueba de ello es la norma ISO 9613 Parte 2 en la cual, se trata de asumir todos los factores que pudieran influir en la predicción acertada de la propagación del ruido en campo libre, pero que aún necesita aportes sustanciales en el mejoramiento de los parámetros asumidos. El método ISO 9613 Parte 2 permite realizar ajustes meteorológicos, pero no tiene recomendaciones específicas para combinaciones de estabilidad atmosférica y velocidad del viento.

Kaliski *et al.* encontraron que al hacer ajustes meteorológicos utilizando el método CONCAWE mejoraban la exactitud del modelo, pero con una tendencia a sobreestimar los niveles reales [47 y 48].

Ferret evaluó la validez de varios modelos aeroacústicos existentes aplicados a aerogeneradores, entre los que se encuentran algunos de los contemplados en el numeral 3.2.2.2. En su tesis de maestría establece que estos modelos presentan diferencias significativas con respecto a las mediciones de campo y explica que esto se debe en gran parte a las dificultades para modelar la física detrás de espectro de ruido del aerogenerador y de las condiciones incontrolables que por lo general se encuentran en condiciones de campo [30].

## 6.8. POSIBLES FUENTES DE ERROR

Al llevar a cabo un programa de trabajo destinado a identificar la influencia de algunos parámetros específicos en la propagación del ruido, es importante aislar en la mayor medida posible los efectos de esos parámetros. Se considera poco probable que la utilización de un parque eólico en funcionamiento como fuente de ruido a estudiar permita aislar los efectos



de los parámetros individuales. Esta conclusión surge por las siguientes razones:

- Los parques eólicos comprenden múltiples fuentes de ruido distribuidas que se extienden sobre grandes áreas. Por lo tanto, en cualquier punto de recepción de la presión sonora resultante comprende la suma total de las contribuciones de muchas fuentes diferentes. Cada una de estas contribuciones pueden haber llegado al receptor a través de una serie de posibles vías de propagación, algunas reflejadas y algunas en forma directa. Para llevar a cabo un estudio paramétrico sobre la base de estos datos es casi seguro llegar a resultados no concluyentes debido al número de variables involucradas.

Shephard indica que la estela de los aerogeneradores y los efectos de la turbulencia tienen una influencia considerable en la propagación del sonido. Los efectos se generan a medida que el aire altamente turbulento abandona el aerogenerador e interactúa con una masa de aire con una velocidad menor [78].

Vestas, un importante fabricante de aerogeneradores, recomienda una distancia de al menos 5 diámetros de rotor entre los aerogeneradores. Los efectos de la estela con masas de aire con una velocidad más baja están presentes dentro de los 3 diámetros de rotor viento abajo y en general, se disipan a una distancia de 10 diámetros de rotor. Si un aerogenerador está situado dentro de los 10 diámetros de rotor del primer aerogenerador, las aspas del segundo aerogenerador pueden entrar de repente en una masa de aire más lenta en la estela generada por el primer aerogenerador, produciendo así un aumento en los niveles de presión sonora [97].

- Debido a la naturaleza de los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores, que son en sí mismos función de las condiciones del viento, no se conoce exactamente la potencia sonora que emite el aerogenerador. Los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores en la vida real también pueden variar mucho de los niveles de potencia sonora idealizados utilizados. No se conoce, por lo tanto, si las variaciones en los niveles de presión sonora medidos en campo se deben más a los cambios en potencia sonora que emite el aerogenerador o a los efectos de propagación, aunque también podrían estar relacionados con la metodología de medición.



Kaliski y Keith indican que los cambios en los niveles de potencia sonora son en gran medida una función de la velocidad del segmento del aspa y el área superficial. Dado que la emisión de sonido resulta en gran parte de procesos aleatorios a lo largo del aspa (turbulencia del flujo de entrada y posterior separación del borde de salida), con la excepción de las interacciones relacionadas con el aspa y la torre, este punto de emisión discreto en el plano del rotor puede ser considerado incoherente [48].

Pedersen *et al.* midieron los niveles de potencia sonora de varios aerogeneradores similares y encontraron que la potencia de sonido varía significativamente. Esta variabilidad se basa únicamente en las diferencias entre los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores y no tiene nada que ver con las condiciones de propagación [50]. Por lo tanto, es importante recalcar que los modelos de predicción dependen fuertemente de los niveles de potencia sonora idealizadas como punto de partida para la modelación y que no tiene en cuenta la variabilidad en el mundo real de los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores, y por lo tanto en los niveles de presión sonora en los receptores en los alrededores.

- La variabilidad es también un factor clave en la consideración de los componentes de baja frecuencia del ruido de los aerogeneradores. Según van den Berg, los niveles de presión sonora provenientes de los aerogeneradores son significativamente más variables por debajo de 200 Hz [95]. El análisis del espectro de los niveles de presión sonora presentado por Ferret corrobora lo anterior [30]. Ver figura 44.
- Un problema importante que puede afectar la medición de los niveles de presión sonora provenientes de los aerogeneradores, es la contribución del ruido de fondo ambiental. Hay que tener en cuenta que el parque eólico sólo funciona (y por tanto sólo genera ruido) cuando la velocidad del viento supera cierto valor. En todos los casos, el sonido medido incluye el ruido de fondo.

El ruido de fondo no se pudo determinar por separado en los mismos lugares, porque los aerogeneradores no pueden ser detenidos. Por otro lado, el ruido de fondo aumenta con la velocidad del viento y varía



especialmente aún en el mismo parque eólico. Según Bass *et al.*, el ruido de fondo presenta una gran variación espacial [6].

Kochanowski y Mackenzie demostraron que el ruido de fondo varía con la estabilidad atmosférica. Generalmente para condiciones más estables resultan niveles de presión sonora de fondo más bajos para una velocidad del viento determinada [73].

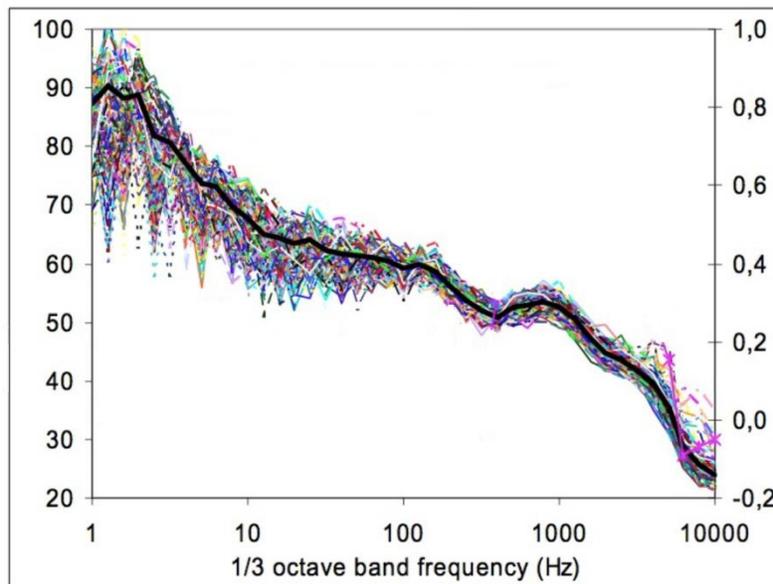


Figura 43. Espectro promedio de los niveles de presión sonora cerca de los aerogeneradores.

Fuente: Van den Berg, G. The beat is getting stronger: the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. En: *Journal of low frequency noise, vibration and active control*. Volume 24 Number 1. United Kingdom, 2005.

La capacidad de oír el ruido de un aerogenerador también depende en gran medida el ruido de fondo. El sonido de un aerogenerador en general, aumenta con la velocidad del viento, pero lo mismo ocurre con el ruido de fondo. A altas velocidades, el viento tiende a generar un ruido de fondo significativo, enmascarando el sonido aerogenerador [16]. Cuando el ruido de fondo y el ruido del aerogenerador son de la misma magnitud, el ruido del aerogenerador queda enmascarado [75].



La variabilidad del ruido de fondo también es un aspecto importante a tener en cuenta. El ruido de fondo varía con la hora del día, la velocidad y dirección del viento, y la interacción del viento con la cobertura del suelo y la vegetación entre otras cosas [75]. La figura 45 presenta los resultados de la medición del ruido de fondo, medido como el nivel de permanencia 90  $L_{90}$ , en un sitio de medición en un parque eólico para un intervalo de velocidad del viento comprendido entre 4 y 12 m/s. En ella se puede observar la variabilidad significativa del ruido de fondo entre los niveles medidos a una misma velocidad. También se observa que cuando los niveles de presión sonora son controlados por el aerogenerador estos presentan una menor variabilidad [14].

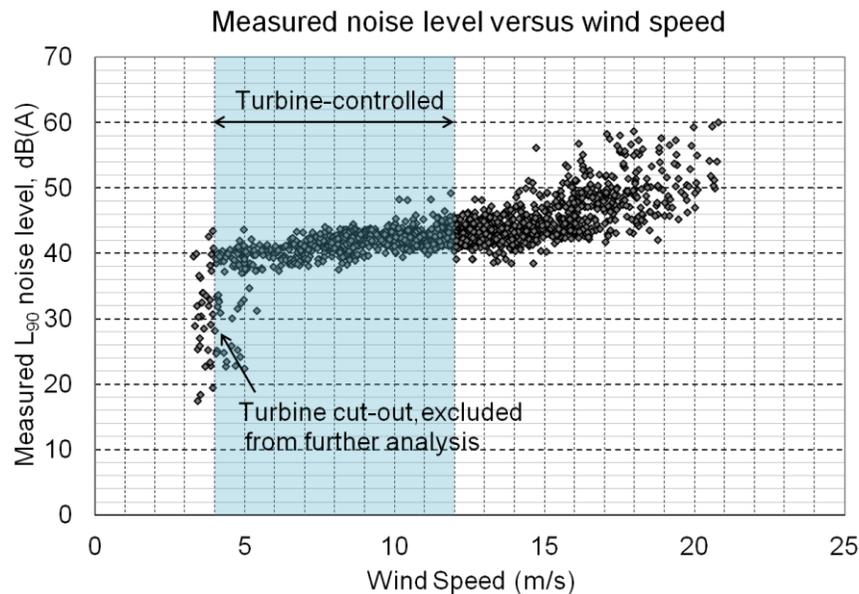


Figura 44. Ruido de fondo en un parque eólico en función de la velocidad del viento.

Fuente: Cooper, J. Accuracy of noise predictions for wind farms. En: 5th International Conference on Wind Turbine Noise. Denver, 2013.

- La precisión del coeficiente de atenuación para la absorción atmosférica depende de los valores de las siguientes variables: humedad relativa, temperatura del aire, presión atmosférica y frecuencia [43]. Para calcular



el nivel de presión sonora en campo abierto, el coeficiente de atenuación atmosférica se debe basar en valores promedio de las condiciones de humedad relativa y temperatura determinados por el intervalo del tiempo en el cual es relevante para el lugar.

- Los niveles de potencia sonora proporcionados por los fabricantes de los aerogeneradores son niveles estandarizados para una velocidad del viento a 10 metros de altura. El formato, en el que se proporcionan los niveles de potencia sonora, así como las posibles incertidumbres, difiere de un fabricante a otro.



## **7. RECOMENDACIONES**

- Es necesario seguir avanzando en la consecución de un modelo para la predicción de la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores en el cual, se pueda abarcar simultáneamente medidas meteorológicas y acústicas de manera certera y verificable que permita la solución de este problema.
- Verificar el desempeño el modelo de predicción de ruido propuesto en otros parques eólicos, especialmente en aquellos que se encuentran ubicados en terrenos complejos.





## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acoustic Ecology Institute. Wind Farm Noise: 2009 in Review. Research, public concerns, and industry trends. A Special Report from the Acoustic Ecology Institute, February 2010.
2. Álvarez, J. Predicción de niveles de ruido generados por industrias. Tesis presentada para optar al título profesional de Ingeniero Acústico. Universidad Austral de Chile. Valdivia, 2002.
3. Attenborough, K. A review of ground impedance models for propagation modelling. University of Hull. Cottingham Road, 2002.
4. Attenborough, K. Developments in modelling and measuring ground impedance. En: 17th International Congress on Acoustics. Rome, 2001.
5. Attenborough, K., Ming Li, K. and Horoshenkov, K. Predicting Outdoor Sound. Taylor & Francis. London, 2007.
6. Bass, J., Bullmore, A. and Sloth, E. Development of a wind farm noise propagation prediction model. Renewable Energy Systems Limited - Hoare Lea & Partners Acoustics - Acoustica A/S. 1998.
7. Beranek, L. Acústica. Editorial Hispano Americana S.A. Buenos Aires, 1969.
8. Bérengier, B. and Blanc-Benon, D. Outdoor sound propagation: A short review on analytical and numerical approaches. Acta Acustica United with Acustica. Vol. 89, 2003.
9. Canadian Wind Energy Association. Wind turbines and sound: Review and best practice guidelines. Ontario, 2007.
10. Chiles, S. New Zealand Standard 6808:2010 Acoustics – Wind farm noise. En: New Zealand Acoustics Vol. 23 / # 2. Wellington, 2010.



11. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Levantamiento de Información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en Caso Piloto. Santiago de Chile, 2008.
12. CONCAWE. The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighboring communities. Den Haag, 1981.
13. Conceição, L. Wind turbine noise prediction. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008.
14. Cooper, J. Accuracy of noise predictions for wind farms. En: 5th International Conference on Wind Turbine Noise. Denver, 2013.
15. Cueto, J. *et al.* Metodología para la evaluación del impacto sonoro producido por los parques eólicos en Andalucía. En: Tecniacustica, Gandia, 2006.
16. Cummings, J. The variability factor in wind turbine noise. En: 5th International Conference on Wind Turbine Noise. Denver, 2013.
17. Danish Electronics, Light & Acoustics. Low frequency noise from large wind turbines: Results from sound power measurements. Hørsholm, 2008.
18. Danish Electronics, Light & Acoustics. Nordic environmental noise predictions methods, Nord2000. Lyngby, 2001.
19. Danish Wind Industry Association. Medición y cálculo de los niveles de sonido. En: <http://www.windpower.org> (fecha de consulta: 18/04/2014).
20. Dawson, B. and Mackenzie, N. Meteorological stability impacts on wind turbine noise assessments. Australian Acoustical Society. Proceedings of Acoustics 2013. Victor Harbor, 2013.



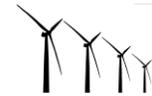
21. Di Napoli, C. Wind turbine sound issues in Finland. En: Wind expert meeting sound propagation models. International Energy Agency. Stockholm, 2009.
22. Dickinson, P. A pragmatic view of a wind turbine noise standard. En: Acoustics 2009. Adelaide, 2009.
23. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Acústica urbana. Módulo I: Manual de medición de niveles sonoros orientados a la gestión municipal. Montevideo, 2008.
24. Doolan, C., Moreau, D. and Brooks, L. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. En: Acoustics Australia. Vol. 40, No. 1. Sidney, 2012.
25. Ducosson, I. Wind turbine noise propagation over flat ground: Measurements and predictions using a Parabolic Equation method. Master's thesis in the Master's programme in Sound and Vibration. Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2006.
26. Echeverri, C. *et al.* Simulación de ruido de tránsito automotor como herramienta para el rediseño de rutas de transporte público colectivo en el municipio de Medellín. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. vol. 10, No. 18, ISSN 1692-3324. Medellín, 2011.
27. Environment Protection Authority. Wind farms environmental noise guidelines. Adelaide, 2009.
28. Estellés, R. Fuentes sonoras y propagación del sonido. En: <http://www.farq.edu.uy/> (fecha de consulta: 02/06/2013).
29. Evans, T. and Cooper, J. Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. En: Acoustics Australia. Vol. 40, No. 1. Sidney, 2012
30. Ferret, O. Assessment, development and validation of wind turbine rotor noise prediction codes. Wind Energy Master Thesis. Danmarks Tekniske Universitet Vindenergi. Lyngby, 2014.



31. Friman, M. Directivity of sound from wind turbines. A study on the horizontal sound radiation pattern from a wind turbine. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research. Stockholm, 2011.
32. Furuholm, H. and Hultberg, K. Noise immission from wind farms. Master's thesis in the Master's programme in Sound and Vibration. Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2013.
33. González, J. *et al.* Comparative analysis of several acoustic impedance measurements. En: <http://digital.csic.es/> (fecha de consulta: 04/04/2014).
34. Grosveld, F. Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines. En: Journal of Propulsion and Power. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Virginia, 1985.
35. Guarnaccia *et al.* A mathematical approach for wind turbine noise propagation. En: Applications of Mathematics and Computer Engineering, 2010.
36. Guarnaccia, C. *et al.* Wind turbine noise: theoretical and experimental study. En: International Journal of Mechanics. Issue 3, Volume 5, 2011.
37. Harris, C. Manual de medidas acústicas y control de ruido. Mc Graw-Hill. Madrid, 1995.
38. Hatfield Consultants and BKL Consultants. Environmental noise modelling study. Vancouver, 2013.
39. Hoogzaad, S. Measuring and calculating turbine noise immission in the Netherlands. En: Wind expert meeting sound propagation models. International Energy Agency. Stockholm, 2009.
40. Hubbard, H. and Shepherd, K. Aeroacoustics of large wind turbines. En: Journal of the Acoustical Society of America. 89 (6), 1991.



41. Impacto Energético y ambiental de plantas eólicas. En: <http://www.rewindenergy.com> (fecha de consulta: 16/06/2011).
42. International Organization for Standardization. ISO 1996-1, Second Edition 2003-08-01. Genève, 2003.
43. International Organization for Standardization. ISO 9613. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Geneva, 1993.
44. International Organization for Standardization. ISO 9613. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. Geneva, 1996.
45. Introducción a la energía eólica. En: <http://news.soliclisma.com> (fecha de consulta: 27/04/2011).
46. Iwan, A. Wind turbine acoustic noise. Case Western Reserve University. En: <http://glc.org/energy/wind/pdf/> (fecha de consulta: 26/08/2013).
47. Kaliski, K. and Duncan, E. Calculating annualized sound levels for a wind farm. En: 159th Meeting Acoustical Society of America/NOISE-CON 2010. Baltimore, 2010.
48. Kaliski, K. and Keith, D. Improving predictions of wind turbine noise using PE modeling. En: 158th Meeting Acoustical Society of America/NOISE-CON 2011. Portland, 2011.
49. Kentilux S.A. Proyecto de generación de energía eólica conectada a la red. Mayo, 2010.
50. Krajewski, C. Uncertainty in prediction of environmental noise immission due to ground effect. Ontario Ministry of Environment and Energy. Ontario, 1993.
51. Kruse, H. In-situ measurement of ground impedances. Doctoral Thesis from the Universität Oldenburg. Oldenburg, 2008.



52. Lamancusa, J. Engineering Noise Control. The Pennsylvania State University. Pennsylvania, 2000.
53. Lee, Gwang-Se *et al.* A case study of localization and identification of noise sources from a pitch and a stall regulated wind turbine. En: Applied Acoustics. Vol. 73. 2012.
54. Lee, S. *et al.* Perception of amplitude-modulated noise from wind turbines. En: 17th International congress on sound and vibration (ICSV17). Cairo, 2010.
55. Lloyd's Register ODS. Low frequency noise emission from wind farms: potential health effects. Copenhagen, 2009.
56. Maestre, A. Energía eólica: aerogeneradores. Master en mantenimiento industrial y técnicas de diagnóstico. En: <http://www.aloj.us.es> (fecha de consulta: 27/04/2011).
57. Martín B., M. *et al.* Impacto acústico de los parques eólicos y su evolución. En: Acústica 2008. Coimbra, 2008.
58. Medina, O. y Quiñones, E. Modelos de transporte y propagación de ondas sonoras en campos abiertos: una mirada desde la física. En: V encuentro institucional de semilleros de investigación. Universidad de Cartagena. Cartagena, 2010.
59. Molina, F. Modelo de dispersión gaussiano de contaminantes atmosféricos. Universidad de Antioquia. Medellín, 1990.
60. Møller, H. and Sejer, C. Low-frequency noise from large wind turbines. En: Journal of the Acoustical Society of America. 129 Volume 6, 2011.
61. Moriarty, P. and Migliore, P. Semi-empirical aeroacoustic noise prediction code for wind turbines. National Renewable Energy Laboratory. Golden, 2003.
62. Nasa. Airfoil self-noise and prediction. Hampton, 1989.
63. Nasa. Wind turbine acoustics. Hampton, 1990.



64. National Physical Laboratory. Guide to Predictive Modelling for Environmental Noise Assessment. En: <http://www.npl.co.uk/> (fecha de consulta: 19/09/2013).
65. Noise Measurement Services Pty Ltd. Wind Farm Noise Guideline. Mitchelton, 2011.
66. Oerlemans, S. *et al.* Location and quantification of noise sources on a wind turbine. En: Journal of sound and vibration, 2006.
67. Pal Arya, S. Air pollution meteorology and dispersion. Oxford University Press. New York, 1999.
68. Pinilla, A. Manual de aplicación de la energía eólica. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, Julio de 1997.
69. Prospathopoulos, J. and Voutsinas, S. Application of a ray theory model to the prediction of noise emission from isolated wind turbines and wind parks. National Technical University of Athens. Athens, 2006.
70. Prowind. Chapter 2 Noise. En: <http://prowinduk.com/> (fecha de consulta: 19/09/2013).
71. Ramos, Á. Medidas de ruido. En: <http://www.ugr.es/> (fecha de consulta: 02/06/2013).
72. Randall, B. Industrial noise control and acoustics. Marcel Dekker, Inc. New York, 2003.
73. Red Acoustics Limited. Wind turbine noise assessment. Hunday Farm. Winscales, 2013.
74. Renewable Energy Research Laboratory. Wind Turbine Acoustic Noise. Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Massachusetts. Amherst, January 2006.
75. Renewable Energy Research Laboratory. Wind Turbine Noise Issues. Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Massachusetts at Amherst. Amherst, 2002.



76. Risø National Laboratory. Implementation and verification of an aeroacoustic noise prediction model for wind turbines. Roskilde, 1996.
77. Scherebnyj, K. Prediction of noise levels and annoyance from aircraft run-ups at the Vancouver International Airport. Master's thesis in the Master's of Applied Science. The University of British Columbia. Columbia, 2006.
78. Shepherd, D. Ensayo sobre Psicoacústica. En: <http://www.docstoc.com/docs> (fecha de consulta: 16/06/2011).
79. Siemens. Noise modelling and assessment details. En: <http://www.eonenergy.com/> (fecha de consulta: 19/09/2013).
80. Simona, J. *et al.* Comparativa de nuevos modelos europeos de predicción de niveles de ruido de tráfico rodado. En: Tecniacustica, León, 2010.
81. Sinruido. Evaluación de impacto ambiental acústico. En: <http://www.sinruido.com> (fecha de consulta: 26/07/2012).
82. Sobre el ruido producido por los parques eólicos. En: <http://news.soliclisma.com> (fecha de consulta: 27/04/2011).
83. Son, Eunkuk *et al.* Integrated numerical method for the prediction of wind turbine noise and the long range propagation. En: Current Applied Physics, Vol. 10, 2010.
84. Søndergaard, B. Problems related to the use of the existing noise measurement standards when predicting noise from wind turbines and wind farms. En: 42nd Agency topical expert meeting. International Energy. Stockholm, 2004.
85. Swedish Environmental Protection Agency. Human perception of sound from wind turbines. En: <http://naturvardsverket.se> (fecha de consulta: 06/07/2011).
86. Swedish Environmental Protection Agency. Report 5308: Noise Annoyance from Wind Turbines. Stockholm, 2003.



87. Tickell, C. *et al.* Wind turbine generator noise prediction. Comparison of computer models. Proceedings of Acoustics 2004. Gold Coast, 2004.
88. Tonin, R. Sources of wind turbine noise and sound propagation. En: Acoustics Australia. Vol. 40, No. 1. Sidney, 2012.
89. Truax, B. Handbook for Acoustic Ecology. World Soundscape Project, Simon Fraser University. Burnaby, 1999.
90. Turtós, L. *et al.* Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. En: <http://www.cubasolar.cu/> (fecha de consulta: 19/09/2013).
91. U.S. Department of Housing and Urban Development. The noise guidebook. En: <http://portal.hud.gov/hudportal/> (fecha de consulta: 19/08/2013).
92. U.S. Environmental Protection Agency. Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications. North Carolina, 2000.
93. Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Informe Subproyecto A. Ministerio de Industria, Energía y Minería. Montevideo, 2012.
94. Van den Berg, G. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. En: Journal of sound and vibration, 2003.
95. Van den Berg, G. The beat is getting stronger: the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. En: Journal of low frequency noise, vibration and active control. Volume 24 Number 1. United Kingdom, 2005.
96. Van den Berg, G. The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral thesis from the University of Groningen, Netherlands, 2006.



97. Vestas Wind Systems. Catálogo aerogeneradores V90. En: <http://www.vestas.com> (fecha de consulta: 20/09/2012).
98. Wagner, S. *et al.* Wind Turbine Noise. European Commission (DGXII), EUR 16823. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 1996.
99. Walpole, R. y Myers, R. Probabilidad y estadística para ingenieros. Mc Graw-Hill. México, 1989.
100. Wondollek, M. Sound from wind turbines in forest areas. Teknisk-naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten. Uppsala Universitet. Uppsala, 2009.
101. Zhu, W *et al.* Modeling of aerodynamically generated noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2005.
102. Zhu, W. Modelling of noise from wind turbines. Technical University of Denmark. Lyngby, 2004.
103. Zidan, E. Elnady, T. and Elsabbagh, A. Comparison of sound power prediction models of wind turbines. En: International Conference on Advances in Agricultural, Biological & Environmental Sciences. Dubai, 2014.



---

**ANEXO A**  
**MEDICIONES DE CAMPO**





Tabla A1. Datos experimentales.

Medición	Fecha de medición	Hora de medición (hh:mm:ss)	Duración de la medición (hh:mm:ss)	Distancia (m)	U <sub>10</sub> (m/s)	U <sub>40</sub> (m/s)	U <sub>60</sub> (m/s)	U <sub>80</sub> (m/s)
1	19/04/2012	22:18:36	00:34:04	100	2	2,97	3,55	4,03
2	19/04/2012	22:56:45	00:24:53	300	2	3,02	3,60	4,09
3	19/04/2012	23:24:50	00:22:28	500	2	3,38	4,04	4,58
4	08/05/2012	20:24:05	00:33:41	100	4	6,35	7,40	8,38
5	08/05/2012	21:01:50	00:30:56	300	2	4,58	5,55	6,55
6	15/05/2012	20:30:14	01:31:20	100	2	5,98	7,66	9,55
7	15/05/2012	22:04:30	00:37:09	300	2	5,87	7,61	9,55
8	17/05/2012	17:35:18	00:30:53	100	4	6,52	7,39	8,05
9	17/05/2012	18:08:44	00:30:07	200	4	6,52	7,39	8,05
10	17/05/2012	18:40:08	00:46:15	300	4	7,13	8,64	9,87
11	05/07/2013	16:20:00	00:10:00	100	4	5,34	5,79	6,13
12	05/07/2013	16:30:00	00:10:00	100	5	5,20	5,25	5,28
13	05/07/2013	16:40:00	00:10:00	100	5	5,20	5,27	5,32
14	05/07/2013	16:50:00	00:10:00	100	5	5,24	5,26	5,28
15	05/07/2013	18:00:00	00:10:00	200	4	4,14	4,21	4,26
16	05/07/2013	18:10:00	00:10:00	200	2	3,97	4,69	5,27
17	05/07/2013	18:20:00	00:10:00	200	2	4,19	4,95	5,57
18	05/07/2013	18:30:00	00:10:00	200	2	4,01	4,73	5,32
19	05/07/2013	18:50:00	00:10:00	300	3	4,55	5,37	5,12
20	05/07/2013	19:00:00	00:10:00	300	3	3,79	4,15	4,43
21	05/07/2013	19:10:00	00:10:00	300	2	4,13	4,87	5,12
22	05/07/2013	19:20:00	00:10:00	300	3	4,15	4,57	4,89
23	05/07/2013	19:40:00	00:10:00	400	3	3,65	4,04	4,35
24	05/07/2013	19:50:00	00:10:00	400	3	3,89	4,08	4,22
25	05/07/2013	20:00:00	00:10:00	400	2	4,37	5,38	6,25
26	05/07/2013	20:20:00	00:10:00	500	2	5,04	6,38	7,55
27	05/07/2013	20:30:00	00:10:00	500	2	4,59	6,02	7,31
28	06/07/2013	15:50:00	00:10:00	900	4	5,17	5,60	5,94
29	06/07/2013	16:00:00	00:10:00	900	4	5,28	5,84	6,28
30	06/07/2013	16:10:00	00:10:00	900	4	5,63	6,27	6,76
31	06/07/2013	16:30:00	00:10:00	800	6	8,01	8,64	9,11
32	06/07/2013	16:40:00	00:10:00	800	5	7,21	8,03	8,67
33	06/07/2013	16:50:00	00:10:00	800	6	7,62	8,37	8,95
34	06/07/2013	17:10:00	00:10:00	700	7	9,41	10,32	11,03
35	06/07/2013	17:20:00	00:10:00	700	6	7,73	8,38	8,87
36	06/07/2013	17:30:00	00:10:00	700	5	7,53	8,45	9,17
37	06/07/2013	17:20:00	00:10:00	700	6	8,22	9,05	9,69
38	06/07/2013	17:40:00	00:10:00	600	6	7,77	8,52	9,10
39	06/07/2013	17:50:00	00:10:00	600	6	8,86	9,80	10,53
40	06/07/2013	18:00:00	00:10:00	600	6	8,94	9,85	10,56
41	06/07/2013	18:20:00	00:10:00	500	6	8,62	9,52	10,20
42	06/07/2013	18:30:00	00:10:00	500	7	9,11	9,87	10,46
43	06/07/2013	18:40:00	00:10:00	500	7	8,69	9,44	10,02
44	06/07/2013	18:50:00	00:10:00	400	7	9,01	9,71	10,24
45	06/07/2013	19:00:00	00:10:00	400	7	8,55	9,11	9,54
46	06/07/2013	19:20:00	00:10:00	300	7	8,92	9,66	10,22
47	06/07/2013	19:30:00	00:10:00	300	7	9,06	9,84	10,44
48	06/07/2013	19:40:00	00:10:00	300	8	10,05	10,67	11,14
49	06/07/2013	19:50:00	00:10:00	300	7	9,34	10,06	10,60
50	06/07/2013	20:10:00	00:10:00	200	8	10,30	11,17	11,84



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Dirección (°)	Estabilidad atmosférica	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	LZeq [dB(Z)]
1	72	6	70,0	15,1	60,5
2	68	6	70,0	14,9	61,5
3	56	6	70,0	13,9	61,0
4	45	6	82,0	19,7	63,3
5	38	6	82,0	19,6	61,7
6	45	6	72,0	16,3	71,2
7	46	6	72,0	15,0	68,8
8	45	4	65,5	21,7	65,2
9	45	4	65,5	21,7	65,6
10	45	6	65,5	20,7	66,4
11	26	2	85,7	17,0	62,9
12	31	2	87,7	16,9	72,9
13	30	2	86,4	17,1	70,7
14	29	2	86,1	17,1	70,4
15	22	2	89,6	16,6	64,4
16	85	6	93,0	13,9	73,6
17	94	6	93,8	13,8	71,7
18	102	6	93,3	13,9	72,1
19	123	6	94,3	13,9	70,9
20	109	6	94,0	13,9	68,5
21	109	6	94,7	13,6	68,2
22	114	6	94,0	13,8	69,4
23	112	6	92,7	14,0	70,4
24	111	6	95,0	13,3	68,5
25	115	5	94,0	13,5	73,8
26	105	6	96,2	13,8	69,8
27	100	6	96,0	14,0	67,4
28	183	4	87,2	14,1	83,6
29	185	4	91,2	13,7	81,5
30	185	4	89,2	13,9	82,2
31	188	4	89,2	13,4	89,2
32	190	4	91,9	12,8	88,3
33	187	4	90,8	13,3	88,3
34	174	4	91,2	12,9	87,0
35	176	4	90,7	12,8	86,9
36	176	4	89,5	12,7	89,4
37	175	4	90,3	12,8	87,7
38	176	4	88,2	12,4	85,8
39	172	4	86,5	12,5	85,7
40	173	4	86,9	12,5	87,1
41	174	4	83,8	11,9	86,5
42	169	4	85,2	12,1	84,7
43	171	4	83,8	12,1	86,5
44	166	4	81,0	12,4	85,8
45	168	4	79,4	12,8	84,6
46	165	5	83,8	12,1	88,9
47	164	5	82,3	12,1	90,2
48	161	5	80,7	11,8	92,1
49	163	5	83,1	12,0	90,6
50	159	6	81,9	11,8	86,9



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	LZeq en dB(Z)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
1	55,0	55,9	55,1	43,9	44,3	42,6	39,9	35,7	32,8	27,2	15,7
2	56,5	56,3	56,9	46,3	38,5	36,1	32,9	29,4	23,7	15,6	12,8
3	56,6	54,3	56,9	44,7	34,5	31,5	30,5	29,1	23,2	15,4	13,2
4	58,4	57,4	58,3	47,6	48,4	46,4	42,9	44,4	39,9	34,8	24,8
5	57,2	55,3	57,4	46,8	39,6	39,9	35,2	34,2	29,3	20,2	20,2
6	66,4	66,8	63,1	60,4	56,4	55,5	48,9	47,0	42,9	35,7	21,9
7	65,5	63,6	62,1	48,9	46,1	45,7	39,3	35,7	28,5	17,4	13,3
8	62,7	59,5	54,9	47,8	49,1	48,1	44,3	42,9	38,7	32,4	33,2
9	63,2	59,9	56,5	47,6	43,5	44,2	41,4	36,9	32,4	23,5	33,1
10	64,2	60,7	56,5	47,7	43,0	45,6	39,6	34,9	29,1	20,1	28,4
11	55,4	52,2	48,8	41,6	43,1	36,8	33,6	31,7	29,6	23,3	14,7
12	64,9	60,9	54,8	46,5	44,2	39,5	36,1	34,7	34,0	29,6	20,4
13	62,3	58,2	51,0	43,2	43,2	37,4	34,7	34,2	34,8	30,4	21,6
14	62,3	58,3	52,2	44,3	43,6	38,1	35,0	33,8	33,3	28,8	19,9
15	56,1	51,7	45,5	40,4	39,8	36,1	33,9	35,3	35,0	29,0	20,2
16	65,4	61,6	54,8	45,8	42,0	39,5	37,1	37,2	34,7	33,0	25,2
17	63,6	59,1	51,8	43,6	40,6	35,5	33,3	31,4	31,1	29,5	22,1
18	63,9	59,9	52,9	44,6	40,9	37,1	34,8	34,1	32,4	30,3	22,5
19	63,2	59,5	52,3	44,0	34,6	32,5	31,1	27,1	26,2	24,3	18,1
20	60,7	57,2	50,3	42,5	34,1	32,6	29,3	25,5	24,4	16,4	13,1
21	60,1	55,8	49,3	42,3	34,2	33,6	30,2	29,0	27,0	21,7	14,8
22	61,6	57,8	50,9	43,0	34,3	33,1	30,5	27,7	26,5	22,6	16,2
23	62,1	58,0	51,2	43,9	33,6	33,0	30,7	29,3	27,9	23,1	16,3
24	60,4	56,2	48,9	41,9	32,1	31,9	29,3	26,6	24,6	18,1	14,7
25	66,2	62,9	56,3	47,3	37,6	35,8	32,4	30,5	28,2	24,0	19,0
26	63,5	57,4	51,1	43,7	34,1	32,5	30,3	29,1	26,4	22,6	16,0
27	60,7	54,5	48,5	42,7	33,5	31,1	29,1	28,0	28,5	24,6	14,6
28	76,7	72,7	67,8	59,9	51,1	42,5	36,1	34,9	32,9	32,0	33,7
29	74,4	70,3	64,9	56,2	47,5	39,1	34,5	32,1	30,8	29,8	31,5
30	75,1	71,1	65,9	57,5	48,7	40,4	35,1	35,2	34,3	31,0	32,2
31	82,6	79,0	74,8	68,0	59,2	51,6	44,2	43,5	42,5	37,3	38,3
32	81,7	77,9	73,4	66,4	57,8	49,9	43,1	41,1	41,1	36,5	37,9
33	81,7	77,9	73,5	66,5	57,8	50,0	43,2	44,4	45,4	38,5	37,7
34	80,3	76,5	71,9	64,8	56,2	48,3	41,2	38,4	36,0	34,9	37,0
35	80,2	76,3	71,9	64,4	55,8	47,8	41,5	45,5	45,2	37,1	37,0
36	82,8	79,1	74,7	68,0	59,5	51,7	44,3	43,3	40,9	36,6	38,5
37	81,0	77,2	72,8	65,7	57,2	49,3	42,3	43,1	42,1	36,2	37,4
38	79,3	75,6	71,0	63,5	55,2	47,1	40,2	37,1	35,3	34,0	36,0
39	79,1	75,4	71,0	63,2	54,9	46,6	40,1	41,5	40,3	34,1	35,8
40	80,7	77,1	72,7	65,5	57,1	49,3	42,1	40,4	38,5	34,9	36,8
41	79,9	76,1	71,7	64,7	56,2	48,2	41,5	37,0	33,2	34,1	36,6
42	77,9	73,8	69,3	61,7	53,1	45,2	39,5	35,5	31,8	32,6	35,0
43	79,8	75,9	71,4	64,3	55,7	47,8	41,3	37,0	33,6	34,1	36,3
44	79,1	75,0	70,5	63,2	54,6	46,9	41,0	37,0	33,1	33,5	35,9
45	77,7	73,6	69,0	61,5	52,8	45,8	40,5	36,3	32,3	32,5	34,8
46	82,5	78,6	74,4	67,9	59,2	51,7	44,9	41,2	38,0	36,5	38,1
47	83,8	80,1	75,8	69,4	60,7	53,1	45,8	41,7	37,6	36,8	38,8
48	85,9	82,5	78,4	72,5	63,5	55,9	48,5	44,4	39,7	37,8	39,4
49	84,3	80,8	76,6	70,4	61,5	53,9	46,7	42,7	38,5	37,1	38,8
50	80,2	76,5	71,9	64,8	56,3	49,4	44,0	40,6	37,0	34,9	36,7



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Fecha de medición	Hora de medición (hh:mm:ss)	Duración de la medición (hh:mm:ss)	Distancia (m)	U <sub>10</sub> (m/s)	U <sub>40</sub> (m/s)	U <sub>60</sub> (m/s)	U <sub>80</sub> (m/s)
51	06/07/2013	20:20:00	00:10:00	200	7	9,27	9,97	10,50
52	06/07/2013	20:40:00	00:10:00	100	7	8,94	9,77	10,41
53	06/07/2013	20:50:00	00:10:00	100	6	8,73	9,74	10,52
54	06/07/2013	21:00:00	00:10:00	100	6	8,90	9,76	10,42
55	07/07/2013	15:40:00	00:10:00	900	5	5,45	5,68	5,85
56	07/07/2013	15:50:00	00:10:00	900	5	6,00	6,36	6,62
57	07/07/2013	16:10:00	00:10:00	800	6	6,37	6,57	6,72
58	08/07/2013	11:41:09	00:10:00	100	4	3,79	3,84	3,87
59	08/07/2013	11:50:00	00:10:00	100	3	3,69	3,83	3,93
60	08/07/2013	12:00:00	00:10:00	100	4	4,31	4,44	4,53
61	08/07/2013	11:41:09	00:30:00	100	4	3,93	4,03	4,11
62	08/07/2013	12:20:00	00:10:00	200	4	3,99	4,14	4,25
63	08/07/2013	12:30:00	00:10:00	200	3	3,45	3,58	3,68
64	08/07/2013	12:12:49	00:30:00	200	3	3,78	3,90	3,98
65	08/07/2013	12:50:00	00:10:00	300	3	3,92	4,28	4,56
66	08/07/2013	13:00:00	00:10:00	300	3	3,89	4,19	4,41
67	08/07/2013	12:44:32	00:30:00	300	3	3,96	4,21	4,40
68	08/07/2013	13:20:00	00:10:00	400	4	4,60	4,77	4,90
69	08/07/2013	13:30:00	00:10:00	400	3	3,59	3,91	4,16
70	08/07/2013	13:16:28	00:30:00	400	3	4,11	4,38	4,59
71	08/07/2013	13:50:00	00:10:00	500	2	3,00	3,29	3,51
72	08/07/2013	14:00:00	00:10:00	500	3	3,07	3,22	3,34
73	08/07/2013	14:10:00	00:10:00	500	3	3,35	3,56	3,71
74	08/07/2013	13:48:23	00:30:00	500	2	3,14	3,36	3,52
75	08/07/2013	14:20:41	00:10:00	600	4	4,12	4,25	4,34
76	08/07/2013	14:30:00	00:10:00	600	2	2,48	2,83	3,11
77	08/07/2013	14:40:00	00:10:00	600	3	4,13	4,35	4,51
78	08/07/2013	14:20:41	00:30:00	600	3	3,58	3,81	3,99
79	08/07/2013	14:50:52	00:10:00	600	3	3,39	3,52	3,62
80	08/07/2013	15:00:00	00:10:00	600	3	3,85	4,17	4,41
81	08/07/2013	15:10:00	00:10:00	600	2	3,40	3,78	4,08
82	08/07/2013	14:50:52	00:30:00	600	3	3,54	3,82	4,04
83	08/07/2013	15:30:00	00:10:00	500	2	3,01	3,42	3,74
84	08/07/2013	15:40:00	00:10:00	500	3	3,28	3,51	3,69
85	08/07/2013	15:22:26	00:30:00	500	2	3,27	3,58	3,81
86	08/07/2013	16:00:00	00:10:00	400	3	3,50	3,79	4,01
87	08/07/2013	16:10:00	00:10:00	400	3	3,83	4,09	4,29
88	08/07/2013	15:57:36	00:30:00	400	3	3,85	4,18	4,43
89	08/07/2013	16:30:00	00:10:00	300	2	3,77	4,29	4,70
90	08/07/2013	16:40:00	00:10:00	300	3	4,21	4,81	5,28
91	08/07/2013	16:50:00	00:10:00	300	3	3,90	4,43	4,85
92	08/07/2013	16:29:11	00:30:00	300	3	3,96	4,51	4,94
93	08/07/2013	17:00:40	00:10:00	200	3	4,02	4,49	4,85
94	08/07/2013	17:10:00	00:10:00	200	3	3,74	4,15	4,48
95	08/07/2013	17:20:00	00:10:00	200	2	3,47	4,23	4,86
96	08/07/2013	17:00:40	00:30:00	200	2	3,74	4,29	4,73
97	08/07/2013	17:30:20	00:10:00	600	2	3,42	4,00	4,47
98	08/07/2013	17:40:00	00:10:00	600	2	4,15	4,83	5,38
99	08/07/2013	17:50:00	00:10:00	600	2	3,88	4,75	5,49
100	08/07/2013	18:10:00	00:10:00	500	2	3,95	4,63	5,18



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Dirección (°)	Estabilidad atmosférica	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	LZeq [dB(Z)]
51	161	4	81,3	11,8	87,1
52	144	4	81,6	11,7	85,7
53	144	4	79,5	11,7	85,7
54	148	4	80,1	11,7	86,4
55	154	2	85,6	10,1	83,4
56	159	4	89,0	10,1	79,4
57	161	1	91,2	9,4	84,9
58	85	1	71,7	11,3	72,6
59	79	1	71,2	11,8	76,0
60	83	1	71,8	11,7	78,9
61	82	1	71,1	11,5	76,6
62	81	1	70,8	11,7	78,5
63	77	1	69,6	11,8	79,9
64	78	1	70,9	11,6	78,7
65	87	1	67,8	12,1	76,5
66	98	1	68,1	12,1	76,9
67	88	1	68,6	12,3	77,3
68	88	1	66,9	13,1	78,0
69	92	1	68,3	12,8	78,8
70	90	1	67,4	12,8	78,0
71	76	1	64,8	12,8	77,0
72	73	1	64,0	12,9	77,5
73	78	1	63,4	13,0	79,3
74	76	1	64,1	12,9	77,9
75	73	1	64,3	13,1	77,7
76	87	1	66,4	13,0	75,6
77	69	1	66,1	13,2	76,1
78	76	1	65,2	13,1	76,5
79	82	1	64,3	13,5	79,4
80	79	1	65,7	13,4	80,2
81	74	1	67,1	13,1	81,1
82	78	1	65,7	13,3	80,3
83	86	1	66,1	13,1	80,7
84	82	1	66,1	12,9	80,5
85	86	1	66,3	13,0	80,2
86	85	1	70,4	12,1	81,9
87	81	1	71,3	11,9	80,5
88	84	1	70,4	12,2	80,5
89	83	1	70,0	12,3	77,3
90	79	1	71,7	11,9	77,6
91	82	1	73,3	11,5	73,8
92	81	1	71,7	11,9	76,7
93	83	1	72,8	11,4	72,7
94	76	1	68,7	11,8	64,6
95	74	1	66,2	11,6	66,0
96	78	1	69,5	11,5	72,7
97	75	1	71,3	10,1	72,7
98	73	2	75,9	8,7	64,6
99	75	4	76,9	8,6	66,0
100	70	5	78,9	8,3	70,2



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	LZeq en dB(Z)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
51	80,5	76,5	72,0	64,9	56,4	49,6	44,1	40,5	37,0	34,8	36,7
52	79,1	75,1	70,4	63,0	56,0	50,7	46,8	44,7	41,4	36,3	35,7
53	79,0	74,9	70,2	63,0	55,9	50,6	46,6	44,6	41,4	36,4	35,8
54	79,7	75,7	71,1	63,9	56,6	50,9	46,8	44,7	41,4	36,6	36,3
55	76,4	73,1	68,5	60,2	51,5	45,2	42,4	39,5	38,2	35,2	34,3
56	72,1	68,3	62,6	54,1	45,4	39,5	37,6	32,2	28,5	27,0	28,3
57	78,1	74,1	69,6	61,9	53,1	45,8	40,9	41,2	41,2	34,9	35,0
58	64,7	60,8	54,1	47,7	42,3	40,6	37,5	34,2	31,7	28,2	20,4
59	68,6	64,7	58,7	50,1	43,9	40,6	37,4	34,6	32,5	28,8	25,2
60	71,8	67,4	61,8	53,3	46,2	41,8	37,5	35,3	33,1	28,3	27,9
61	69,3	65,1	59,3	51,0	44,5	41,0	37,5	34,8	32,6	28,5	25,6
62	70,9	66,9	61,3	52,1	44,2	38,1	33,6	30,5	27,4	25,4	27,1
63	72,7	68,6	63,2	54,2	46,2	40,2	36,7	34,9	33,9	30,4	29,5
64	71,3	67,3	61,6	52,4	44,6	38,7	35,0	32,7	31,3	28,0	27,7
65	69,1	65,2	59,0	49,5	40,8	36,1	33,3	29,7	28,4	28,4	25,8
66	69,3	65,2	58,6	48,9	40,4	36,0	33,4	31,3	30,7	29,1	25,9
67	69,9	66,0	59,7	50,2	41,5	36,4	33,4	30,9	30,0	28,8	26,4
68	70,4	66,6	60,8	51,7	42,5	34,9	30,3	27,5	27,1	24,2	26,3
69	71,5	67,8	62,0	52,7	44,0	36,3	31,7	28,1	25,6	25,8	27,6
70	70,5	66,8	60,9	51,7	42,6	35,3	31,5	33,0	31,3	26,6	26,5
71	69,6	66,1	60,1	50,4	41,4	33,5	29,2	27,7	25,3	22,7	24,9
72	69,8	66,1	60,0	50,7	41,9	34,4	30,9	30,1	29,5	27,9	26,0
73	72,2	68,6	63,1	54,1	45,4	37,2	32,5	36,0	36,7	29,8	28,6
74	70,5	66,9	61,1	51,8	43,0	35,2	31,2	32,5	32,7	27,7	26,6
75	70,3	66,7	61,0	51,9	42,9	35,7	32,7	30,7	29,2	27,9	26,4
76	67,7	64,7	58,1	48,6	39,6	34,9	34,6	32,6	32,6	31,1	25,5
77	68,6	65,1	58,7	49,0	39,5	32,4	30,4	29,7	29,3	26,3	24,0
78	69,0	65,5	59,4	50,0	40,9	34,5	32,9	31,2	30,7	28,9	25,4
79	72,2	68,4	62,7	53,9	44,9	35,7	31,0	28,3	28,9	26,2	28,1
80	73,0	69,1	63,7	54,8	45,9	37,4	32,3	29,3	31,6	28,7	29,5
81	74,0	70,0	64,8	56,2	47,5	38,7	33,4	30,4	31,7	29,8	31,0
82	73,1	69,2	63,8	55,0	46,2	37,4	32,4	29,6	31,0	28,6	29,7
83	73,6	69,6	64,3	55,4	46,5	40,0	37,5	38,2	40,0	35,9	31,4
84	73,2	69,3	64,0	55,1	46,5	38,3	32,6	29,8	27,9	28,5	29,9
85	72,9	69,1	63,6	54,7	45,9	38,5	35,1	34,5	35,7	32,2	30,0
86	74,9	70,8	65,6	57,1	48,3	40,4	34,9	33,2	31,0	29,3	31,7
87	73,1	69,4	64,1	55,2	46,2	38,5	33,9	30,8	30,3	28,5	30,0
88	73,2	69,3	64,0	55,3	46,3	39,0	34,8	32,7	31,2	28,8	30,0
89	69,7	65,7	59,7	51,2	42,2	37,1	33,4	30,9	27,9	23,5	25,2
90	70,2	66,4	60,5	51,5	42,8	38,4	35,5	33,6	32,9	30,4	27,3
91	66,1	62,8	56,4	47,4	38,7	36,9	34,7	32,9	31,1	28,4	22,4
92	69,1	65,3	59,3	50,5	41,7	37,6	34,6	32,6	31,1	28,5	25,7
93	64,7	61,3	56,0	46,8	40,4	38,7	36,7	36,1	34,4	30,5	22,8
94	57,5	56,0	52,6	42,7	39,5	38,2	36,1	36,7	38,2	31,2	23,6
95	58,5	56,6	54,8	44,4	39,2	37,2	36,2	44,3	44,6	33,8	19,2
96	65,0	61,3	55,7	46,2	40,7	38,6	35,6	38,7	36,4	25,1	22,4
97	58,2	54,9	50,2	44,1	33,9	36,8	34,6	36,0	33,3	28,9	21,0
98	59,2	56,2	51,8	44,2	33,5	36,4	33,3	30,8	29,0	26,4	18,6
99	61,6	57,9	52,1	45,0	33,8	36,4	33,8	30,8	28,5	25,5	18,4
100	62,4	59,3	52,9	46,0	34,6	36,9	33,9	30,7	24,2	18,6	14,4



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Fecha de medición	Hora de medición (hh:mm:ss)	Duración de la medición (hh:mm:ss)	Distancia (m)	U <sub>10</sub> (m/s)	U <sub>40</sub> (m/s)	U <sub>60</sub> (m/s)	U <sub>80</sub> (m/s)
101	08/07/2013	17:40:00	00:10:00	500	3	4,07	4,37	4,60
102	08/07/2013	18:00:00	00:10:00	400	3	3,77	4,01	4,19
103	08/07/2013	18:10:00	00:10:00	400	2	3,69	4,33	4,86
104	08/07/2013	19:20:00	00:10:00	400	2	3,95	4,59	5,10
105	08/07/2013	18:30:00	00:10:00	400	2	3,80	4,31	4,72
106	08/07/2013	18:50:00	00:10:00	300	3	4,36	4,97	5,45
107	08/07/2013	19:00:00	00:10:00	300	3	4,97	5,77	6,41
108	08/07/2013	19:10:00	00:10:00	300	4	5,80	6,30	6,69
109	08/07/2013	19:20:00	00:10:00	300	3	5,04	5,68	6,18
110	08/07/2013	19:40:00	00:10:00	200	4	6,98	8,27	9,34
111	08/07/2013	19:50:00	00:10:00	200	4	6,97	8,41	9,61
112	08/07/2013	20:00:00	00:10:00	200	4	7,07	8,42	9,53
113	08/07/2013	20:20:00	00:10:00	100	4	7,25	8,56	9,63
114	08/07/2013	20:30:00	00:10:00	100	4	6,88	8,38	9,64
115	08/07/2013	20:40:00	00:10:00	100	3	6,91	8,55	9,95
116	08/07/2013	20:50:00	00:10:00	100	4	7,01	8,50	9,74
117	16/07/2013	15:40:00	00:10:00	600	6	7,79	8,52	9,08
118	16/07/2013	15:50:00	00:10:00	600	5	7,36	8,36	9,16
119	16/07/2013	16:10:00	00:10:00	500	4	6,81	7,74	8,48
120	16/07/2013	16:20:00	00:10:00	500	4	6,02	7,04	7,86
121	16/07/2013	16:40:00	00:10:00	400	4	6,41	7,39	8,18
122	16/07/2013	16:50:00	00:10:00	400	3	5,87	7,05	8,02
123	16/07/2013	17:00:00	00:10:00	400	4	6,35	7,37	8,20
124	16/07/2013	17:20:00	00:10:00	300	3	5,31	6,51	7,51
125	16/07/2013	17:30:00	00:10:00	300	2	5,05	6,45	7,67
126	16/07/2013	17:40:00	00:10:00	300	2	5,23	6,88	8,34
127	16/07/2013	17:50:00	00:10:00	300	2	5,26	7,16	8,91
128	16/07/2013	18:00:00	00:10:00	300	2	5,64	7,29	8,75
129	16/07/2013	18:10:00	00:10:00	300	2	5,20	6,61	7,84
130	16/07/2013	18:20:00	00:10:00	300	2	5,38	7,11	8,67
131	16/07/2013	18:40:00	00:10:00	200	2	5,22	6,92	8,45
132	16/07/2013	18:50:00	00:10:00	200	3	6,34	8,04	9,51
133	16/07/2013	19:00:00	00:10:00	200	3	6,78	8,32	9,62
134	16/07/2013	19:10:00	00:10:00	200	4	7,10	8,69	10,03
135	16/07/2013	19:20:00	00:10:00	200	2	6,10	7,97	9,63
136	16/07/2013	19:30:00	00:10:00	200	2	5,17	7,17	9,04
137	16/07/2013	19:40:00	00:10:00	200	3	6,11	7,76	9,19
138	16/07/2013	19:50:00	00:10:00	200	3	6,66	8,33	9,76
139	16/07/2013	20:10:00	00:10:00	100	3	7,04	8,87	10,46
140	16/07/2013	20:20:00	00:10:00	100	3	7,07	9,00	10,69
141	16/07/2013	20:30:00	00:10:00	100	3	6,60	8,52	10,22
142	16/07/2013	20:40:00	00:10:00	100	3	6,94	8,88	10,57
143	16/07/2013	20:50:00	00:10:00	100	4	7,60	9,35	10,83
144	16/07/2013	21:00:00	00:10:00	100	3	6,90	8,80	10,45
145	16/07/2013	21:10:00	00:10:00	100	3	7,05	8,92	10,54
146	17/07/2013	13:20:00	00:10:00	800	6	7,10	7,36	7,56
147	17/07/2013	13:30:00	00:10:00	800	8	7,70	7,75	7,79
148	17/07/2013	13:40:00	00:10:00	800	7	7,70	7,78	7,83
149	17/07/2013	13:50:00	00:10:00	800	7	7,40	7,43	7,45
150	17/07/2013	14:00:00	00:10:00	800	7	7,71	7,89	8,02



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Dirección (°)	Estabilidad atmosférica	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	LZeq [dB(Z)]
101	57	6	81,4	7,7	70,3
102	36	6	82,4	7,5	68,4
103	37	6	83,7	7,1	68,5
104	35	6	85,2	6,5	69,6
105	36	6	84,3	6,8	68,8
106	37	6	86,4	6,2	70,1
107	41	6	87,4	5,9	68,7
108	51	6	87,8	5,7	68,3
109	43	6	86,9	6,0	69,1
110	48	6	84,5	6,5	70,3
111	46	6	85,5	6,3	69,7
112	46	6	86,1	6,1	70,1
113	44	6	86,4	6,2	75,6
114	47	6	85,1	6,5	75,2
115	48	6	84,4	6,8	76,0
116	46	6	85,3	6,5	75,6
117	238	2	60,0	19,3	74,3
118	242	3	59,0	19,0	75,3
119	240	4	57,2	19,5	81,4
120	242	3	57,6	19,1	78,8
121	250	5	65,8	17,1	68,2
122	250	5	68,3	18,6	65,3
123	249	5	63,1	18,4	69,8
124	251	6	74,0	15,2	71,6
125	254	6	74,3	15,1	74,2
126	256	6	74,8	15,0	75,5
127	255	6	72,3	15,6	73,9
128	255	6	74,2	15,1	73,3
129	253	6	74,4	15,1	74,1
130	255	6	73,8	15,2	74,3
131	260	6	74,1	15,3	78,0
132	259	6	74,8	15,4	80,2
133	261	6	76,1	15,2	78,7
134	263	6	76,6	15,1	78,6
135	264	6	77,0	15,0	78,9
136	263	6	77,5	14,9	80,6
137	260	6	75,1	15,2	79,1
138	263	6	76,5	15,1	78,7
139	260	6	78,6	14,8	81,0
140	260	6	79,7	14,5	82,4
141	259	6	79,9	14,5	82,3
142	258	6	79,6	14,6	83,3
143	258	6	80,0	14,5	83,3
144	260	6	79,4	14,6	81,9
145	258	6	79,8	14,5	83,0
146	242	1	58,0	20,8	80,0
147	242	1	56,6	21,2	80,1
148	244	1	54,4	22,3	80,1
149	243	1	51,8	21,7	79,7
150	246	1	54,5	21,5	80,1



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	LZeq en dB(Z)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
101	62,6	59,9	53,2	46,8	35,2	37,6	34,4	31,3	24,7	18,3	15,7
102	61,3	59,3	54,0	46,1	36,9	38,7	35,7	31,5	25,2	17,9	14,6
103	61,6	60,2	54,4	46,9	37,7	39,7	36,1	31,7	25,9	17,7	14,1
104	62,3	60,4	53,8	47,4	38,2	40,4	36,3	31,8	26,1	15,8	13,2
105	61,7	59,9	54,1	46,8	37,6	39,6	36,1	31,8	26,0	17,8	14,1
106	62,3	62,3	57,1	47,7	43,2	43,2	40,0	36,7	32,3	22,9	14,0
107	61,2	62,3	57,4	47,4	43,7	43,3	40,1	36,8	32,3	23,9	14,9
108	60,7	61,8	58,0	47,9	44,0	43,5	40,4	36,9	32,4	24,1	15,2
109	61,4	62,1	57,5	47,7	43,7	43,4	40,2	36,8	32,4	23,8	14,9
110	62,7	63,0	59,6	49,5	49,0	53,1	44,1	41,4	37,8	29,4	13,0
111	62,3	63,2	59,9	49,4	49,1	53,3	44,5	41,8	38,8	33,3	23,3
112	62,5	63,3	59,9	49,7	49,1	53,3	44,4	41,7	38,6	32,7	20,2
113	68,5	68,8	62,3	55,2	53,5	52,1	48,8	46,1	44,6	39,6	20,4
114	68,2	68,7	62,2	54,9	53,5	52,1	48,8	45,9	44,5	39,5	20,0
115	68,6	68,4	62,8	54,8	53,5	53,6	48,8	46,0	44,9	40,0	23,4
116	68,4	68,6	62,4	55,0	53,5	52,6	48,8	46,0	44,7	39,7	21,5
117	67,0	63,6	57,3	51,2	42,6	44,7	40,9	37,4	35,3	22,9	19,4
118	67,8	64,3	58,2	51,4	42,7	44,4	41,1	37,7	37,1	28,0	22,0
119	74,2	69,8	64,4	56,2	47,0	43,8	39,5	41,0	42,1	33,7	31,5
120	71,5	67,1	61,4	53,2	43,7	42,8	38,3	33,6	28,1	25,8	27,9
121	61,3	57,3	53,0	47,6	37,9	41,9	37,7	36,7	31,7	22,4	15,4
122	59,8	55,7	51,9	46,7	37,3	41,2	37,2	35,6	34,7	22,0	14,8
123	62,5	58,6	53,6	47,7	37,9	41,6	37,5	37,6	34,7	23,5	17,3
124	64,0	61,4	54,8	55,1	51,9	46,4	42,3	37,7	32,8	22,2	15,2
125	66,5	64,7	56,7	49,9	44,4	46,9	41,3	37,4	33,0	23,7	19,1
126	67,7	66,1	58,1	50,5	44,7	47,4	41,6	37,5	33,2	24,4	21,5
127	66,0	64,8	56,8	50,0	44,4	47,0	41,0	37,2	32,7	23,0	17,9
128	65,8	63,4	56,6	50,0	43,7	46,9	40,0	36,3	31,9	22,2	15,3
129	66,3	64,5	56,7	52,5	48,5	46,9	41,7	37,5	33,0	23,5	19,3
130	66,6	64,9	57,2	50,2	44,3	47,1	40,9	37,0	32,6	23,3	19,0
131	70,6	68,8	61,8	53,0	51,9	50,1	45,1	41,9	39,5	32,5	24,9
132	72,8	70,9	63,8	54,9	51,7	49,7	45,2	42,1	39,6	33,3	29,2
133	71,3	70,1	62,3	53,4	52,4	50,4	45,6	42,5	40,0	33,3	26,1
134	71,0	69,9	62,1	53,3	52,3	50,3	45,4	42,2	39,9	33,3	26,2
135	71,4	70,0	62,3	53,4	51,8	50,2	45,4	42,2	39,9	33,4	26,9
136	73,1	70,7	63,7	55,1	50,7	48,7	44,7	41,8	39,2	33,3	29,6
137	71,7	70,0	62,7	53,8	52,0	50,1	45,3	42,1	39,7	33,1	27,1
138	71,3	70,0	62,2	53,4	52,2	50,3	45,5	42,3	40,0	33,3	26,4
139	74,1	71,5	64,9	57,3	55,4	53,2	49,2	46,8	46,0	41,5	30,7
140	75,3	72,6	66,2	58,2	54,9	52,4	48,5	46,4	45,2	40,9	32,4
141	75,2	72,3	65,9	57,9	54,4	51,9	48,1	46,1	44,7	40,4	32,3
142	76,3	73,0	66,9	58,9	55,0	52,3	48,4	46,4	45,1	40,8	33,6
143	76,4	73,1	67,2	59,3	55,0	52,1	48,2	46,2	44,9	40,6	33,5
144	74,9	72,1	65,7	57,8	55,0	52,5	48,6	46,5	45,3	40,9	31,9
145	76,0	72,8	66,7	58,7	54,8	52,1	48,2	46,2	44,9	40,6	33,2
146	72,3	67,8	61,9	52,2	42,8	34,4	31,5	35,4	37,7	30,8	29,7
147	72,3	67,8	61,9	52,3	42,9	34,9	32,5	39,4	41,1	31,1	29,6
148	72,5	68,3	63,1	54,0	44,8	36,8	33,9	33,7	33,4	31,8	30,4
149	62,6	59,9	53,2	46,8	35,2	37,6	34,4	31,3	24,7	18,3	15,7
150	61,3	59,3	54,0	46,1	36,9	38,7	35,7	31,5	25,2	17,9	14,6



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Fecha de medición	Hora de medición (hh:mm:ss)	Duración de la medición (hh:mm:ss)	Distancia (m)	U <sub>10</sub> (m/s)	U <sub>40</sub> (m/s)	U <sub>60</sub> (m/s)	U <sub>80</sub> (m/s)
151	17/07/2013	14:10:00	00:10:00	800	7	7,50	7,63	7,73
152	17/07/2013	14:20:00	00:10:00	800	7	7,60	7,70	7,77
153	17/07/2013	14:40:00	00:10:00	700	7	7,19	7,28	7,34
154	17/07/2013	14:50:00	00:10:00	700	6	7,10	7,42	7,66
155	17/07/2013	15:00:00	00:10:00	700	7	7,34	7,45	7,52
156	17/07/2013	15:10:00	00:10:00	700	7	7,49	7,58	7,64
157	17/07/2013	15:20:00	00:10:00	700	6	6,55	6,60	6,64
158	17/07/2013	15:30:00	00:10:00	700	7	7,21	7,38	7,51
159	17/07/2013	15:40:00	00:10:00	700	7	7,13	7,21	7,27
160	17/07/2013	16:00:00	00:10:00	600	5	6,12	6,63	7,03
161	17/07/2013	16:10:00	00:10:00	600	7	7,07	7,25	7,37
162	17/07/2013	16:20:00	00:10:00	600	6	6,77	7,01	7,18
163	17/07/2013	16:30:00	00:10:00	600	6	6,83	7,12	7,33
164	17/07/2013	16:40:00	00:10:00	600	6	7,44	7,84	8,13
165	17/07/2013	16:50:00	00:10:00	600	6	6,65	6,96	7,19
166	17/07/2013	17:10:00	00:10:00	500	6	6,99	7,21	7,36
167	17/07/2013	17:20:00	00:10:00	500	6	6,86	7,21	7,48
168	17/07/2013	17:30:00	00:10:00	500	5	6,52	7,16	7,65
169	17/07/2013	17:40:00	00:10:00	500	5	5,99	6,46	6,81
170	17/07/2013	17:50:00	00:10:00	500	4	6,11	6,85	7,43
171	17/07/2013	18:00:00	00:10:00	500	6	6,79	7,20	7,50
172	17/07/2013	18:10:00	00:10:00	500	4	6,21	6,83	7,30
173	17/07/2013	18:30:00	00:10:00	400	3	5,37	6,11	6,69
174	17/07/2013	18:40:00	00:10:00	400	3	5,50	6,44	7,20
175	17/07/2013	18:50:00	00:10:00	400	4	6,18	7,02	7,69
176	17/07/2013	19:00:00	00:10:00	400	4	6,04	6,87	7,53
177	17/07/2013	19:10:00	00:10:00	400	3	5,67	6,76	7,67



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	Dirección (°)	Estabilidad atmosférica	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	LZeq [dB(Z)]
151	243	1	56,3	21,4	80,1
152	244	1	53,6	21,8	80,0
153	246	1	51,1	23,3	81,3
154	250	1	53,3	22,6	81,6
155	251	1	52,3	22,9	81,5
156	253	1	51,6	23,1	80,8
157	249	1	52,6	23,2	79,7
158	249	1	52,2	22,9	81,5
159	251	1	52,2	23,1	80,7
160	262	2	54,3	23,0	76,9
161	270	2	54,2	23,2	79,3
162	266	2	56,1	22,3	78,8
163	277	2	56,6	23,1	78,7
164	281	1	58,6	22,3	79,8
165	266	2	54,9	22,8	78,4
166	278	4	59,6	22,0	76,3
167	274	4	61,1	22,0	71,4
168	274	4	60,9	21,9	70,8
169	278	2	62,5	21,5	74,6
170	271	4	63,1	21,3	76,3
171	275	4	60,5	22,0	73,6
172	274	4	62,2	21,6	74,4
173	273	4	69,2	19,4	70,5
174	273	4	71,1	18,8	70,9
175	272	5	71,6	18,5	69,8
176	268	6	72,7	17,9	67,4
177	267	6	75,0	17,1	63,7



Tabla A1. Datos experimentales (continuación).

Medición	LZeq en dB(Z)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
151	72,4	68,0	62,3	52,9	43,6	35,5	32,8	36,8	38,4	31,3	29,9
152	72,4	68,2	62,8	53,7	44,4	36,7	33,4	32,7	33,0	31,5	30,1
153	74,3	70,0	64,9	56,6	47,7	38,6	32,7	29,8	27,0	28,5	31,0
154	74,6	70,7	65,8	57,5	48,4	39,6	33,6	35,8	34,7	29,1	31,2
155	74,5	70,9	66,0	57,0	48,0	39,0	33,1	38,5	37,8	29,5	31,3
156	73,8	69,7	64,4	55,2	46,3	37,7	31,8	29,2	26,0	27,9	30,4
157	72,4	68,6	63,3	53,7	44,6	35,8	31,9	32,1	28,4	27,5	29,2
158	74,5	70,5	65,6	57,0	48,0	39,1	33,2	35,9	35,0	29,0	31,2
159	73,6	69,9	64,7	55,5	46,5	37,7	32,3	35,0	33,7	28,4	30,4
160	69,5	65,1	59,3	50,6	41,5	36,2	31,6	29,9	25,5	23,5	25,3
161	72,3	68,1	62,8	53,9	44,8	39,3	38,0	47,2	49,7	41,8	29,7
162	71,2	67,4	61,9	53,0	43,9	37,5	32,6	30,3	30,2	26,1	27,6
163	70,9	66,9	61,3	52,2	43,5	37,7	33,5	31,8	29,2	25,5	27,6
164	72,4	68,2	62,8	54,0	45,1	38,3	33,9	32,0	28,4	27,6	29,5
165	71,1	67,0	61,6	52,7	43,6	37,8	35,0	42,6	45,0	37,2	27,9
166	68,5	64,6	58,4	50,2	40,3	38,4	32,8	30,7	25,4	21,6	23,0
167	63,4	59,5	52,9	45,7	37,3	37,3	32,1	30,2	23,6	17,5	16,5
168	62,6	59,0	52,8	46,0	39,7	38,9	34,9	31,7	29,9	28,0	19,2
169	66,6	62,5	56,4	53,4	47,7	42,8	36,2	31,9	24,1	20,0	21,7
170	68,7	64,7	59,1	50,4	41,9	41,0	36,3	35,0	32,5	29,0	26,6
171	65,7	61,8	55,5	47,8	39,3	38,2	33,4	30,9	27,2	24,4	20,4
172	66,6	62,6	56,8	50,9	44,5	41,2	35,8	33,2	30,0	27,0	23,6
173	63,1	59,2	54,1	46,9	39,7	42,2	36,6	36,0	33,1	22,2	14,5
174	63,3	59,7	54,3	47,5	39,5	42,2	36,3	35,9	31,6	20,1	15,6
175	61,9	59,2	56,1	49,0	40,4	42,6	39,7	41,7	41,4	31,9	15,1
176	60,1	56,8	51,5	46,0	40,1	41,6	35,7	35,6	34,6	19,5	13,2
177	56,7	55,2	50,7	45,2	38,6	41,2	35,4	39,0	38,6	25,3	13,5



---

**ANEXO B**

**COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA (ISO 9613 PARTE 1)**





Tabla B1. Coeficientes de atenuación por absorción atmosférica para tonos puros, en dB/km, a una presión atmosférica de referencia de 101,325 kPa [15].

Temperatura del aire: -5 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,547	0,361	0,279	0,216	0,192	0,177	0,166	0,156	0,146	0,137	0,129
125	1,69	1,11	0,796	0,522	0,423	0,381	0,361	0,350	0,343	0,337	0,330
250	4,20	3,49	2,60	1,58	1,12	0,903	0,785	0,720	0,683	0,662	0,651
500	6,87	8,34	7,72	5,31	3,71	2,80	2,25	1,90	1,68	1,52	1,42
1000	8,29	13,10	16,00	15,70	12,40	9,68	7,74	6,38	5,42	4,72	4,20
2000	9,18	15,60	22,40	31,80	33,20	30,10	26,00	22,20	19,10	16,70	14,80
4000	11,10	18,10	26,40	44,20	58,70	66,40	67,70	65,00	60,50	55,50	50,70
8000	18,30	25,50	34,30	55,40	78,60	100,00	118,00	131,00	138,00	140,00	139,00

Temperatura del aire: 0 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,424	0,302	0,256	0,219	0,198	0,181	0,165	0,151	0,138	0,127	0,118
125	1,30	0,818	0,614	0,469	0,427	0,411	0,401	0,390	0,379	0,367	0,354
250	4,00	2,63	1,85	1,17	0,922	0,821	0,779	0,763	0,759	0,760	0,761
500	9,25	8,14	6,16	3,73	2,63	2,08	1,78	1,61	1,51	1,45	1,42
1000	14,00	18,30	17,70	12,70	9,00	6,83	5,50	4,64	4,06	3,66	3,37
2000	16,60	27,20	34,60	36,00	29,80	23,80	19,30	16,10	13,80	12,10	10,80
4000	19,00	32,60	47,00	69,00	75,20	71,00	63,30	55,50	48,90	43,20	38,60
8000	26,40	40,90	58,10	95,20	127,00	147,00	154,00	153,00	147,00	138,00	129,00

Temperatura del aire: 5 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,359	0,288	0,261	0,227	0,199	0,175	0,155	0,138	0,124	0,113	0,103
125	0,97	0,661	0,554	0,493	0,474	0,458	0,436	0,416	0,393	0,371	0,349
250	3,11	1,90	1,38	1,01	0,915	0,892	0,892	0,897	0,898	0,896	0,888
500	9,34	6,32	4,42	2,74	2,10	1,82	1,69	1,64	1,63	1,64	1,66
1000	20,00	18,90	14,80	9,18	6,48	5,08	4,29	3,80	3,50	3,31	3,20
2000	28,50	39,60	40,50	30,90	22,70	17,50	14,20	12,00	10,50	9,39	8,58
4000	33,50	56,20	73,70	82,60	72,50	60,20	50,20	42,70	37,00	32,70	29,40
8000	41,80	69,10	98,70	147,00	169,00	168,00	156,00	142,00	128,00	116,00	105,00

Temperatura del aire: 10 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,342	0,298	0,271	0,225	0,188	0,160	0,139	0,122	0,108	0,098	0,089
125	0,788	0,623	0,579	0,551	0,522	0,486	0,447	0,411	0,378	0,348	0,322
250	2,29	1,48	1,20	1,05	1,04	1,05	1,05	1,04	1,02	0,996	0,963
500	7,52	4,59	3,27	2,28	1,98	1,90	1,90	1,93	1,97	2,00	2,03
1000	21,60	15,40	11,00	6,77	5,07	4,26	3,86	3,66	3,57	3,54	3,55
2000	42,30	43,80	36,20	23,50	16,80	13,20	11,00	9,66	8,76	8,14	7,71
4000	57,30	84,00	91,50	76,60	59,00	46,70	38,40	32,80	28,70	25,70	23,50
8000	69,40	115,00	154,00	187,00	177,00	155,00	134,00	117,00	103,00	92,40	83,70



Tabla B1. Coeficientes de atenuación por absorción atmosférica para tonos puros, en dB/km, a una presión atmosférica de referencia de 101,325 kPa (continuación).

Temperatura del aire: 15 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,353	0,310	0,272	0,212	0,171	0,142	0,121	0,105	0,093	0,083	0,075
125	0,735	0,667	0,647	0,601	0,539	0,479	0,426	0,381	0,343	0,312	0,285
250	1,78	1,33	1,22	1,21	1,23	1,22	1,18	1,13	1,07	1,02	0,959
500	5,58	3,49	2,70	2,23	2,18	2,24	2,31	2,36	2,40	2,41	2,41
1000	18,40	11,50	8,17	5,45	4,51	4,16	4,06	4,08	4,15	4,25	4,35
2000	43,90	38,30	28,20	17,70	13,10	10,80	9,50	8,75	8,31	8,07	7,95
4000	87,30	99,90	88,80	82,00	45,70	36,20	30,30	26,40	23,70	21,70	20,30
8000	114,00	174,00	202,00	190,00	156,00	129,00	108,00	93,70	82,80	74,60	68,10

Temperatura del aire: 20 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,370	0,310	0,260	0,192	0,150	0,123	0,104	0,090	0,079	0,071	0,064
125	0,776	0,746	0,712	0,615	0,521	0,445	0,386	0,339	0,302	0,272	0,247
250	1,58	1,39	1,39	1,42	1,39	1,32	1,23	1,13	1,04	0,97	0,895
500	4,25	2,97	2,60	2,52	2,63	2,73	2,79	2,80	2,77	2,71	2,63
1000	14,10	8,72	6,53	5,01	4,65	4,66	4,80	4,98	5,15	5,30	5,42
2000	45,30	29,90	21,50	14,10	11,20	9,86	9,25	9,02	8,98	9,06	9,21
4000	109,00	95,10	74,10	48,50	36,10	29,40	25,40	22,90	21,30	20,20	19,40
8000	175,00	221,00	215,00	166,00	128,00	104,00	87,80	76,60	68,60	62,60	58,10

Temperatura del aire: 25 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,374	0,295	0,238	0,169	0,130	0,106	0,089	0,077	0,067	0,060	0,054
125	0,867	0,816	0,740	0,591	0,479	0,399	0,340	0,030	0,026	0,235	0,213
250	1,61	1,60	1,64	1,60	1,47	1,32	1,18	1,06	0,963	0,876	0,803
500	3,56	2,92	2,86	3,04	3,19	3,23	3,18	3,08	2,96	2,80	2,66
1000	10,70	7,13	5,87	5,27	5,39	5,68	5,96	6,19	6,35	6,44	6,47
2000	36,60	23,00	17,00	12,20	10,70	10,20	10,20	10,40	10,70	11,00	11,40
4000	110,00	79,40	58,80	38,80	30,10	25,70	23,20	21,90	21,10	20,80	20,60
8000	233,00	232,00	196,00	137,00	104,00	85,40	73,40	65,40	59,80	55,80	52,80

Temperatura del aire: 30 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,362	0,270	0,212	0,147	0,112	0,091	0,076	0,065	0,057	0,051	0,046
125	0,958	0,845	0,725	0,543	0,428	0,351	0,296	0,256	0,226	0,202	0,182
250	1,82	1,88	1,87	1,68	1,45	1,25	1,09	0,963	0,860	0,775	0,705
500	3,40	3,26	3,41	3,67	3,70	3,57	3,36	3,14	2,91	2,71	2,52
1000	8,67	6,52	6,00	6,15	6,63	7,03	7,29	7,41	7,41	7,32	7,17
2000	28,50	18,50	14,50	11,80	11,40	11,70	12,20	12,70	13,30	13,80	14,20
4000	96,00	63,50	47,10	32,70	27,00	24,50	23,40	23,10	23,10	23,50	24,00
8000	260,00	211,00	165,00	113,00	87,10	73,10	64,70	59,30	55,70	53,30	51,80



Tabla B1. Coeficientes de atenuación por absorción atmosférica para tonos puros, en dB/km, a una presión atmosférica de referencia de 101,325 kPa (continuación).

Temperatura del aire: 35 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,337	0,242	0,187	0,128	0,097	0,078	0,065	0,056	0,049	0,044	0,040
125	1,010	0,826	0,678	0,486	0,376	0,305	0,257	0,221	0,195	0,174	0,157
250	2,13	2,13	2,00	1,65	1,36	1,14	0,977	0,853	0,756	0,678	0,614
500	3,66	3,88	4,12	4,22	4,00	3,66	3,32	3,01	2,73	2,50	2,30
1000	7,71	6,74	8,82	7,55	8,15	8,43	8,45	8,30	8,03	7,71	7,37
2000	22,80	16,00	13,70	12,80	13,40	14,20	15,10	15,90	16,40	16,80	17,10
4000	78,30	51,30	39,30	29,70	26,50	25,70	25,80	26,50	27,40	28,30	29,30
8000	249,00	179,00	138,00	94,50	75,90	66,20	60,70	57,70	56,00	55,20	55,00

Temperatura del aire: 40 °C											
Frecuencia (Hz)	Humedad relativa (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
63	0,306	0,214	0,163	0,111	0,084	0,067	0,056	0,048	0,042	0,038	0,034
125	1,010	0,774	0,615	0,429	0,328	0,265	0,222	0,192	0,168	0,150	0,135
250	2,45	2,28	2,02	1,55	1,23	1,02	0,883	0,748	0,660	0,590	0,534
500	4,28	4,68	4,82	4,56	4,04	3,54	3,12	2,77	2,48	2,25	2,05
1000	7,68	7,68	8,25	9,24	9,62	9,52	9,14	8,66	8,14	7,62	7,14
2000	19,30	15,20	14,30	15,00	16,40	17,70	18,60	19,20	19,40	19,40	19,30
4000	63,60	43,20	35,00	29,30	28,50	29,20	30,60	32,10	33,70	35,10	36,30
8000	217,00	149,00	114,00	82,80	69,90	64,00	61,40	60,50	60,70	61,50	62,70

Fuente: International Organization for Standardization. ISO 9613. Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Geneva, 1993.





## **ANEXO C**

### **NIVEL DE PRESIÓN SONORA RESIDUAL ESTIMADO CON LA NORMA ISO 9613 PARTE 2 DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD Y FRECUENCIA**







Tabla C1. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	200	Promedio	32,5	29,5	28,4	26,7	30,5	26,8	27,4	37,9	45,1	51,1	53,2
		Máxima	34,6	31,3	28,8	27,5	31,2	27,5	27,8	39,9	47,5	53,5	54,5
		Mínima	28,2	26,5	27,9	25,8	29,8	26,1	27,1	34,2	39,1	44,8	51,3
	300	Promedio	42,9	39,2	36,4	36,7	36,4	29,7	28,9	30,8	36,8	46,9	60,8
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	48,5	45,0	42,4	43,3	42,5	33,9	34,8	36,9	46,5	56,2	68,1
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	49,5	46,0	43,5	44,5	43,3	34,7	34,6	40,3	54,5	59,0	68,8
		Máxima	51,2	47,5	45,5	46,6	45,4	37,6	38,2	44,4	59,4	63,6	71,5
		Mínima	47,2	44,0	41,2	41,7	40,4	31,1	29,9	34,1	44,7	50,5	65,0
600	Promedio	49,5	46,0	43,7	45,8	44,2	36,4	36,9	42,5	53,5	59,3	69,3	
	Máxima	53,2	49,6	47,5	49,7	48,1	38,1	37,3	44,9	54,2	60,4	72,6	
	Mínima	37,4	34,4	32,9	37,6	34,5	34,2	36,1	39,1	52,7	58,2	62,7	
B	600	Promedio	38,4	35,8	34,5	37,6	34,0	35,6	35,8	39,7	50,0	55,7	60,3
		Máxima											
		Mínima											
D	500	Promedio	38,2	35,3	33,6	36,1	34,6	36,3	37,6	40,1	53,5	62,5	62,9
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	40,8	37,4	34,8	38,5	34,4	35,6	36,3	39,6	49,5	54,9	60,1
		Máxima											
		Mínima											
E	400	Promedio	41,9	39,0	35,4	35,8	34,4	31,2	30,9	33,3	39,6	49,8	57,2
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	37,9	34,8	32,0	35,3	32,6	32,0	32,4	34,6	41,2	44,6	53,7
		Máxima	40,0	37,2	34,0	37,2	33,5	34,3	34,4	37,0	43,6	46,3	54,5
		Mínima	33,6	29,1	28,2	31,9	31,5	26,9	28,5	29,0	35,7	41,6	52,9
F	100	Promedio	33,9	32,1	29,7	32,2	37,4	34,9	32,2	33,5	35,4	44,6	53,3
		Máxima	38,0	35,6	32,1	35,2	40,0	38,0	34,0	35,4	37,9	48,0	57,5
		Mínima	18,7	19,9	22,2	18,7	27,9	25,1	25,0	24,2	25,8	35,3	41,8
	200	Promedio	38,2	36,2	32,2	31,7	38,3	34,8	33,0	33,9	37,7	51,0	57,0
		Máxima	42,7	40,7	36,8	36,4	42,4	39,1	37,0	37,5	41,2	53,1	61,7
		Mínima	30,0	26,0	21,8	23,5	29,9	23,4	24,0	25,2	30,0	44,3	46,7
	300	Promedio	38,9	37,2	34,6	35,2	38,5	38,5	35,3	35,8	39,1	46,8	54,9
		Máxima	42,5	39,6	38,8	37,9	42,7	40,2	37,3	37,2	41,2	52,2	59,8
		Mínima	29,7	28,8	25,9	27,7	28,5	26,4	25,8	28,5	31,7	38,9	48,5
	400	Promedio	37,6	36,2	33,3	35,6	34,7	35,2	34,4	35,2	41,4	43,0	52,0
		Máxima	38,0	36,4	33,6	36,0	35,1	35,6	34,5	35,2	41,6	43,6	52,3
		Mínima	37,3	35,9	33,0	35,4	34,4	34,9	34,3	35,1	41,2	41,6	51,4
	500	Promedio	40,3	35,9	35,2	35,8	33,4	29,7	30,9	34,5	42,6	50,0	55,0
		Máxima	43,1	39,4	38,1	37,5	34,5	30,6	31,3	35,1	43,7	52,3	56,1
		Mínima	34,3	32,3	29,6	33,9	32,4	28,8	29,9	33,6	41,5	43,2	53,2

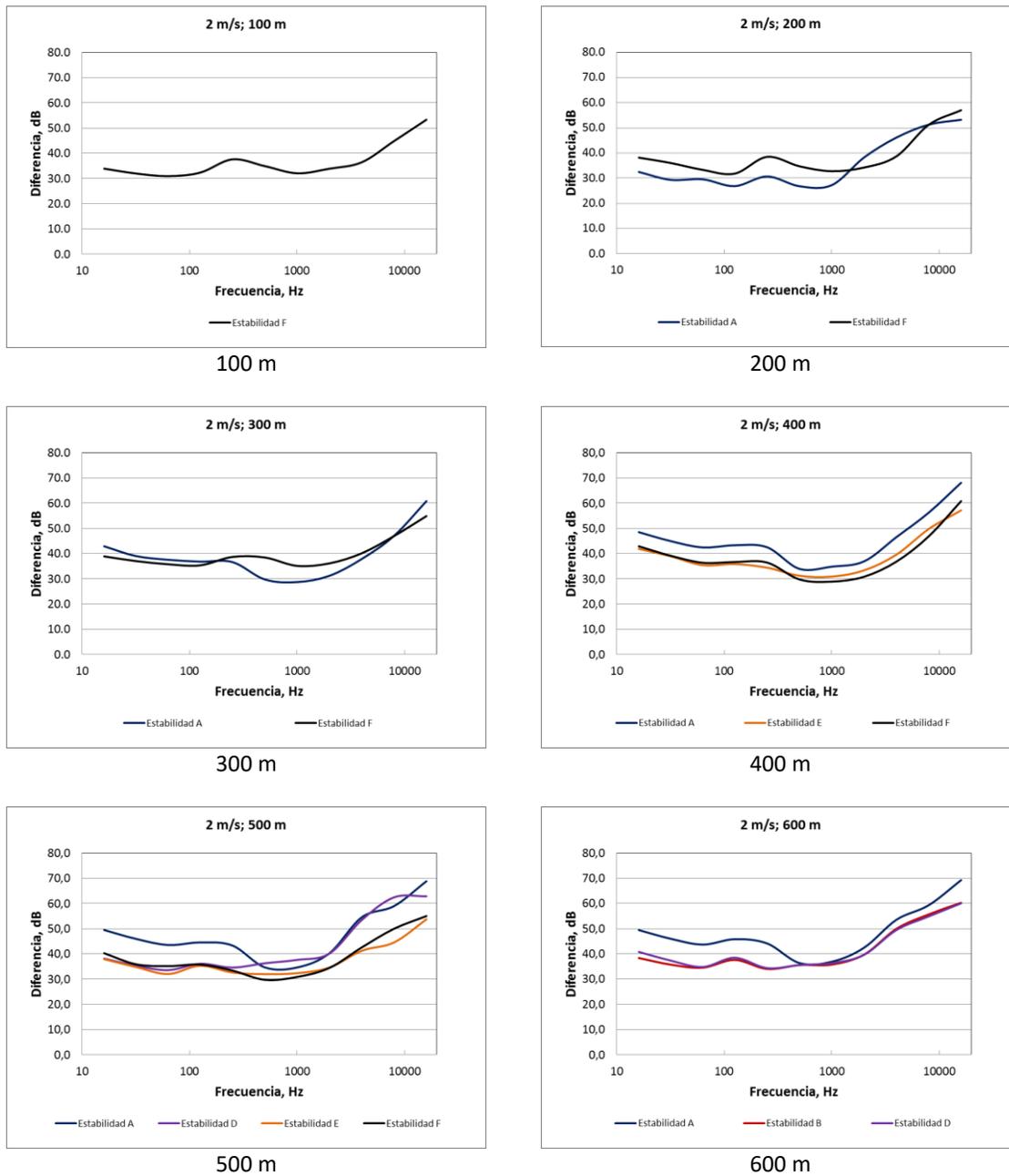


Figura C1. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

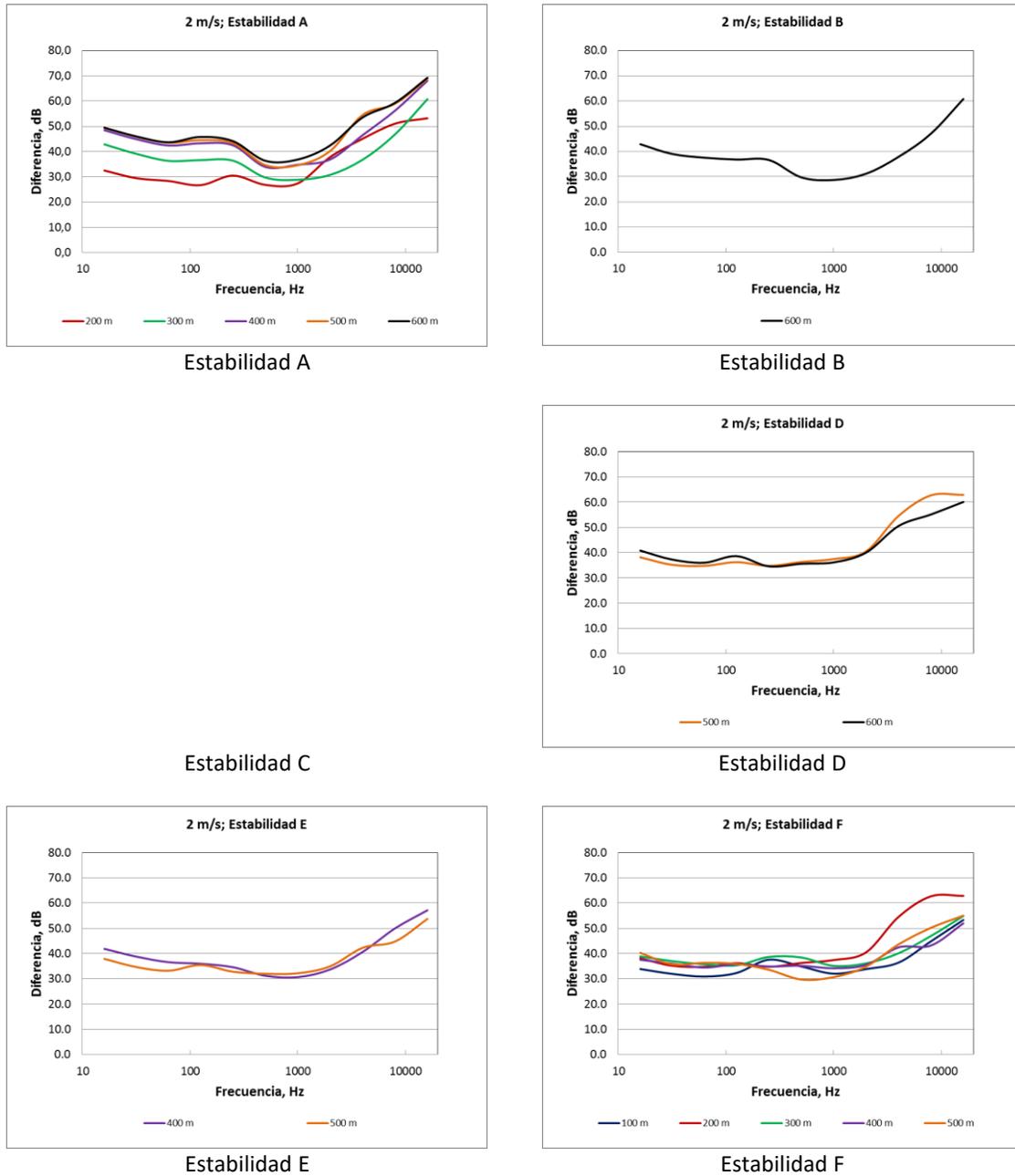


Figura C2. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.



Tabla C2. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	19,1	15,5	12,7	11,8	14,4	9,9	9,3	10,0	12,8	25,2	38,2
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	26,0	22,4	20,1	19,2	20,9	14,8	14,6	17,7	24,6	36,9	45,8
		Máxima	29,2	25,4	23,2	22,4	23,6	16,0	15,2	19,1	27,7	37,9	48,5
		Mínima	14,0	12,8	12,6	10,9	16,9	14,0	13,4	15,1	20,7	34,7	41,9
	300	Promedio	29,7	26,2	23,2	22,8	22,9	16,7	16,5	18,6	26,6	39,0	48,8
		Máxima	31,9	28,6	25,7	25,3	25,2	18,0	17,8	20,3	28,7	40,6	50,7
		Mínima	26,2	23,2	20,0	19,7	19,8	15,5	15,6	16,5	24,5	38,0	44,9
	400	Promedio	34,5	30,9	28,6	29,1	28,4	19,7	18,8	23,8	33,5	40,8	53,5
		Máxima	37,5	33,7	31,6	32,6	32,0	22,7	20,2	28,7	38,5	42,0	56,7
		Mínima	31,8	28,4	25,4	25,6	24,7	16,5	16,8	18,3	27,0	38,5	50,3
	500	Promedio	36,5	33,1	30,6	31,8	30,8	21,4	20,2	25,7	38,5	43,1	55,4
		Máxima	37,7	34,2	32,0	33,3	32,3	22,7	21,4	29,3	43,0	44,4	56,8
		Mínima	34,3	31,0	28,0	28,9	27,7	18,9	18,5	23,0	33,3	41,7	52,9
	600	Promedio	37,7	34,2	31,8	33,6	31,8	22,1	21,5	25,4	38,3	44,1	56,5
		Máxima	39,2	35,6	33,4	35,4	33,7	23,7	22,5	27,0	39,5	45,1	58,3
		Mínima	34,7	31,5	28,3	29,4	27,1	18,6	20,0	24,1	36,8	42,4	52,6
D	400	Promedio	25,8	22,4	20,2	22,7	23,4	24,7	22,1	26,0	31,2	33,9	40,1
		Máxima	25,9	22,6	20,3	22,9	23,5	24,7	22,3	26,1	31,9	34,8	40,6
		Mínima	25,7	22,1	20,1	22,4	23,3	24,7	21,9	26,0	30,3	32,7	39,6
E	300	Promedio	20,6	18,7	17,6	21,6	23,5	23,9	22,3	23,5	29,4	38,0	41,6
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	21,5	18,8	18,0	22,0	20,9	23,6	22,8	30,6	37,0	38,5	40,3
		Máxima	22,4	18,9	18,0	22,2	21,1	23,7	22,8	32,8	38,9	40,5	40,7
		Mínima	20,3	18,6	18,0	21,8	20,6	23,6	22,7	25,7	33,8	34,7	39,8
F	100	Promedio	25,5	22,9	19,7	19,5	25,2	22,0	20,5	21,7	25,1	35,4	45,0
		Máxima	26,8	23,9	20,9	20,6	25,9	22,9	21,2	22,1	25,7	37,1	46,6
		Mínima	19,1	19,2	16,8	16,5	23,9	21,2	20,1	21,4	24,5	34,5	36,3
	200	Promedio	28,4	27,1	22,8	22,1	29,5	26,0	23,9	24,4	28,1	39,9	46,4
		Máxima	29,3	27,7	23,8	23,1	29,8	26,3	24,1	24,6	28,3	40,0	48,3
		Mínima	27,8	26,9	22,2	21,5	29,1	25,5	23,7	24,3	27,9	39,7	45,1
	300	Promedio	22,3	21,2	18,7	21,3	26,3	21,6	20,9	21,6	26,5	33,0	38,0
		Máxima	24,1	22,7	21,1	27,4	33,0	26,0	24,7	24,3	29,0	34,5	40,6
		Mínima	20,8	17,6	13,8	14,7	15,2	12,1	11,7	11,8	17,7	26,5	35,6
	400	Promedio	22,8	20,1	17,7	20,3	20,8	21,5	19,9	25,8	33,9	37,2	40,8
		Máxima	24,7	22,2	20,0	21,5	23,5	24,7	22,5	29,3	37,5	41,4	43,3
		Mínima	19,3	18,1	14,9	17,3	15,9	14,2	14,5	16,1	22,5	30,6	38,5
	500	Promedio	27,6	24,9	21,7	24,8	21,2	21,8	21,8	24,5	31,9	35,2	43,0
		Máxima	27,9	25,1	22,2	24,9	21,4	21,9	21,8	24,5	32,7	36,7	43,2
		Mínima	27,1	24,7	21,2	24,7	20,9	21,7	21,8	24,4	30,9	32,9	42,6

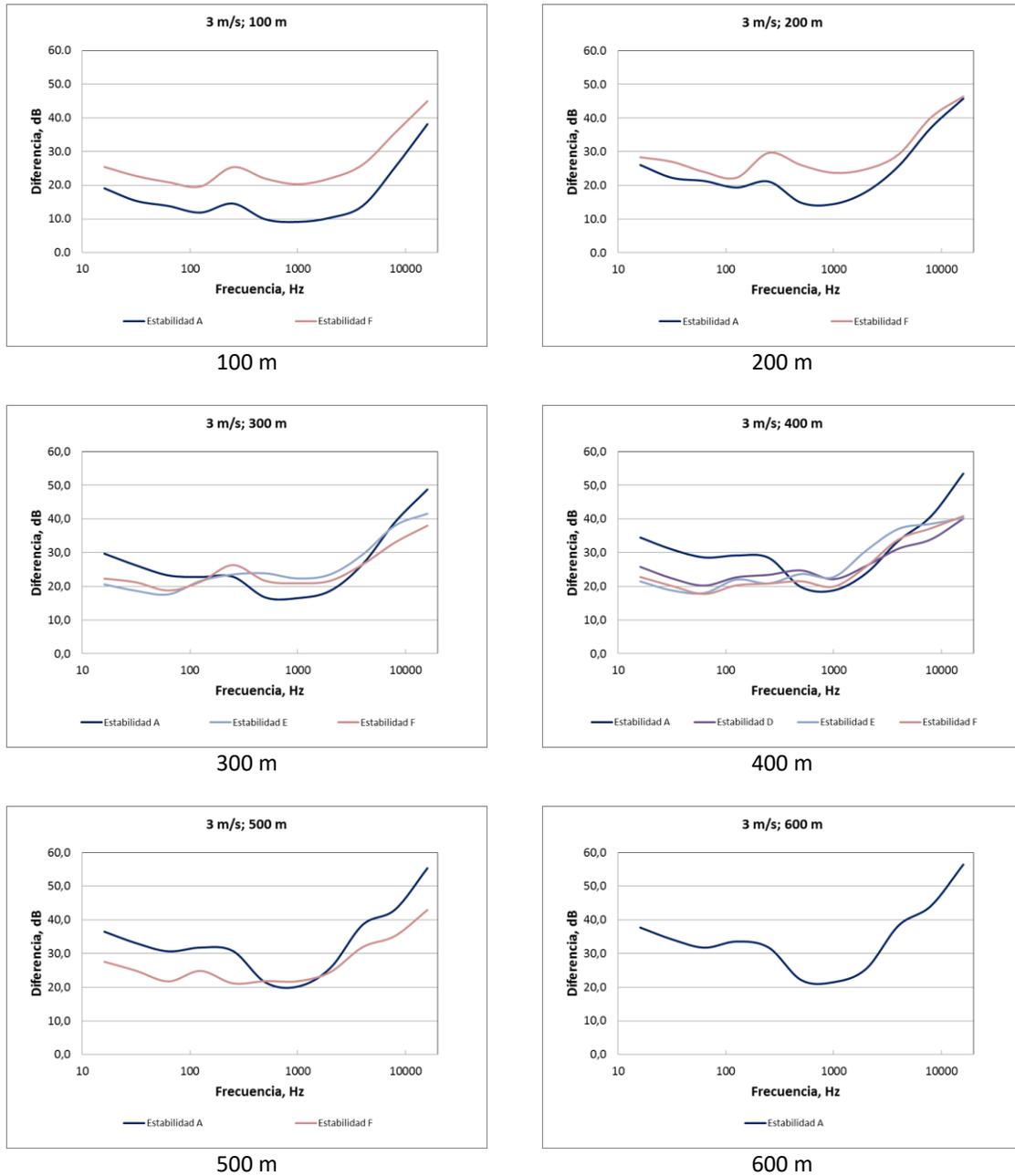
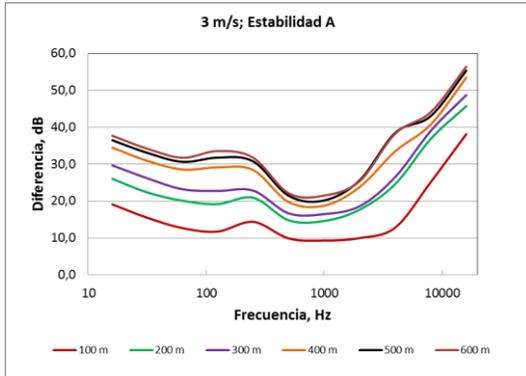
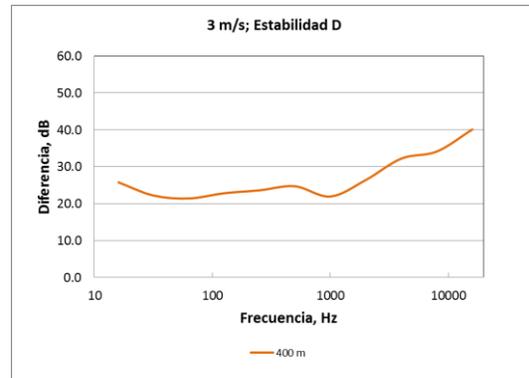


Figura C3. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 3 m/s.



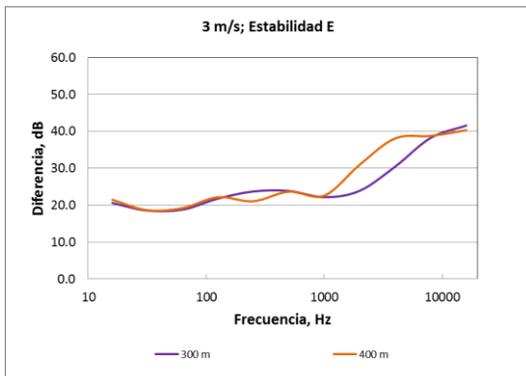
Estabilidad A

Estabilidad B

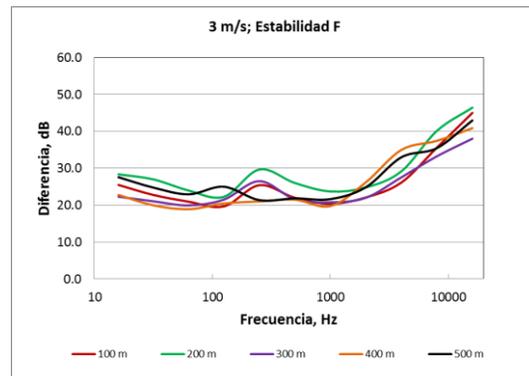


Estabilidad D

Estabilidad C



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura C4. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.



Tabla C3. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	11,4	7,3	6,0	4,5	6,6	1,9	0,7	2,0	5,3	16,4	30,0
		Máxima	13,7	9,5	8,4	6,5	8,2	2,5	0,7	2,5	5,8	16,6	32,3
		Mínima	6,6	2,9	0,7	0,9	4,3	1,3	0,6	1,4	4,5	16,3	24,8
	200	Promedio	18,4	14,6	13,2	10,9	12,5	5,0	3,7	5,6	12,2	25,4	37,1
		Máxima	18,9	15,3	14,0	11,8	13,2	5,5	4,6	7,0	14,9	27,8	38,1
		Mínima	17,2	13,3	11,5	9,2	11,2	3,9	3,0	4,6	9,3	23,3	35,1
	300	Promedio	21,6	17,8	15,8	13,8	14,0	7,1	7,0	10,8	20,1	31,5	40,4
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	24,4	20,7	19,5	18,8	17,8	8,6	6,8	9,5	21,0	28,5	42,8
		Máxima											
		Mínima											
600	Promedio	27,8	24,4	23,2	23,8	22,0	13,3	13,5	18,3	29,6	35,7	46,4	
	Máxima												
	Mínima												
B	100	Promedio	-2,7	-5,7	-4,7	-5,1	5,1	-2,5	-3,1	-1,2	1,5	7,8	19,1
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	4,0	-0,2	-1,9	0,1	8,7	3,4	3,7	9,2	15,0	26,6	30,6
		Máxima	5,3	0,7	-1,6	0,6	9,7	3,7	4,5	10,5	16,5	27,5	31,4
		Mínima	2,1	-1,5	-2,2	-0,5	7,5	3,1	2,9	7,2	12,9	25,6	29,6
900	Promedio	34,5	30,6	29,6	31,6	28,9	20,3	19,8	30,1	41,2	41,6	53,8	
	Máxima												
	Mínima												
C	500	Promedio	27,5	23,2	22,0	22,9	21,2	18,9	17,5	18,6	25,4	32,1	46,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	4,6	1,6	1,4	1,0	11,1	8,9	7,6	10,1	10,8	17,4	37,6
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	11,1	8,1	9,1	7,4	12,5	11,6	11,3	11,1	12,9	21,8	43,5
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	15,5	11,7	11,6	14,2	16,2	17,0	15,4	20,6	31,0	35,4	37,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	26,0	22,0	20,8	21,9	21,2	18,1	16,9	23,3	35,1	37,3	45,7
		Máxima	30,1	26,0	25,0	25,9	24,5	19,9	18,7	26,0	39,4	39,9	49,8
		Mínima	21,0	17,5	16,2	17,9	18,2	17,2	15,3	18,1	25,9	32,6	42,0
800	Promedio	41,2	37,7	37,6	41,0	38,5	29,7	27,9	41,6	55,7	54,5	59,8	
	Máxima												
	Mínima												
900	Promedio	36,2	32,4	31,6	34,3	31,6	22,3	20,9	27,6	37,6	42,5	55,8	
	Máxima	37,7	34,0	33,5	36,6	34,0	24,4	21,8	29,2	39,5	43,4	57,2	
	Mínima	35,1	31,2	29,9	31,6	28,6	20,1	20,1	24,8	34,6	41,2	55,0	
E	400	Promedio	17,3	13,7	13,4	15,5	14,3	15,9	15,0	20,8	28,9	31,7	34,1
		Máxima	19,8	15,9	14,7	16,3	15,8	16,5	16,5	23,5	32,6	36,2	36,9
		Mínima	15,3	11,5	11,7	14,6	13,3	15,5	14,2	18,6	24,0	26,7	31,6



Tabla C3. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s (continuación).

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
F	100	Promedio	13,1	11,5	10,0	8,9	15,3	12,3	11,1	12,9	16,8	27,1	32,0
		Máxima	19,0	18,1	14,7	13,0	21,3	17,5	15,1	16,1	20,6	31,6	37,9
		Mínima	10,1	10,7	8,8	8,1	15,5	12,8	11,4	13,1	17,1	26,4	24,4
	200	Promedio	13,5	13,4	13,0	10,3	18,8	20,0	14,2	15,9	20,9	31,1	32,2
		Máxima	19,0	18,1	14,7	13,0	21,3	20,6	15,1	16,2	21,7	33,5	36,7
		Mínima	10,1	10,6	8,8	8,1	15,5	12,8	11,9	13,1	17,5	27,7	23,4
	300	Promedio	14,3	12,9	13,5	11,7	16,2	15,7	13,7	14,6	19,5	24,4	39,5
		Máxima	15,7	13,4	14,1	11,7	16,7	16,8	13,8	15,5	21,5	25,9	42,4
		Mínima	12,2	12,4	12,6	11,6	15,7	14,4	13,5	13,4	15,6	21,9	29,1
	400	Promedio	14,1	11,0	10,1	13,0	15,5	15,4	12,5	17,4	25,9	23,8	29,6
		Máxima											
		Mínima											

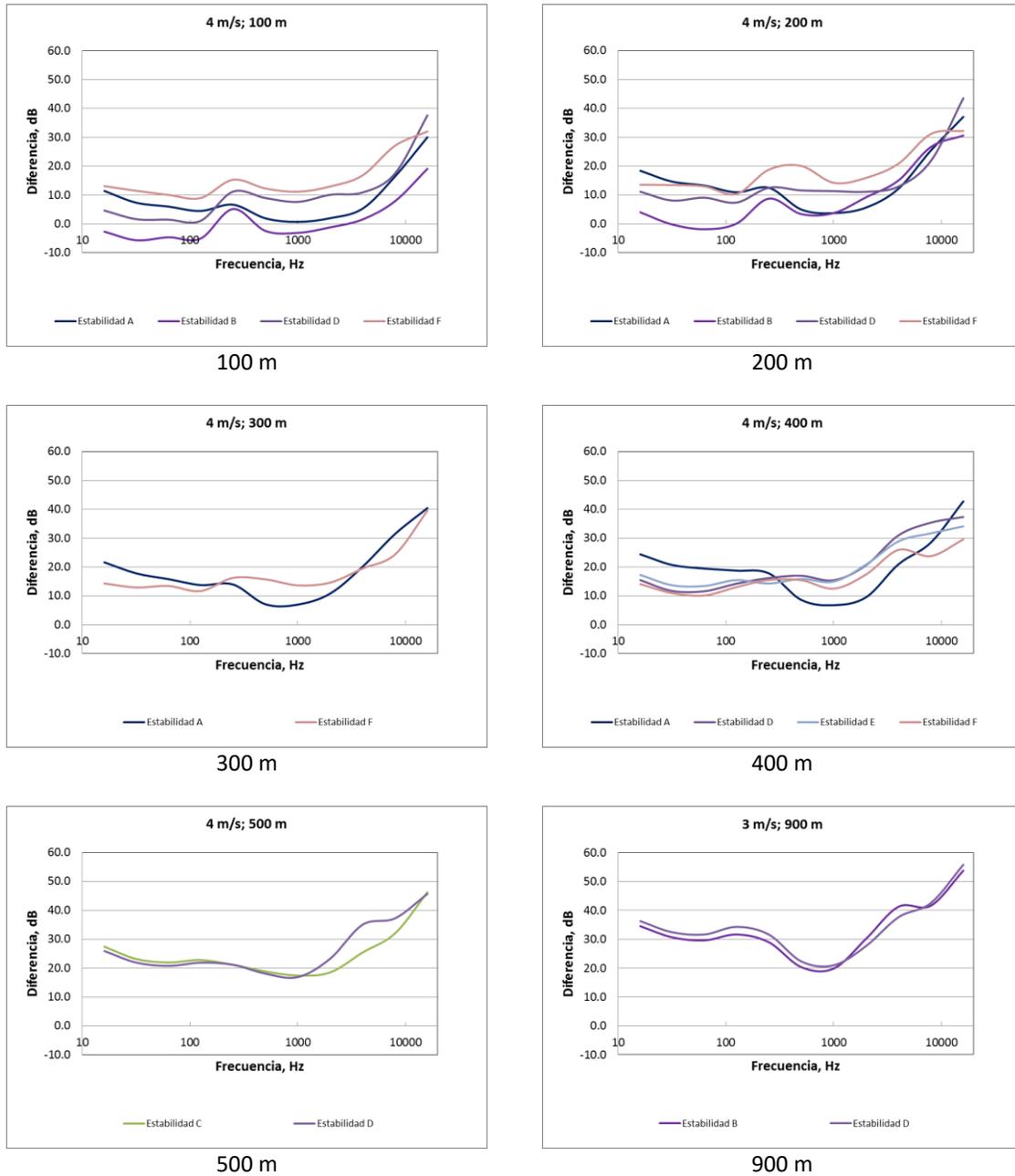


Figura C5. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 4 m/s.

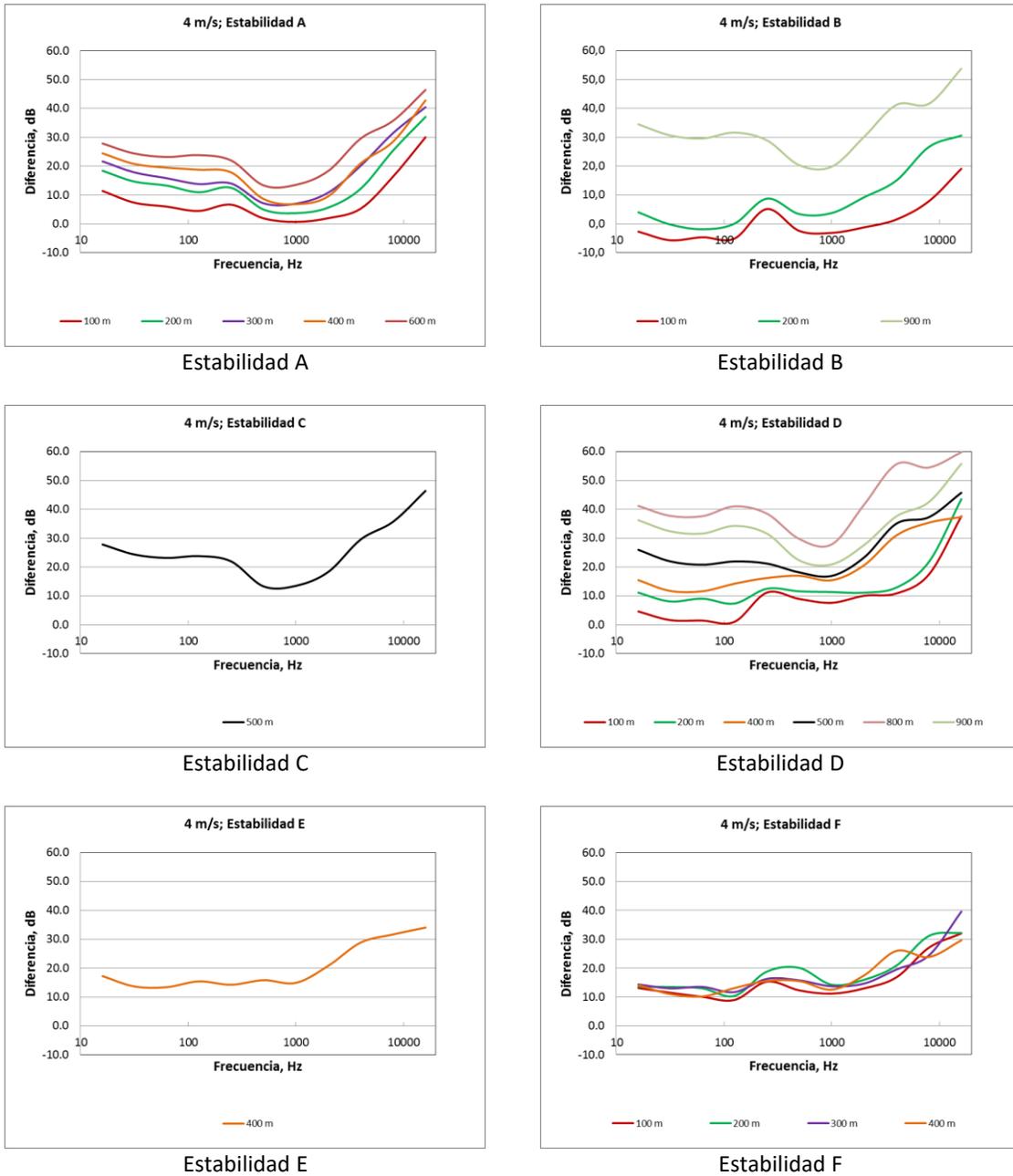


Figura C6. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.



Tabla C4. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	17,4	13,6	11,2	13,3	11,4	7,8	7,8	13,0	24,2	26,8	34,0
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	27,7	24,1	24,0	25,2	22,9	13,4	11,6	15,7	24,6	34,1	46,9
		Máxima											
		Mínima											
B	100	Promedio	1,1	-2,7	-4,3	-5,9	1,0	-5,2	-6,0	-3,5	0,7	8,8	19,6
		Máxima	1,9	-2,0	-3,6	-5,3	1,2	-4,7	-5,6	-3,2	1,7	9,9	21,0
		Mínima	-0,8	-4,7	-7,5	-8,6	0,3	-6,8	-7,0	-4,2	0,3	8,3	19,4
	500	Promedio	17,6	13,6	12,0	18,0	20,2	14,0	10,7	11,9	14,9	21,2	35,0
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	22,0	17,9	16,5	17,5	15,7	9,3	8,3	12,7	20,8	26,3	40,2
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	31,5	28,1	27,9	30,5	28,0	20,1	20,8	25,0	34,5	39,4	51,4
		Máxima	32,5	29,3	29,3	31,9	29,3	21,8	22,6	27,4	37,1	41,6	52,8
		Mínima	30,2	26,5	26,0	28,4	26,1	17,3	17,7	19,6	27,1	35,1	49,2
C	500	Promedio	16,9	13,4	11,6	15,2	12,6	14,4	14,0	23,4	42,1	39,4	35,1
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	19,2	16,1	14,3	17,7	16,0	17,0	16,9	19,5	31,4	28,6	35,1
		Máxima	20,4	17,0	15,4	18,3	16,9	17,3	17,3	20,1	32,4	30,8	37,0
		Mínima	17,7	14,9	12,8	16,9	15,0	16,5	16,4	18,8	30,1	23,9	31,7
D	500	Promedio	13,5	10,1	8,3	10,7	12,2	10,1	9,4	11,7	20,9	29,2	32,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	36,7	33,2	33,2	36,7	35,0	25,9	21,9	27,1	37,6	40,8	54,8
		Máxima											
		Mínima											
	800	Promedio	36,8	33,1	33,1	36,8	34,5	25,6	22,2	26,9	38,9	41,8	55,3
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	28,2	24,5	23,3	25,8	23,3	16,2	17,7	19,9	27,3	33,3	46,8
		Máxima											
		Mínima											

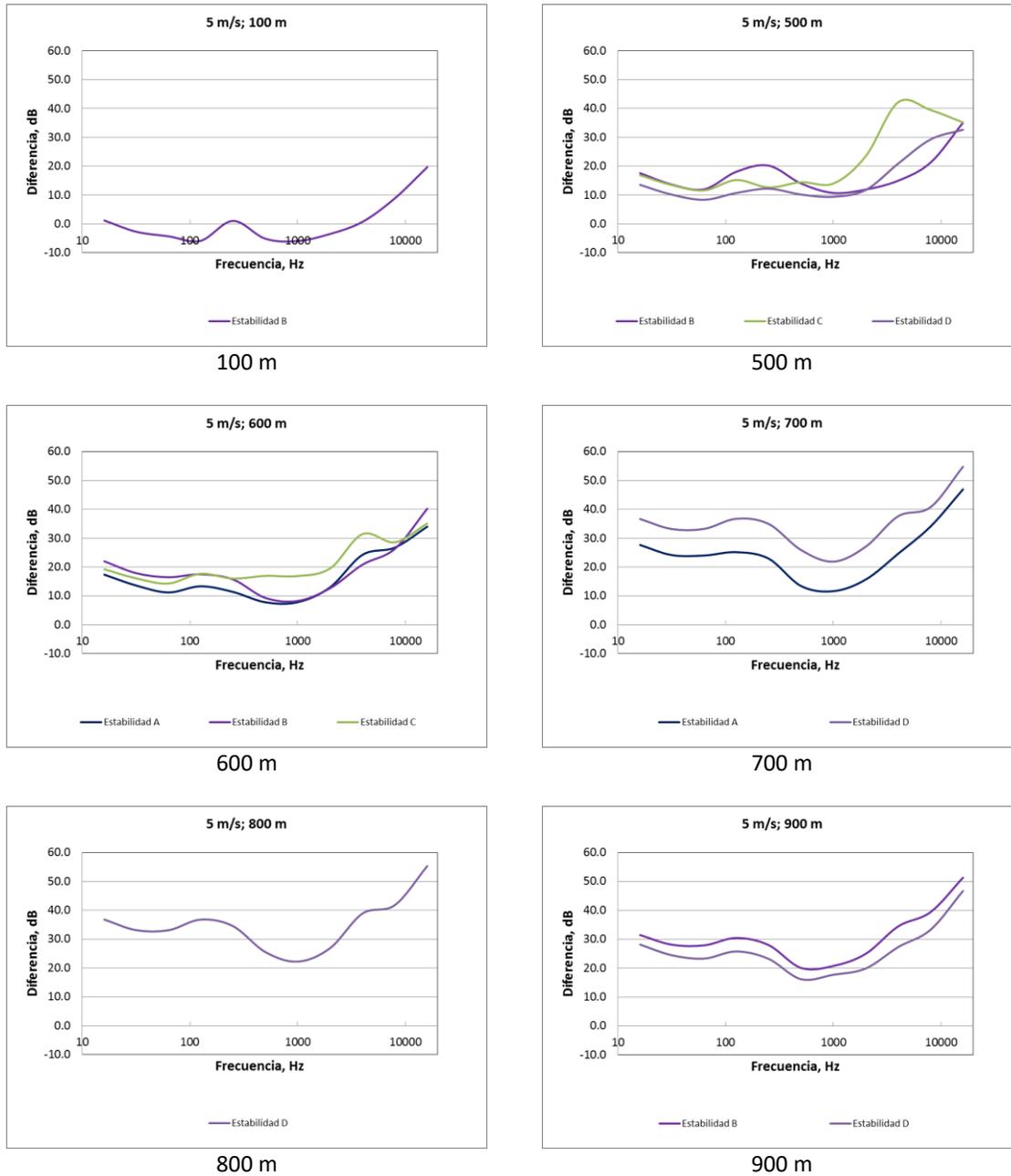
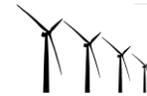
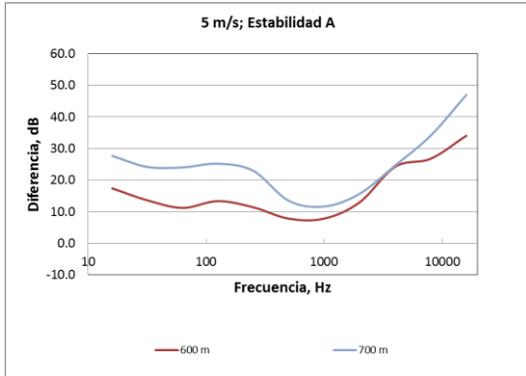
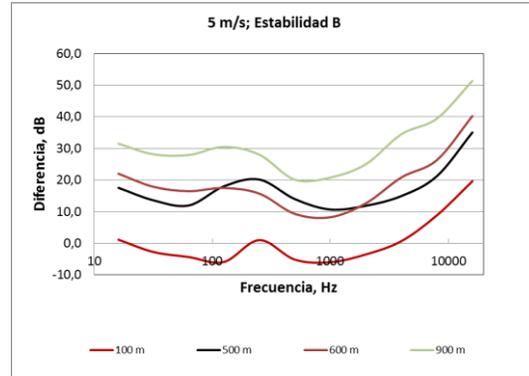


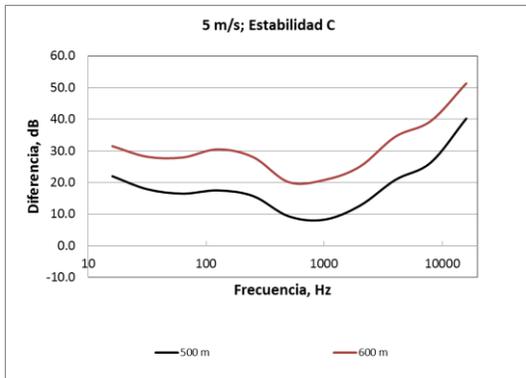
Figura C7. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 5 m/s.



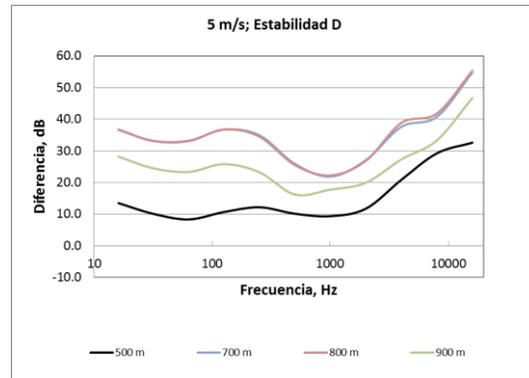
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad C



Estabilidad D

Estabilidad E

Estabilidad F

Figura C8. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.



Tabla C5. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	21,8	17,8	16,9	17,8	16,2	8,3	7,4	11,5	20,6	27,4	41,4
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	24,4	20,8	20,2	21,8	19,5	9,8	8,3	16,3	26,1	29,5	43,5
		Máxima	25,4	21,7	21,3	23,2	21,0	11,3	9,0	17,8	28,2	30,2	44,4
		Mínima	23,2	19,6	18,8	19,5	17,2	7,5	7,3	14,1	21,9	28,6	42,4
	800	Promedio	28,0	24,1	23,8	26,6	24,1	15,5	14,1	22,2	34,5	35,5	47,5
		Máxima	30,0	26,2	26,1	29,1	26,7	18,2	16,5	24,0	36,0	37,1	49,4
		Mínima	24,2	20,0	18,5	19,5	16,6	7,4	8,3	19,1	32,4	33,0	44,1
B	500	Promedio	17,5	13,8	12,1	12,1	11,3	8,7	8,8	11,5	20,3	27,2	36,6
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	19,9	16,2	15,2	16,4	14,8	10,3	9,7	16,9	30,9	30,9	38,8
		Máxima	20,6	17,0	16,0	17,2	15,8	14,6	14,0	22,2	37,2	36,9	39,8
		Mínima	16,4	13,2	11,4	15,1	13,6	7,5	6,1	9,9	18,1	22,6	31,3
	800	Promedio	29,9	26,2	25,7	28,3	26,0	17,4	15,6	19,0	31,4	35,5	49,2
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	26,9	23,2	22,5	24,8	22,6	14,5	15,4	18,2	26,6	33,3	46,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	14,0	10,3	10,2	9,7	11,0	3,8	1,9	3,8	5,9	15,6	33,1
		Máxima	15,3	11,7	11,7	11,3	12,3	4,5	2,1	4,2	6,0	16,2	34,3
		Mínima	12,9	8,9	8,7	8,1	9,9	3,2	1,7	3,5	5,7	15,2	32,1
	200	Promedio	20,4	17,0	16,8	17,2	18,3	9,3	6,0	6,9	10,0	25,1	39,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	25,7	22,1	22,0	24,2	23,3	14,2	10,4	11,8	19,9	29,7	43,9
		Máxima	30,7	27,1	27,0	29,3	28,4	19,0	14,8	15,7	24,4	34,3	48,6
		Mínima	11,3	7,5	5,4	7,2	6,7	5,4	3,5	7,1	11,4	15,7	26,8
	600	Promedio	29,2	25,7	25,7	28,0	26,8	17,4	13,6	18,7	30,4	34,1	48,1
		Máxima	30,1	26,7	26,8	29,3	28,1	18,8	14,8	20,2	32,2	34,7	48,6
		Mínima	28,6	25,0	25,0	27,0	25,8	16,2	12,8	15,7	27,1	33,8	47,7
	700	Promedio	31,4	27,8	27,8	30,8	28,9	19,8	16,4	25,2	37,5	37,7	50,4
		Máxima	31,8	28,2	28,2	31,4	29,5	20,5	16,8	26,2	38,8	38,1	50,6
		Mínima	30,9	27,2	27,3	30,1	28,2	19,0	16,0	23,8	35,6	37,3	50,2
	800	Promedio	34,1	30,7	30,8	34,6	32,2	23,5	19,8	26,6	38,9	40,1	52,4
		Máxima	34,5	31,2	31,4	35,3	32,9	24,2	20,3	27,1	40,1	40,7	52,7
		Mínima	33,6	30,1	30,1	33,8	31,5	22,6	19,2	26,1	37,3	39,5	52,1
E	400	Promedio	25,5	21,7	21,4	22,6	22,3	13,1	9,8	10,9	17,4	30,1	44,6
		Máxima											
		Mínima											

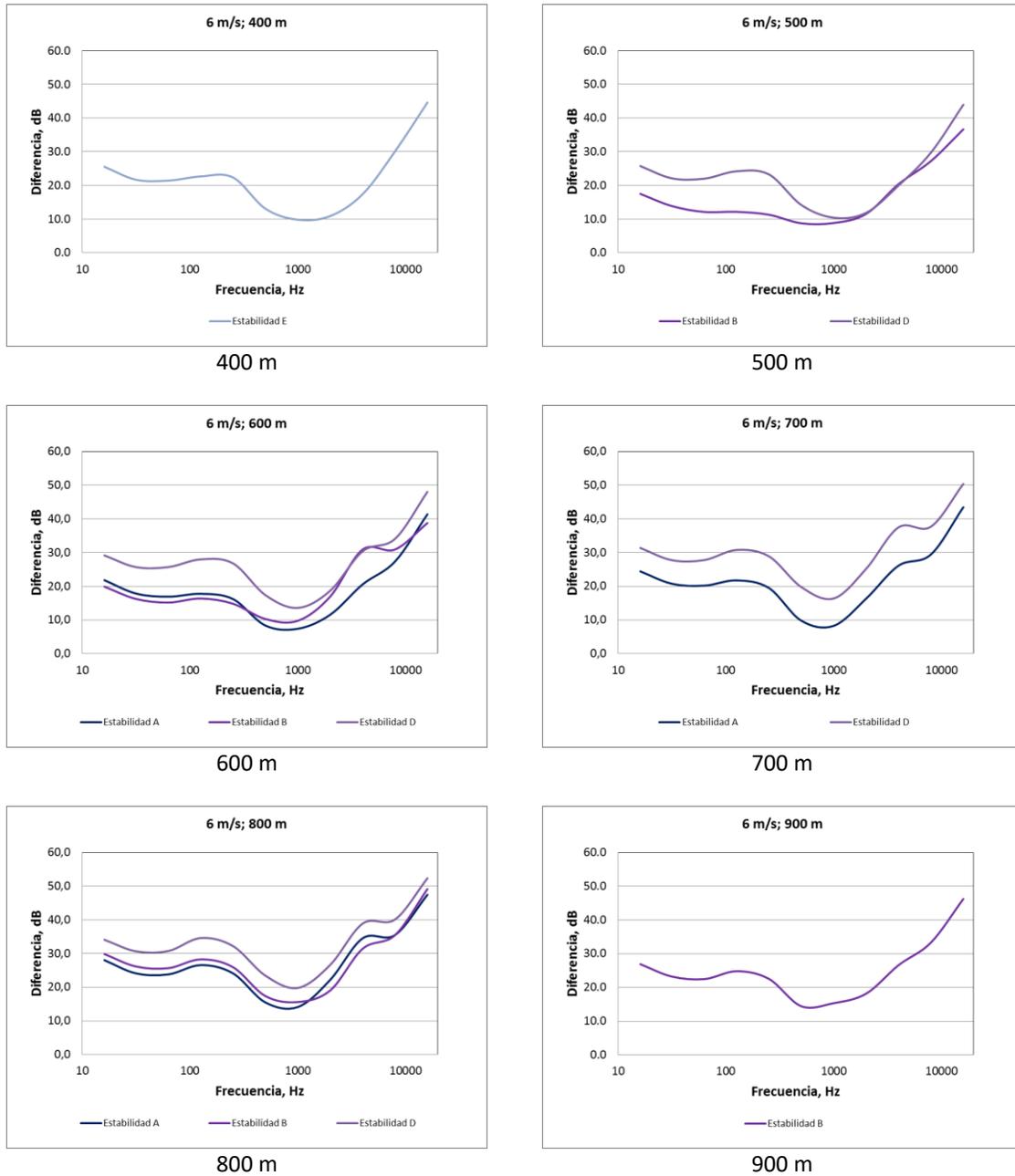
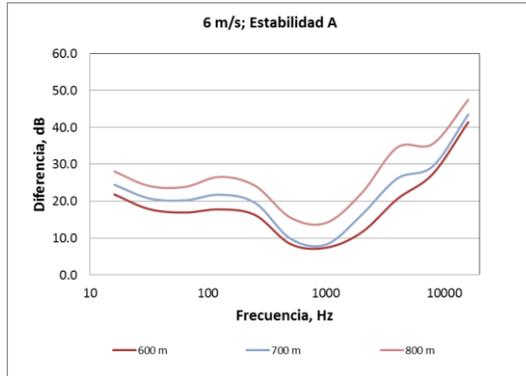
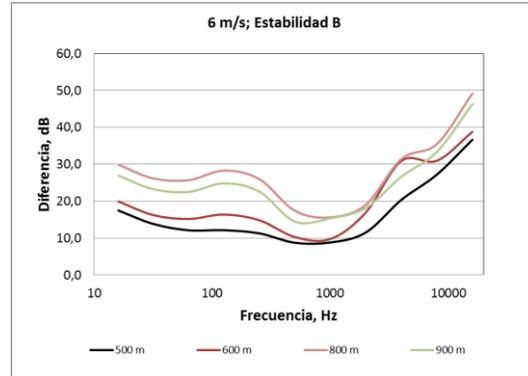


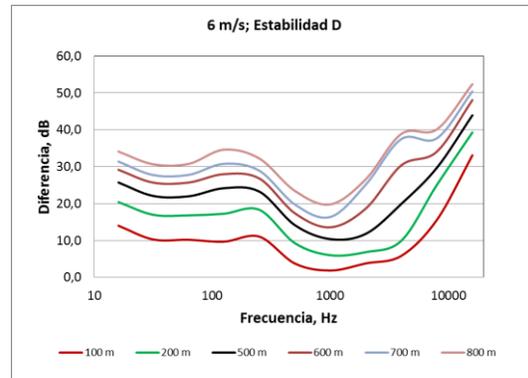
Figura C9. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 6 m/s.



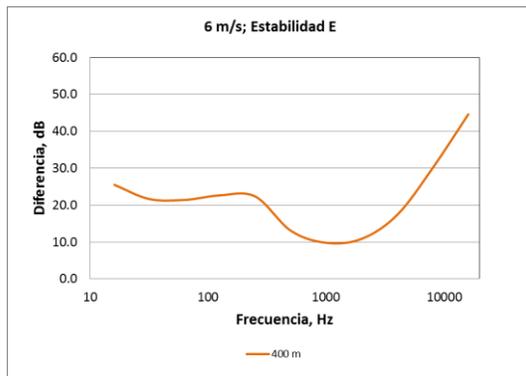
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura C10. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.



Tabla C6. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	17,7	14,2	12,4	14,9	13,5	13,7	13,1	16,4	29,1	25,4	34,9
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	23,8	20,1	19,5	20,9	18,9	9,2	7,2	15,6	26,0	29,0	43,1
		Máxima	24,2	20,8	20,4	21,7	19,5	9,7	8,5	19,4	30,2	30,5	43,9
		Mínima	23,3	19,6	18,7	19,8	17,8	8,3	6,1	10,1	18,4	27,8	42,5
	800	Promedio	23,3	19,3	18,2	19,9	17,2	8,4	8,8	16,2	27,5	32,2	43,3
		Máxima	24,9	21,0	20,0	22,0	19,5	10,2	10,4	19,7	32,1	34,1	44,5
		Mínima	21,5	17,1	15,4	16,9	13,6	5,1	6,7	11,5	20,9	28,9	41,7
B	600	Promedio	20,6	16,6	15,7	16,6	14,8	8,3	10,5	25,8	40,8	40,4	40,5
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	12,2	8,6	8,4	7,9	9,4	2,5	0,7	2,6	4,7	14,2	31,3
		Máxima	12,6	9,1	8,9	8,6	9,8	2,7	0,7	2,6	4,8	14,5	31,6
		Mínima	11,9	8,0	7,8	7,0	8,9	2,2	0,7	2,5	4,6	13,8	30,9
	200	Promedio	19,2	15,4	15,4	15,4	16,2	7,6	4,6	5,3	8,9	23,9	38,0
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	23,2	19,3	19,2	20,3	19,9	10,9	8,0	9,1	15,7	28,1	42,6
		Máxima	23,9	20,0	19,9	21,0	20,7	11,4	8,3	9,4	16,1	28,6	43,1
		Mínima	22,5	18,5	18,4	19,4	19,0	10,3	7,7	8,8	15,3	27,6	42,0
	500	Promedio	25,4	21,6	21,6	23,3	22,5	13,1	9,9	11,5	20,6	30,7	44,8
		Máxima	26,5	22,8	22,8	24,8	23,9	14,5	10,9	12,2	21,4	31,2	45,4
		Mínima	24,6	20,8	20,7	22,1	21,3	11,9	9,0	10,6	19,0	29,6	44,2
	600	Promedio	31,7	28,5	28,8	31,6	30,3	21,4	16,9	19,1	29,2	35,5	49,4
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	30,0	26,3	26,3	29,3	27,5	18,3	14,6	18,0	28,5	34,8	49,1
		Máxima											
		Mínima											
	800	Promedio	30,9	26,8	26,4	29,7	27,4	18,4	15,0	18,8	29,5	35,6	49,7
		Máxima											
		Mínima											
E	300	Promedio	25,9	22,4	22,6	24,0	24,1	14,8	10,2	11,0	15,9	29,4	43,3
		Máxima	26,6	23,2	23,5	25,0	25,0	15,7	11,1	11,8	16,4	29,7	43,5
		Mínima	24,8	21,1	21,3	22,6	22,7	13,5	9,2	10,2	15,5	29,1	42,8

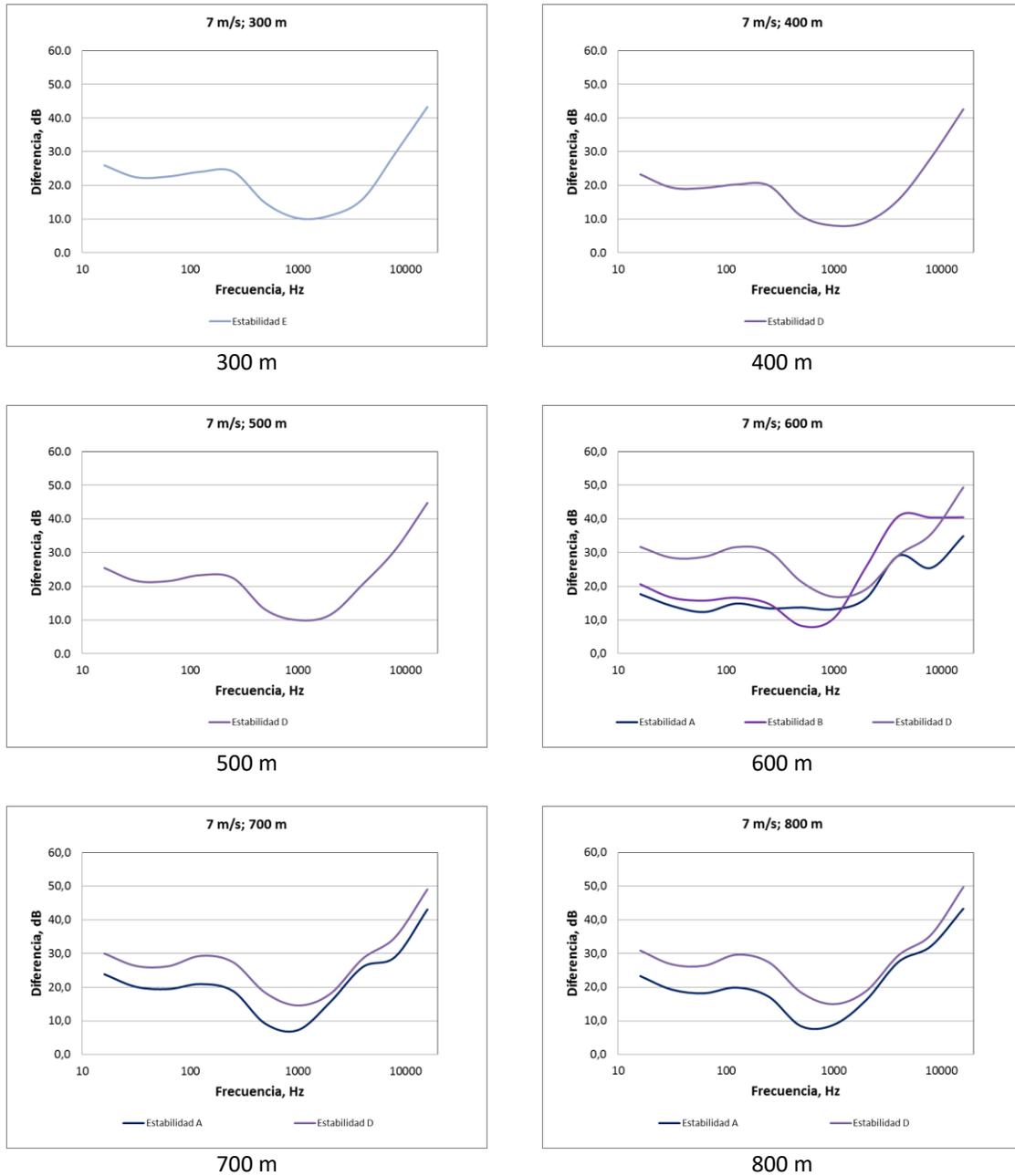
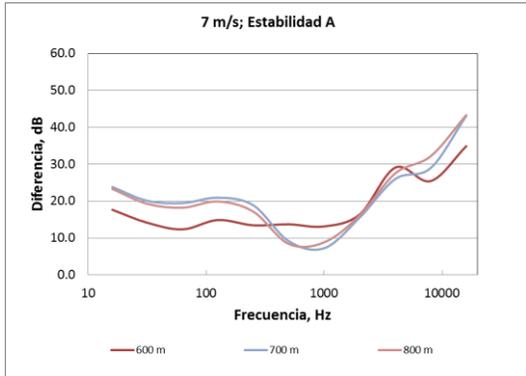
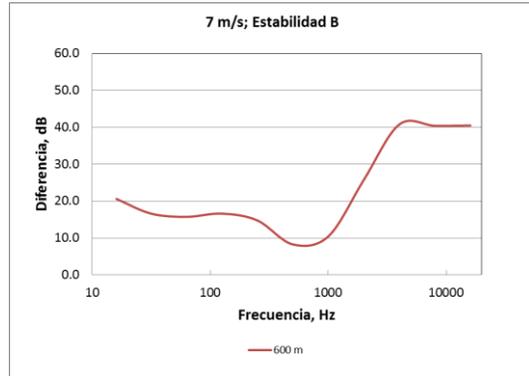


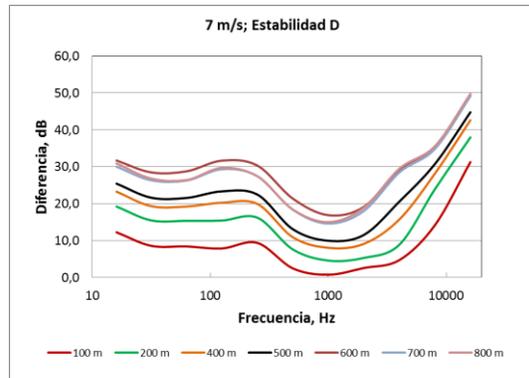
Figura C11. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 7 m/s.



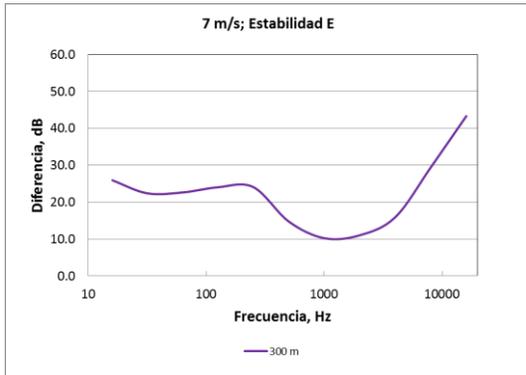
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura C12. Nivel de presión sonora residual estimado con la norma ISO 9613 Parte 2 para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.





## **ANEXO D**

### **COMPORTAMIENTO DE LA PROPAGACIÓN DE LA EMISIÓN DE RUIDO DE LOS AEROGENERADORES**





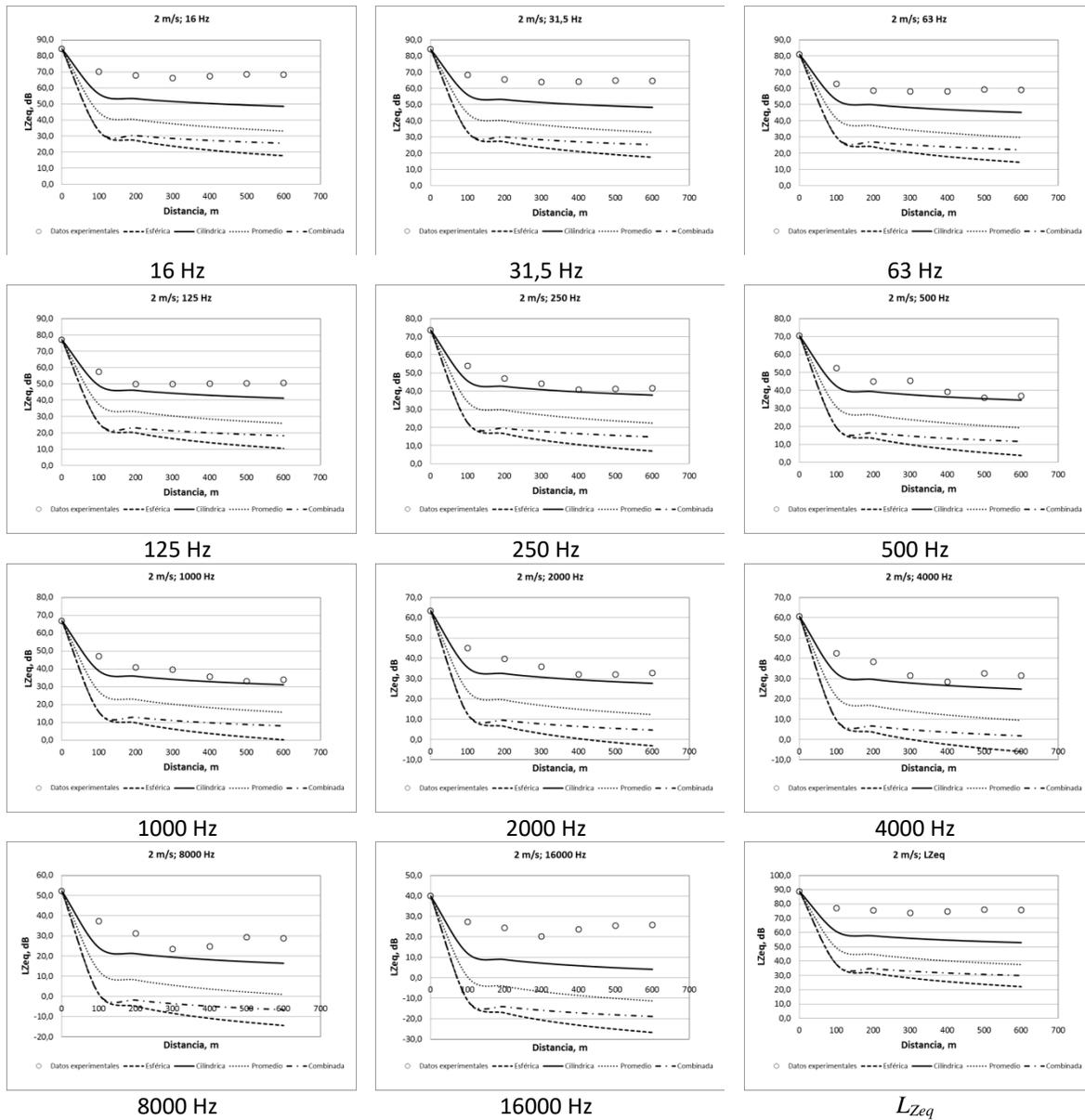


Figura D1. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 2 m/s.

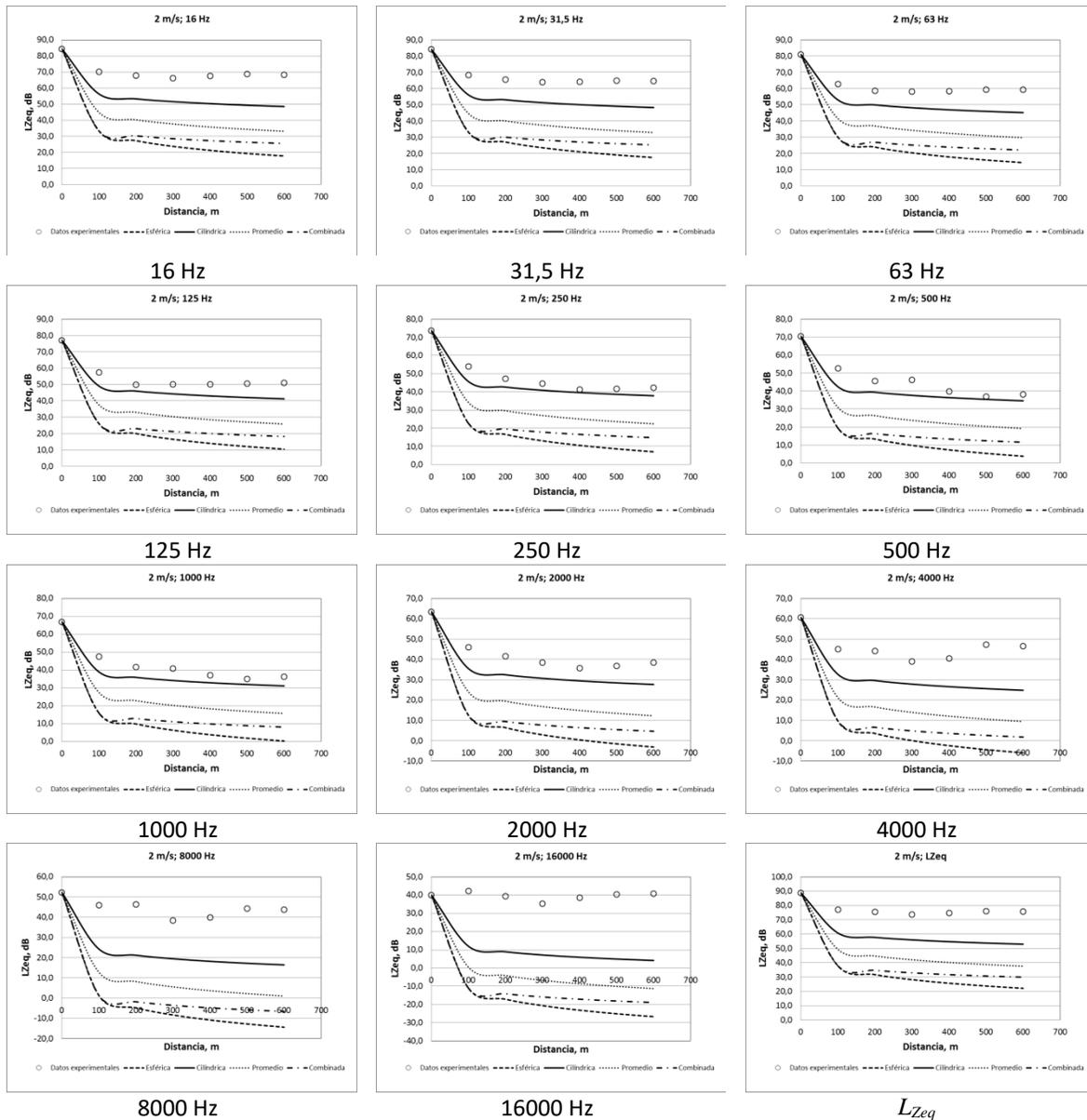


Figura D2. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 2 m/s.

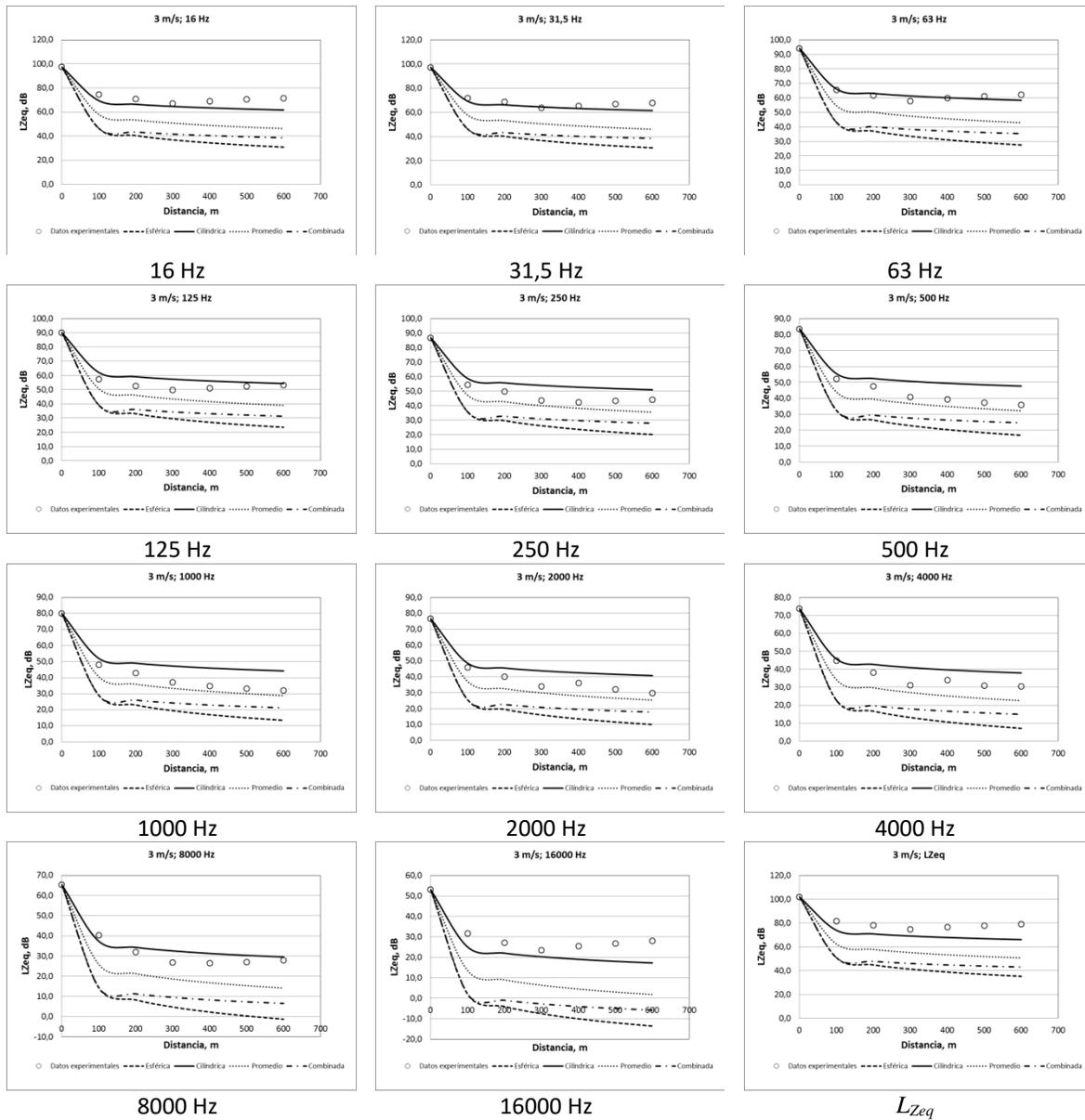


Figura D3. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 3 m/s.

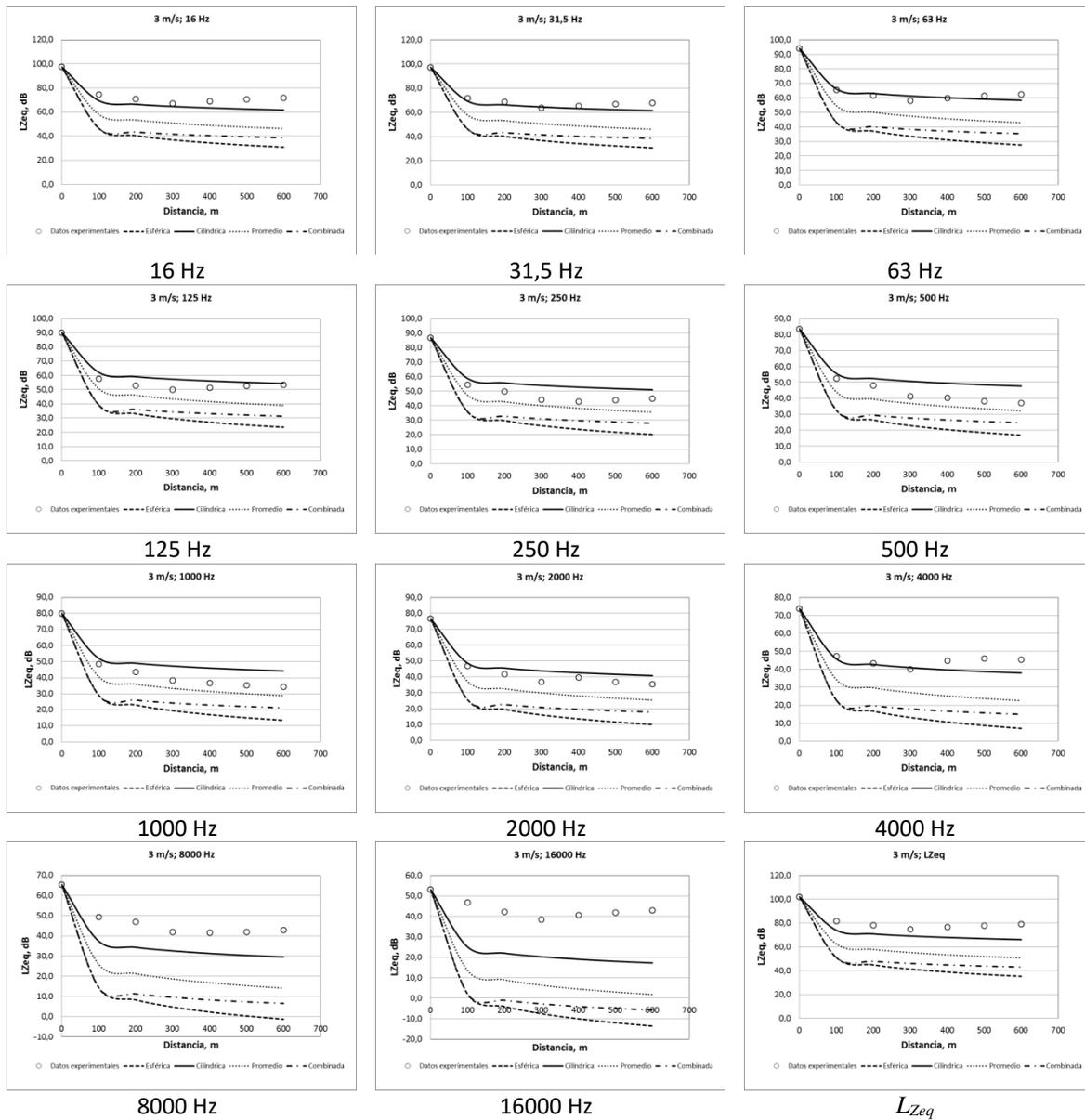


Figura D4. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 3 m/s.

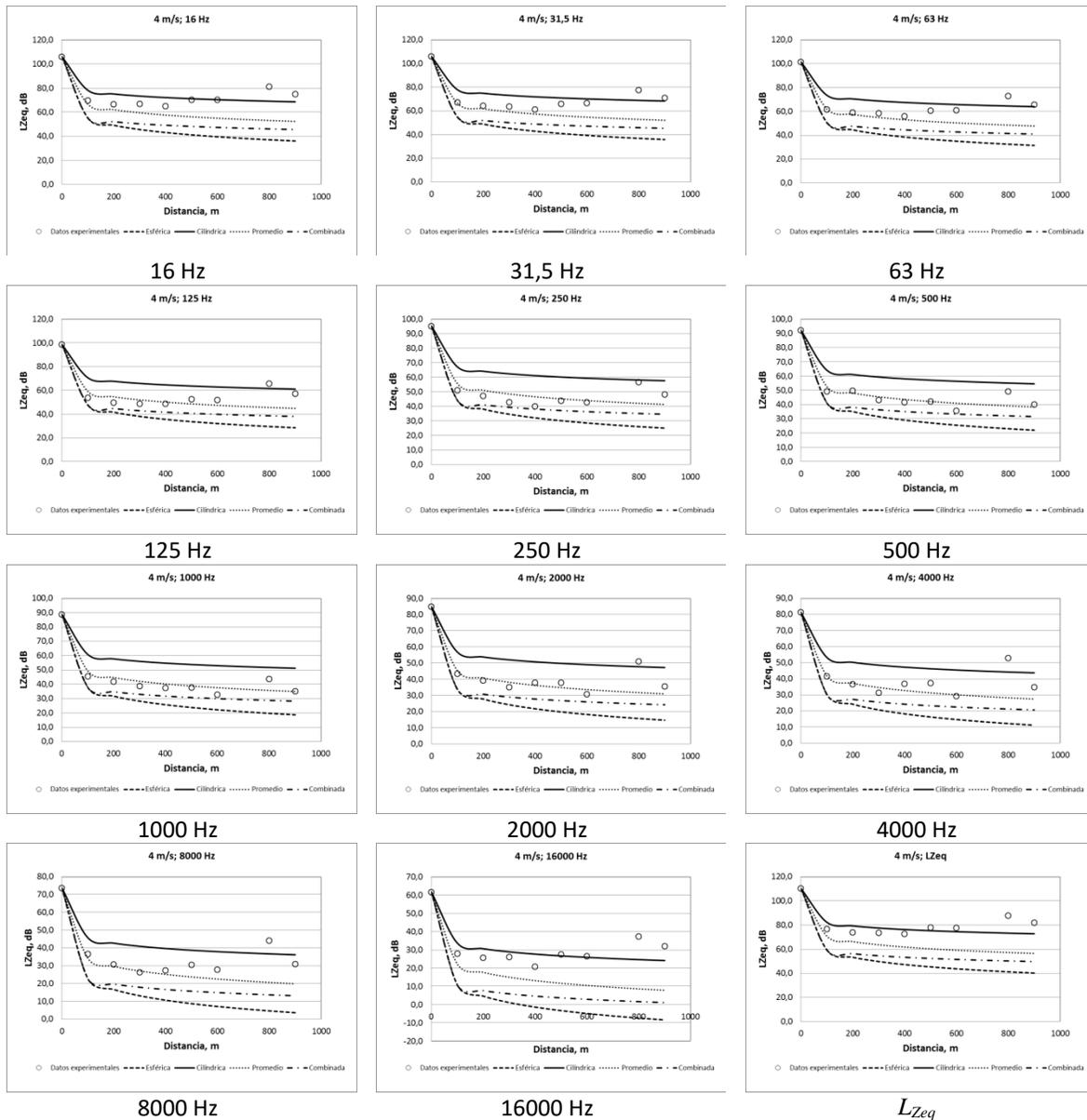


Figura D5. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 4 m/s.

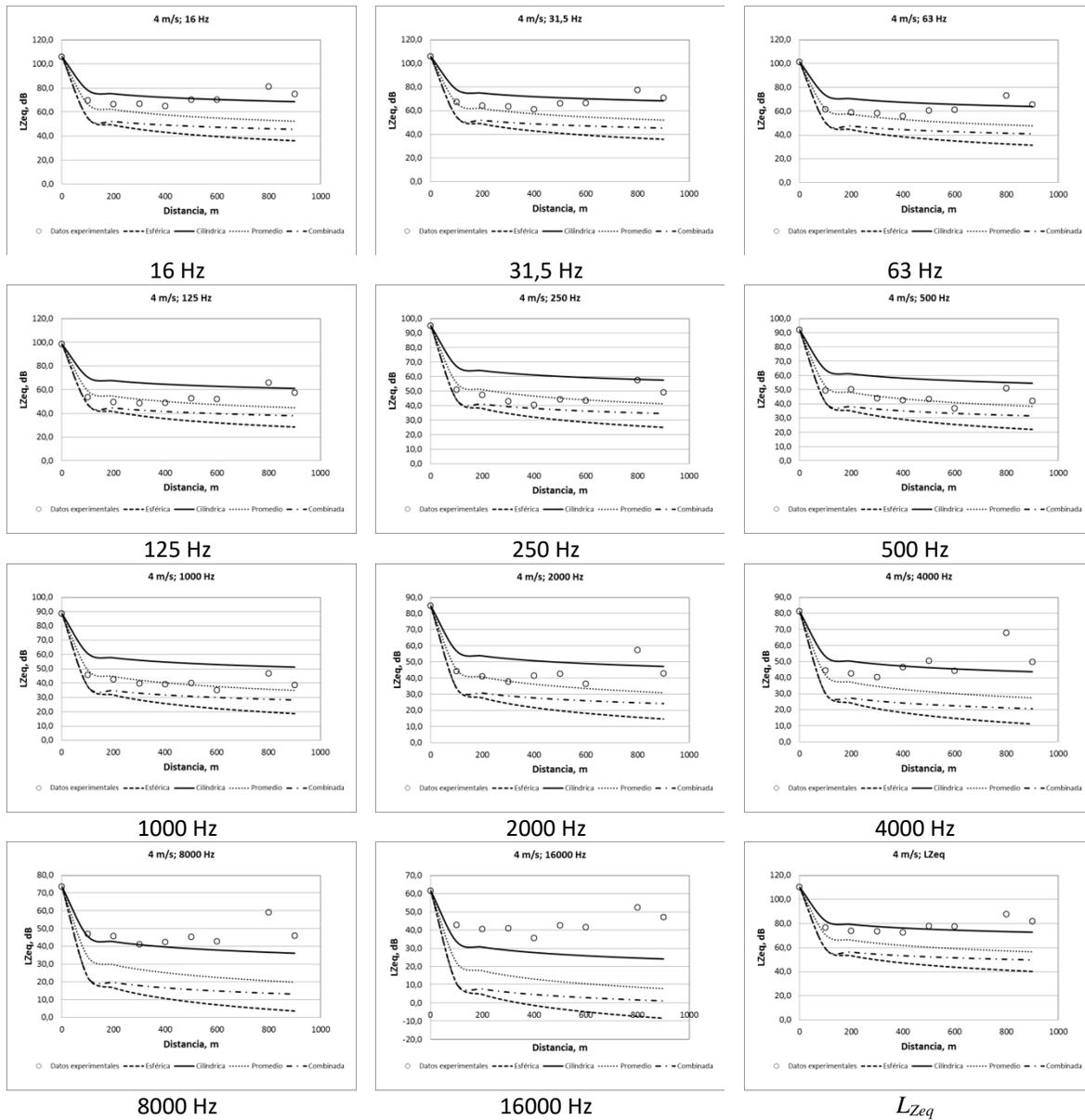
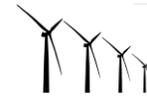


Figura D6. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 4 m/s.

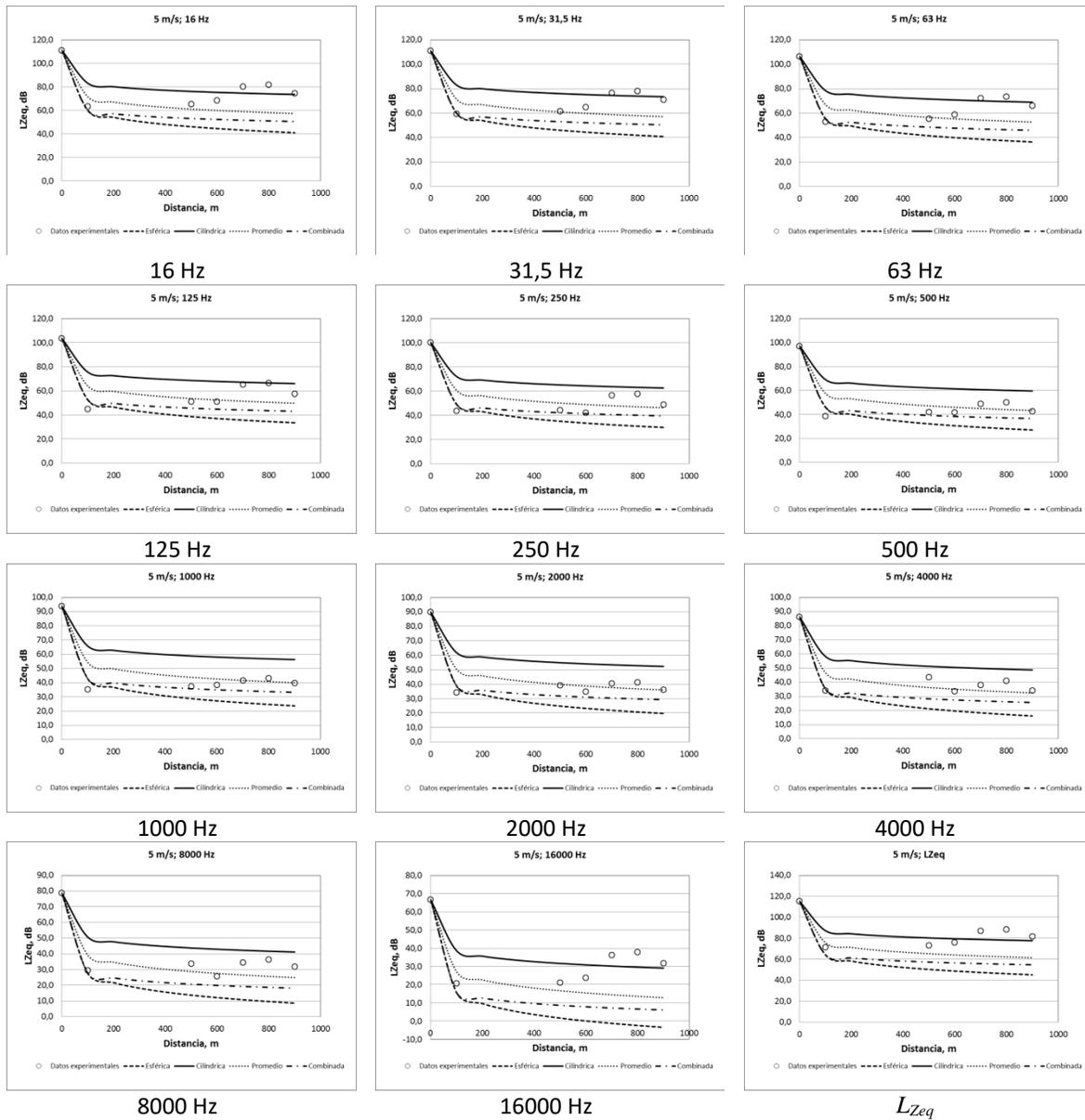


Figura D7. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 5 m/s.

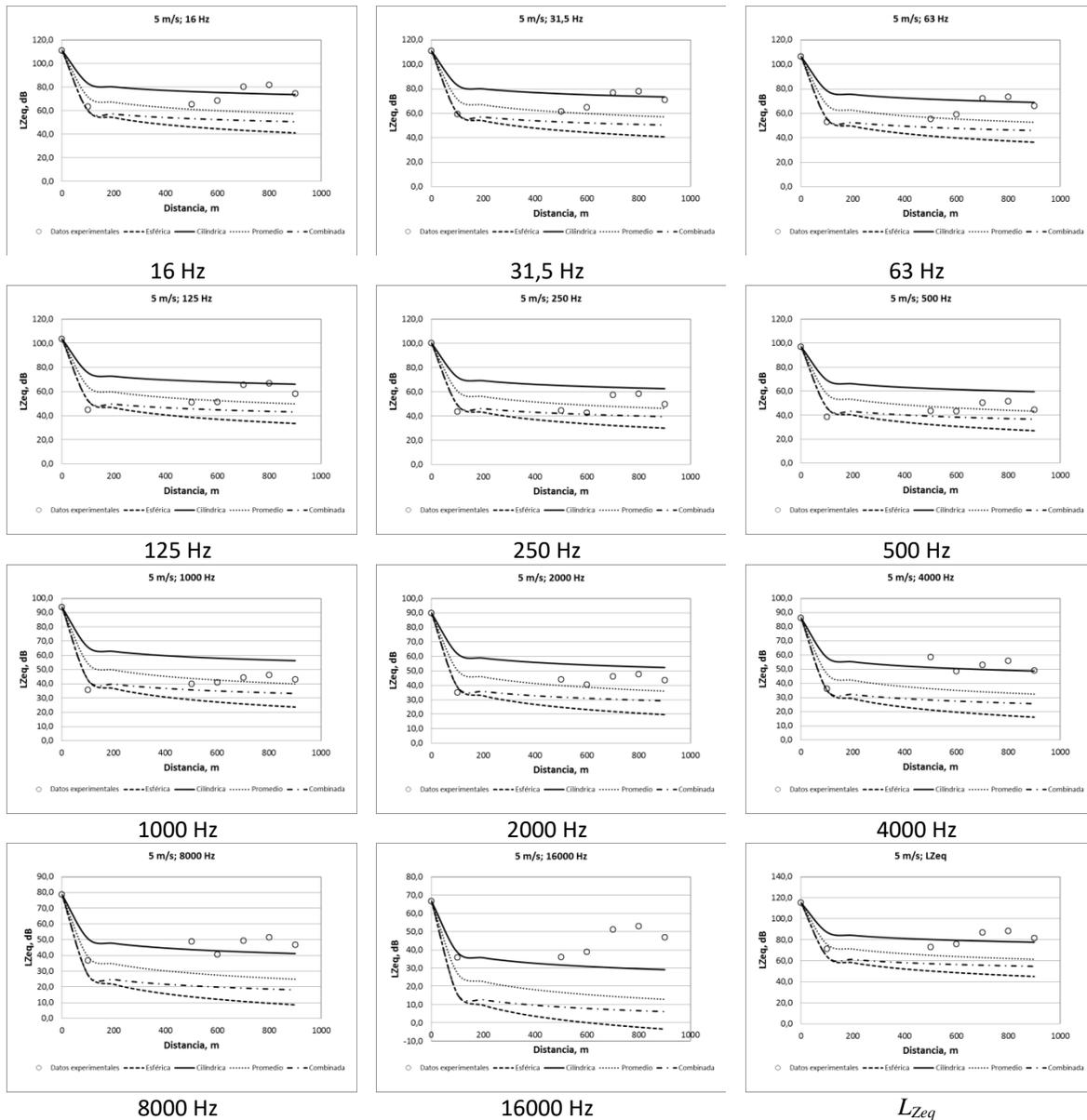


Figura D8. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 5 m/s.

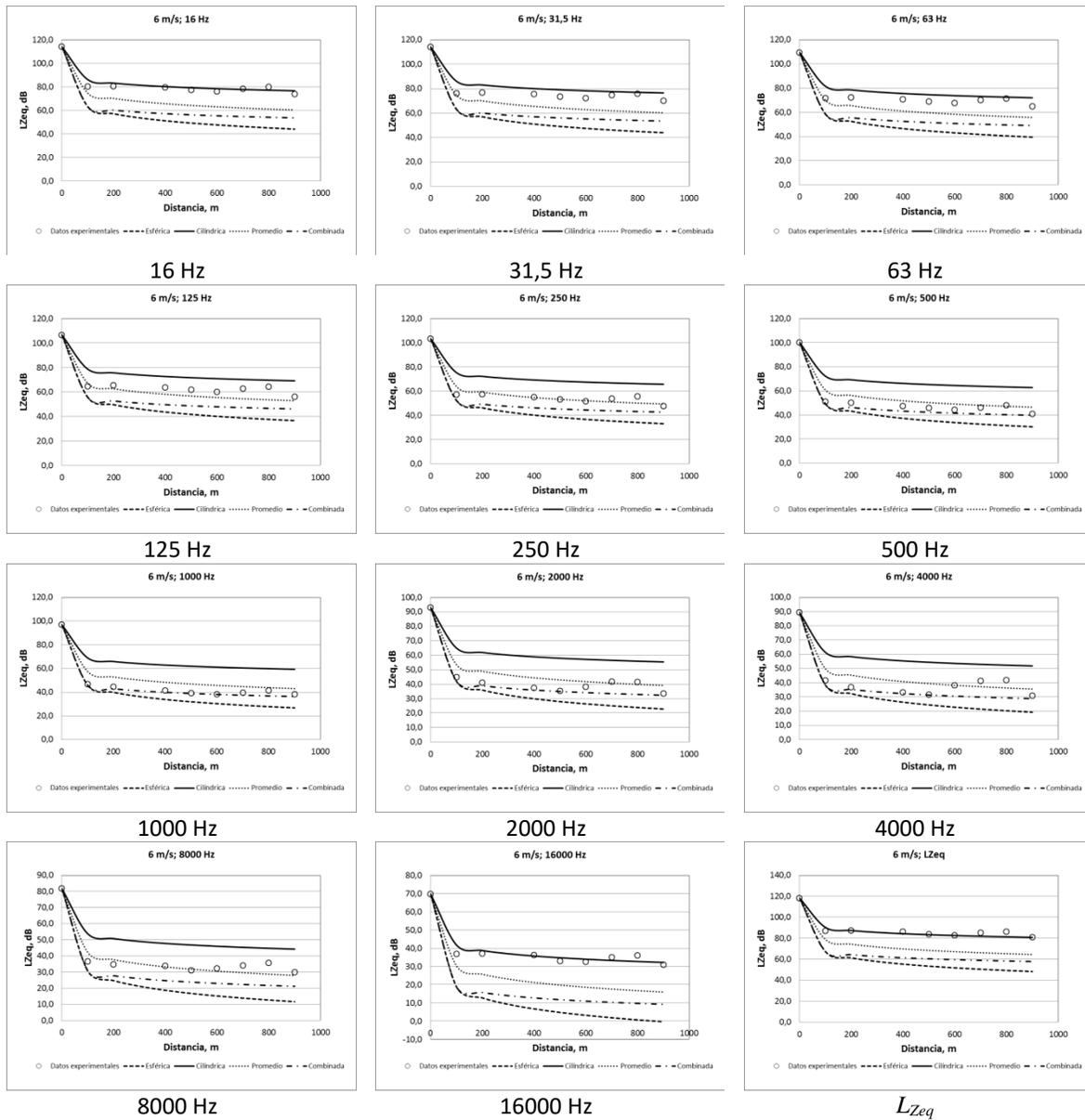


Figura D9. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 6 m/s.

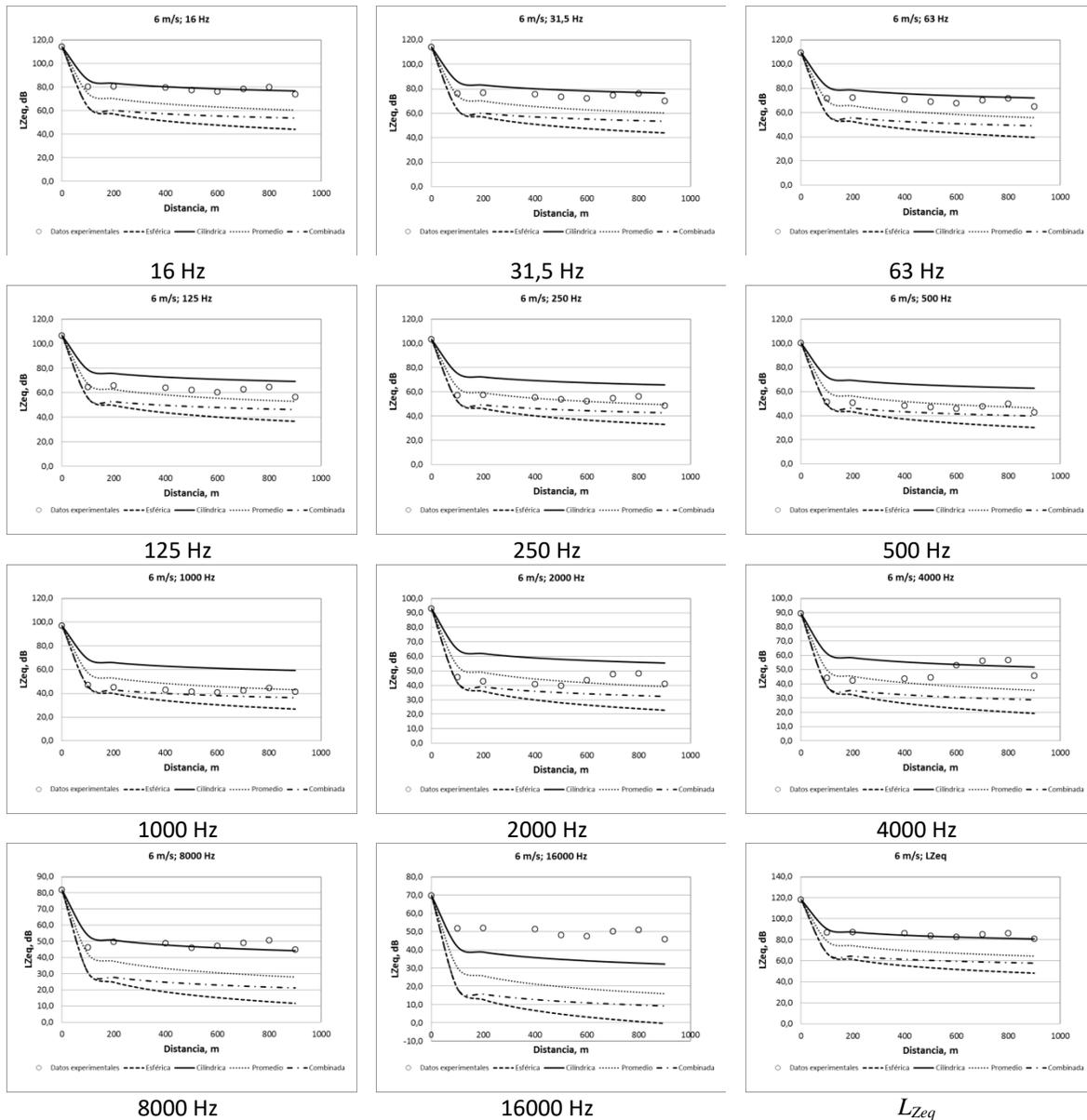
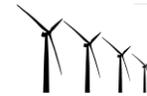


Figura D10. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 6 m/s.

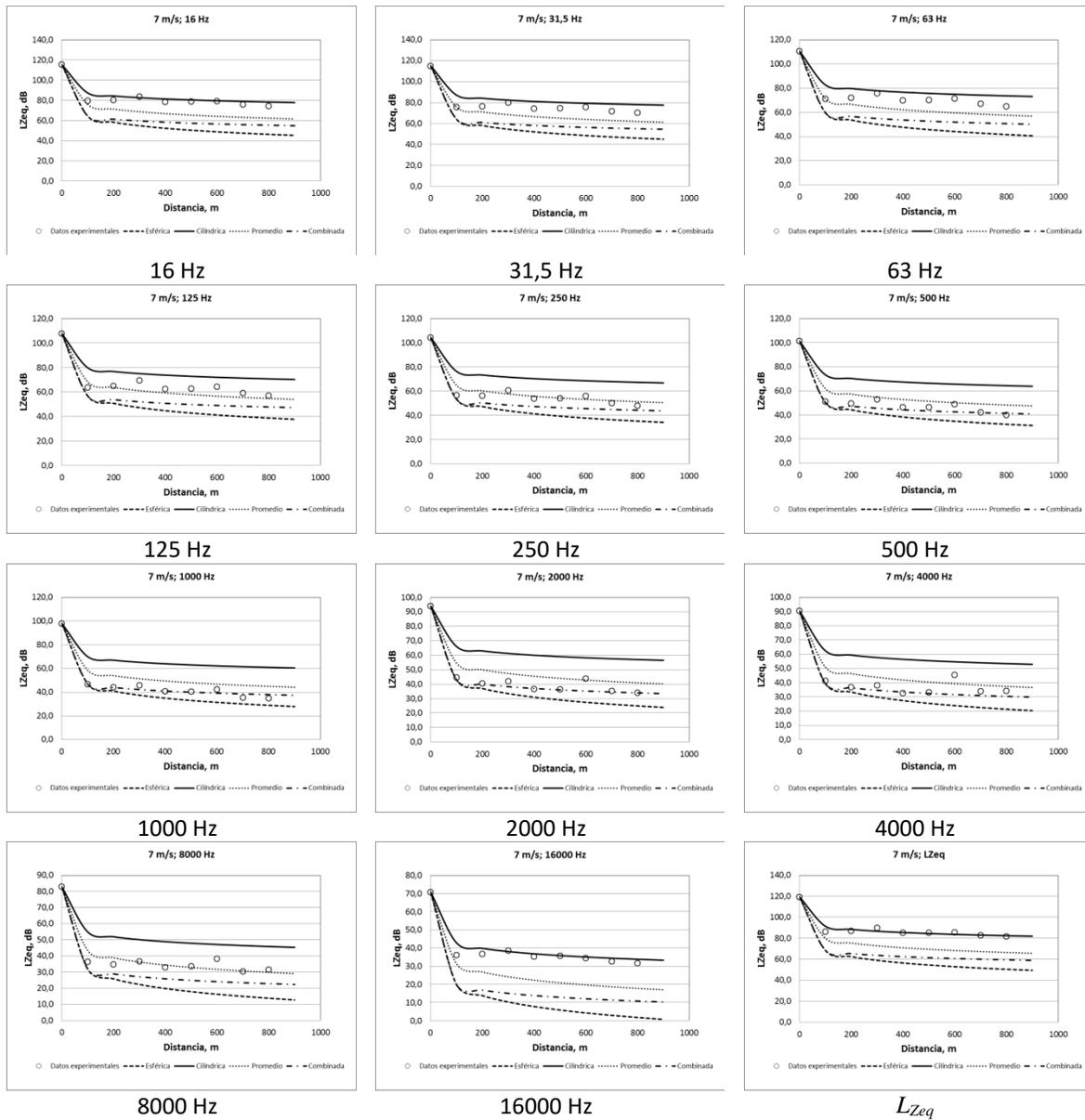


Figura D11. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 7 m/s.

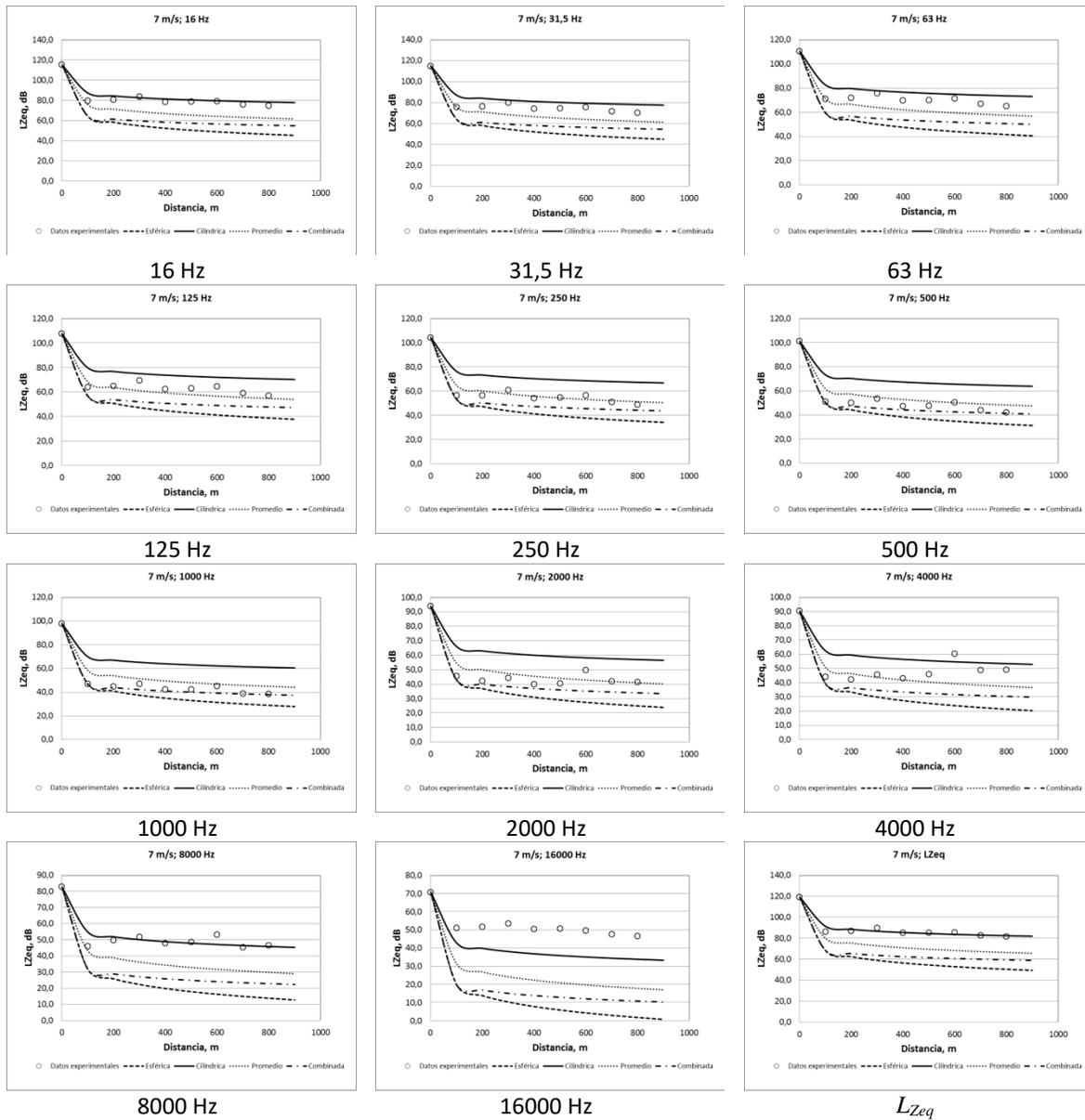
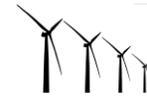


Figura D12. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 7 m/s.



## **ANEXO E**

# **COMPORTAMIENTO DE LA PROPAGACIÓN DE LA EMISIÓN DE RUIDO DE LOS AEROGENERADORES DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA**





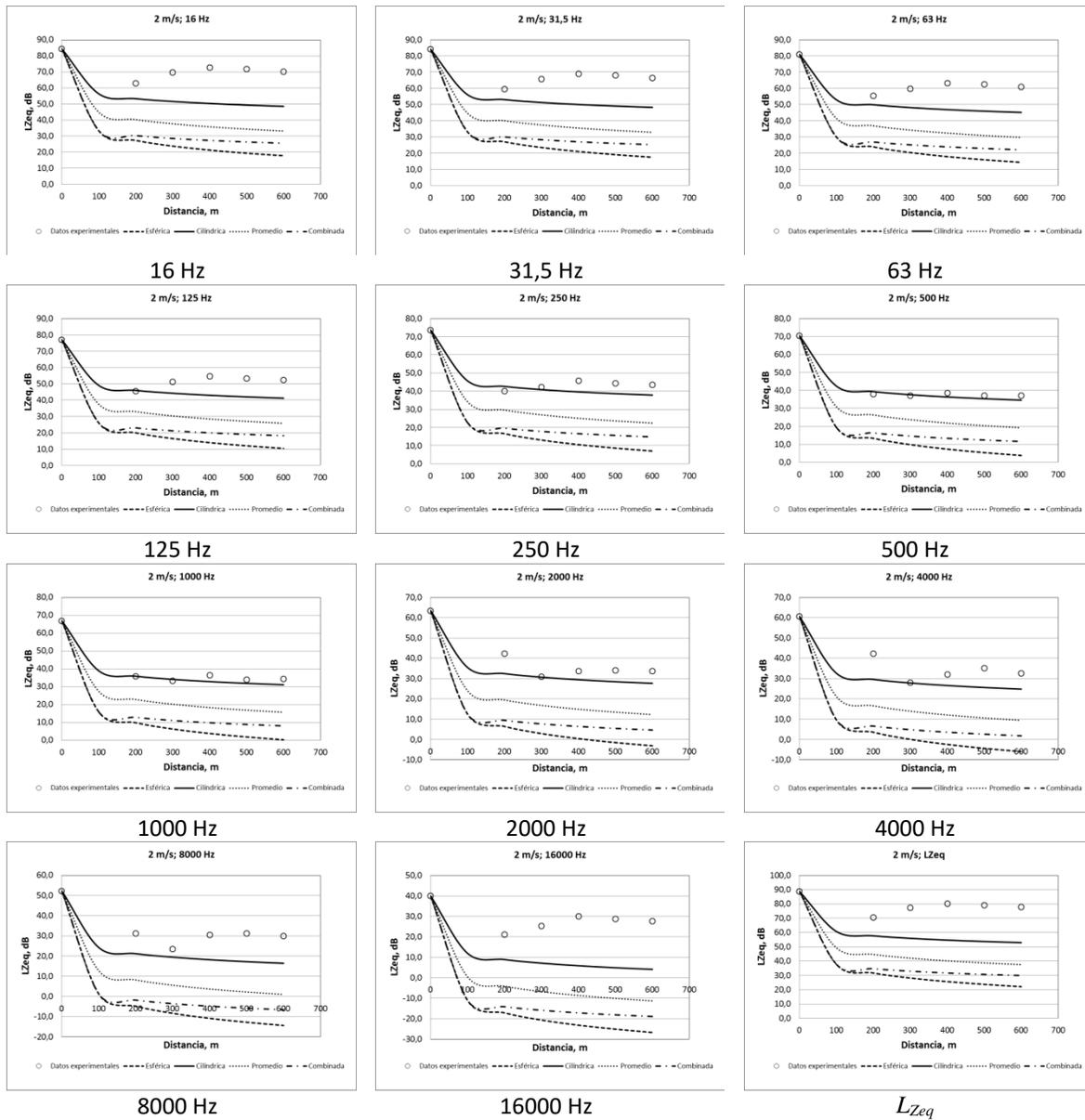


Figura E1. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 2 m/s y estabilidad A.

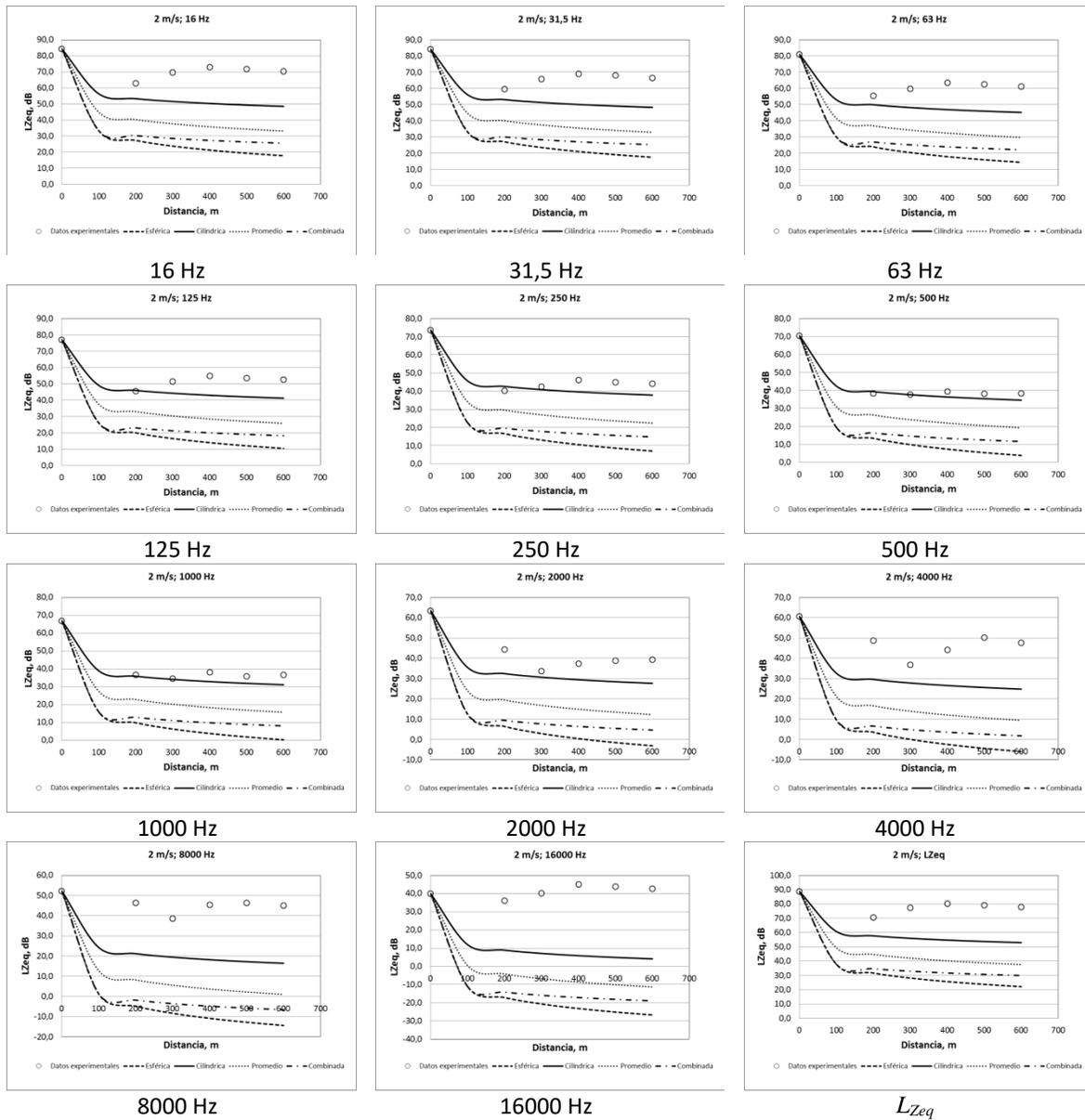


Figura E2. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 2 m/s y estabilidad A.

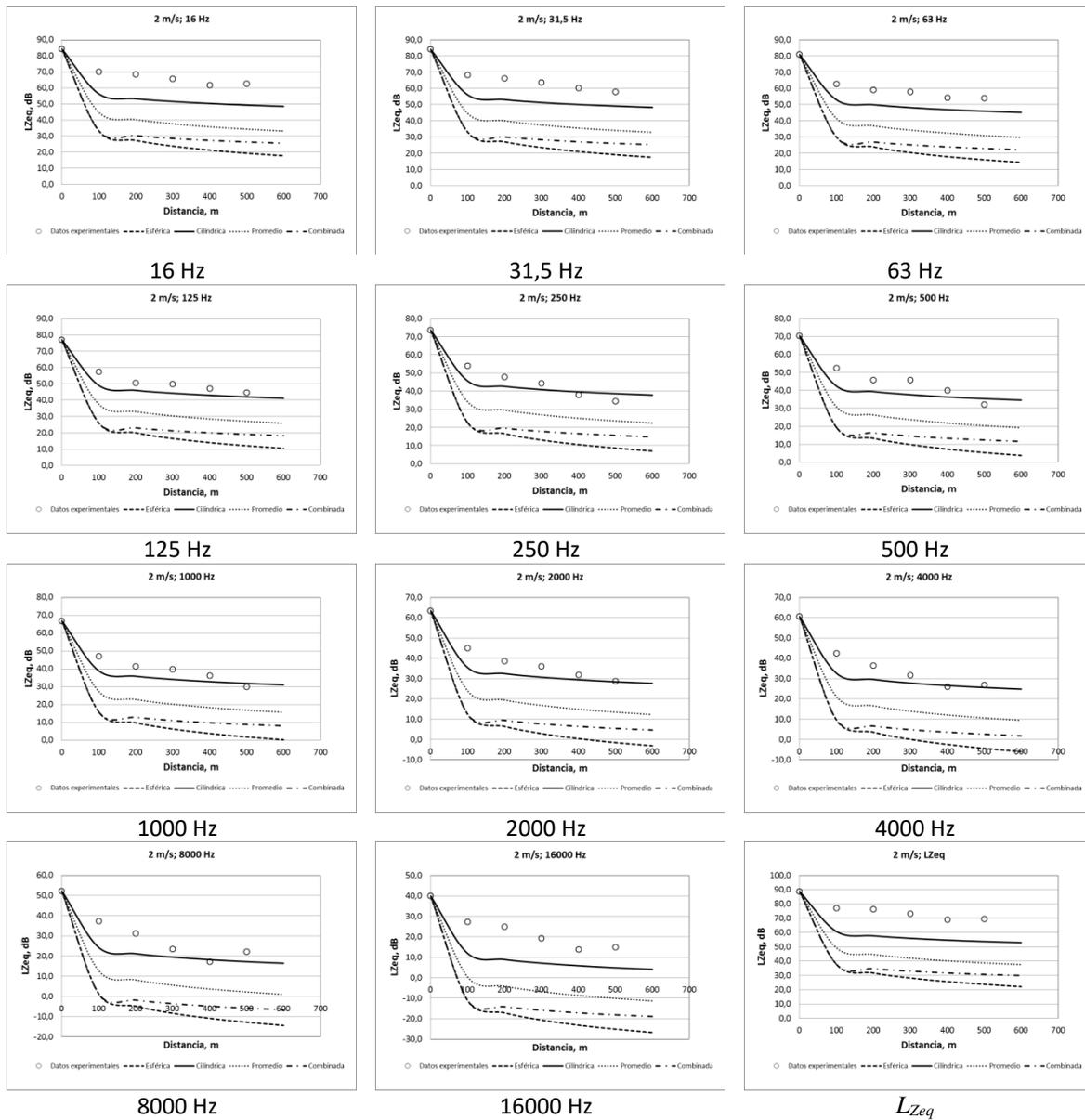


Figura E3. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 2 m/s y estabilidad F.

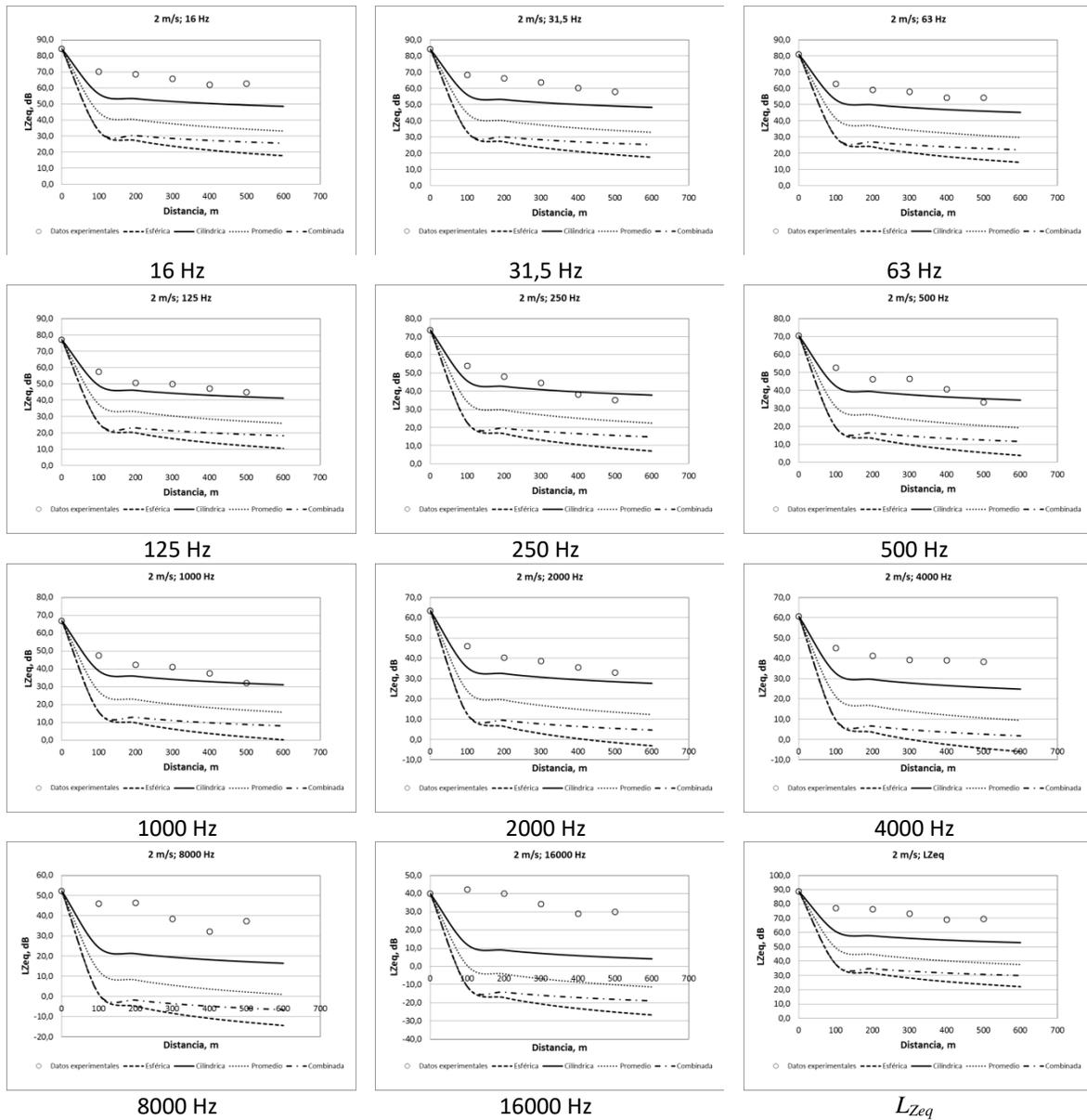


Figura E4. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 2 m/s y estabilidad F.

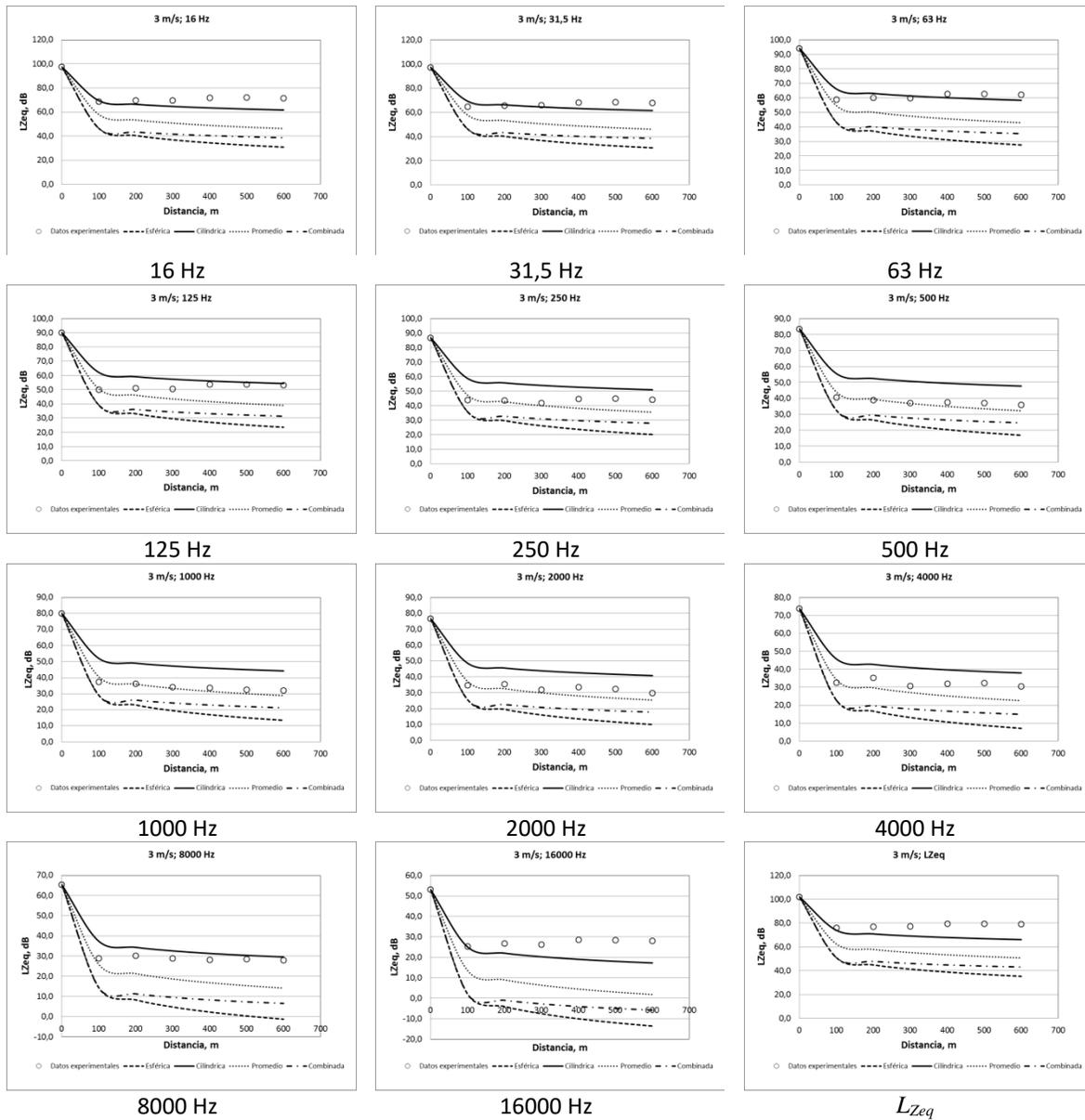


Figura E5. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 3 m/s y estabilidad A.

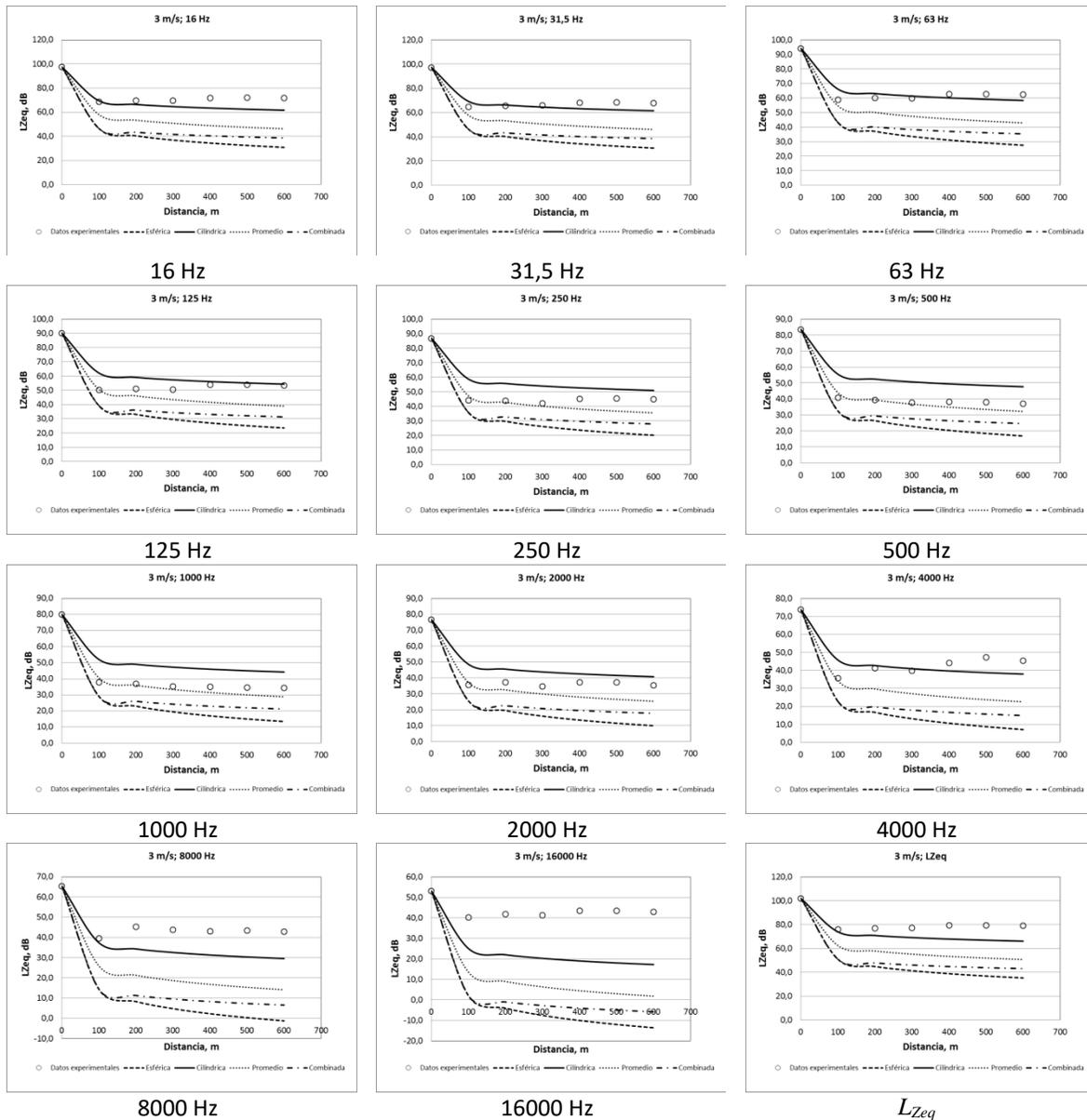


Figura E6. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 3 m/s y estabilidad A.

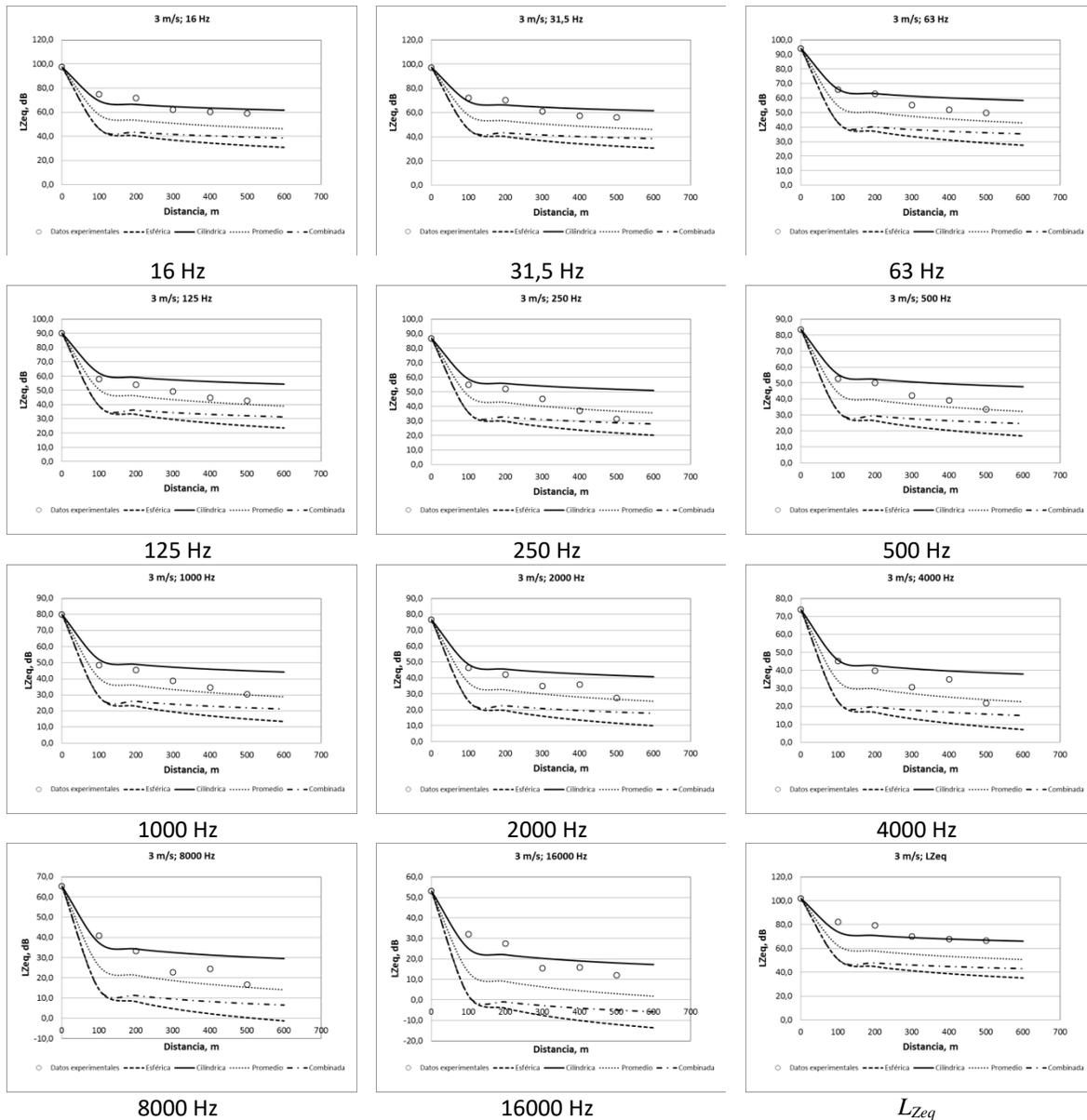


Figura E7. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 3 m/s y estabilidad F.

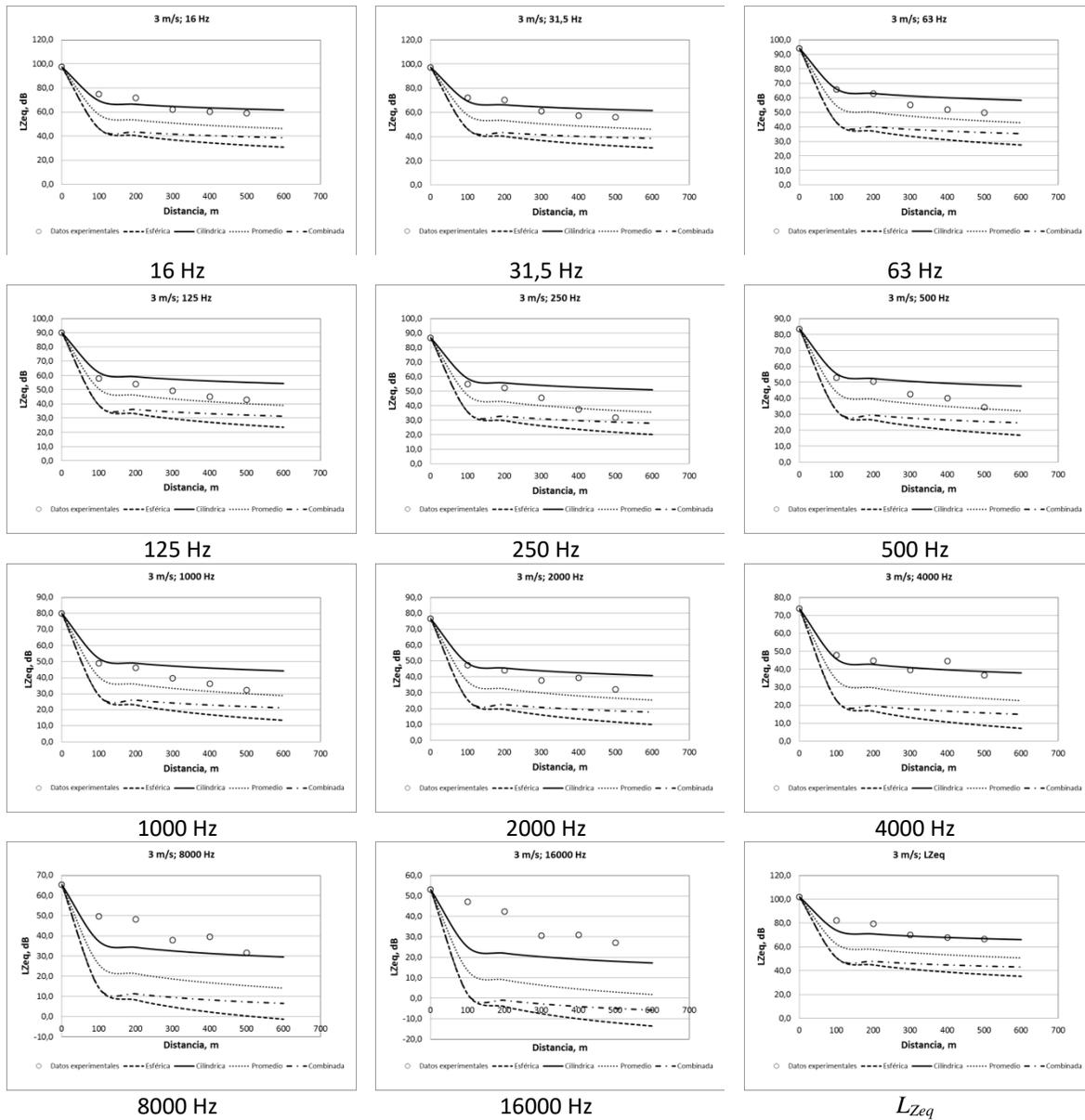


Figura E8. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 3 m/s y estabilidad F.

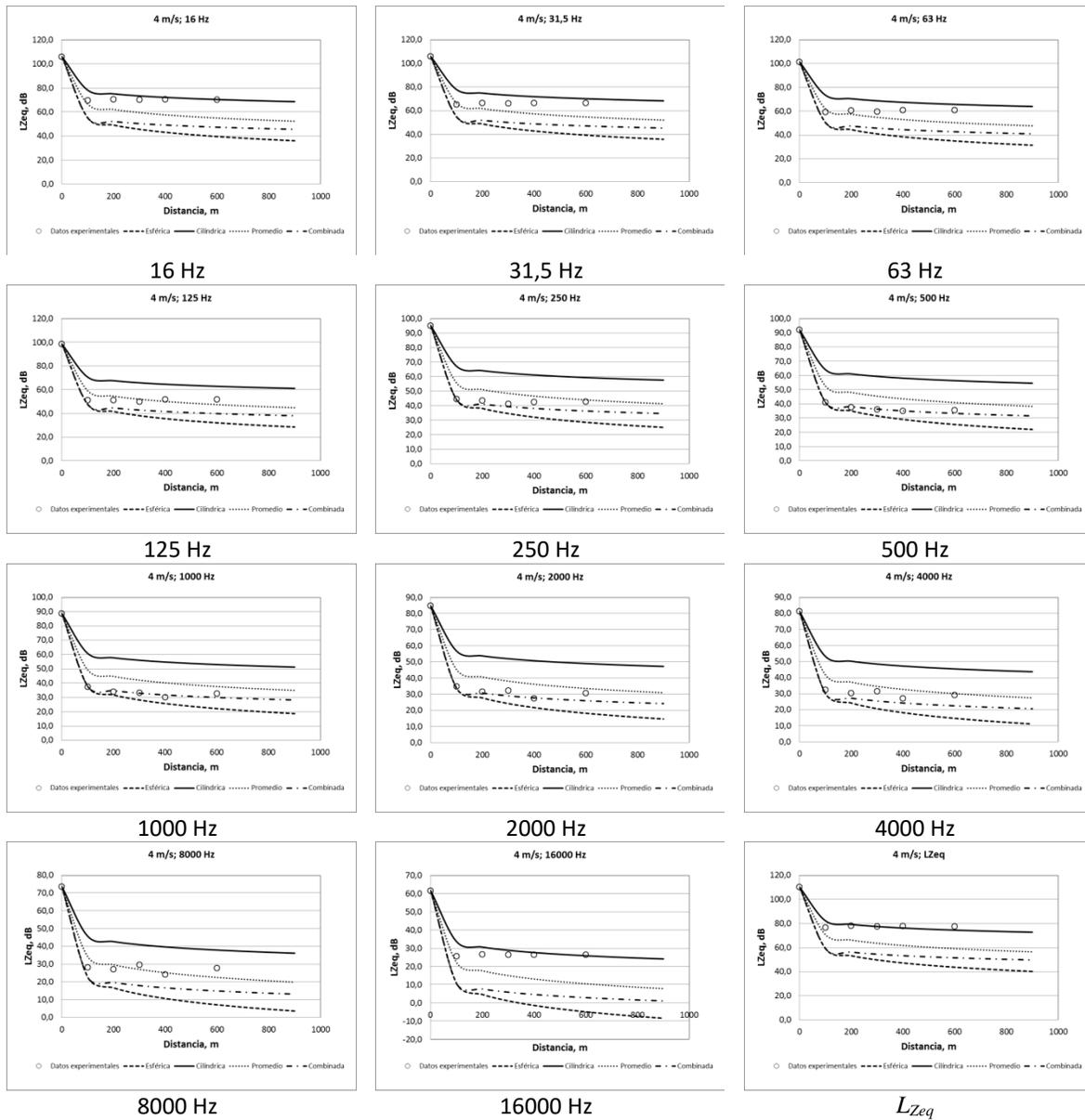
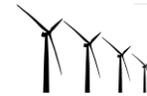


Figura E9. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad A.

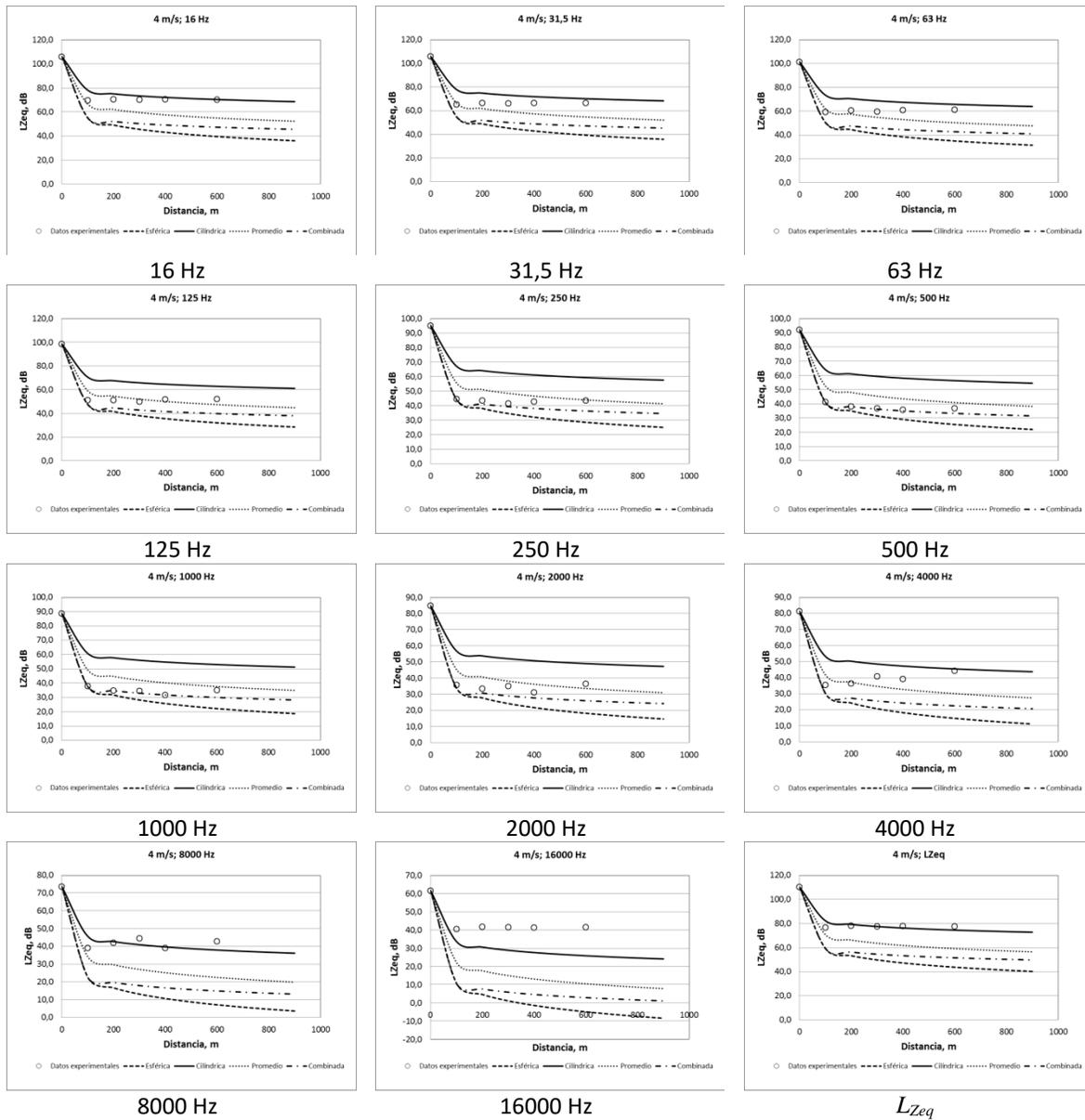
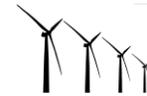


Figura E10. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad A.

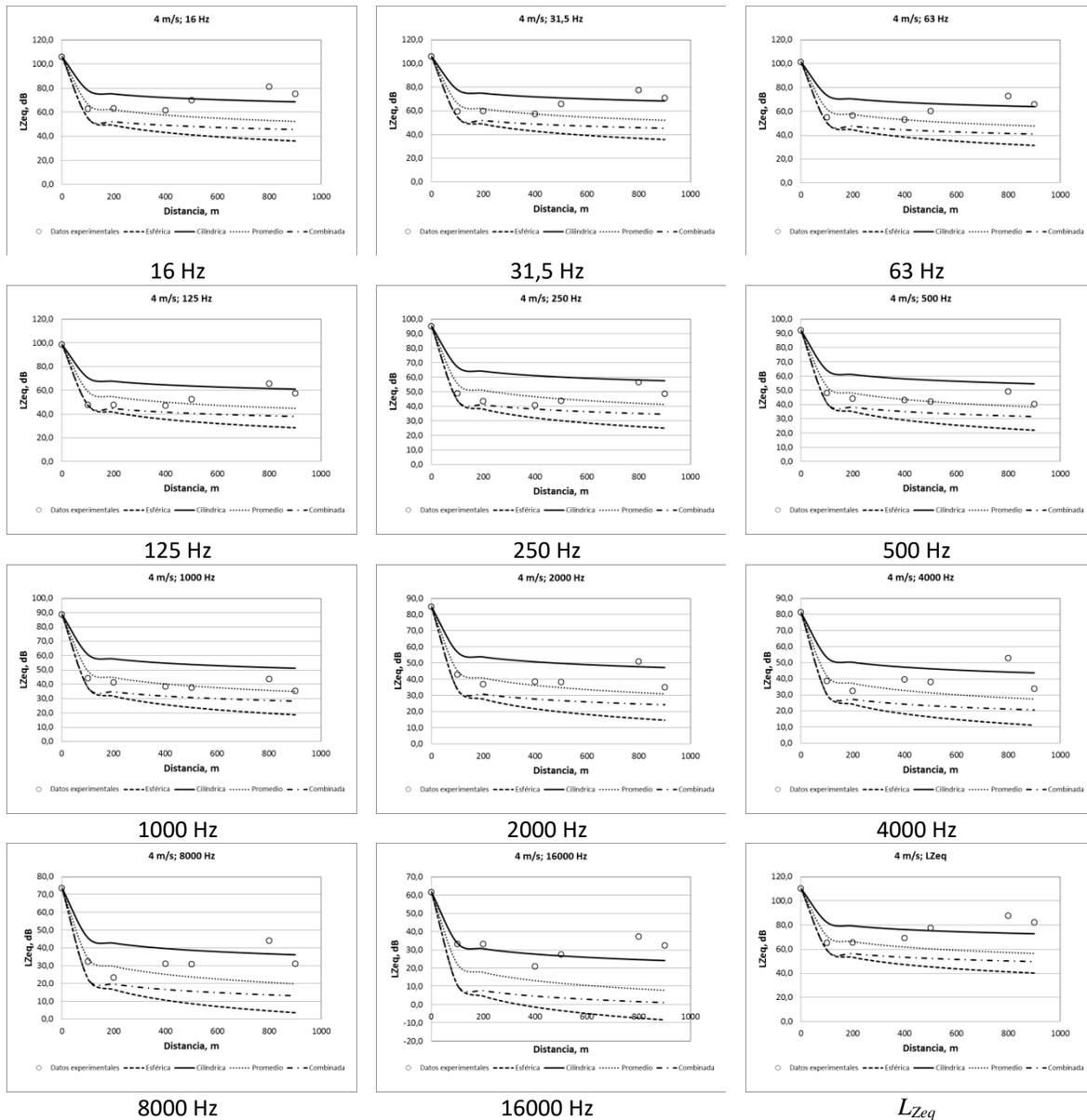
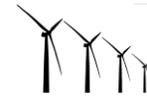


Figura E11. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad D.

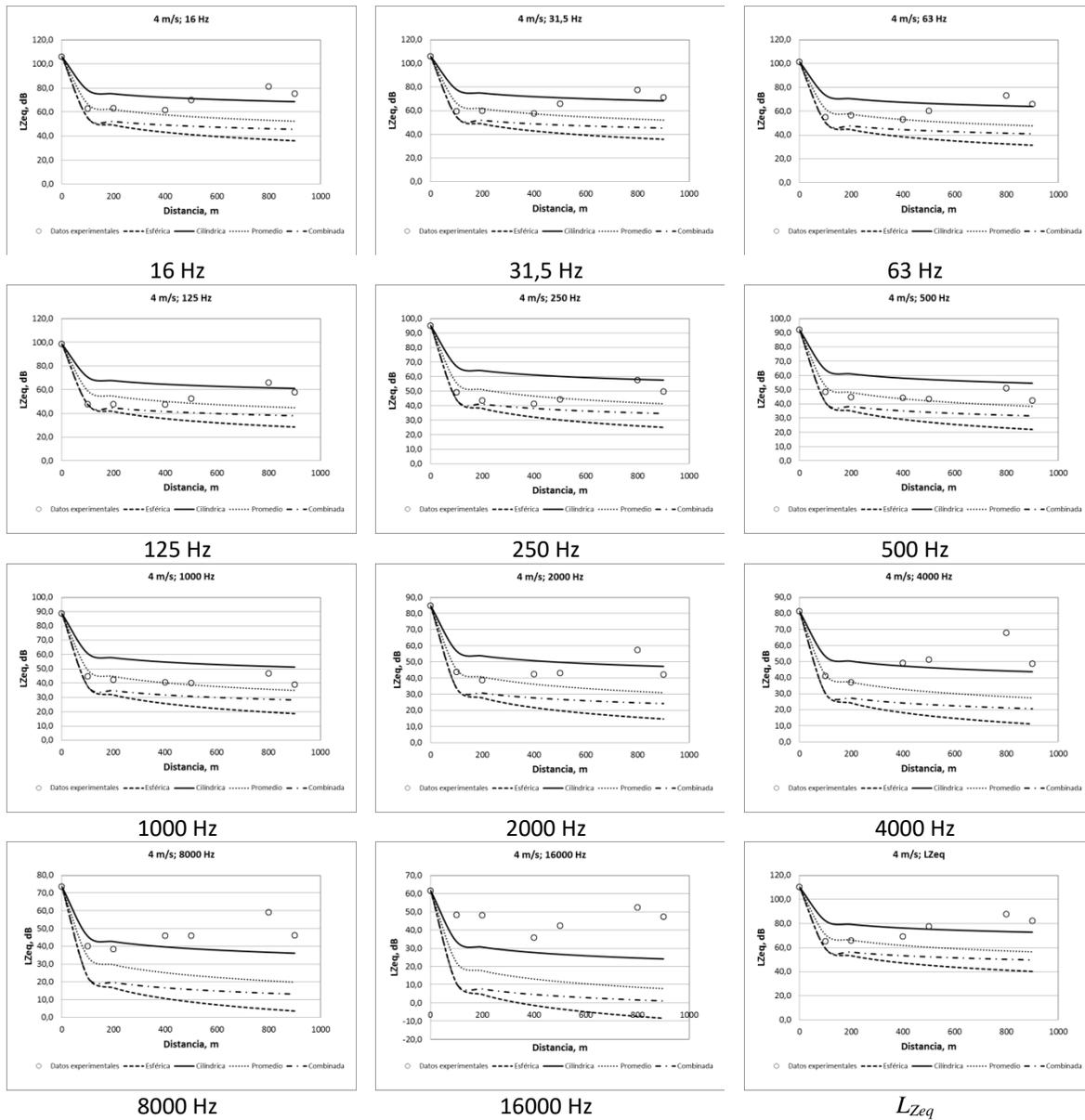
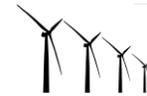


Figura E12. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad D.

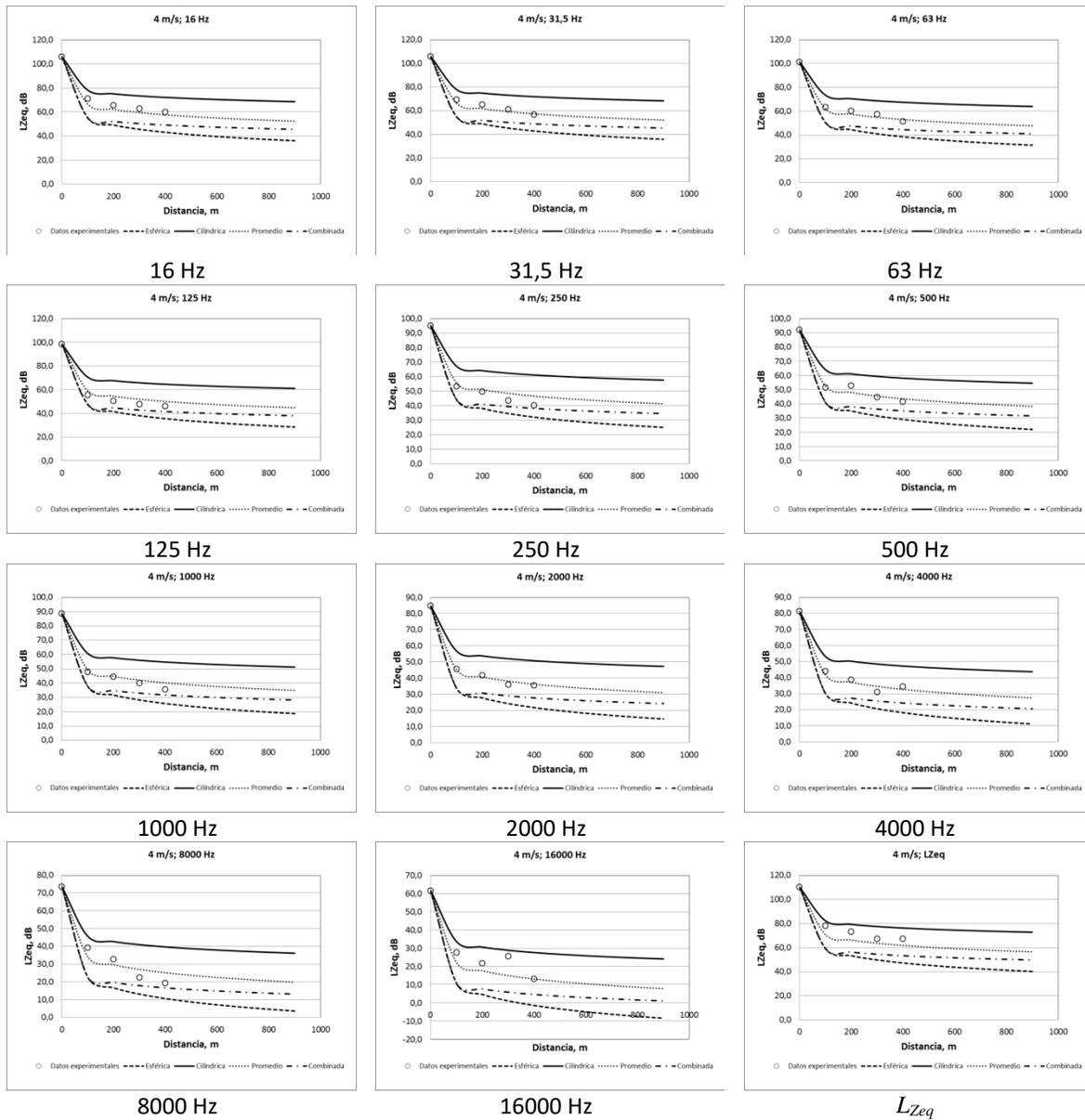


Figura E13. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad F.

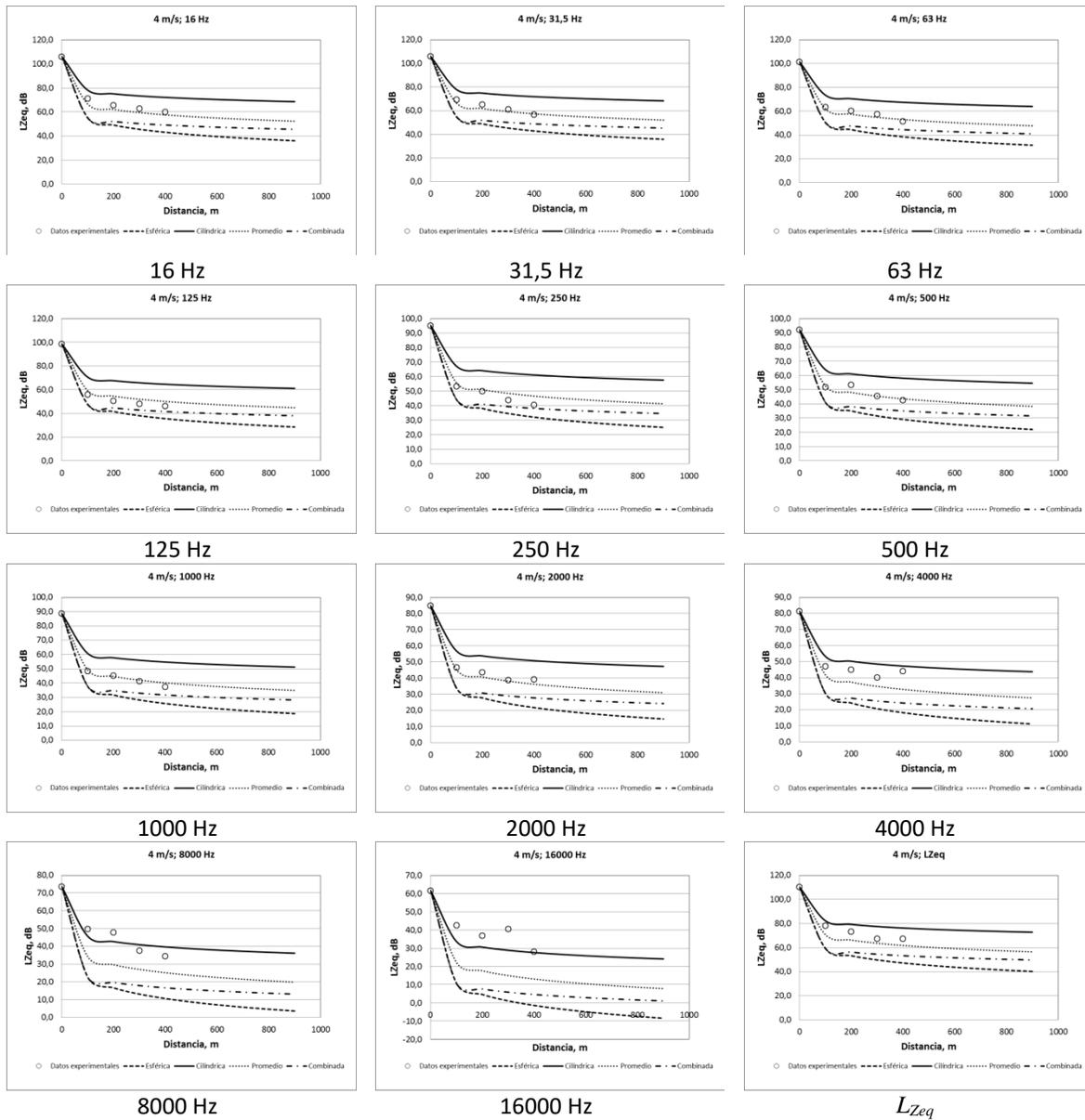
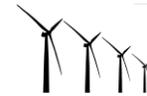


Figura E14. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 4 m/s y estabilidad F.

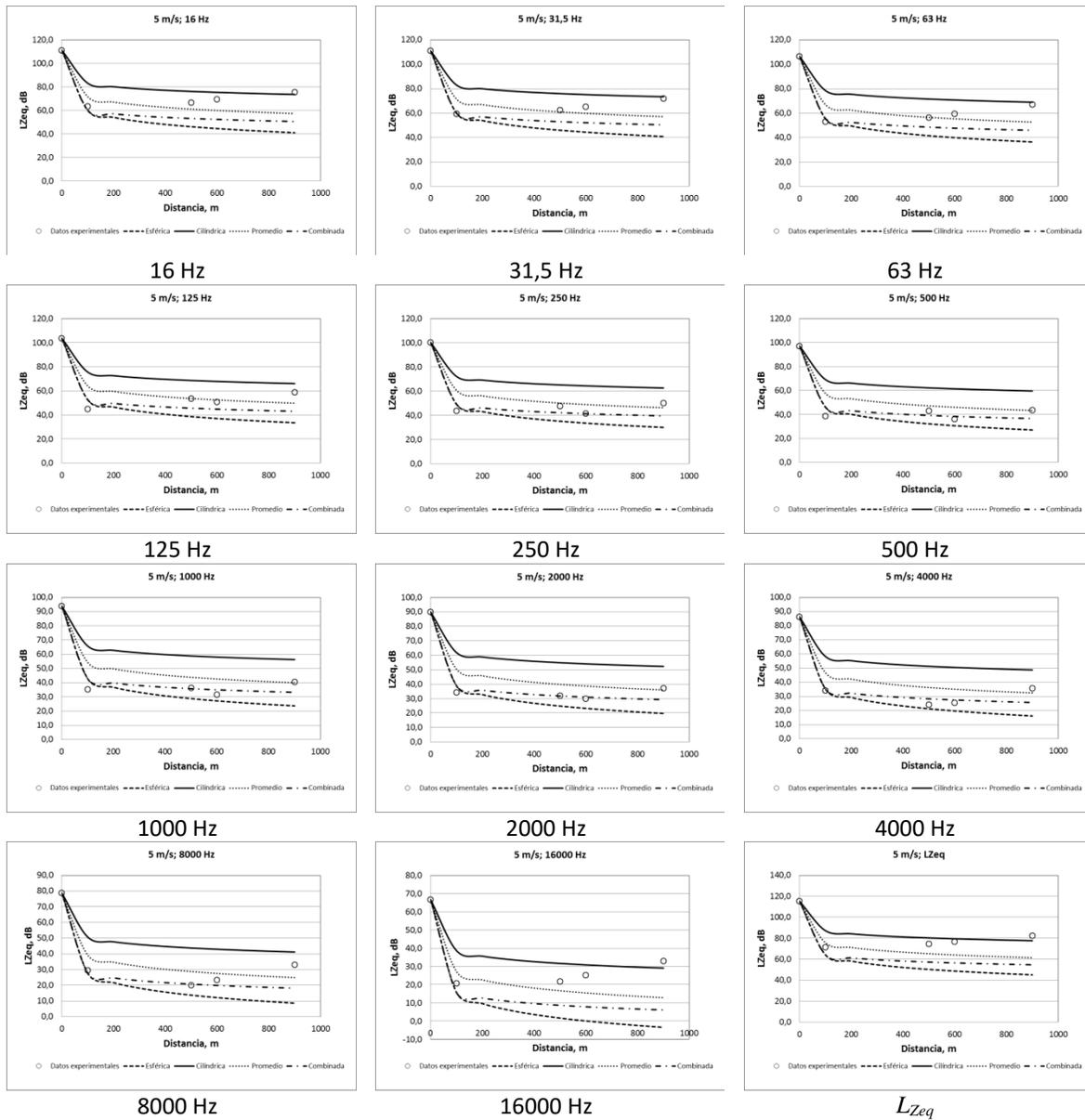
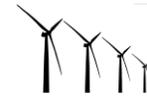


Figura E15. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 5 m/s y estabilidad B.

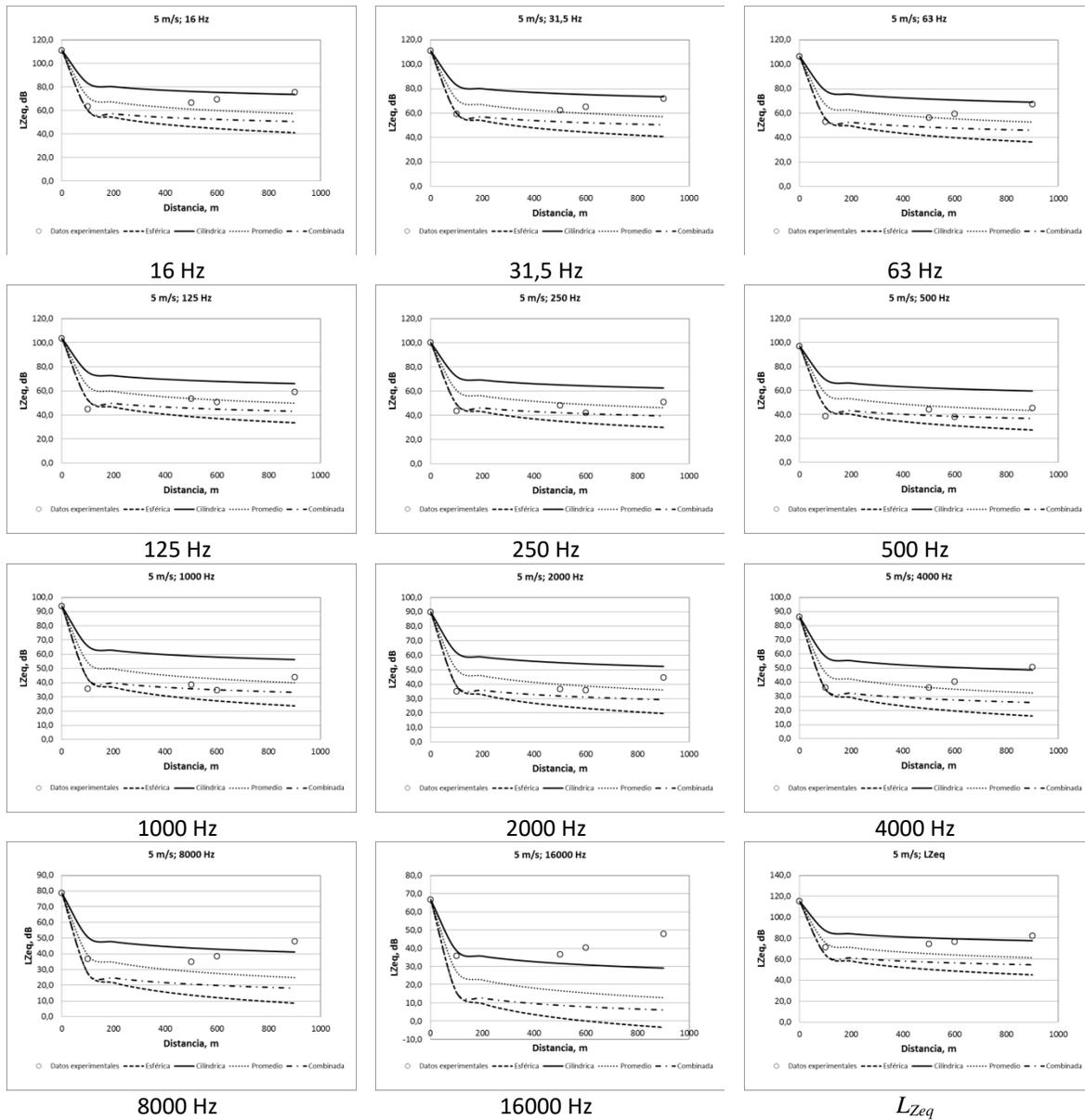
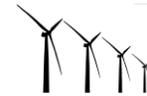


Figura E16. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 5 m/s y estabilidad B.

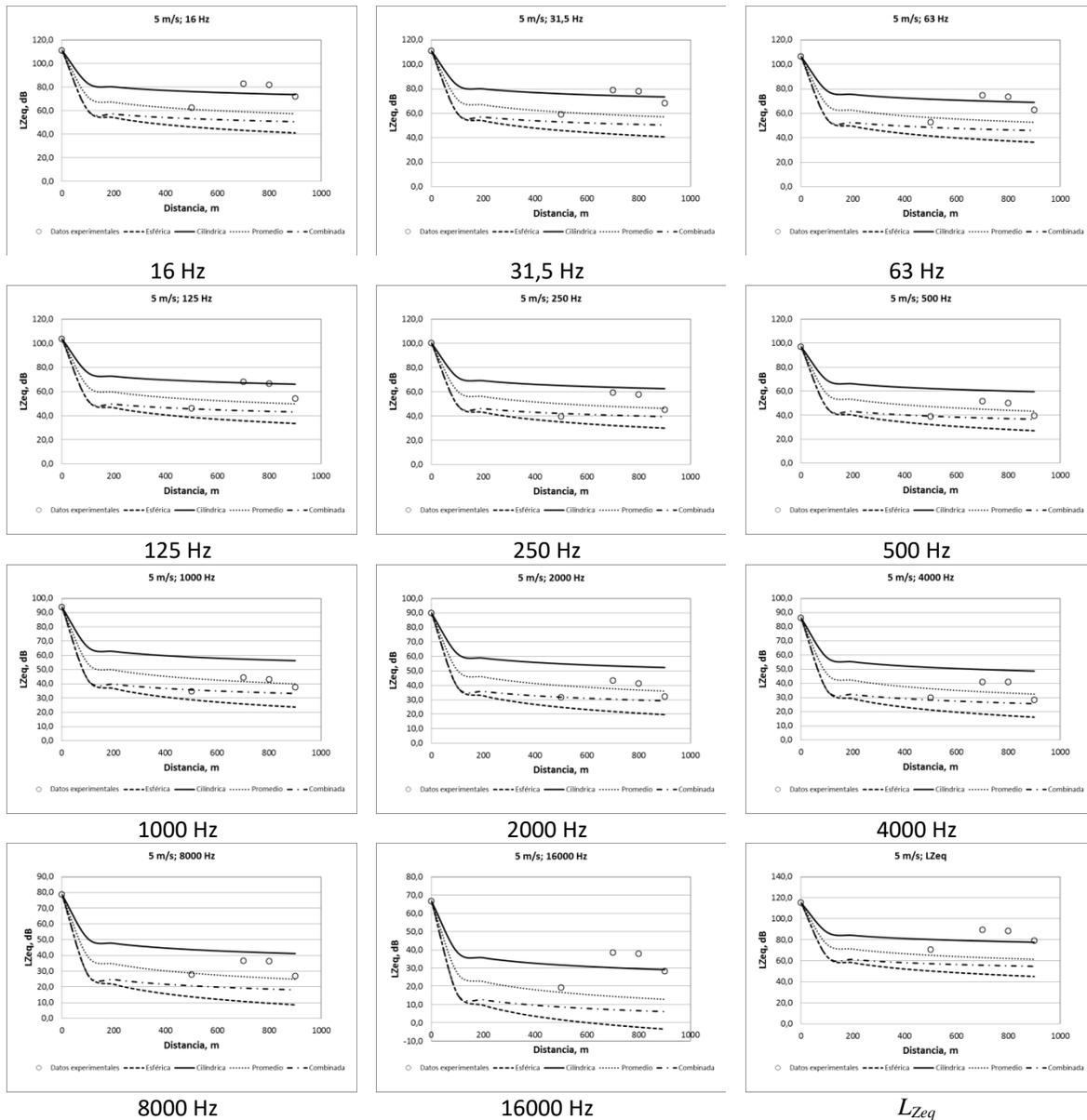


Figura E17. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 5 m/s y estabilidad D.

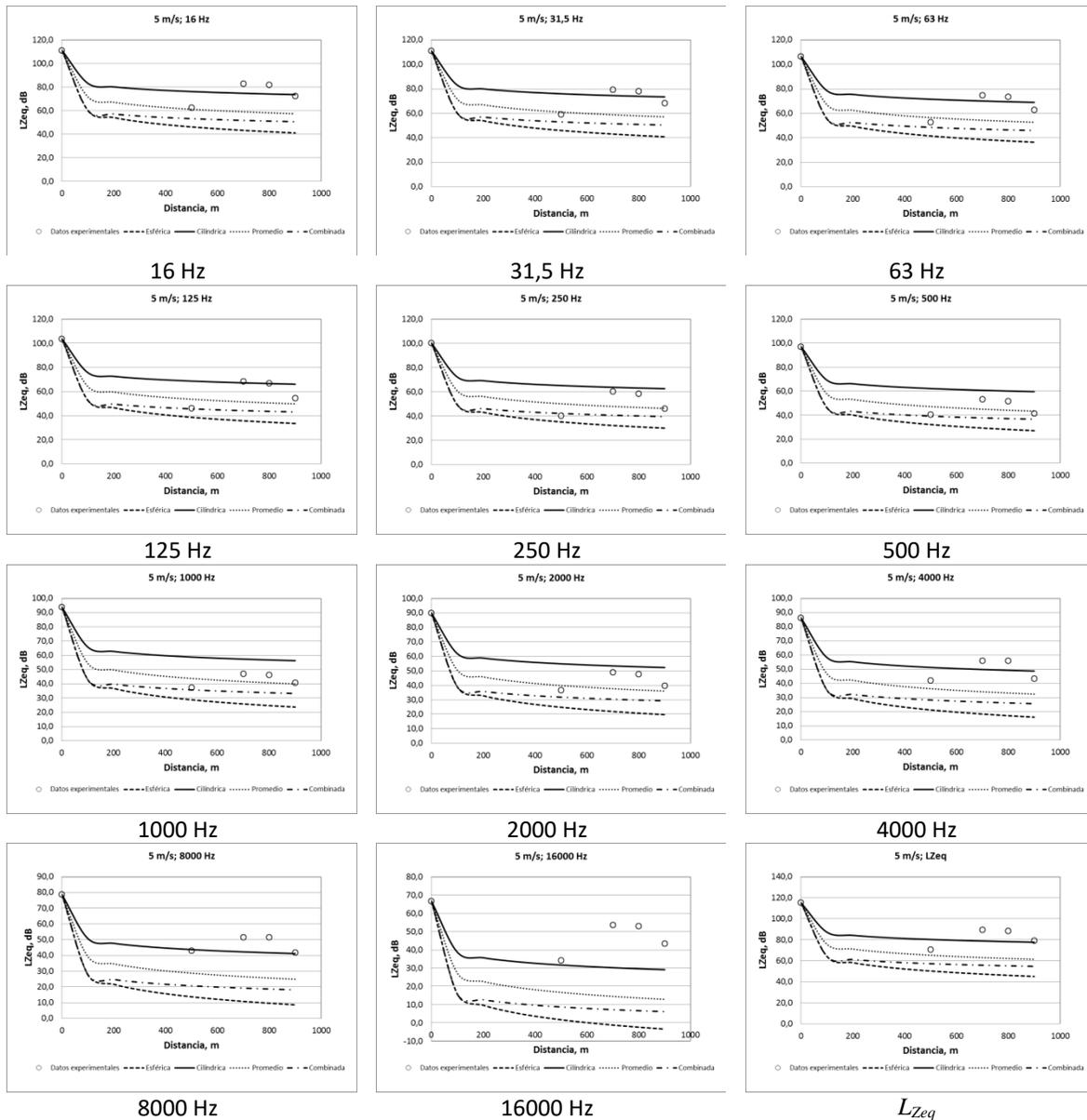
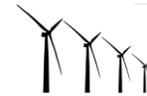


Figura E18. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 5 m/s y estabilidad D.

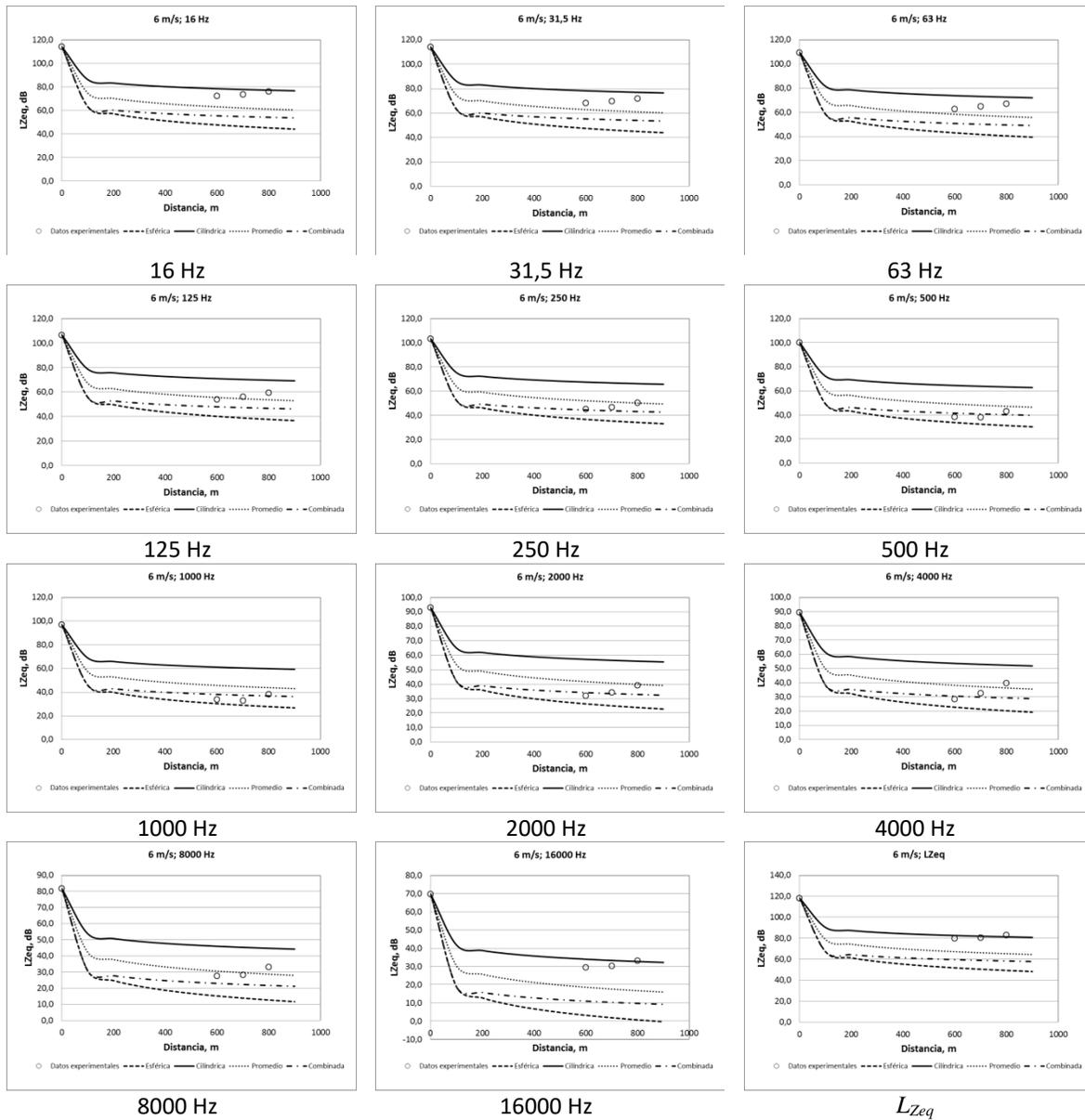


Figura E19. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad A.

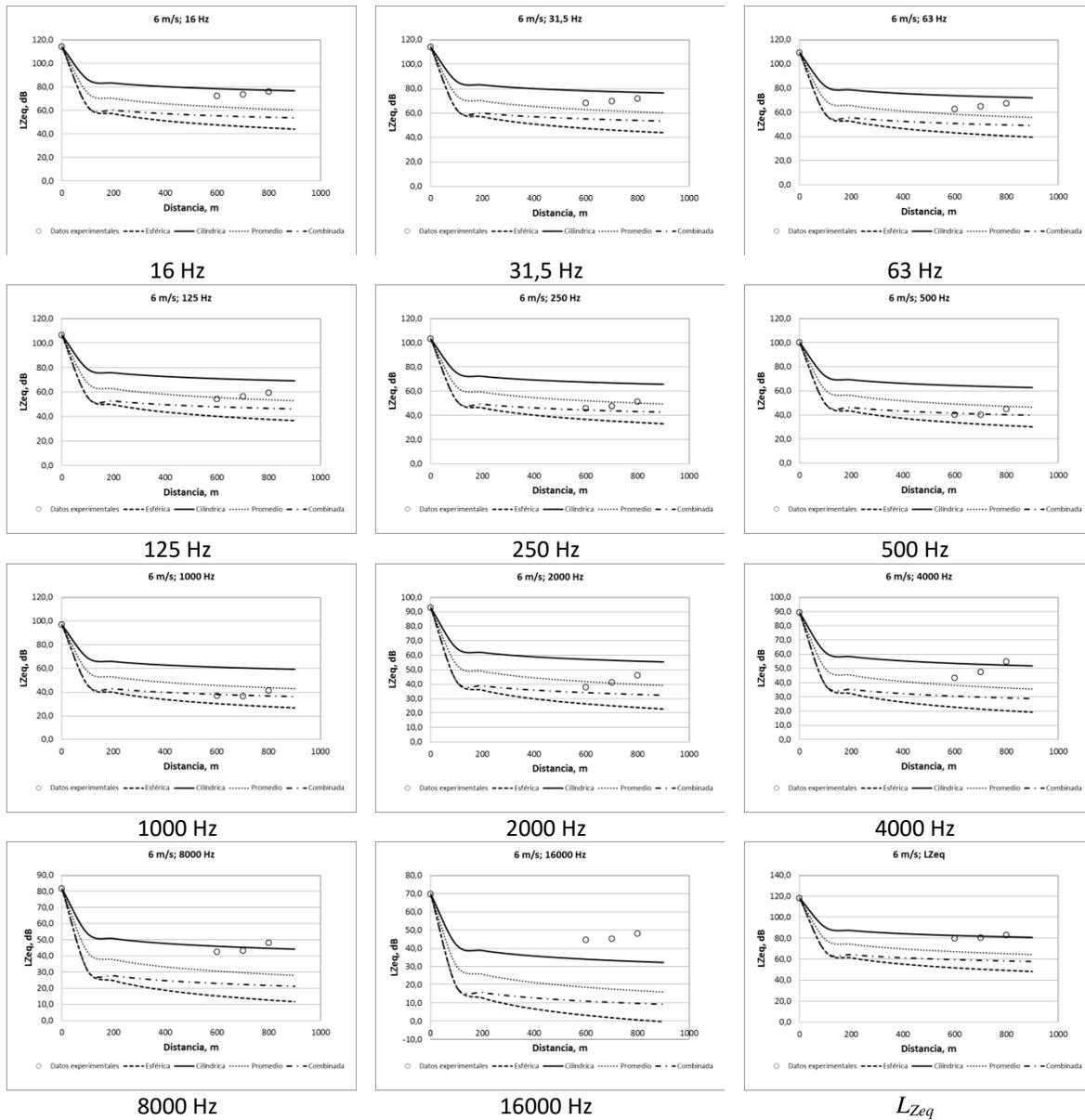


Figura E20. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad A.

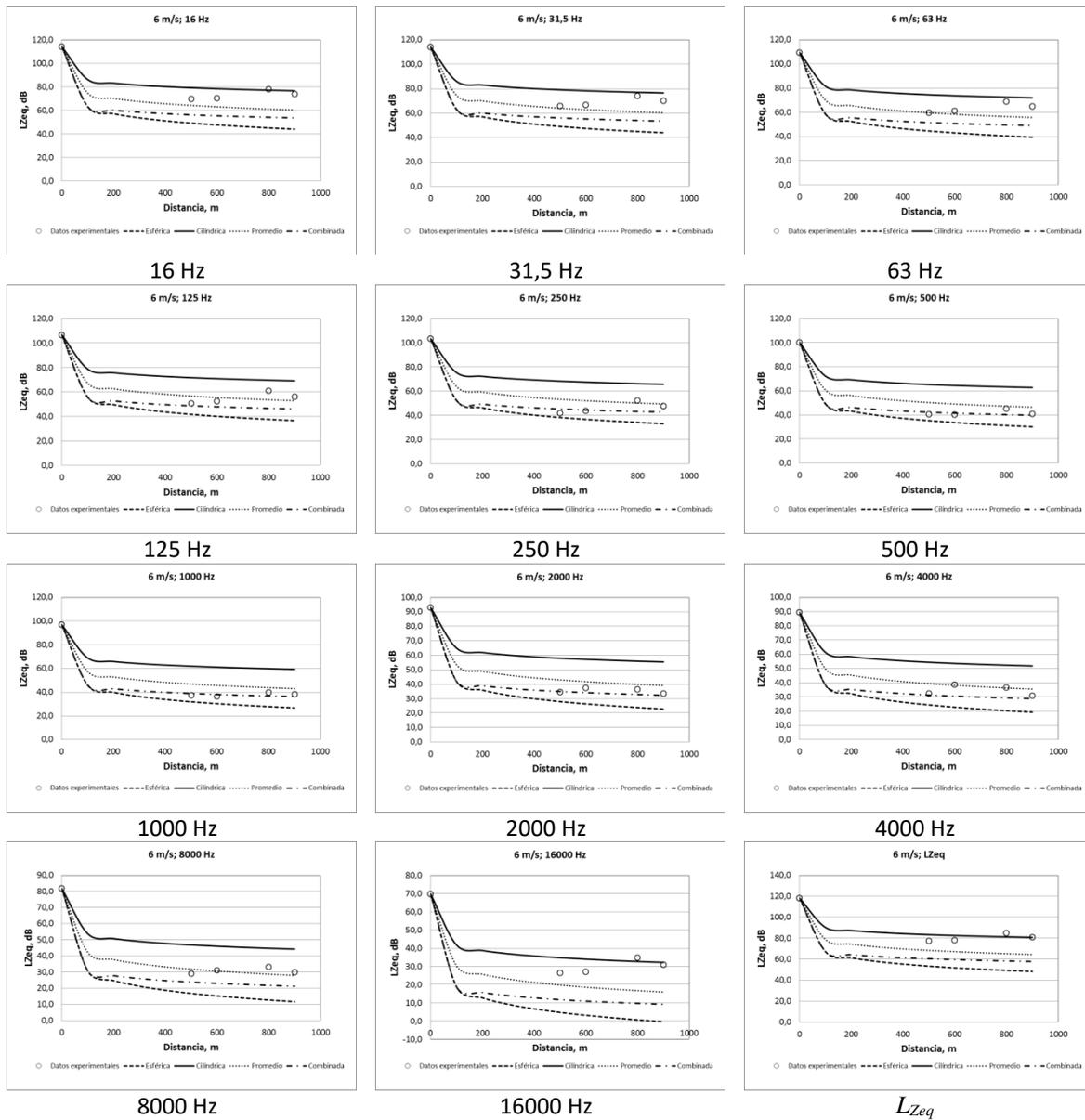


Figura E21. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad B.

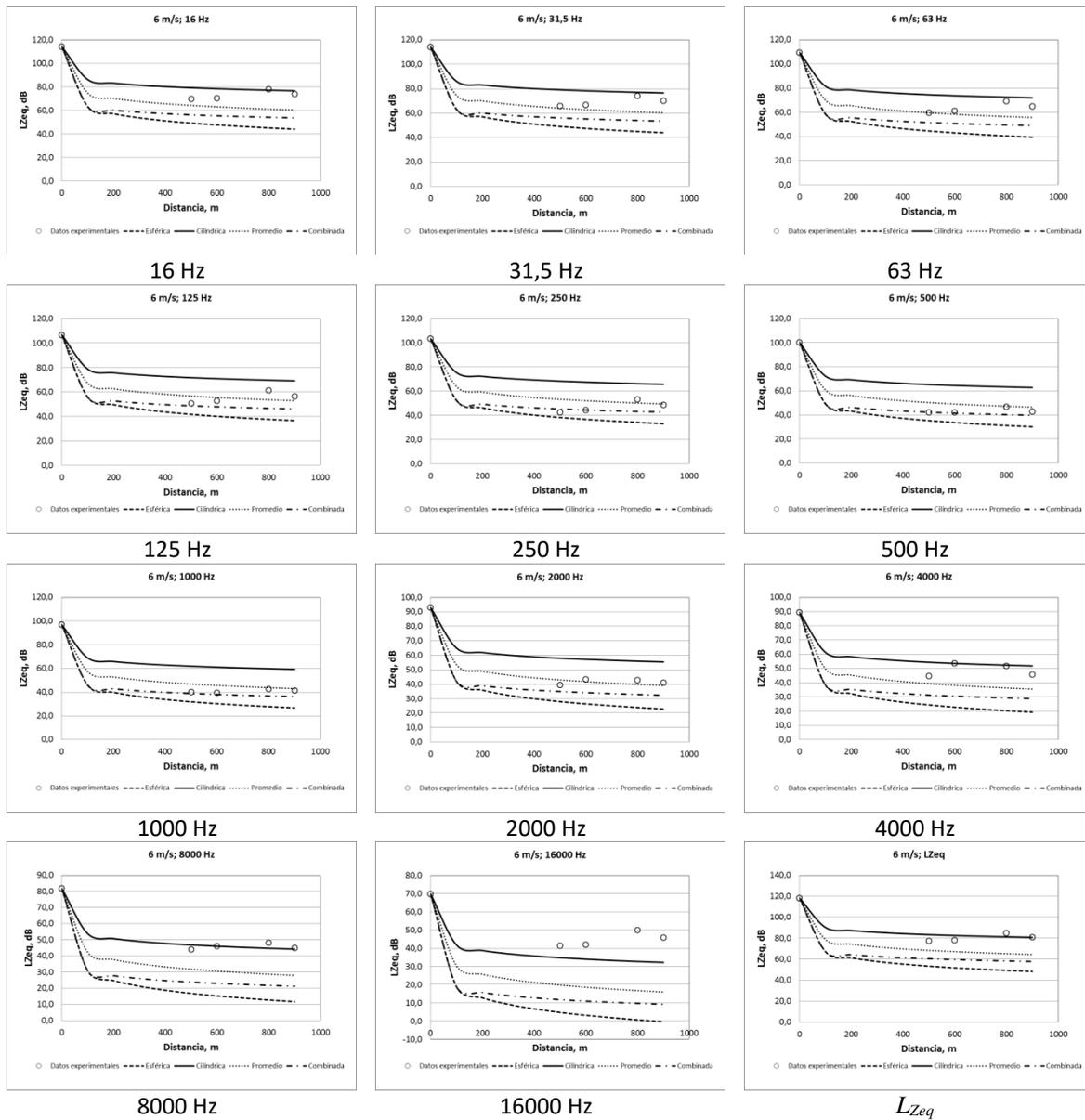
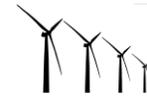


Figura E22. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad B.

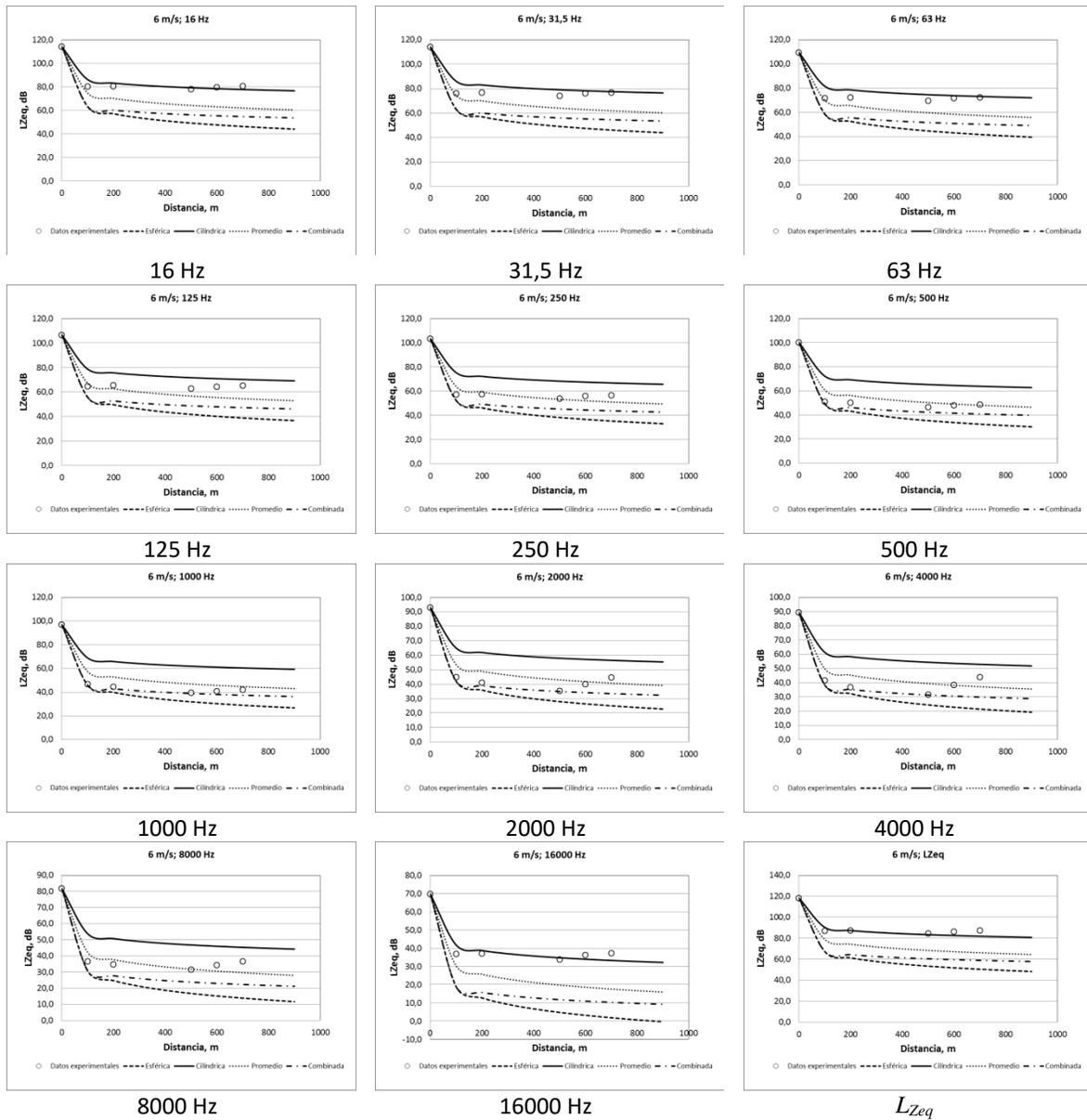


Figura E23. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad D.

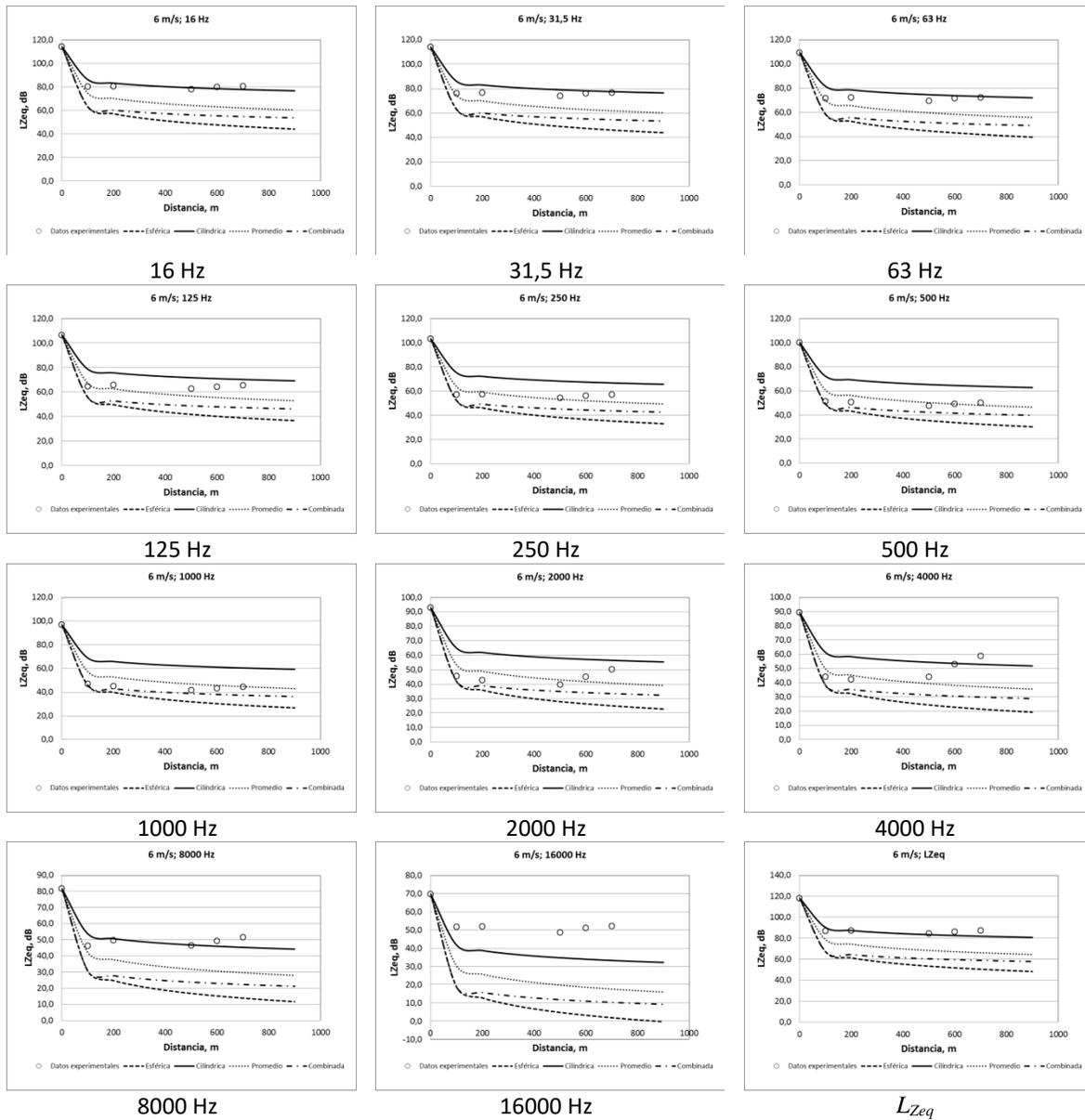


Figura E24. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 6 m/s y estabilidad D.

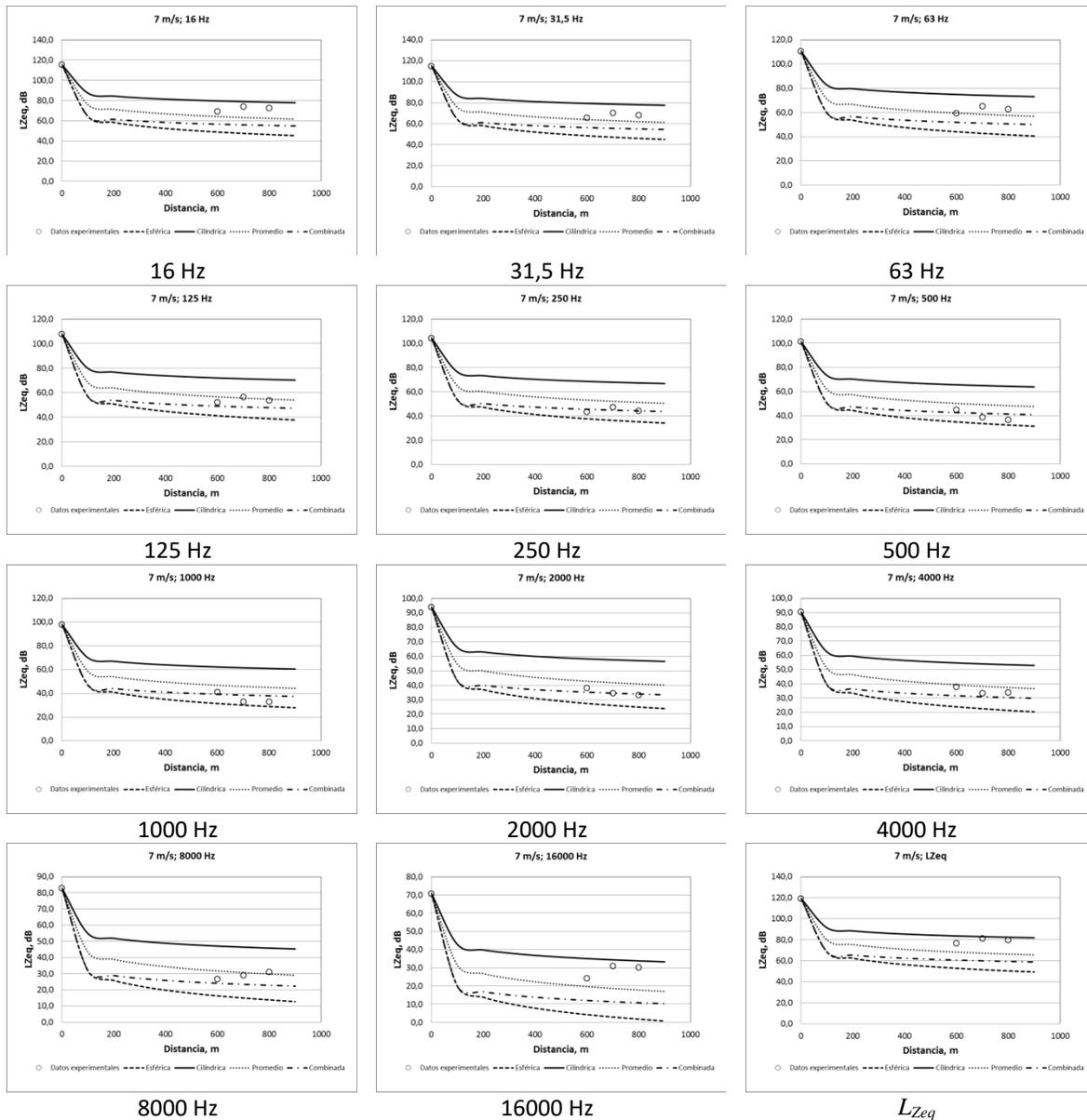
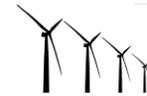


Figura E25. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 7 m/s y estabilidad A.

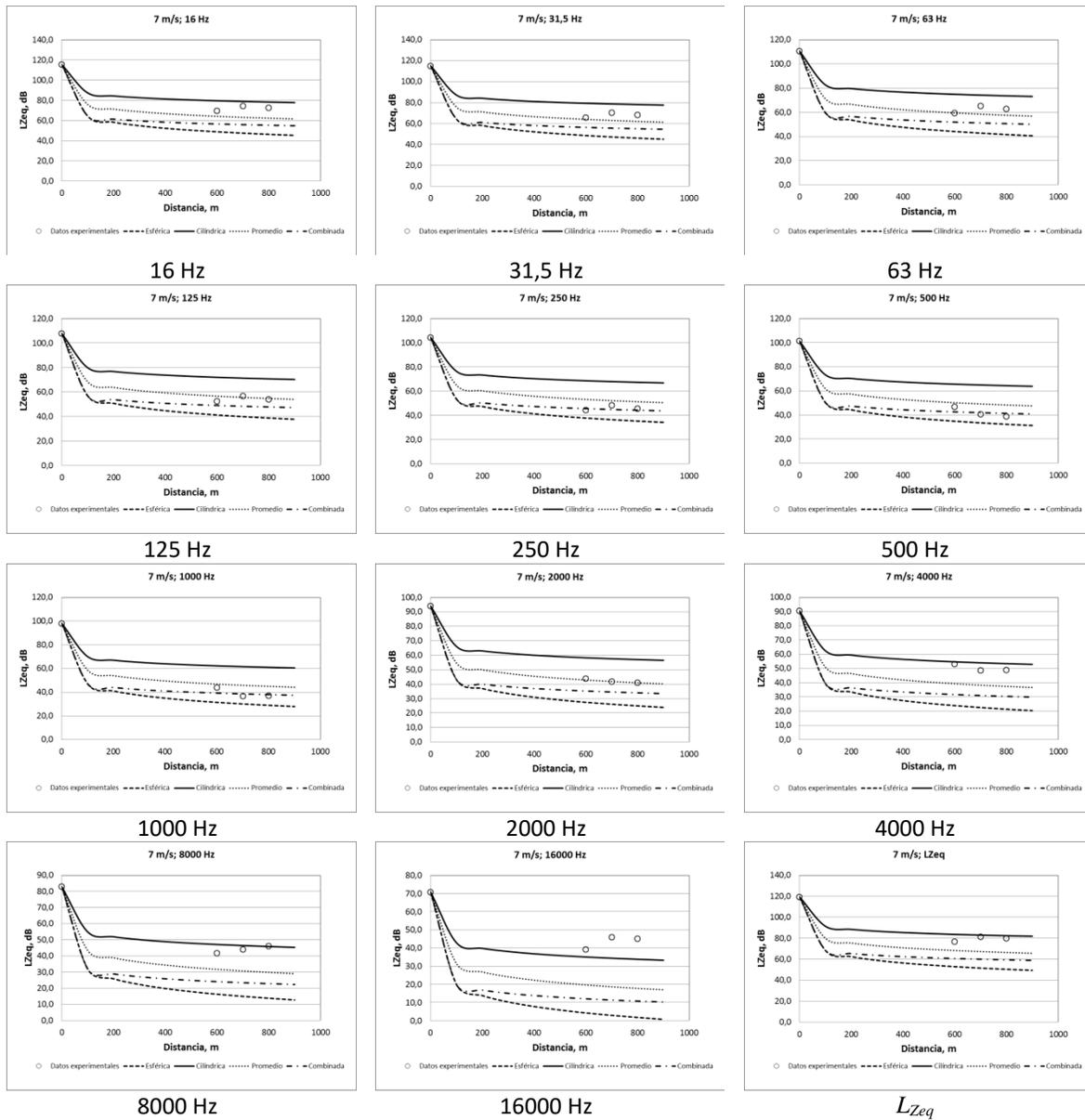


Figura E26. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 7 m/s y estabilidad A.

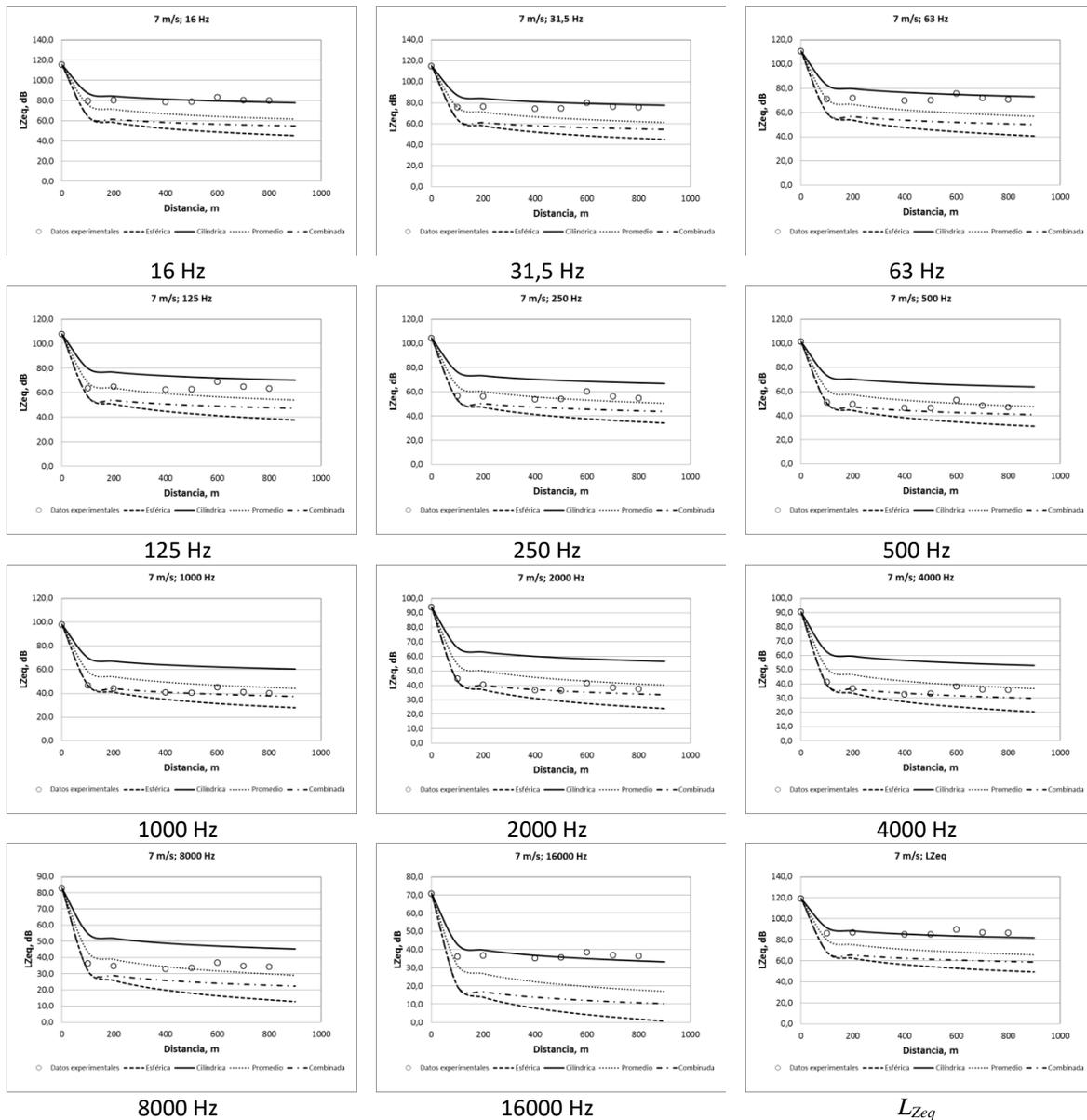
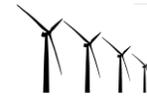


Figura E27. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores sin tener en cuenta los demás factores de atenuación para una velocidad del viento de 7 m/s y estabilidad D.

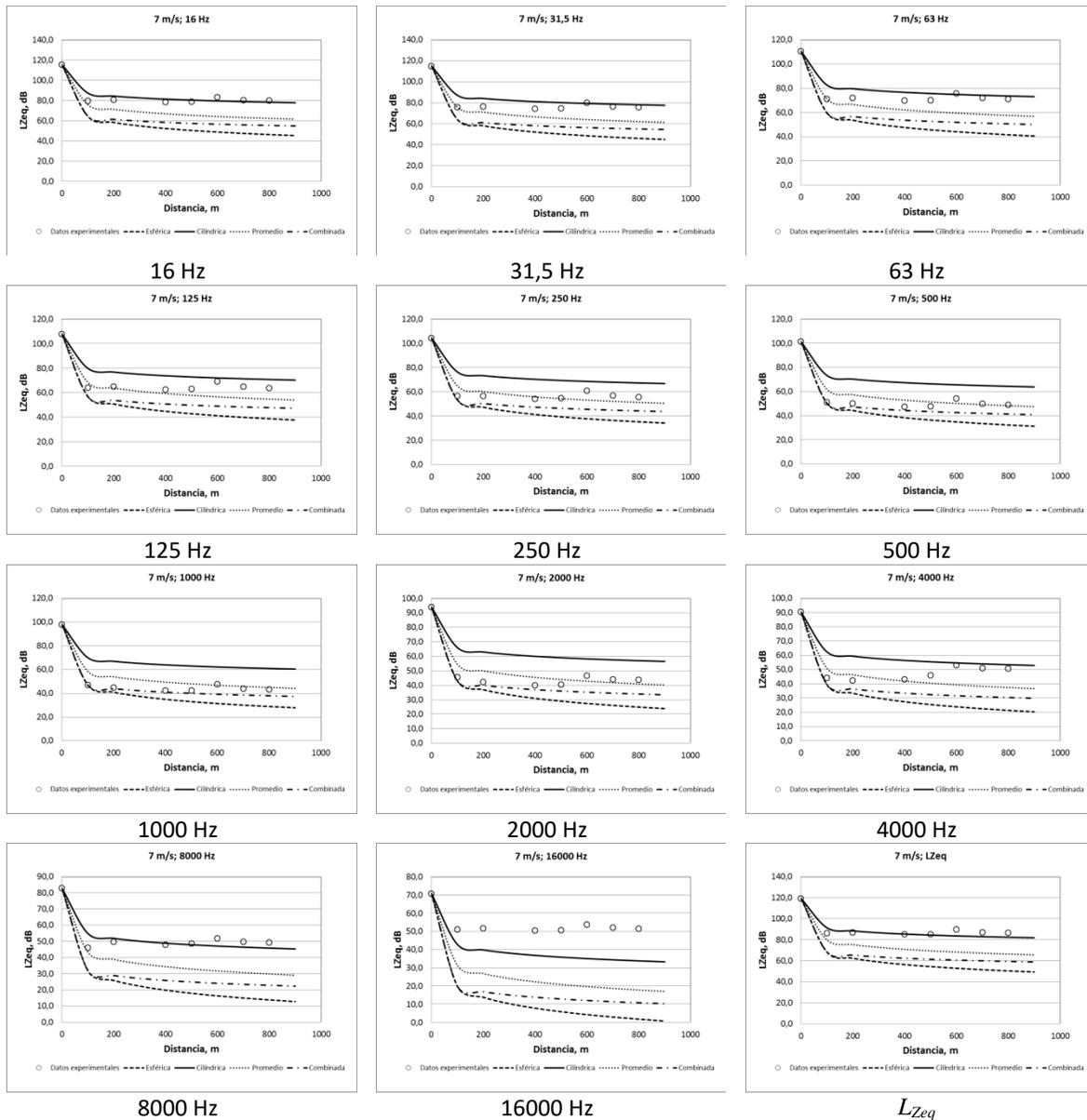


Figura E28. Comportamiento de la propagación de la emisión de ruido de los aerogeneradores teniendo en cuenta la atenuación por absorción atmosférica para una velocidad del viento de 7 m/s y estabilidad D.



## **ANEXO F**

### **NIVEL DE PRESIÓN SONORA RESIDUAL ESTIMADO CON EL MODELO DE PROPAGACIÓN CILÍNDRICA DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD Y FRECUENCIA**





Tabla F1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	200	Promedio	6,5	3,5	2,4	0,7	4,5	0,8	1,4	11,9	19,1	25,1	27,2
		Máxima	8,6	5,2	2,8	1,5	5,2	1,5	1,7	13,8	21,5	27,5	28,5
		Mínima	2,2	0,5	1,9	-0,3	3,7	0,0	1,1	8,2	13,1	18,8	25,3
	300	Promedio	15,1	11,4	8,6	8,9	8,7	2,0	1,1	3,0	9,0	19,1	33,0
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	19,5	15,9	13,4	14,3	13,5	4,9	5,8	7,9	17,5	27,2	39,1
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	19,5	16,0	13,6	14,6	13,3	4,7	4,6	10,3	24,6	29,0	38,8
		Máxima	21,2	17,5	15,5	16,6	15,4	7,6	8,3	14,4	29,4	33,6	41,5
		Mínima	17,2	14,0	11,2	11,7	10,4	1,1	-0,1	4,1	14,8	20,5	35,0
	600	Promedio	18,7	15,3	12,9	15,1	13,4	5,6	6,1	11,7	22,8	28,6	38,5
		Máxima	22,5	18,8	16,7	18,9	17,3	7,3	6,5	14,1	23,5	29,6	41,9
		Mínima	6,7	3,6	2,1	6,8	3,7	3,5	5,3	8,4	21,9	27,5	31,9
B	600	Promedio	7,6	5,0	3,8	6,9	3,2	4,8	5,0	8,9	19,2	24,9	29,5
		Máxima											
		Mínima											
D	500	Promedio	8,2	5,3	3,6	6,1	4,6	6,3	7,6	10,1	23,5	32,5	32,9
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	10,0	6,6	4,0	7,7	3,6	4,8	5,5	8,9	18,7	24,1	29,3
		Máxima											
		Mínima											
E	400	Promedio	12,8	9,9	6,4	6,8	5,4	2,2	1,8	4,3	10,6	20,8	28,1
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	7,9	4,8	2,0	5,3	2,7	2,0	2,4	4,6	11,3	14,6	23,7
		Máxima	10,0	7,2	4,1	7,2	3,5	4,3	4,4	7,0	13,6	16,3	24,5
		Mínima	3,6	-0,9	-1,8	1,9	1,5	-3,1	-1,5	-1,0	5,7	11,6	22,9
F	100	Promedio	10,9	9,1	6,7	9,2	14,4	11,9	9,2	10,5	12,4	21,6	30,3
		Máxima	15,0	12,6	9,1	12,2	17,0	15,0	11,0	12,4	14,9	25,0	34,5
		Mínima	-4,3	-3,1	-0,8	-4,3	4,9	2,1	2,0	1,2	2,8	12,3	18,8
	200	Promedio	12,2	10,2	6,1	5,7	12,3	8,8	7,0	7,9	11,6	25,0	31,0
		Máxima	16,7	14,7	10,8	10,4	16,4	13,1	11,0	11,4	15,2	27,1	35,7
		Mínima	4,0	0,0	-4,2	-2,5	3,8	-2,6	-2,0	-0,8	3,9	18,3	20,7
	300	Promedio	11,1	9,4	6,8	7,4	10,7	10,7	7,5	8,0	11,3	19,0	27,1
		Máxima	14,7	11,9	11,0	10,2	15,0	12,4	9,5	9,4	13,4	24,4	32,1
		Mínima	2,0	1,0	-1,8	-0,1	0,7	-1,4	-2,0	0,7	3,9	11,1	20,7
	400	Promedio	8,5	7,1	4,3	6,6	5,7	6,1	5,3	6,1	12,4	14,0	22,9
		Máxima	8,9	7,4	4,6	7,0	6,0	6,6	5,5	6,2	12,6	14,6	23,3
		Mínima	8,3	6,9	3,9	6,3	5,4	5,8	5,2	6,1	12,2	12,6	22,3
	500	Promedio	10,3	5,9	5,2	5,8	3,4	-0,3	0,9	4,5	12,6	20,0	25,0
		Máxima	13,1	9,4	8,1	7,5	4,5	0,7	1,3	5,1	13,7	22,4	26,1
		Mínima	4,3	2,3	-0,4	3,9	2,4	-1,2	-0,1	3,6	11,5	13,2	23,3

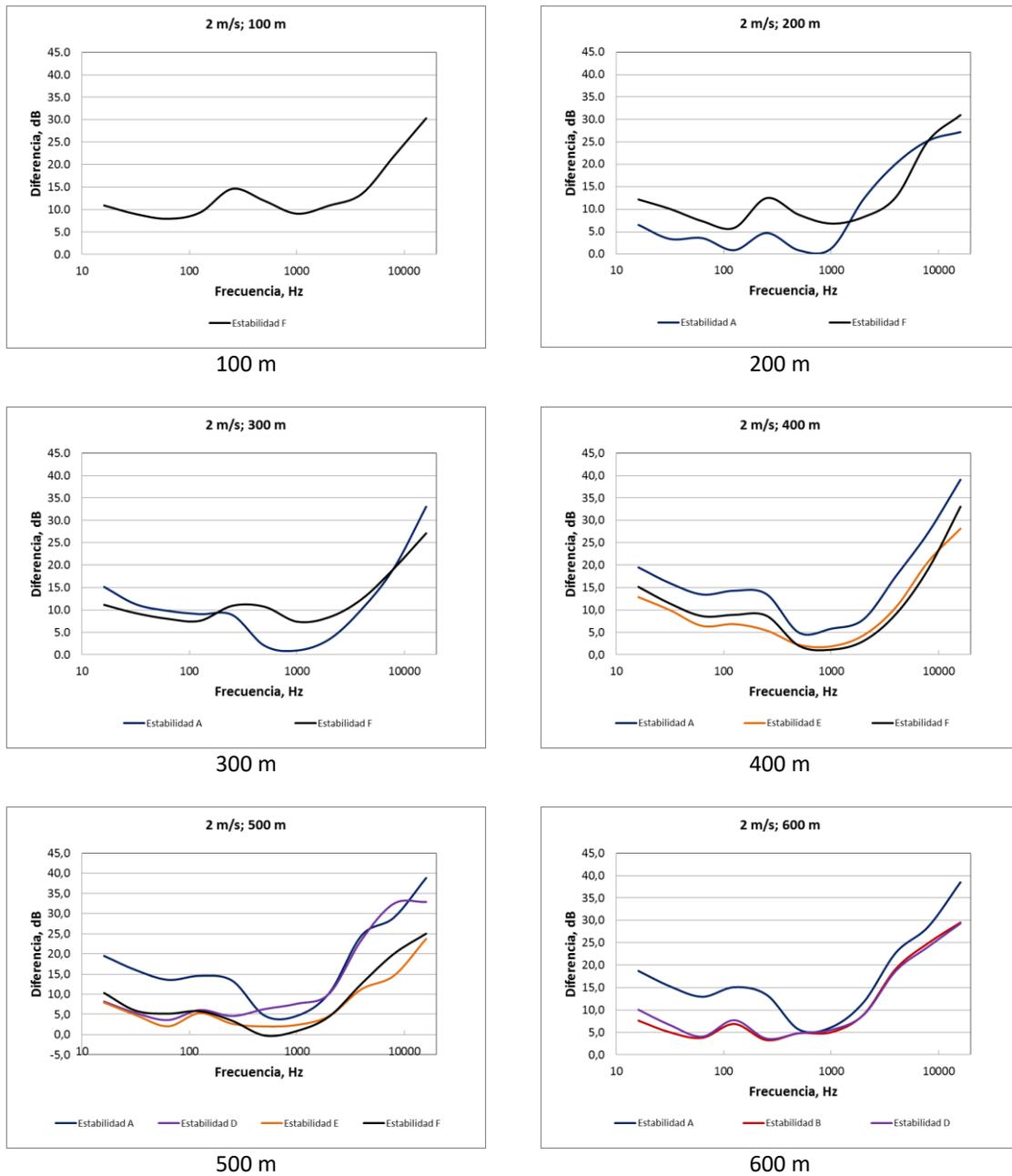


Figura F1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 2 m/s.

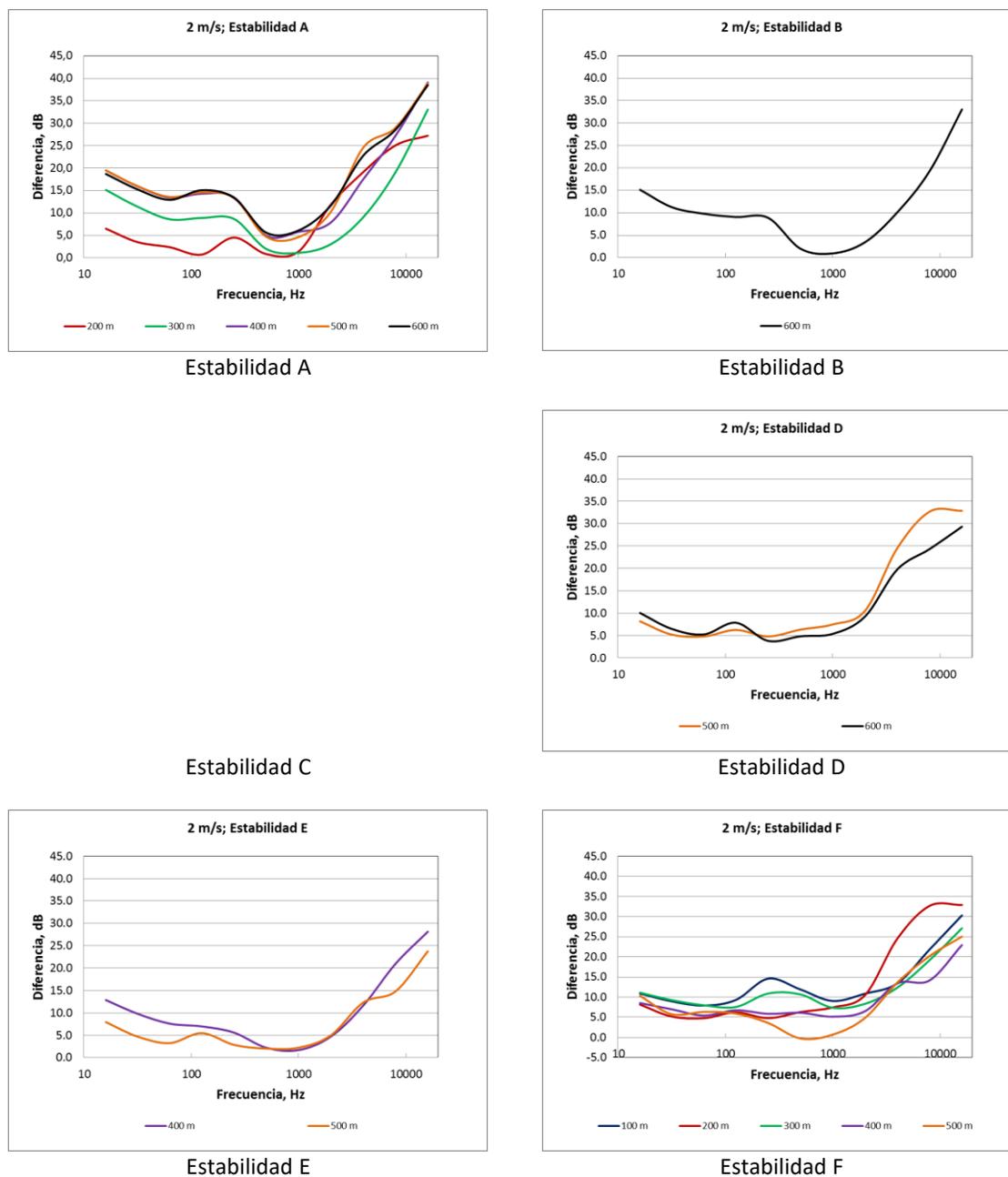


Figura F2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.



Tabla F2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	-3,9	-7,5	-10,3	-11,2	-8,6	-13,1	-13,7	-13,0	-10,2	2,2	15,2
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	0,0	-3,6	-5,9	-6,8	-5,1	-11,2	-11,4	-8,3	-1,4	10,9	19,8
		Máxima	3,2	-0,6	-2,9	-3,6	-2,4	-10,0	-10,9	-6,9	1,7	11,9	22,5
		Mínima	-12,0	-13,2	-13,4	-15,1	-9,2	-12,0	-12,6	-10,9	-5,3	8,7	15,8
	300	Promedio	1,9	-1,6	-4,6	-5,0	-4,9	-11,1	-11,3	-9,1	-1,2	11,3	21,0
		Máxima	4,1	0,8	-2,1	-2,5	-2,5	-9,8	-10,0	-7,4	0,9	12,9	22,9
		Mínima	-1,6	-4,6	-7,8	-8,1	-8,0	-12,3	-12,1	-11,3	-3,3	10,3	17,1
	400	Promedio	5,5	1,9	-0,5	0,1	-0,6	-9,3	-10,2	-5,2	4,5	11,7	24,5
		Máxima	8,4	4,6	2,6	3,5	3,0	-6,4	-8,9	-0,3	9,5	13,0	27,7
		Mínima	2,8	-0,7	-3,6	-3,4	-4,3	-12,5	-12,2	-10,7	-2,1	9,5	21,3
	500	Promedio	6,5	3,1	0,7	1,8	0,8	-8,5	-9,8	-4,3	8,5	13,1	25,4
		Máxima	7,7	4,2	2,0	3,3	2,3	-7,3	-8,6	-0,7	13,0	14,4	26,9
		Mínima	4,3	1,0	-2,0	-1,1	-2,3	-11,1	-11,5	-7,0	3,3	11,8	23,0
	600	Promedio	6,9	3,4	1,0	2,8	1,0	-8,7	-9,3	-5,3	7,5	13,4	25,7
		Máxima	8,5	4,9	2,6	4,6	2,9	-7,1	-8,3	-3,8	8,7	14,4	27,5
		Mínima	3,9	0,7	-2,5	-1,4	-3,7	-12,2	-10,8	-6,7	6,0	11,6	21,8
D	400	Promedio	-3,2	-6,7	-8,8	-6,4	-5,6	-4,3	-6,9	-3,0	2,1	4,9	11,1
		Máxima	-3,2	-6,4	-8,7	-6,1	-5,5	-4,3	-6,7	-2,9	2,8	5,8	11,6
		Mínima	-3,3	-6,9	-8,9	-6,6	-5,7	-4,3	-7,1	-3,0	1,3	3,7	10,5
E	300	Promedio	-7,2	-9,1	-10,2	-6,2	-4,3	-3,9	-5,4	-4,3	1,6	10,2	13,8
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	-7,6	-10,3	-11,0	-7,0	-8,2	-5,4	-6,3	1,6	8,0	9,5	11,3
		Máxima	-6,7	-10,1	-11,0	-6,9	-8,0	-5,3	-6,2	3,8	9,9	11,5	11,7
		Mínima	-8,7	-10,4	-11,0	-7,2	-8,4	-5,4	-6,3	-3,4	4,8	5,7	10,8
F	100	Promedio	2,5	-0,1	-3,3	-3,5	2,2	-1,0	-2,5	-1,3	2,1	12,4	22,0
		Máxima	3,8	0,9	-2,1	-2,4	2,9	-0,1	-1,8	-0,9	2,7	14,1	23,6
		Mínima	-3,9	-3,8	-6,2	-6,5	0,9	-1,8	-2,9	-1,6	1,5	11,5	13,3
	200	Promedio	2,3	1,1	-3,2	-3,9	3,5	0,0	-2,1	-1,6	2,1	13,9	20,4
		Máxima	3,3	1,7	-2,2	-3,0	3,8	0,3	-1,9	-1,4	2,3	14,0	22,2
		Mínima	1,8	0,8	-3,8	-4,5	3,0	-0,5	-2,3	-1,8	1,9	13,7	19,1
	300	Promedio	-5,5	-6,6	-9,0	-6,4	-1,5	-6,2	-6,8	-6,1	-1,3	5,2	10,2
		Máxima	-3,6	-5,1	-6,7	-0,3	5,2	-1,8	-3,1	-3,5	1,2	6,7	12,9
		Mínima	-7,0	-10,1	-13,9	-13,0	-12,5	-15,6	-16,1	-15,9	-10,1	-1,2	7,8
	400	Promedio	-6,3	-8,9	-11,3	-8,7	-8,2	-7,5	-9,1	-3,2	4,9	8,2	11,8
		Máxima	-4,4	-6,8	-9,0	-7,5	-5,6	-4,3	-6,5	0,3	8,5	12,4	14,3
		Mínima	-9,7	-10,9	-14,1	-11,7	-13,1	-14,8	-14,5	-12,9	-6,6	1,5	9,5
500	Promedio	-2,4	-5,1	-8,2	-5,1	-8,8	-8,2	-8,2	-5,5	1,9	5,2	13,0	
	Máxima	-2,1	-4,9	-7,8	-5,0	-8,6	-8,1	-8,2	-5,5	2,7	6,8	13,3	
	Mínima	-2,8	-5,3	-8,8	-5,2	-9,1	-8,2	-8,2	-5,5	1,0	2,9	12,7	

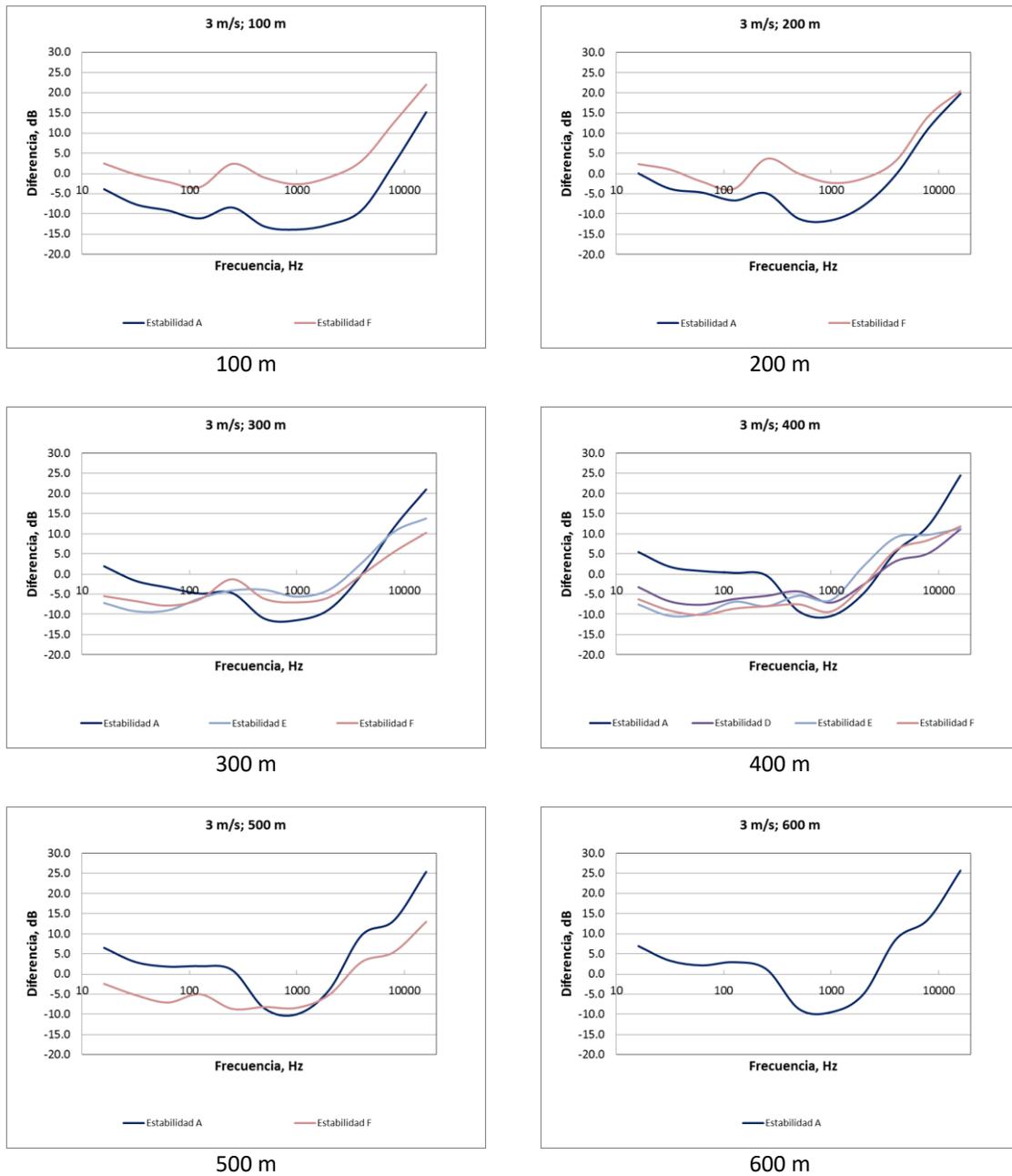
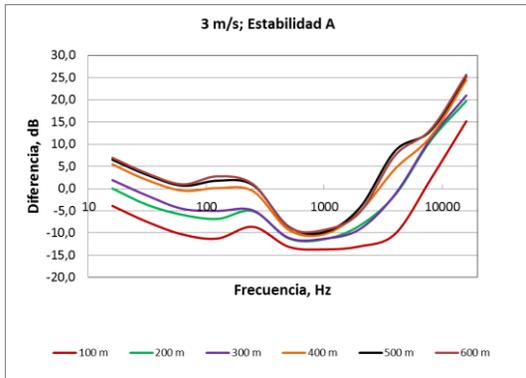
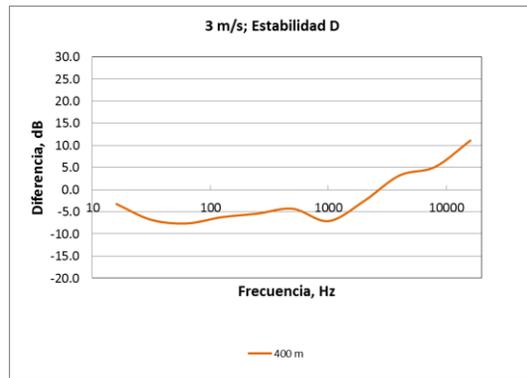


Figura F3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 3 m/s.



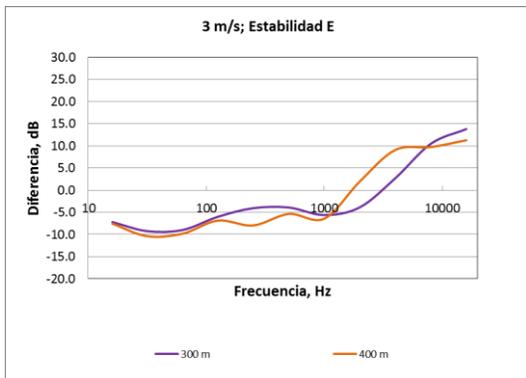
Estabilidad A

Estabilidad B

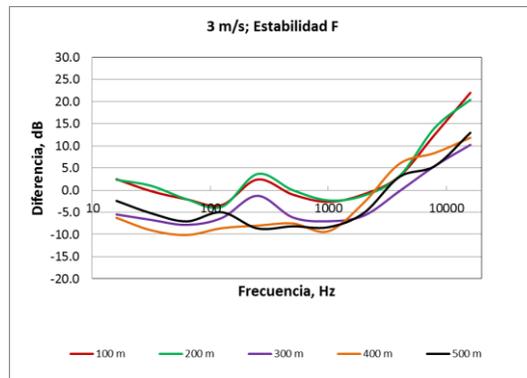


Estabilidad D

Estabilidad C



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura F4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.



Tabla F3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	-11,6	-15,7	-17,0	-18,5	-16,4	-21,1	-22,3	-21,0	-17,7	-6,6	7,0
		Máxima	-9,3	-13,5	-14,6	-16,5	-14,8	-20,5	-22,3	-20,5	-17,2	-6,4	9,3
		Mínima	-16,4	-20,1	-22,3	-22,1	-18,7	-21,7	-22,4	-21,6	-18,5	-6,7	1,8
	200	Promedio	-7,6	-11,4	-12,8	-15,1	-13,5	-21,1	-22,3	-20,4	-13,8	-0,6	11,1
		Máxima	-7,1	-10,7	-12,1	-14,2	-12,8	-20,5	-21,4	-19,1	-11,1	1,8	12,0
		Mínima	-8,8	-12,8	-14,5	-16,9	-14,8	-22,1	-23,0	-21,4	-16,7	-2,7	9,1
	300	Promedio	-6,1	-9,9	-12,0	-14,0	-13,8	-20,6	-20,8	-17,0	-7,6	3,7	12,7
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	-4,6	-8,3	-9,6	-10,3	-11,2	-20,4	-22,2	-19,5	-8,1	-0,5	13,8
		Máxima											
		Mínima											
600	Promedio	-3,0	-6,4	-7,6	-7,0	-8,8	-17,5	-17,3	-12,5	-1,2	4,9	15,6	
	Máxima												
	Mínima												
B	100	Promedio	-25,7	-28,7	-27,7	-28,1	-17,9	-25,5	-26,1	-24,2	-21,5	-15,2	-3,9
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	-22,0	-26,2	-27,9	-26,0	-17,3	-22,6	-22,3	-16,8	-11,0	0,6	4,6
		Máxima	-20,7	-25,3	-27,6	-25,4	-16,4	-22,4	-21,5	-15,5	-9,5	1,5	5,4
		Mínima	-23,9	-27,5	-28,2	-26,6	-18,5	-22,9	-23,1	-18,8	-13,1	-0,4	3,6
	900	Promedio	1,9	-1,9	-3,0	-0,9	-3,6	-12,2	-12,7	-2,4	8,7	9,1	21,2
		Máxima											
		Mínima											
C	500	Promedio	-2,5	-6,8	-8,0	-7,1	-8,8	-11,1	-12,5	-11,4	-4,5	2,1	16,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	-18,4	-21,4	-21,6	-22,0	-11,9	-14,1	-15,4	-12,9	-12,2	-5,6	14,6
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	-14,9	-17,9	-17,0	-18,7	-13,5	-14,4	-14,7	-14,9	-13,1	-4,2	17,5
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	-13,6	-17,3	-17,4	-14,8	-12,8	-12,0	-13,6	-8,4	2,0	6,4	8,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	-4,0	-8,0	-9,2	-8,1	-8,8	-11,8	-13,1	-6,7	5,1	7,3	15,8
		Máxima	0,1	-4,0	-5,0	-4,1	-5,5	-10,1	-11,3	-4,0	9,4	10,0	19,9
		Mínima	-9,0	-12,5	-13,8	-12,0	-11,8	-12,8	-14,7	-11,9	-4,1	2,6	12,0
	800	Promedio	9,2	5,7	5,6	9,0	6,5	-2,3	-4,2	9,6	23,6	22,4	27,7
		Máxima											
		Mínima											
900	Promedio	3,7	-0,1	-0,9	1,7	-1,0	-10,2	-11,6	-4,9	5,1	10,0	23,3	
	Máxima	5,2	1,4	0,9	4,1	1,4	-8,1	-10,7	-3,4	6,9	10,8	24,6	
	Mínima	2,6	-1,3	-2,7	-0,9	-3,9	-12,5	-12,4	-7,7	2,1	8,6	22,4	
E	400	Promedio	-11,7	-15,3	-15,6	-13,6	-14,7	-13,1	-14,1	-8,2	-0,1	2,7	5,1
		Máxima	-9,2	-13,1	-14,3	-12,8	-13,2	-12,5	-12,5	-5,5	3,6	7,2	7,9
		Mínima	-13,7	-17,5	-17,3	-14,4	-15,7	-13,5	-14,8	-10,4	-5,0	-2,3	2,6



Tabla F3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s (continuación).

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
F	100	Promedio	-9,9	-11,5	-13,0	-14,1	-7,7	-10,7	-11,9	-10,1	-6,2	4,1	9,0
		Máxima	-4,7	-7,8	-9,2	-10,5	-4,7	-8,5	-10,9	-9,7	-5,3	5,5	14,9
		Mínima	-12,9	-12,3	-14,2	-14,9	-7,5	-10,2	-11,6	-9,9	-5,9	3,4	1,4
	200	Promedio	-12,5	-12,6	-13,1	-15,7	-7,2	-6,0	-11,8	-10,1	-5,2	5,1	6,2
		Máxima	-7,0	-8,0	-11,4	-13,0	-4,7	-5,4	-10,9	-9,7	-4,3	7,5	10,6
		Mínima	-15,9	-15,4	-14,2	-16,8	-8,4	-10,2	-12,3	-10,5	-5,9	1,7	-2,6
F	300	Promedio	-13,4	-14,8	-14,3	-16,1	-11,5	-12,0	-14,1	-13,2	-8,3	-3,4	11,8
		Máxima	-12,0	-14,4	-13,6	-16,0	-11,0	-11,0	-13,9	-12,2	-6,2	-1,8	14,6
		Mínima	-15,5	-15,4	-15,1	-16,2	-12,1	-13,4	-14,3	-14,3	-12,2	-5,9	1,3
	400	Promedio	-14,9	-18,0	-18,9	-16,0	-13,5	-13,6	-16,5	-11,6	-3,1	-5,2	0,6
		Máxima											
		Mínima											

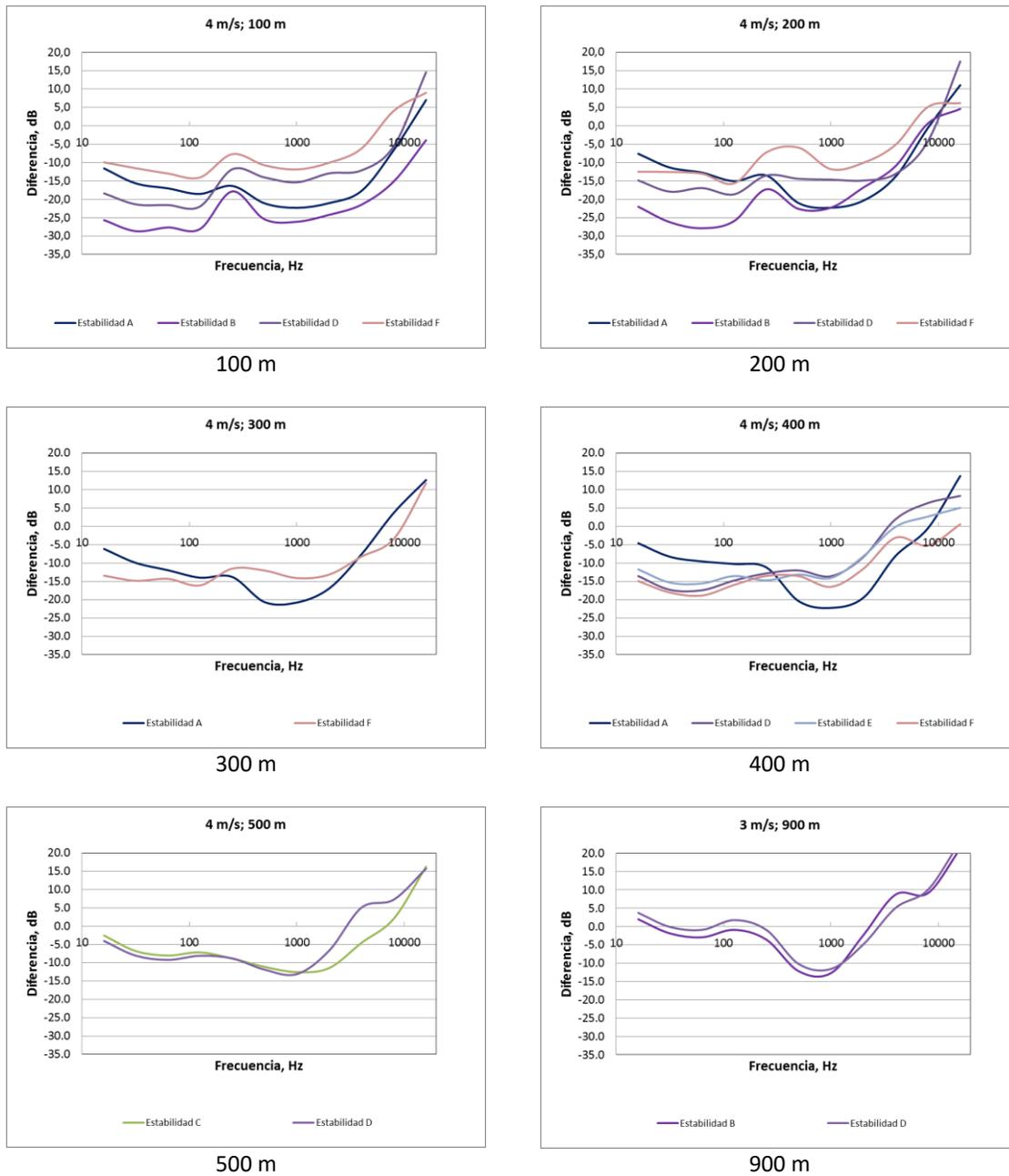


Figura F5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 4 m/s.

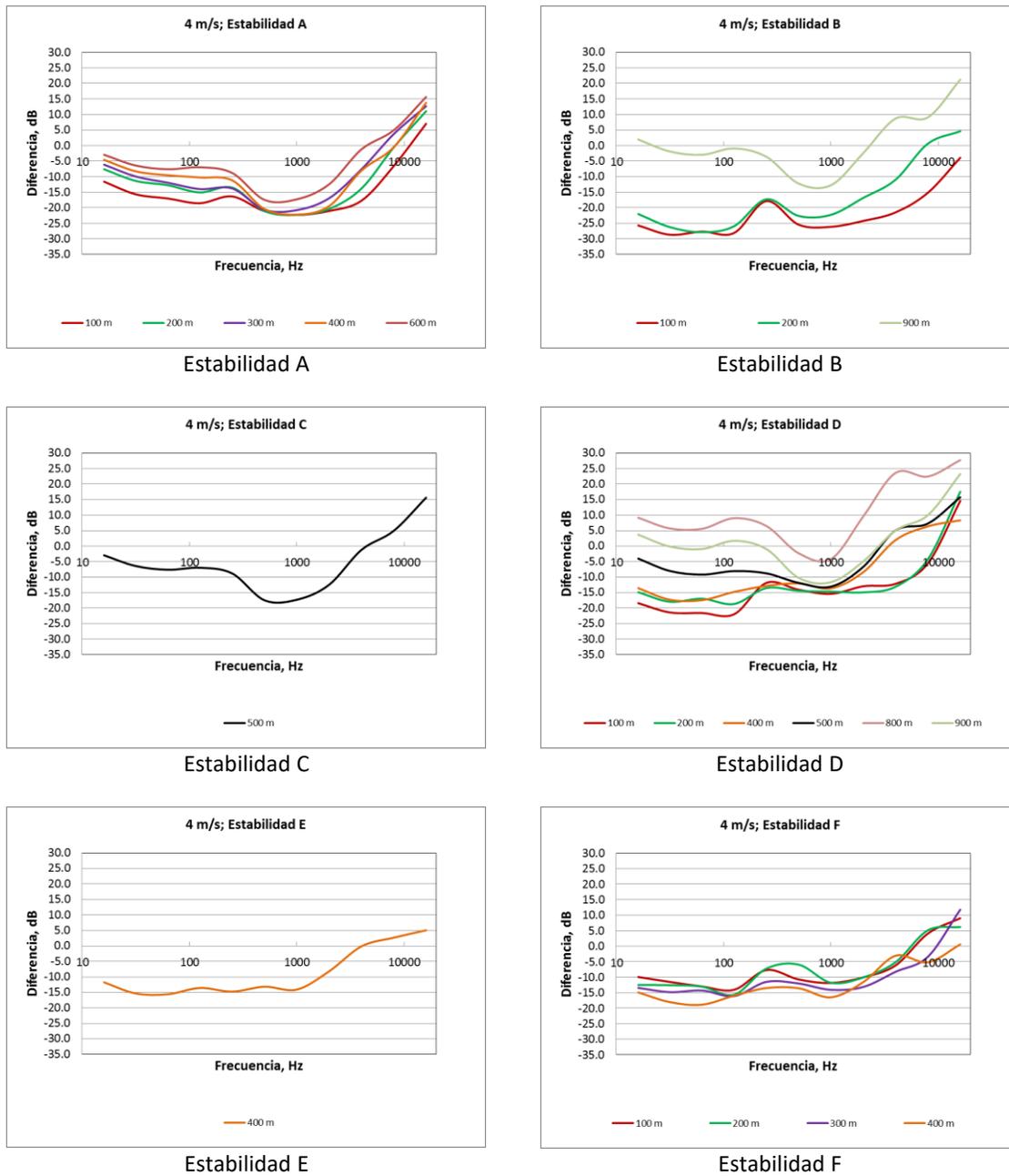


Figura F6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.



Tabla F4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-13,4	-17,2	-19,6	-17,4	-19,4	-23,0	-23,0	-17,8	-6,6	-4,0	3,2
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-3,8	-7,3	-7,4	-6,3	-8,5	-18,0	-19,8	-15,8	-6,8	2,6	15,5
		Máxima											
		Mínima											
B	100	Promedio	-21,9	-25,7	-27,3	-28,9	-22,0	-28,2	-29,0	-26,5	-22,3	-14,2	-3,4
		Máxima	-21,1	-25,0	-26,6	-28,3	-21,8	-27,7	-28,6	-26,2	-21,3	-13,1	-2,0
		Mínima	-23,8	-27,7	-30,5	-31,6	-22,7	-29,8	-30,0	-27,2	-22,7	-14,7	-3,6
	500	Promedio	-12,4	-16,4	-18,0	-12,0	-9,8	-16,0	-19,3	-18,1	-15,0	-8,8	5,1
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-8,8	-12,9	-14,3	-13,3	-15,1	-21,5	-22,5	-18,1	-10,0	-4,5	9,4
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	-1,0	-4,4	-4,6	-2,1	-4,5	-12,4	-11,7	-7,5	1,9	6,9	18,8
		Máxima	-0,1	-3,2	-3,3	-0,6	-3,2	-10,7	-10,0	-5,2	4,5	9,0	20,2
		Mínima	-2,3	-6,0	-6,6	-4,2	-6,4	-15,3	-14,8	-13,0	-5,4	2,6	16,6
C	500	Promedio	-13,1	-16,6	-18,4	-14,8	-17,4	-15,6	-16,0	-6,5	12,1	9,5	5,1
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-11,5	-14,7	-16,5	-13,1	-14,8	-13,8	-13,9	-11,3	0,6	-2,2	4,3
		Máxima	-10,4	-13,8	-15,4	-12,5	-13,9	-13,5	-13,4	-10,6	1,6	0,0	6,2
		Mínima	-13,1	-15,8	-18,0	-13,8	-15,8	-14,2	-14,4	-12,0	-0,7	-6,8	0,9
D	500	Promedio	-16,5	-19,9	-21,7	-19,3	-17,8	-19,9	-20,6	-18,3	-9,1	-0,7	2,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	5,2	1,7	1,8	5,3	3,5	-5,5	-9,6	-4,4	6,2	9,3	23,3
		Máxima											
		Mínima											
	800	Promedio	4,8	1,1	1,1	4,7	2,5	-6,5	-9,8	-5,2	6,9	9,8	23,3
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	-4,4	-8,0	-9,2	-6,7	-9,3	-16,3	-14,8	-12,6	-5,2	0,8	14,2
		Máxima											
		Mínima											

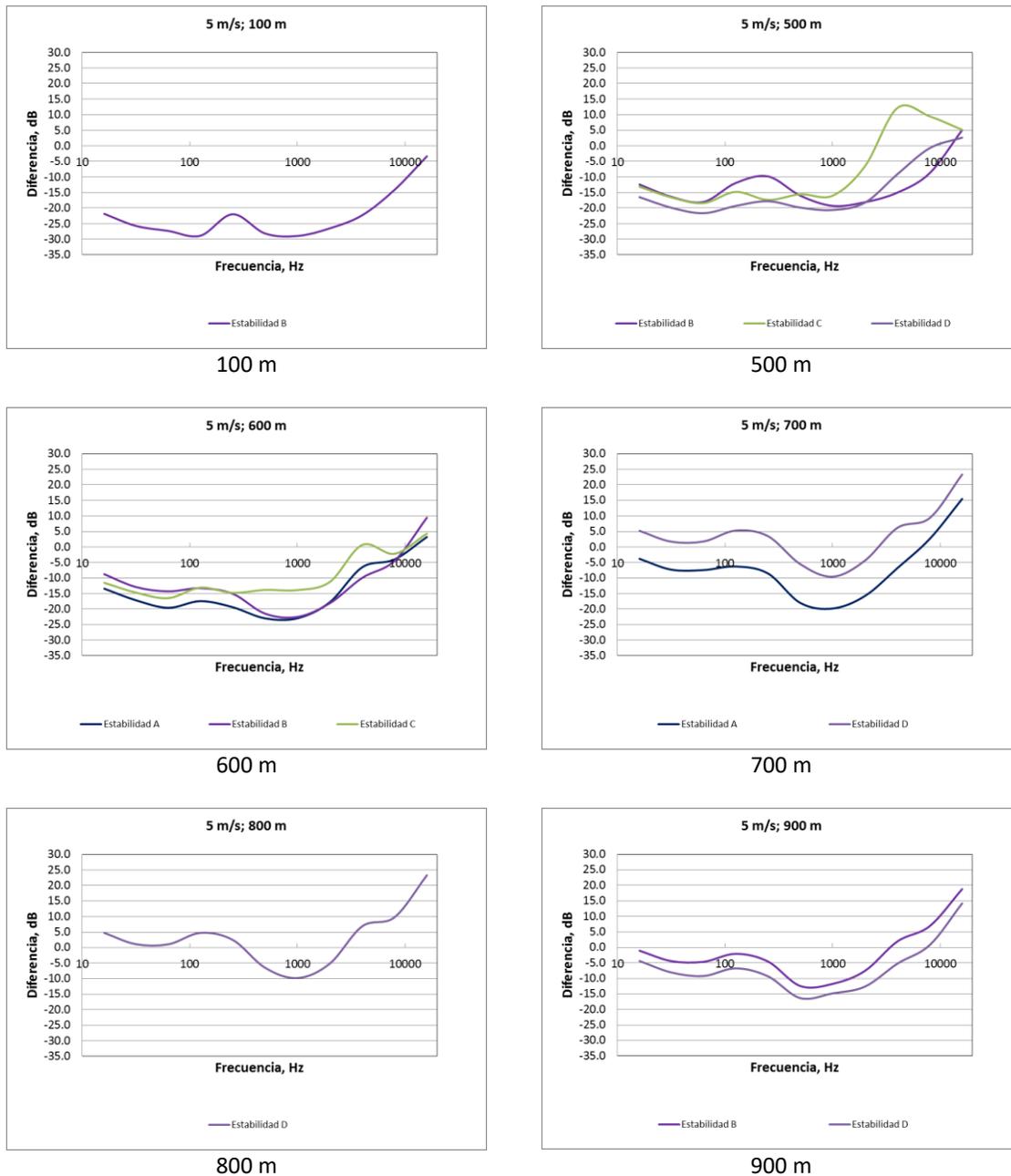
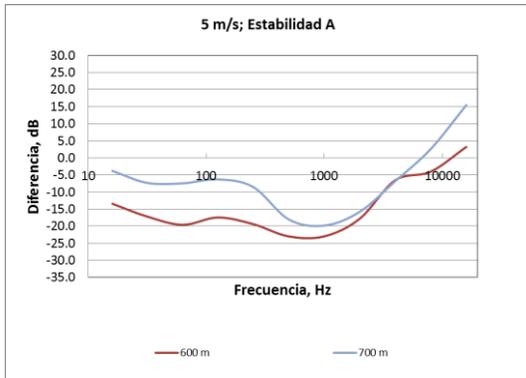
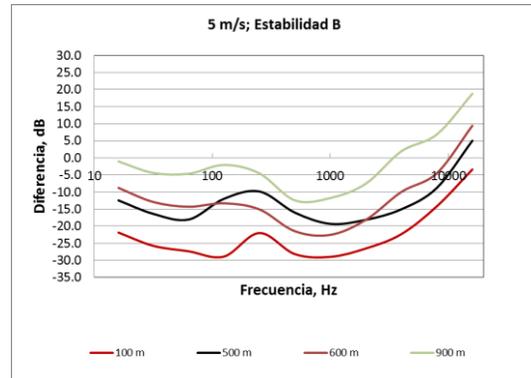


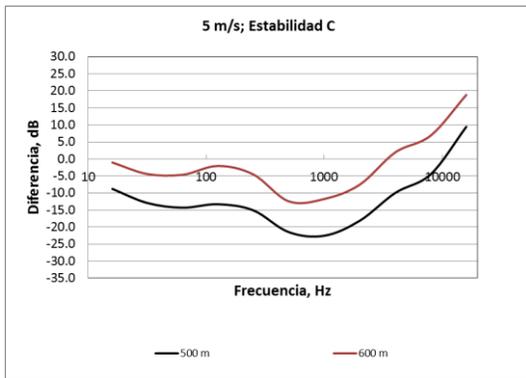
Figura F7. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 5 m/s.



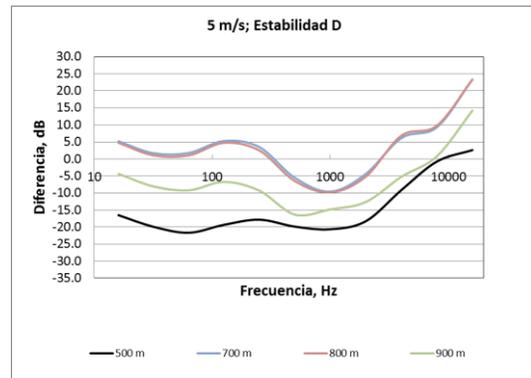
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad C



Estabilidad D

Estabilidad E

Estabilidad F

Figura F8. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.



Tabla F5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-9,0	-12,9	-13,9	-13,0	-14,6	-22,4	-23,4	-19,2	-10,2	-3,4	10,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-7,0	-10,7	-11,3	-9,7	-11,9	-21,7	-23,2	-15,1	-5,3	-2,0	12,0
		Máxima	-6,1	-9,8	-10,2	-8,2	-10,4	-20,2	-22,4	-13,7	-3,2	-1,3	12,9
		Mínima	-8,3	-11,8	-12,7	-12,0	-14,3	-23,9	-24,1	-17,3	-9,5	-2,9	10,9
	800	Promedio	-4,0	-7,9	-8,2	-5,5	-7,9	-16,5	-17,9	-9,8	2,5	3,5	15,4
		Máxima	-2,0	-5,8	-5,9	-2,9	-5,3	-13,9	-15,5	-8,1	3,9	5,1	17,3
		Mínima	-7,8	-12,1	-13,5	-12,6	-15,4	-24,6	-23,7	-12,9	0,4	1,0	12,0
B	500	Promedio	-12,5	-16,1	-17,9	-17,9	-18,7	-21,3	-21,2	-18,5	-9,6	-2,8	6,7
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-10,9	-14,5	-15,6	-14,4	-16,0	-20,5	-21,0	-13,8	0,1	0,1	8,0
		Máxima	-10,1	-13,8	-14,8	-13,6	-14,9	-16,2	-16,8	-8,6	6,4	6,1	9,0
		Mínima	-14,3	-17,6	-19,4	-15,7	-17,1	-23,2	-24,6	-20,9	-12,7	-8,1	0,5
	800	Promedio	-2,2	-5,9	-6,4	-3,8	-6,1	-14,6	-16,4	-13,0	-0,6	3,5	17,1
		Máxima											
		Mínima											
900	Promedio	-5,6	-9,3	-10,0	-7,7	-10,0	-18,1	-17,2	-14,4	-5,9	0,8	13,7	
	Máxima												
	Mínima												
D	100	Promedio	-9,0	-12,7	-12,8	-13,3	-12,0	-19,2	-21,1	-19,2	-17,1	-7,4	10,1
		Máxima	-7,7	-11,3	-11,3	-11,7	-10,7	-18,5	-20,9	-18,8	-17,0	-6,8	11,3
		Mínima	-10,1	-14,1	-14,3	-14,9	-13,1	-19,8	-21,3	-19,5	-17,3	-7,8	9,1
	200	Promedio	-5,6	-9,0	-9,2	-8,8	-7,7	-16,7	-20,0	-19,1	-16,1	-0,9	13,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	-4,3	-7,9	-8,0	-5,8	-6,7	-15,8	-19,6	-18,2	-10,0	-0,3	14,0
		Máxima	0,8	-2,9	-2,9	-0,7	-1,6	-11,0	-15,2	-14,3	-5,6	4,3	18,6
		Mínima	-18,7	-22,5	-24,6	-22,8	-23,3	-24,6	-26,5	-22,9	-18,6	-14,3	-3,2
	600	Promedio	-1,6	-5,1	-5,1	-2,8	-4,0	-13,4	-17,2	-12,1	-0,4	3,3	17,3
		Máxima	-0,7	-4,1	-4,0	-1,5	-2,7	-11,9	-16,0	-10,6	1,5	3,9	17,8
		Mínima	-2,2	-5,8	-5,8	-3,8	-5,0	-14,6	-18,0	-15,1	-3,7	3,0	16,9
	700	Promedio	-0,1	-3,7	-3,7	-0,7	-2,5	-11,7	-15,1	-6,3	6,1	6,3	19,0
		Máxima	0,4	-3,2	-3,2	-0,1	-1,9	-11,0	-14,7	-5,2	7,4	6,7	19,2
		Mínima	-0,5	-4,2	-4,1	-1,4	-3,3	-12,5	-15,5	-7,7	4,2	5,8	18,8
	800	Promedio	2,1	-1,4	-1,3	2,6	0,2	-8,6	-12,2	-5,4	6,9	8,1	20,3
		Máxima	2,5	-0,9	-0,6	3,3	0,9	-7,9	-11,7	-4,9	8,0	8,6	20,6
		Mínima	1,6	-2,0	-2,0	1,8	-0,6	-9,4	-12,8	-5,9	5,2	7,5	20,0
E	400	Promedio	-3,5	-7,4	-7,6	-6,4	-6,7	-15,9	-19,2	-18,1	-11,7	1,1	15,6
		Máxima											
		Mínima											

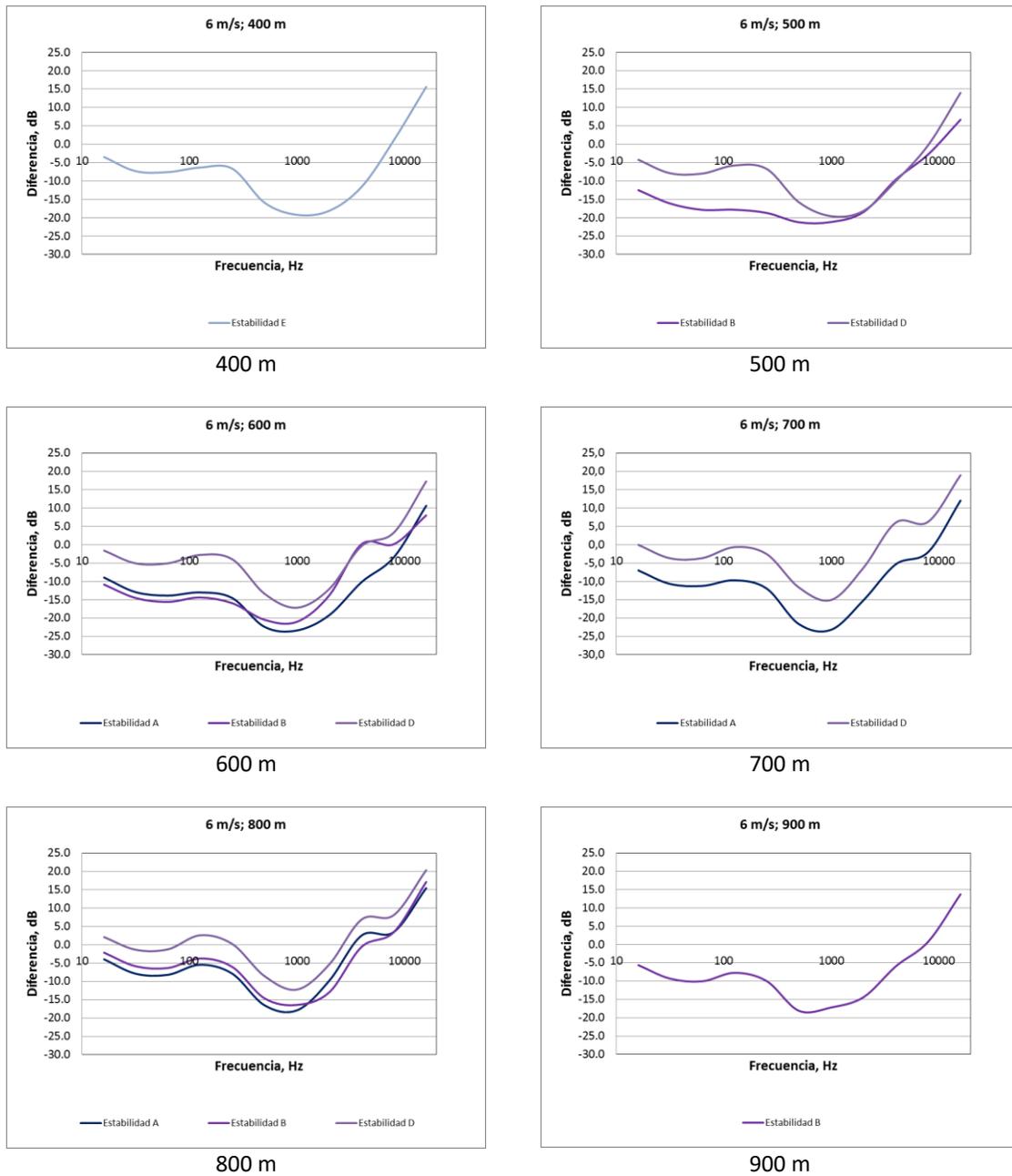
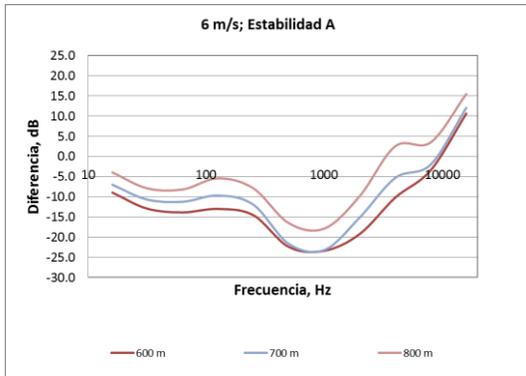
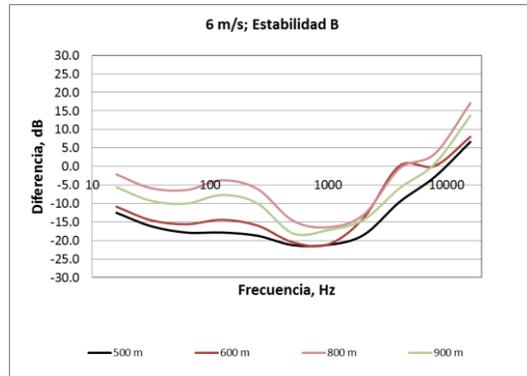


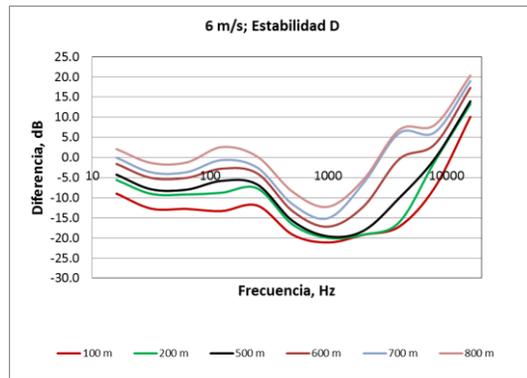
Figura F9. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 6 m/s.



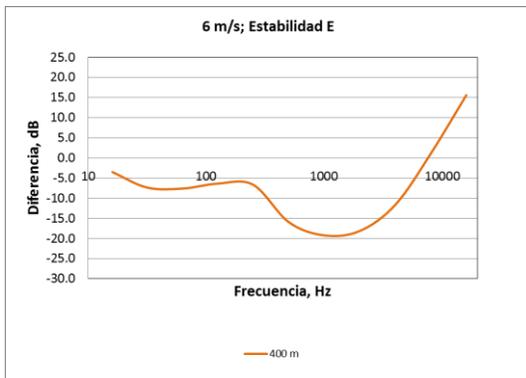
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura F10. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.



Tabla F6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-13,1	-16,6	-18,4	-15,9	-17,3	-17,1	-17,6	-14,4	-1,7	-5,3	4,1
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-7,6	-11,3	-12,0	-10,5	-12,6	-22,3	-24,2	-15,9	-5,5	-2,4	11,7
		Máxima	-7,3	-10,7	-11,1	-9,8	-11,9	-21,7	-23,0	-12,1	-1,2	-1,0	12,4
		Mínima	-8,1	-11,8	-12,7	-11,6	-13,6	-23,1	-25,4	-21,3	-13,0	-3,6	11,0
	800	Promedio	-8,7	-12,7	-13,8	-12,1	-14,9	-23,6	-23,2	-15,9	-4,5	0,2	11,3
		Máxima	-7,2	-11,0	-12,0	-10,0	-12,5	-21,9	-21,6	-12,4	0,0	2,1	12,5
		Mínima	-10,6	-14,9	-16,6	-15,2	-18,4	-26,9	-25,4	-20,5	-11,2	-3,1	9,7
B	600	Promedio	-10,2	-14,2	-15,0	-14,2	-16,0	-22,5	-20,3	-5,0	10,0	9,6	9,7
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	-10,8	-14,4	-14,6	-15,1	-13,6	-20,5	-22,3	-20,4	-18,3	-8,8	8,3
		Máxima	-10,4	-13,9	-14,1	-14,4	-13,2	-20,3	-22,3	-20,4	-18,2	-8,5	8,6
		Mínima	-11,1	-15,0	-15,2	-16,0	-14,1	-20,8	-22,3	-20,5	-18,4	-9,2	7,9
	200	Promedio	-6,8	-10,6	-10,7	-10,6	-9,8	-18,4	-21,4	-20,7	-17,1	-2,1	11,9
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	-5,8	-9,7	-9,8	-8,8	-9,1	-18,1	-21,0	-19,9	-13,3	-0,9	13,6
		Máxima	-5,1	-9,0	-9,1	-8,0	-8,3	-17,6	-20,7	-19,6	-12,9	-0,4	14,1
		Mínima	-6,6	-10,5	-10,6	-9,7	-10,1	-18,7	-21,3	-20,3	-13,7	-1,4	13,0
	500	Promedio	-4,6	-8,4	-8,4	-6,7	-7,5	-16,9	-20,0	-18,5	-9,4	0,7	14,8
		Máxima	-3,5	-7,2	-7,2	-5,2	-6,1	-15,5	-19,1	-17,8	-8,6	1,2	15,5
		Mínima	-5,4	-9,2	-9,3	-7,9	-8,7	-18,1	-20,9	-19,4	-11,0	-0,4	14,2
	600	Promedio	0,9	-2,3	-2,0	0,9	-0,5	-9,4	-13,9	-11,7	-1,6	4,7	18,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-1,4	-5,1	-5,2	-2,1	-4,0	-13,1	-16,9	-13,4	-3,0	3,4	17,6
		Máxima											
		Mínima											
	800	Promedio	-1,2	-5,2	-5,6	-2,4	-4,6	-13,6	-17,0	-13,2	-2,5	3,5	17,7
		Máxima											
		Mínima											
E	300	Promedio	-1,9	-5,4	-5,2	-3,8	-3,7	-13,0	-17,5	-16,8	-11,9	1,6	15,5
		Máxima	-1,1	-4,5	-4,3	-2,7	-2,7	-12,1	-16,7	-16,0	-11,4	1,9	15,8
		Mínima	-3,0	-6,7	-6,4	-5,2	-5,1	-14,3	-18,5	-17,5	-12,3	1,4	15,1

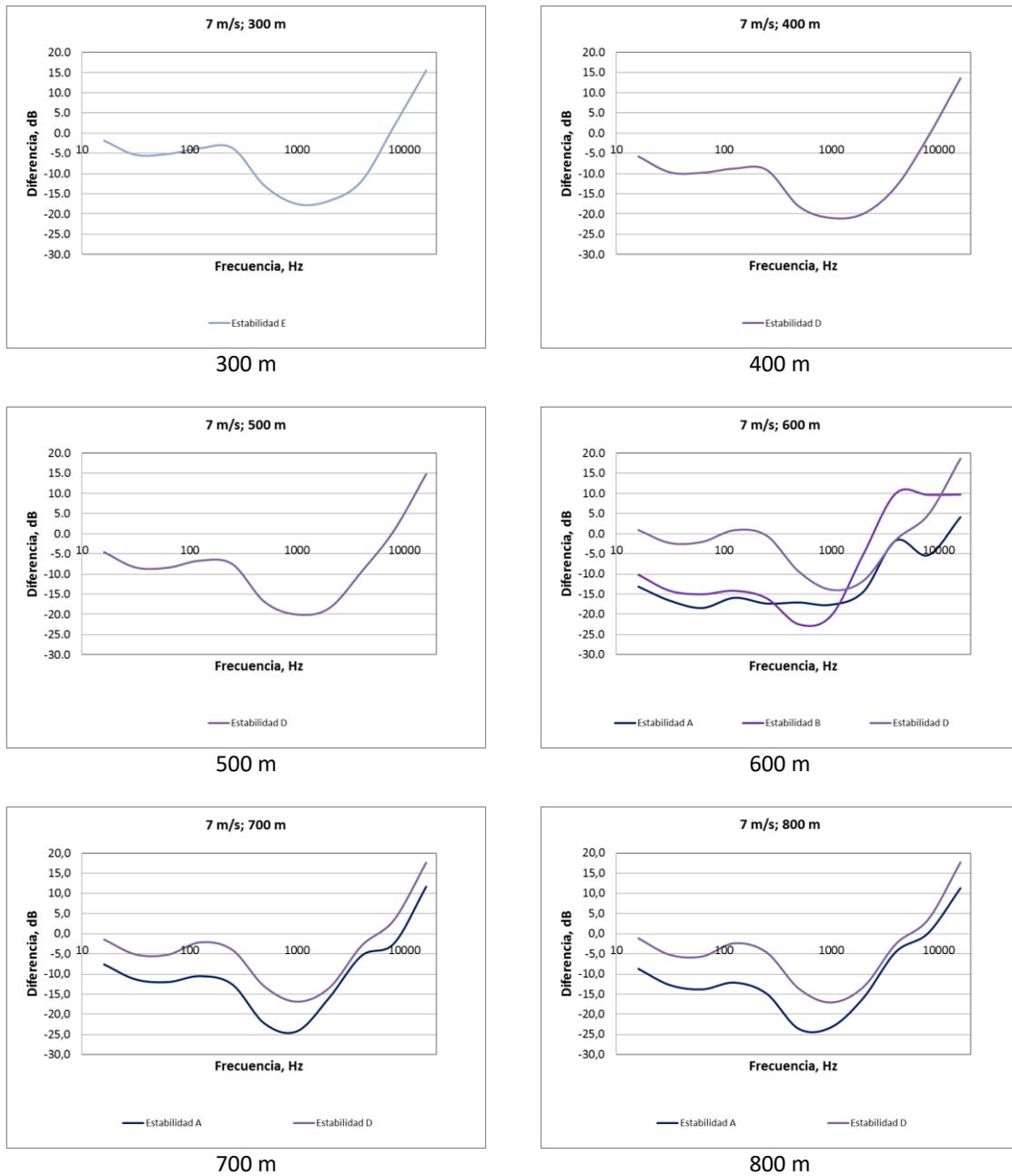
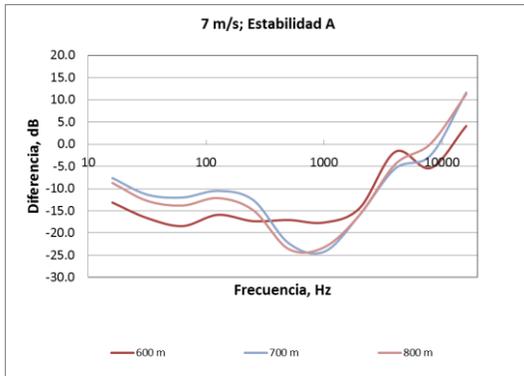
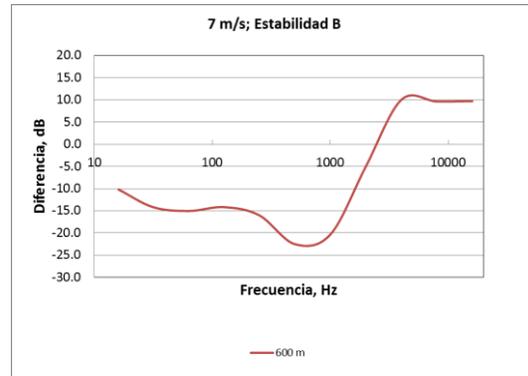


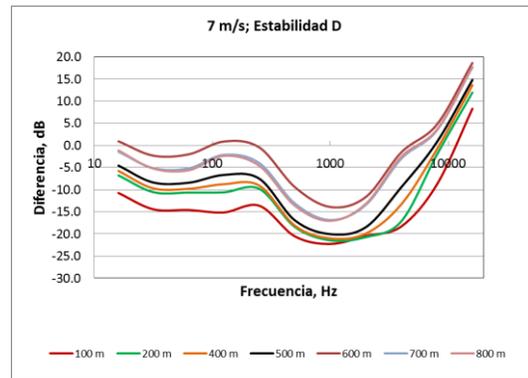
Figura F11. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 7 m/s.



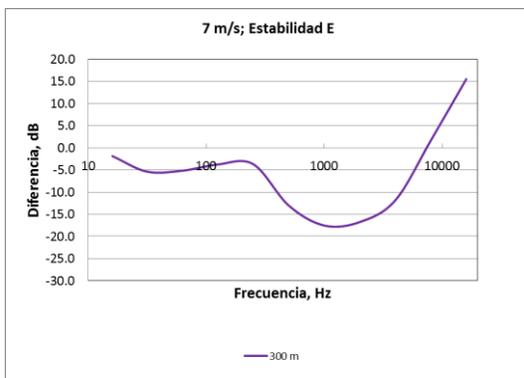
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura F12. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación cilíndrica para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.





## **ANEXO G**

### **NIVEL DE PRESIÓN SONORA RESIDUAL ESTIMADO CON EL MODELO DE PROPAGACIÓN COMBINADO (DIVERGENCIA ESFÉRICA Y CILÍNDRICA) DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD Y FRECUENCIA**





Tabla G1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	200	Promedio	29,5	26,5	25,4	23,7	27,5	23,8	24,4	34,9	42,1	48,1	50,2
		Máxima	31,6	28,2	25,8	24,5	28,2	24,5	24,7	36,8	44,5	50,5	51,5
		Mínima	25,2	23,5	24,9	22,7	26,7	23,0	24,1	31,2	36,1	41,8	48,3
	300	Promedio	38,1	34,4	31,6	31,9	31,7	25,0	24,1	26,0	32,0	42,1	56,0
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	42,5	38,9	36,4	37,3	36,5	27,9	28,8	30,9	40,5	50,2	62,1
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	42,5	39,0	36,6	37,6	36,3	27,7	27,6	33,3	47,6	52,0	61,8
		Máxima	44,2	40,5	38,5	39,6	38,4	30,6	31,3	37,4	52,4	56,6	64,5
		Mínima	40,2	37,0	34,2	34,7	33,4	24,1	22,9	27,1	37,8	43,5	58,0
600	Promedio	41,7	38,3	35,9	38,1	36,4	28,6	29,1	34,7	45,8	51,6	61,5	
	Máxima	45,5	41,8	39,7	41,9	40,3	30,3	29,5	37,1	46,5	52,6	64,9	
	Mínima	29,7	26,6	25,1	29,8	26,7	26,5	28,3	31,4	44,9	50,5	54,9	
B	600	Promedio	30,6	28,0	26,8	29,9	26,2	27,8	28,0	31,9	42,2	47,9	52,5
		Máxima											
		Mínima											
D	500	Promedio	31,2	28,3	26,6	29,1	27,6	29,3	30,6	33,1	46,5	55,5	55,9
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	33,0	29,6	27,0	30,7	26,6	27,8	28,5	31,9	41,7	47,1	52,3
		Máxima											
		Mínima											
E	400	Promedio	35,8	32,9	29,4	29,8	28,4	25,2	24,8	27,3	33,6	43,8	51,1
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	30,9	27,8	25,0	28,3	25,7	25,0	25,4	27,6	34,3	37,6	46,7
		Máxima	33,0	30,2	27,1	30,2	26,5	27,3	27,4	30,0	36,6	39,3	47,5
		Mínima	26,6	22,1	21,2	24,9	24,5	19,9	21,5	22,0	28,7	34,6	45,9
F	100	Promedio	33,9	32,1	29,7	32,2	37,4	34,9	32,2	33,5	35,4	44,6	53,3
		Máxima	38,0	35,6	32,1	35,2	40,0	38,0	34,0	35,4	37,9	48,0	57,5
		Mínima	18,7	19,9	22,2	18,7	27,9	25,1	25,0	24,2	25,8	35,3	41,8
	200	Promedio	35,2	33,2	29,1	28,7	35,3	31,8	30,0	30,9	34,6	48,0	54,0
		Máxima	39,7	37,7	33,8	33,4	39,4	36,1	34,0	34,4	38,2	50,1	58,7
		Mínima	27,0	23,0	18,8	20,5	26,8	20,4	21,0	22,2	26,9	41,3	43,7
	300	Promedio	34,1	32,4	29,8	30,4	33,7	33,7	30,5	31,0	34,3	42,0	50,1
		Máxima	37,7	34,9	34,0	33,2	38,0	35,4	32,5	32,4	36,4	47,4	55,1
		Mínima	25,0	24,0	21,2	22,9	23,7	21,6	21,0	23,7	26,9	34,1	43,7
	400	Promedio	31,5	30,1	27,3	29,6	28,7	29,1	28,3	29,1	35,4	37,0	45,9
		Máxima	31,9	30,4	27,6	30,0	29,0	29,6	28,5	29,2	35,6	37,6	46,3
		Mínima	31,3	29,9	26,9	29,3	28,4	28,8	28,2	29,1	35,2	35,6	45,3
	500	Promedio	33,3	28,9	28,2	28,8	26,4	22,7	23,9	27,5	35,6	43,0	48,0
		Máxima	36,1	32,4	31,1	30,5	27,5	23,7	24,3	28,1	36,7	45,4	49,1
		Mínima	27,3	25,3	22,6	26,9	25,4	21,8	22,9	26,6	34,5	36,2	46,3

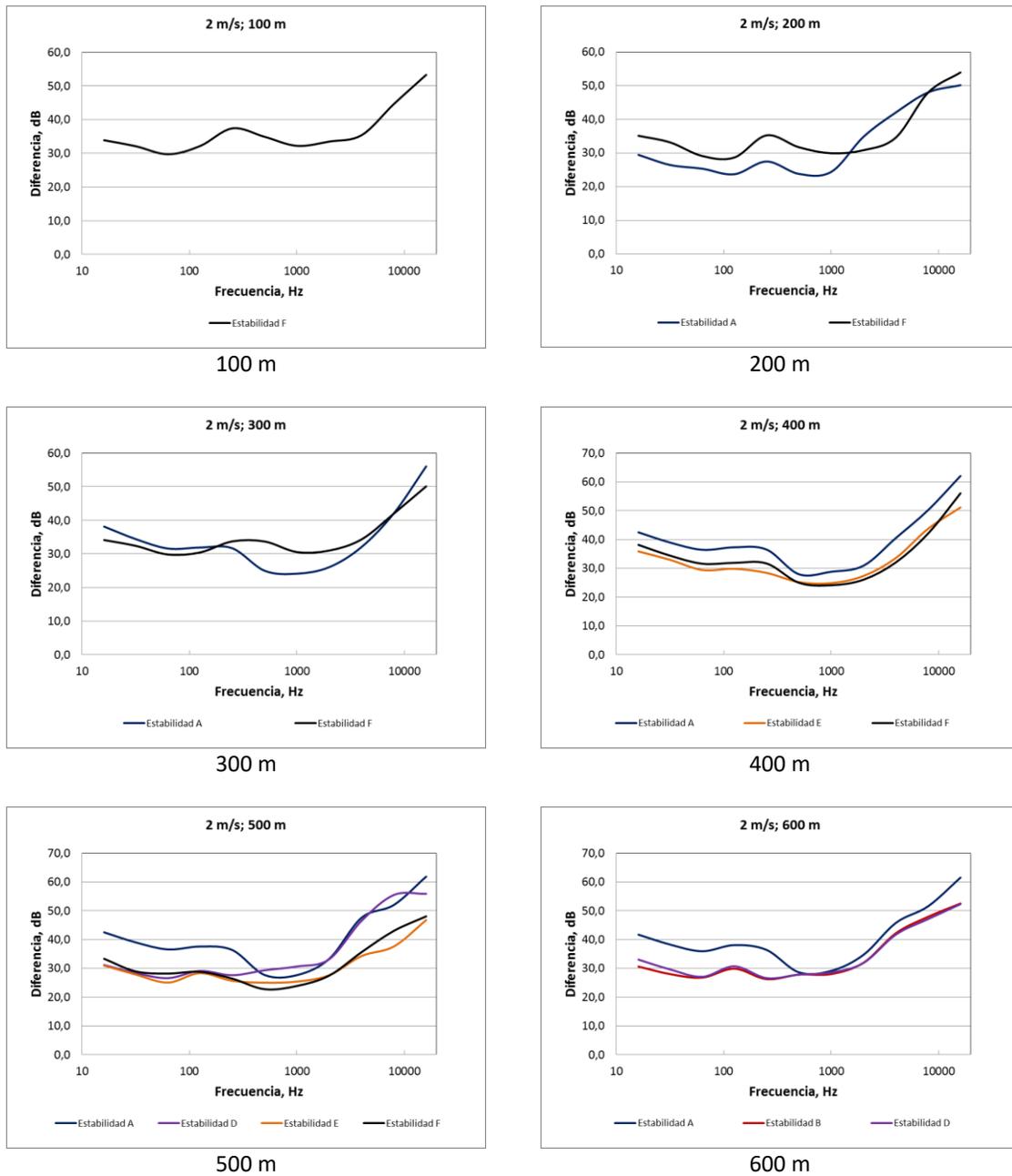


Figura G1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 2 m/s.

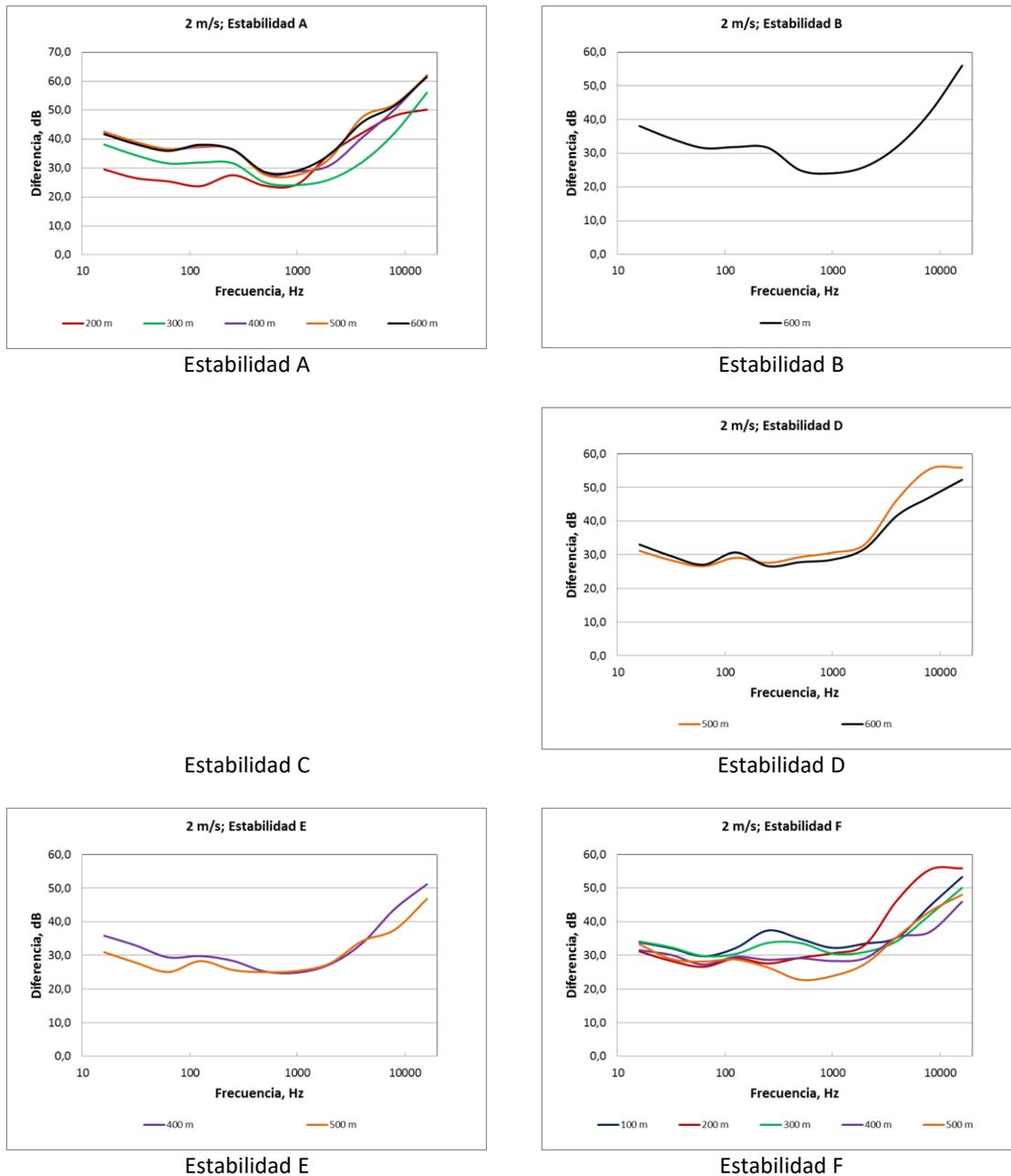


Figura G2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.



Tabla G2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	19,1	15,5	12,7	11,8	14,4	9,9	9,3	10,0	12,8	25,2	38,2
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	23,0	19,4	17,1	16,2	17,9	11,8	11,6	14,7	21,6	33,9	42,8
		Máxima	26,2	22,4	20,1	19,4	20,6	13,0	12,1	16,1	24,7	34,9	45,5
		Mínima	11,0	9,8	9,6	7,9	13,8	11,0	10,4	12,1	17,7	31,7	38,8
	300	Promedio	24,9	21,4	18,4	18,0	18,1	11,9	11,7	13,9	21,8	34,3	44,0
		Máxima	27,1	23,8	20,9	20,5	20,5	13,2	13,0	15,6	23,9	35,9	45,9
		Mínima	21,4	18,4	15,2	14,9	15,0	10,7	10,9	11,7	19,7	33,3	40,1
	400	Promedio	28,5	24,9	22,5	23,1	22,4	13,7	12,8	17,8	27,5	34,7	47,5
		Máxima	31,4	27,6	25,6	26,5	26,0	16,6	14,1	22,7	32,5	36,0	50,7
		Mínima	25,8	22,3	19,4	19,6	18,7	10,5	10,8	12,3	20,9	32,5	44,3
	500	Promedio	29,5	26,1	23,7	24,8	23,8	14,5	13,2	18,7	31,5	36,1	48,4
		Máxima	30,7	27,2	25,0	26,3	25,3	15,7	14,4	22,3	36,0	37,4	49,9
		Mínima	27,3	24,0	21,0	21,9	20,7	11,9	11,5	16,0	26,3	34,8	46,0
	600	Promedio	29,9	26,4	24,0	25,8	24,0	14,3	13,7	17,7	30,5	36,4	48,7
		Máxima	31,5	27,9	25,6	27,6	25,9	15,9	14,7	19,2	31,7	37,4	50,5
		Mínima	26,9	23,7	20,5	21,6	19,3	10,8	12,2	16,3	29,0	34,6	44,8
D	400	Promedio	19,8	16,3	14,2	16,6	17,4	18,7	16,1	20,0	25,1	27,9	34,1
		Máxima	19,8	16,6	14,3	16,9	17,5	18,7	16,3	20,1	25,8	28,8	34,6
		Mínima	19,7	16,1	14,1	16,4	17,3	18,7	15,9	20,0	24,3	26,7	33,5
E	300	Promedio	15,8	13,9	12,8	16,8	18,7	19,1	17,6	18,7	24,6	33,2	36,8
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	15,4	12,7	12,0	16,0	14,8	17,6	16,7	24,6	31,0	32,5	34,3
		Máxima	16,3	12,9	12,0	16,1	15,0	17,7	16,8	26,8	32,9	34,5	34,7
		Mínima	14,3	12,6	12,0	15,8	14,6	17,6	16,7	19,6	27,8	28,7	33,8
F	100	Promedio	25,5	22,9	19,7	19,5	25,2	22,0	20,5	21,7	25,1	35,4	45,0
		Máxima	26,8	23,9	20,9	20,6	25,9	22,9	21,2	22,1	25,7	37,1	46,6
		Mínima	19,1	19,2	16,8	16,5	23,9	21,2	20,1	21,4	24,5	34,5	36,3
	200	Promedio	25,3	24,1	19,8	19,1	26,5	23,0	20,9	21,4	25,1	36,9	43,4
		Máxima	26,3	24,7	20,8	20,0	26,8	23,3	21,1	21,6	25,3	37,0	45,2
		Mínima	24,8	23,8	19,2	18,5	26,0	22,5	20,7	21,2	24,9	36,7	42,1
	300	Promedio	17,5	16,4	14,0	16,6	21,5	16,8	16,2	16,9	21,7	28,2	33,2
		Máxima	19,4	17,9	16,3	22,7	28,2	21,2	19,9	19,5	24,2	29,7	35,9
		Mínima	16,0	12,9	9,1	10,0	10,5	7,4	6,9	7,1	12,9	21,8	30,8
	400	Promedio	16,7	14,1	11,7	14,3	14,8	15,5	13,9	19,8	27,9	31,2	34,8
		Máxima	18,6	16,2	14,0	15,5	17,4	18,7	16,5	23,3	31,5	35,4	37,3
		Mínima	13,3	12,1	8,9	11,3	9,9	8,2	8,5	10,1	16,4	24,5	32,5
	500	Promedio	20,6	17,9	14,8	17,9	14,2	14,8	14,8	17,5	24,9	28,2	36,0
		Máxima	20,9	18,1	15,2	18,0	14,4	14,9	14,8	17,5	25,7	29,8	36,3
		Mínima	20,2	17,7	14,2	17,8	13,9	14,8	14,8	17,5	24,0	25,9	35,7

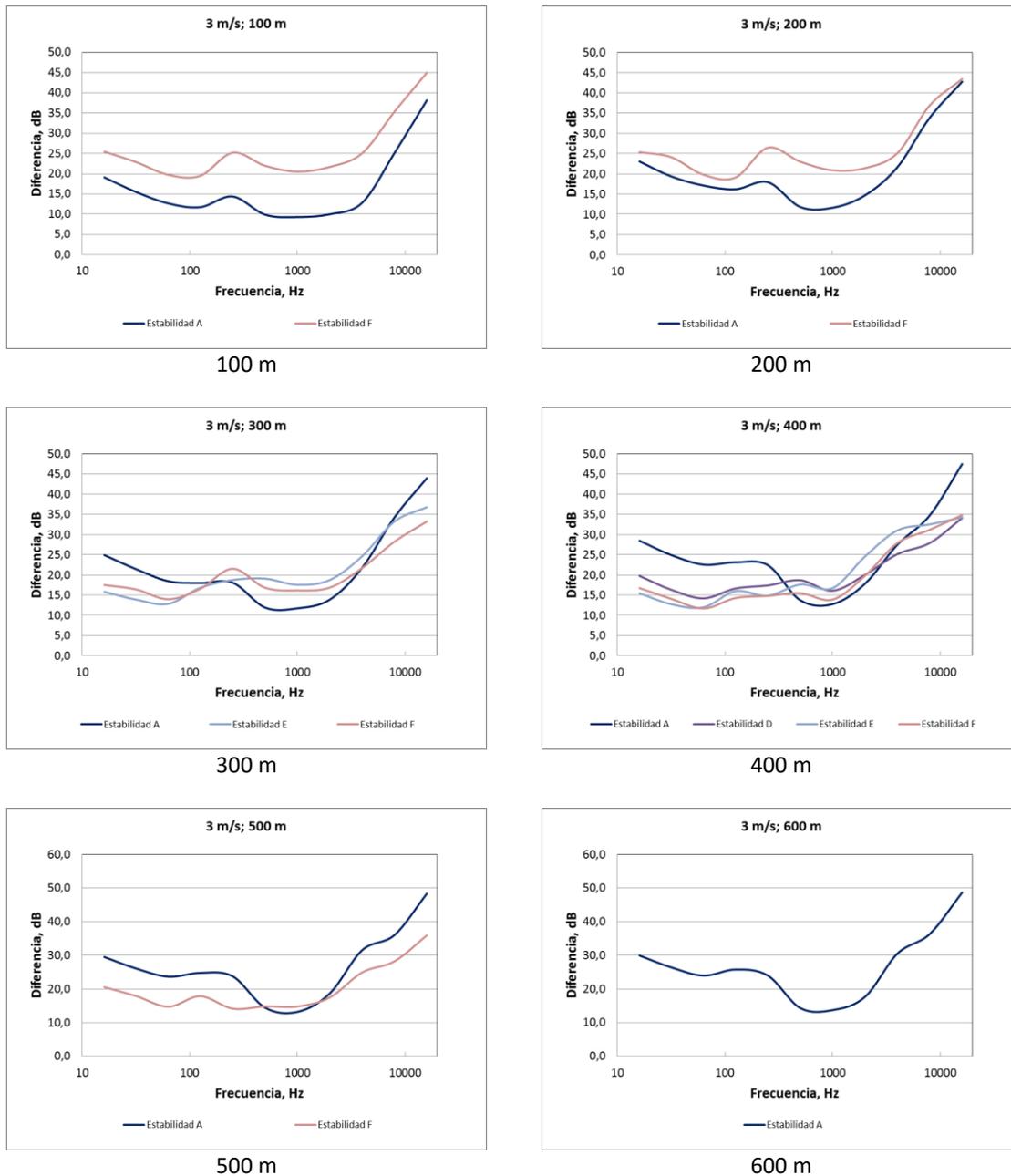
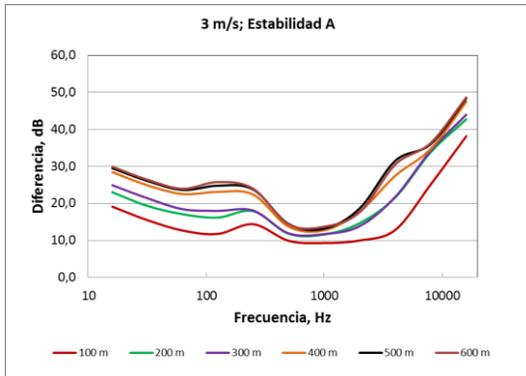
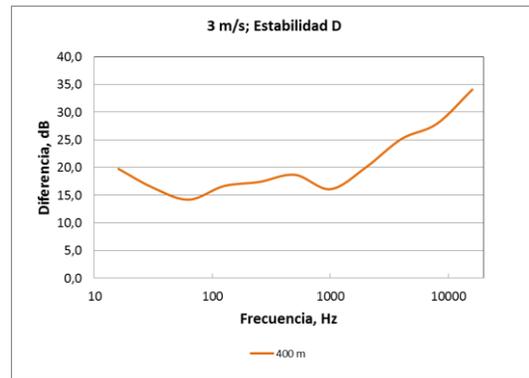


Figura G3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 3 m/s.



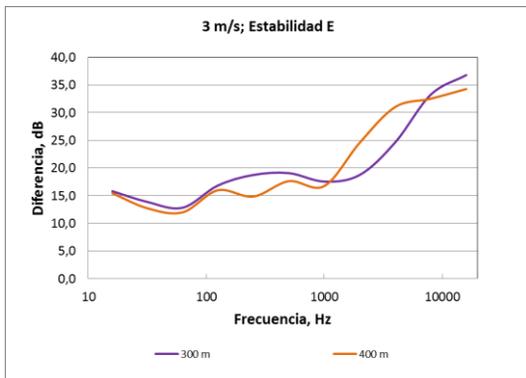
Estabilidad A

Estabilidad B

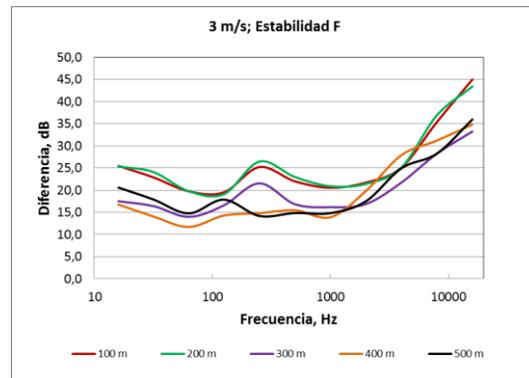


Estabilidad D

Estabilidad C



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura G4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.



Tabla G3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	11,4	7,3	6,0	4,5	6,6	1,9	0,7	2,0	5,3	16,4	30,0
		Máxima	13,7	9,5	8,4	6,5	8,2	2,5	0,7	2,5	5,8	16,6	32,3
		Mínima	6,6	2,9	0,7	0,9	4,3	1,3	0,6	1,4	4,5	16,3	24,8
	200	Promedio	15,4	11,6	10,2	7,9	9,5	1,9	0,7	2,6	9,2	22,4	34,1
		Máxima	15,9	12,3	10,9	8,8	10,2	2,5	1,6	3,9	11,9	24,8	35,0
		Mínima	14,2	10,2	8,5	6,1	8,2	0,9	0,0	1,6	6,3	20,3	32,1
	300	Promedio	16,9	13,1	11,0	9,0	9,2	2,4	2,2	6,0	15,4	26,7	35,7
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	18,4	14,7	13,4	12,7	11,8	2,6	0,8	3,5	14,9	22,5	36,8
		Máxima											
		Mínima											
600	Promedio	20,0	16,6	15,4	16,0	14,2	5,5	5,7	10,5	21,8	27,9	38,6	
	Máxima												
	Mínima												
B	100	Promedio	-2,7	-5,7	-4,7	-5,1	5,1	-2,5	-3,1	-1,2	1,5	7,8	19,1
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	1,0	-3,2	-4,9	-3,0	5,7	0,4	0,7	6,2	12,0	23,6	27,6
		Máxima	2,3	-2,3	-4,6	-2,4	6,6	0,6	1,5	7,5	13,5	24,5	28,4
		Mínima	-0,9	-4,5	-5,2	-3,6	4,5	0,1	-0,1	4,2	9,9	22,6	26,6
	900	Promedio	24,9	21,1	20,0	22,1	19,4	10,8	10,3	20,6	31,7	32,1	44,2
		Máxima											
		Mínima											
C	500	Promedio	20,5	16,2	15,0	15,9	14,2	11,9	10,5	11,6	18,5	25,1	39,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	4,6	1,6	1,4	1,0	11,1	8,9	7,6	10,1	10,8	17,4	37,6
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	8,1	5,1	6,0	4,3	9,5	8,6	8,3	8,1	9,9	18,8	40,5
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	9,4	5,7	5,6	8,2	10,2	11,0	9,4	14,6	25,0	29,4	31,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	19,0	15,0	13,8	14,9	14,2	11,2	9,9	16,3	28,1	30,3	38,8
		Máxima	23,1	19,0	18,0	18,9	17,5	12,9	11,7	19,0	32,4	33,0	42,9
		Mínima	14,0	10,5	9,2	11,0	11,2	10,2	8,3	11,1	18,9	25,6	35,0
	800	Promedio	32,2	28,7	28,6	32,0	29,5	20,7	18,8	32,6	46,6	45,4	50,7
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	26,7	22,9	22,1	24,7	22,0	12,8	11,4	18,1	28,1	33,0	46,3
		Máxima	28,2	24,4	23,9	27,1	24,4	14,9	12,3	19,6	29,9	33,8	47,6
		Mínima	25,6	21,7	20,3	22,1	19,1	10,5	10,6	15,3	25,1	31,6	45,4
E	400	Promedio	11,3	7,7	7,4	9,4	8,3	9,9	8,9	14,8	22,9	25,7	28,1
		Máxima	13,8	9,9	8,7	10,2	9,8	10,5	10,5	17,5	26,6	30,2	30,9
		Mínima	9,3	5,5	5,7	8,6	7,3	9,5	8,2	12,6	18,0	20,7	25,6



Tabla G3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s (continuación).

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
F	100	Promedio	13,1	11,5	10,0	8,9	15,3	12,3	11,1	12,9	16,8	27,1	32,0
		Máxima	18,3	15,2	13,8	12,5	18,3	14,5	12,1	13,3	17,7	28,5	37,9
		Mínima	10,1	10,7	8,8	8,1	15,5	12,8	11,4	13,1	17,1	26,4	24,4
	200	Promedio	10,5	10,4	9,9	7,3	15,8	17,0	11,2	12,9	17,8	28,1	29,2
		Máxima	16,0	15,0	11,6	10,0	18,3	17,6	12,1	13,3	18,7	30,5	33,6
		Mínima	7,1	7,6	8,8	6,2	14,6	12,8	10,7	12,5	17,1	24,7	20,4
F	300	Promedio	9,6	8,2	8,7	6,9	11,5	11,0	8,9	9,8	14,7	19,6	34,8
		Máxima	11,0	8,6	9,4	7,0	12,0	12,0	9,1	10,8	16,8	21,2	37,6
		Mínima	7,5	7,6	7,9	6,8	10,9	9,6	8,7	8,7	10,8	17,1	24,3
	400	Promedio	8,1	5,0	4,1	7,0	9,5	9,4	6,5	11,4	19,9	17,8	23,6
		Máxima											
		Mínima											

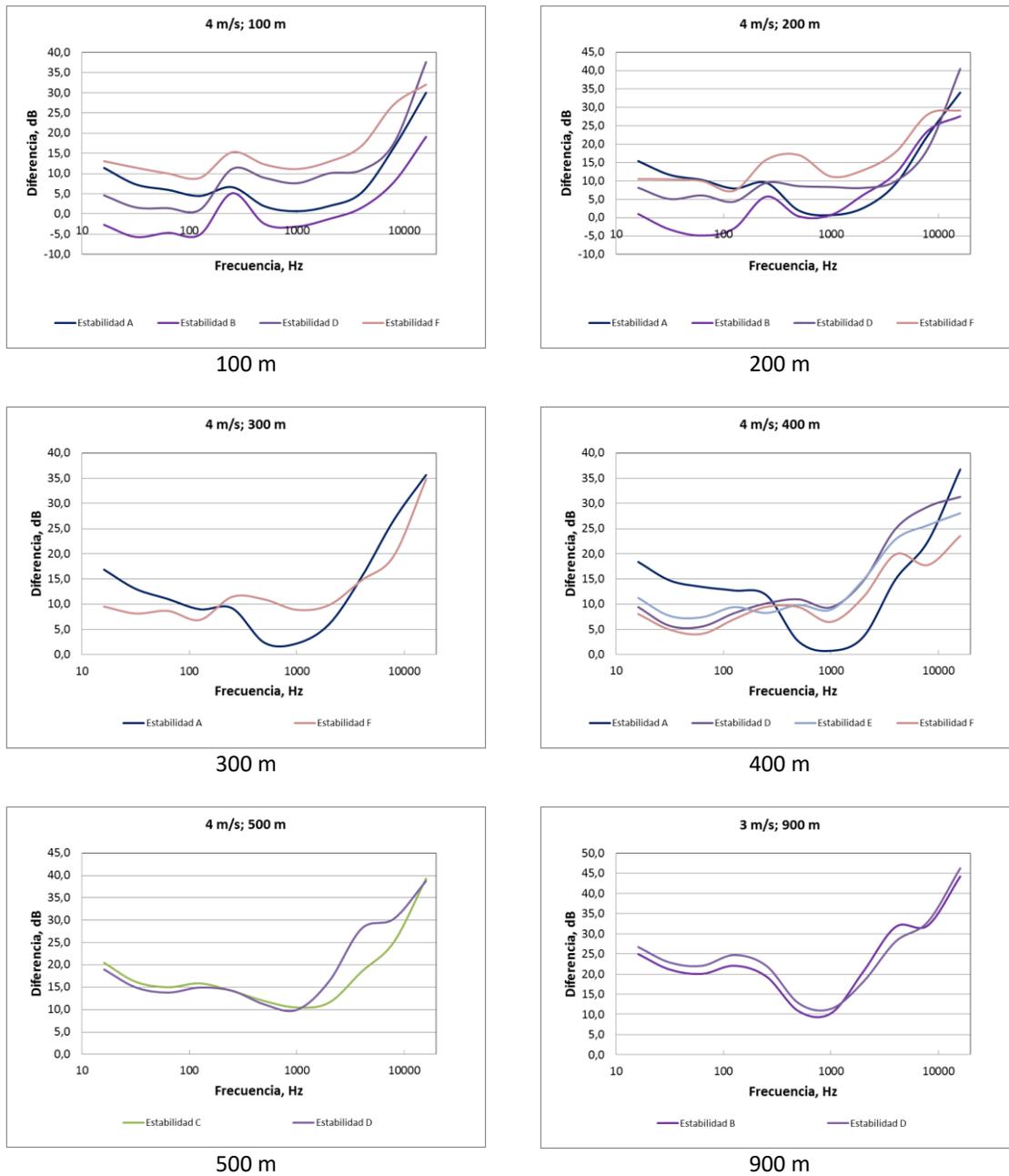


Figura G5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 4 m/s.

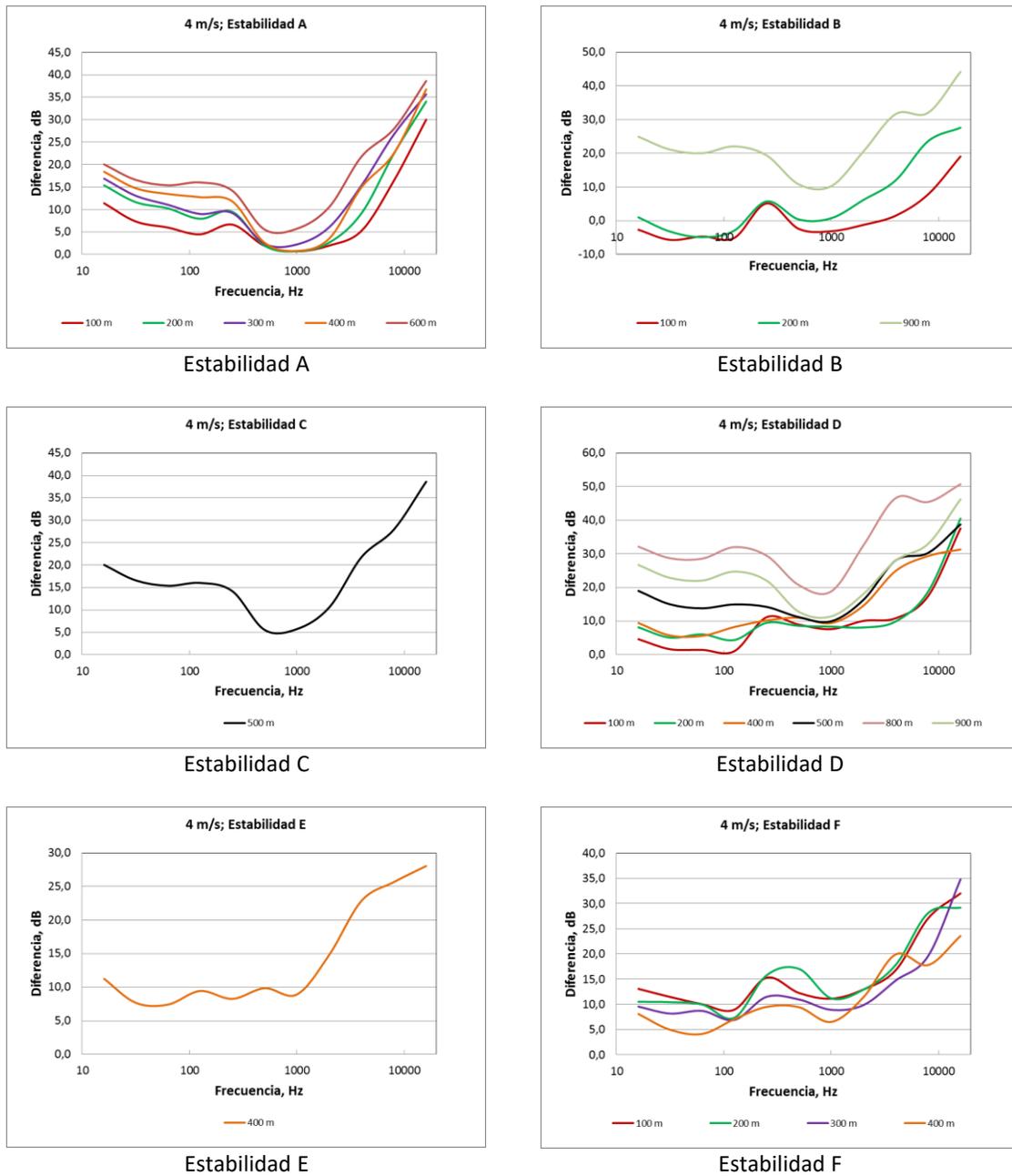


Figura G6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.



Tabla G4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)											
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
A	600	Promedio	9,6	5,8	3,4	5,6	3,6	0,0	0,0	5,2	16,4	19,0	26,2	
		Máxima												
		Mínima												
	700	Promedio	19,2	15,7	15,6	16,7	14,5	5,0	3,2	7,2	16,2	25,6	38,5	
		Máxima												
		Mínima												
B	100	Promedio	1,1	-2,7	-4,3	-5,9	1,0	-5,2	-6,0	-3,5	0,7	8,8	19,6	
		Máxima	1,9	-2,0	-3,6	-5,3	1,2	-4,7	-5,6	-3,2	1,7	9,9	21,0	
		Mínima	-0,8	-4,7	-7,5	-8,6	0,3	-6,8	-7,0	-4,2	0,3	8,3	19,4	
	500	Promedio	10,6	6,6	5,0	11,0	13,2	7,0	3,7	4,9	8,0	14,2	28,1	
		Máxima												
		Mínima												
	600	Promedio	14,2	10,1	8,7	9,7	7,9	1,5	0,5	4,9	13,0	18,5	32,4	
		Máxima												
		Mínima												
	900	Promedio	22,0	18,6	18,4	20,9	18,5	10,6	11,3	15,5	24,9	29,9	41,8	
		Máxima	22,9	19,8	19,7	22,4	19,8	12,3	13,0	17,8	27,5	32,0	43,2	
		Mínima	20,7	17,0	16,4	18,8	16,6	7,7	8,2	10,0	17,6	25,6	39,6	
	C	500	Promedio	9,9	6,4	4,6	8,2	5,6	7,4	7,0	16,5	35,1	32,5	28,1
			Máxima											
			Mínima											
		600	Promedio	11,5	8,3	6,5	9,9	8,2	9,2	9,1	11,7	23,6	20,8	27,3
			Máxima	12,6	9,2	7,6	10,5	9,1	9,5	9,6	12,4	24,6	23,0	29,2
			Mínima	9,9	7,2	5,0	9,2	7,2	8,8	8,6	11,0	22,3	16,2	23,9
D	500	Promedio	6,5	3,1	1,3	3,7	5,2	3,1	2,4	4,7	13,9	22,3	25,6	
		Máxima												
		Mínima												
	700	Promedio	28,2	24,7	24,8	28,3	26,5	17,5	13,4	18,6	29,2	32,3	46,3	
		Máxima												
		Mínima												
	800	Promedio	27,8	24,1	24,1	27,7	25,5	16,5	13,2	17,8	29,9	32,8	46,3	
		Máxima												
		Mínima												
	900	Promedio	18,6	15,0	13,8	16,3	13,7	6,7	8,2	10,4	17,8	23,8	37,2	
		Máxima												
		Mínima												

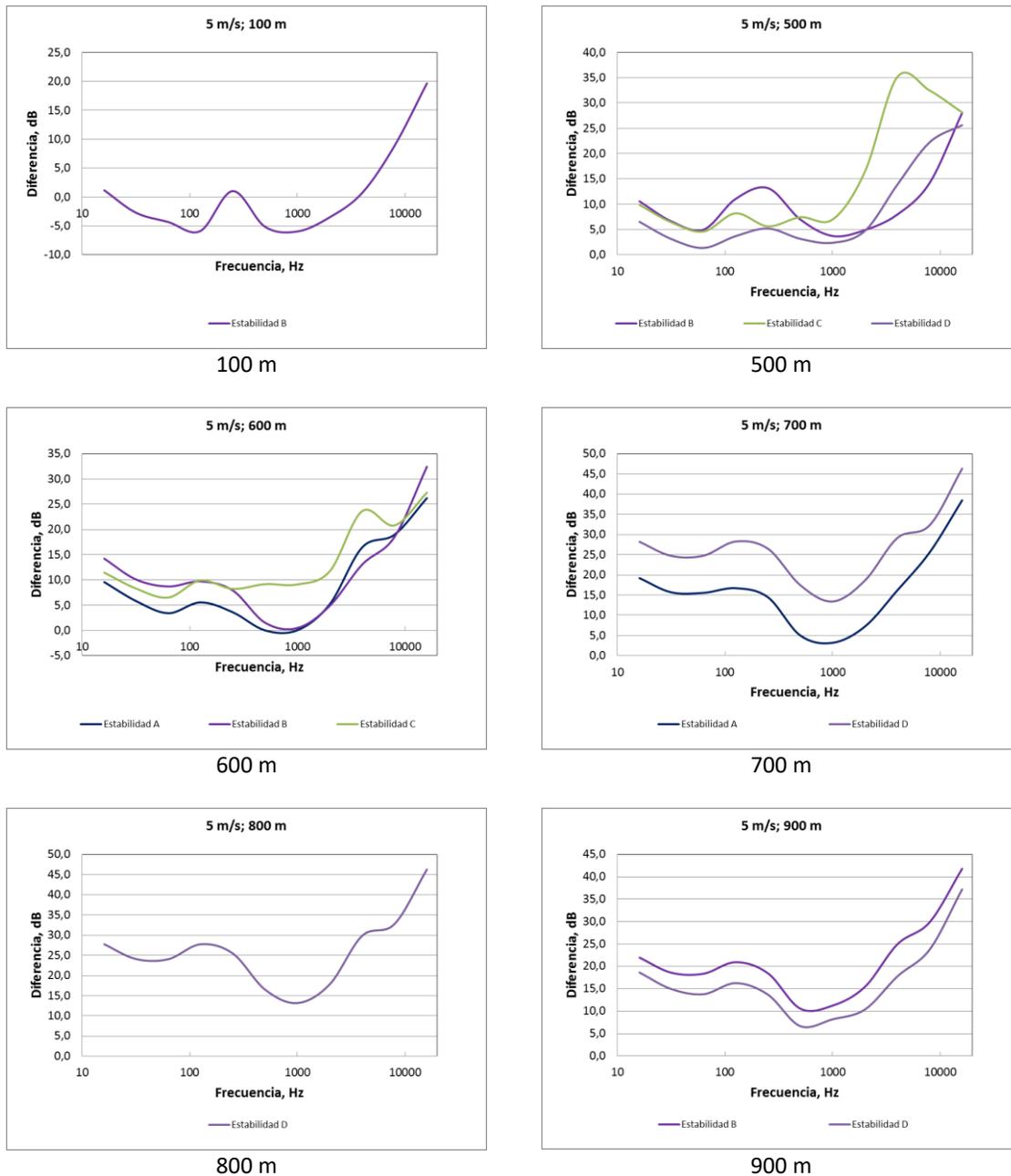
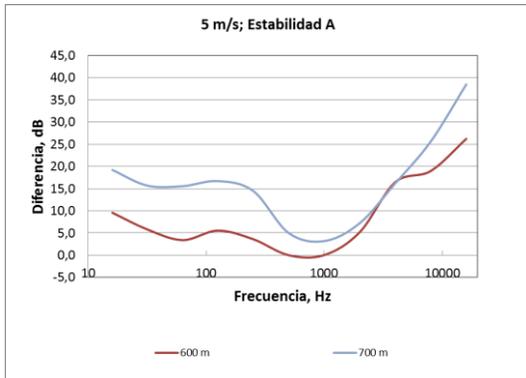
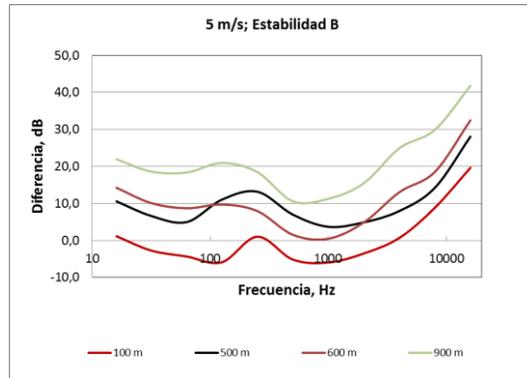


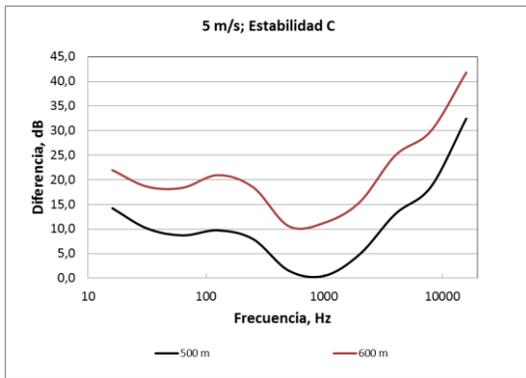
Figura G7. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 5 m/s.



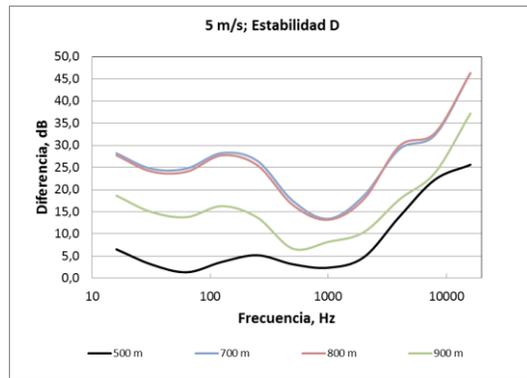
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad C



Estabilidad D

Estabilidad E

Estabilidad F

Figura G8. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.



Tabla G5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	21,8	17,8	16,9	17,8	16,2	8,3	7,4	11,5	20,6	27,4	41,4
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	24,4	20,8	20,2	21,8	19,5	9,8	8,3	16,3	26,1	29,5	43,5
		Máxima	25,4	21,7	21,3	23,2	21,0	11,3	9,0	17,8	28,2	30,2	44,4
		Mínima	23,2	19,6	18,8	19,5	17,2	7,5	7,3	14,1	21,9	28,6	42,4
	800	Promedio	28,0	24,1	23,8	26,6	24,1	15,5	14,1	22,2	34,5	35,5	47,5
		Máxima	30,0	26,2	26,1	29,1	26,7	18,2	16,5	24,0	36,0	37,1	49,4
		Mínima	24,2	20,0	18,5	19,5	16,6	7,4	8,3	19,1	32,4	33,0	44,1
B	500	Promedio	10,5	6,9	5,1	5,1	4,3	1,7	1,8	4,5	13,4	20,2	29,7
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	19,0	15,3	14,3	15,6	14,1	9,8	9,1	13,3	25,6	26,2	37,8
		Máxima	20,6	17,0	16,0	17,2	15,8	14,6	14,0	16,6	29,4	29,1	39,7
		Mínima	12,8	8,9	7,9	8,7	6,9	0,1	0,8	9,9	18,1	22,6	31,3
	800	Promedio	29,9	26,2	25,7	28,3	26,0	17,4	15,6	19,0	31,4	35,5	49,2
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	26,9	23,2	22,5	24,8	22,6	14,5	15,4	18,2	26,6	33,3	46,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	14,0	10,3	10,2	9,7	11,0	3,8	1,9	3,8	5,9	15,6	33,1
		Máxima	15,3	11,7	11,7	11,3	12,3	4,5	2,1	4,2	6,0	16,2	34,3
		Mínima	12,9	8,9	8,7	8,1	9,9	3,2	1,7	3,5	5,7	15,2	32,1
	200	Promedio	17,4	14,0	13,8	14,2	15,3	6,3	3,0	3,9	6,9	22,1	36,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	18,7	15,1	15,0	17,2	16,3	7,2	3,4	4,8	13,0	22,7	37,0
		Máxima	23,8	20,1	20,1	22,3	21,4	12,0	7,8	8,7	17,4	27,3	41,6
		Mínima	4,3	0,5	-1,6	0,2	-0,3	-1,6	-3,5	0,1	4,4	8,7	19,8
	600	Promedio	21,4	17,9	17,9	20,2	19,0	9,6	5,8	10,9	22,6	26,3	40,3
		Máxima	22,3	18,9	19,0	21,5	20,3	11,1	7,0	12,4	24,5	26,9	40,8
		Mínima	20,8	17,2	17,2	19,2	18,0	8,4	5,0	7,9	19,3	26,0	39,9
	700	Promedio	22,9	19,3	19,3	22,3	20,5	11,3	7,9	16,7	29,1	29,3	42,0
		Máxima	23,4	19,8	19,8	22,9	21,1	12,0	8,3	17,8	30,4	29,7	42,2
		Mínima	22,5	18,8	18,9	21,6	19,7	10,5	7,5	15,3	27,2	28,8	41,8
	800	Promedio	25,1	21,6	21,7	25,6	23,2	14,4	10,8	17,6	29,9	31,1	43,3
		Máxima	25,5	22,1	22,4	26,3	23,9	15,1	11,3	18,1	31,0	31,6	43,6
		Mínima	24,6	21,0	21,0	24,8	22,4	13,6	10,2	17,1	28,2	30,5	43,0
E	400	Promedio	19,5	15,6	15,4	16,6	16,3	7,1	3,8	4,9	11,3	24,1	38,6
		Máxima											
		Mínima											

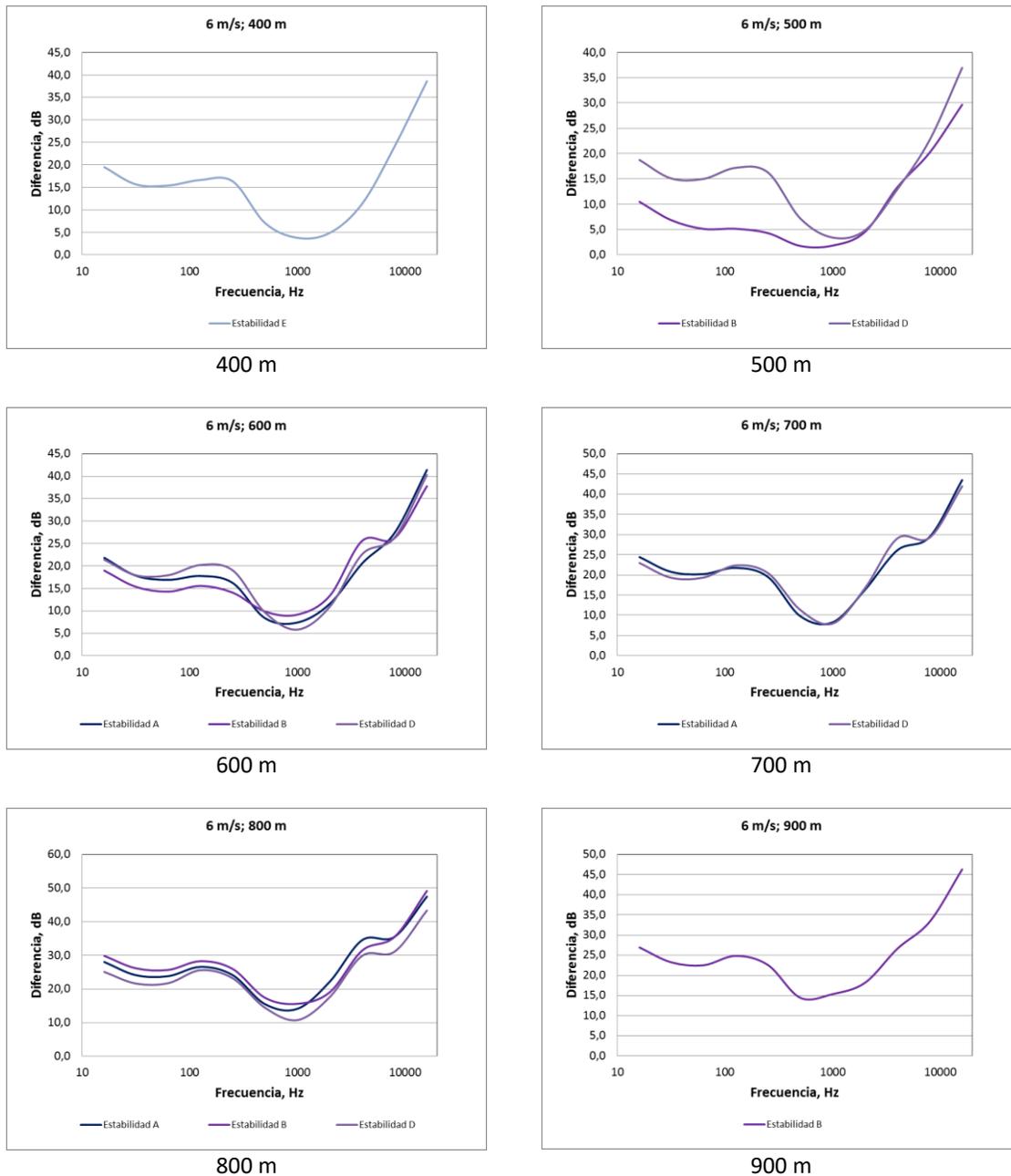
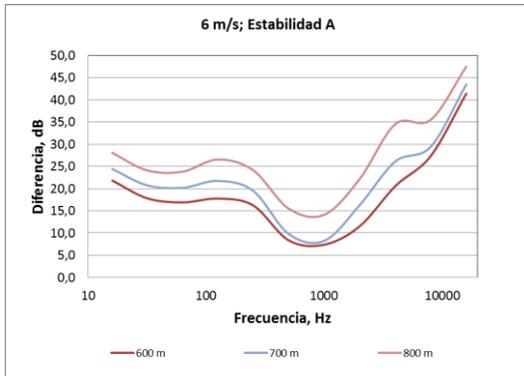
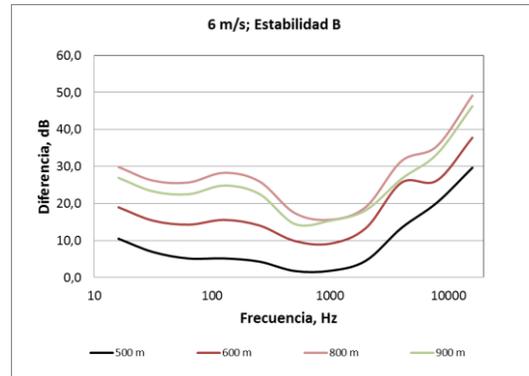


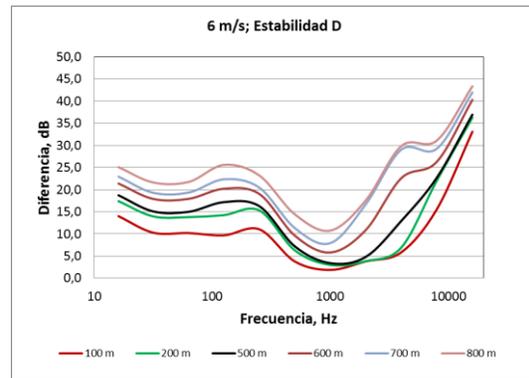
Figura G9. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 6 m/s.



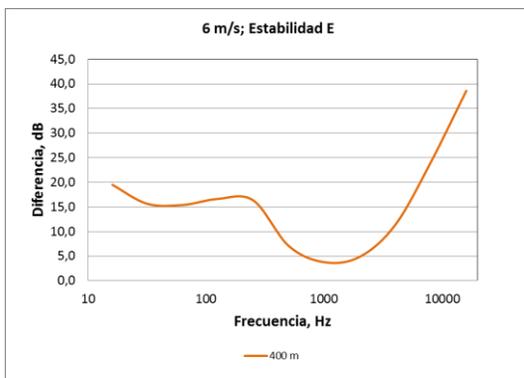
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura G10. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.



Tabla G6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	9,9	6,4	4,6	7,1	5,7	5,9	5,4	8,6	21,3	17,7	27,1
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	15,4	11,7	11,0	12,5	10,4	0,7	-1,2	7,1	17,5	20,6	34,7
		Máxima	15,7	12,3	11,9	13,2	11,1	1,3	0,0	10,9	21,8	22,0	35,4
		Mínima	14,9	11,2	10,3	11,4	9,4	-0,1	-2,4	1,7	10,0	19,4	34,0
	800	Promedio	14,3	10,3	9,2	10,9	8,1	-0,6	-0,2	7,1	18,5	23,2	34,3
		Máxima	15,8	12,0	11,0	13,0	10,5	1,1	1,4	10,6	23,0	25,1	35,5
		Mínima	12,4	8,1	6,4	7,8	4,6	-3,9	-2,4	2,5	11,8	19,9	32,7
B	600	Promedio	12,8	8,8	8,0	8,8	7,0	0,5	2,7	18,0	33,0	32,6	32,7
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	12,2	8,6	8,4	7,9	9,4	2,5	0,7	2,6	4,7	14,2	31,3
		Máxima	12,6	9,1	8,9	8,6	9,8	2,7	0,7	2,6	4,8	14,5	31,6
		Mínima	11,9	8,0	7,8	7,0	8,9	2,2	0,7	2,5	4,6	13,8	30,9
	200	Promedio	16,2	12,4	12,3	12,4	13,2	4,6	1,6	2,3	5,9	20,9	34,9
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	17,2	13,3	13,2	14,2	13,9	4,9	2,0	3,1	9,7	22,1	36,6
		Máxima	17,9	14,0	13,9	15,0	14,7	5,4	2,3	3,4	10,1	22,6	37,1
		Mínima	16,4	12,5	12,4	13,3	12,9	4,3	1,7	2,7	9,3	21,6	36,0
	500	Promedio	18,4	14,6	14,6	16,3	15,5	6,1	3,0	4,5	13,6	23,7	37,8
		Máxima	19,5	15,8	15,8	17,8	16,9	7,5	3,9	5,2	14,4	24,2	38,5
		Mínima	17,6	13,8	13,7	15,1	14,3	4,9	2,1	3,6	12,0	22,6	37,2
	600	Promedio	23,9	20,7	21,0	23,9	22,5	13,6	9,1	11,3	21,4	27,7	41,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	21,6	17,9	17,8	20,9	19,0	9,9	6,1	9,6	20,0	26,4	40,6
		Máxima											
		Mínima											
800	Promedio	21,8	17,8	17,4	20,6	18,4	9,4	6,0	9,8	20,5	26,5	40,7	
	Máxima												
	Mínima												
E	300	Promedio	21,1	17,6	17,8	19,2	19,3	10,0	5,5	6,2	11,1	24,6	38,5
		Máxima	21,9	18,5	18,7	20,3	20,3	10,9	6,3	7,0	11,6	24,9	38,8
		Mínima	20,0	16,3	16,6	17,8	17,9	8,7	4,5	5,5	10,7	24,4	38,1

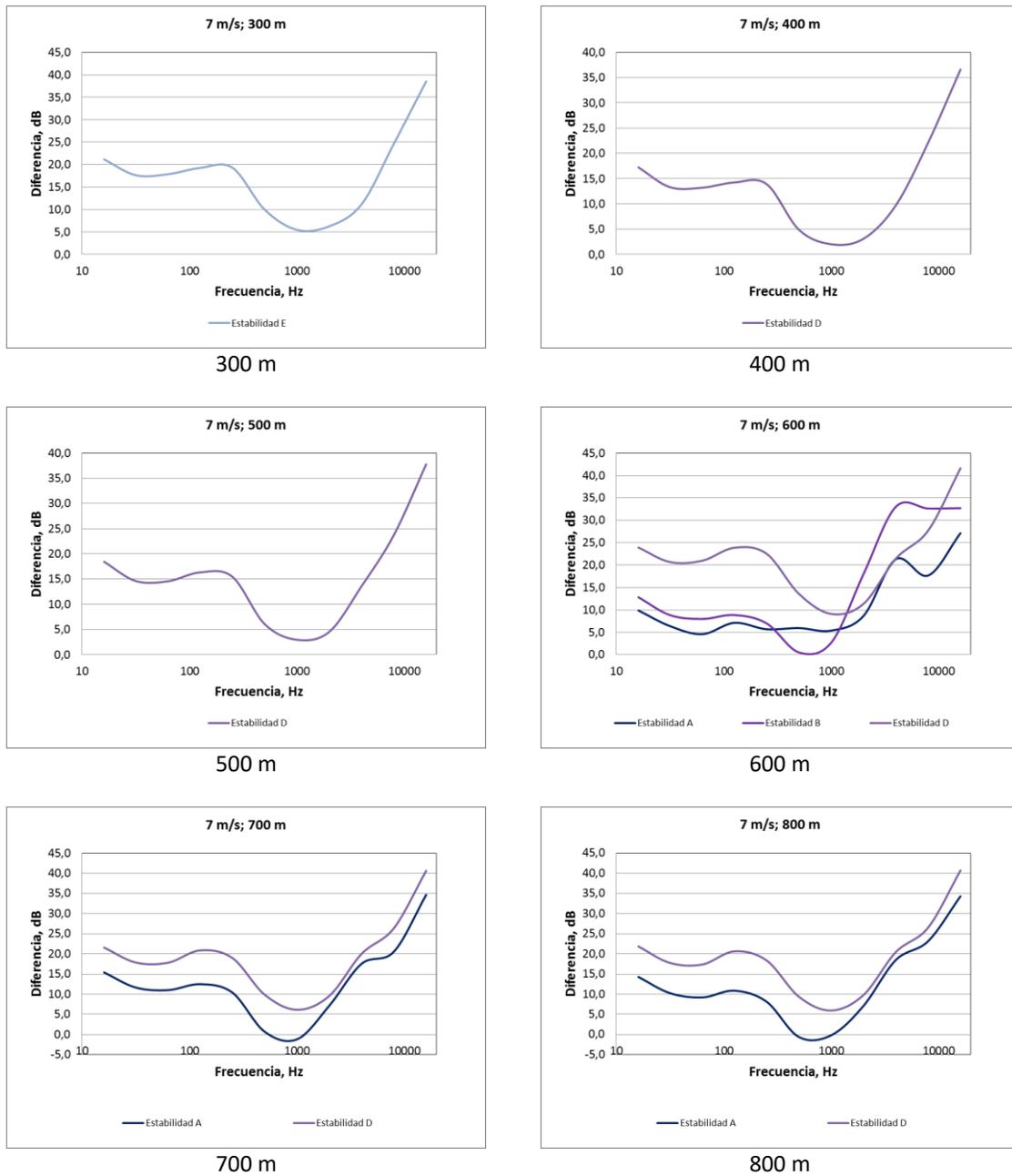
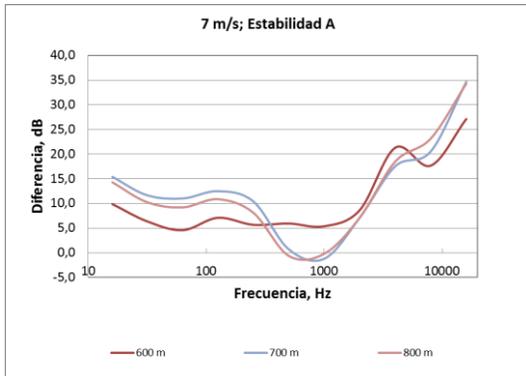
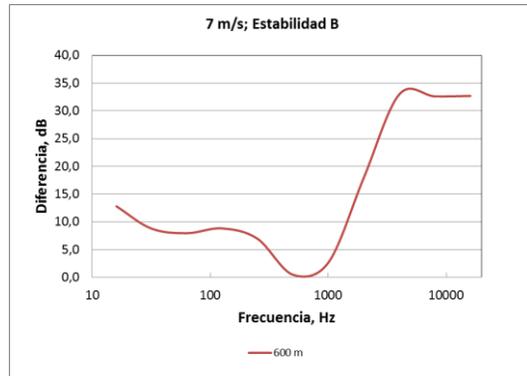


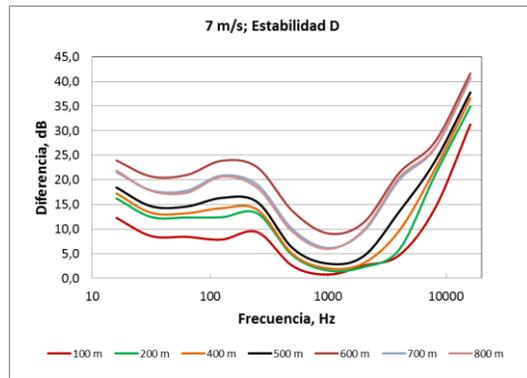
Figura G11. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 7 m/s.



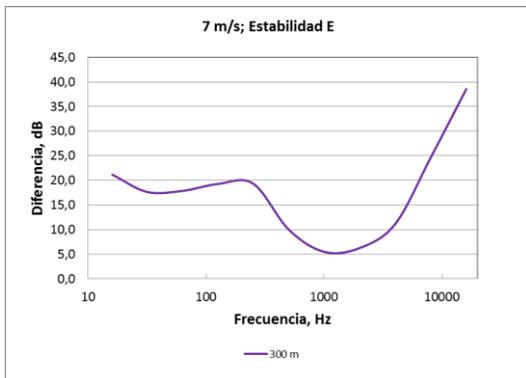
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura G12. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación combinado para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.





## **ANEXO H**

### **NIVEL DE PRESIÓN SONORA RESIDUAL ESTIMADO CON EL MODELO DE PROPAGACIÓN PROMEDIO (PROMEDIO ENTRE LA DIVERGENCIA ESFÉRICA Y CILÍNDRICA) DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD Y FRECUENCIA**





Tabla H1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	200	Promedio	19,5	16,5	15,4	13,7	17,5	13,8	14,4	24,9	32,1	38,1	40,2
		Máxima	21,6	18,2	15,8	14,5	18,2	14,5	14,8	26,8	34,5	40,5	41,5
		Mínima	15,2	13,5	14,9	12,8	16,8	13,1	14,1	21,2	26,1	31,8	38,3
	300	Promedio	29,0	25,3	22,5	22,8	22,6	15,9	15,0	16,9	22,9	33,0	46,9
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	34,0	30,5	27,9	28,8	28,0	19,4	20,3	22,4	32,0	41,7	53,6
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	34,5	31,0	28,5	29,6	28,3	19,7	19,6	25,3	39,5	44,0	53,8
		Máxima	36,2	32,5	30,5	31,6	30,4	22,6	23,2	29,4	44,4	48,6	56,5
		Mínima	32,2	29,0	26,2	26,7	25,4	16,1	14,9	19,1	29,7	35,5	50,0
600	Promedio	34,1	30,6	28,3	30,5	28,8	21,0	21,5	27,1	38,2	43,9	53,9	
	Máxima	37,8	34,2	32,1	34,3	32,7	22,7	21,9	29,5	38,9	45,0	57,2	
	Mínima	22,1	19,0	17,5	22,2	19,1	18,8	20,7	23,8	37,3	42,9	47,3	
B	600	Promedio	23,0	20,4	19,1	22,2	18,6	20,2	20,4	24,3	34,6	40,3	44,9
		Máxima											
		Mínima											
D	500	Promedio	23,2	20,3	18,6	21,1	19,6	21,3	22,6	25,1	38,5	47,5	47,9
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	25,4	22,0	19,4	23,1	19,0	20,2	20,9	24,3	34,1	39,5	44,7
		Máxima											
		Mínima											
E	400	Promedio	27,4	24,4	20,9	21,3	19,9	16,7	16,4	18,8	25,1	35,3	42,6
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	22,9	19,8	17,0	20,3	17,6	17,0	17,4	19,6	26,2	29,6	38,7
		Máxima	25,0	22,2	19,1	22,2	18,5	19,3	19,4	22,0	28,6	31,3	39,5
		Mínima	18,6	14,1	13,2	16,9	16,5	11,9	13,5	14,0	20,7	26,6	37,9
F	100	Promedio	22,4	20,6	18,2	20,7	25,9	23,4	20,7	22,0	23,9	33,1	41,8
		Máxima	26,5	24,1	20,6	23,7	28,5	26,5	22,5	23,9	26,4	36,5	46,0
		Mínima	7,2	8,4	10,7	7,2	16,4	13,6	13,5	12,7	14,3	23,8	30,3
	200	Promedio	25,2	23,2	19,2	18,7	25,3	21,8	20,0	20,9	24,6	38,0	44,0
		Máxima	29,7	27,7	23,8	23,4	29,4	26,1	24,0	24,5	28,2	40,1	48,7
		Mínima	17,0	13,0	8,8	10,5	16,8	10,4	11,0	12,2	17,0	31,3	33,7
	300	Promedio	30,2	29,1	24,9	26,4	29,7	30,4	27,3	27,6	31,0	37,6	45,1
		Máxima	39,2	38,3	33,5	35,4	38,7	39,7	36,6	36,9	40,3	46,4	53,6
		Mínima	15,9	14,9	12,1	13,8	14,6	12,5	11,9	14,6	17,8	25,0	34,6
	400	Promedio	23,0	21,6	18,8	21,1	20,2	20,6	19,8	20,7	26,9	28,5	37,5
		Máxima	23,5	21,9	19,1	21,5	20,6	21,1	20,0	20,7	27,1	29,1	37,8
		Mínima	22,8	21,4	18,4	20,8	19,9	20,3	19,8	20,6	26,7	27,1	36,8
	500	Promedio	25,3	20,9	20,2	20,8	18,4	14,7	15,9	19,5	27,6	35,0	40,0
		Máxima	28,1	24,4	23,1	22,5	19,5	15,6	16,3	20,1	28,7	37,3	41,1
		Mínima	19,3	17,3	14,6	18,9	17,4	13,8	14,9	18,6	26,5	28,2	38,3

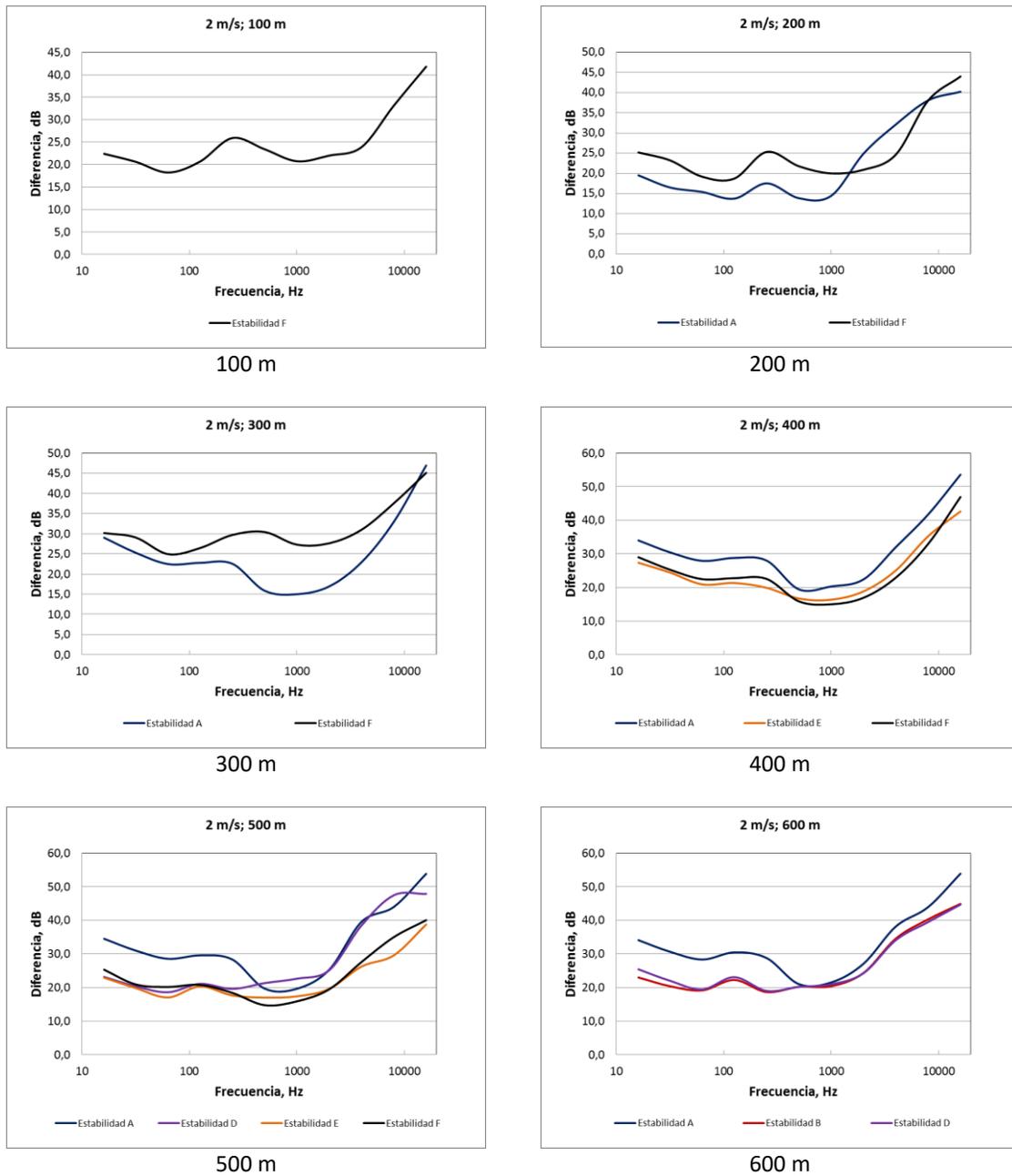
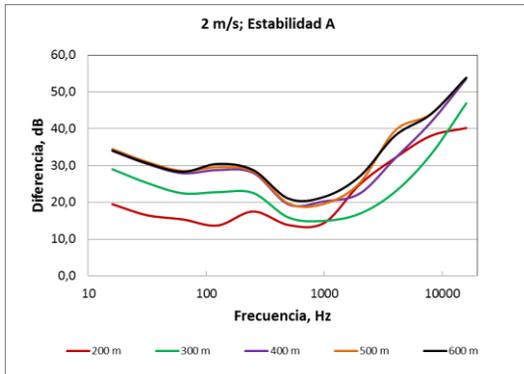
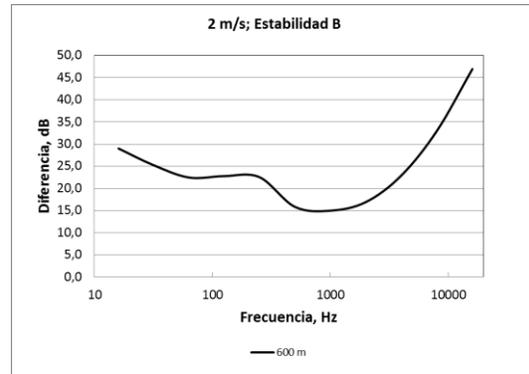


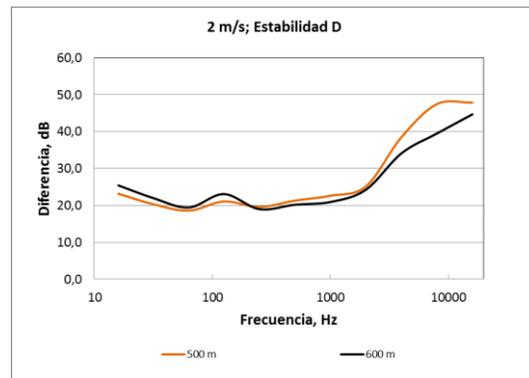
Figura H1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 2 m/s.



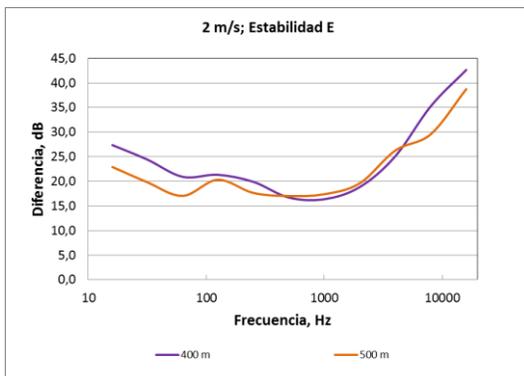
Estabilidad A



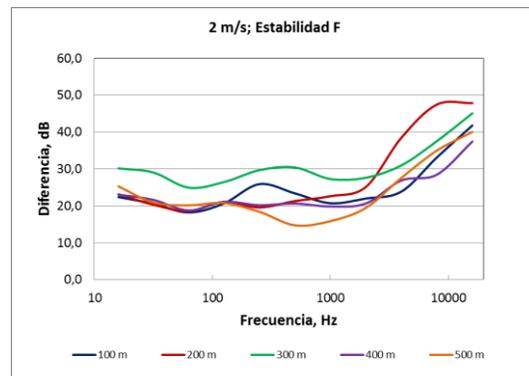
Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura H2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.



Tabla H2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	7,6	4,0	1,2	0,3	2,9	-1,6	-2,2	-1,5	1,3	13,7	26,7
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	13,0	9,4	7,1	6,2	7,9	1,8	1,6	4,7	11,6	23,9	32,8
		Máxima	16,2	12,4	10,2	9,4	10,6	3,0	2,1	6,1	14,7	24,9	35,5
		Mínima	1,0	-0,2	-0,4	-2,1	3,9	1,0	0,4	2,1	7,7	21,7	28,9
	300	Promedio	15,8	12,3	9,3	8,9	9,0	2,8	2,6	4,8	12,7	25,2	34,9
		Máxima	18,0	14,7	11,8	11,4	11,4	4,1	3,9	6,4	14,8	26,8	36,8
		Mínima	12,3	9,3	6,1	5,8	5,9	1,6	1,7	2,6	10,6	24,2	31,0
	400	Promedio	20,0	16,4	14,1	14,6	13,9	5,2	4,3	9,3	19,0	26,3	39,0
		Máxima	22,9	19,2	17,1	18,1	17,5	8,2	5,7	14,2	24,0	27,5	42,2
		Mínima	17,3	13,9	10,9	11,1	10,2	2,0	2,3	3,8	12,4	24,0	35,8
	500	Promedio	21,5	18,1	15,6	16,8	15,8	6,4	5,2	10,7	23,5	28,1	40,4
		Máxima	22,7	19,2	17,0	18,3	17,3	7,7	6,4	14,3	28,0	29,4	41,8
		Mínima	19,3	16,0	13,0	13,9	12,7	3,9	3,5	8,0	18,3	26,8	38,0
	600	Promedio	22,3	18,8	16,4	18,2	16,4	6,7	6,1	10,0	22,9	28,8	41,1
		Máxima	23,8	20,2	18,0	20,0	18,3	8,3	7,1	11,6	24,1	29,8	42,9
		Mínima	19,3	16,1	12,9	14,0	11,7	3,2	4,6	8,7	21,4	27,0	37,2
D	400	Promedio	11,3	7,8	5,7	8,1	8,9	10,2	7,6	11,5	16,7	19,4	25,6
		Máxima	11,3	8,1	5,8	8,4	9,0	10,2	7,8	11,6	17,3	20,3	26,1
		Mínima	11,2	7,6	5,6	7,9	8,8	10,2	7,4	11,5	15,8	18,2	25,1
E	300	Promedio	6,7	4,8	3,7	7,7	9,6	10,0	8,4	9,6	15,5	24,1	27,7
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	6,9	4,2	3,5	7,5	6,3	9,1	8,2	16,1	22,5	24,0	25,8
		Máxima	7,9	4,4	3,5	7,7	6,6	9,2	8,3	18,3	24,4	26,0	26,2
		Mínima	5,8	4,1	3,5	7,3	6,1	9,1	8,2	11,1	19,3	20,2	25,3
F	100	Promedio	14,0	11,4	8,2	8,0	13,7	10,5	9,0	10,2	13,6	23,9	33,5
		Máxima	15,3	12,4	9,4	9,1	14,4	11,4	9,7	10,6	14,2	25,6	35,1
		Mínima	7,6	7,7	5,3	5,0	12,4	9,7	8,6	9,9	13,0	23,0	24,8
	200	Promedio	15,3	14,1	9,8	9,1	16,5	13,0	10,9	11,4	15,1	26,9	33,4
		Máxima	16,3	14,7	10,8	10,1	16,8	13,3	11,1	11,6	15,3	27,0	35,2
		Mínima	14,8	13,8	9,2	8,5	16,1	12,5	10,7	11,3	14,9	26,7	32,1
	300	Promedio	8,4	7,3	4,9	7,5	12,4	7,7	7,0	7,7	12,6	19,1	24,1
		Máxima	10,3	8,8	7,2	13,5	19,1	12,1	10,8	10,4	15,1	20,6	26,8
		Mínima	6,9	3,8	0,0	0,9	1,3	-1,7	-2,2	-2,1	3,8	12,7	21,7
	400	Promedio	8,2	5,6	3,2	5,8	6,3	7,0	5,4	11,3	19,4	22,7	26,3
		Máxima	10,2	7,7	5,5	7,0	9,0	10,2	8,0	14,8	23,0	26,9	28,8
		Mínima	4,8	3,6	0,4	2,8	1,4	-0,3	0,0	1,6	8,0	16,0	24,0
	500	Promedio	12,6	9,9	6,7	9,9	6,2	6,8	6,8	9,5	16,9	20,2	28,0
		Máxima	12,9	10,1	7,2	9,9	6,4	6,9	6,8	9,5	17,7	21,8	28,2
		Mínima	12,2	9,7	6,2	9,7	5,9	6,7	6,8	9,5	16,0	17,9	27,6

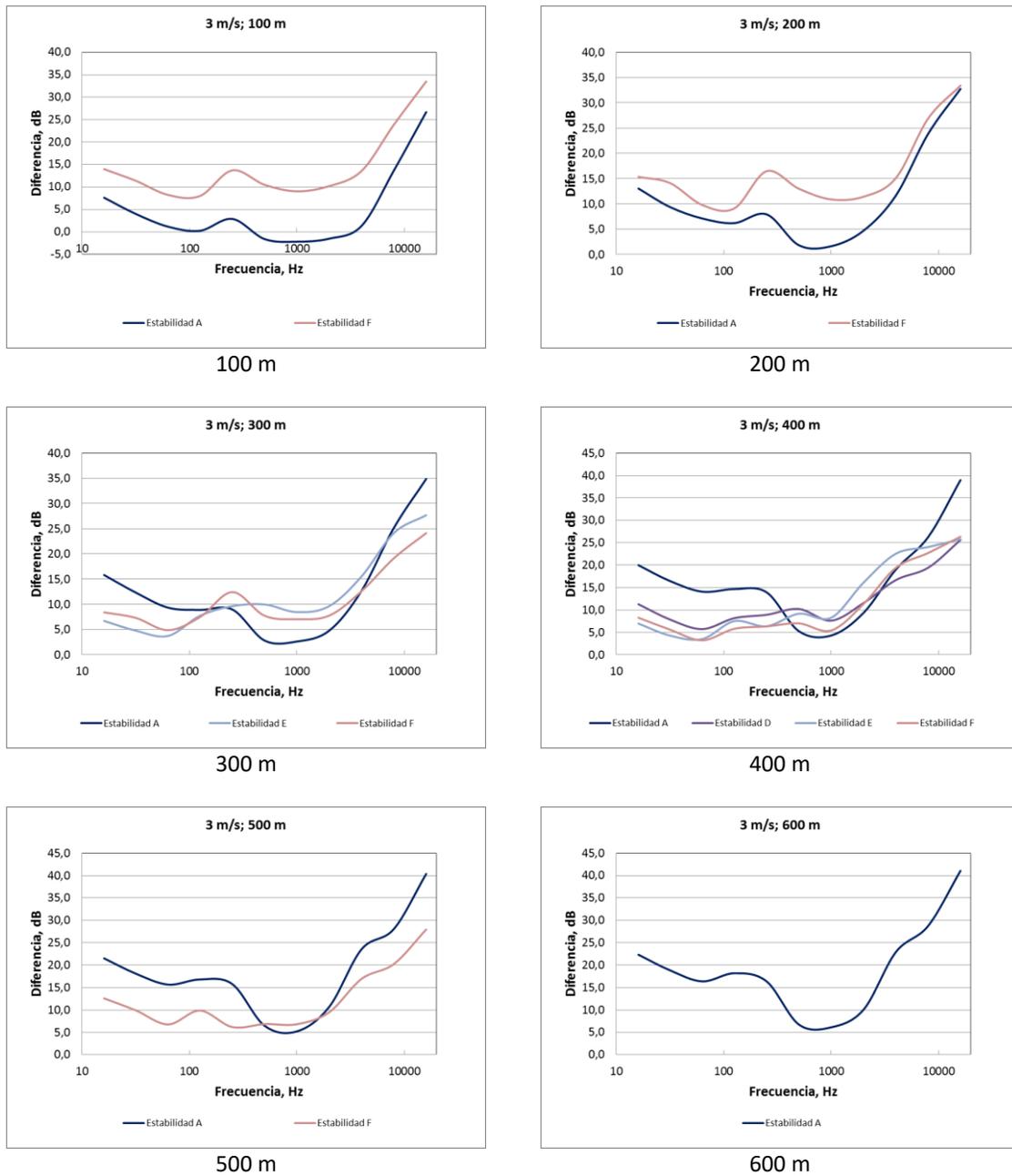
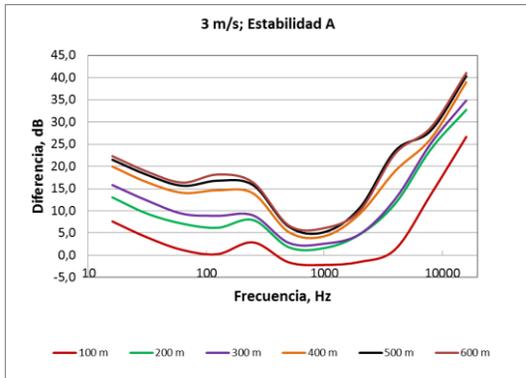
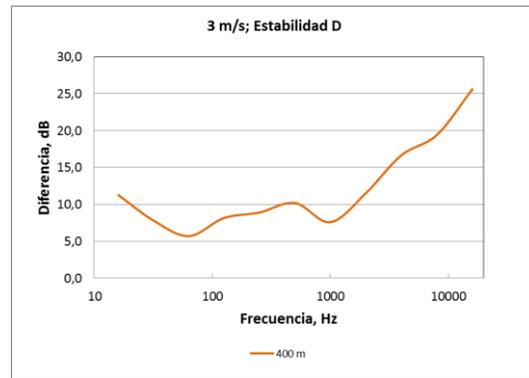


Figura H3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 3 m/s.



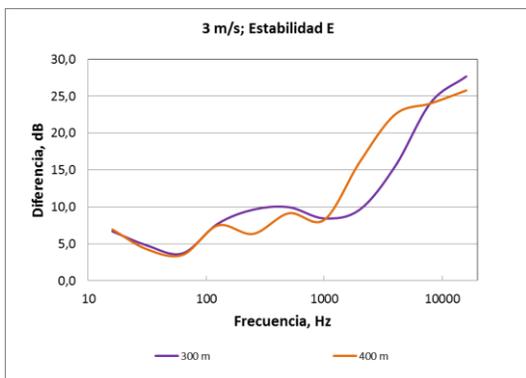
Estabilidad A

Estabilidad B

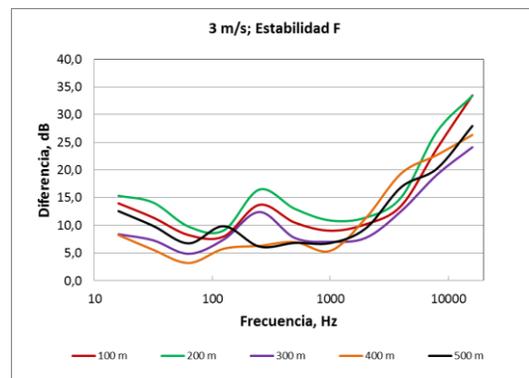


Estabilidad D

Estabilidad C



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura H4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.



Tabla H3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	-0,1	-4,2	-5,5	-7,0	-4,9	-9,6	-10,8	-9,5	-6,2	4,9	18,5
		Máxima	2,2	-2,0	-3,1	-5,0	-3,3	-9,0	-10,8	-9,0	-5,7	5,1	20,8
		Mínima	-4,9	-8,6	-10,8	-10,6	-7,2	-10,2	-10,9	-10,1	-7,0	4,8	13,3
	200	Promedio	5,4	1,6	0,2	-2,1	-0,5	-8,1	-9,3	-7,4	-0,8	12,4	24,1
		Máxima	5,9	2,3	1,0	-1,2	0,2	-7,5	-8,4	-6,0	1,9	14,8	25,0
		Mínima	4,2	0,2	-1,5	-3,9	-1,8	-9,1	-10,0	-8,4	-3,7	10,3	22,1
	300	Promedio	7,7	3,9	1,9	-0,1	0,1	-6,8	-6,9	-3,1	6,2	17,6	26,5
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	9,9	6,2	5,0	4,2	3,3	-5,9	-7,7	-5,0	6,5	14,0	28,3
		Máxima											
		Mínima											
600	Promedio	12,4	9,0	7,8	8,4	6,6	-2,1	-1,9	2,9	14,2	20,3	31,0	
	Máxima												
	Mínima												
B	100	Promedio	-14,2	-17,2	-16,2	-16,6	-6,4	-14,0	-14,6	-12,7	-10,0	-3,7	7,6
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	-9,0	-13,2	-14,9	-12,9	-4,3	-9,6	-9,3	-3,8	2,0	13,6	17,6
		Máxima	-7,7	-12,3	-14,6	-12,4	-3,3	-9,4	-8,5	-2,5	3,5	14,5	18,4
		Mínima	-10,9	-14,5	-15,2	-13,5	-5,5	-9,9	-10,1	-5,8	-0,1	12,6	16,6
900	Promedio	18,2	14,4	13,3	15,3	12,7	4,0	3,5	13,9	25,0	25,3	37,5	
	Máxima												
	Mínima												
C	500	Promedio	12,5	8,2	7,0	7,9	6,2	3,9	2,5	3,6	10,5	17,1	31,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	-6,9	-9,9	-10,1	-10,5	-0,4	-2,6	-3,9	-1,4	-0,7	5,9	26,1
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	-1,9	-4,9	-3,9	-5,7	-0,5	-1,4	-1,7	-1,9	-0,1	8,8	30,5
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	0,9	-2,8	-2,9	-0,3	1,7	2,5	0,9	6,1	16,5	20,9	22,8
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	11,0	7,0	5,8	6,9	6,2	3,2	1,9	8,3	20,1	22,3	30,7
		Máxima	15,1	11,0	10,0	10,9	9,5	4,9	3,7	11,0	24,4	25,0	34,8
		Mínima	6,0	2,5	1,2	3,0	3,2	2,2	0,3	3,1	10,9	17,6	27,0
	800	Promedio	25,2	21,7	21,6	25,0	22,5	13,7	11,8	25,6	39,6	38,5	43,8
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	20,0	16,1	15,3	18,0	15,3	6,0	4,7	11,3	21,3	26,3	39,5
		Máxima	21,5	17,7	17,2	20,3	17,7	8,2	5,5	12,9	23,2	27,1	40,9
		Mínima	18,9	15,0	13,6	15,3	12,4	3,8	3,8	8,5	18,3	24,9	38,7
E	400	Promedio	2,8	-0,8	-1,1	1,0	-0,2	1,4	0,4	6,3	14,4	17,2	19,6
		Máxima	5,3	1,4	0,2	1,8	1,3	2,0	2,0	9,0	18,1	21,7	22,4
		Mínima	0,8	-3,0	-2,8	0,1	-1,2	1,0	-0,3	4,1	9,5	12,2	17,1



Tabla H3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s (continuación).

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
F	100	Promedio	1,6	0,0	-1,5	-2,6	3,8	0,8	-0,4	1,4	5,3	15,6	20,5
		Máxima	6,8	5,0	2,3	1,0	8,3	4,5	2,1	3,1	7,6	18,6	26,4
		Mínima	-1,4	-0,8	-2,7	-3,4	4,0	1,3	-0,1	1,6	5,6	14,9	12,9
	200	Promedio	0,5	0,4	-0,1	-2,7	5,8	7,0	1,2	2,9	7,8	18,1	19,2
		Máxima	6,0	5,0	1,6	0,0	8,3	7,6	2,1	3,2	8,7	20,5	23,7
		Mínima	-2,9	-2,4	-2,7	-3,8	4,0	1,3	0,4	1,6	6,0	14,7	10,4
F	300	Promedio	0,4	-1,0	-0,4	-2,2	2,4	1,8	-0,2	0,7	5,6	10,5	25,7
		Máxima	1,8	-0,5	0,3	-2,1	2,8	2,9	-0,1	1,6	7,6	12,0	28,5
		Mínima	-1,7	-1,5	-1,3	-2,3	1,8	0,5	-0,4	-0,4	1,7	8,0	15,2
	400	Promedio	-0,4	-3,5	-4,4	-1,5	1,0	0,9	-2,0	2,9	11,4	9,3	15,1
		Máxima											
		Mínima											

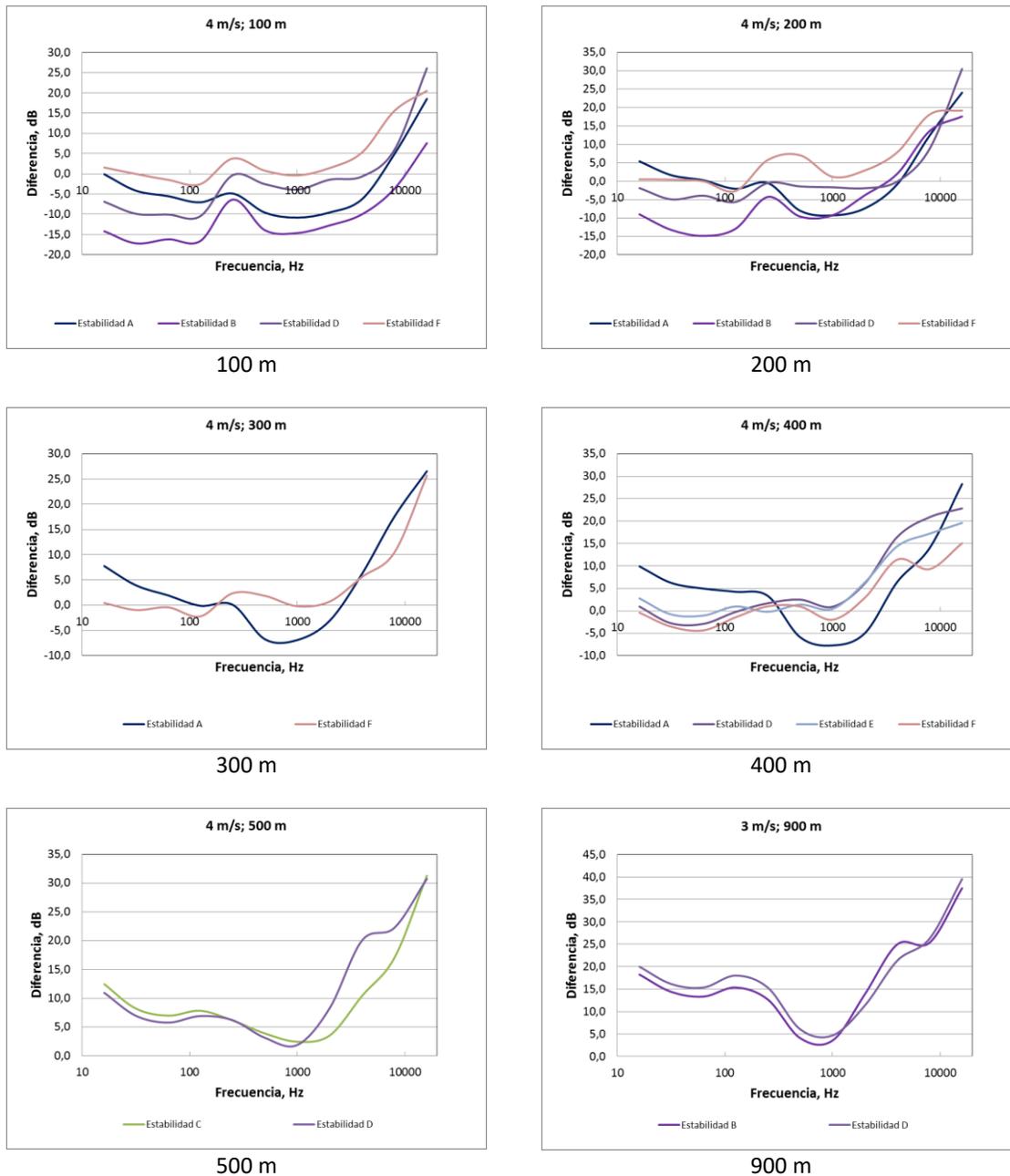


Figura H5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 4 m/s.

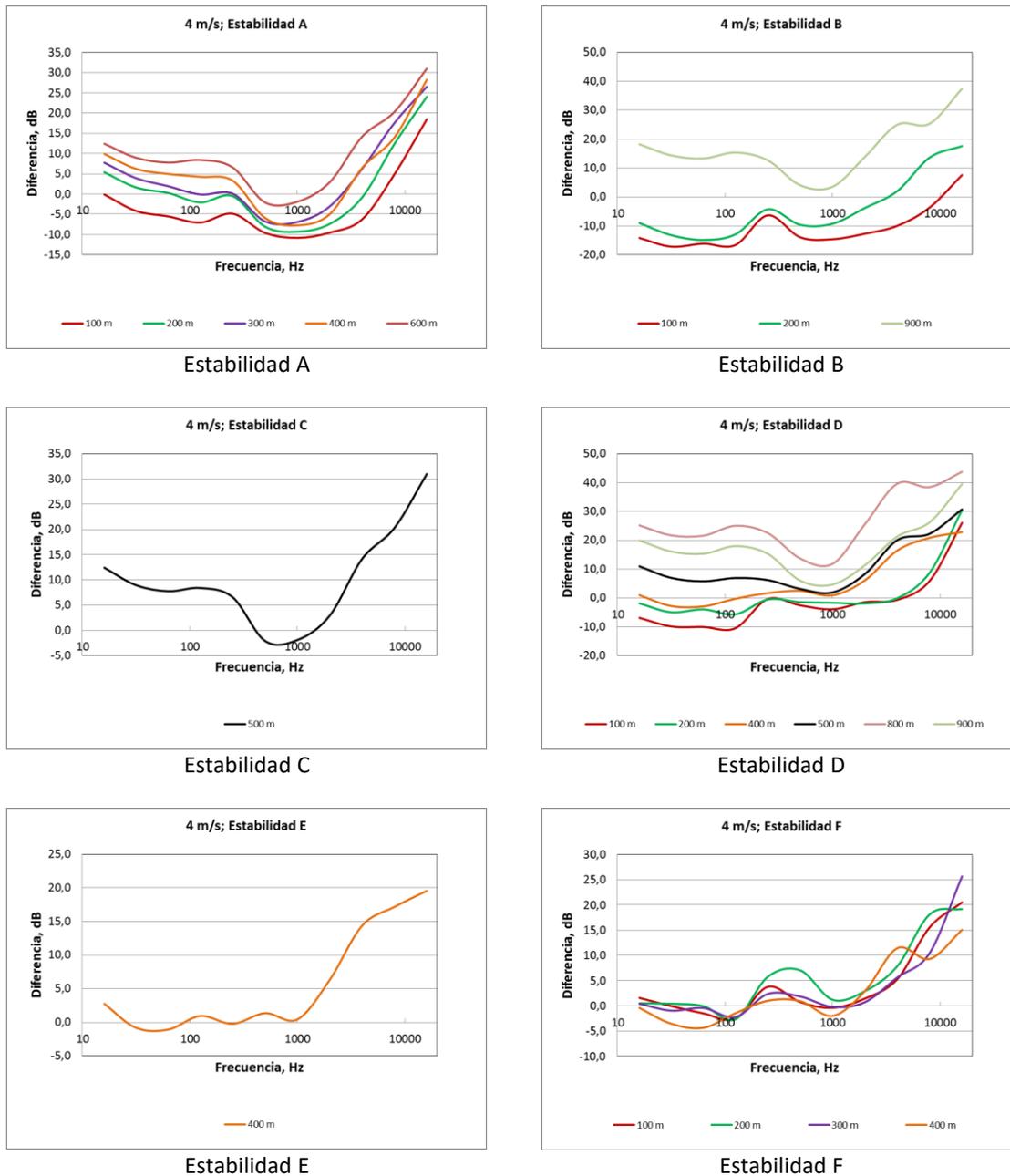
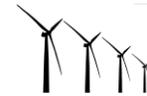


Figura H6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.



Tabla H4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)											
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
A	600	Promedio	2,0	-1,8	-4,2	-2,1	-4,0	-7,6	-7,6	-2,4	8,8	11,4	18,6	
		Máxima												
		Mínima												
	700	Promedio	11,9	8,4	8,3	9,4	7,2	-2,3	-4,1	0,0	8,9	18,3	31,2	
		Máxima												
		Mínima												
B	100	Promedio	-10,4	-14,2	-15,8	-17,4	-10,5	-16,7	-17,5	-15,0	-10,8	-2,7	8,1	
		Máxima	-9,6	-13,5	-15,1	-16,8	-10,3	-16,2	-17,1	-14,7	-9,8	-1,6	9,5	
		Mínima	-12,3	-16,2	-19,0	-20,1	-11,2	-18,3	-18,5	-15,7	-11,2	-3,2	7,9	
	500	Promedio	2,6	-1,4	-3,0	3,0	5,2	-1,0	-4,3	-3,1	0,0	6,2	20,0	
		Máxima												
		Mínima												
	600	Promedio	6,6	2,5	1,1	2,1	0,3	-6,1	-7,1	-2,7	5,4	10,9	24,8	
		Máxima												
		Mínima												
	900	Promedio	15,2	11,9	11,6	14,2	11,7	3,8	4,5	8,7	18,2	23,2	35,1	
		Máxima	16,2	13,1	13,0	15,6	13,1	5,6	6,3	11,1	20,8	25,3	36,5	
		Mínima	14,0	10,3	9,7	12,1	9,8	1,0	1,4	3,3	10,9	18,9	32,9	
	C	500	Promedio	1,9	-1,6	-3,4	0,2	-2,4	-0,6	-1,0	8,4	27,1	24,4	20,1
			Máxima											
			Mínima											
600		Promedio	3,8	0,7	-1,1	2,3	0,6	1,6	1,5	4,1	16,0	13,2	19,7	
		Máxima	5,0	1,6	0,0	2,9	1,5	1,9	2,0	4,7	17,0	15,4	21,6	
		Mínima	2,3	-0,4	-2,6	1,6	-0,4	1,2	1,0	3,4	14,7	8,5	16,3	
D	500	Promedio	-1,5	-4,9	-6,7	-4,3	-2,8	-4,9	-5,6	-3,3	5,9	14,2	17,6	
		Máxima												
		Mínima												
	700	Promedio	20,9	17,4	17,5	21,0	19,2	10,2	6,1	11,4	21,9	25,1	39,1	
		Máxima												
		Mínima												
	800	Promedio	20,8	17,1	17,1	20,8	18,5	9,5	6,2	10,9	22,9	25,8	39,3	
		Máxima												
		Mínima												
900	Promedio	11,9	8,2	7,1	9,5	7,0	-0,1	1,5	3,7	11,0	17,1	30,5		
	Máxima													
	Mínima													

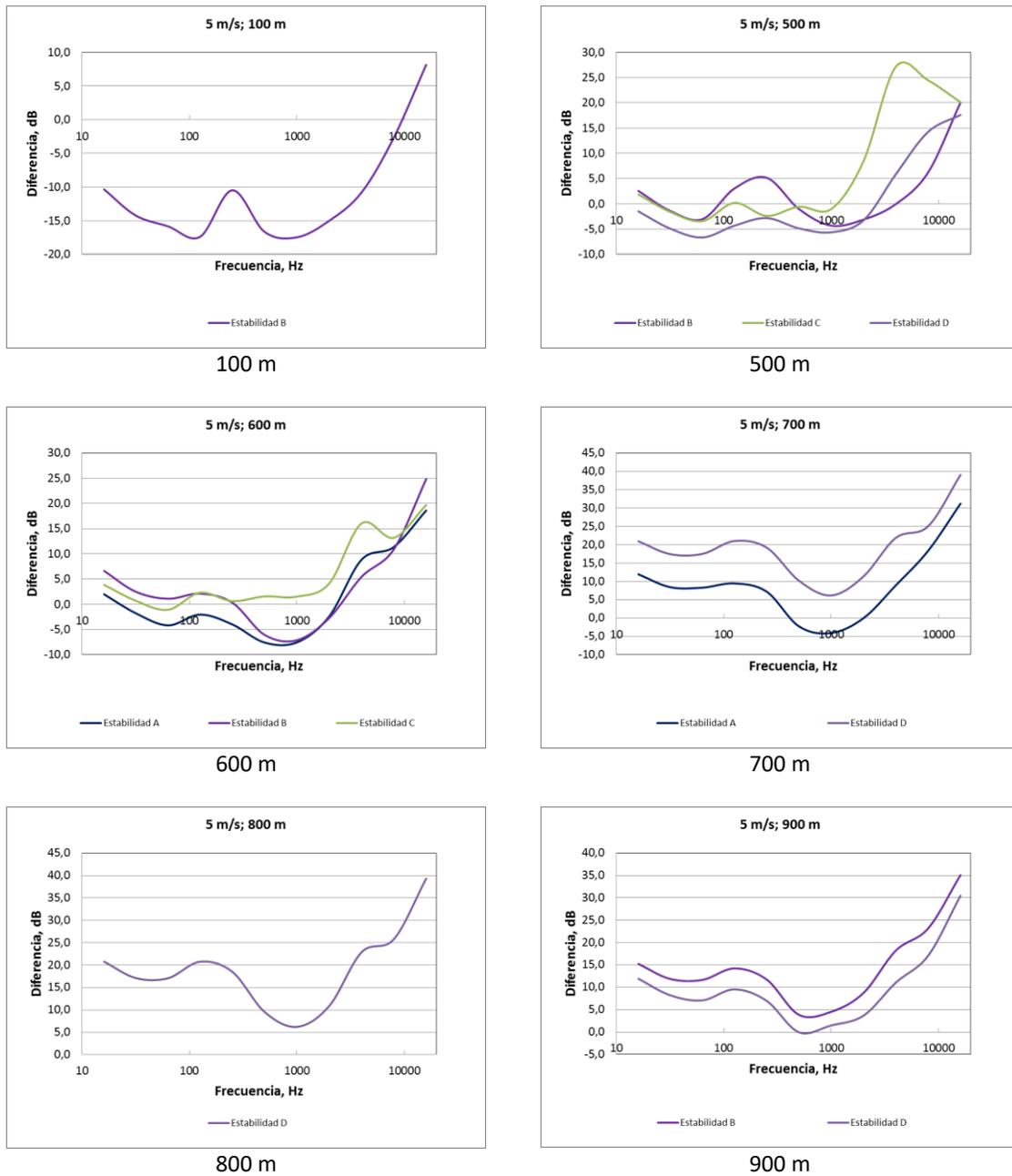


Figura H7. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 5 m/s.

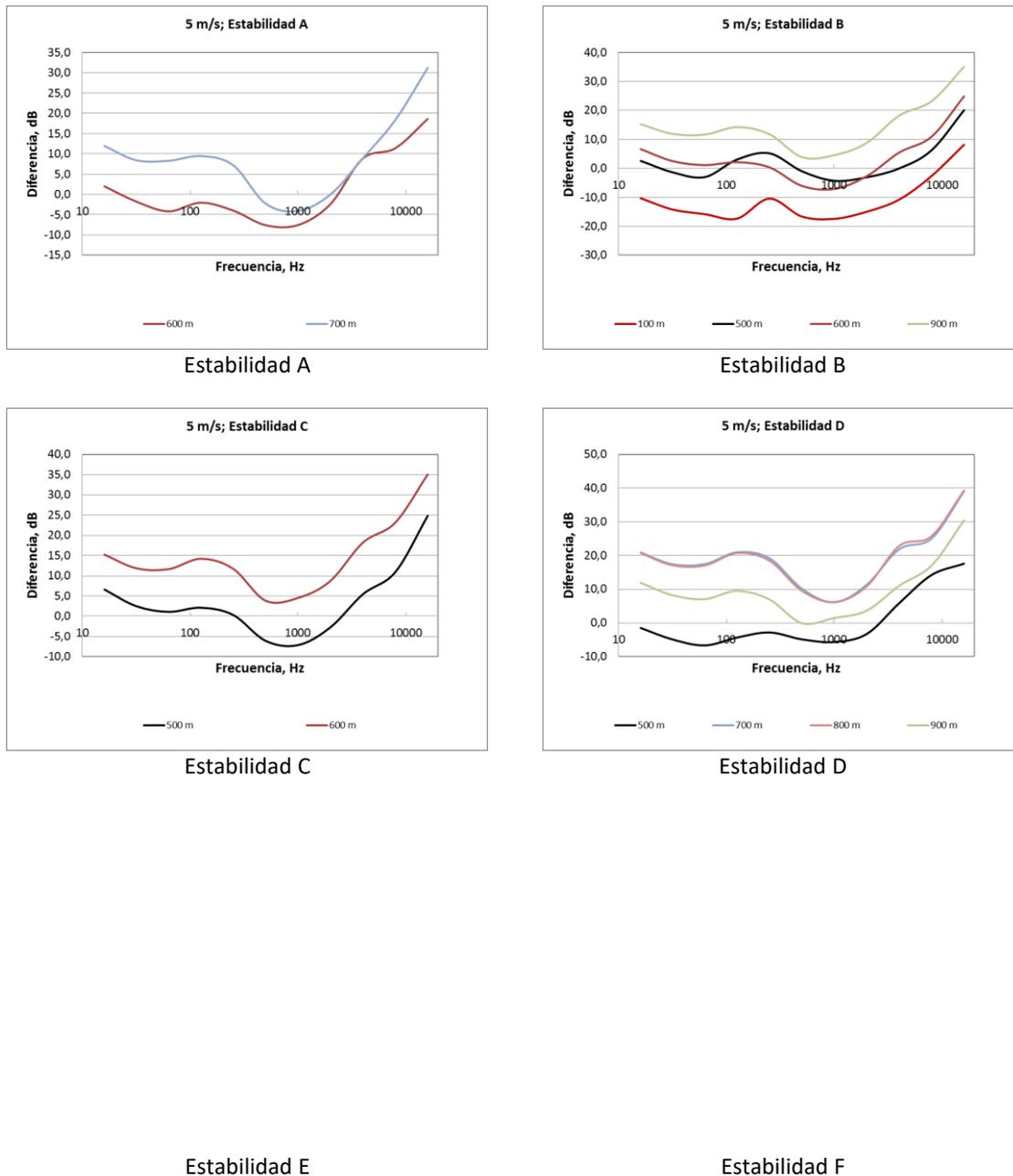


Figura H8. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.



Tabla H5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	6,4	2,4	1,5	2,4	0,8	-7,0	-8,0	-3,8	5,2	12,0	26,0
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	8,7	5,0	4,5	6,0	3,8	-5,9	-7,5	0,6	10,4	13,7	27,8
		Máxima	9,7	5,9	5,5	7,5	5,3	-4,5	-6,7	2,0	12,5	14,5	28,7
		Mínima	7,5	3,9	3,0	3,7	1,5	-8,2	-8,4	-1,6	6,2	12,8	26,6
	800	Promedio	12,0	8,1	7,8	10,6	8,1	-0,5	-1,9	6,2	18,5	19,5	31,5
		Máxima	14,0	10,2	10,1	13,1	10,7	2,1	0,5	7,9	19,9	21,1	33,4
		Mínima	8,2	3,9	2,5	3,5	0,6	-8,6	-7,7	3,1	16,4	17,0	28,1
B	500	Promedio	2,5	-1,2	-2,9	-2,9	-3,7	-6,3	-6,2	-3,5	5,4	12,2	21,7
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	4,5	0,8	-0,2	1,0	-0,6	-5,1	-5,7	1,5	15,5	15,5	23,4
		Máxima	5,2	1,6	0,6	1,8	0,4	-0,8	-1,4	6,8	21,8	21,5	24,4
		Mínima	1,1	-2,2	-4,0	-0,3	-1,8	-7,9	-9,3	-5,5	2,7	7,2	15,9
	800	Promedio	13,9	10,1	9,7	12,3	10,0	1,4	-0,4	3,0	15,4	19,5	33,2
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	10,7	7,0	6,2	8,6	6,3	-1,8	-0,9	1,9	10,3	17,1	30,0
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	2,5	-1,2	-1,3	-1,8	-0,5	-7,7	-9,6	-7,7	-5,6	4,1	21,6
		Máxima	3,8	0,2	0,2	-0,2	0,8	-7,0	-9,4	-7,3	-5,5	4,7	22,8
		Mínima	1,4	-2,6	-2,8	-3,4	-1,6	-8,3	-9,8	-8,0	-5,8	3,7	20,6
	200	Promedio	7,4	4,0	3,8	4,2	5,3	-3,7	-7,0	-6,1	-3,0	12,1	26,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	10,7	7,1	7,0	9,2	8,3	-0,8	-4,6	-3,2	5,0	14,7	28,9
		Máxima	15,7	12,1	12,1	14,3	13,4	4,0	-0,2	0,7	9,4	19,3	33,6
		Mínima	-3,7	-7,5	-9,6	-7,8	-8,3	-9,6	-11,5	-7,9	-3,6	0,7	11,8
	600	Promedio	13,8	10,3	10,3	12,6	11,4	2,0	-1,8	3,3	15,0	18,7	32,7
		Máxima	14,7	11,3	11,4	13,9	12,7	3,4	-0,6	4,8	16,9	19,3	33,2
		Mínima	13,2	9,6	9,6	11,6	10,4	0,8	-2,6	0,3	11,7	18,4	32,3
	700	Promedio	15,7	12,0	12,1	15,1	13,2	4,1	0,7	9,4	21,8	22,0	34,7
		Máxima	16,1	12,5	12,5	15,7	13,8	4,7	1,1	10,5	23,1	22,4	34,9
		Mínima	15,2	11,5	11,6	14,4	12,4	3,2	0,2	8,1	19,9	21,5	34,5
	800	Promedio	18,1	14,6	14,8	18,6	16,2	7,4	3,8	10,6	22,9	24,1	36,4
		Máxima	18,5	15,2	15,4	19,3	16,9	8,1	4,3	11,1	24,1	24,7	36,7
		Mínima	17,6	14,1	14,1	17,8	15,4	6,6	3,2	10,1	21,2	23,5	36,0
E	400	Promedio	11,0	7,2	6,9	8,1	7,8	-1,4	-4,7	-3,6	2,9	15,6	30,1
		Máxima											
		Mínima											

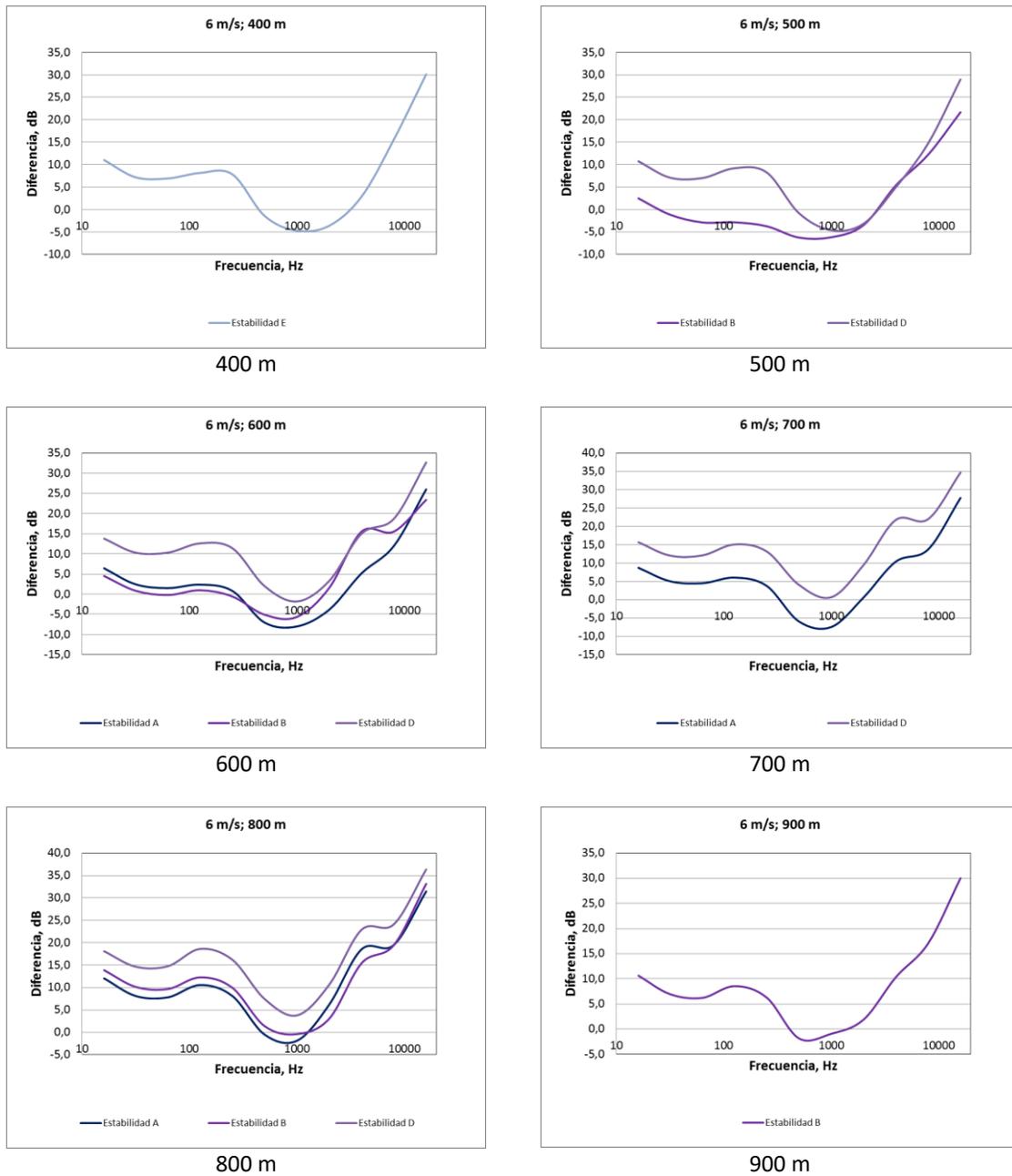
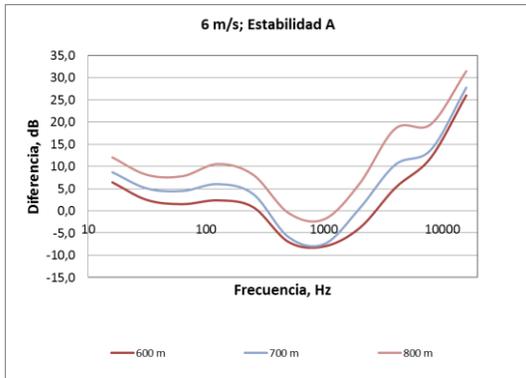
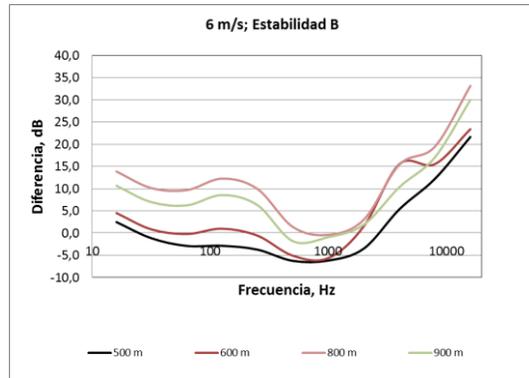


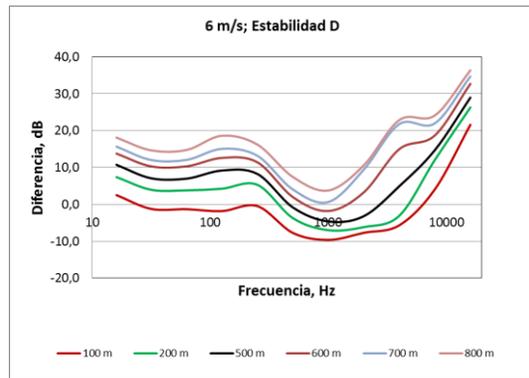
Figura H9. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 6 m/s.



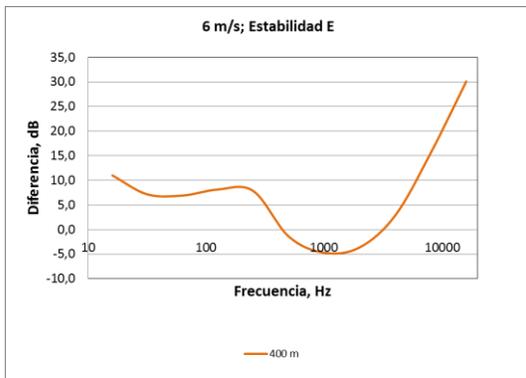
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura H10. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.



Tabla H6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	2,3	-1,2	-3,0	-0,5	-1,9	-1,7	-2,2	1,0	13,7	10,1	19,5
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	8,1	4,4	3,7	5,2	3,2	-6,6	-8,5	-0,2	10,3	13,3	27,4
		Máxima	8,4	5,1	4,6	5,9	3,8	-6,0	-7,2	3,7	14,5	14,7	28,1
		Mínima	7,6	3,9	3,0	4,1	2,1	-7,4	-9,6	-5,6	2,7	12,1	26,7
	800	Promedio	7,3	3,3	2,2	3,9	1,2	-7,6	-7,2	0,1	11,5	16,2	27,3
		Máxima	8,8	5,0	4,0	6,0	3,5	-5,8	-5,6	3,6	16,0	18,1	28,5
		Mínima	5,4	1,1	-0,6	0,8	-2,4	-10,9	-9,4	-4,5	4,8	12,9	25,7
B	600	Promedio	5,2	1,2	0,4	1,2	-0,6	-7,1	-4,9	10,4	25,4	25,0	25,1
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	0,7	-2,9	-3,1	-3,6	-2,1	-9,0	-10,8	-8,9	-6,8	2,7	19,8
		Máxima	1,1	-2,4	-2,6	-2,9	-1,7	-8,8	-10,8	-8,9	-6,7	3,0	20,1
		Mínima	0,4	-3,5	-3,7	-4,5	-2,6	-9,3	-10,8	-9,0	-6,9	2,3	19,4
	200	Promedio	6,2	2,4	2,3	2,4	3,2	-5,4	-8,4	-7,7	-4,1	10,9	25,0
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	8,7	4,8	4,7	5,7	5,4	-3,6	-6,5	-5,4	1,2	13,6	28,1
		Máxima	9,4	5,5	5,4	6,5	6,2	-3,1	-6,2	-5,1	1,6	14,1	28,6
		Mínima	8,0	4,0	3,9	4,8	4,5	-4,2	-6,8	-5,7	0,8	13,1	27,5
	500	Promedio	10,4	6,6	6,6	8,3	7,5	-1,9	-5,0	-3,5	5,6	15,7	29,8
		Máxima	11,5	7,8	7,8	9,8	8,9	-0,5	-4,1	-2,8	6,4	16,2	30,5
		Mínima	9,6	5,8	5,7	7,1	6,3	-3,1	-5,9	-4,4	4,0	14,6	29,2
	600	Promedio	16,3	13,1	13,4	16,3	14,9	6,0	1,5	3,7	13,8	20,1	34,0
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	14,3	10,6	10,5	13,6	11,7	2,6	-1,1	2,3	12,7	19,1	33,4
		Máxima											
		Mínima											
800	Promedio	14,9	10,8	10,4	13,6	11,4	2,4	-1,0	2,8	13,5	19,5	33,7	
	Máxima												
	Mínima												
E	300	Promedio	12,0	8,5	8,7	10,1	10,2	0,9	-3,7	-2,9	2,0	15,5	29,4
		Máxima	12,7	9,4	9,6	11,1	11,2	1,8	-2,8	-2,1	2,5	15,8	29,6
		Mínima	10,9	7,2	7,4	8,7	8,8	-0,4	-4,7	-3,6	1,6	15,2	29,0

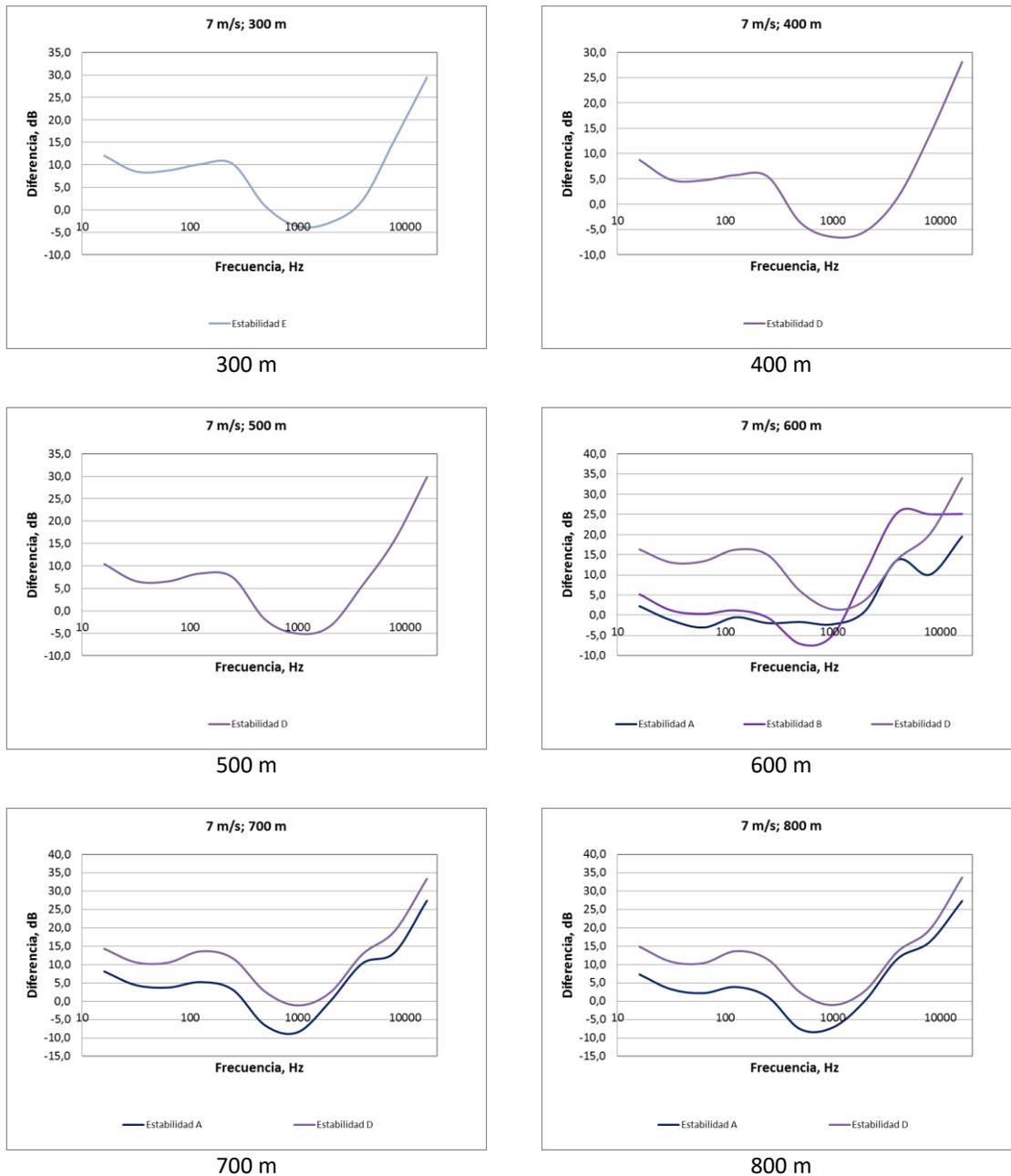
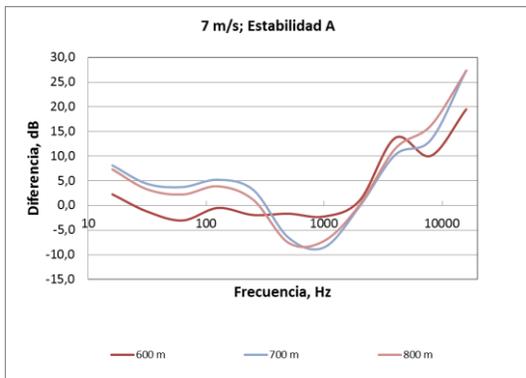
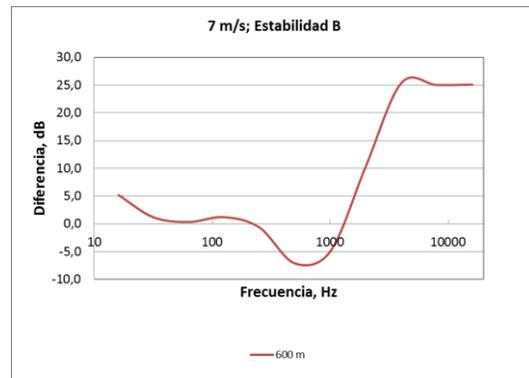


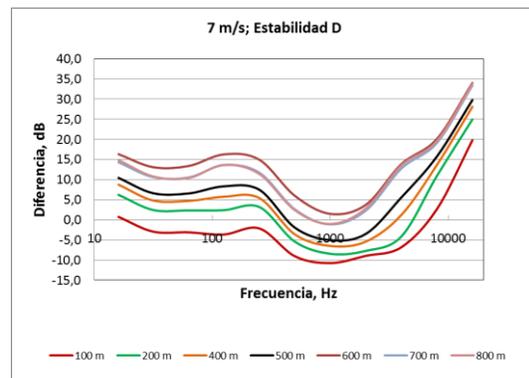
Figura H11. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 7 m/s.



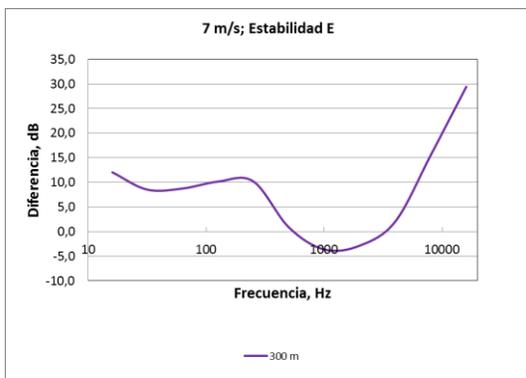
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura H12. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo de propagación promedio para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.





## **ANEXO I**

### **NIVEL DE PRESIÓN SONORA RESIDUAL ESTIMADO CON EL MODELO PROPUESTO DISCRIMINADO POR ESTABILIDAD Y FRECUENCIA**







Tabla I1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	300	Promedio	-7,6	-7,1	-7,7	-8,7	-11,2	-14,3	-12,7	-14,9	-14,0	-11,6	-5,3
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	3,3	3,8	3,2	1,9	-0,6	-6,2	-3,0	-5,3	-0,7	1,8	7,3
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	4,9	5,4	5,1	3,3	1,1	-4,0	-1,7	-0,4	8,8	6,1	9,0
		Máxima	8,0	8,3	8,1	6,4	4,0	-0,5	2,2	4,0	13,8	11,0	13,0
		Mínima	1,7	2,6	1,8	-0,5	-2,8	-8,6	-7,3	-7,4	-1,9	-3,5	4,0
	600	Promedio	1,3	2,1	1,5	0,1	-2,1	-6,5	-3,8	-2,7	3,1	1,9	5,3
		Máxima	3,8	4,4	4,4	3,3	1,4	-5,5	-3,2	0,0	4,3	3,1	7,0
		Mínima	-10,0	-9,0	-8,6	-7,4	-11,0	-7,7	-5,1	-6,2	2,2	1,0	-0,6
B	600	Promedio	-9,2	-7,6	-6,6	-6,8	-10,7	-6,0	-3,3	-3,6	1,5	-0,5	-3,7
		Máxima											
		Mínima											
D	500	Promedio	-1,4	-0,2	0,0	-0,4	-3,1	2,0	5,5	3,6	11,8	13,7	8,1
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-3,8	-3,2	-3,9	-3,7	-8,4	-4,4	-1,5	-2,7	2,1	0,4	-0,3
		Máxima											
		Mínima											
E	400	Promedio	1,9	3,1	1,6	-0,1	-3,3	-3,3	-1,3	-3,2	-2,0	0,9	1,5
		Máxima											
		Mínima											
	500	Promedio	0,9	1,2	1,0	1,5	-1,4	-0,5	2,2	-0,4	1,0	-2,2	3,5
		Máxima	1,7	1,4	1,6	2,1	0,2	0,5	3,0	1,4	2,9	-1,9	5,7
		Mínima	0,1	0,9	0,4	0,8	-3,9	-1,7	1,2	-3,6	-2,3	-2,6	-1,1
F	100	Promedio	-4,4	-1,8	-1,2	-0,7	2,9	2,4	2,4	-1,1	-4,2	-1,8	0,9
		Máxima	-0,5	1,1	-0,4	1,7	4,2	4,5	3,0	0,3	-2,4	0,8	4,3
		Mínima	-9,7	-4,6	-3,0	-4,8	1,7	0,5	1,9	-3,7	-7,2	-4,1	-6,6
	200	Promedio	6,3	6,4	4,8	5,4	8,3	5,9	8,4	5,9	5,7	12,6	9,5
		Máxima	14,3	14,4	12,3	13,1	16,8	13,8	16,8	13,8	13,6	21,4	18,1
		Mínima	14,3	14,4	12,3	13,1	16,8	13,8	16,8	13,8	13,6	21,4	18,1
	300	Promedio	-8,7	-7,8	-7,5	-8,1	-8,0	-6,5	-6,8	-8,5	-9,0	-8,7	-8,0
		Máxima	-10,0	-9,0	-4,5	-8,0	-7,4	-6,6	-6,9	-10,1	-12,7	-9,5	-7,7
		Mínima	-17,8	-15,3	-15,1	-14,7	-16,2	-14,8	-12,9	-14,3	-16,5	-17,3	-19,3
	400	Promedio	-2,9	-0,1	-0,8	-0,6	-3,1	0,6	2,2	-1,2	-0,1	-6,0	-4,3
		Máxima	-2,5	0,4	-0,1	-0,4	-2,9	0,9	2,3	-1,1	0,1	-5,3	-3,2
		Mínima	-3,3	-0,6	-1,4	-0,9	-3,4	0,3	2,1	-1,3	-0,3	-7,5	-5,4
	500	Promedio	-0,9	-1,0	2,0	-1,0	-4,6	-5,0	-1,5	-2,4	0,4	0,4	-0,6
		Máxima	0,7	1,2	6,6	1,5	-2,3	-3,4	0,8	0,0	1,5	3,3	0,7
		Mínima	-3,0	-2,9	-4,0	-4,1	-7,0	-6,3	-2,9	-3,6	-1,7	-3,9	-2,4

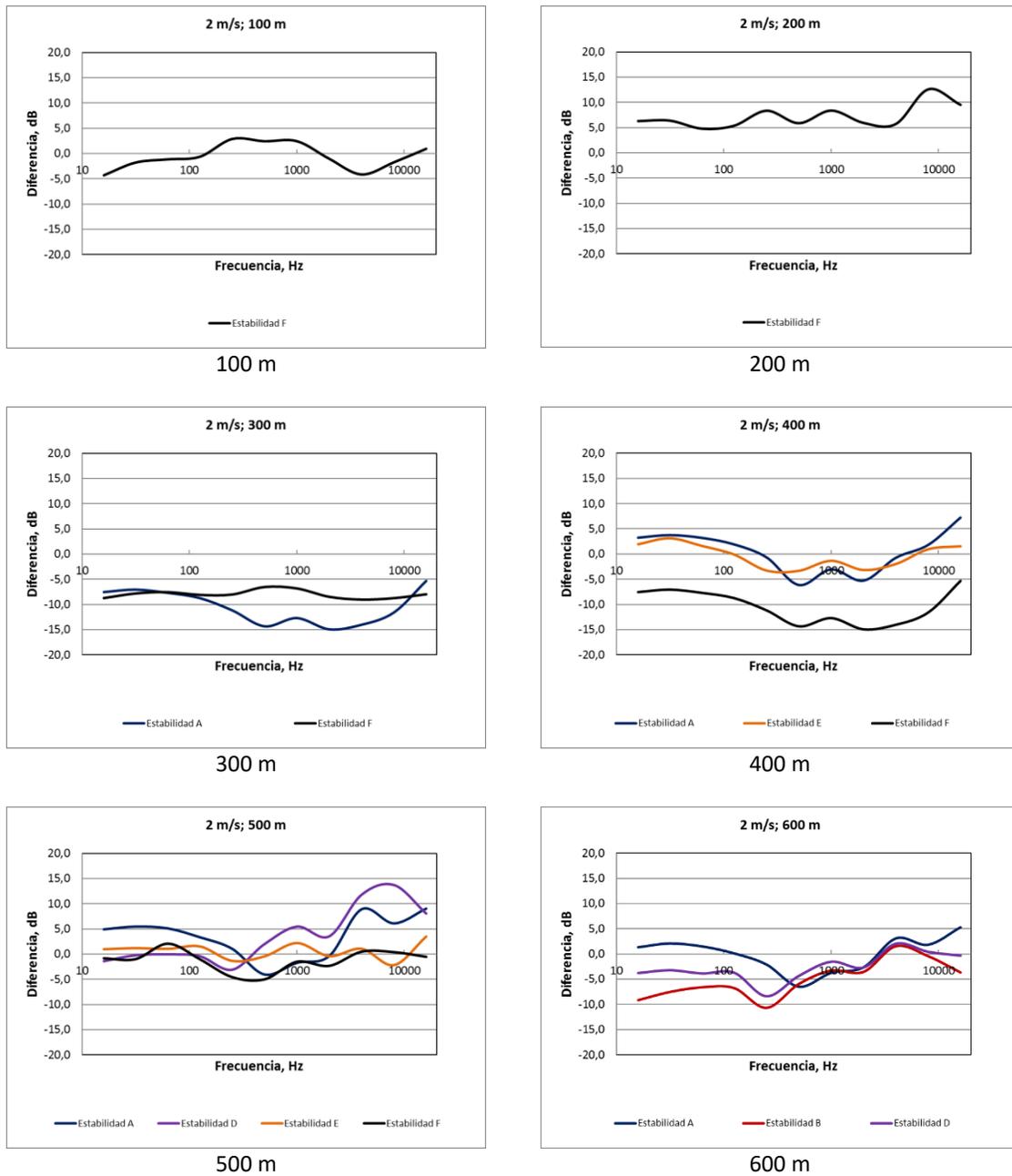


Figura I1. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.

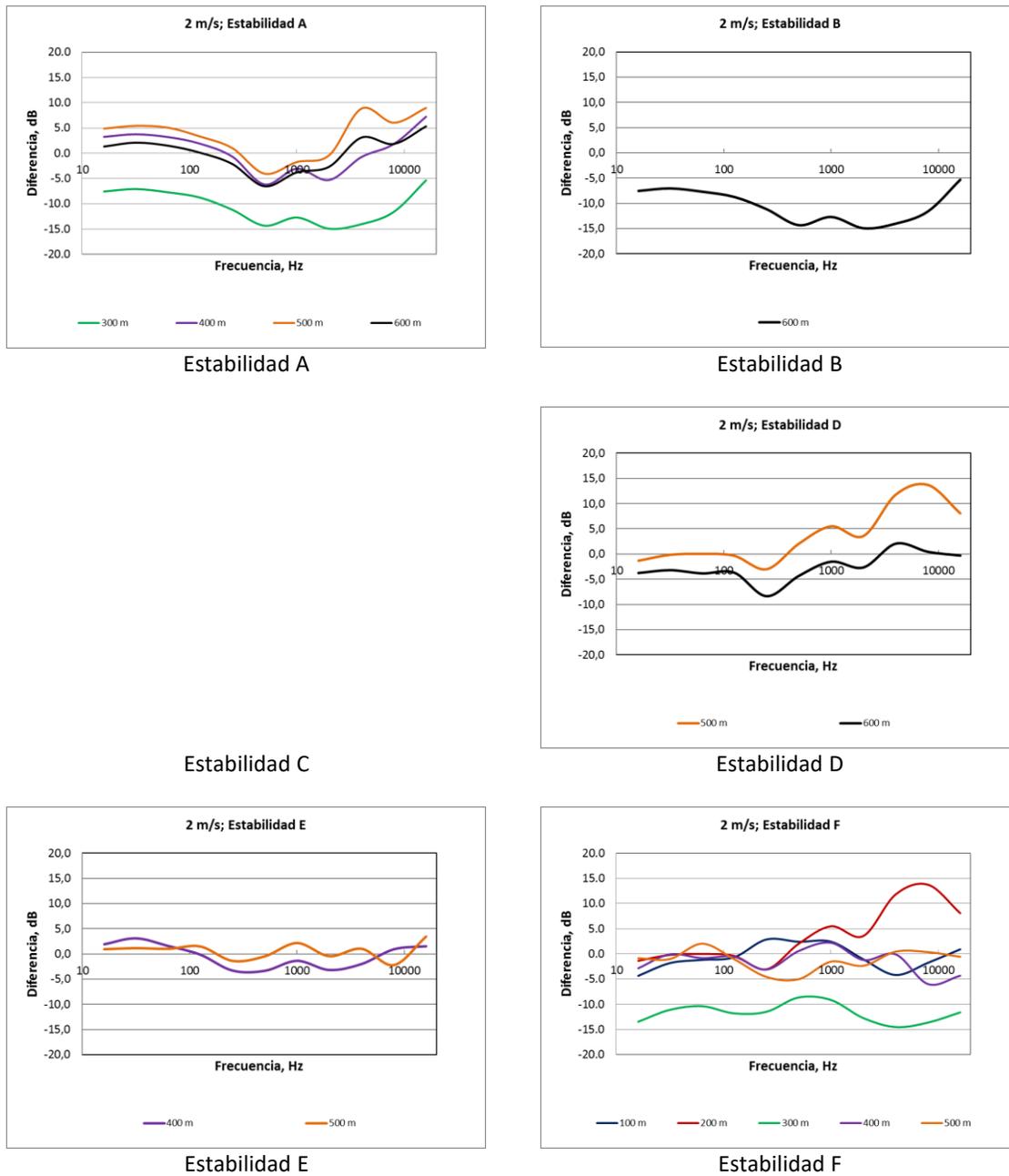


Figura I2. Nivel de presión sonora residual estimado con modelo propuesto para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 2 m/s.



Tabla I2. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	100	Promedio	-2,6	-1,7	-2,0	-2,9	-2,2	-4,2	-2,3	-5,8	-8,2	-4,0	-0,1
		Máxima											
		Mínima											
	200	Promedio	5,6	8,2	10,0	7,8	11,0	11,7	14,7	15,1	18,6	21,0	17,6
		Máxima	10,6	13,7	15,7	13,3	16,7	17,5	20,6	21,0	24,6	27,0	23,6
		Mínima	10,6	13,7	15,7	13,3	16,7	17,5	20,6	21,0	24,6	27,0	23,6
	300	Promedio	-7,9	-7,0	-7,6	-9,2	-11,2	-13,8	-11,5	-13,6	-10,9	-6,4	-5,4
		Máxima	-5,7	-4,5	-4,9	-6,3	-8,3	-12,4	-10,4	-12,0	-8,8	-4,8	-3,9
		Mínima	-11,1	-9,8	-10,8	-12,4	-14,5	-15,0	-12,4	-15,7	-12,9	-7,4	-8,2
	400	Promedio	2,7	3,6	3,5	2,3	0,2	-5,1	-3,4	-2,6	1,7	0,8	4,8
		Máxima	5,5	6,0	6,3	5,3	3,3	-2,8	-1,9	2,2	6,6	1,8	8,3
		Mínima	-0,2	0,9	0,3	-1,2	-3,4	-8,2	-5,7	-8,6	-5,2	-1,5	0,9
	500	Promedio	3,9	4,8	4,6	3,2	1,4	-4,2	-2,9	-1,8	5,8	2,4	6,6
		Máxima	5,2	6,0	6,0	4,7	2,8	-3,0	-1,0	1,9	10,3	3,8	8,3
		Mínima	0,4	1,3	0,6	-1,2	-3,2	-8,3	-6,2	-5,5	1,5	0,7	2,9
	600	Promedio	0,7	1,6	1,5	0,2	-1,8	-8,2	-6,2	-6,5	1,0	-1,3	2,3
		Máxima	2,6	3,3	3,5	2,2	0,3	-6,2	-5,4	-5,2	2,6	-0,1	4,6
		Mínima	-2,2	-0,8	-1,5	-3,4	-5,8	-10,9	-8,1	-8,8	-1,5	-4,0	-2,3
D	400	Promedio	-3,8	-2,7	-2,3	-1,6	-2,1	2,6	2,5	2,1	1,9	-3,7	-7,0
		Máxima	-3,4	-2,4	-1,9	-1,3	-1,5	3,2	3,2	2,7	3,0	-2,4	-6,8
		Mínima	-4,2	-3,0	-2,8	-1,9	-2,9	1,9	1,6	1,4	0,4	-5,5	-7,2
E	300	Promedio	-18,5	-16,1	-14,9	-12,2	-12,4	-8,4	-7,4	-10,4	-9,7	-8,9	-13,6
		Máxima											
		Mínima											
	400	Promedio	-10,0	-8,2	-6,6	-4,3	-6,9	-0,6	1,0	4,5	5,6	-1,2	-8,4
		Máxima	-9,1	-8,1	-6,6	-4,1	-6,6	-0,5	1,1	6,7	7,4	0,8	-8,0
		Mínima	-11,2	-8,4	-6,6	-4,6	-7,1	-0,7	0,9	-0,3	2,4	-4,9	-8,9
F	100	Promedio	-2,3	-0,4	-1,2	-1,4	2,3	1,6	2,7	-0,3	-2,1	0,1	0,9
		Máxima	-1,1	0,4	-0,1	-0,4	3,2	2,9	3,6	0,3	-1,3	2,0	2,5
		Mínima	-8,5	-3,9	-3,8	-4,1	1,4	0,7	2,0	-0,7	-2,7	-0,5	-7,9
	300	Promedio	-13,6	-10,7	-11,0	-10,7	-8,4	-8,6	-6,6	-9,9	-10,1	-10,7	-13,9
		Máxima	-11,2	-8,9	-8,6	-6,5	-3,0	-6,2	-4,2	-7,0	-6,9	-7,8	-9,7
		Mínima	-15,9	-13,1	-14,4	-14,0	-15,6	-15,6	-13,0	-17,0	-16,4	-15,5	-17,7
	400	Promedio	-5,1	-3,7	-4,2	-3,8	-5,5	-2,0	-0,4	0,1	2,5	-1,2	-4,8
		Máxima	-1,9	-1,4	-1,5	-1,8	-4,1	-0,5	2,0	2,7	5,8	0,9	-1,5
		Mínima	-12,3	-9,1	-8,0	-6,1	-7,0	-5,2	-2,4	-5,1	-4,2	-6,0	-10,3
	500	Promedio	0,6	2,3	1,4	2,0	-2,5	1,9	4,4	2,8	5,0	0,4	-0,4
		Máxima	1,3	2,7	2,0	2,0	-2,3	2,1	4,4	2,9	5,8	2,1	0,7
		Mínima	-0,3	1,8	0,7	1,9	-2,7	1,7	4,3	2,7	3,9	-2,4	-1,8

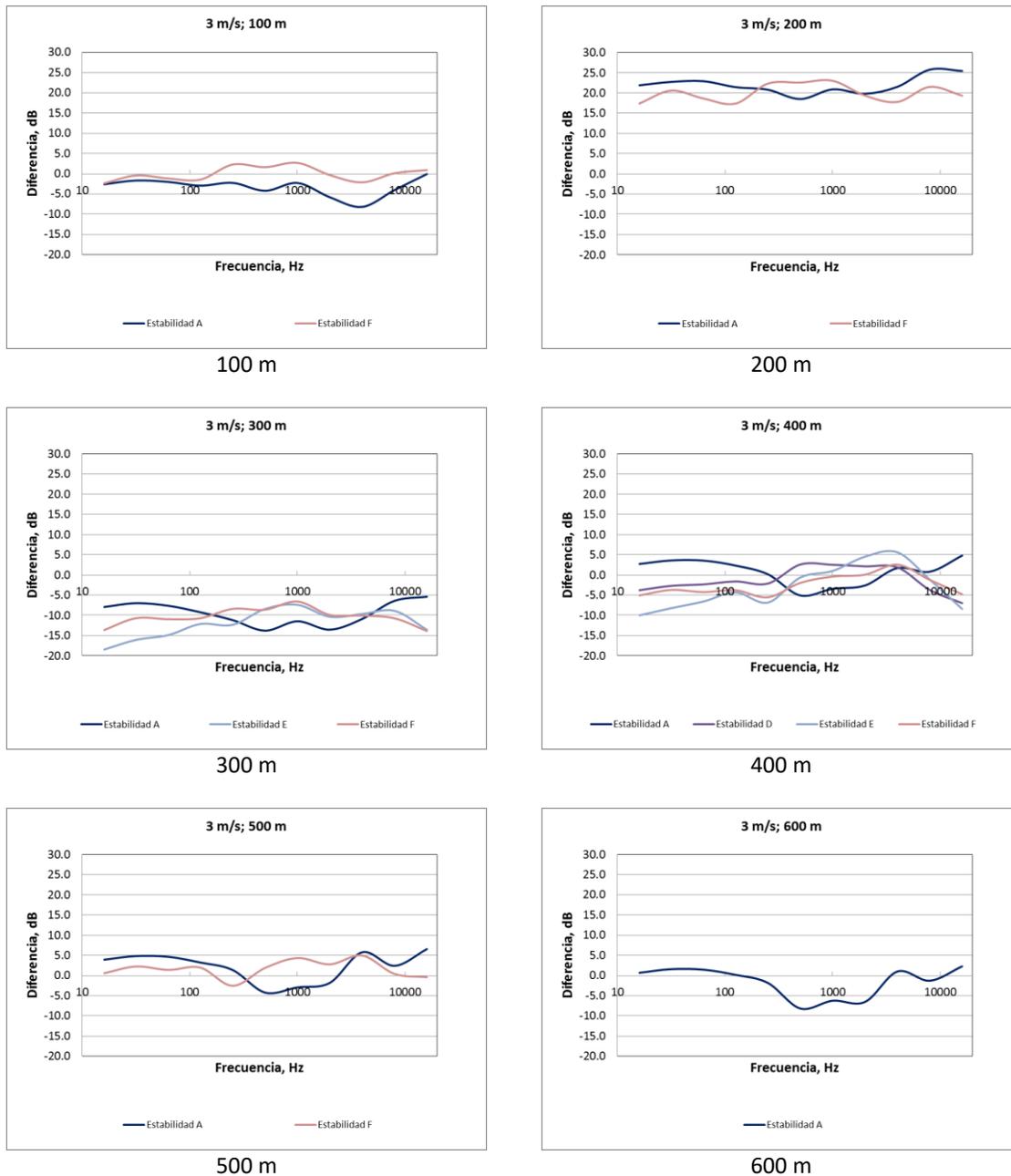
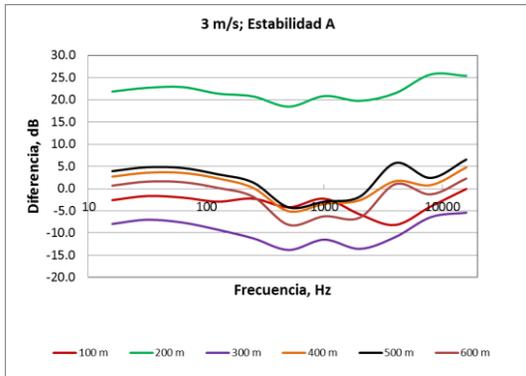
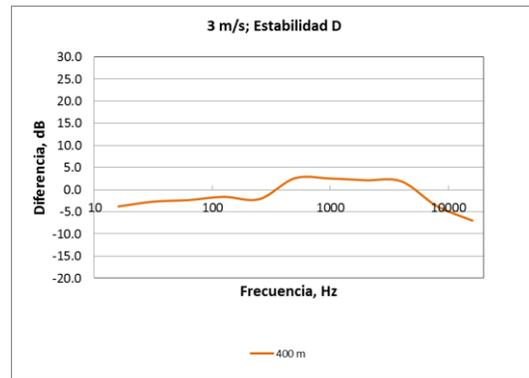


Figura I3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 3 m/s.



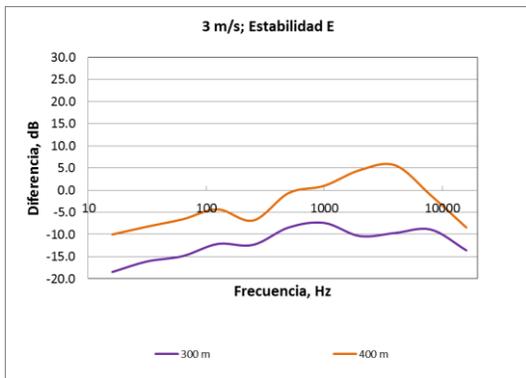
Estabilidad A

Estabilidad B

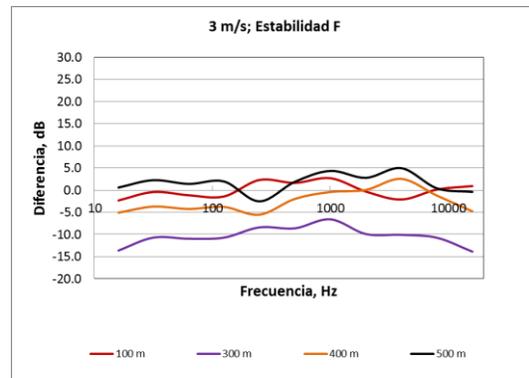


Estabilidad D

Estabilidad C



Estabilidad E



Estabilidad F

Figura I4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 3 m/s.



Tabla I3. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)											
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
A	100	Promedio	-1,6	-0,9	-0,9	-1,3	-1,0	-3,0	-1,6	-5,1	-7,8	-4,3	0,1	
		Máxima	0,8	1,5	1,7	1,0	0,9	-2,0	-1,1	-4,2	-6,9	-4,0	2,5	
		Mínima	-6,8	-5,8	-6,7	-5,4	-3,9	-4,1	-2,1	-6,2	-9,1	-4,8	-5,5	
	300	Promedio	-8,3	-7,3	-8,1	-10,1	-11,8	-14,8	-12,2	-13,2	-10,1	-6,4	-6,8	
		Máxima												
		Mínima												
	400	Promedio	0,3	1,5	1,6	0,4	-1,8	-7,3	-6,4	-8,6	-3,4	-3,7	0,9	
		Máxima												
		Mínima												
	600	Promedio	-1,1	0,2	0,3	-0,9	-2,8	-7,9	-5,1	-5,2	-0,2	-1,8	-0,5	
		Máxima												
		Mínima												
B	100	Promedio	-11,4	-9,5	-7,1	-6,4	2,1	-2,7	-0,7	-3,6	-6,9	-8,3	-6,6	
		Máxima												
		Mínima												
	200	Promedio	13,0	13,6	13,3	16,0	22,4	21,0	24,0	24,8	24,5	28,2	22,7	
		Máxima	14,2	14,5	13,6	16,6	23,5	21,2	24,3	26,3	26,1	28,8	23,4	
		Mínima	11,0	12,2	12,7	15,0	20,6	20,8	23,5	22,2	21,7	27,4	21,6	
	900	Promedio	-1,9	-1,0	-0,7	-1,7	-3,2	-8,2	-6,0	-0,6	4,2	-3,3	-0,8	
		Máxima												
		Mínima												
	C	500	Promedio	3,5	4,0	3,9	3,5	1,2	2,9	4,1	0,3	1,0	0,0	4,9
			Máxima											
			Mínima											
D	100	Promedio	-8,9	-7,0	-5,7	-4,8	3,5	4,2	5,6	3,2	-2,1	-3,2	7,3	
		Máxima												
		Mínima												
	400	Promedio	-5,3	-4,2	-3,0	-0,8	-0,1	4,5	5,6	5,9	10,0	6,5	-1,2	
		Máxima												
		Mínima												
	500	Promedio	2,0	2,9	3,1	3,3	2,5	3,8	5,3	6,0	10,9	6,9	4,6	
		Máxima	4,1	4,9	5,4	5,2	4,7	5,4	7,7	7,6	13,8	11,2	6,5	
		Mínima	0,2	1,5	1,1	0,6	-2,4	1,4	2,8	3,0	4,4	-0,1	1,7	
	800	Promedio	1,6	3,0	4,2	4,9	3,4	-2,0	-1,2	7,6	15,3	6,3	1,8	
		Máxima												
		Mínima												
	900	Promedio	-1,8	-0,8	-0,2	-0,5	-1,9	-7,7	-6,8	-5,4	-1,9	-4,3	-0,4	
		Máxima	0,8	1,8	2,6	2,8	1,3	-4,6	-4,6	-3,7	-0,9	-2,1	2,1	
		Mínima	-6,3	-5,3	-5,3	-6,5	-8,3	-13,2	-9,7	-7,3	-3,7	-6,8	-4,5	
	E	400	Promedio	-7,0	-5,6	-4,2	-2,8	-5,0	0,2	2,1	3,3	5,4	0,6	-8,1
			Máxima	-5,6	-4,2	-1,6	-0,8	-2,2	2,2	4,9	7,0	9,8	5,6	-6,1
			Mínima	-9,2	-8,2	-6,7	-4,3	-6,8	-1,1	0,2	0,0	-0,9	-6,0	-10,5
F	100	Promedio	-6,3	-2,9	-2,5	-2,8	2,2	1,9	3,5	1,3	-1,7	0,8	-3,2	
		Máxima	15,7	19,5	17,3	16,4	22,2	22,4	22,7	18,9	17,3	20,6	16,5	
		Mínima	-9,0	-3,7	-4,4	-3,6	1,7	1,3	2,6	-0,4	-2,6	-0,8	-11,6	
	200	Promedio	10,2	14,9	15,8	13,9	20,0	25,4	22,2	19,1	17,8	20,2	11,9	
		Máxima	15,7	19,5	17,3	16,4	22,2	27,3	23,6	20,5	19,0	22,0	16,5	
		Mínima	-9,0	-3,7	-4,4	-3,6	1,7	1,8	3,7	0,2	-1,6	1,5	-11,6	
	400	Promedio	-9,0	-7,3	-6,8	-4,4	-3,2	0,4	0,2	0,2	2,4	-7,5	-11,3	
		Máxima												
		Mínima												

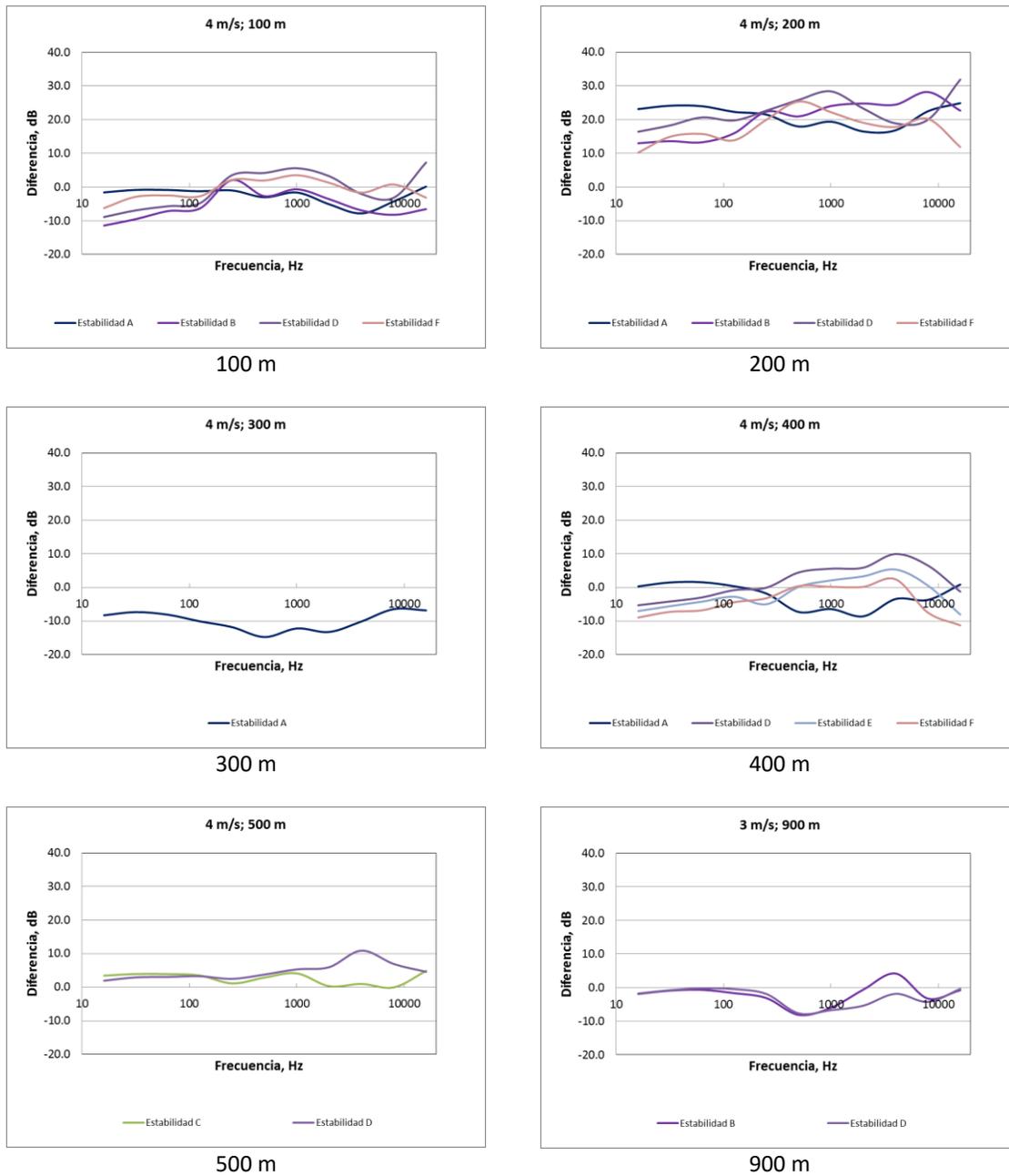


Figura I5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 4 m/s.

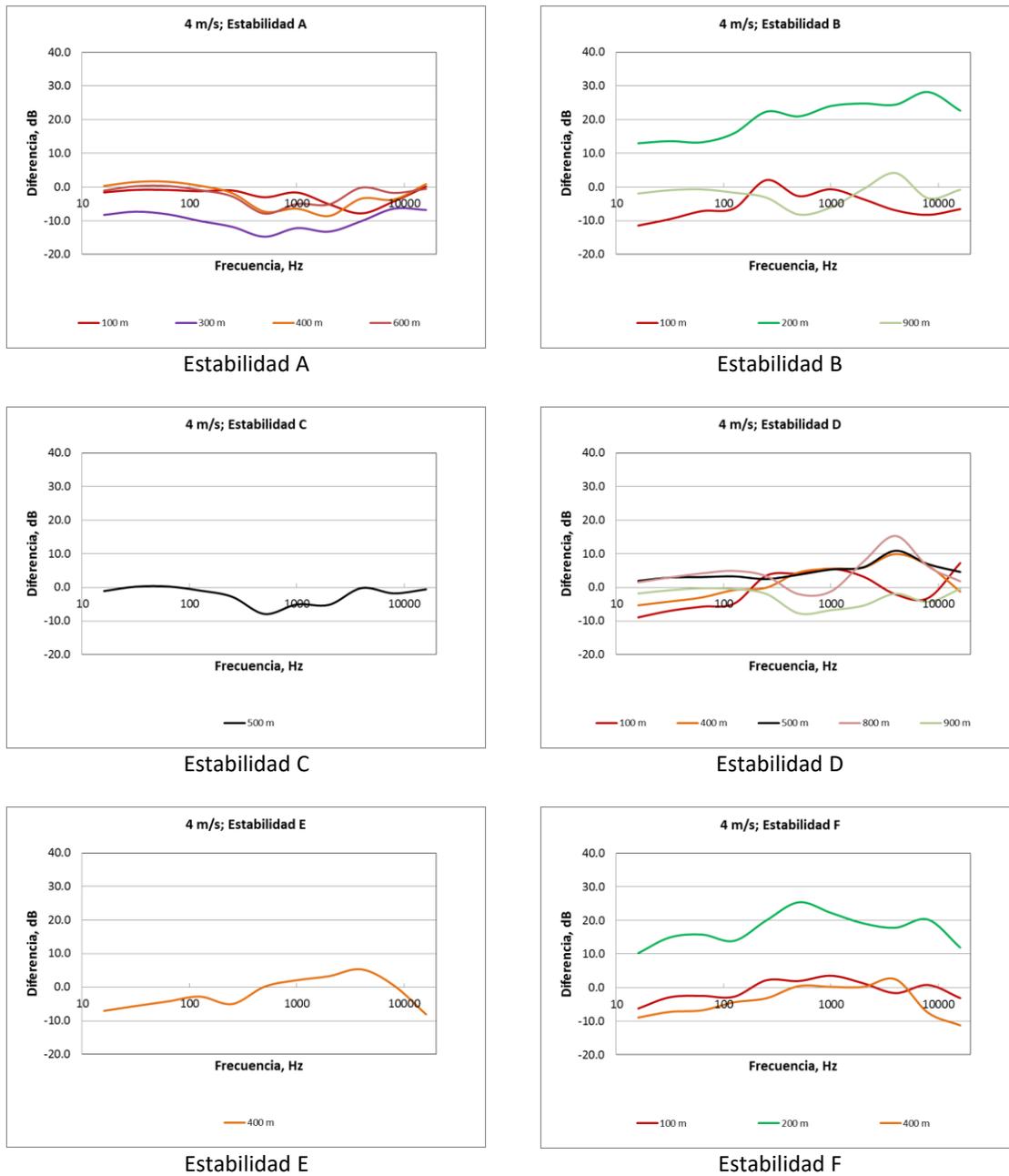


Figura I6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 4 m/s.



Tabla I4. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-5,6	-4,3	-5,1	-4,5	-6,2	-6,0	-3,1	-2,7	2,3	-3,1	-6,1
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	0,0	1,6	3,1	2,2	0,8	-5,0	-3,9	-4,6	-1,8	-0,3	2,3
		Máxima											
		Mínima											
B	100	Promedio	-3,5	-2,3	-2,3	-2,4	2,9	-0,2	1,9	-0,3	-2,1	-1,7	-1,0
		Máxima	-2,7	-1,5	-1,5	-1,7	3,1	0,2	2,2	0,0	-1,1	-0,7	0,5
		Mínima	-5,7	-4,4	-5,3	-5,0	2,3	-1,8	0,9	-1,0	-2,6	-2,3	-1,4
	500	Promedio	0,6	1,6	1,5	6,5	8,2	6,2	5,7	2,0	-1,2	-2,8	1,0
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	0,2	1,1	1,2	0,6	-1,1	-3,8	-2,0	-2,5	-0,6	-3,1	0,8
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	-1,9	-0,2	1,1	0,9	-0,2	-4,3	-0,8	-1,4	1,8	-1,2	0,6
		Máxima	-0,7	1,2	2,6	2,4	1,2	-2,5	1,0	0,9	4,4	0,9	2,0
		Mínima	-3,7	-2,3	-1,3	-1,6	-2,4	-7,3	-3,9	-6,8	-5,4	-5,4	-1,6
C	500	Promedio	-7,8	-6,2	-6,5	-3,8	-6,7	-0,6	1,9	6,7	19,2	8,5	-6,0
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-9,5	-7,7	-7,9	-6,2	-7,6	-2,9	-0,1	-2,3	3,4	-7,3	-10,9
		Máxima	-8,0	-6,4	-6,4	-5,2	-6,4	-2,2	0,6	-1,4	4,6	-5,0	-8,9
		Mínima	-11,8	-9,5	-10,1	-7,4	-9,2	-3,8	-1,0	-3,3	1,8	-12,3	-14,9
D	500	Promedio	-4,6	-3,0	-3,3	-1,9	-0,8	1,3	3,4	0,9	3,8	4,2	-2,5
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	1,6	3,2	4,8	6,3	5,3	-0,2	-1,4	-0,9	3,4	-1,4	2,4
		Máxima											
		Mínima											
	800	Promedio	0,0	1,4	2,9	4,1	3,0	-2,3	-2,8	-2,9	2,8	-2,2	1,1
		Máxima											
		Mínima											
	900	Promedio	-5,6	-4,3	-3,9	-4,3	-5,4	-8,6	-4,2	-6,9	-5,7	-7,7	-4,4
		Máxima											
		Mínima											

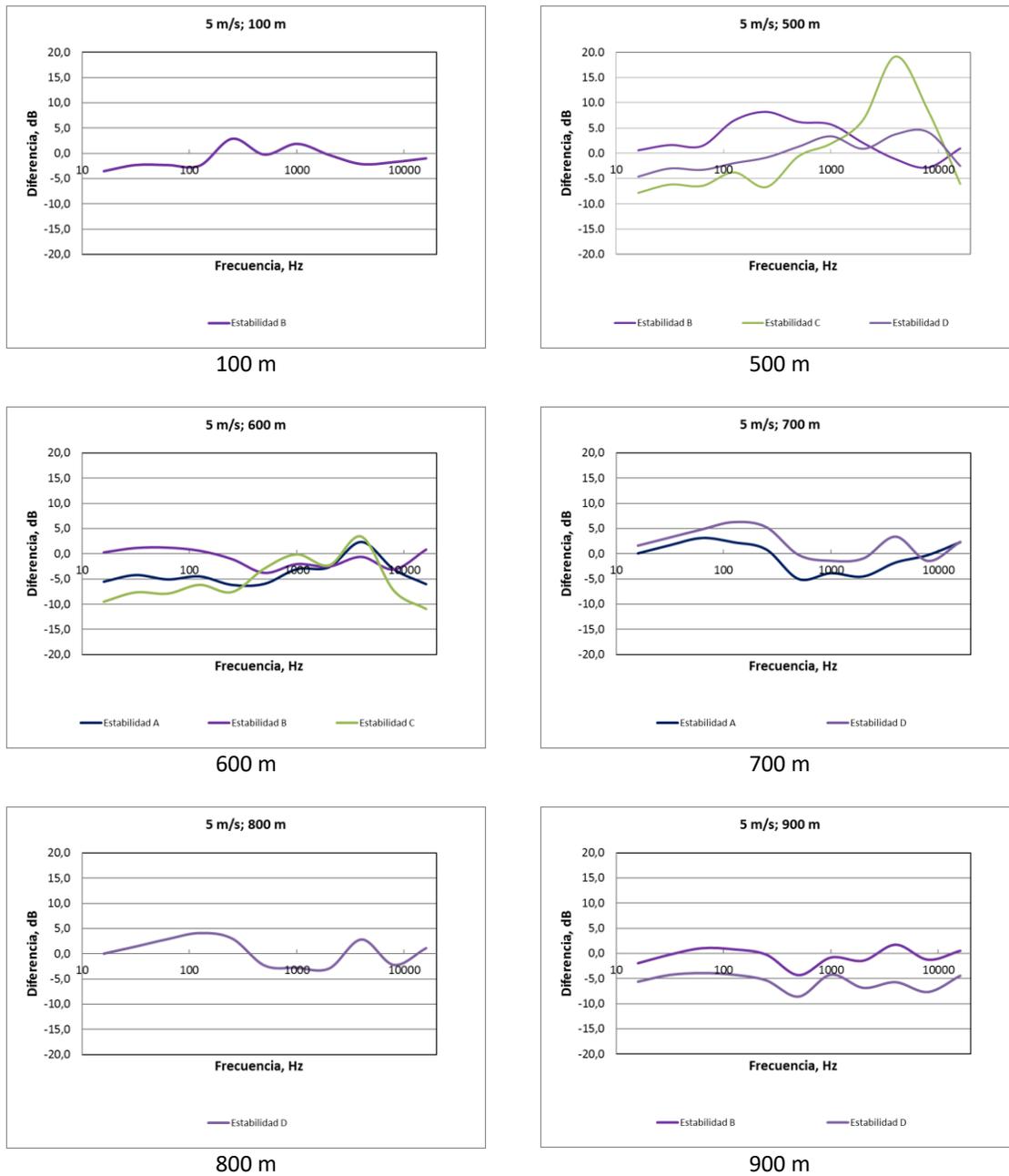
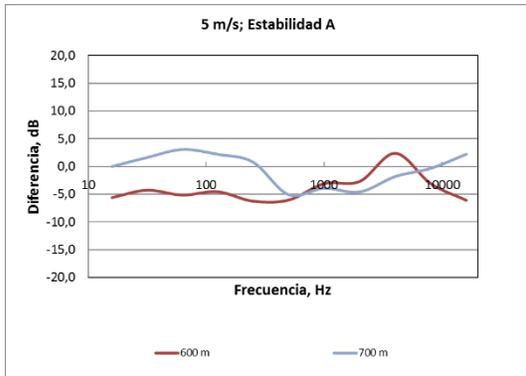
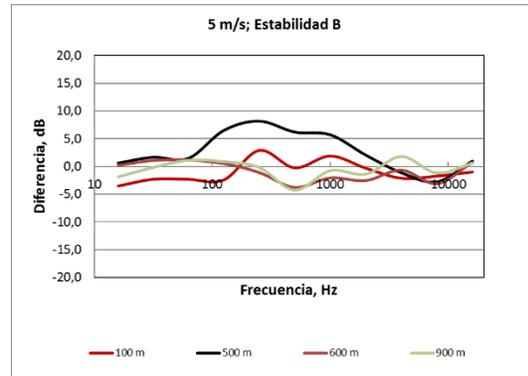


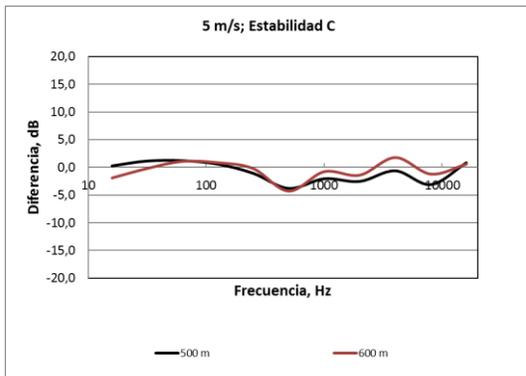
Figura I7. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 5 m/s.



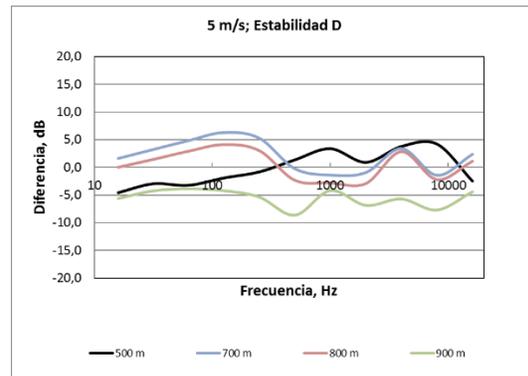
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad C



Estabilidad D

Estabilidad E

Estabilidad F

Figura I8. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 5 m/s.



Tabla I5. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-1,6	-0,3	0,5	0,1	-1,0	-4,7	-2,4	-2,7	0,4	-0,7	2,8
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-1,0	0,6	1,8	1,3	0,1	-5,8	-3,8	-0,4	3,1	-0,8	2,6
		Máxima	-0,9	0,8	1,8	1,9	0,6	-5,2	-3,3	0,0	4,5	-0,3	2,9
		Mínima	-1,1	0,4	1,8	0,6	-0,6	-6,4	-4,3	-0,9	1,0	-1,5	2,2
	800	Promedio	-3,0	-1,8	-0,5	-0,3	-1,5	-6,3	-4,3	-0,1	6,4	-0,6	0,6
		Máxima	-1,8	-0,5	1,1	1,8	0,7	-4,0	-2,6	0,3	6,6	-0,6	1,2
		Mínima	-4,6	-3,6	-3,3	-4,6	-6,0	-11,2	-7,1	-0,7	6,2	-0,7	-0,2
B	500	Promedio	-1,0	0,7	0,7	0,0	-1,0	1,0	4,4	2,6	5,5	4,5	3,4
		Máxima											
		Mínima											
	600	Promedio	-1,2	0,3	1,0	0,5	-0,6	-2,6	0,0	4,3	12,6	4,8	2,1
		Máxima	0,3	1,6	2,2	1,7	0,3	-1,6	1,2	10,3	19,2	11,0	3,4
		Mínima	-9,6	-7,7	-7,8	-5,5	-6,6	-3,6	-1,5	-3,2	-1,2	-9,0	-10,8
	800	Promedio	-1,3	0,3	1,5	1,8	0,9	-3,7	-2,3	-3,3	3,1	-0,8	2,4
		Máxima											
		Mínima											
900	Promedio	-4,0	-2,5	-1,5	-1,7	-2,3	-6,3	-2,1	-3,8	-1,3	-2,6	-0,1	
	Máxima												
	Mínima												
D	100	Promedio	-3,7	-2,2	-0,5	0,7	0,7	-3,2	-1,8	-4,1	-7,8	-5,8	1,3
		Máxima	-2,5	-0,8	1,0	2,3	2,0	-2,5	-1,5	-3,7	-7,6	-5,1	2,5
		Mínima	-4,6	-3,1	-1,5	-0,5	-0,1	-3,6	-2,0	-4,4	-8,0	-6,1	0,4
	500	Promedio	0,0	1,6	2,7	4,0	2,9	0,5	0,9	-0,9	-0,1	0,3	3,0
		Máxima	3,3	5,0	6,6	8,2	7,1	2,4	1,8	0,4	1,4	2,7	6,4
		Mínima	-5,2	-3,8	-4,2	-3,2	-3,9	-0,7	-1,1	-4,3	-2,1	-5,8	-5,1
	600	Promedio	-1,2	0,5	2,2	3,1	2,4	-2,9	-3,5	-3,3	2,4	-1,3	2,2
		Máxima	0,6	2,3	3,8	4,6	3,9	-1,6	-2,3	-2,5	3,7	0,0	3,6
		Mínima	-3,3	-1,6	0,2	0,9	0,2	-5,3	-5,4	-4,1	1,3	-2,7	0,6
	700	Promedio	-1,3	0,3	2,0	3,1	2,1	-3,2	-3,4	1,2	7,6	-0,3	1,7
		Máxima	-0,8	0,7	2,5	3,4	2,4	-3,0	-2,9	2,9	9,4	0,8	2,4
		Mínima	-1,8	-0,2	1,5	2,7	1,9	-3,4	-3,9	-1,4	4,4	-1,9	0,9
	800	Promedio	-0,1	1,7	3,5	5,1	4,0	-0,8	-1,4	0,8	6,9	0,3	2,2
		Máxima	0,5	2,4	4,4	6,0	5,0	0,2	-0,4	1,0	7,4	0,5	3,1
		Mínima	-0,7	0,8	2,5	3,8	2,8	-2,3	-2,7	0,6	6,2	0,1	1,1
E	400	Promedio	0,7	2,2	3,7	4,9	3,9	-1,1	-1,1	-4,3	-3,8	1,1	5,0
		Máxima											
		Mínima											

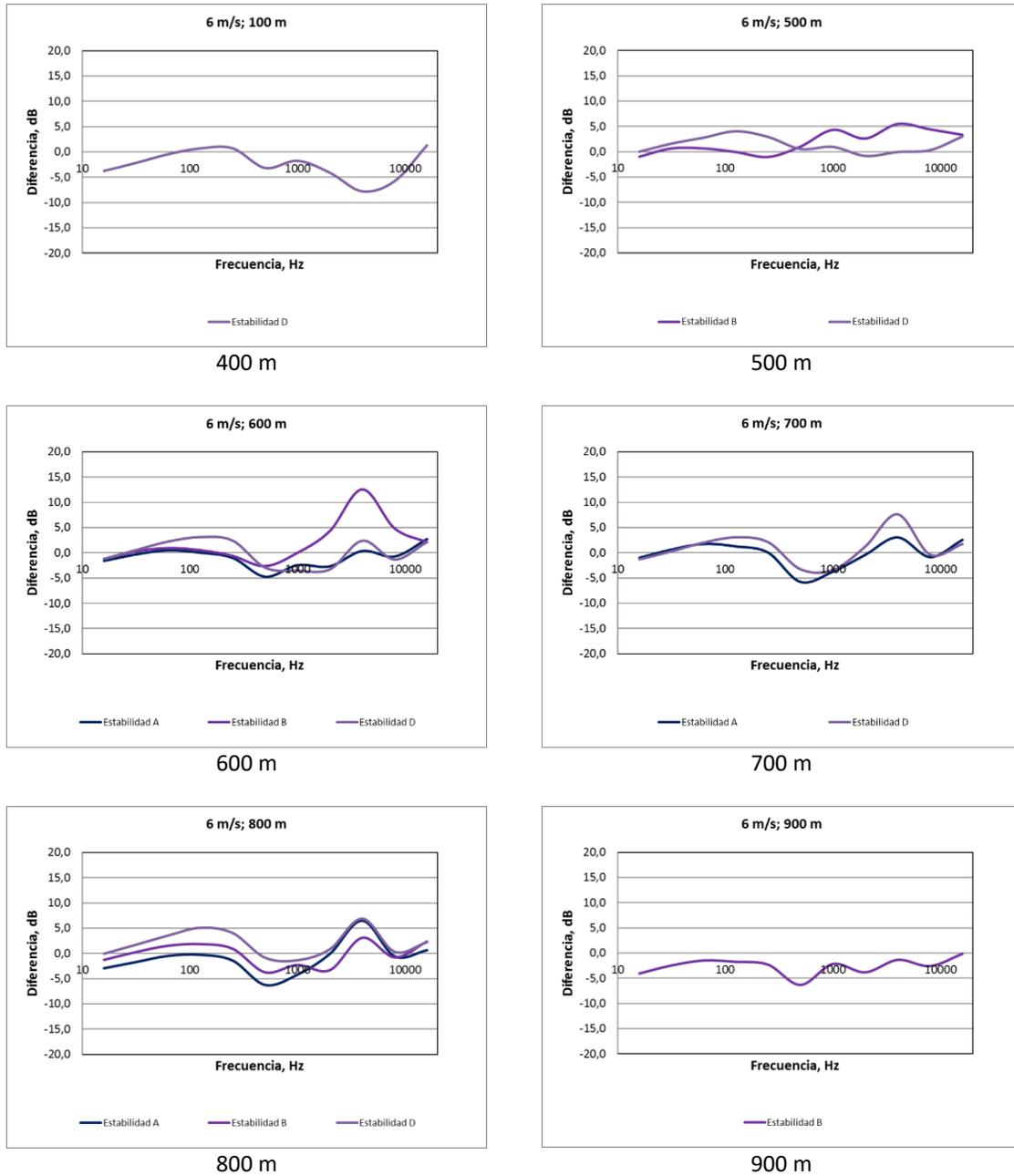
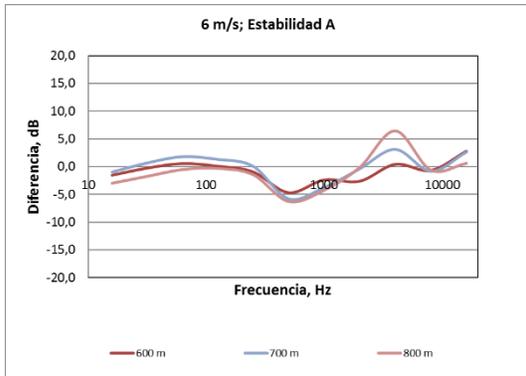
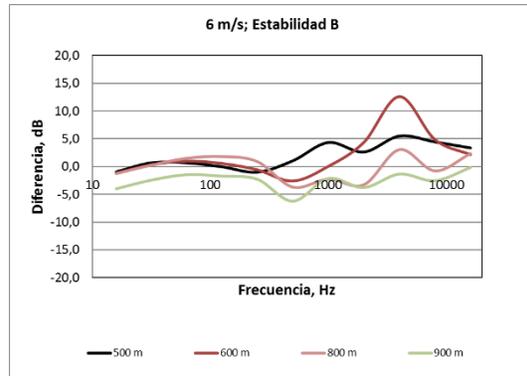


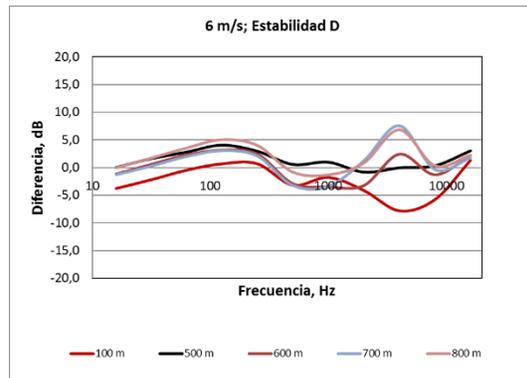
Figura I9. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo proporcional para cada punto de medición, discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 6 m/s.



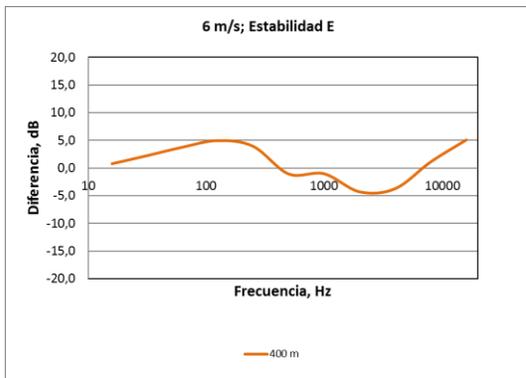
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura I10. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 6 m/s.



Tabla I6. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.

Estabilidad	Distancia (m)	Diferencia (dB)	Frecuencia (Hz)										
			16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A	600	Promedio	-8,2	-6,3	-6,3	-5,0	-5,8	-1,3	1,5	0,5	7,3	-4,3	-5,5
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	0,4	2,1	3,3	3,0	2,0	-3,7	-2,3	1,7	6,2	1,3	4,8
		Máxima	1,0	2,9	4,4	3,8	2,9	-3,0	-1,9	5,8	10,8	2,0	5,3
		Mínima	-0,8	0,7	1,6	1,6	0,8	-4,7	-2,9	-2,8	-0,4	0,5	4,1
	800	Promedio	-2,2	-0,8	0,0	-0,5	-1,6	-6,3	-2,6	0,3	5,7	2,6	3,0
		Máxima	-1,1	0,3	1,5	0,9	-0,1	-4,8	-0,5	3,6	10,1	4,3	4,2
		Mínima	-4,0	-3,1	-2,9	-3,6	-5,3	-9,8	-4,7	-3,6	-0,3	-0,8	1,3
B	600	Promedio	1,3	2,6	3,6	3,2	1,9	-0,5	5,0	16,0	25,1	16,8	6,3
		Máxima											
		Mínima											
D	100	Promedio	-5,3	-3,6	-1,8	-0,7	-0,4	-3,8	-2,2	-4,6	-8,1	-6,4	0,2
		Máxima	-5,2	-3,4	-1,6	-0,2	-0,2	-3,8	-1,9	-4,4	-8,0	-6,2	0,3
		Mínima	-5,3	-3,8	-2,1	-1,2	-0,6	-3,9	-2,4	-4,8	-8,2	-6,5	0,1
	400	Promedio	-3,9	-2,4	-0,7	0,4	-0,6	-5,2	-4,6	-7,9	-7,1	-2,6	1,2
		Máxima	-3,8	-2,4	-0,7	0,5	-0,5	-5,1	-4,2	-7,5	-6,8	-2,4	1,4
		Mínima	-3,9	-2,5	-0,7	0,3	-0,7	-5,4	-5,1	-8,3	-7,5	-2,8	1,0
	500	Promedio	-0,7	0,9	2,6	3,8	2,9	-1,8	-1,5	-4,2	-0,9	1,3	4,6
		Máxima	0,2	1,8	3,6	4,9	4,0	-0,8	-0,5	-3,0	1,0	2,9	5,6
		Mínima	-2,7	-1,2	0,6	1,4	0,6	-4,1	-3,6	-6,3	-3,8	-1,1	2,8
	600	Promedio	-0,6	1,6	3,8	5,5	4,8	0,1	-1,1	-3,1	1,0	-0,6	2,6
		Máxima											
		Mínima											
	700	Promedio	-4,3	-2,7	-0,9	0,4	-0,3	-5,5	-5,9	-6,8	-2,2	-3,8	-0,2
		Máxima											
		Mínima											
800	Promedio	-3,2	-1,9	-0,5	0,6	-0,1	-5,1	-5,1	-5,6	-0,9	-2,7	0,8	
	Máxima												
	Mínima												
E	300	Promedio	-8,0	-6,1	-4,0	-1,9	-3,1	-7,9	-9,0	-12,5	-13,4	-7,8	-4,5
		Máxima	-7,6	-5,8	-3,7	-1,4	-2,7	-7,4	-8,7	-12,2	-13,0	-7,5	-4,2
		Mínima	-8,4	-6,8	-4,7	-2,7	-3,9	-8,6	-9,4	-12,7	-13,7	-8,1	-4,9

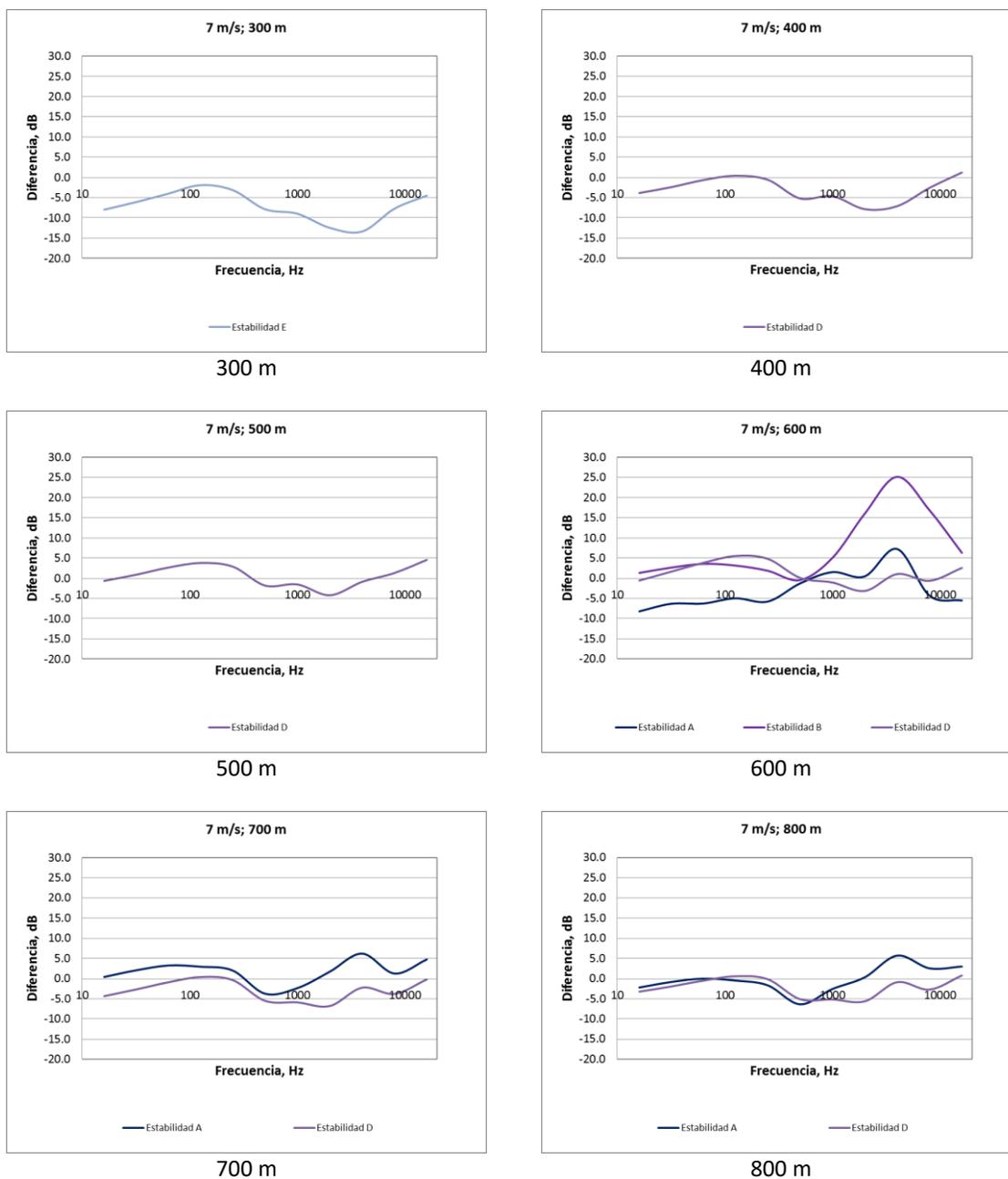
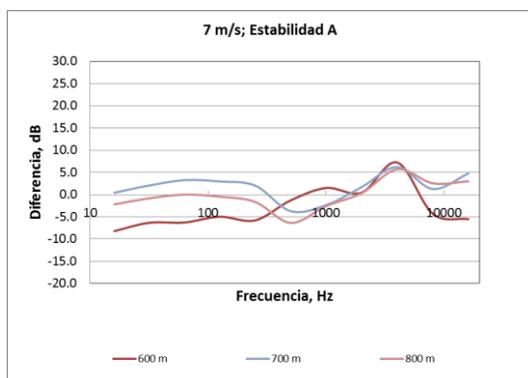
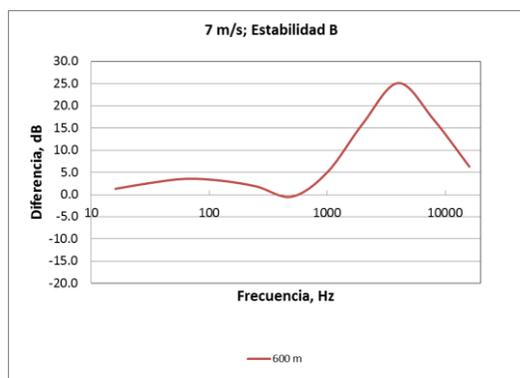


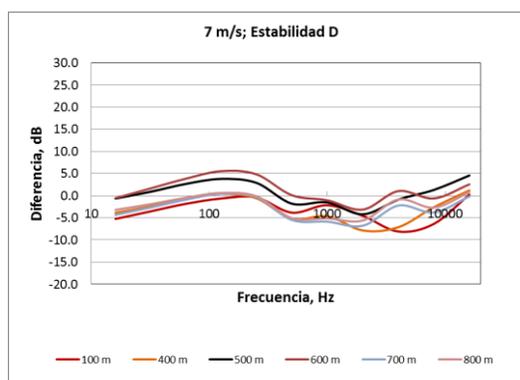
Figura I11. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad para una velocidad del viento de 7 m/s.



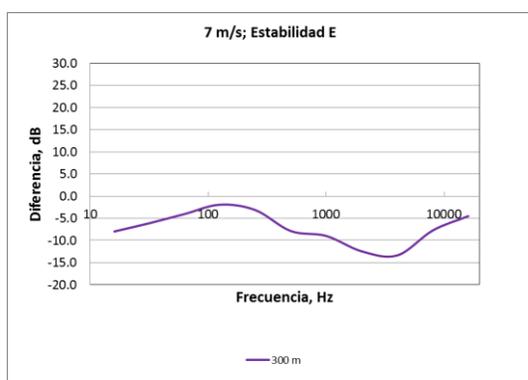
Estabilidad A



Estabilidad B



Estabilidad D



Estabilidad E

Estabilidad F

Figura I12. Nivel de presión sonora residual estimado con el modelo propuesto para cada punto de medición, discriminado por estabilidad y frecuencia para una velocidad del viento de 7 m/s.



## **ANEXO J**

### **MODELO DE CÁLCULO PARA LAS CONTRIBUCIONES RELATIVAS DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE LA EMISIÓN DE ENERGÍA ACÚSTICA A LA POTENCIA SONORA DE UN AEROGENERADOR**





A continuación, se presenta la aplicación del modelo para estimar las contribuciones relativas de los componentes de la emisión de energía acústica al nivel de potencia sonora de los aerogeneradores de acuerdo al modelo de predicción propuesto con el fin de proponer un enfoque adecuado para la predicción de la potencia del sonido de los aerogeneradores. Se presentan los valores de los parámetros de entrada utilizados y los resultados numéricos obtenidos. Los cálculos están en bandas de octava para cada uno de los componentes identificados. También se incluye la suma de dichos componentes.

Para el modelo de cálculo se tiene un aerogenerador Vestas 90 de 2,0 MW con tres aspas de 44 m de radio y una longitud máxima de la cuerda de 3,5 m. La velocidad del viento a 10 metros de altura es de 2,0 m/s y la frecuencia para la cual se van a calcular las contribuciones relativas de los componentes de ruido es 500 Hz.

• **Nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento incidente:**

Densidad del aire a 15° C y 760 mm Hg:

$$\rho = \frac{1,293}{(1 + 0,00367t)} = \frac{1,293}{(1 + 0,00367 \times 15)} = 1,226 \frac{kg}{m^3}$$

Viscosidad del aire a 15° C y 760 mm Hg:

$$\mu = 0,00001716 \left( \frac{t + 273,15}{273} \right)^{0,763} = 0,00001716 \left( \frac{15 + 273,15}{273} \right)^{0,763}$$

$$\mu = 1,79 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

Número de Reynolds:

$$R_{ec} = \frac{c_{max} U_{10} \rho}{\mu} = \frac{3,5 \times 2 \times 1,226}{1,79 \times 10^{-5}} = 479743,8$$



Parámetros integrales de la capa límite:

$$\frac{\delta_0}{c_{max}} = 10^{[3,411 - 1,5397 (\log R_{ec}) + 0,1059 (\log R_{ec})^2]}$$

$$\frac{\delta_0}{3,5} = 10^{[3,411 - 1,5397 \times \log(479743,8) + 0,1059 \times [\log(479743,8)]^2]}$$

$$\delta_0 = 0,0422 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 14,296 \times 10^{0,0258\alpha}$$

Se asume un ángulo de ataque igual a 15.

$$\frac{\delta_s}{\delta_0} = 14,296 \times 10^{0,0258\alpha}$$

$$\frac{\delta_s}{0,0422} = 14,296 \times 10^{0,0258 \times 15}$$

$$\delta_s = 1,4724 \text{ m}$$

Número de Strouhal:

$$S_t' = \frac{f \delta_s}{U_{10}}$$

$$S_t' = \frac{f \delta_s}{U_{10}} = \frac{500 \times 1,4724}{2} = 368,11$$

Parámetro  $K_1(f)$  en función de la frecuencia:

$$K_1(f) = 10 \log \left\{ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^4 \left[ \left( \frac{S_t}{S_{tmax}} \right)^{1,5} + 0,5 \right]^{-4} \right\}$$



$$K_1(f) = 10 \log \left\{ \left( \frac{368,11}{0,1} \right)^4 \left[ \left( \frac{368,11}{0,1} \right)^{1,5} + 0,5 \right]^{-4} \right\} = -71,32$$

Nivel de potencia sonora  $Lw_1$  en función de la velocidad del viento y la frecuencia:

$$Lw_1 = 10 \log(\delta_s U_{10}^5 n_a) + K_1(f) + 7,04$$

$$Lw_1 = 10 \log(1,4724 \times (2)^5 \times 3) - 71,32 + 7,04 = -42,8 \text{ dB(Z)}$$

Nivel de potencia sonora  $Lw_2$  en función de la velocidad del viento:

$$Lw_2 = -0,0073 U_{10}^4 + 0,2987 U_{10}^3 - 4,5549 U_{10}^2 + 30,6407 U_{10} + 43,2753$$

$$Lw_2 = -0,0073 \times 2^4 + 0,2987 \times 2^3 - 4,5549 \times 2^2 + 30,6407 \times 2 + 43,2753$$

$$Lw_2 = 88,6 \text{ dB(Z)}$$

Nivel de potencia sonora debido al flujo turbulento incidente:

$$Lw_{fte} = 27,8802 - 0,256685 Lw_1 + 0,776152 K_1(f) + 0,979926 Lw_2 - 0,00134543 f$$

$$Lw_{fte} = 27,8802 - 0,256685 \times (-42,8) + 0,776152 \times (-71,32) + 0,979926 \times (88,6) - 0,00134543 \times (500)$$

$$Lw_{fte} = 69,7 \text{ dB(Z)}$$

- **Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:**

Velocidad de propagación del sonido a 15° C y 760 mm Hg:

$$C = 20,05\sqrt{T}$$

$$C = 20,05\sqrt{(15 + 273,15)} = 340,35 \frac{m}{s}$$



Número de Mach:

$$M = \frac{U_{10}}{C}$$

$$M = \frac{2}{340,35} = 0,006$$

Frecuencia pico:

$$f_{peak} = \frac{0,02 U_{10} M^{-0,6}}{\delta_s}$$

$$f_{peak} = \frac{0,02 \times 2 \times 0,006^{-0,6}}{1,4724} = 0,5923$$

Parámetro  $K_2(f)$  en función de la frecuencia:

$$K_2(f) = \frac{4 \left( \frac{f}{f_{peak}} \right)^{2,5}}{\left[ 1 + \left( \frac{f}{f_{peak}} \right)^{2,5} \right]^2}$$

$$K_2(f) = \frac{4 \left( \frac{500}{0,5923} \right)^{2,5}}{\left[ 1 + \left( \frac{500}{0,5923} \right)^{2,5} \right]^2} = 1,93 \times 10^{-7}$$

Parámetro  $K_3(f)$  en función de la frecuencia:

$$K_3(f) = -[1,446 \ln(f) - 8,9915]^2$$

$$K_3(f) = -[1,446 \ln(500) - 8,9915]^2 = 0$$

Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:



$$LW_{bsclt} = 47,628 + 214,23 K_2(f) - 0,438903 U_{10}^2 - 0,32683 LW_2 + 0,405141 K_3(f) + 37,3317 \log(U_{10}^3) - 0,00143337 f + 4,432 \log(f)$$

$$LW_{bsclt} = 47,628 + 214,23 \times 1,93 \times 10^{-7} - 0,438903 \times (2)^2 - 0,32683 \times 88,6 + 0,405141 \times 0 + 37,3317 \log(2^3) - 0,00143337 \times 500 + 4,432 \log(500)$$

$$LW_{bsclt} = 61,9 \text{ dB}(Z)$$

- **Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida:**

Desviación estándar geométrica de la frecuencia:

$$\sigma = e^{\left[ \sqrt{\frac{\sum (\ln(f) - \overline{\ln(f)})^2}{(n-1)}} \right]}$$

$$\sigma = e^{\left[ \sqrt{\frac{(\ln(16) - 6,218)^2 + (\ln(31,5) - 6,218)^2 + \dots + (\ln(16000) - 6,218)^2}{(11-1)}} \right]}$$

$$\sigma = e^{[2,294]} = 9,911$$

Parámetro  $K_4(f)$  en función de la frecuencia:

$$K_4(f) = -[1,446 \ln(f) - 9,9915]^2$$

$$K_4(f) = -[1,446 \ln(500) - 9,9915]^2 = -1$$

Nivel de potencia sonora  $LW_3$  en función de la velocidad del viento y la frecuencia:

$$LW_3 = LW_2 - 9,38034 \log(f) - 0,00105866 f + 8,07483 \quad (20)$$

$$LW_3 = 88,6 - 9,38034 \log(500) - 0,00105866 \times 500 + 8,07483$$

$$LW_3 = 70,84 \text{ dB}(Z)$$



Nivel de potencia sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida:

$$LW_{dvcllbs} = -22,3209 - 0,652198 \log(K_2(f)) - 6,74579 e^{\left[\frac{-(f-315)^2}{2f\sigma}\right]} + 0,00242912 f + 0,0718905 \frac{(f - 1600)^2}{2f\sigma} + 1,02093 LW_3 + 2,68552 K_4(f)$$

$$LW_{dvcllbs} = -22,3209 - 0,652198 \log(1,93 \times 10^{-7}) - 6,74579 e^{\left[\frac{-(500-315)^2}{2 \times 500 \times 9,911}\right]} + 0,00242912 \times 500 + 0,0718905 \frac{(500 - 1600)^2}{2 \times 500 \times 9,911} + 1,02093 \times 70,84 + 2,68552 \times (-1)$$

$$LW_{dvcllbs} = -22,3209 - 0,652198 \times (-6,714) - 6,74579 e^{[-0,348]} + 0,00242912 \times 500 + 0,0718905 \times 12,3 + 72,323 + 2,308 y2$$

$$LW_{dvcllbs} = -22,3209 + 4,3789 - 6,74579 \times 0,706 + 1,215 + 0,884 + 72,323 - 2,68552$$

$$LW_{dvcllbs} = 49,0 \text{ dB}(Z)$$

### Nivel de potencia sonora total:

$$LW_{total} = 10 \log \left[ 10^{\left(\frac{LW_{fte}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LW_{bsclt}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LW_{dvcllbs}}{10}\right)} \right]$$

$$LW_{total} = 10 \log \left[ 10^{\left(\frac{69,7}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{61,9}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{49,0}{10}\right)} \right] = 70,4 \text{ dB}(Z)$$

La tabla J1 y las figuras J1 a J8 presentan los resultados numéricos obtenidos de los cálculos de las contribuciones relativas de los componentes de la emisión de energía acústica a la potencia sonora de un aerogenerador y la suma de dichos componentes.



Tabla J1. Contribuciones relativas de los componentes de la emisión de energía acústica a la potencia sonora de un aerogenerador y la suma de dichos componentes.

U <sub>10</sub> (m/s)	Frecuencia (Hz)	Lw <sub>fte</sub> (dBZ)	Lw <sub>psclt</sub> (dBZ)	Lw <sub>dvcllts</sub> (dBZ)	Lw <sub>total</sub> (dBZ)
2	16	85,8	46,1	28,1	85,8
	31,5	82,8	50,8	25,9	82,8
	63	79,6	54,9	32,9	79,6
	125	76,4	58,1	40,4	76,5
	250	73,1	60,5	43,3	73,4
	500	69,7	61,9	49,0	70,4
	1000	65,9	62,1	53,4	67,6
	2000	61,4	60,8	50,2	64,3
	4000	55,6	57,2	42,9	59,6
3	8000	47,1	50,0	33,8	51,8
	16000	33,2	36,2	26,2	38,2
	16	98,9	59,6	41,2	98,9
	31,5	95,9	64,1	39,0	95,9
	63	92,7	68,1	46,0	92,7
	125	89,5	71,4	53,5	89,6
	250	86,2	73,7	56,4	86,5
	500	82,8	75,1	62,1	83,5
	1000	79,0	75,3	66,5	80,7
4	2000	74,5	74,0	63,3	77,4
	4000	68,7	70,5	56,0	72,8
	8000	60,2	63,2	46,9	65,0
	16000	46,3	49,4	39,3	51,4
	16	107,4	68,0	49,8	107,4
	31,5	104,4	72,3	47,6	104,4
	63	101,2	76,3	54,6	101,2
	125	98,0	79,5	62,1	98,1
	250	94,7	81,9	65,0	95,0
5	500	91,3	83,3	70,7	91,9
	1000	87,5	83,5	75,1	89,1
	2000	83,0	82,2	71,9	85,8
	4000	77,2	78,6	64,6	81,1
	8000	68,7	71,4	55,5	73,3
	16000	54,8	57,6	47,9	59,7
	16	112,6	73,6	55,0	112,6
	31,5	109,5	77,5	52,7	109,5
	63	106,4	81,5	59,7	106,4
5	125	103,2	84,7	67,2	103,3
	250	99,9	87,1	70,2	100,1
	500	96,4	88,5	75,9	97,1
	1000	92,6	88,7	80,3	94,3
	2000	88,2	87,4	77,1	91,0
	4000	82,4	83,8	69,8	86,2
	8000	73,8	76,6	60,7	78,5
	16000	60,0	62,8	53,1	64,9



Tabla J1. Contribuciones relativas de los componentes de la emisión de energía acústica a la potencia sonora de un aerogenerador y la suma de dichos componentes (continuación).

U <sub>10</sub> (m/s)	Frecuencia (Hz)	LW <sub>fte</sub> (dBZ)	LW <sub>psclt</sub> (dBZ)	LW <sub>dvcllts</sub> (dBZ)	LW <sub>total</sub> (dBZ)
6	16	115,4	77,1	57,8	115,4
	31,5	112,4	80,7	55,5	112,4
	63	109,2	84,6	62,5	109,2
	125	106,0	87,8	70,0	106,1
	250	102,7	90,2	73,0	103,0
	500	99,3	91,6	78,7	100,0
	1000	95,5	91,8	83,1	97,2
	2000	91,0	90,5	79,9	93,9
	4000	85,2	86,9	72,6	89,2
	8000	76,7	79,7	63,5	81,5
16000	62,8	65,9	55,8	67,9	
7	16	116,7	78,9	59,0	116,7
	31,5	113,7	82,2	56,8	113,7
	63	110,5	86,0	63,8	110,5
	125	107,3	89,2	71,3	107,4
	250	104,0	91,6	74,2	104,3
	500	100,6	93,0	79,9	101,3
	1000	96,8	93,2	84,3	98,5
	2000	92,3	91,9	81,1	95,3
	4000	86,5	88,3	73,8	90,6
	8000	78,0	81,0	64,7	82,9
16000	64,1	67,3	57,1	69,2	
8	16	117,1	79,1	59,4	117,1
	31,5	114,1	82,0	57,2	114,1
	63	110,9	85,8	64,2	110,9
	125	107,8	89,0	71,7	107,8
	250	104,5	91,3	74,6	104,7
	500	101,0	92,7	80,3	101,6
	1000	97,2	92,9	84,7	98,8
	2000	92,7	91,6	81,5	95,4
	4000	86,9	88,1	74,2	90,6
	8000	78,4	80,8	65,1	82,9
16000	64,5	67,0	57,5	69,3	

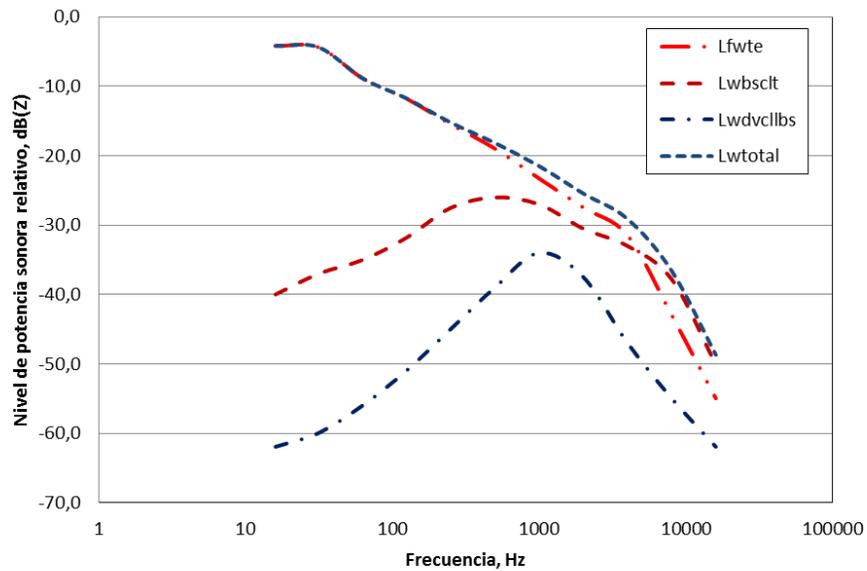


Figura J1. Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada.

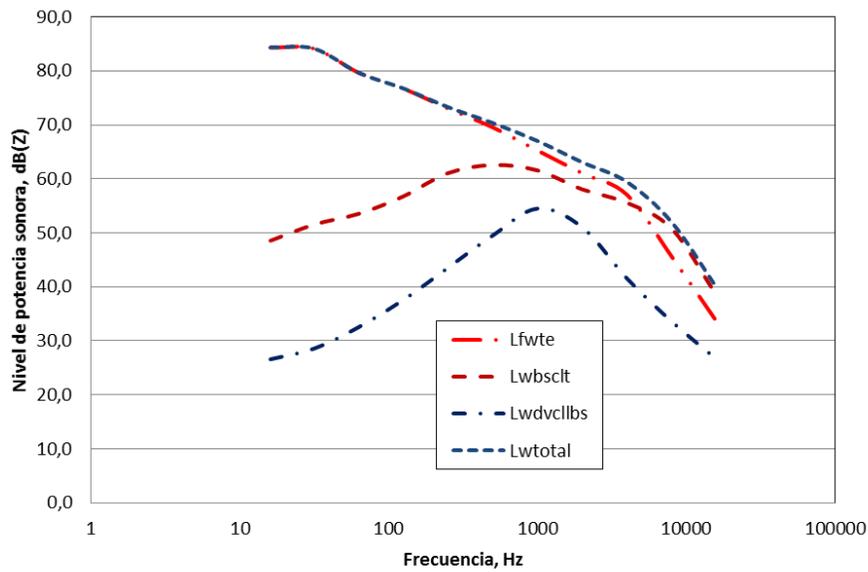


Figura J2. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 2 m/s.

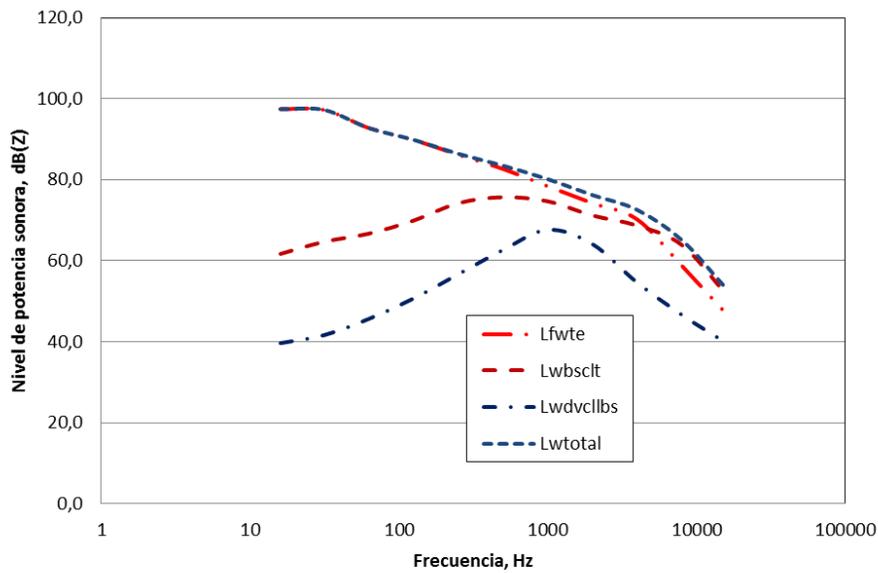


Figura J3. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 3 m/s.

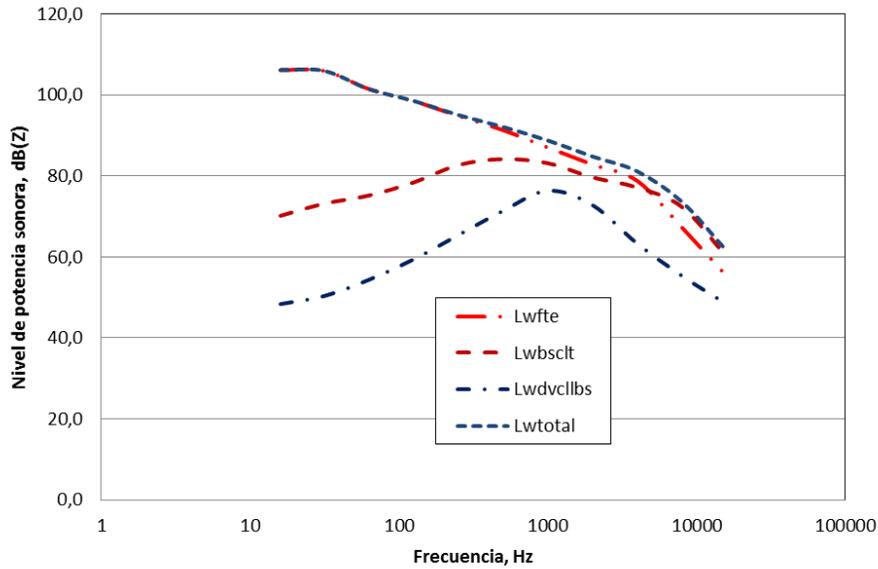


Figura J4. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 4 m/s.

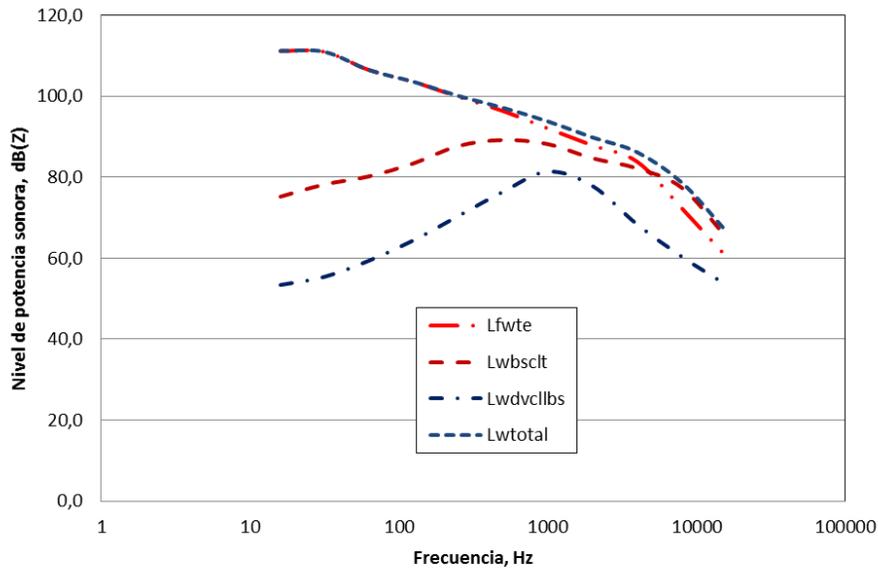


Figura J5. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 5 m/s.

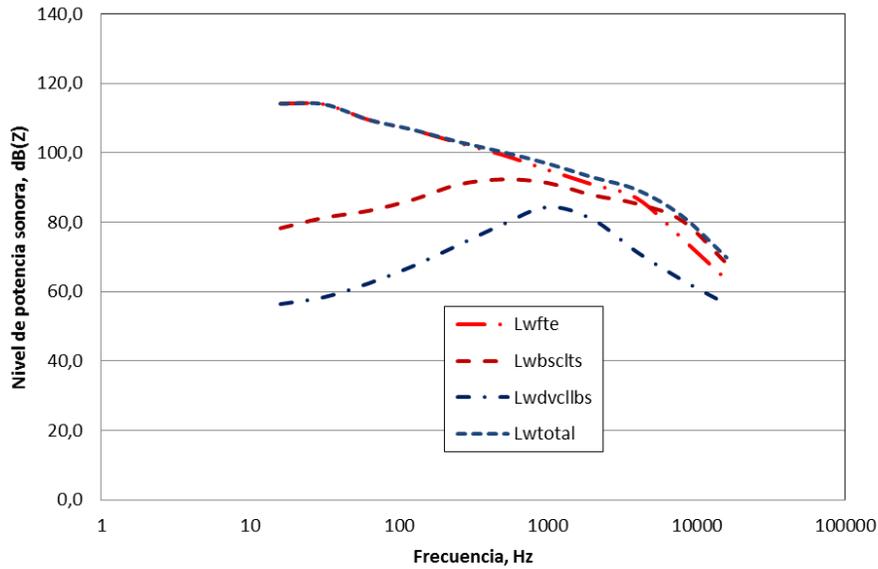


Figura J6. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 6 m/s.

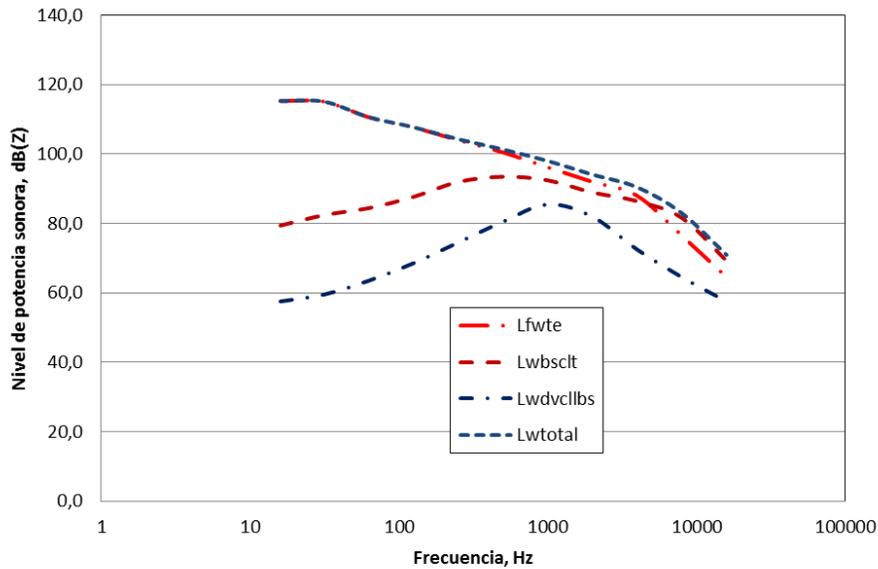


Figura J7. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 7 m/s.

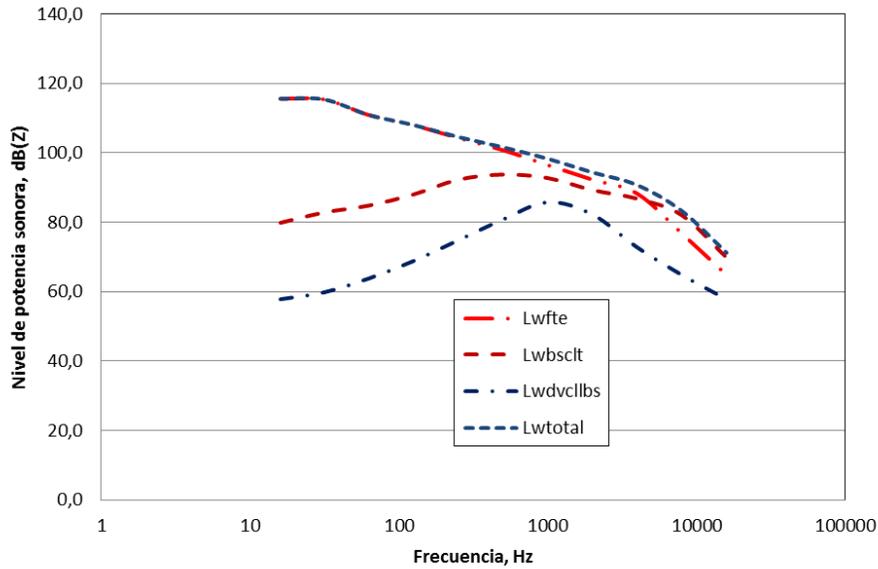


Figura J8. Contribuciones de las diferentes fuentes de ruido al espectro de potencia sonora total calculada para una velocidad del viento de 8 m/s.