



**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE INGENIERIA**

**Tesis para optar al Título de**

**Magíster en Ingeniería Ambiental**

**“PREDICCIÓN DE LOS NIVELES SONOROS ASOCIADOS  
CON EL FUNCIONAMIENTO DE AEROGENERADORES:  
Aplicabilidad de la ISO 9613-2 en el Uruguay”**

**Autora: ING. FABIANA BIANCHI FALCO**

**Tutora: DRA. ING. ALICE ELIZABETH GONZÁLEZ FERNÁNDEZ**

Montevideo, Uruguay

Agosto, 2014

## CONTENIDO

GLOSARIO.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	9
RESUMEN.....	10
PALABRAS CLAVE .....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. ANTECEDENTES .....	13
1.1.1. Situación Internacional .....	14
1.1.2. Política Energética Nacional.....	15
1.2. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACION Y MOTIVACION ...	21
1.3. OBJETIVOS .....	23
1.3.1. Objetivo general .....	23
1.3.2. Objetivos específicos .....	23
1.3.3. Alcance .....	23
1.4. FORMULACIÓN Y ABORDAJE DEL PROBLEMA .....	24
2. EFECTOS DEL RUIDO.....	26
2.1. AUDICIÓN HUMANA .....	26
2.1.1. Campo audible .....	26
2.1.2. Respuesta del oído humano a los infrasonidos.....	29
2.2. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD HUMANA .....	31
2.3. EFECTOS DEL RUIDO EN LA BIOTA.....	33
3. MODELOS DE TRANSPORTE Y PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS	35
3.1. ECUACIÓN DE ONDA ACÚSTICA .....	35
3.1.1. Sonido .....	35
3.1.2. Intensidad del Sonido.....	35
3.1.3. Las variables acústicas .....	36
3.1.4. Ecuaciones básicas.....	37
3.1.5. Impedancia acústica.....	39
3.2. ONDAS ARMÓNICAS Y MONOCROMÁTICAS.....	39
3.2.1. Ondas Planas.....	40
3.2.2. Ondas esféricas .....	40
3.3. REPRESENTACIÓN DE FUENTES SONORAS.....	40

3.3.1.	Fuente Plana .....	40
3.3.2.	Fuente Puntual .....	41
3.3.3.	Fuente Lineal .....	42
3.4.	PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS .....	43
3.4.1.	Atenuación de ondas sonoras .....	43
3.4.2.	Reflexión y transmisión acústica .....	44
3.5.	CONSIDERACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN EN MODELOS EXPLÍCITOS .....	45
4.	EL AEROGENERADOR COMO FUENTE DE NIVELES SONOROS .....	48
4.1.	COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR .....	48
4.2.	TIPOS DE RUIDO ASOCIADOS CON AEROGENERADORES	49
4.2.1.	Fuentes de Emisión .....	49
4.2.2.	Ruido Mecánico .....	53
4.2.3.	Ruido Aerodinámico .....	53
4.2.3.1.	Emisiones de baja frecuencia, infrasonidos .....	56
4.2.3.2.	Ruido de banda ancha, turbulencia del flujo entrante ....	58
4.2.3.3.	Ruido de frecuencias altas en el borde de salida de la pala	58
4.3.	INCIDENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LAS EMISIONES SONORAS .....	59
4.3.1.	Estabilidad atmosférica .....	59
4.3.2.	Turbulencia .....	62
5.	REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS .....	67
5.1.	NORMATIVA Y AUTORIZACIONES REQUERIDAS .....	67
5.1.1.	A nivel internacional .....	67
5.1.2.	A nivel nacional .....	70
5.2.	ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO DE PARQUES EÓLICOS .....	73
6.	ESTIMACIÓN DE NIVELES DE PRESION SONORA .....	75
6.1.	MODELOS PREDICTIVOS .....	75
6.1.1.	Modelos de ecuación de onda .....	76
6.1.2.	Modelos de rayos .....	76
6.1.3.	Modelos empíricos .....	77

6.2.	MODELO DE CONCAWE .....	77
6.3.	NORMA ISO 9613-2.....	88
6.4.	OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO DE USO CORRIENTE A NIVEL INTERNACIONAL .....	94
6.4.1.	Norma AU 4959-2010 .....	95
6.4.2.	Norma NZS 9808:2010 .....	97
6.4.3.	NORD2000 (Modelo nórdico) .....	99
6.5.	SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS	105
7.	ANTECEDENTES ESPECÍFICOS DEL TRABAJO, JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN.....	109
7.1.	G.P. VAN DEN BERG .....	109
7.1.1.	Hipótesis .....	110
7.1.2.	Conclusiones de los estudios de GP. van den Berg (2006)	111
7.1.3.	Entrevista .....	114
7.2.	COMPARACIÓN DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA MEDIDOS Y CALCULADOS .....	115
7.3.	ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE NIVELES SONOROS .....	124
7.3.1.	Consideraciones a nivel internacional .....	124
7.3.2.	Propuesta de cálculo - IMFIA .....	125
8.	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA NORMA ISO 9613-2.....	132
8.1.	HIPÓTESIS Y CONSIDERACIONES.....	132
8.2.	MÉTODO DE CÁLCULO.....	134
8.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO.....	138
9.	CASO DE ESTUDIO .....	142
9.1.	CAMPAÑAS DE MEDICIÓN Y RESULTADOS.....	142
9.1.1.	Ubicación del caso de estudio.....	142
9.1.2.	Campañas de medición.....	144
9.2.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	149
9.2.1.	Modulación de los niveles sonoros medidos .....	149
9.2.2.	Comparación de niveles de presión sonora calculados y medidos.....	150

9.2.3.	Incidencia de las condiciones atmosféricas en la variación de los niveles sonoros .....	154
9.2.4.	Análisis de los fenómenos de propagación .....	155
10.	APLICABILIDAD DE LA NORMA ISO 9613-2 .....	164
10.1.	HIPÓTESIS Y CONSIDERACIONES DE LA ISO .....	164
10.2.	FACTORES DE ATENUACIÓN Y APLICABILIDAD DEL MÉTODO DE CÁLCULO AL CASO DE AERGENERADORES Y EN URUGUAY .....	165
11.	REFLEXIONES FINALES .....	168
11.1.	CONCLUSIONES GENERALES.....	168
11.1.1.	Sobre la aplicabilidad de la ISO al caso de aerogeneradores 168	
11.1.2.	Sobre la aplicabilidad de la ISO al caso de estudio en Uruguay .....	171
11.1.3.	Sobre otros métodos de cálculo de reciente aparición .....	172
11.2.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO .....	174
	BIBLIOGRAFÍA.....	175

## **GLOSARIO**

$A_{atm}$ : Absorción atmosférica

$A_{barr}$ : Atenuación debida a la presencia de barreras

$A_{div}$ : Divergencia geométrica

$A_{fol}$ : Atenuación debida a la vegetación

$A_{gr}$ : Efecto del terreno

$A_{hous}$ : Atenuación debida a la presencia de edificaciones

$A_{site}$ : Atenuación debida a la presencia de emplazamientos industriales

AAP: Autorización ambiental previa

AM: Amplitud modulada

B: Módulo adiabático de volumen

c: Velocidad de propagación del sonido

$C_D$ : Coeficiente de arrastre

$C_L$ : Coeficiente de sustentación

$C_{met}$ : Corrección por las características meteorológicas medias del lugar

CONCAWE: Conservation of clean air and water in Europe

D: Factor de corrección debido a la directividad de la fuente

$\rho$ : Densidad del medio/fluido

$\rho_0$ : Densidad de equilibrio

$\gamma$ : Índice adiabático

$\alpha$ : coeficiente de atenuación atmosférica (dB/km)

DIA: Departamento de Ingeniería Ambiental

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

DNE: Dirección Nacional de Energía

DINOT: Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial

I: Intensidad acústica

IMFIA: Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

k = Constante de Von Kármán

L: Fuerza de sustentación

l: Distancia de la cuerda del álabe

$L_{90}$ : Nivel alcanzado o sobrepasado durante el 90% del tiempo

$L_{Aeq}$ : Nivel de presión acústica equivalente ponderado A

$L_{den}$ : Nivel equivalente día-tarde-noche

$L_{eq}$ : Nivel de presión acústica equivalente

$L_I$ : Nivel de intensidad

$L_p$ : Nivel de presión sonora

$L_{p,LT}$ : Nivel de presión sonora de largo plazo

$L_{p,ST}$ : Nivel de presión sonora de corto plazo

$L_w$ : Nivel de potencia sonora

$L_{wA}$ : Nivel de potencia sonora en escala A

$L_{wA,LF}$ : Nivel de potencia sonora en escala A en bajas frecuencias

$L_{Zeq}$ : Nivel de presión acústica equivalente ponderado Z

LOAEL: Nivel mínimo con efecto observable

$\mu$ : Masa molecular media

MIEM: Ministerio de Industria Energía y Minería

MVOTMA: Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

NOEL: Nivel sin efecto adverso observable

NPS: Nivel de presión sonora

OMS: Organización Mundial de la Salud

$p_e$ : Presión eficaz

$p_o$ : Presión de equilibrio

R: Constante universal de los gases

s: Condensación

S: Sección del conducto

$u^*$  = Velocidad de corte

$\varphi_1$  = Función que depende de la clase de estabilidad atmosférica

$\Gamma$ : Gradiente adiabático de temperatura de aire seco

UDELAR: Universidad de la República

UTE: Usinas Termoeléctricas del Estado

$V_\infty$  : Velocidad del objeto relativa al fluido

z: Impedancia acústica específica

$z_0$  = Rugosidad del terreno

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría comenzar agradeciendo a la Facultad de Ingeniería de la UdelaR por todo aquello que me ha ido aportando durante estos años de estudio.

Dentro de la Universidad quiero agradecer muy especialmente a mi tutora de tesis, a la Dra. Elizabeth González, quien ha sido mi gran guía y apoyo constante para poder realizar y culminar con el presente documento de tesis de la Maestría. Agradezco a Elizabeth por su dedicación y asesoramiento brindado, lo que me ha sido sumamente valioso y enriquecedor.

En esta misma línea quisiera agradecer al Departamento de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería por los datos e instrumentos que me fueron facilitados; y especialmente a todo el equipo de Grupo de Ruido del DIA por el gran y valioso intercambio generado durante el período de trabajo.

En otro orden, quisiera agradecer a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la designación y apoyo económico a través de la beca de posgrados nacionales para la realización de la presente maestría.

Agradecer también al Dr. Frits van den Berg, quien ha sido a través de sus admirables estudios e investigaciones en el tema, la base y motivación de mi tesis de Maestría. Le quiero agradecer especialmente al Dr. van den Berg por su disposición en concederme la oportunidad y el honor de realizarle una entrevista y por su amabilidad en responder todas mis interrogantes e inquietudes, generando un espacio de intercambio que me fue sumamente enriquecedor.

También y muy especialmente quisiera agradecer a mi familia que ha sido un gran apoyo, especialmente a mis padres, María Noel Falco y Leonel Bianchi, y a mis hermanos.

Gracias a todos mis amigos y compañeros, y a todas aquellas personas me han acompañado y apoyado en todo momento, siendo parte de mis sueños y de mi vida.

## RESUMEN

Si bien la energía eólica es no sólo renovable sino ambientalmente limpia, existen posibles impactos ambientales adversos asociados con la instalación de parques de generación eólica cuya ocurrencia debe ser analizada cuidadosamente en cada proyecto. La elevación de los niveles sonoros ambientales es uno de los impactos que conlleva mayor potencial de generar conflictos con la población local, aun desde el momento en que se da a conocer la intención de llevar adelante un emprendimiento de esta naturaleza.

Para predecir los niveles sonoros en el entorno asociados con la operación de fuentes fijas, y por extensión de aerogeneradores, se suele emplear a nivel internacional la metodología de la Norma ISO 9613-2 (1996). El hecho de que se trate no sólo de un método normalizado de cálculo sino de que sea el método recomendado y de uso corriente en la Unión Europea respalda su selección. Sin embargo, hace pocos años comenzaron a aparecer críticas fundamentadas a esa metodología, debido a subestimaciones importantes en las predicciones en un caso de repercusión internacional (van den Berg, G.P., 2006). Es que en algunas condiciones, las predicciones pueden subestimar en forma importante los niveles sonoros esperables en el entorno.

Ante las dificultades que existen actualmente para lograr predicciones ajustadas de los niveles sonoros asociados con el funcionamiento de aerogeneradores de gran porte, se aborda la presente tesis de Maestría titulada: “*Predicciones de los niveles sonoros asociados al funcionamiento de aerogeneradores; Aplicabilidad de la ISO 9613-2 en el Uruguay*”. El objetivo de la misma es contribuir con el desarrollo de metodologías y modelos aplicables para la predicción de los niveles sonoros ambientales asociados con el funcionamiento de aerogeneradores, y con ello a los estudios de impacto acústico de parques eólicos. En esta línea los objetivos específicos a los cuales se apunta en el presente trabajo son por un lado analizar las principales metodologías para el cálculo de niveles sonoros en receptor que se consideran a nivel internacional; realizar un análisis crítico de la aplicabilidad de la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613 - Parte 2 para la predicción de los niveles sonoros asociados con aerogeneradores de gran porte en ambiente rural; y estudiar la aplicabilidad de la Norma ISO 9613 - Parte 2 en proyectos de generación de energía eólica en el Uruguay.

Para ello se realiza una revisión y sistematización en profundidad del marco teórico actual, de estudios realizados y resultados obtenidos tanto a nivel nacional como internacional, y de las metodologías existentes; se

realiza un análisis crítico de la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613-2; y su aplicación para un caso de estudio en Uruguay.

De lo cual se concluye que el método de cálculo que plantea la norma no resulta aplicable al caso de aerogeneradores y no se recomienda la aplicabilidad de la ISO para la predicción de los niveles sonoros generado por este tipo de fuente en el Uruguay.

### ***PALABRAS CLAVE***

Predicción de niveles sonoros; metodologías de cálculo; aerogeneradores; energía eólica.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento continuo de la demanda energética junto con la creciente concientización ambiental en lo que refiere a los combustibles fósiles y la importancia de diversificar la matriz energética en el contexto actual, han hecho que la energía eólica tome cada vez mayor relevancia en la generación de energía eléctrica frente a la generación basada en combustible fósiles.

Los impactos ambientales adversos asociados con la generación de energía eólica afectan en ciertos casos aspectos sensibles para las poblaciones próximas a los parques, como son las modificaciones de los niveles sonoros ambientales debido a su funcionamiento.

Como metodología de cálculo para predecir los niveles sonoros se utiliza a nivel internacional la Norma ISO 9613 Parte 2, método de cálculo oficial en la Unión Europea. Se ha verificado que las diferencias entre los niveles sonoros predichos por la metodología de cálculo utilizada (Norma ISO 9613 Parte 2) y los que efectivamente ocurren en el ambiente debido al funcionamiento de aerogeneradores son muy significativos. Esto ha dado lugar a que en la actualidad se trabaje activamente en torno al tema para avanzar en la comprensión de los fenómenos de propagación relacionados con este tipo de fuentes de gran altura, de modo de mejorar las herramientas que se aplican para la predicción de los niveles sonoros ambientales asociados con su funcionamiento.

En este sentido, ante las dificultades que existen actualmente para lograr predicciones ajustadas de los niveles sonoros en el entorno asociado con el funcionamiento de aerogeneradores de gran porte, es en esta línea que se aborda la presente tesis de Maestría.

Se espera generar información relevante con respecto a los niveles sonoros ambientales asociados con el funcionamiento de aerogeneradores en distintas condiciones meteorológicas y asimismo contribuir a mejorar las herramientas disponibles para predicción de los niveles sonoros y para la evaluación ambiental de parques eólicos desde el punto de vista acústico en el Uruguay. Esto se realizará a través del análisis de un caso particular de la aplicabilidad de la ISO 9613-2 en el Uruguay.

En lo que refiere a la estructura del informe, se presenta en los primeros capítulos el marco teórico y estado del arte, que abarca desde los modelos de propagación de ondas sonoras, los tipos de ruido generados por las turbinas eólicas e incidencia de las condiciones atmosféricas, estado del arte en cuanto a los modelos existentes para la estimación de

los niveles de presión sonora ambientales y antecedentes específicos (Capítulo 2 al 7).

Luego en el Capítulo 8 se realiza un análisis crítico de la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613-2.

En el Capítulo 9 se presenta un caso de estudio en Uruguay, y se analiza la aplicabilidad de la Norma ISO para este caso. Para ello se comparan los niveles de presión sonora calculados y medidos, la incidencia de las condiciones atmosféricas y se analizan los fenómenos de propagación.

En el Capítulo 10 se evalúa la aplicabilidad del método de cálculo de la Norma ISO 9613-2 al caso de aerogeneradores y en Uruguay.

Finalmente en el Capítulo 11 se presentan las conclusiones generales y las líneas de investigación a futuro.

## **1.1. ANTECEDENTES**

Si bien el empleo de la energía eólica en el Uruguay es de larga data, sobre todo en zonas rurales mediante molinos para extracción de agua subterránea o generación de energía eléctrica para bajos consumos, la implantación de Parques Eólicos a gran escala para la generación de energía eléctrica incorporados a la red del sistema eléctrico nacional es bastante reciente.

La implantación de los parques eólicos responde a la necesidad del país de diversificar la matriz energética y la incorporación de recursos autóctonos en el abastecimiento energético del país, establecidos en los lineamientos de la política energética del Uruguay, para lo cual se requiere contar con nuevas formas de energía, entre las que se halla la eólica. Esta es una forma de obtener energía limpia y renovable, evitando la contaminación del aire y otras formas de degradación ambiental asociadas a los combustibles fósiles. Los parques eólicos permiten generar energía eléctrica a partir del recurso eólico disponible, sustituyendo la generación de electricidad producida a partir de otras fuentes, en particular a partir de fuentes no renovables como los combustibles fósiles. La generación de energía eléctrica conectada a la red a partir del recurso eólico, se plantea como uno de los recursos autóctonos con mejores perspectivas en el mediano y largo plazo.

Actualmente se cuenta con más de 600 MW entre los parques en funcionamiento y los que ya están adjudicados para su instalación, y se proyecta para el año 2015 contar con más de 1000 MW de potencia instalada, los cuales son proyectos que fueron adjudicados a privados en diferentes convocatorias.

Aunque se considera una energía verdaderamente limpia, existen algunos potenciales impactos ambientales negativos asociados con la instalación de parques de generación eólica, cuya ocurrencia debe ser analizada cuidadosamente en cada proyecto previo a su autorización, dado que una vez en operación es muy poco probable que se pueda contar con medidas de mitigación efectivas y costo eficientes en caso de apartamientos importantes en relación a las previsiones realizadas en los estudios previos. En ese sentido, la elevación de los niveles sonoros ambientales es uno de los impactos que presenta mayor potencial de generar conflictos con la población local y que, de hecho, ya se ha manifestado en el Uruguay pese a la corta historia de la operación de aerogeneradores de gran porte.

En lo que refiere al marco normativo en el Uruguay, el Decreto 349/005, Reglamento de la Evaluación de Impacto Ambiental, exige la obtención de la denominada Autorización Ambiental Previa (AAP) para la instalación y operación de diversos emprendimientos, entre los que se encuentran los parques eólicos de más de 10 MW. Para la obtención de la AAP se debe realizar un Estudio de Impacto Ambiental en el cual se identifiquen y evalúen los impactos significativos del emprendimiento, y se definan medidas de mitigación para aquellos impactos que no sean aceptables en el medio receptor. En el caso de los parques eólicos, también se debe obtener previamente la denominada Viabilidad Ambiental de Localización. En ambas evaluaciones se debe analizar el impacto generado por el ruido de los aerogeneradores y las posibles molestias causadas a los vecinos por el incremento en el nivel sonoro de inmisión. El análisis se basa en un modelo de propagación de ruido, que permite calcular el nivel sonoro de inmisión en un determinado receptor a partir del nivel sonoro de emisión de los aerogeneradores.

### **1.1.1. Situación Internacional**

La predicción de los niveles de presión sonora producidos por el funcionamiento de aerogeneradores de gran porte, es un tema que ha pasado en los últimos años a estar en los primeros lugares de la lista de "hot topics" en acústica ambiental. Esto surge al demostrarse las falencias de los métodos utilizados a nivel internacional, y que los mismos no habían sido concebidos para ser aplicados a este tipo de fuentes de ruido, lo cual se funda en lo expresado en la Directiva 2002/49/CE, en la que precisamente se sugiere aplicar la ISO 9613-2 en tanto no se cuente con métodos de predicción nacionales en los países de la Unión Europea.

La metodología generalmente utilizada a nivel mundial para la predicción de los niveles sonoros en inmisión en el área de influencia de fuentes puntuales es la Norma ISO 9613-2 (1996) como fue mencionado. Ésta a su vez recoge los puntos principales de un estudio realizado en 1981 para

CONCAWE - The oil companies European association for environment, health and safety in refining and distribution (Manning, 1981).

Hacia 2006, una serie de conflictos entre Holanda y Alemania debido a que los niveles de presión sonora predichos en el Estudio de Impacto Ambiental de un Parque Eólico próximo a la frontera entre ambos países estaban siendo largamente superados en horario nocturno, condujo a revisar el método de cálculo de la mencionada Norma. Los estudios de G.P. van den Berg (2006) permitieron poner en evidencia que la condición de estabilidad atmosférica, que no se considera explícitamente en ese método de cálculo, era una de las causas centrales de la significativa subestimación (que en algunos casos llegaba a exceder los 10 dB).

En efecto, si bien ya Rudolphi (2003) había publicado previamente una crítica dura en ese sentido, sólo desde las primeras publicaciones de G.P. van den Berg (2006) demostrando las falencias de la metodología de la Norma ISO 9613-2 (1996) para la aplicación a ruido de aerogeneradores se desata una verdadera necesidad a nivel mundial de desarrollar una nueva metodología de predicción.

Luego, y como consecuencia de las falencias demostradas por van den Berg, se realizan otros estudios más específicos a nivel internacional. En el año 2012 Huikwan K. *et al.* ponen a punto una técnica de medición de vibraciones para analizar la propagación por tierra, a grandes distancias de las fuentes, de las emisiones acústicas de turbinas eólicas instaladas off-shore, con énfasis en el análisis de los fenómenos que ocurren en las interfaces tierra-agua y agua-aire, es decir, en las superficies en que ocurren cambios drásticos en la impedancia acústica del medio de propagación.

### **1.1.2. Política Energética Nacional**

El objetivo central de la política energética es la satisfacción de todas las necesidades energéticas nacionales, a costos que resulten adecuados para todos los sectores sociales y que aporten competitividad al país, promoviendo hábitos saludables de consumo energético, procurando la independencia energética del país en un marco de integración regional, mediante políticas sustentables tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, utilizando la política energética como un instrumento para desarrollar capacidades productivas y promover la integración social.

Para alcanzar este objetivo central, se estructuran 4 grandes ejes estratégicos, que son el eje institucional, el eje de la oferta, el eje de la demanda y el eje social.

Mediante la necesidad del país de diversificar la matriz energética y la incorporación de recursos autóctonos en el abastecimiento energético del país, establecidos en los lineamientos de la política energética del Uruguay, se requiere contar con nuevas formas de energía, entre las que se halla la eólica.

A continuación se presentan los parques eólicos, que en esta línea de acción, fueron instalados y los que se encuentran en etapa de construcción.

### **Proyectos instalados**

Desde el año 2006 se han instalado en el Uruguay diferentes parques eólicos para generación a gran escala. Algunos de estos emprendimientos se enmarcan en la convocatoria del proceso competitivo de la empresa estatal UTE a través del Decreto 77 del año 2006. Otros parques, como Caracoles I y II, son propiedad de UTE.

En 2006, la empresa Agroland, ubicada en las cercanías de Garzón en el departamento Rocha, fue una de las precursoras de la generación eólica en el Uruguay. Sin embargo su potencia instalada (450 kW) no está en lo que en la actualidad se define como “gran escala”.

Luego surgió el establecimiento Nuevo Manantial, con una potencia actual instalada de 13 MW.

En 2008, se instaló el primer parque del complejo de Parques Eólicos "Ing. Emanuele Cambilargiu" (Caracoles II), propiedad de la empresa pública UTE, y ubicado en la Sierra de los Caracoles a pocos kilómetros al norte de la ciudad de San Carlos en el departamento de Maldonado. Este Complejo Eólico, está compuesto por dos parques, cada uno con una potencia instalada de 10 MW, provista por 5 máquinas Vestas (V80) de 2 MW de potencia cada una. La segunda etapa fue concluida en junio de 2010.

Luego de ello, como resultado del procedimiento competitivo promovido por UTE a partir del Decreto 77/006 y sus decretos complementarios, se construyó en el departamento de San José el parque eólico "Magdalena" de la firma Kentilux. Este parque entrega energía a la red desde mayo de 2011, y cuenta con una potencia instalada de 17,2 MW.

Proyectos operativos			
Empresa	Pot. Instalada (MW)	Departamento	Entrada operación
Agroland	0,45	Rocha	marzo 2007
Nuevo Manantial	18	Rocha	junio 2008
Caracoles I (UTE)	10	Maldonado	diciembre 2008
Caracoles II (UTE)	10	Maldonado	junio 2010
Kentilux	17,2	San José	mayo 2011
Engraw	3,6	Florida	enero 2013
Blengio	1,8	San José	julio 2013
R. del sur	50	Maldonado	abril 2014
Palmatir	50	San José	Julio 2013
Total	161,1		

**Figura 1.1. Proyectos instalados en Uruguay.**

Fuente: <http://www.energiaeolica.gub.uy/> (Actualización 21/04/2014)

Luego, en el año 2013, y como se puede observar en la Figura 1.1, se instalaron en Florida y San José, 2 parques eólicos de 3,6 y 1,8 MW respectivamente, y en el año 2014, 2 parques más de 50 MW cada uno, sumando un total de 161,1 MW de potencia instalada a abril 2014.

### Proyectos en desarrollo

Como resultado de las diferentes convocatorias realizadas por UTE en el marco de los Decretos 77/006, 403/009, 159/011 y 424/011 se adjudicaron a privados un total de 882,8 MW de potencia instalada.

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los proyectos en desarrollo al 2015 que fueran adjudicados a privados en diferentes convocatorias.

<b>Proyectos en construcción - privados</b>			
<b>Conv. Año</b>	<b>Empresa</b>	<b>Pot. Instalada (MW)</b>	<b>Departamento</b>
2006	Luz de loma	20	Florida
2006	Luz de mar	18	Florida
2006	Libertador I	15	Maldonado, Lavalleja
2009	Fingano	50	Maldonado
2009	Jistok	50	Maldonado, Lavalleja
2011	Luz de rio	50	Florida, Flores
2011	Gemsa	42	Lavalleja
2011	Agua leguas	100	Tacuarembó
2011	Polesine	50	Florida
2011	Estrellada	50	Cerro Largo
2011	Molino de rosas	50	Maldonado
2011	Astidey	50	Flores
2011	Noukar	50	Lavalleja
2011	Vientos de pastorale	49,2	Flores
2011	Grupo cobra Uruguay	48,6	San José
2011	Vengano	40	Maldonado
2011	Darinel	50	Maldonado

<b>2011</b>	Ladaner	50	Cerro Largo
<b>2011</b>	Cadonal	50	Flores
<b>Total</b>		<b>882,8</b>	

**Figura 1.2. Proyectos en desarrollo en Uruguay.**

Fuente: <http://www.energieolica.gub.uy/> (Actualización 28/05/2014)

En el siguiente cuadro se muestran los parques en desarrollo por parte de UTE.

<b>Proyectos en construcción - UTE</b>			
<b>Empresa</b>	<b>Parque</b>	<b>Pot. Instalada (MW)</b>	<b>Departamento</b>
<b>UTE-Electrobras</b>	Rosendo Mendoza	65,1	Flores
<b>UTE</b>	Juan Pablo Terra	67,2	Artigas
<b>UTE</b>	Colonia Arias	70	Florida, Flores
<b>UTE</b>	Valentines	70	Treinta y Tres
<b>UTE</b>	Pampa	140	Tacuarembó
<b>UTE</b>	Andresito	50	Flores
<b>Teyma</b>	Palomas	71	Salto
<b>Total</b>		<b>533,3</b>	

**Figura 1.3. Proyectos instalados en Uruguay.**

Fuente: <http://www.energieolica.gub.uy/> (Actualización 21/04/2014)

En el marco del convenio de asociación entre UTE y ELETROBRAS, se desarrollarán parques eólicos en conjunto en Uruguay. Actualmente se está desarrollando un parque eólico de 65,1 MW de la colonia Rosendo Mendoza, perteneciente al Instituto Nacional de Colonización.

Por otra parte, en el marco del leasing operativo fue adjudicado ad referendum a la empresa TEYMA para construir y operar en Palomas, Departamento de Salto, un parque de 71 MW.

### **Perspectivas**

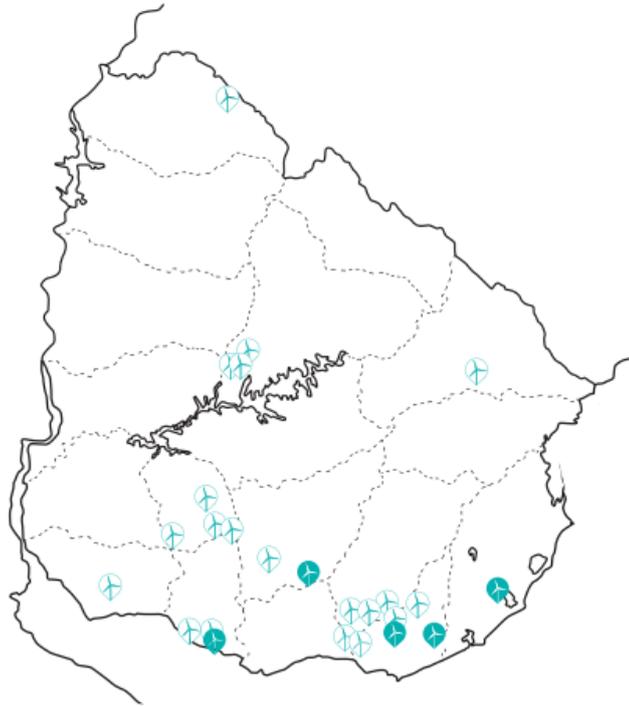
Las perspectivas para la generación eólica son muy auspiciosas en el país, teniendo en cuenta diversos aspectos, habiéndose mostrado que la generación es rentable en la gran mayoría del territorio nacional, con factores de capacidad del 40 % e incluso mayores.

Las ventajas impositivas que el país ha asignado a los emprendimientos de generación de energías renovables también representan un importante apoyo, donde destacan los decretos reglamentarios de la Ley de Promoción y Protección de Inversiones, que establece exoneración de impuestos bajo ciertas condiciones.

El aumento de la demanda de energía eléctrica, por otro lado, marca una necesidad futura a cubrir, donde la política energética juega un papel decisivo, fomentando las energías autóctonas y en particular las renovables.

Sumado a lo anteriormente citado, la madurez del sector ha contribuido a la disminución de los costos de los aerogeneradores lo que hace que la energía eólica sea una alternativa muy atractiva a nivel económico, con precios de la energía del orden de 65 USD/MWh (Fuente: [www.energiaeolica.gub.uy](http://www.energiaeolica.gub.uy)).

Restan desafíos para el desarrollo futuro de la energía eólica, donde se deberán tener en cuenta -entre otros- aspectos relacionados al despacho de una fuente variable, como también con la proyección de la expansión de la red de transmisión y el desarrollo social local.

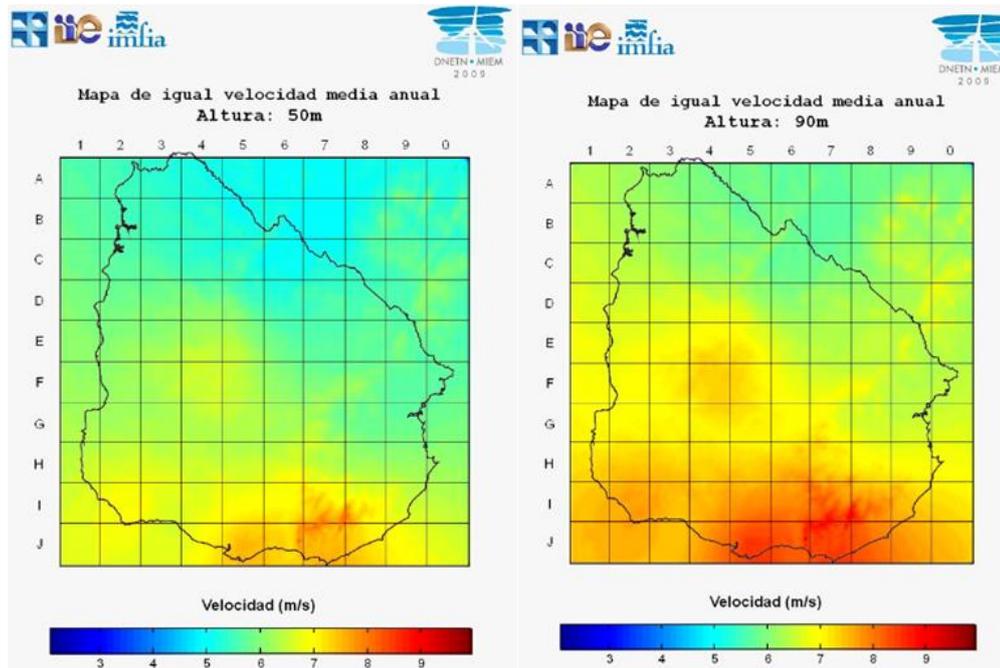


**Figura 1.4. Parques eólicos instalados y proyectos.**

Fuente: MIEM. 2013.

## **1.2. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACION Y MOTIVACION**

En la última década se ha producido un incremento de la energía eólica en la matriz energética del Uruguay, como consecuencia de un cambio en la política energética que apunta a aumentar sustancialmente la energía generada a partir de fuentes renovables. Este incremento se vio impulsado por sistemas especiales de apoyo a la instalación de generadores de pequeño porte de fuentes renovables (Decreto 77/006), cuya rentabilidad se ve favorecida por el potencial eólico de la región (Figura 1.5). Ya se han instalado 9 parques eólicos, y existen varios proyectos en marcha; en la última licitación de UTE se presentaron 19 propuestas y se encuentran 7 parques más en desarrollo por parte de UTE.



**Figura 1.5. Potencial eólico de Uruguay como estimaciones de vientos a 50 m y 90 m de altura.** Fuente: [www.energiaeolica.gub.uy](http://www.energiaeolica.gub.uy).

Debido a que al día de hoy no existe normativa nacional que defina la metodología a emplear para evaluar los niveles sonoros de inmisión esperados cuando se instala un Parque Eólico, se emplea el modelo de propagación definido en la Norma ISO 9613-2:1996, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*.

Desde las primeras publicaciones de G.P. van den Berg (2006) se ha demostrado a nivel internacional las falencias de la metodología de la Norma ISO 9613-2 (1996) para la aplicación a ruido de aerogeneradores. G.P. van den Berg (2006), Kaliski & Duncan (2008) y Martín Bravo (2008) han comprobado discrepancias entre los niveles predichos por la norma ISO y los que efectivamente ocurren en el ambiente debido al funcionamiento de aerogeneradores, que pueden alcanzar diferencias muy significativas (van den Berg reportan subestimaciones de hasta 15 dB).

Es en este sentido, que el presente trabajo de tesis de Maestría resulta relevante considerando el incremento (reciente y en los próximos años) de la generación de energía a partir de la eólica de gran porte en el Uruguay y de la necesidad de una mayor comprensión de los fenómenos de propagación de los niveles sonoros de aerogeneradores de gran porte.

En esta línea, con el fin de profundizar en conceptos que definen la relevancia de la investigación y motivación se presenta en el Capítulo 2

los efectos del ruido en la salud humana y en el Capítulo 7, antecedentes específicos del trabajo, justificación y motivación.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

El objetivo general de la tesis de Maestría es contribuir con el desarrollo de metodologías y modelos aplicables para la predicción de los niveles sonoros ambientales asociados con el funcionamiento de aerogeneradores, y con ello a los estudios de impacto acústico de parques eólicos.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

En esta línea los objetivos específicos a los cuales se apunta en el presente trabajo son los siguientes:

1. Identificar las principales metodologías de cálculo de uso a nivel internacional y los estudios referidos.
2. Analizar la aplicabilidad de la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613 - Parte 2 para la predicción de los niveles sonoros asociados con aerogeneradores de gran porte en ambiente rural.
3. Evaluar la aplicabilidad de la Norma ISO 9613 - Parte 2 en proyectos de generación de energía eólica para un caso de estudio en Uruguay.

#### ***1.3.3. Alcance***

El alcance del trabajo es para el caso de topografía plana y sin presencia de barreras ni obstáculos.

## 1.4. FORMULACIÓN Y ABORDAJE DEL PROBLEMA

La problemática a nivel internacional en el cálculo de los niveles sonoros en receptor para el caso de parques eólicos, es la constatación de las diferencias que resultan en la precisión de las predicciones que se realizan con los métodos de las normas existentes en función de las diferentes condiciones ambientales. En particular, en cuanto a las predicciones realizadas a través de la aplicación de la norma ISO 9613-2 y los niveles medidos en sitio luego de implantados los aerogeneradores.

En el Uruguay se ha observado también, que los cálculos realizados a través de la aplicación de la norma ISO 9613-2 presentan una variación con los niveles medidos luego de implantados los mismos en sitio.

Como forma de abordaje del problema se plantea realizar en primer lugar un análisis crítico de la metodología de cálculo Norma ISO 9613-2 y luego estudiar su aplicabilidad al caso de Uruguay. Esto se llevará a cabo a través: del estudio de las hipótesis y consideraciones que toma la norma, del análisis de los fenómenos de propagación existentes y de los factores de atenuación de los niveles sonoros, y de la incidencia de las condiciones atmosféricas en la variación de los niveles sonoros.

A continuación se presenta la metodología utilizada y las actividades que se desarrollan para lograr los objetivos propuestos.

De acuerdo a los antecedentes específicos y la problemática internacional al momento actual, se consideran los siguientes aspectos relevantes que serán objeto de análisis detallado:

### I. Metodología para la estimación de la potencia acústica emitida.

En las metodologías de cálculo de los niveles sonoros, la potencia acústica emitida se estima en general considerando atmósfera neutra. Sin embargo, siendo la condición crítica "atmósfera estable", se ha constatado a nivel internacional por varios autores (G.P. van den Berg, 2006) que el valor de potencia acústica emitida considerando atmósfera neutra es subestimado.

### II. Metodología para la estimación de los niveles sonoros en receptor

Se deber realizar un análisis del fenómeno de propagación y de la estimación de los diferentes términos de atenuación de los niveles sonoros.

En lo que refiere a las leyes de decaimiento por divergencia geométrica el método de cálculo comúnmente utilizado, de la Norma ISO 9613-2, considera un decaimiento en forma cuadrática. Sin embargo, se han

constatado a nivel internacional (Martín Bravo, 2008) y en el Uruguay (IMFIA, 2012a y 2012b) discrepancias en cuanto a esta consideración.

A continuación se presentan en líneas generales las actividades desarrolladas en el presente trabajo de tesis:

### **I. Revisión y sistematización del estado del arte.**

En primer lugar se realiza una revisión y sistematización en profundidad del marco teórico actual, estudios realizados y resultados obtenidos tanto a nivel nacional como internacional. Este marco teórico se desarrolla en los Capítulos 2 al 7, en los cuales se abordan los siguientes temas específicos:

2. Efectos del Ruido
3. Modelos de transporte y propagación de ondas sonoras
4. El aerogenerador como fuente de emisión sonora
5. Requisitos para la instalación de parques eólicos
6. Estimación de niveles de presión sonora
7. Antecedentes del trabajo, justificación y motivación

### **II. Análisis crítico de la Metodología de Cálculo de la Norma ISO 9613-2**

En esta sección se analizan las hipótesis y consideraciones de la Norma y se realiza un análisis crítico de la implementación del método de cálculo.

### **III. Caso de estudio y aplicabilidad en Uruguay**

Se selecciona como caso de estudio - Parque Eólico “Magdalena” (Kentilux S.A.) - considerado representativo de los proyectos operativos, y se analizaron los datos obtenidos.

#### *Interpretación de resultados*

Los datos de las mediciones de 4 campañas de medición se comparan con los valores calculados a partir de la ISO 9613-2, y otros modelos de uso corriente.

#### *Análisis de la incidencia de las condiciones atmosféricas en la variación de los niveles sonoros.*

Se analizan las variaciones de los niveles sonoros con los distintos estados de estabilidad de la atmósfera.

### *Análisis de los fenómenos de propagación.*

Se analiza en forma crítica los fenómenos de propagación relacionados con fuentes de gran altura. En particular se estudian las posibles representaciones de las fuentes de emisión y los diferentes factores de atenuación de los niveles sonoros, considerando los términos que resultan más apropiados al caso de interés.

### *Aplicabilidad de la Norma ISO*

Se estudia la aplicabilidad de la Norma ISO al caso de interés de aerogeneradores y en particular en el Uruguay.

## **2. EFECTOS DEL RUIDO**

En la bibliografía analizada, que se menciona a continuación, se constata la existencia de posibles efectos del ruido emitido por los aerogeneradores, tanto sobre la salud humana como sobre la biota.

### **2.1. AUDICIÓN HUMANA**

#### **2.1.1. Campo audible**

En general se acepta que el campo auditivo del oído humano cubre un espectro frecuencial de entre 20 Hz y 20.000 Hz para intensidades comprendidas entre el umbral de la percepción o umbral auditivo ( $20 \times 10^{-6}$  Pa) y el umbral del dolor (200 Pa). En realidad la zona audible no es exactamente un rectángulo en el plano frecuencia - intensidad pues no todos los pares ( $f, p$ ) generan sensación auditiva; sino que dentro de la zona audible se definen curvas isófonas o isofónicas que son aquellas sobre las que el oído humano registra una misma sensación auditiva (ver Figura 2.1). A su vez, no todas las personas cubren auditivamente todo el espectro comprendido entre 20 Hz y 20.000 Hz.

De acuerdo a estudios de Leventhall (2004) se comprueba que espectros secuenciales menores a 20 Hz (de hasta 4 Hz) pueden ser audibles, si los estímulos asociados a los niveles de presión son lo suficientemente intensos.

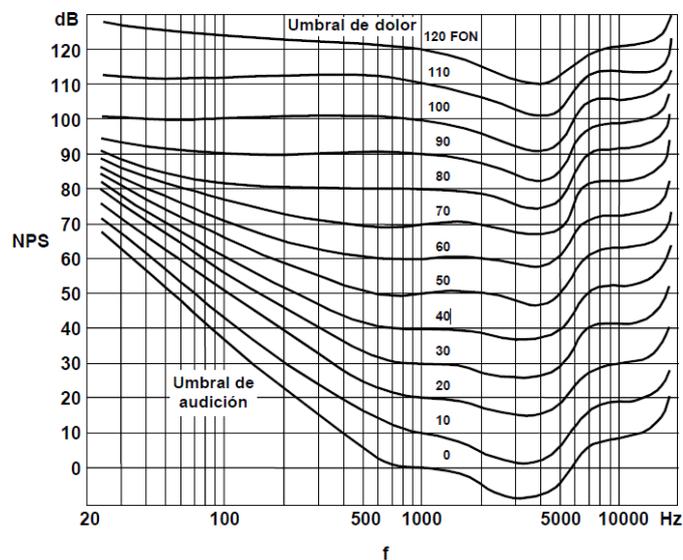
La respuesta del oído no es lineal. Tiene su mejor funcionamiento (o mayor sensibilidad) en el intervalo de frecuencias de 1000 Hz a 5000 Hz. Por debajo de 1000 Hz y por encima de 5000 Hz, el oído es menos sensible. Esta pérdida de sensibilidad es más pronunciada para altas frecuencias, es decir, por encima de los 5000 Hz, que para frecuencias por debajo de los 1000 Hz. En cambio, entre 1000 Hz y 5000 Hz el oído

realiza una pequeña amplificación, es decir, requiere de un menor nivel de presión que a frecuencias menores a 1000 Hz para lograr una sensación auditiva equivalente.

Esto determina que dos sonidos de diferentes frecuencias, aún con el mismo aporte de potencia al oído (igual Nivel de Presión Sonora en adelante NPS), se perciban en forma diferente por el oído. La percepción del sonido es objeto de estudio de la psicoacústica, se trata de una apreciación subjetiva y solamente puede definirse de manera estadística utilizando un número grande de sujetos.

Una de las variables psicoacústicas más conocidas es la sonoridad, debido especialmente al uso de las curvas de igual nivel de sonoridad o curvas isófonas, es decir, las que indican cuándo un sonido se percibe como igual de sonoro que otro. Fueron determinadas por primera vez en 1933 por Fletcher y Munson a partir de la comparación entre dos tonos puros: un tono de 1000 Hz e intensidad fija, utilizado como referencia, y un tono de otra frecuencia e intensidad variable, que el sujeto debía ajustar hasta que le resultara igualmente sonoro que el sonido de referencia (Figura 2.1).

El nivel de sonoridad se mide en fones, y se define como el nivel de presión sonora del tono de 1000 Hz que se encuentra sobre la misma curva isófona. Por ejemplo, un sonido de 40 fones es el que se encuentra sobre la curva isófona que pasa por el punto (40 dB, 1000 Hz). Un tono de 200 Hz y 40 dB de NPS provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y 20 dB de NPS. Se dice entonces que tiene un nivel de sonoridad de 20 fon. Obsérvese que a igual NPS los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (alta frecuencia) tienen menor nivel de sonoridad que los sonidos medios. Además, en la zona de los 3000 Hz se tiene la mayor sensibilidad del oído. La curva de 0 fon representa el umbral de audición, y la curva de 120 fon el umbral de dolor.



**Figura 2.1. Curvas isófonas determinadas por Fletcher y Munson, 1933 (tomado de Miyara, F., 1999)**

El nivel de sonoridad es una magnitud psicoacústica que permite evidenciar en forma objetiva las diferencias de percepción de intensidad en relación con la frecuencia. Un tono de 60 fones produce la misma percepción de intensidad, cualquiera sea su frecuencia. Pero como su valor numérico no se refiere a la intensidad de la sensación, un tono de 80 fones no es el doble de sonoro de otro de 40 fones.

Se comprende entonces que, para evaluar el efecto del sonido y de los ruidos molestos sobre los seres humanos, no sólo importa la magnitud física  $L_p$ , esto es, la energía acústica que llega al oído. Es necesario corregir estas lecturas objetivas teniendo en cuenta las curvas de igual sonoridad de la Figura 2.1. Para ello se crearon las curvas o escalas de ponderación, procurando obtener una mejor representación de la percepción del oído humano. Para sonidos de baja intensidad se debe restar a la curva de ponderación que intenta reproducir a la curva de 40 fones, que se identifica como ponderación tipo A. Los valores obtenidos se expresan como decibeles con ponderación A, o, más brevemente dB(A). Si a la lectura objetiva de  $L_p$  se resta la curva que procura representar a la isófona de 100 fones, se obtiene la ponderación tipo C, la cual se utiliza para sonidos intensos; los valores obtenidos se indican como dBC (Everest and Pohlmann, 2009).

### **2.1.2. Respuesta del oído humano a los infrasonidos**

El ruido de baja frecuencia incluye generalmente las frecuencias entre 10 Hz y 100 Hz; extendiendo una octava a ambos lados de este rango, se obtiene una gama más amplia, de 5 Hz a 200 Hz, la cual incluye una gran parte de los llamados infrasonidos.

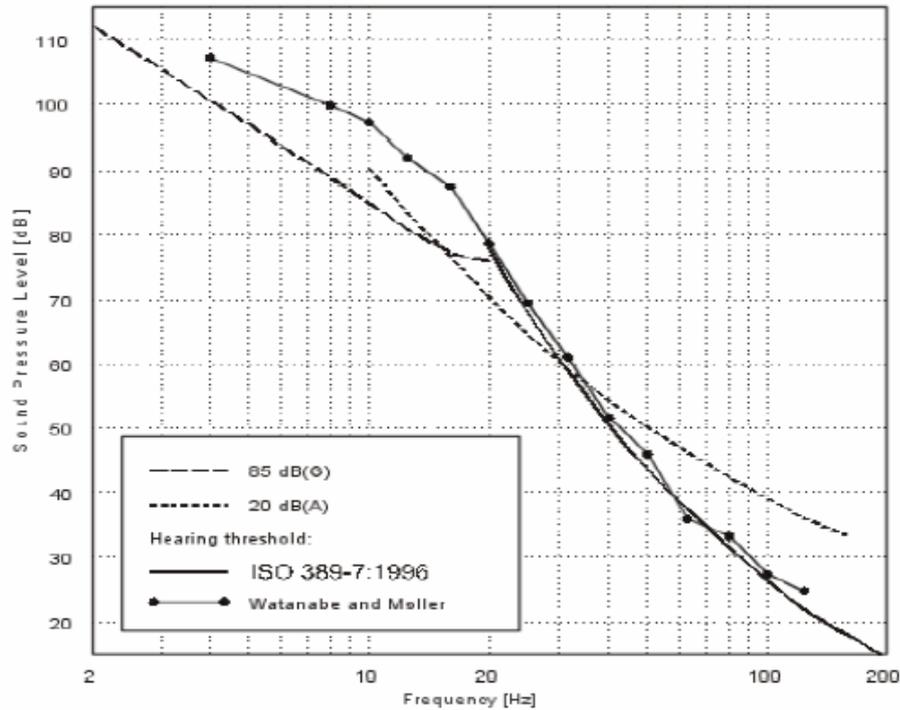
Hay muchas fuentes de ruido de baja frecuencia en el ambiente. Las fuentes naturales principales son las olas del mar y el viento. Entre las fuentes antropogénicas, puede encontrarse gran variedad de casos tales como calderas, aerogeneradores, bombas, ventiladores, torres de refrigeración o instalaciones de ventilación. Los medios de transporte, tales como aviones, trenes y helicópteros también son fuentes de ruido de estas características.

Los umbrales de audición de infrasonidos han sido estudiados por diferentes autores, entre los cuales se destaca los estudios de Leventhall (2004). Un umbral de audición común para los rangos de estudio es un nivel de ruido infrasónico de 85 dBG<sup>1</sup> o más. Si bien las normas y directrices actuales no establecen requisitos preceptivos para infrasonido de los parques debido a la ausencia de evidencia, en algunos países (como Australia) está siendo considerado en las directrices de proyectos para la evaluación de ruido de baja frecuencia e infrasonidos en el entorno de una fuente de ruido para prevenir la molestia.

En la Figura 2.2. se aprecia la curva que proponen Watanabe y Moller a partir de mediciones del umbral auditivo entre 4 Hz y 125 Hz, junto con la curva de audición a bajas frecuencias (20 Hz a 200 Hz) que presenta la Norma ISO 226:2003, *Acoustics -- Normal equal-loudness-level contours*. El rango completo en que la norma ISO 226:2003 presenta niveles de umbral auditivo es de 20 Hz a 12.500 Hz.

---

<sup>1</sup> La escala de ponderación G, definida en la norma ISO 7196:1995(E): "Acoustics – Frequency – Weighting Characteristic for Infrasound Measurements, es de aplicación en infrasonidos y frecuencias muy bajas y bajas (hasta 315 Hz). Tiene su cero en 10 Hz, su máximo en 20 Hz, pendiente de unos 12 dB/octava entre 1 y 20 Hz, pendiente negativa de -24 dB/octava a partir de 20 Hz. Pese a haberse definido hace más de 15 años, aún es de muy poco uso en la actualidad.



**Figura 2.2. Umbrales auditivos propuestos por Watanabe y Moller, 1990 (tomado de Bellhouse, 2004)**

Nótese que, alrededor de 15 Hz, se produce un cambio en la pendiente de la curva de aproximadamente 20 dB/octava a frecuencias más altas de 12 dB/octava en frecuencias más bajas. Este es un resultado que concuerda con otros resultados publicados por distintos autores, dentro del rango de 15 Hz a 20 Hz, en función de las frecuencias que se han utilizado en las mediciones. Aunque no se tiene una explicación concluyente, se piensa que puede estar asociada a un cambio en el proceso de detección auditiva, que ocurre en la región de frecuencia en la que se pierde la sensación auditiva de tonalidad. El cambio en la pendiente de la curva del umbral próximo a los 16 Hz a una pendiente menor indica que la caída de la sensibilidad auditiva en las frecuencias de infrasonidos es menor que la que ocurre para frecuencias por encima de 16 Hz. Esta es una de las razones por las que la curva de ponderación A subestima el nivel sonoro subjetivo de estas frecuencias de infrasonidos.

## 2.2. EFECTOS DEL RUIDO EN LA SALUD HUMANA

La exposición a ruido puede causar efectos auditivos y extra-auditivos. Aunque en el caso de estos últimos no suele ser del todo sencillo establecer en forma cuantitativa una relación causa-efecto, pueden ser efectos adversos sobre la salud o precursores de ellos. También puede producir efectos psicofísicos, que muchas veces están acompañados por otros síntomas como dificultad en la comunicación, perturbación del reposo y descanso, disminución de la capacidad de concentración, molestia, ansiedad, agresividad, estrés, entre otros. Estos efectos alteran la vida social de las personas, y en muchos casos pueden modificar sus relaciones con el entorno (efectos psicosociales), según sea la actitud del sujeto y su sensibilidad personal al ruido.

Como indica Kogan (2004), algunos de los efectos fisiológicos extra auditivos son temporales y no dejan secuelas clínicas significativas, pero otros pueden tener consecuencias irreversibles; ciertos daños cardiovasculares. La recurrencia de exposiciones sonoras puede transformar irregularidades pasajeras en patologías crónicas.

En ese sentido, el informe acerca de morbilidad y efectos del ruido presentado en 2004 por la red de investigación interdisciplinaria “Ruido y Salud” de la Organización Mundial de la Salud (WHO LARES, Large Analysis and Review of European housing and health Status), confirma la tesis acerca de que para un elevado nivel de molestia crónica, ocurre una cadena salud–elevado nivel de molestia–aumento de la morbilidad. Aparecen riesgos elevados sobre el aparato respiratorio en niños y sobre los sistemas cardiovasculares, respiratorios y músculo-esquelético en adultos.

Algunas de las alteraciones físicas generadas por el ruido pueden ser advertidas por el individuo, como el caso de fatiga corporal, náuseas, respuestas reflejas y los dolores de cabeza. En cambio, muchas otras reacciones del organismo a nivel funcional pueden pasar desapercibidas por el sujeto afectado.

Existen datos científicos suficientes y contrastados que permiten considerar el ruido como un agente desencadenante de un conjunto de reacciones en el organismo, que se manifiestan a nivel fisiológico mediante enfermedades cardiovasculares, alteraciones del aparato digestivo, alteraciones hormonales y reducción del sistema inmunitario de defensa.

De acuerdo con la definición que da la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006):

*“La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solo la ausencia de enfermedad o dolencia”* resulta claro que el ruido afecta a la salud de las personas casi por definición, pues por tratarse de una señal no deseada y que carece de utilidad para el receptor, es muy probable que en algún grado afecte su bienestar.

PEACRAM (2001) plantea un enfoque más extremo, orientado a los derechos humanos:

*“En los lugares afectados, ocasiona daños físicos y psíquicos sobre la salud, provoca degradación ambiental, desintegración del tejido social, deterioro de la convivencia ciudadana y de la calidad de vida. El ruido provoca también comportamientos adictivos. A niveles intensos desencadena fenómenos endocrinos, como la secreción de adrenalina, generando estados de excitación. Expuestas reiteradamente a niveles de ruido aun no tan intensos, las personas experimentan ansiedad y padecen dificultades para conciliar el sueño si repentinamente se encuentran en entornos silenciosos. Provoca también hipertensión arterial, sordera, cefaleas, insomnio, irritabilidad úlceras de duodeno y digestivas, riesgos de accidente, cardiopatías, entre otras. La contaminación acústica es una forma de infringir o de quebrar los derechos constitucionales fundamentales de los ciudadanos. El ruido atenta contra los derechos fundamentales de las personas”.*

De acuerdo con la OMS, citado por Orozco-Medina et. al (2010), los riesgos para la salud asociados con la contaminación sonora incluyen:

- Interferencias con el comportamiento social (agresividad, protesta e impotencia)
- Interferencia con la comunicación verbal
- Descenso del rendimiento en el trabajo y/o escuela
- Dolor y fatiga de la audición
- Pérdida auditiva
- Molestia
- Alteración del sueño y todas sus consecuencias de corto y largo plazo
- Efectos cardiovasculares
- Respuestas hormonales (hormonas del estrés) y sus posibles consecuencias sobre el metabolismo humano (nutrición) y el sistema inmunitario

Estudios de G.P. van den Berg (2006) sobre percepción de un parque eólico han demostrado que la molestia del ruido de las turbinas de viento está relacionada con la actitud hacia la energía eólica y/o percepción social de las turbinas de viento en el paisaje y la visibilidad de un parque eólico. Además, los residentes que obtienen beneficios económicos de los aerogeneradores se sienten apenas o nada molestos, mientras que para los residentes sin tales beneficios, el sonido de las turbinas es más molesto que el sonido en el mismo nivel de otras fuentes de ruido importantes, como carreteras, ferrocarril o tráfico aéreo e industria.

### **2.3. EFECTOS DEL RUIDO EN LA BIOTA**

Casi todas las especies tienen algún nivel de susceptibilidad a los sonidos. La mayoría de los animales perciben los sonidos en intervalos de frecuencias diferentes al de las personas. Por ejemplo, ciertos animales, como el perro puede percibir sonidos de hasta 35000 Hz, y los murciélagos y los delfines pueden oír sonidos de frecuencias mucho más elevadas aún. Los murciélagos utilizan su sistema de eco localización por ultrasonidos que les permite moverse en zonas de oscuridad total (Szewczak y Arnett, 2006a). Las palomas y los patos pueden captar ondas de frecuencia muy baja, de hasta 1 Hz, aun a varios kilómetros de distancia (Dooling, 2002).

Aunque algunos autores consideran que los animales pueden adaptarse a elevados niveles sonoros, denominado síndrome de adaptación (Tolosa 2003, citado por Bernabeu, 2009), otros consideran que los efectos pueden llegar incluso a generar la desaparición de especies en determinadas zonas.

Cada especie puede presentar diferentes respuestas ante la contaminación sonora y son también diversas las reacciones ante una misma fuente, en este caso los aerogeneradores.

Radle, A. L. (2007) enumera las respuestas fisiológicas y comportamentales que experimentan generalmente los animales cuando resultan expuestos a ruidos antropogénicos. Entre las respuestas fisiológicas menciona el incremento en el ritmo cardíaco, alteración del metabolismo y del equilibrio hormonal. Las reacciones de comportamiento consisten en levantar la cabeza, moverse, trotar distancias cortas, batir las alas (las aves), conductas de pánico y fuga. La superposición de estos efectos tiene el potencial de causar lesiones corporales, pérdida de energía, disminución en la ingesta de alimentos, evitación y abandono del hábitat, y pérdidas reproductivas.

En líneas generales, los efectos del ruido sobre la biota se pueden categorizar en:

- Pérdida auditiva, reduciendo la capacidad de orientación y defensa.
- Interferencias en la comunicación, con potencial afectación en el éxito reproductivo.
- Fragmentación del hábitat.
- Molestias, que pueden redundar en desplazamiento o pérdida de hábitats, al hacer que las aves pierdan interés en ciertos sitios que consideran se han tornado adversos.
- Mayor gasto de energía por movimientos excesivos por sobresaltos.

### 3. MODELOS DE TRANSPORTE Y PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS

#### 3.1. ECUACIÓN DE ONDA ACÚSTICA

##### 3.1.1. Sonido

El sonido es una perturbación que se propaga en un medio elástico y que es capaz de generar sensación auditiva en las personas. A su vez, un medio elástico es aquel que se puede deformar bajo la acción de una fuerza de modo que cuando esta fuerza cesa, el medio recupera su forma. Si la deformación es proporcional a la fuerza, el medio elástico se llama lineal. En estas condiciones, el sonido que se propaga en ellos es estudiado por la acústica lineal.

Cuando los sonidos son muy intensos, pueden dar lugar a deformaciones que ya no son proporcionales a las fuerzas aplicadas. En estos casos los sonidos involucrados son objeto de estudio de la acústica no lineal; por ejemplo es el caso de las ondas de choque.

En lo sucesivo se considerarán los medios materiales como medios continuos, lo cual significa que la longitud de onda de los sonidos considerados es mucho mayor que la distancia media entre las partículas que forman el sistema (Núñez, 2013).

##### 3.1.2. Intensidad del Sonido

La *intensidad acústica* es la potencia media entregada por una fuente acústica por unidad de área.

$$I = \frac{1}{2} \frac{P_o^2}{c \rho_o} \quad (1)$$

Siendo:

$P_o$ , la amplitud de presión ejercida

$c$ , velocidad de propagación del sonido

$\rho_o$ , densidad de equilibrio  $\rho_0$  correspondiente al medio no perturbado

Debido al amplio intervalo de intensidades que puede registrar el oído humano (entre  $10^{-12}$  hasta  $1 \text{ W/m}^2$ ), es más útil el nivel de intensidad  $L_I$  definido como:

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (2)$$

donde  $I_{ref}$  es un nivel tomado como referencia (usualmente  $I_{ref} = 10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup>). El  $L_I$  calculado con (2) se expresa en decibeles (dB).

La presión eficaz es definida como la raíz cuadrática media (RMS) de la amplitud de presión. Esto es:

$$p_e = \sqrt{\frac{p_o^2}{2}} \quad (3)$$

Por lo que la intensidad acústica puede expresarse como:

$$I = \frac{p_e^2}{c \rho_o} \quad (4)$$

Se puede sustituir la ecuación anterior en la ecuación de nivel de intensidad (2) y obtener el llamado nivel de presión sonora  $L_p$ :

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_e}{p_{e ref}} \right)^2 \quad (5)$$

El nivel de presión sonora (5) es una magnitud física objetivamente definida. No obstante, el oído humano no responde igual a todas las frecuencias del rango por él detectado (entre 20 y 20000 Hz, aproximadamente), por lo que no suele proporcionar suficiente información a los efectos de evaluar el impacto acústico de un emisor.

### **3.1.3. Las variables acústicas**

Las variables involucradas en una onda sonora son todas las magnitudes mecánicas que miden la deformación experimentada por el medio ante el pasaje de la perturbación. Una de ellas es la sobrepresión, o *presión sonora* definida como:

$$p(x; y; z; t) = P(x; y; z; t) - P_0 \quad (6)$$

donde  $P(x; y; z; t)$  es la presión absoluta en el punto  $(x; y; z)$  y en el instante  $t$  en el medio perturbado y  $P_0$  es la presión de equilibrio en el medio no perturbado.

Otra magnitud acústica, también escalar, es la *densidad*  $\rho(x; y; z; t)$  *del medio*, que fluctúa alrededor de su valor de equilibrio  $\rho_0$  correspondiente al medio no perturbado.

La *condensación*  $s$  es una magnitud adimensionada definida como:

$$s(x; y; z; t) = \frac{\rho(x; y; z; t) - \rho_0}{\rho_0} \quad (7)$$

Para la acústica lineal se verifica que la condensación es muy pequeña:

$$|s| \ll 1$$

En cuanto a la *velocidad*  $u(x; y; z; t)$  de un elemento de masa en el punto  $(x; y; z)$  del medio en el instante  $t$  se asume que en el medio no perturbado estas velocidades son nulas (Núñez, 2013).

### 3.1.4. Ecuaciones básicas

Si se considera la propagación de sonido en los gases (eventualmente en líquidos), las leyes utilizadas provienen de la mecánica de fluidos, y se obtiene la siguiente *simplificación* relevante debido a que se considera *fluido en reposo*, las velocidades y desplazamientos debidos a las perturbaciones son pequeños, y no turbulento (no se cuenta con vórtices, fuentes ni sumideros).

En este sentido, se cuenta con las siguientes ecuaciones:

#### (a) Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad, la cual se obtiene de la conservación de la masa (Kundu, 2002), resulta,

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (8)$$

#### (b) Ecuación de Navier-Stokes

Para fluido con viscosidad despreciable y no sometido a fuerzas másicas apreciables, resulta (Kundu, 2002; Landau, 2001):

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p \quad (9)$$

#### (c) Ecuación termodinámica de estado

Debido a que los procesos vibratorios que interesan a la acústica en los fluidos son lo suficientemente rápidos, se consideran adiabáticos.

La dependencia de la sobrepresión acústica  $p$  con la densidad puede aproximarse al primer orden en el desarrollo como se presenta a continuación (Kinsler, 2000).

$$p = P(\rho) - P(\rho_0) = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0, s} (\rho - \rho_0) \quad (10)$$

Utilizando el módulo adiabático de volumen definido como  $B = \rho_0 \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0, s}$ , cuyos valores se encuentran tabulados para los diversos fluidos y diversas temperaturas, y la condensación  $s$  (7) resulta:

$$p = B \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) = Bs \quad (11)$$

Si bien las ecuaciones (8) y (9) no son ecuaciones lineales, si se sustituye la densidad  $\rho$  en función de la condensación,  $\rho = \rho_0 + \rho_0 s$ , y considerando que  $|s| \ll 1$ , se desprecian todos los términos de segundo orden en las variables acústicas  $p$ ;  $u$ ;  $s$  y sus derivadas parciales y temporales. Esto conduce a las siguientes **ecuaciones de la acústica linealizadas**, en lugar de (8) y (9) respectivamente (Kinsler, 2000):

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \quad (12) \text{ Ecuación de continuidad linealizada}$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p \quad (13) \text{ Ecuación de Euler linealizada}$$

Las ecuaciones (11), (12) y (13) son las bases de la **ecuación de ondas de la acústica lineal**. Eliminando la condensación  $s$  y la velocidad del fluido  $u$ , se obtiene una ecuación para la presión de la forma:

$$\boxed{\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}} \quad (14) \text{ Ecuación de ondas clásica, lineal y sin pérdidas}$$

$$\text{Siendo, } c = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (15)$$

La constante  $c$  resulta ser la *velocidad de propagación del sonido en el medio* considerado.

Para el caso del aire a presión normal, éste puede considerarse un gas ideal que experimenta *procesos adiabáticos*. Siendo el módulo adiabático

de volumen  $B = \gamma p_0$ , donde  $\gamma$  es el índice adiabático<sup>2</sup> y  $p_0$  la presión de equilibrio del gas la velocidad del sonido en el aire resulta:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} \quad (16)$$

Utilizando la ecuación de estado de los gases ideales,  $p/\rho = RT/\mu$ , donde  $R$  es la constante universal de los gases,  $\mu$  es la masa molecular media y  $T$  la temperatura absoluta, se puede expresar la velocidad del sonido en función de la temperatura del gas, como:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R}{\mu} T} \quad (17)$$

Como se observa, es independiente de la *presión* y, por consiguiente, de la *densidad del gas*, y es dependiente de la temperatura.

### 3.1.5. Impedancia acústica

Es de gran utilidad conocer cuánta energía sonora se refleja y cuánta se transmite en la interface de separación entre dos medios (aire - pared, aire - vidrio, etc.). Este análisis puede efectuarse con la aproximación de ondas planas.

El denominador de la expresión  $I = \frac{p_e^2}{c\rho_0}$  es una magnitud importante para determinar el transporte de energía acústica de una onda. Este producto entre la densidad  $\rho$  y la velocidad de propagación del sonido  $c$  es una característica del medio y se llama *impedancia acústica específica*  $z = \pm \rho_0 c$  (Núñez, 2013).

## 3.2. ONDAS ARMÓNICAS Y MONOCROMÁTICAS

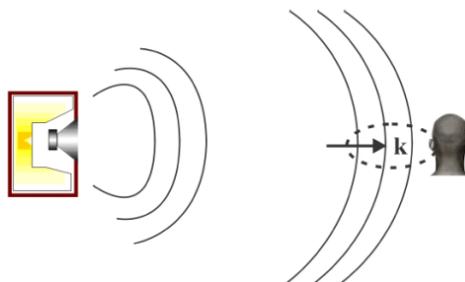
Un tipo de ondas de fundamental importancia en acústica es la onda de frecuencia  $f$  determinada, llamada **ondas armónicas** u **ondas monocromáticas**. Esta importancia se debe a que toda otra perturbación acústica puede analizarse como una superposición de ondas armónicas de diferentes frecuencias y amplitudes.

---

<sup>2</sup>  $\gamma$  es la razón entre la capacidad calorífica a presión constante ( $C_p$ ) y la capacidad calorífica a volumen constante ( $C_v$ ).

### 3.2.1. Ondas Planas

Aunque las ondas planas son las más sencillas, son de gran utilidad. Cuando la fuente emisora está lejos de la región de estudio y ésta no es muy extensa, se puede aproximar la radiación acústica como una fuente de ondas planas. Esto se ilustra en el esquema de la Figura 3.1.



**Figura 3.1.** En la pequeña región punteada las ondas se pueden considerar cuasi-planas. Fuente: Núñez, I. 2013.

En general se puede utilizar una aproximación por ondas planas en zonas alejadas del generador.

### 3.2.2. Ondas esféricas

Otro caso de gran aplicación, aparte de las ondas planas, es el de las ondas esféricas. Toda fuente que emita ondas de manera más o menos uniforme en todas direcciones, a distancias mayores que sus dimensiones puede aproximarse por un emisor de ondas esféricas. A este tipo de emisor acústico se le llama *fente puntual*.

## 3.3. REPRESENTACIÓN DE FUENTES SONORAS

### 3.3.1. Fuente Plana

Se considera que la fuente es plana cuando las ondas se propagan en una única dirección, permaneciendo los frentes de onda paralelos entre sí; como por ejemplo el caso del campo de onda presente en conductos cuando la relación diámetro/longitud de onda es pequeña.

Si el conducto está aislado y es indefinidamente largo (sin reflexión desde los extremos), la intensidad sonora en cada punto, que es independiente de la distancia a la fuente, es numéricamente igual a su potencia sonora dividida entre la sección del conducto ( $S$ ).

El nivel de presión sonora correspondiente, se relaciona con el nivel de potencia sonora según Parrondo (2006):

$$L_p = L_w - 10 \log S$$

Siendo:

$L_p$ , nivel de presión sonora

$L_w$ , nivel de potencia sonora

$S$ , sección del conducto

### **3.3.2. Fuente Puntual**

Una fuente puntual es la fuente que genera frentes de onda esféricos. Normalmente es considerada como puntual en el caso de que se encuentre una fuente a distancias grandes respecto a la dimensión de la propia fuente.

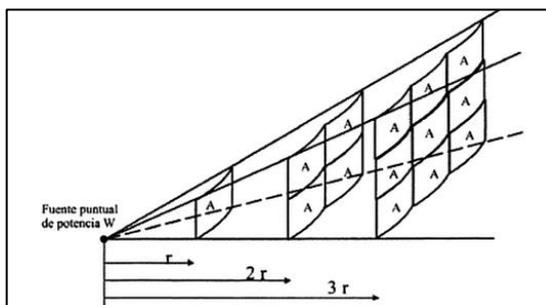
En caso de que sea isótropa, la energía fluye desde la fuente de forma homogénea en todas las direcciones, repartiéndose por superficies de área proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente (igual al radio). La intensidad sonora disminuye con el cuadrado de la distancia (Figura 3.2).

La ecuación de emisión de ondas esféricas, se obtiene buscando una solución en coordenadas esféricas de la ecuación de onda.

En este caso las fuentes irradian uniformemente en todas direcciones, por lo que la dependencia espacial será solamente función de la distancia radial  $r$  del punto de observación al origen de la radiación.

En consecuencia, el nivel de presión sonora correspondiente a una distancia  $r$  desde la fuente se relaciona con el nivel de potencia sonora a través de la siguiente ecuación (Parrondo, 2006):

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi - 20 \log r$$



**Figura 3.2. Aumento del área de paso al aumentar la distancia a una fuente puntual.** Fuente: Parrondo Gayo, J. 2006.

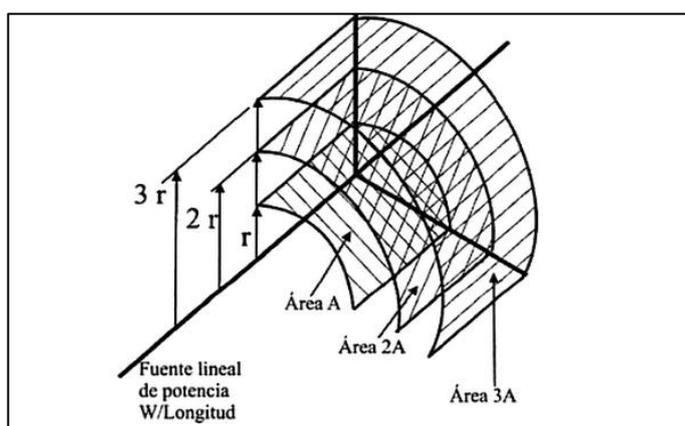
La norma ISO 9613 considera decaimiento esférico de la energía acústica en campo libre para el cálculo de la propagación, con lo cual la presión sonora disminuye con la distancia a la fuente, introduciendo valores constantes para los términos  $\rho_0$ , densidad del aire, y  $v$ , velocidad del viento.

Si se duplica la distancia  $r$  a la fuente, el nivel de presión sonora disminuye en la cantidad  $20 \log(2)$  que es aproximadamente 6 dB.

### 3.3.3. Fuente Lineal

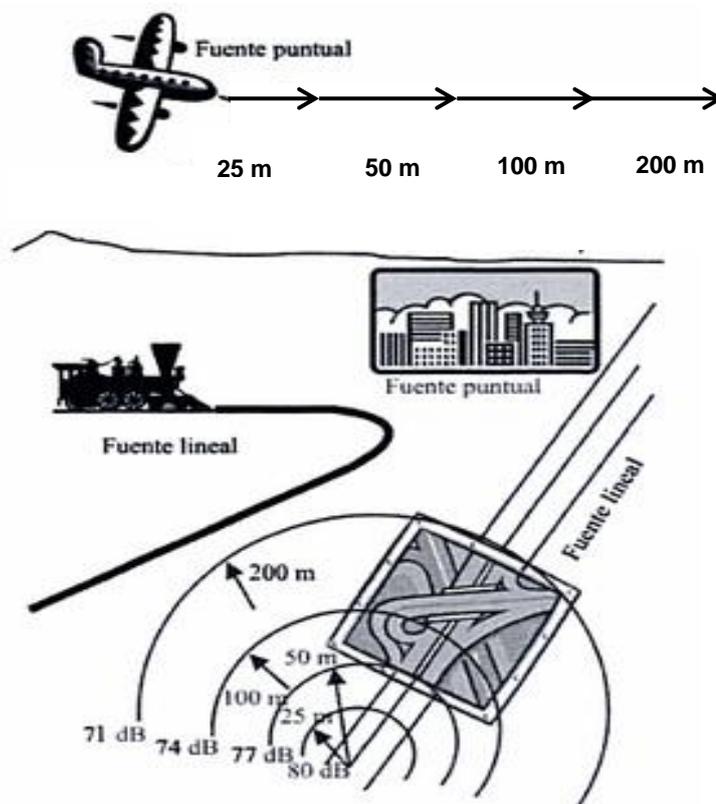
Si la fuente es lineal la propagación genera ondas cilíndricas (Tabla 4.3), y la presión sonora disminuye con la distancia a la fuente de la forma (Parrondo, 2006):

$$L_p = L_{WL} - 10 \log 2\pi - 10 \log r$$



**Figura 3.3. Frentes de onda de una fuente lineal.** Fuente: Parrondo Gayo, J. 2006.

En la Figura 3.4 se muestran dos ejemplos de leyes de atenuación del ruido para fuentes puntuales y lineales. Se puede apreciar en la figura la propagación de los niveles de presión sonora con la distancia y cómo disminuyen de acuerdo al tipo de fuente: 6 dB para el caso de fuente puntual y 3 dB para el caso de fuente lineal.



**Figura 3.4. Ejemplos de fuentes puntuales y lineales.**  
Fuente: Parrondo Gayo, J. 2006.

### 3.4. PROPAGACIÓN DE ONDAS SONORAS

#### 3.4.1. Atenuación de ondas sonoras

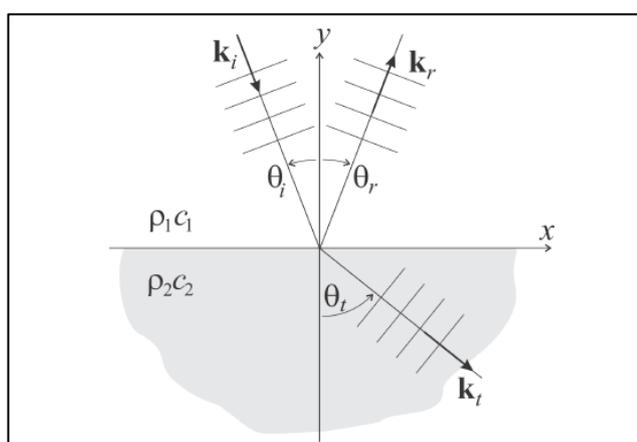
La *atenuación* de una onda acústica se debe a la disipación de su energía durante la propagación. Esta disipación puede deberse a pérdidas en el medio, debido principalmente a la fricción viscosa entre sus partes, o bien a la dispersión producida por la existencia de heterogeneidades (porosidad o partículas) presentes en el medio. En este último caso la energía es dispersada en direcciones diferentes a la de propagación del haz principal. La *atenuación* se aplica a todas las pérdidas de energía que experimenta el haz en su propagación sin importar su causa.

En cambio, en general se reserva la denominación de *absorción* a las pérdidas por fricción viscosa y, en menor medida, por la conductividad térmica del medio material en que se propaga la onda (Kinsler, 2000).

Las atenuaciones pueden ser causadas ya sea por condiciones atmosféricas, por efectos del terreno, por obstáculos, barreras presentes, entre otros.

### 3.4.2. Reflexión y transmisión acústica

Un abordaje para el estudio de ondas es basarse en los **fenómenos de reflexión, refracción, difracción**.



**Figura 3.5. Reflexión y transmisión de una onda acústica al cambiar de medio.** Fuente: Núñez, I. 2013.

La Figura 3.5. muestra el esquema en el que una onda acústica plana incide según el vector de onda  $k_i$  desde un medio de impedancia  $|z_1| = \rho_1 c_1$  sobre una superficie en el plano  $(x; z)$ . Esta superficie separa el primer medio del segundo con impedancia  $|z_2| = \rho_2 c_2$ . Parte del sonido se refleja (vuelve) al primer medio en la dirección de  $k_r$  y parte se trasmite al segundo medio en la dirección de  $k_t$ .

En general, una onda sonora se reflejará siempre que haya una discontinuidad o un cambio de medio.

La onda reflejada depende de: la onda incidente, el ángulo de incidencia, la superficie reflectora y las impedancias características de los medios. El flujo de energía sonora reflejada es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda sonora reflejada. Esto queda expresado por la ley de Snell. La refracción se presenta cuando las ondas sonoras inciden en una discontinuidad o límite: una parte de la energía incidente se refleja y la parte restante se transmite. Las ondas transmitidas son desviadas,

alejándose o acercándose a la normal hacia la superficie límite en concordancia con las velocidades del sonido en los medios.

La difracción se presenta cuando las ondas sonoras son desviadas o sus direcciones de propagación cambian debido a obstáculos que se encuentran en su trayectoria (si tales obstáculos tienen dimensiones del mismo orden que la longitud de las ondas en cuestión, ya que cuando es mayor, las ondas siguen la propagación rectilínea).

### **3.5. CONSIDERACIÓN DE LOS FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN EN MODELOS EXPLÍCITOS**

Los modelos matemáticos desarrollados para estudiar la propagación de ondas sonoras en espacios abiertos se basan fundamentalmente en los principios de conservación de la masa y de la energía, analizando los fenómenos ondulatorios.

De acuerdo a Medina Forero y Quiñones Bolaños (2010) la propagación del sonido a campo abierto se ha estudiado sobre una base experimental, debido a que no hay un modelo teórico universalmente aceptado por la complejidad del fenómeno y la gran cantidad de variables que intervienen. El análisis de los modelos comprende desde la identificación de las variables involucradas, análisis de sensibilidad validando teóricamente los modelos existentes a partir de sus supuestos y los principios de transporte de energía y propagación de ondas sonoras en la atmósfera. Los resultados muestran que las principales variables hacen referencia a las condiciones geométricas de los espacios, sus interrelaciones con las condiciones atmosféricas (viento, humedad, temperatura y presión atmosférica) y el tráfico urbano si corresponde.

El desarrollo de un modelo unificado para la predicción de la propagación del ruido en campos abiertos se encuentra en evolución a nivel internacional debido a los diversos aportes físico-matemáticos contemplados en los trabajos llevados a cabo, que tienen por finalidad suplir las falencias de cada uno de los modelos existentes.

En el caso de los modelos que utilizan descriptores de los niveles de energía sonora, así como de los que consideran fenómenos de transporte y más recientemente la utilización de los procesos de difusión basados en transferencia de calor, las herramientas de cálculo teórico y analítico de tipo estadístico y de métodos numéricos combinados con software avanzado, permiten contemplar tanto las condiciones geométricas en exteriores y la influencia de las condiciones atmosféricas, pero, sin la correlación suficientemente alta para validarla como único modelo. Sin embargo, parte de las herramientas de cálculo que se ha intentado aplicar son o de dudosa aplicabilidad para abordar los fenómenos en bajas

frecuencias (por ejemplo, el modelo de Daigle que si bien considera la turbulencia atmosférica y las reflexiones producto de las colisiones de los rayos con el suelo, trabaja con frecuencias de 300 Hz a 4000 Hz, por lo que no abarca todo el espectro de interés), o en ciertos casos se requiere de información que no está fácilmente disponible (como es el caso de los *modelos de propagación sonora en espacio libre* o aquellos en que *los factores atmosféricos son determinantes*) o por su complejidad de implementación y cálculo que excede lo que se requiere en estudios predictivos de impacto acústico.

El trabajo presentado por Cinar I. y Sensogut C. (2008), es un aporte para la comprensión de la propagación de las ondas sonoras en campos abiertos desde el punto de vista experimental, en el cual se muestra la influencia de los factores atmosféricos como la temperatura, la humedad, la intensidad y dirección del viento, en la predicción de los niveles sonoros en campo abierto. En particular, para el cálculo del nivel de presión sonora se considera atenuación por variación de distancia y por reflexión.

Por otro lado en lo que refiere a la norma ISO 9613-2, se ha constatado por diversos investigadores como G.P. van den Berg (2006), Kaliski & Duncan (2008), que para el caso de aerogeneradores de gran porte, se requiere de aportes sustanciales en el mejoramiento de los parámetros considerados. Por lo tanto, es necesario continuar avanzando en el desarrollo de un método de cálculo más preciso.

El método de cálculo de la Norma ISO 9613-2 para predecir los niveles de ruido se va a describir en detalle en el Capítulo 6.

En estudios realizados por Arenal M. et al. (2000, 2001) se analiza experimentalmente la contribución de la influencia de las variables meteorológicas y de los fenómenos turbulentos en la propagación del sonido en exteriores. En estos trabajos se pone de manifiesto la importancia de estos fenómenos en la propagación, e intenta cuantificar la importancia del efecto de la turbulencia atmosférica en la propagación del sonido en exteriores. Para ello, se compara niveles de presión sonora, tomados en campañas de medidas sobre suelos planos de impedancia acústica conocida, con modelos acústicos en dos casos diferentes tipificados por unas condiciones meteorológicas concretas: una atmósfera totalmente coherente (sin efectos turbulentos) y otra parcialmente coherente (incluye efectos turbulentos). En el rango de distancias analizado, hasta unos 50 m aproximadamente, la influencia de la *turbulencia* se produce en las frecuencias más altas, las superiores a 1500 Hz. Para las frecuencias más bajas el efecto predominante es el tipo de *suelo*. Los resultados confirman un mejor ajuste de los datos experimentales para las frecuencias acústicas más altas cuando se

incluyen los efectos de la turbulencia atmosférica, aun cuando las distancias entre fuente y receptor no sean muy grandes.

Asimismo, resulta relevante notar que de los estudios más recientes realizados por Martín Bravo et al. (2008), resulta que la atenuación por divergencia geométrica se aproxima al modelo de atenuación de una fuente lineal ideal, con lo cual varía con la distancia en lugar de la distancia al cuadrado como es considerada por la Norma ISO.

Por otro lado se resalta, que si bien la energía acústica emitida por los aerogeneradores es mayor en las frecuencias bajas y muy bajas, la emisión depende de distintas variables, entre ellas la velocidad de viento a la altura del buje, la temperatura y la humedad ambiente. Se visualizan incrementos de 0,5 dBA a 1,5 dBA en el nivel de potencia sonora por cada m/s en que aumenta la velocidad del viento.

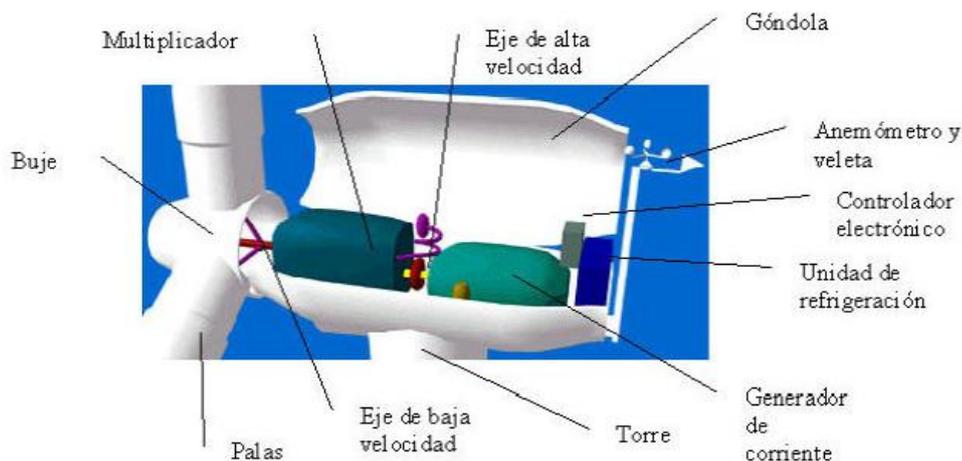
## 4. EL AEROGENERADOR COMO FUENTE DE NIVELES SONOROS

### 4.1. COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR

En la Figura 4.1, tomada de Martín Bravo et al. (2008), se presenta un esquema de los principales elementos que componen un aerogenerador: rotor, góndola y torre.

El rotor está compuesto por las palas y el buje.

En la góndola se ubican los “componentes clave” del aerogenerador: caja multiplicadora, sistema de frenado, sistemas de orientación, ejes de alta y baja velocidad, generador de corriente, controladores electrónicos, veleta y anemómetro.



**Figura 4.1. Componentes de un aerogenerador**

Fuente: Martín Bravo et al. 2008

A modo de ejemplo se presentan algunos datos de la geometría y funcionamiento de aerogeneradores de gran porte (Fuente: Catálogo Vestas V90-3,0 MW):

<b>Diámetro del rotor</b>	<b>90 m</b>
<b>Área barrida</b>	<b>6.362 m<sup>2</sup></b>
<b>Velocidad de giro nominal</b>	<b>16,1 rpm</b>
<b>Intervalo operativo</b>	<b>8,6-18,4 rpm</b>
<b>Número de palas</b>	<b>3</b>
<b>Altura de buje</b>	<b>80 m, 105 m</b>
<b>Velocidad de arranque</b>	<b>4 m/s</b>
<b>Velocidad de viento nominal</b>	<b>15 m/s</b>
<b>Velocidad de corte</b>	<b>25 m/s</b>
<b>Producción nominal</b>	<b>3.000 kW</b>

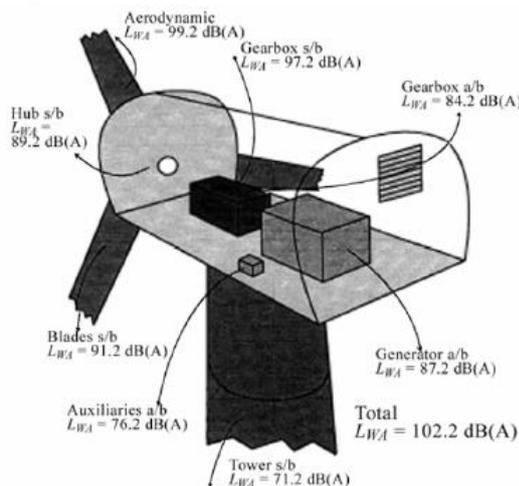
**Tabla 4.1. Geometría y funcionamiento de aerogeneradores**  
Fuente: Catálogo Vestas V90-3,0 MW

## 4.2. TIPOS DE RUIDO ASOCIADOS CON AEROGENERADORES

### 4.2.1. Fuentes de Emisión

Un aerogenerador produce emisiones sonoras de dos naturalezas diferentes: ruido mecánico y ruido aerodinámico.

En la Figura 4.2 esquematizan las fuentes de ruido de un aerogenerador de 2 MW y se indican los niveles de potencia acústica (expresados en dBA) de cada una de ellas, las que luego se resumen en la Tabla 4.2.



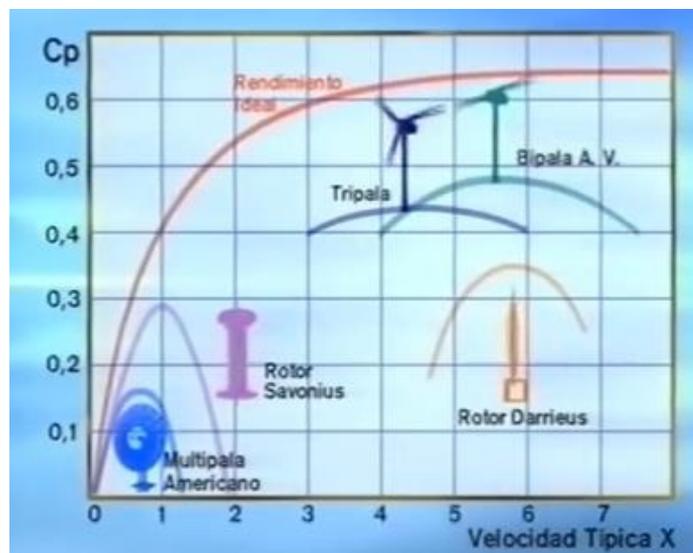
**Figura 4.2. Fuente de emisión y nivel de potencia sonora emitido por un aerogenerador. a/b indica transmisión aérea; s/b indica transmisión por vía sólida a través de la estructura y luego por vía aérea.**

Fuente: Wagner. 1996.

Fuente	$L_{WA}$ (dBA)	Vías de transmisión (*)
Generador	87,2	a/b
Buje	89,2	a/b
Engranajes	84,2	a/b
Engranajes	97,2	s/b
Torre	71,2	s/b
Auxiliares	76,2	a/b
Palas	91,2	s/b
Palas	99,2	a/b
Emisión total	102,2	

**Tabla 4.2. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora emitido por el aerogenerador de la Figura 4.1. (\*) Vías de transmisión: a/b indica transmisión aérea; s/b indica transmisión por vía sólida a través de la estructura y luego por vía aérea. Fuente: Wagner. 1996.**

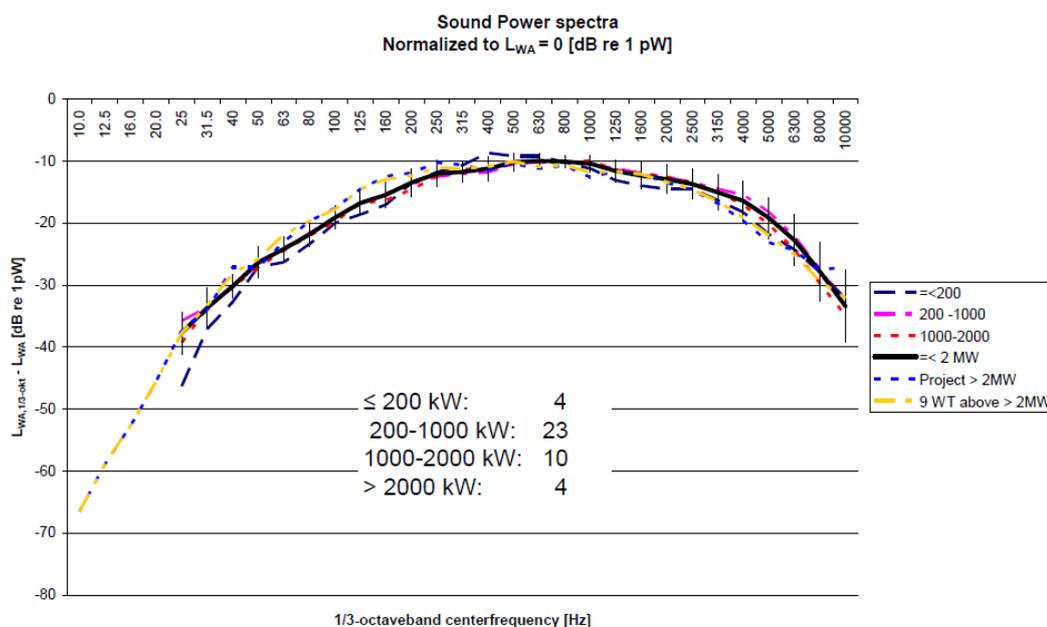
Los avances tecnológicos han permitido incrementar la potencia de las máquinas, emplear máquinas de mayor altura y diámetro de palas, mejorar el diseño de las palas y reducir el ruido aerodinámico que se produce durante el funcionamiento de los aerogeneradores (Figura 4.3).



**Figura 4.3. Evolución hacia el rendimiento óptimo**

En la Figura 4.4. se muestra un espectro de potencia acústica normalizado para mediciones realizadas a 41 aerogeneradores. Está definido en bandas de tercio de octava normalizadas y sus valores están expresados en dBA. Para la elaboración de las curvas se consideraron

para cada rango de potencias, según se indica en la tabla ubicada en el centro de la figura, distinto número de aerogeneradores.

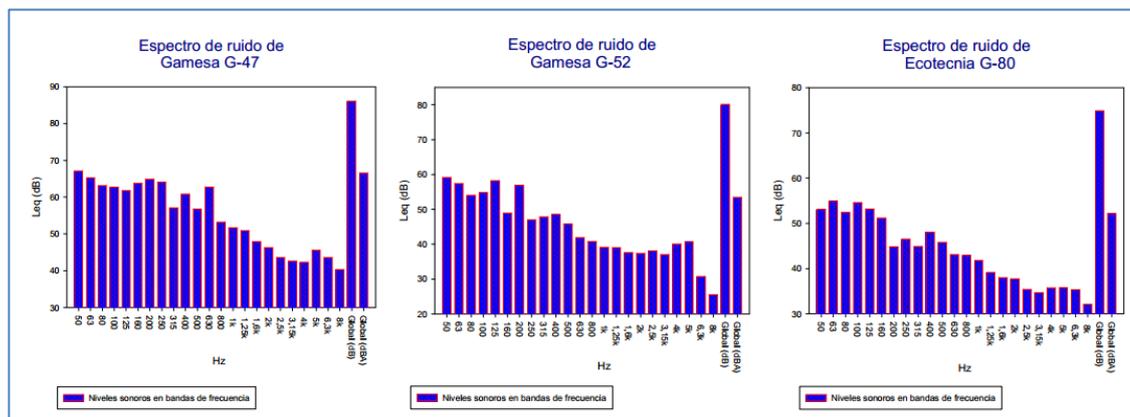


**Figura 4.4. Espectro de potencia acústica en escala A.**

Fuente: DELTA. 2010.

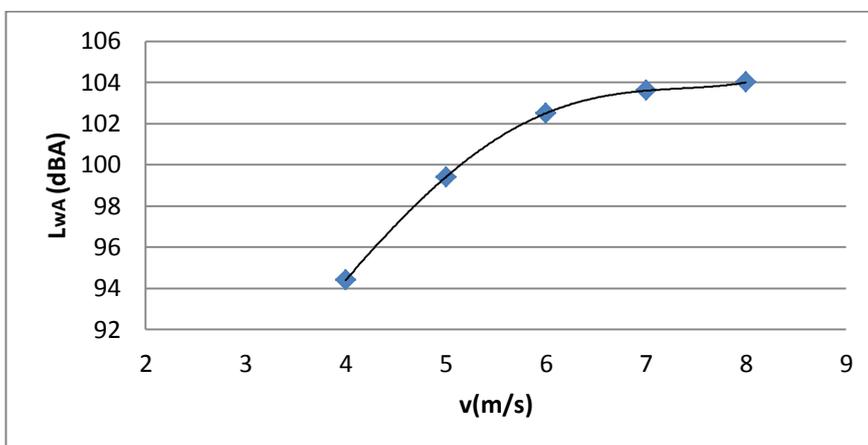
El espectro de la figura indica como la forma general del espectro de potencia acústica de aerogeneradores no cambia con el tiempo.

En la Figura 4.5. se presenta el espectro de emisión medidos por Martín Bravo et al. (2008) en España, en aerogeneradores de diferentes edades instalados en parques en operación. Las mediciones se realizaron en todos los casos a igual distancia de las máquinas (1,5 m) y a 1,2 m del piso. Se representa el nivel equivalente ( $L_{eq}$ ) en 1/3 de octava y el nivel global, en dB y en dBA, con el objetivo de observar el espectro de emisión producido por las máquinas en sus cercanías y los niveles a los que podría estar expuesto un operario del parque durante las tareas de reparación o mantenimiento. Los niveles en escala A están representados por la barra situada más a la derecha de cada diagrama. Se puede notar que éstos han disminuido significativamente.



**Figura 4.5. Espectro de ruido de tres modelos de aerogeneradores (instalados en 2000, 2002 y 2006 respectivamente).** Fuente: Martín Bravo et al. 2008.

Si bien la energía acústica emitida por los aerogeneradores es mayor en las frecuencias bajas y muy bajas, la emisión depende de distintas variables, entre ellas la velocidad de viento a la altura del buje, la temperatura y la humedad ambiente. Es posible detectar incrementos desde 0,5 dBA a 5 dBA en el nivel de potencia sonora por cada m/s en que aumenta la velocidad del viento dependiendo del valor de la velocidad del viento (ver Figura 4.6.).



**Figura 4.6. Nivel de Potencia sonora y velocidad del viento a 10 m de altura, para el caso de Atmósfera Neutra.** Fuente: Catálogo Vestas V90-2,0 MW.

Es interesante notar que el perfil de velocidad del viento varía con la altura, siendo mayor a alturas más altas, y el viento en su posición más elevada presenta mayor velocidad y por ende mayor energía (la cual depende de la densidad, área del rotor y velocidad del viento). Por el contrario, cuando la pala pasa por su parte más baja, además del viento que es menor a menor altura se le adiciona el “efecto sombra” de la torre.

Los aerogeneradores modernos son de paso variable, es decir la orientación de las palas del rotor respecto a la dirección de la corriente del viento es controlada normalmente por un sistema de regulación de paso que permite ajustar el ángulo de paso de las palas del rotor para mantener la velocidad del rotor en un valor constante o dentro de un rango dado. La pala conforme alcanza su parte más elevada modifica su ángulo de paso aumentándolo, de forma que deje escapar parte del viento de forma de reducir tensiones estructurales.

#### **4.2.2. Ruido Mecánico**

El ruido mecánico se produce normalmente por el movimiento de los siguientes componentes: engranajes, generador, mecanismo de orientación, ventiladores de enfriamiento. Estas emisiones se encuentran determinadas no sólo por las características de la fuente sino también por su estado de mantenimiento.

Los ruidos de naturaleza mecánica tienden a ser tonales, aunque también puede haber componentes en banda ancha.

El ruido tonal suele ser causado por componentes con movimiento periódico y ocurre usualmente en la correspondiente frecuencia de rotación (por ejemplo, la del generador o de los engranajes).

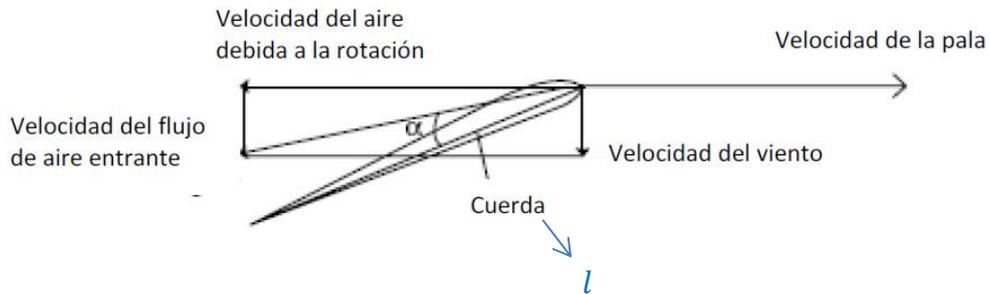
#### **4.2.3. Ruido Aerodinámico**

El ruido aerodinámico suele ser el componente más importante de las emisiones acústicas de los aerogeneradores. Se trata de un ruido de banda ancha inherente a la operación de la máquina, que se genera en la interacción del flujo de aire atmosférico y las palas del rotor.

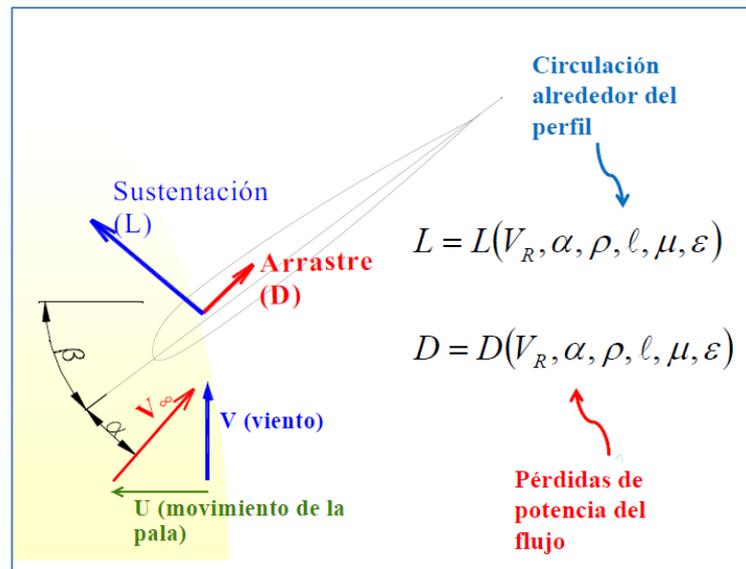
Como en el caso de las alas de los aviones, el flujo de aire alrededor de la pala de un aerogenerador establece una fuerza resultante de la variación de presión alrededor del perfil, que se puede descomponer en una componente de sustentación (lift) y una componente de arrastre (drag). Las magnitudes de ambas fuerzas están íntimamente ligadas al valor del ángulo de ataque  $\alpha$ , que queda definido por las direcciones del flujo entrante y la cuerda de la pala (ver Figura 4.7).

La condición óptima de funcionamiento del aerogenerador desde el punto de vista aerodinámico se corresponde con la condición de mínimos niveles de emisión sonora. Cuando el ángulo de ataque aumenta por encima de su valor óptimo, la capa límite turbulenta en el lado de la succión (subpresión) o extradós crece en espesor, con lo que disminuye el rendimiento energético y aumenta el nivel de ruido. Para valores altos del ángulo de ataque, predomina la fuerza de drag o arrastre, con la consiguiente reducción drástica de los efectos de sustentación (lift). Las

mejores condiciones acústicas son aquellas en que la sustentación se maximiza y el arrastre (drag, resistencia del flujo al giro de la pala) se reduce al mínimo.



**Figura 4.7. Flujo de aire en torno a un álabe**  
Fuente: van den Berg G.P. 2004



**Figura 4.8. Fuerzas de sustentación y arrastre en torno a un álabe**  
Fuente: Cataldo, J. 2013

La fuerza de sustentación, como se puede observar en la Figura 4.8, está asociada a cómo interactúa el viento sobre el perfil, y la fuerza de arrastre está asociada a las pérdidas de energía que sufre el flujo al desarrollarse alrededor del perfil.

Para mantener el ángulo de ataque óptimo, para potencia inferior a la nominal, se modifica la potencia cambiando la velocidad de giro.

El ángulo de ataque es óptimo desde el punto de vista energético cuando  $C_D/C_L$  es mínimo, pero no es el óptimo desde el punto de vista acústico

(esto significa que las emisiones sonoras en este caso no son las mejores) por lo que no se diseña para esta condición.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho l V_\infty^2}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho l V_\infty^2}$$

Siendo:

$C_L$ , Coeficiente de sustentación

$C_D$ , Coeficiente de arrastre

$L$ , Fuerza de sustentación

$D$ , Fuerza de arrastre

$l$ , distancia de la cuerda del álabe

$V_\infty$ , velocidad del objeto relativa al fluido

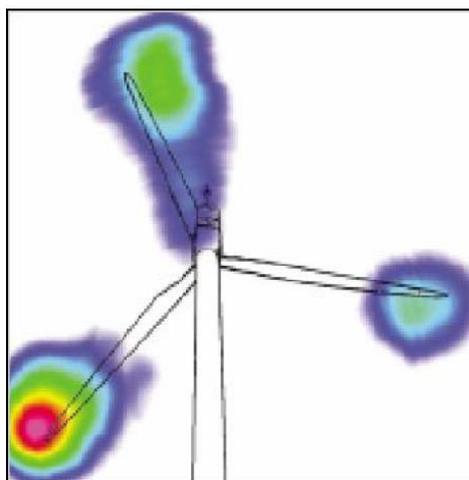
$\rho$ , densidad del fluido

Además de estos fenómenos asociados con la superficie de sustentación, no debe olvidarse que la propia atmósfera es turbulenta en una amplia gama de frecuencias y dimensiones de vórtice.

Se cuentan o se pueden apreciar tres fenómenos de generación de ruido. Uno de ellos es el denominado *sonido de borde*. La capa límite turbulenta en el extremo de aguas abajo de un perfil aerodinámico produce un sonido denominado de borde el cual es dominante para aerogeneradores modernos. Cuando el ángulo de ataque sobrepasa su valor óptimo, la capa límite turbulenta en el lado de succión (bajas presiones) crece en espesor, disminuyendo de ese modo los niveles de potencia e incrementando el nivel de sonido. Otro mecanismo de producción de sonido es la respuesta de la pala al cambio en la fuerza de sustentación (lift) cuando aquella enfrenta la torre. Al pasar por la torre, el viento resulta "frenado" por ella y *cambia el ángulo de ataque* sobre la pala. El movimiento resultante hacia los lados de la pala causa un sonido "de espesor" en la frecuencia de pasaje de la pala y sus armónicos (se designa así pues la capa límite turbulenta crece en espesor al bajar la presión en la succión); ver sección 5.3.2, apartado turbulencia. Asimismo, cuando la pala pasa por la torre se produce una *contracción* del flujo lo que resulta en otro (un tercer) mecanismo de generación de ruido.

Por otro lado, el flujo turbulento genera fluctuaciones en el campo de presiones y dinámica de vórtices que resulta en un incremento en los niveles sonoros.

En su tesis doctoral, G.P. van den Berg (2006) hace referencia al sonido generado por los aerogeneradores modernos de velocidad variable, donde el ángulo de pala (el ángulo entre la cuerda de la pala y el flujo entrante) es constante para una amplia gama de velocidades del viento. Van den Berg (2006) hace referencia a que siendo el sonido de espesor no relevante para la percepción directa, el flujo turbulento resulta la causa dominante del sonido perceptible de los aerogeneradores modernos. Este ruido, de banda ancha sin componentes tonales, es conocido como “silbido” de las palas. El nivel de sonido de borde, que es la fuente de sonido audible dominante en turbinas modernas, se incrementa abruptamente con la velocidad de las palas y es mayor en las puntas de las palas (Figura 4.9.).



**Figura 4.9. Fotografía acústica. Los colores desde el centro hacia el exterior indican una disminución del nivel de sonido (foto: Acoustic Cámara, GFAL Berlín). Fuente: van den Berg, G.P. 2006.**

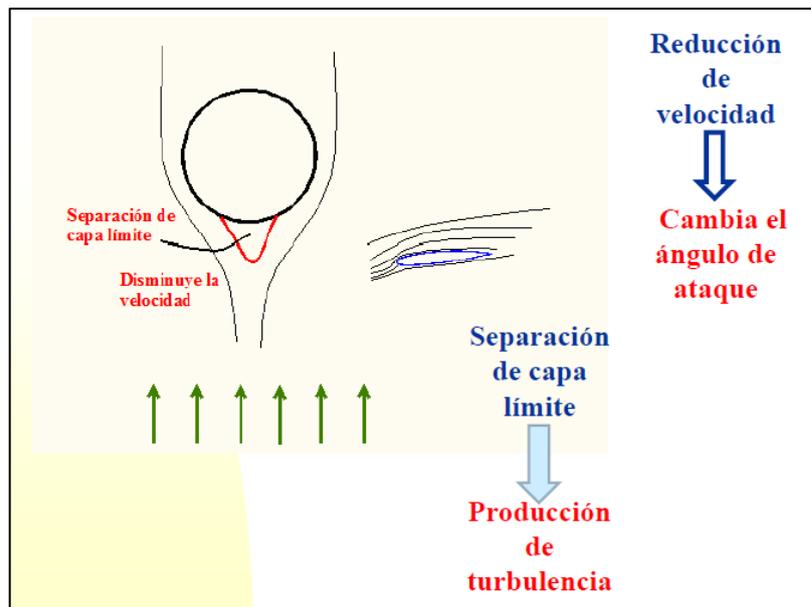
#### **4.2.3.1. Emisiones de baja frecuencia, infrasonidos**

El *ruido de baja frecuencia* tiene una energía acústica significativa en frecuencias por debajo de 100 Hz y se asocia fundamentalmente con el ruido aerodinámico. Como las ondas de baja frecuencia no son fáciles de amortiguar, el ruido de baja frecuencia puede ser oído a varios kilómetros de la fuente.

Datos experimentales de Jakobsen (2004), indican que el nivel de infrasonido a 100 metros de una turbina de viento es típicamente 70 dBG o menor, y cerca de ellas es entre 10 dB y 30 dB más alto (el umbral medio de audición de infrasonidos de las personas es de 95 dBG). Por lo

tanto, los infrasonidos emitidos por aerogeneradores con el rotor a barlovento no parecen ser auditivamente perceptibles. Sin embargo, la turbulencia del flujo incidente sobre el rotor, que genera una dinámica de vórtices y fluctuaciones en el campo de presiones, es la causa principal del ruido audible de los aerogeneradores modernos. Es un ruido de banda ancha conocido como “silbido de la pala” (swish blade), sin componentes tonales y que sólo presenta pequeñas variaciones. El silbido de la pala se debe al incremento regular de los niveles sonoros en el borde de salida del perfil aerodinámico cada vez que la pala pasa por la torre.

Una *fente de emisión* a destacar sucede en la *interacción pala – torre*. Cuando la pala pasa por delante de la torre se genera una variación abrupta en el flujo de aire, una contracción y compresión del flujo, por lo que el nivel sonoro aumenta considerablemente (Figura 4.10).



**Figura 4.10. Interacción pala – torre.**

Fuente: Cataldo, J. 2013.

Este incremento resulta una importante contribución a la zona de bajas frecuencias del espectro y se debe a la variación *abrupta* en el flujo de aire que la pala encuentra cuando pasa por la torre. Además, el ángulo de ataque del aire se desvía abruptamente del ángulo que está optimizado para el flujo medio (pero al ocurrir muy rápidamente, no da tiempo a que la máquina corrija este ángulo). Esta interacción origina un campo fluctuante de presiones, en el que inciden diversos factores, como la turbulencia del flujo, la geometría del rotor, el acabado superficial de las palas y la distancia entre pala y torre. El denominado sonido de borde, por

lo tanto, aumenta considerablemente con la velocidad de la pala y es máximo en los extremos de las palas.

#### **4.2.3.2. Ruido de banda ancha, turbulencia del flujo entrante**

El *ruido de banda ancha* se caracteriza por una distribución continua de la presión sonora en frecuencias superiores a 100 Hz. Es causado por la interacción entre las palas y el flujo turbulento del viento.

La contribución de la turbulencia atmosférica al ruido generado por los aerogeneradores, que se designa como “ruido del flujo turbulento entrante”, se trata de un ruido de banda ancha sobre un amplio rango de frecuencias.

#### **4.2.3.3. Ruido de frecuencias altas en el borde de salida de la pala**

Varios fenómenos de flujo en la pala o en la estela turbulenta detrás de ella causan un sonido de alta frecuencia (ruido propio de la superficie de sustentación). Lo más importante en las turbinas modernas es el ruido de separación de la capa límite turbulenta en la parte posterior de la pala, donde la capa límite turbulenta tiene el mayor espesor y la fuerza de la turbulencia es máxima.

El sonido sibilante (sonido agudo como un silbido) que se escucha cuando una pala pasa por la torre para que sea audible (reconocible), debe corresponder a un cambio en el nivel sonoro de por lo menos 1 dB. Se puede estimar que, al pasar por la torre, el nivel sonoro varía en aproximadamente: 2,1 +/- 0,4 dB. Esto se debe, en parte, a la menor velocidad del viento en el extremo inferior de la pala en relación al promedio en el rotor, y el resto se debe al enlentecimiento del viento a causa de la presencia de la torre.

De acuerdo con Brooks (citado por G.P. van den Berg en su Tesis Doctoral. 2006), el nivel de inmisión en un punto a distancia  $r$  de la fuente se puede obtener como suma de tres aportes, generados respectivamente por el lado de presión, el lado de succión y el ángulo de ataque. La incidencia del ángulo de ataque es significativa, 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  $\alpha = 5^\circ$ .

Cuando el aerogenerador está en operación, las palas producen emisiones sonoras que dependen de sus características. Debido a lo liso de las palas, la mayor parte del ruido se origina en el borde de salida (borde posterior) de ellas. En su generación inciden también las condiciones ambientales, como la velocidad del viento a la altura del buje, la temperatura y la humedad ambiente.

Un informe del Instituto de Ecología Acústica de USA (Acoustic Ecology Institute, 2010) indica que una de las características más comprometidas del ruido de aerogeneradores es que se trata de una señal de amplitud modulada (AM), en la que la intensidad del sonido (amplitud de la onda) está variando en el transcurso de muy pocos segundos. Teóricamente estas fluctuaciones en el nivel sonoro serían claramente perceptibles para el oído humano y, en la práctica, es lo que se verifica: los habitantes próximos a turbinas eólicas coinciden en notar que, en la tardecita o por la noche, el ruido de los aerogeneradores (especialmente de los de gran altura, o sea, máquinas modernas) adquiere un carácter de golpeteo cuyo ritmo coincide con la frecuencia de paso de la pala. El funcionamiento de otras turbinas puede contribuir a amplificar aún más este efecto.

La frecuencia de paso de la pala modula sonidos de frecuencias mucho más elevadas y hace aparecer un sonido periódico de amplitud modulada: el “silbido” de la pala. Este efecto es más fuerte en la noche porque, en una atmósfera estable, hay una diferencia mayor entre la velocidad del viento promediada en el rotor y la velocidad junto a la torre.

Cuando la fluctuación de la AM supera los 5 dB, la variabilidad del sonido resulta claramente perceptible. Estudios recientes han presentado modelos y medidas para el abordaje del problema de direccionalidad de la AM. Ésta es aparentemente más pronunciada a los lados de las turbinas, lo que puede ser debido al movimiento de las palas o porque el ruido que viene del borde de las palas es direccional. Un hallazgo interesante muestra que, mientras que los niveles de ruido eran más bajos a un lado, la AM era sólo perceptible en ese lugar. De ahí que una de las razones por las que la AM preocupa es debido a que puede hacer audibles las turbinas donde, de lo contrario, serían prácticamente imperceptibles.

### **4.3. INCIDENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LAS EMISIONES SONORAS**

#### **4.3.1. Estabilidad atmosférica**

Para comprender la estabilidad atmosférica y cómo influye en la propagación y dispersión de un contaminante, elemento o sustancia, es fundamental entender los mecanismos de la atmósfera que están relacionados con el movimiento vertical del aire.

El perfil de la temperatura en altura es la característica a la cual se vincula la estabilidad atmosférica. A partir de la comparación entre el gradiente que presenta el perfil de temperatura y el denominado gradiente adiabático de temperatura de aire seco, es que se caracteriza la estabilidad atmosférica.

El gradiente adiabático de temperatura de aire seco ( $\Gamma$ ) es fijo, independiente de la temperatura ambiental, y caracteriza la forma en la cual cambiará la temperatura de una parcela de una que se mueve verticalmente.

$$\Gamma = \frac{-dT}{dz} = 10 \text{ °C / km}$$

Las diferentes condiciones de estabilidad atmosférica se expresan a continuación en función de la relación entre  $(-dT/dz)_{amb}$  y  $\Gamma$ :

1.  $(-dT/dz)_{ambiental} > \Gamma$ : **atmósfera INESTABLE** (atmósfera súper adiabática)
2.  $(-dT/dz)_{ambiental} = \Gamma$ : **atmósfera NEUTRA**
3.  $(-dT/dz)_{ambiental} < \Gamma$ : **atmósfera ESTABLE** (atmósfera subadiabática)

Los parámetros atmosféricos son críticos para el uso de modelos de dispersión de contaminantes. En efecto, los coeficientes de dispersión que aparecen en las fórmulas gaussianas, están determinados por el mezclado o poder dispersivo del flujo turbulento dentro de la capa límite atmosférica. Para este propósito, Pasquill propuso un método que permite determinar los coeficientes de dispersión a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, definidas como categorías de estabilidad. La ventaja de esta clasificación es que para aplicarla, solamente es necesario utilizar información convencional suministrada por el servicio meteorológico local.

Pasquill propuso seis categorías de estabilidad:

- A - extremadamente inestable**
- B - moderadamente inestable**
- C - ligeramente inestable**
- D - neutral**
- E - ligeramente estable**
- F - moderadamente estable**

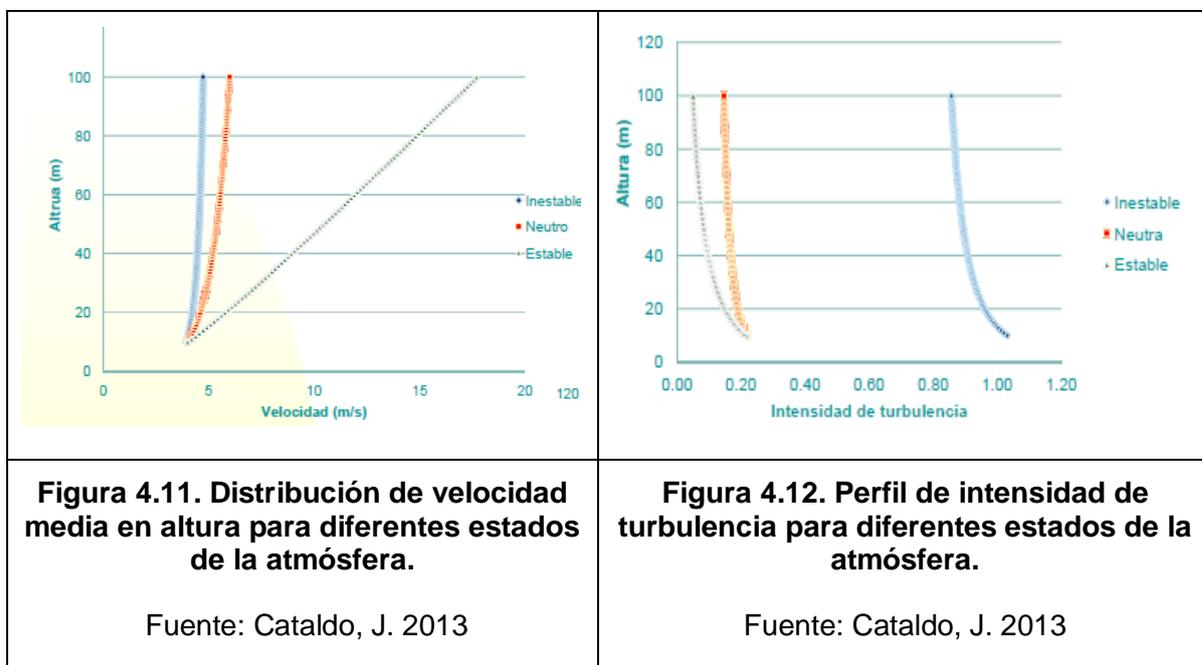
El método permite asociar a cualquier situación atmosférica, alguna de las seis categorías anteriores. Los factores determinantes de las clases de estabilidad son: la velocidad del viento, la nubosidad, el flujo neto de radiación que llega a la Tierra.

Gifford caracteriza las clases de estabilidad propuestas por Pasquill como se muestra en la Tabla 4.3:

$(-dT/dz)_{\text{ambiental}}$ (°C/100 m)	Estabilidad	Calificación
< - 1.9	A	Muy inestable
- 1.9 a - 1.7	B	Moderadamente inestable
- 1.7 a - 1.5	C	Ligeramente inestable
- 1.5 a - 0.5	D	Neutra
- 0.5 a + 1.5	E	Ligeramente estable
> +1.5	F	Estable

**Tabla 4.3. Niveles de estabilidad en función del gradiente de temperatura en la atmósfera.**

En lo que refiere a las distintas condiciones de estabilidad de la atmósfera, se puede observar (Figura 4.11) que en los casos de atmósfera neutra e inestable la distribución de velocidades medias no presenta variaciones importantes con la altura, pero sí presenta variaciones importantes para el caso de atmósfera estable. En este caso, el método de la Norma ISO 9613-2 no debería aplicarse, pues no está dentro de las hipótesis de validez de dicho método.



La ISO 9613 considera atmósfera inestable o neutra; no se aplica para atmósfera estable, con lo cual la velocidad del viento en estos casos toma un valor constante para todas las alturas de interés (de acuerdo a la Figura 4.11. resulta de 5 m/s aproximadamente). Sin embargo, es

importante resaltar que en atmósfera estable la velocidad del viento a la altura del buje es de 2 a 3 mayor a los valores de velocidades para atmósfera inestable o neutra (como se desprende de la Figura 4.11).

### **4.3.2. Turbulencia**

La producción de turbulencia está asociada a la ocurrencia de procesos que inducen fuertes gradientes de deformación que el flujo no puede sostener en forma estable. Entre tales procesos se destacan dos que se dan principalmente en la naturaleza. El primero es el escurrimiento en torno a obstáculos no aerodinámicos. En este caso, debido a que el fluido es viscoso, tiende a adherirse a las paredes sólidas, lo cual lleva a la aparición de zonas de gradientes de velocidad como lo son las **capas límites**, las regiones donde existen radios de curvatura extremadamente grandes como las esquinas y donde aparecen separaciones de capa límite. En este caso, se habla de producción mecánica de turbulencia. El segundo proceso que cabe destacar es el que ocurre asociado a la existencia de gradientes térmicos en el seno del flujo. Cuando la temperatura de la atmósfera disminuye con la altura más de lo correspondiente al gradiente adiabático, da lugar a un estado inestable que lleva a la producción de turbulencia. Por otro lado, cuando dicho gradiente lleva a un descenso de temperatura con la altura menor que el gradiente adiabático o incluso a un incremento de temperatura, aparecen situaciones de estabilidad atmosférica que llevan a una disipación de la turbulencia.

Cuando un flujo escurre alrededor de un obstáculo romo, se produce una importante generación de turbulencia mecánica. Por otro lado, en el entorno de un obstáculo se producen “zonas muertas”, en las cuales no hay un intercambio fuerte con el flujo principal, y aparecen flujos cerrados sin un franco intercambio de masa con su entorno. Cabe destacar que la turbulencia que presenta el flujo que escurre alrededor de un obstáculo romo, se encuentra fuertemente afectada por la generación de turbulencia mecánica que resulta de la interacción entre el flujo incidente y el obstáculo.

Los flujos turbulentos, presentan cambios en el tiempo y el espacio en la velocidad y dirección del viento. La energía de la fluctuación de la turbulencia atmosférica tiene un máximo a una frecuencia que depende de la altura y de la estabilidad atmosférica. Para la altura típica de las turbinas eólicas esta frecuencia de pico (máxima) es del orden de una vez por minuto ( $\approx 0,017$  Hz). La escala de los vórtices asociados es de varios cientos de metros en atmósfera inestable, y un poco menor en atmósfera estable.

El tamaño de los vórtices asociados a la turbulencia resulta de menor escala espacial con el incremento de la frecuencia y se disipan, debido a la fricción viscosa, cuando presentan un tamaño aproximado de un milímetro.

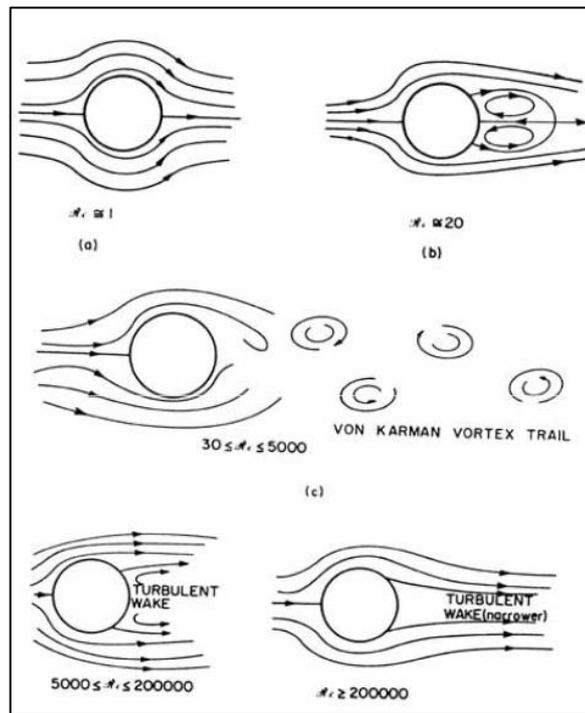
Como resultado de la existencia de un flujo turbulento se produce un cambio del vector de velocidades y, como consecuencia, del campo de presiones que se establece alrededor de la pala. Las velocidades medidas mayores se encuentran en la punta de la pala, por lo que se limita la velocidad en que puede funcionar el aerogenerador, para evitar que el flujo se haga compresible.

Si se produce un desprendimiento de la capa límite que se desarrolla sobre las palas, se genera una zona de producción de turbulencia dando lugar a un flujo con *vórtices*.

En la Figura 4.13 se puede observar cómo se generan los vórtices y la forma que adopta la estela turbulenta, en función del valor que presenta el número de Reynolds ( $Re$ ).

El desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de fuga de un perfil aerodinámico, o bien de la torre, da lugar a diferentes patrones de emisiones de vórtices (produce un sonido audible dominante).

En particular es usualmente de interés el patrón que corresponde a vórtices que se emiten periódicamente con una determinada frecuencia dependiente de la geometría del obstáculo, denominado calle de vórtices de von Karman.

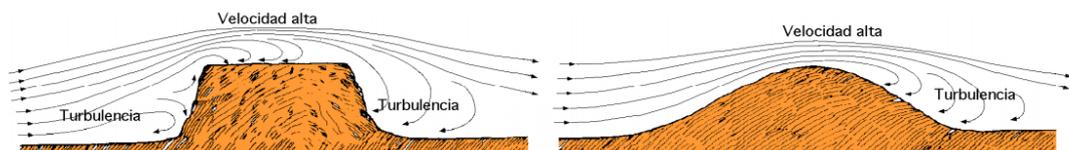


**Figura 4.13. Emisiones de vórtices**

Fuente: Cataldo, J. 2013.

Si el vórtice incidente sobre la pala es de mayor escala geométrica que esta, la modificación del flujo que incluimos puede ser interpretada como un cambio en la dirección y/o la velocidad del flujo incidente, lo que equivale a una desviación del ángulo óptimo de ataque. Esto conduce a los mismos fenómenos que en el caso anterior, pero los cambios ahora son aleatorios (no periódicos) y menos abruptos. Para vórtices turbulentos del tamaño de la longitud de la cuerda de la pala y menores, los efectos son locales y no se producen en forma coherente sobre la pala. Cuando el vórtice incide sobre la pala, el movimiento del flujo perpendicular a la superficie del perfil presenta una reducción de la velocidad o incluso un estancamiento lo que da lugar a grandes aceleraciones y, por lo tanto, a emisiones sonoras.

Por otro lado, en presencia de *topografía compleja* (pequeños obstáculos, cerros, colinas) se generan fenómenos turbulentos.



**Figura 4.14. Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento.** Fuente: Fernández, P. 1993.

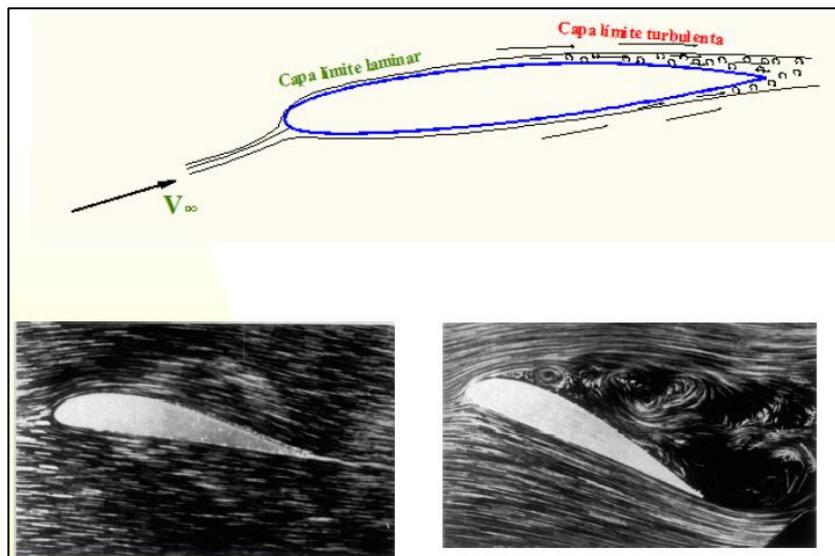
Es debido a que en las cumbres de las colinas ocurren velocidades de viento superiores, que los aerogeneradores se suelen ubicar en estas zonas. Sin embargo, en las laderas de las colinas se genera turbulencia, asociada a la emisión de vórtices que pueden ser muy significativos y ameritar un estudio en sí mismo.

El tipo de topografía agrega complejidad a los fenómenos de propagación de las ondas de sonido y, en consecuencia, a las predicciones de los niveles sonoros en el receptor.

Por tratarse esta tesis de una primera aproximación del problema, es que se enfoca el estudio en el caso de topografía plana.

### Capa Límite Laminar y Turbulenta

Cuando se tiene un perfil en el seno de un fluido en movimiento relativo a él, pueden ocurrir tanto flujos de tipo laminar o turbulento (Figura 4.15.). El perfil aerodinámico crea una alta presión en un lado de la pala y una baja presión en el lado opuesto.



**Figura 4.15. Capa límite, perfil aerodinámico**

Fuente: Cataldo, J. 2013

Las acciones de las fuerzas viscosas se producen en las proximidades de la zona de contacto sólido-aire, dentro de la capa límite.

La fricción del fluido viscoso sobre la superficie del sólido provoca una tensión de corte proporcional al gradiente de velocidades perpendicular a la superficie sólida. La distribución de velocidades va desde cero en el contacto con la superficie hasta una velocidad máxima para zonas

alejadas de la superficie. La región comprendida entre ambos estados se denomina capa límite superficial, la cual se desarrolla en ambos lados (extradós e intradós) en forma distinta.

El flujo que se desarrolla sobre las palas de un aerogenerador *es el de un fluido viscoso, con lo cual sobre la superficie de la pala se genera una capa límite.*

## 5. REQUISITOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

### 5.1. NORMATIVA Y AUTORIZACIONES REQUERIDAS

Los modelos de propagación en general utilizados se basan en la Norma ISO 9613-2; y los límites más empleados para la evaluación de los niveles sonoros en la etapa de operación provienen de alguna de las siguientes fuentes.

#### 5.1.1. A nivel internacional

- Normativa Chilena: Decreto Supremo N°146 año 1997.

En áreas rurales, las emisiones sonoras de fuentes fijas medidas en la zona donde se encuentra el receptor, no puede superar el ruido de fondo en más de 10 dB (A).

- *Norma brasileña CETESB L11032*, año 1993, (recomendada por DINAMA):

Horario	Límite en exterior	Límite interior de vivienda (ventanas abiertas)
de 7:00 a 19:00 h	50 dB (A)	40 dB (A)
de 19:00 a 22:00 h	45 dB (A)	35 dB (A)
De 22:00 a 7:00 h	40 dB (A)	30 dB (A)

- Recomendaciones de niveles admisibles:

A continuación se presenta una recopilación de criterios de la bibliografía referentes a niveles sonoros considerados admisibles en diferentes países y por diferentes investigadores.

Fuente	Recomendaciones de niveles admisibles en escala A
Alemania <sup>&amp;</sup>	40 dBA
Alemania*	35 dBA (nocturno)
Australia <sup>&amp;</sup>	45 dBA, si el propietario del predio ha consentido la instalación de algún aerogenerador en su padrón.

<b>Australia</b>	35 dBA (nocturno)
<b>Dinamarca<sup>&amp;</sup></b>	40 dBA
<b>Estudios en Suecia y Holanda<sup>**</sup></b>	35 dBA (nivel exterior nocturno)
<b>Hayes McKenzie Partnership HMP (informe original)<sup>**</sup></b>	33 dBA – 38 dBA como $L_{A90}$ (o 35 dBA – 40 dBA como $L_{Aeq}$ ) exterior
<b>Holanda<sup>&amp;</sup></b>	40 dBA
<b>Illinois (<sup>3</sup>)<sup>&amp;</sup></b>	50 dBA (diurno); 46 dBA (nocturno)
<b>Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM)<sup>**</sup></b>	NOEL: $L_{den}$ al aire libre de 40 dBA, que corresponde a un nivel de ruido exterior de alrededor de 35 dBA
<b>Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM)<sup>**</sup></b>	LOAEL <sup>4</sup> : $L_{den} = 45$ dBA límite máximo tolerable para evitar o minimizar efectos graves sobre la salud humana.
<b>ISO*</b>	25 dBA (32 dBA)
<b>Legislación holandesa<sup>&amp;&amp;</sup></b>	40 dBA (nocturno), 45 dBA (tarde 'evening'), 50 dBA (diurno)
<b>Michigan<sup>&amp;</sup></b>	55 dBA
<b>Ontario*</b>	40 dBA
<b>Wisconsin<sup>&amp;</sup></b>	50 dBA
<b>WHO 2009 (NNGL)</b>	$L_{A_{noche, exterior}}$ no mayor que 30 dBA
<b>WHO 2009 (NNGL)</b>	LOAEL: $L_{Noche, exterior}$ 40 dBA. El valor del LOAEL varía en función de la frecuencia, de la edad de los receptores y de la sensibilidad con que se evalúa el efecto
<b>Decreto Lei 292-2000, Portugal</b>	Variación admisible en $L_{Aeq}$ nocturno: 3 dBA
<b>Decreto Lei 292-2000,</b>	Variación admisible en $L_{Aeq}$ diurno: 5 dBA

<sup>3</sup> Los límites en el estado de Illinois se expresan sólo en 9 BO contiguas y no indican ponderación frecuencial para los límites de  $L_{eq}$  horario. Para ruido de aerogeneradores, por lo general el nivel sonoro en dBA es unos 5 dB menor que la suma energética de las nueve bandas de octava consideradas, por lo que los niveles que prescribe la normativa de Illinois son, en la práctica, del orden de 50 dBA (diurno, entre 7 y 22 horas) y 46 dBA (nocturno), en el supuesto de que un parque eólico es una fuente sonora lineal típica.

<sup>4</sup> LOAEL = Low Observed Adverse Effect Level. La Organización Mundial de la Salud reconoce que entre 30 dBA y 40 dBA pueden ocurrir ciertos efectos sobre el sueño, con la salvedad de que para 40 dBA los efectos sobre el sueño que se presentan, aunque pueden ser adversos, son moderados (movimientos corporales, sobresaltos, despertarse).

<b>Portugal</b>	
<b>DTI United Kingdom (1996)</b>	$L_{A90} + 5$ (nocturno)
<b>Francia<sup>&amp;</sup></b>	$L_{A90} + 5$ (diurno); $L_{A90} + 3$ (nocturno)
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	Variación admisible en $L_{A90,10\text{ min}}$ medido en el horario más tranquilo de la tarde o de la noche: 5 dBA
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	En presencia de tonos puros, penalizar con + 5 dBA el valor de comparación según Norma IEC 61400-1, pero no aplicar las demás disposiciones de esa Norma.
<b>Norma IRAM 4062:2001</b>	Incremento menor o igual que 8 dBA sobre el nivel de ruido de fondo
<b>Norma IRAM 4062:2001</b>	Si ocurren picos, no deben superar en 30 dBA el ruido de fondo (medido o calculado) en horario diurno o en 20 dBA en horario nocturno
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	$L_{Ceq} - L_{A90, \text{noche, línea de base}}$ menor o igual a 20 dB en el exterior de cualquier edificación ocupada
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	$L_{C90}$ menor o igual que 50 dBC sin presencia de otros sonidos ambientales, en propiedades ubicadas a 1.600 m o más de una carretera u otra vía de circulación importante.
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	$L_{C90}$ menor o igual que 55 dBC sin presencia de otros sonidos ambientales, en propiedades ubicadas a menos de 1.600 m de una carretera u otra vía de circulación importante.
<b>Australia<sup>&amp;</sup></b>	
	El menor de 35 dBA ó $L_{90} + 5$ dBA
<b>Hanning (2010)</b>	1.500 m y nivel sonoro exterior no mayor que 35 dBA
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	No exceder 35 dBA a 30 m de cualquier estructura ocupada o no más de 5 dBA sobre el ruido de fondo medido como $L_{A90,10\text{ min}}$
<b>Kamperman &amp; James (2008)</b>	35 dBA ó $L_{A90} + 5$ dBA
<b>Nueva Zelanda (Norma NZ 6808, 2010)</b>	El menor de: $L_{A90,10\text{ min}} = 40$ dBA ó un incremento de su valor inferior a 5 dBA en relación al nivel $L_{A90,10\text{ min}}$ de línea de base.
<b>Nueva Zelanda, Norma NZ 6808, 2010*; **</b>	En áreas sensibles, el menor de: $L_{A90,10\text{ min}} = 35$ dBA ó un incremento de su valor inferior a 5 dBA en relación al nivel $L_{A90,10\text{ min}}$ de línea de base.
<b>Phipps**</b>	El menor de los valores siguientes: incremento no mayor a 5 dBA en $L_{95}$ o $L_{95} = 30$ dBA
<b>Reino Unido<sup>&amp;</sup></b>	
	40 dBA (diurno); 43 dBA (nocturno) ó $L_{90} + 5$ dBA
<b>Thorne y van den Berg**</b>	$L_{A95}$ interior para bajas velocidades del viento = 30 dB; amplitud de la modulación no mayor a 3 dB

\* Citado sin más detalles por Harrison, 2009

\*\* Citado por Hanning, 2010

<sup>&</sup> Citado por Kamperman y James (2008)

<sup>&&</sup> Citado por Moorhouse et. al 2007

### 5.1.2. A nivel nacional

- Ley de Contaminación Acústica 17.852, del año 2004.
- Reglamentación Ley 17.852 – Decreto Ruido. Propuesta Técnica GESTA 2013. Documento Borrador.

#### Niveles de presión sonora en exteriores

Es competencia del MVOTMA fijar los objetivos de calidad acústica a nivel nacional. Cada Gobierno Departamental establecerá en su jurisdicción los objetivos en función de sus planes de ordenamiento territorial y zonificación urbana.

Los objetivos de calidad acústica en términos de niveles de presión sonora en espacios abiertos expresados en escala A, sin considerar el ruido de tránsito rodado, se enuncian en la Tabla 5.1.

	$L_{A,F,eq}$ (dBA)	
	Diurno	Nocturno
Espacios rurales, áreas protegidas.	45	40
Área urbana silenciosa, áreas de protección sonora.	55	45
Área levemente ruidosa, predominantemente residencial.	60	50
Área poco ruidosa. Uso mixto, residencial y comercial.	65	55
Área ruidosa, predominantemente industrias y comercios de gran porte.	70	60

**Tabla 5.1. Objetivos de Calidad Acústica en espacios abiertos ( $L_{A,F,eq}$ ).**  
Fuente: Propuesta Técnica GESTA 2013 para la Reglamentación Ley 17.852 – Decreto Ruido. Documento Borrador.

En los Gobiernos Departamentales que no estén definidas las zonas establecidas en la Tabla 5.1., se deberán cumplir los siguientes Objetivos de Calidad Acústica (Tabla 5.2):

	$L_{A,F,eq}$ (dBA)	
	Diurno	Nocturno
Áreas Rurales	45	40
Áreas Urbanas y Suburbanas	65	55

**Tabla 5.2. Objetivos de Calidad Acústica en espacios abiertos ( $L_{A,F,eq}$ ) cuando no se tiene zonificación o la que existe no es compatible con la Tabla 5.1.** Fuente: Propuesta Técnica GESTA 2013 para la Reglamentación Ley 17.852 – Decreto Ruido. Documento Borrador.

### *Niveles de presión sonora en interiores*

Es importante notar que la Propuesta GESTA (2013) acota niveles de presión sonora en interiores, en cambio la OMS propone trabajar solamente con el nivel sonoro de inmisión en exteriores (no considera las características en particular el aislamiento acústico en el área de influencia de las turbinas).

A los efectos de homogeneizar criterios en todo el país, los niveles de inmisión sonora que se considerarán admisibles en viviendas, en aulas y en áreas de internación en centros de atención a la salud, se presentan en la Tabla 5.3. Tales niveles corresponden a los que se obtienen como resultado de los aportes de todas las fuentes sonoras cuyas emisiones alcancen el recinto en cuestión, excluyendo el que genere el aporte del ruido del tránsito rodado.

	$L_{A,F,eq}$ (dBA)	
	Diurno	Nocturno
<b>Residencial habitable en territorio urbano / urbanizable</b>	45	40
<b>Aulas de Enseñanza (nivel de ruido de fondo sin considerar el generado por las actividades que se realicen en el establecimiento cumpliendo con su objetivo)</b>	35	
<b>Salas de internación en hospitales y sanatorios (nivel de ruido de fondo sin considerar el que resulte de actividades que se realicen dentro de la sala en cuestión, relacionadas con la atención de la salud de los pacientes)</b>	35	

**Tabla 5.3. Niveles de presión sonora admisibles en recintos, según destino del local ( $L_{A,F,eq}$ ).** Fuente: Propuesta Técnica GESTA 2013 para la Reglamentación Ley 17.852 – Decreto Ruido. Documento Borrador.

Los estándares de inmisión en el interior de locales comerciales e industriales serán fijados en cada caso por las autoridades competentes.

- *Límites acordados por 11 Intendencias departamentales* en el marco de las Jornadas de Convergencia en Contaminación Acústica, Ed. 1ª., Montevideo, MVOTMA – DINAMA, 2008:
  - Diurno: 45 dBA
  - Nocturno: 40 dBA
- Decretos u Ordenanzas Departamentales (MVOTMA, 1998)

Para el desarrollo de un parque eólico en Uruguay es necesario recorrer un camino que implica las siguientes autorizaciones:

- Permiso de la Junta Departamental, en lo que refiere a los instrumentos de Ordenamiento Territorial.
- Autorización Ambiental Previa para todo emprendimiento de potencia instalada mayor o igual a 10 MW (numeral 16 del artículo 2° del Decreto 349/005).

Asimismo se debe tener en consideración la importancia de la prevención, lo cual se implementa a través de medidas fundamentadas en relación a la autorización o no de los emplazamientos en los que se propone desarrollar emprendimientos de generación eólica. Es en este sentido que el Ordenamiento Territorial es el mecanismo utilizado y recomendado como herramienta para anticiparse al surgimiento de nuevos problemas.

En esta línea, en marzo 2012, el MVOTMA – DINAMA ha definido una serie de *criterios para la instalación de parques eólicos* en relación a la localización de los aerogeneradores dentro del predio del Parque Eólico. Los cuales se consideran criterios que los Parques Eólicos deben cumplir para minimizar la posibilidad de que se generen impactos ambientales residuales negativos no admisibles, debido a la operación de los mismos.

A continuación se presentan en forma resumida algunos de los criterios definidos por el MVOTMA - DINAMA (2012) en relación a los impactos acústicos:

- Se ha establecido que deberá existir una distancia mínima de 300 metros desde el centro de la base de cada aerogenerador a todos los bordes o límites exteriores del predio (conjunto de padrones o fracciones de padrones) del proyecto, incluyendo como tales también a aquellos linderos con caminos de uso público o rutas.

Esta distancia pretende reducir un conjunto de efectos derivados de la operación del aerogenerador, tales como el ruido y el parpadeo de sombra, tendiente a mantener condiciones seguras de uso y transitabilidad en esos bordes y reducir la afectación sobre los predios linderos.

- En relación a las emisiones sonoras generadas por el funcionamiento del parque eólico, se deberá realizar una evaluación del nivel de ruido futuro esperado en el área de influencia del emprendimiento. Ésta constará de un estudio del ruido de fondo existente sin la presencia de los aerogeneradores (a partir de medidas directas en campo), una modelación del nivel de

ruido generado por los aerogeneradores durante su funcionamiento y un estudio del nivel sonoro que resulta de la superposición de los dos anteriores en el sitio de inmisión más comprometido.

A los efectos de la evaluación se establece un límite máximo de inmisión de **45 dB(A)**, tanto diurno como nocturno, medido en la fachada de una edificación habitada y siempre que el ruido de fondo no supere los 42 dB(A). Para el caso donde el ruido de fondo supere el valor de 42 dB(A), entonces el nivel sonoro resultante de la superposición de aquel con el ruido generado por los aerogeneradores no debiera superar en 3 dB(A) el ruido de fondo medido.

- Para reducir la incidencia de posibles impactos visuales y sobre la estructura del territorio, la DINOT ha planteado que la localización del parque eólico deberá respetar una distancia mínima de 1 km a centros poblados y de 3 km a ciudades, villas y pueblos.

## **5.2. ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO DE PARQUES EÓLICOS**

Los estudios de impacto acústico de parques eólicos son parte de los estudios de impacto ambiental que deben ser presentados para solicitar al MVOTMA la viabilidad ambiental de localización y la autorización ambiental previa para su instalación.

Si bien se exige para otorgar la autorización de localización, la presentación de la caracterización del clima de vientos en el lugar con un año de duración de mediciones (UTE), se recomienda (IMFIA, 2012b) realizar también la caracterización en la zona cercana al emprendimiento. Esto es debido a que la prevención es la medida de gestión más efectiva para evitar y/o minimizar impactos.

Si bien los contenidos de los estudios de impacto acústico no están estipulados por normativa nacional, de acuerdo a IMFIA (2012b) se presentan a continuación los contenidos mínimos sugeridos para estos estudios.

1. Delimitación del área de estudio para línea de base.
2. Identificación de las fuentes sonoras con incidencia en el área de estudio.
3. Normativa (nacional o municipal) a aplicar en materia de niveles de presión sonora.
4. Línea de base de niveles de presión sonora en el área de estudio.
5. Predicción de niveles de presión sonora con el parque eólico en funcionamiento.
6. Evaluación del impacto acústico esperable.

7. Medidas de gestión a considerar para asegurar la calidad acústica ambiental.
8. Plan de monitoreo de niveles de presión sonora en fase operativa.

En la fase de selección del sitio se debe realizar mediciones de niveles sonoros y de series de vientos en el área de influencia directa (no sólo en el sitio de implantación) a través de registros prolongados, para contar con una línea de base sólida y realizar las predicciones de los niveles sonoros lo más preciso posible para evitar y/o minimizar los impactos.

## 6. ESTIMACIÓN DE NIVELES DE PRESION SONORA

### 6.1. MODELOS PREDICTIVOS

Para poder hacer una evaluación fiable del ruido generado por aerogeneradores en el entorno es necesario disponer de métodos confiables y aplicables para la determinación del ruido emitido, de los fenómenos de propagación y de las características de los potenciales receptores en cuanto a sus necesidades de apantallamiento, aislamiento o protección acústica entendida de un modo amplio (Figura 6.1).



**Figura 6.1. Pasos en la predicción de niveles sonoros en inmisión**

Fuente: DELTA. 2010.

Es importante mencionar que la OMS (1999) propone trabajar con el nivel sonoro de inmisión *en exteriores*, sin considerar las características –en particular, el aislamiento acústico - de las edificaciones en el área de influencia de las turbinas.

Los modelos de propagación analizados se pueden clasificar en tres grupos (DELTA, 2010):

1. Modelos de ecuación de onda
2. Modelos de rayos
3. Modelos empíricos

### **6.1.1. Modelos de ecuación de onda**

Los modelos de ecuación de onda son modelos numéricos que, de una u otra forma, resuelven la ecuación de ondas.

Entre ellos, se pueden mencionar los siguientes: *Método de la ecuación parabólica* (PE), *Método de los elementos de contorno* (BEM), *FFP* (“Fast Field Program”, bautizado así como alusión a la FFT), y *Euler Linealizado* (EU).

Si bien los modelos de ecuación de onda producen resultados precisos en los casos en los que son válidos, insumen un tiempo de cálculo extremadamente largo. Como además el tiempo de cálculo aumenta con la frecuencia, los modelos de ecuación de onda rara vez se emplean para frecuencias superiores a algunos pocos miles de hertz.

### **6.1.2. Modelos de rayos**

Como modelos de rayos se pueden mencionar los *Modelos numéricos de trazado de rayos*, y los *Modelos semi-analíticos de rayos empíricos*.

Para una atmósfera homogénea sin refracción, existen soluciones precisas para ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual sobre una superficie de impedancia constante (superficie del suelo) o sobre una pantalla con un borde en el que se produce difracción. Para atmósferas en las que ocurre refracción y terrenos más complejos, las soluciones del modelo de rayos siempre son soluciones más o menos aproximadas, basadas en las soluciones para atmósfera homogénea. Cuando hay refracción en la atmósfera, si la *refracción es moderada* (desviación de las ondas de sonido de su trayectoria original es leve), la solución más sencilla de rayos rectilíneos debe reemplazarse por rayos curvos. Si hay *refracción fuerte* deja de ser válida la hipótesis de campo esférico y el modelo da resultados menos precisos. Las imprecisiones aumentan cuanto más cerca del suelo ocurre la propagación, por lo que es esperable que sean menos importantes para turbinas de viento que para fuentes de baja altura, como el ruido del tráfico.

Dada esta situación, la acústica de rayos no suele utilizarse para la predicción de niveles sonoros asociados con aerogeneradores de gran porte.

En la sección 6.4.3. – referido al modelo de propagación Nord2000, modelo semi-analítico de rayos -, se explica más en detalle el fenómeno de refracción atmosférica y el esquema de propagación de las ondas sonoras.

### **6.1.3. Modelos empíricos**

La mayoría de los cálculos predictivos de niveles sonoros asociados con turbinas de viento se hacen aplicando modelos empíricos.

Los modelos empíricos más utilizados son:

- *ISO 9613-2 Atenuación del sonido durante su propagación al aire libre - Parte 2: Método general de cálculo (1996)*
- *Modelo general de predicción de ruido de los países nórdicos para plantas industriales (DELTA, 2002)*

Estos modelos tienen características comunes y compartidas como, por ejemplo, las ecuaciones de atenuación del terreno. Ambos están disponibles en software comerciales.

Una debilidad general de los modelos empíricos es que no se puede esperar que generen resultados fiables fuera del rango de las variables del modelo. En particular, para los modelos empíricos mencionados debe tenerse en cuenta que las condiciones climáticas en el modelo han sido fijadas para velocidad del viento moderada, propagación en distancias moderadas y con fuente y receptor de baja altura. Para fuentes de gran altura como las turbinas eólicas ninguno de los dos métodos produce buenos resultados.

## **6.2. MODELO DE CONCAWE**

Como antecedente de interés se cuenta el informe elaborado por Manning en 1981 para CONCAWE - Conservation of Clean Air and Water in Europe – la organización de empresas petroleras europeas formada en 1963 con el objetivo de realizar investigación en temas ambientales para proteger la salud y el ambiente.

El estudio fue llevado a cabo por la empresa Acoustics Technology Ltd., de Southampton, Reino Unido, a partir de un esquema de trabajo diseñado por un Grupo de Trabajo Especial sobre Propagación de Ruido de CONCAWE. El informe “The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighboring Communities, Report 4/81, CONCAWE, 1981” plantea un modelo que tiene muchas similitudes con la propuesta de la Norma ISO 9613-2 posteriormente elaborada, aunque este modelo es en algunos puntos bastante más exhaustivo que la Norma.

Se presentan a continuación los grandes aspectos que considera el método de cálculo propuesto.

El *nivel de presión sonora* en un cierto punto puede relacionarse con la energía acústica emitida por la fuente según una expresión genérica de la misma forma que la que emplea la Norma ISO 9613-2 (1996):

$$L_p = L_w + D - K$$

Siendo:

$L_p$ : Nivel de presión sonora (dB re 20  $\mu$ Pa)

$L_w$ : Nivel de potencia sonora (dB re  $10^{-12}$  W)

D: Índice de directividad, en dB

K: Suma de los términos de atenuación

Los términos de atenuación, incluidos en K, que fueron considerados por el método son los siguientes:

$$K = k_{div} + k_{atm} + k_{gr} + k_{met} + k_{height} + k_{barr} + k_{plant}$$

Siendo:

$k_{div}$ : Divergencia geométrica, en dB

$k_{atm}$ : Absorción atmosférica, en dB/octava

$k_{gr}$ : Efecto del terreno, en dB/octava

$k_{met}$ : Atenuación debida a las condiciones meteorológicas, en dB/octava

$k_{height}$ : Atenuación debida a la altura de la fuente, en dB/octava

$k_{barr}$ : Atenuación debida a la presencia de barreras, en dB/octava

$k_{plant}$ : Atenuación debida a otras instalaciones de la planta, en dB/octava

A continuación se presentan las expresiones y métodos de cálculo presentados por CONCAWE para cada una de las atenuaciones.

Las correcciones por la existencia de barreras,  $k_{barr}$ , y apantallamientos en la planta,  $k_{plant}$ , se calculan del mismo modo que lo plantea la Norma ISO 9613-2 (que se discute en la sección 6.3), por lo que no son desarrollados aquí.

### **Divergencia geométrica ( $k_{div}$ )**

Se denomina atenuación por divergencia de las ondas sonoras a la disminución de presión sonora que tiene lugar a medida que aumenta la distancia a una fuente emisora, debido al progresivo aumento de la superficie por la que se distribuye la energía sonora emitida. La disminución es dependiente de la forma de los frentes de onda, es decir, de cómo se pueda representar el emisor (fuente plana, lineal, puntual) y las superficies sucesivas a través de las cuales ocurre el flujo de la energía acústica emitida por la fuente en cuestión.

Para el caso de una fuente puntual, como es considerado por el método de CONCAWE, la propagación en forma esférica de los niveles sonoros emitidos está dada por la siguiente expresión:

$$k_{div} = 10 \log 4 \pi d^2 \quad [\text{dB}]$$

Siendo  $d$  la distancia entre la fuente y el receptor (en metros).

### **Absorción atmosférica ( $k_{atm}$ )**

De acuerdo menciona Manning (1981) en el Reporte 4/81, la absorción del sonido por la atmósfera puede deberse a los siguientes mecanismos: la absorción “clásica” que es debido a la viscosidad de corte o viscosidad cinemática<sup>5</sup>, conductividad térmica, difusión de masas y difusión térmica en el medio; la absorción por rotación, causada por la relajación de la energía rotacional de las moléculas; y la relajación vibracional de las moléculas de nitrógeno y oxígeno en el aire.

Para la absorción atmosférica, el Reporte 4/81 presenta tablas con coeficientes expresados en dB/km para las bandas de tercio de octava normalizadas entre 50 Hz y 8000 Hz, para porcentajes de humedad relativa variando de a 5 % entre 55 % y 100 % y para temperaturas variando cada 5°C entre 0°C y 30°C.

### **Efectos Meteorológicos ( $k_{met}$ )**

#### *Categorías meteorológicas consideradas por CONCAWE*

El modelo de CONCAWE no trabaja directamente con las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford sino que reagrupa algunas condiciones y define seis nuevas categorías para la aplicación de su esquema de

---

<sup>5</sup> La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. Sus dimensiones corresponden a  $[L^2T^{-1}]$ . Se expresa usualmente en  $[m^2/s] = [Pa.s/(kg/m^3)]$

cálculo, según se detalla en la Tabla 6.1. Las categorías van de mayor atenuación (categoría 1) a menor atenuación (categoría 6), tomando como referencia la categoría 4, en la que se asume que no hay influencia meteorológica.

Categoría meteorológica	Categoría de estabilidad según 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	--	$v > +3,0$	$+0,5 < v < +3,0$

\* Categoría asumida como con cero influencia meteorológica

\*\* Atenuación decreciente de Categoría 1 a Categoría 6.

**Tabla 6.1. Categorías meteorológicas que considerada CONCAWE.**

Fuente: Manning, C. J. 1981.

Para considerar los efectos meteorológicos, se emplean estas "categorías meteorológicas" en función del vector velocidad del viento y el gradiente de temperaturas en la atmósfera.

El valor de  $k_{met}$  se obtiene como diferencia entre los datos registrados para distintas condiciones atmosféricas y las condiciones asumidas como de atmósfera neutra, definidas por un vector nulo tanto en cuanto a velocidad del viento como a gradiente de temperatura. Para superficies acústicamente duras (por ejemplo, agua u hormigón), se toma  $k_{met} = -3$  dB para propagación en la dirección del viento (viento abajo o a sotavento).

A continuación se presentan los gráficos de corrección por efectos meteorológicos, con sus correspondientes ecuaciones, que presenta el Reporte 4/81 de CONCAWE.

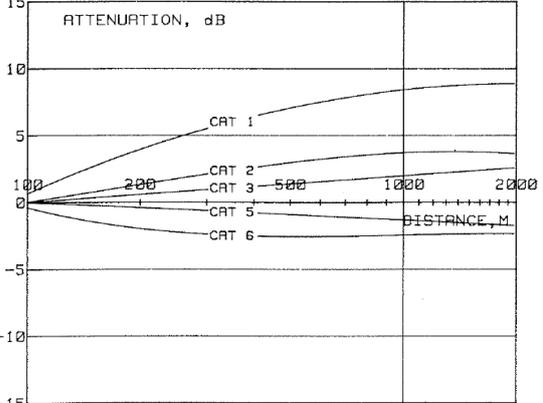
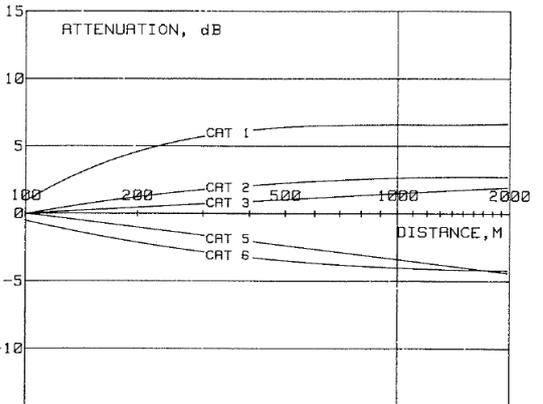
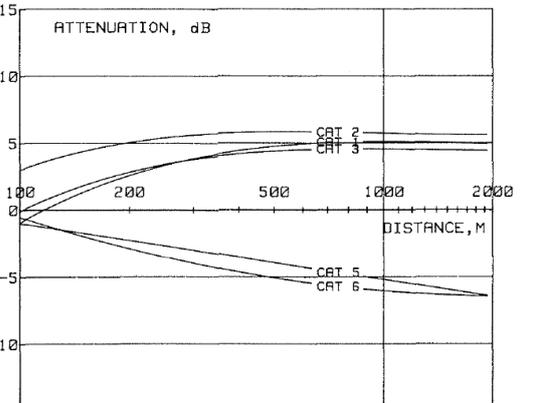
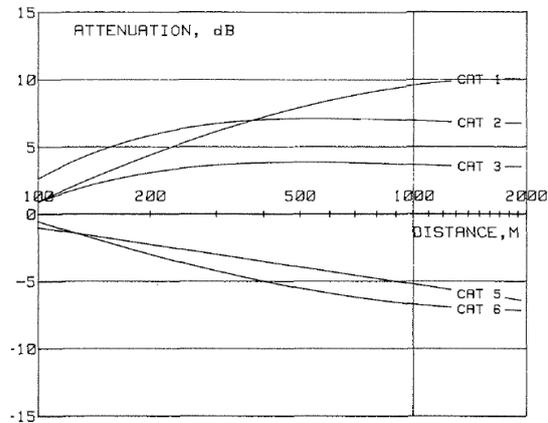
<p>Figure 2: Meteorological Attenuation Curves - 63 Hz                      (Experimental Data not available for Category 1)</p> 	<p><b>63 Hz</b></p> <p>Cat. Met.1: <math>k_{met} = -38.9 + 26.4 (\log d) - 2.84 (\log d)^2 - 0.234 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.2: <math>k_{met} = 16.1 - 28.43 (\log d) + 14.4 (\log d)^2 - 2.1 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.3: <math>k_{met} = -4 + 2 (\log d)</math></p> <p>Cat. Met. 5: <math>k_{met} = 3.35 - 2.26 (\log d) + 0.407 (\log d)^2 - 0.0572 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.6: <math>k_{met} = 69.3 - 73.2 (\log d) + 24.688 (\log d)^2 - 2.7531 (\log d)^3</math></p>
<p>Figure 3: Meteorological Attenuation Curves - 125 Hz                      (Experimental Data not available for Category 1)</p> 	<p><b>125 Hz</b></p> <p>Cat. Met.1: <math>k_{met} = -137 + 142 (\log d) - 46.8 (\log d)^2 + 5.14 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.2: <math>k_{met} = -23.2 + 19.53 (\log d) - 4.646 (\log d)^2 + 0.3358 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.3: <math>k_{met} = -3 + 1.5 (\log d)</math></p> <p>Cat. Met.5: <math>k_{met} = 6.8 - 3.4 (\log d)</math></p> <p>Cat. Met.6: <math>k_{met} = 29.5 - 25.62 (\log d) + 6.286 (\log d)^2 - 0.4904 (\log d)^3</math></p>
<p>Figure 4: Meteorological Attenuation Curves - 250 Hz                      (Experimental Data not available for Category 1)</p> 	<p><b>250 Hz</b></p> <p>Cat. Met.1: <math>k_{met} = -104 + 100 (\log d) - 30.3 (\log d)^2 + 3.03 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.2: <math>k_{met} = -84.8 + 91.93 (\log d) - 30.873 (\log d)^2 + 3.4295 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.3: <math>k_{met} = -100.6 + 101.23 (\log d) - 32.352 (\log d)^2 + 3.4306 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.5: <math>k_{met} = 7.4 - 4.2 (\log d)</math></p> <p>Cat. Met.6: <math>k_{met} = 31.7 - 23.81 (\log d) - 4.055 (\log d)^2 - 0.1043 (\log d)^3</math></p>

Figure 5: Meteorological Attenuation Curves - 500 Hz  
(Experimental Data not available for Category 1)



### 500 Hz

$$\text{Cat. Met.1: } k_{\text{met}} = -20.9 + 3.86 (\log d) + 6.39 (\log d)^2 - 1.43 (\log d)^3$$

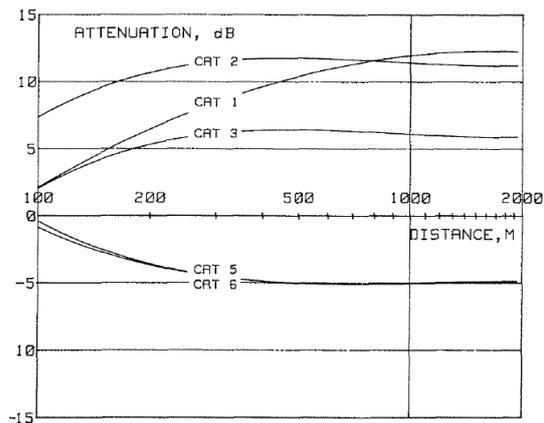
$$\text{Cat. Met.2: } k_{\text{met}} = -133.7 + 142.63 (\log d) - 47.851 (\log d)^2 + 5.3118 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.3: } k_{\text{met}} = -96.8 + 102.98 (\log d) - 34.868 (\log d)^2 + 3.9016 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.5: } k_{\text{met}} = 7.4 - 4.2 (\log d)$$

$$\text{Cat. Met.6: } k_{\text{met}} = 19.8 - 8.8 (\log d) - 2.035 (\log d)^2 - 0.6747 (\log d)^3$$

Figure 6: Meteorological Attenuation Curves - 1 kHz  
(Experimental Data not available for Category 1)



### 1000 Hz

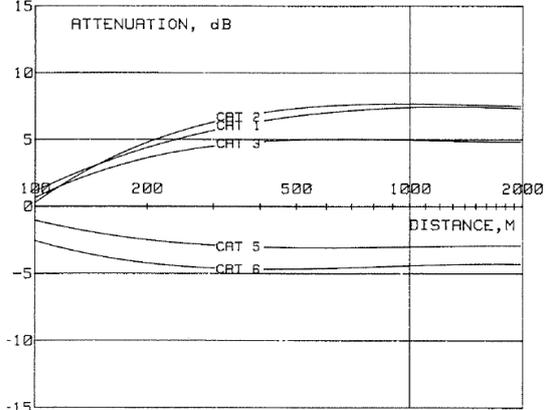
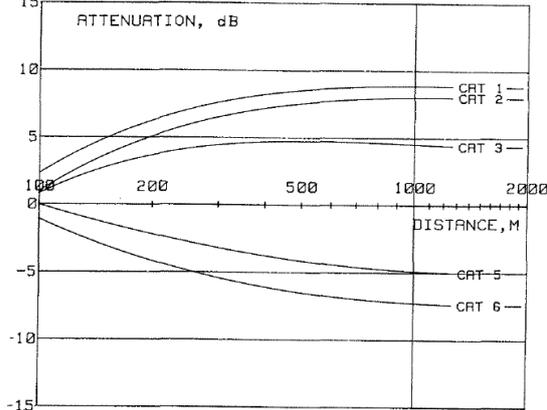
$$\text{Cat. Met.1: } k_{\text{met}} = -54.3 + 39 (\log d) - 4.92 (\log d)^2 - 0.239 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.2: } k_{\text{met}} = -148.2 + 164.99 (\log d) - 56.287 (\log d)^2 + 6.3422 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.3: } k_{\text{met}} = -150 + 160.95 (\log d) - 54.786 (\log d)^2 + 6.1604 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.5: } k_{\text{met}} = 104.6 - 108.03 (\log d) + 35.295 (\log d)^2 - 3.8227 (\log d)^3$$

$$\text{Cat. Met.6: } k_{\text{met}} = 123.4 - 127.6 (\log d) + 42.017 (\log d)^2 - 4.584 (\log d)^3$$

<p>Figure 7: Meteorological Attenuation Curves - 2 kHz (Experimental Data not available for Category 1)</p> 	<p><b>2000 Hz</b></p> <p>Cat. Met.1: <math>k_{met} = -69.9 + 63.6 (\log d) - 16.9 (\log d)^2 + 1.43 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.2: <math>k_{met} = -143.0 + 142.18 (\log d) - 44.509 (\log d)^2 + 4.6195 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.3: <math>k_{met} = -116.3 + 120.85 (\log d) - 39.944 (\log d)^2 + 4.378 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.5: <math>k_{met} = 60.3 - 64.07 (\log d) + 21.458 (\log d)^2 - 2.3784 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.6: <math>k_{met} = 82.3 - 90.98 (\log d) + 31.444 (\log d)^2 - 3.584 (\log d)^3</math></p>
<p>Figure 8: Meteorological Attenuation Curves - 4 kHz (Experimental Data not available for Category 1)</p> 	<p><b>4000 Hz</b></p> <p>Cat. Met.1: <math>k_{met} = -126 + 128 (\log d) - 40.4 (\log d)^2 + 4.24 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.2: <math>k_{met} = -125.4 + 124.74 (\log d) - 38.807 (\log d)^2 + 4.017 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.3: <math>k_{met} = -127.5 + 135.12 (\log d) - 45.709 (\log d)^2 + 5.1113 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.5: <math>k_{met} = 28.7 - 20.1 (\log d) + 2.68 (\log d)^2 + 0.0957 (\log d)^3</math></p> <p>Cat. Met.6: <math>k_{met} = 66.4 - 60.77 (\log d) + 16.409 (\log d)^2 - 1.4457 (\log d)^3</math></p>

**Tabla 6.2: Corrección por efectos meteorológicos.**

Fuente: Manning, C.J. 1981.

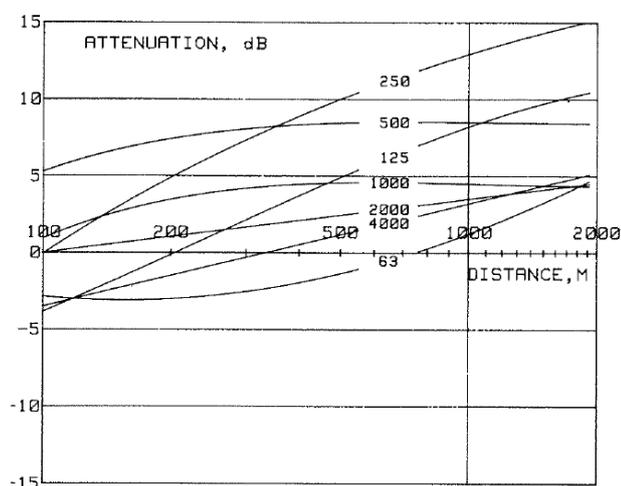
### Efectos del terreno ( $k_{gr}$ )

En lo que refiere a efectos del terreno sobre la propagación del sonido, las consideraciones son similares a las de la Norma ISO 9613-2. Al igual que en la Norma, se presentan dos casos: el primero se refiere a *suelo acústicamente duro* en que la corrección es simplemente **-3 dB** para todas las bandas de frecuencia y para todas las distancias, suponiendo radiación hemisférica desde la fuente; y un segundo caso para suelo con *impedancia acústica finita*, para el que se dan relaciones de atenuación empíricas en función de la distancia a la fuente y la frecuencia.

Se consideran las bandas de octava normalizadas centradas entre 63 Hz y 4000 Hz, y se presentan resultados tanto en forma gráfica como a través de ecuaciones sencillas. En cambio la absorción atmosférica está considerada en un rango mayor, entre 50 y 8000 Hz para las bandas de tercio de octava normalizadas.

La Figura 6.2, tomada del reporte 4/81, presenta las curvas de atenuación en función de la distancia a la fuente para las bandas de octava normalizadas con frecuencias centrales entre 63 Hz y 4000 Hz. Las ecuaciones que corresponden a dichas curvas anteriores se presentan en la Tabla 6.3.

El Reporte indica explícitamente que **no deben ser empleadas para distancias inferiores a 100 m entre fuente y receptor.**



**Figura 6.2. Curvas de atenuación del terreno (Categoría meteorológica 4)**  
Fuente: Manning, C.J. 1981.

Frecuencias (Hz)	$k_{gr}$
63	$33,4 - 35,04 (\log d) + 9,159 (\log d)^2 - 0,3508 (\log d)^3$
125	$8,96 - 35,8 (\log d) + 20,4 (\log d)^2 - 2,85 (\log d)^3$
250	$- 64,2 + 48,6 (\log d) - 9,53 (\log d)^2 + 0,634 (\log d)^3$
500	$- 74,9 + 82,23 (\log d) - 26,921 (\log d)^2 + 2,9258 (\log d)^3$
1000	$- 100,1 + 104,68 (\log d) - 34,693 (\log d)^2 + 3,8068 (\log d)^3$
2000	$- 7,0 + 3,5 (\log d)$
4000	$- 16,9 + 6,7 (\log d)$

**Tabla 6.3. Ecuaciones de las curvas de atenuación por efecto del suelo (no aplican si  $d < 100$  m).** Fuente: Manning, C.J. 1981.

### Efectos por altura de la fuente ( $k_{\text{height}}$ )

Esta corrección toma en cuenta que el efecto del terreno es diferente según sea la altura de la fuente o, más específicamente, el ángulo con que inciden (y se reflejan, en consecuencia) en el terreno las emisiones de una fuente de gran altura.

La altura de las fuentes elevadas que motivan esta corrección está comprendida entre 10 m y 20 m, en tanto la altura del receptor para el que se validó el método de cálculo es de 1,20 m.

La corrección por altura de la fuente se aplica a partir de una altura de 2 m, y está definida de la siguiente forma:

Si  $k_{\text{gr}} + k_{\text{met}} < -3$  dB, entonces  $k_{\text{height}} = 0$

Si  $k_{\text{gr}} + k_{\text{met}} > -3$  dB, entonces  $k_{\text{height}} = (k_{\text{gr}} + k_{\text{met}} + 3) (\gamma - 1)$  dB

y es función del ángulo de incidencia  $\psi$ , con

$$\psi = \arctg [(h_s + h_r)/d]$$

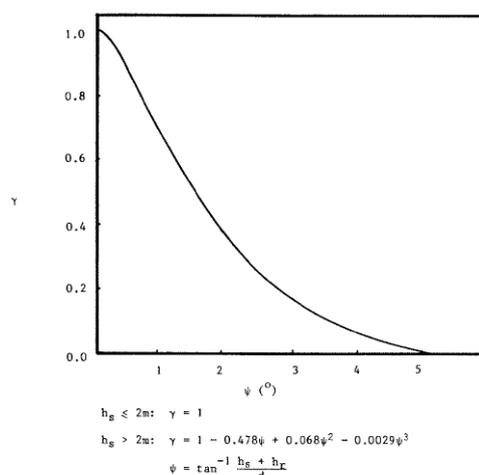
siendo:

$h_s$  altura de la fuente

$h_r$  altura del receptor

$d$  distancia entre ambos

Su valor se obtiene del gráfico de la Figura 6.3., tomado del Reporte 4/81.



**Figura 6.3. Curvas de corrección por efectos de altura de la fuente.**

Fuente: Manning, C.J. 1981.

CONCAWE advierte que cuando la propagación es a un receptor situado en una colina, o a través de un fondo del valle, el valor de  $k_{\text{height}}$  se debe reducir en más de 3 dB, para tomar en consideración los múltiples reflejos de la ladera. Este factor de corrección o atenuación por altura no es considerado en forma explícita en la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613-2.

### **Precisión del cálculo y simplificaciones que ensaya el modelo**

La validez del modelo de CONCAWE está dada para distancias a la fuente emisora de entre 100 m y 2000 m y para velocidades de viento de hasta 7 m/s (medido en los primeros metros de altura sobre el suelo).

El Reporte 4/81 explora la posibilidad de emplear modelos simplificados a partir del modelo general propuesto, y ensaya tres opciones:

#### **1. Considerar la corrección $k_{\text{met}}$ como independiente de la frecuencia**

El resultado obtenido fue sensiblemente más pobre que el del modelo original.

#### **2. Considerar la corrección $k_{\text{gr}}$ como independiente de la distancia**

En este caso, pudo verse que no ocurría mayor pérdida de precisión, por lo que la simplificación propuesta se consideró una opción válida.

<b>Constantes de atenuación por bandas de octava (simplificación 2 del modelo de CONCAWE)</b>							
<b>Categoría Meteorológica</b>	<b>Frecuencia central de las bandas de octava, Hz</b>						
	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
1	8,0	5,0	6,0	8,0	10,0	6,0	8,0
2	3,0	2,0	5,0	7,0	11,5	7,5	8,0
3	2,0	1,5	4,0	3,5	6,0	5,0	4,5
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-1,0	-2,0	-4,0	-4,0	-4,5	-3,0	-4,5
6	-2,0	-4,0	-5,0	-6,0	-5,0	-4,5	-7,0

**Tabla 6.4. Constantes de atenuación por bandas de octava (simplificación 2 del modelo de CONCAWE).** Fuente: Manning, C.J. 1981.

### 3. Considerar la corrección $k_{met}$ en función del viento sin tener en cuenta la estabilidad y temperatura

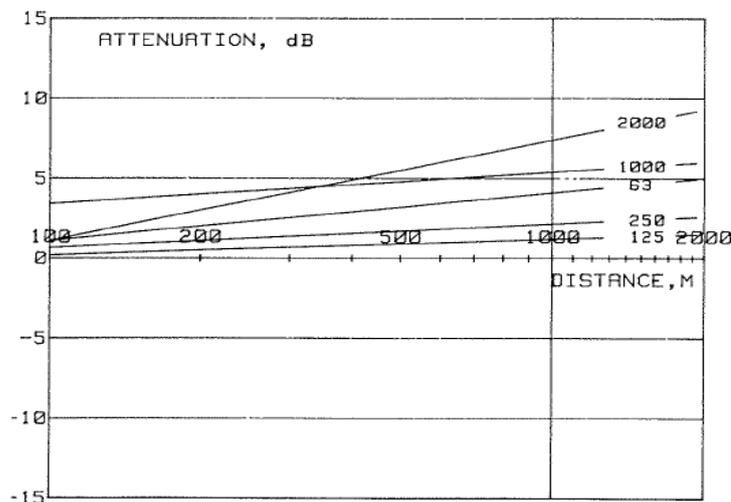
En el Reporte las curvas de atenuación meteorológicas incluyen una combinación de efectos del viento y de gradientes de temperatura. Por simplificación práctica se decidió investigar un modelo el cual sea función sólo del vector velocidad del viento.

En este caso, el Reporte menciona que, en apariencia, esta simplificación no conduce a una pérdida de precisión significativa. Se consideraron 3 situaciones:

- Categoría I: viento en contra ( $v < 1$  m/s)
- Categoría II: vientos casi nulos ( $-1$  m/s  $< v < 1$  m/s)
- Categoría III: viento a favor ( $v > 1$  m/s)

La Categoría II se toma como referencia, y la atenuación meteorológica  $k_{met}$ , a considerar en cada una de las otras dos categorías se toma de los gráficos que se reproducen en las Figuras 6.4 y 6.5 (tomadas del Reporte 4/81).

Figure 11: Vector Wind Model, Meteorological Category I, Wind Speed,  $< -1$  m/s



Note: The curve for the 250 Hz octave band is also valid for the 500 Hz octave band and the 2000 Hz curve is valid for the 4000 Hz octave band.

Figura 6.4. Curvas de atenuación meteorológicas a considerar en la categoría meteorológica I. Fuente: Manning, C.J. 1981.

Figure 12: Vector Wind Model, Meteorological Category III,  
Wind Speed, > 1m/s

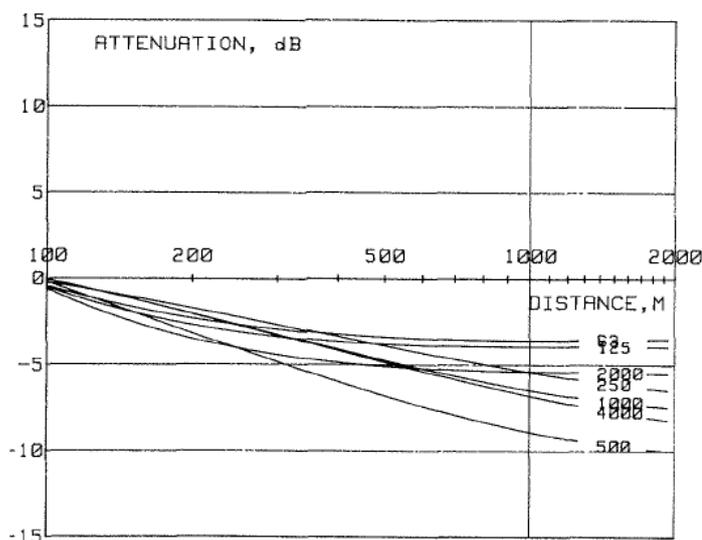


Figura 6.5. Curvas de atenuación meteorológicas a considerar en la categoría meteorológica III. Fuente: Manning, C.J. 1981.

### 6.3. NORMA ISO 9613-2

En el Anexo II de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental se indican los métodos avalados para la obtención de los indicadores  $L_{den}$  y  $L_{night}$  y en su numeral 2.2 dice:

*“Los métodos recomendados para los Estados miembros que no cuentan con métodos sancionados de cálculo o para los que quieran cambiar a otro método de cálculo son los siguientes: RUIDO INDUSTRIAL: ISO 9613-2: “Acoustics – Attenuation of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation” (...).”*

Es en esta línea, que para predecir los niveles sonoros en el entorno asociados con la operación de aerogeneradores, se suele emplear a nivel internacional la metodología de la Norma ISO 9613-2.

La norma considera las siguientes hipótesis para calcular los niveles de presión sonora:

- 1. Fuente puntual:** se considera al emisor como fuente puntual, y en esta línea la propagación del sonido desde la fuente sigue una ley de decaimiento cuadrático con la distancia.

- 2. Topografía del terreno:** El método de cálculo para determinar la absorción del terreno sólo es válido cuando el terreno es relativamente plano, ya sea horizontal o con una pendiente continua.
- 3. Estabilidad atmosférica:** El método de cálculo de la Norma corresponde a condiciones de atmósfera neutra, inestable o propagación por debajo de una capa de inversión térmica.
- 4. Velocidad del viento:** La velocidad del viento debe estar comprendida entre 1 m/s y 5 m/s medida a una altura de entre 3 m y 11 m sobre el nivel del suelo.

### Método de Cálculo del nivel de presión sonora

La Norma plantea el siguiente método de cálculo del nivel de presión sonora en bandas de octava, a partir de la emisión acústica de la fuente en bandas de octava normalizadas  $L_{wi}$ :

$$L_{pi, ST} = L_{wi} + D - A_i$$

Siendo:

$L_{pi, ST}$ : Nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .

$L_{wi}$ : Nivel de potencia sonora correspondiente a la banda de octava  $i$ .

D: Factor de corrección debido a la directividad de la fuente.

$A_i$ : Atenuación correspondiente a la banda de octava  $i$ .

### Características meteorológicas

Si se conocen las características meteorológicas del lugar en que se realiza la evaluación, el nivel  $L_{pi, ST}$  calculado precedentemente se puede corregir aplicando la ecuación que sigue para obtener un nivel de presión sonora  $L_{pi, LT}$  representativo de un período de tiempo prolongado. Éste se halla como:

$$L_{pi, LT} = L_{pi, ST} - C_{met}$$

Siendo:

$L_{pi, LT}$ : Nivel de presión sonora de largo plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .

$L_{pi,ST}$ : Nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .

$C_{met}$ : Corrección por las características meteorológicas medias del lugar (gradientes de temperatura atmosféricos, velocidad del viento, entre otros), pero que a su vez considera las alturas de fuente y receptor, y la distancia existente entre ambos.

### **Cálculo de la atenuación “A”**

La atenuación que utiliza en el cálculo la Norma ISO 9613 considera, como se presenta a continuación, las atenuaciones por divergencia geométrica, absorción atmosférica, atenuación debido a las características del suelo o a la existencia de apantallamientos, obstáculos y cortinas vegetales en la dirección de propagación considerada. También permite considerar posibles reflexiones del sonido durante su propagación y otros efectos misceláneos.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{barr} + A_{fol} + A_{site} + A_{hous}$$

Siendo:

$A_{div}$ : Divergencia geométrica, en dB

$A_{atm}$ : Absorción atmosférica, en dB/octava

$A_{gr}$ : Efecto del terreno, en dB/octava

$A_{barr}$ : Atenuación debida a la presencia de barreras, en dB/octava

$A_{fol}$ : Atenuación debida a la vegetación, en dB/octava

$A_{site}$ : Atenuación debida a la presencia de emplazamientos industriales, en dB/octava

$A_{hous}$ : Atenuación debida a la presencia de edificaciones, en dB/octava.

Debido a que en el caso de aerogeneradores de gran porte las atenuaciones  $A_{fol}$ ,  $A_{site}$ ,  $A_{hous}$  carecen de interés por ser usualmente instalados en zonas rurales, las mismas no son analizadas.

Aunque el método de cálculo detallado trabaja por bandas de octava normalizadas, la Norma indica que cuando la información disponible está dada por valores en escala A la metodología sigue siendo válida si se emplean para el cálculo los procedimientos simplificados, coeficientes y fórmulas correspondientes a la banda de 500 Hz.

Se detalla a continuación el método para calcular los términos de atenuación definidos por la norma y de aplicación al caso de aerogeneradores.

## **Cálculo de los términos de atenuación**

### **1. Divergencia Geométrica**

Se adopta una ley de decaimiento cuadrático para fuente puntual, omnidireccional, es decir, se trata de propagación esférica en campo libre:

$$A_{div} = 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 11 \text{ dB}$$

Siendo:

$d$  es la distancia desde la fuente al receptor en metros,

$d_0$  es la distancia de referencia (1 m).

La constante en la ecuación relaciona el nivel de presión sonora con el nivel de presión sonora a una distancia de referencia  $d_0$  de una fuente de sonido puntual omnidireccional.

### **2. Absorción Atmosférica**

La atenuación debido a la absorción atmosférica (en decibelios) durante la propagación a través de la distancia que el sonido recorre en el aire se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$A_{atm} = \alpha d / 1000$$

Donde:

$d$  es la distancia en metros,

$\alpha$  es el coeficiente de atenuación atmosférica, se expresa en dB/km en cada banda de octava. Este coeficiente depende fuertemente de la frecuencia del sonido, de la temperatura ambiente y de la humedad relativa del aire (ver Tabla 6.5) y débilmente de la presión ambiente.

El factor de atenuación de acuerdo se hace referencia en la ISO, no debe ser mayor de 15 dB para cada banda de octava.

Temp. (°C)	Hum. Relativa (%)	Atmospheric attenuation coefficient $\alpha$ dB/km							
		Nominal midband frequency, Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

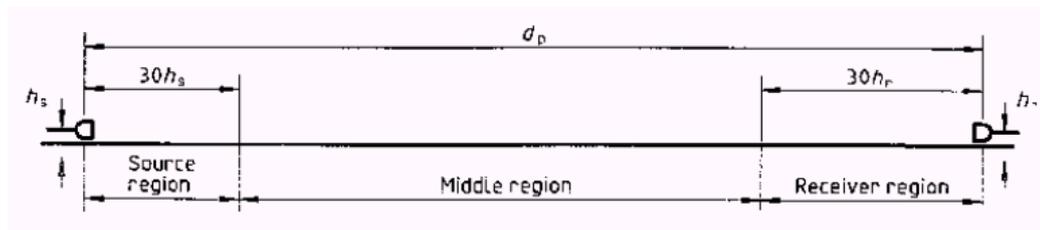
**Tabla 6.5. Coeficiente de atenuación atmosférica, en dB/km, en cada banda de octava.** Fuente: Norma ISO 9613-2

### 3. Absorción del Terreno

La absorción por parte del terreno se relaciona principalmente con su porosidad y con el tipo de cobertura que posee en el tramo que separa emisor y receptor, aspectos ambos que no tienen por qué ser idénticos a lo largo de una línea de propagación.

Para la determinación de esta atenuación, la *Norma ISO 9613-2* propone métodos distintos según se trate de distancias cortas (inferiores a 100 metros) o de largas distancias (superiores a 100 metros). Considerando este último caso como el más general, la atenuación finalmente conseguida se considera igual a la suma de las atenuaciones correspondientes a tres zonas: zona próxima a la fuente (f), zona próxima al receptor (r) y zona intermedia (m). A su vez, la extensión de estas zonas depende de las alturas de la fuente ( $h_f$ ) y del receptor ( $h_r$ ): las denominadas “zona próxima a la fuente” y “zona próxima al receptor” se extienden distancias iguales a 30 veces sus alturas respectivas (ver figura). La atenuación total se calculará sumando las atenuaciones producidas en las tres zonas citadas:

$$A_{ground} = A_f + A_m + A_r$$



**Figura 6.6. Regiones para determinar la absorción del terreno.**

Fuente: Norma ISO 9613-2

Es importante tener en consideración que esta corrección se aplica para terreno plano.

#### **4. Atenuación por presencia de apantallamientos**

En lo referente a la atenuación por la presencia de pantallas, según la Norma se consideran las atenuaciones por presencia de apantallamientos cuando su dimensión en la dirección perpendicular a la línea que une en planta al emisor y el receptor es mayor que la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de interés. Como en el caso de aerogeneradores las frecuencias de mayor interés son las bajas, esa dimensión debería ser de por lo menos 1,70 m para ser considerada como elemento capaz de proteger en algo al receptor de las ondas de 200 Hz, pero de por lo menos 5,40 m para ser efectiva para la frecuencia de 63 Hz. A su vez, la altura de la pantalla deberá ser dimensionada atendiendo las alturas relativas de emisor y receptor, la distancia que los separa y los fenómenos de difracción en el coronamiento. En cualquier caso, y más allá de que la altura debe calcularse, será siempre (a menos de casos particulares en cuanto a topografía) superior a la del receptor de interés.

#### **Precisión del cálculo**

La norma especifica que el error en el cálculo es de  $\pm 3$  dB si la altura promedio entre emisor y receptor no supera los 5 m (independientemente de la distancia que los separa, con un máximo de 1000 m), pero baja a  $\pm 1$  dB si la altura promedio de ellos está entre 5 m y 30 m y la distancia entre ambos no supera los 100 m. Asimismo **el error se presenta para distancias entre emisor y receptor que no superan los 1000 m**, lo que está no sólo tabulado sino enunciado explícitamente (Tabla 6.6).

Adicionalmente, se puede notar en otros gráficos de la Norma que por encima de los 1000 m en general las curvas aparecen con trazo cortado,

indicando que los gráficos deben entenderse más bien como una tendencia.

Height, $h$ <sup>*)</sup>	Distance, $d$ <sup>*)</sup>	
	$0 < d < 100$ m	$100$ m $< d < 1\,000$ m
$0 < h < 5$ m	$\pm 3$ dB	$\pm 3$ dB
$5$ m $< h < 30$ m	$\pm 1$ dB	$\pm 3$ dB
<sup>*)</sup> $h$ is the mean height of the source and receiver. $d$ is the distance between the source and receiver.		
NOTE — These estimates have been made from situations where there are no effects due to reflection or attenuation due to screening.		

**Tabla 6.6. Precisión estimada del cálculo del ruido de banda ancha.** Fuente: Norma ISO 9613 – 2.

Con la información disponible, no es posible estimar el error que se obtendría de la aplicación de este método de cálculo si la fuente tiene una altura de 90 m ya que, aún si el receptor tuviera altura nula (0 m), el promedio superaría ampliamente los 30 m.

#### 6.4. OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO DE USO CORRIENTE A NIVEL INTERNACIONAL

Para el cálculo de los niveles sonoros, existe a nivel internacional distintos modelos de cálculo que están relacionados con las exigencias de los distintos países o regiones, y la aplicabilidad y requerimientos de la zona del emplazamiento. En este sentido cabe mencionar que en cuanto al método de cálculo general de la Norma ISO 9613-2, tanto Alemania como el Reino Unido han establecidos opciones de ajuste al método de cálculo a los valores usuales de estos países. Dichas normas se denominan: Norma ISO 9613-2 Alemania, e ISO 9613-2 Reino Unido. Asimismo, se cuenta a nivel internacional con otras normativas antiguas para el cálculo de los niveles sonoros como son: la Normativa Danesa (1991), la Normativas Suecas (1992, 2002), y la Normativa Holandesa (1999).

Dentro de las normativas internacionales existentes de reciente aparición se menciona y detalla a continuación la Norma Australiana AU 4959-2010, la Norma Neocelandesa NZS 9808:2010 y el modelo Nord2000, siendo este último uno de los mejores modelos de propagación sonora disponibles en la actualidad.

### 6.4.1. Norma AU 4959-2010

#### Método de Cálculo

A los efectos de la medición, predicción y evaluación de los niveles sonoros en el entorno, en Australia se cuenta con una normativa y estándar bastante actualizado del año 2010: Norma AU 4959-2010.

En su capítulo 5 se describe la metodología de cálculo. Se menciona que es posible el análisis para intervalos de 1 m/s entre la velocidad mínima a la que el aerogenerador genera energía utilizable y la máxima velocidad del viento correspondiente a los niveles de potencia sonora publicados por el fabricante.

La ecuación general aplicada es:

$$L_R = L_w - 10 \log (2 \pi r^2) - \Delta L_a$$

Siendo:

$L_R$ : Nivel de presión sonora generado por un aerogenerador, a una distancia  $r$  en metros y a una altura de 1,2 a 1,5 m sobre el nivel del terreno.

$L_w$ : Nivel de potencia sonora emitida por el aerogenerador en dBA, referenciado a la altura de buje, en componente espectral. Estos niveles deben pertenecer a un rango de velocidades de viento entre la velocidad mínima de generación de energía (velocidad de arranque) y la velocidad de viento que corresponde a un 95 % de la potencia nominal del aerogenerador.

$r$ : Distancia entre la fuente y el receptor, en metros.

$\Delta L_a$ : *Efecto de la absorción del aire.*  $\Delta L_a = \alpha_a R$  siendo  $\alpha_a$  un coeficiente de atenuación por absorción del aire en dB/m.

Se indica un valor razonable de aplicación de 0,003 dBA/m (o 3 dBA/km, independiente del espectro de frecuencias) aplicado al total de la potencia sonora para distancias menores a 500 m. Para distancias mayores se debe incorporar valores de absorción por banda, correspondientes a los presentados en la ISO 9613-2.

Sólo a mero título informativo, se hace notar que la Norma ISO 9613-2 no presenta en ningún caso atenuaciones que alcancen a 3 dB/km en frecuencias de 125 Hz o menos. Apenas en algunas

condiciones especiales se supera una atenuación de 1 dB/km en la banda centrada en 125 Hz, pero nunca alcanza a 1 dB/km ni en 31,5 Hz ni en 63 Hz.

Es importante notar que para el cálculo de la *atenuación por divergencia geométrica* se considera a una fuente que se propaga *en un semiespacio* y no en el espacio abierto como considera la Norma ISO 9613-2.

### **Algunas Precisiones que realiza la Norma**

La norma indica que su modelo es conservador ya que tiende a sobreestimar los niveles en los receptores. La norma incluye algunos modelos de predicción más complejos, donde se plantea que se pueden observar aproximaciones más detalladas al cálculo de las absorciones del aire por bandas y reducir lo conservador del abordaje propuesto.

Indica que todos los análisis se deben realizar teniendo en consideración la velocidad del viento a la altura de buje.

Finalmente, en su anexo B, la norma australiana propone la siguiente ecuación para trasladar la velocidad del viento a 10 m a la velocidad a la altura de buje:

$$v_{\text{buj e}} = v_{10 \text{ m}} \left( \frac{H_{10}}{H_{\text{buj e}}} \right)^{\text{coef}}$$

Siendo

$v_{\text{ buje}}$ : velocidad del viento a la altura del buje (m/s)

$v_{10\text{m}}$ : velocidad del viento a 10 m de altura sobre el terreno (m/s)

$H_{10\text{m}}$ : 10 m

$H_{\text{ buje}}$ : altura de buje (m)

coef: exponente proporcionado por el fabricante para la localización a estudiar; el cual depende de las características del punto de instalación del aerogenerador y de su meteorología, dado que es el que rige la ley de distribución en alturas de la velocidad del viento.

## 6.4.2. Norma NZS 9808:2010

### Método de cálculo

Pese a ser bastante actual, esta norma neocelandesa parte de la base de que no se cuenta con un método de propagación directamente aplicable al ruido de aerogeneradores y, en consecuencia, plantea el uso de la metodología de la Norma ISO 9613-2, con ciertas consideraciones particulares.

Indica que los niveles de potencia sonora utilizados para predecir los niveles en inmisión deben ser proporcionados por los fabricantes. Normalmente los niveles de potencia de los fabricantes deben considerar el rango de velocidades a nivel de buje entre un valor mínimo de funcionamiento y el 95 % de la potencia nominal.

Menciona a su vez que la corrección de velocidad del viento a 10 m de altura para obtener la velocidad a la altura de buje debe realizarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$v_{\text{buj e}} = v_{10 \text{ m}} * \text{Ln} \left( \frac{H}{0,05} \right) * 0,1887$$

Siendo

$v_{\text{buj e}}$ : velocidad del viento a la altura del buje (m/s)

$v_{10\text{m}}$ : velocidad del viento a 10 m de altura sobre el terreno (m/s)

$H_{\text{buj e}}$ : altura de buje (m)

Esta expresión responde a la aplicación de un perfil de velocidad del viento logarítmico en la altura, con un valor de rugosidad del terreno de 0,05 m:

$$v_{\text{buj e}} = v_{10 \text{ m}} \left[ \frac{\text{Ln} \left( \frac{H}{0,05} \right)}{\text{Ln} \left( \frac{10}{0,05} \right)} \right]$$

En el Anexo C de la Norma se presenta un ejemplo del método de propagación utilizado que, al igual que la ISO, parte de la emisión acústica de la fuente en bandas de octava normalizadas  $L_{wi}$ :

$$L_{pi, ST} = L_{wi} + D - A_i$$

Siendo:

$L_{pi,ST}$ : Nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .

$L_{wi}$ : Nivel de potencia sonora correspondiente a la banda de octava  $i$ .

D: Factor de corrección debido a la directividad de la fuente.

$A_i$ : Atenuación correspondiente a la banda de octava  $i$ .

### Factores de atenuación

La Norma presenta las siguientes consideraciones sobre los factores de atenuación:

- Divergencia geométrica:  $A_{div} = 20 \log(d) + 11$

Siendo:  $d$  la distancia en metros al receptor.

- Atenuación atmosférica:  $A_{atm} = \alpha * d/1000$

Siendo:

$\alpha$ : coeficiente de absorción del aire dado en una tabla de la norma, pero que también se puede tomar de la norma ISO 9613-2. Por defecto, las condiciones a considerar son temperatura de 10 ° C y humedad relativa 70 %.

$d$ : distancia en metros al receptor

- Para los demás coeficientes de atenuación ( $A_{gr}$ ,  $A_{barr}$ ,  $A_{fol}$ ,  $A_{site}$ ,  $A_{hous}$ ), la Norma indica que deben considerarse los valores dados por la Norma ISO 9613-2.
- En el caso de  $A_{gr}$ , plantea que por defecto se puede asignar un valor de 0,5.
- Para considerar el posible efecto de barreras y definir el valor de  $A_{barr}$ , la Norma advierte que se debe testear la localización de la fuente a la máxima altura de pala.

### Método de cálculo simplificado

La Norma plantea también, en su sección D2, un método de cálculo simplificado. En él se realizan las siguientes consideraciones:

- El terreno entre la fuente y el receptor es de pendiente constante y no existen barreras.

- No existen edificios significativos o follaje de importancia en la zona de propagación o entre los aerogeneradores.
- El terreno entre los aerogeneradores y el receptor es poroso y no compactado.
- El espectro de emisión del aerogenerador no se encuentra dominado por tonos.

Bajo estas circunstancias, se sigue la metodología anterior con las siguientes salvedades:

- Las siguientes correcciones *no se consideran (o toman valor nulo)*:

$$A_{\text{barr}}, A_{\text{fol}}, A_{\text{site}}, A_{\text{hous}}$$

- $A_{\text{gr}} = 4,8 - (2 * h_m / d) * (17 + 300/d)$

Siendo:

$h_m$ : altura media entre emisor y receptor

$d$ : distancia en metros al receptor

Si el valor resultante de esta ecuación fuera menor que 0, se debe tomar 0.

Se plantea también que en la estimación de  $A_{\text{gr}}$ , la corrección de directividad  $D_{\text{cf}}$  debe ser 3,0 dB para tomar en cuenta la reflexión del suelo cerca de la fuente.

La Norma advierte asimismo que, si existe algún apantallamiento, este método de cálculo sobreestimarán los niveles sonoros en los receptores.

#### **6.4.3. *NORD2000 (Modelo nórdico)***

##### **Origen**

Nord2000 es un modelo desarrollado por DELTA (2002), *Acoustics & Vibration, SINTEF, Telecom and Informatics y el Swedish National Testing and Research Institute Acoustics*, a solicitud del Nordic Noise Group. Ha sido validado, por DELTA, sobre la base de comparación de los resultados de mediciones con los resultados de cálculo.

A nivel internacional se considera uno de los mejores modelos de propagación sonora disponibles en la actualidad.

El modelo Nord2000 es un producto surgido a partir del proyecto sobre "*Ruido de baja frecuencia de aerogeneradores de gran porte*", que se inició con la idea de conocer si las modernas turbinas eólicas de gran porte podrían generar un mayor impacto que las más pequeñas en lo relativo a emisiones acústicas en bajas frecuencias (LFN, low frequency noise).

Si bien las emisiones sonoras de las turbinas eólicas se incrementan con la potencia nominal de las turbinas, las emisiones por kW de potencia generada son menores para las turbinas más modernas.

Aunque la emisión en bajas frecuencias de los grandes aerogeneradores, ponderada en escala A ( $L_{WA,LF}$ ), es ligeramente superior a la de las turbinas eólicas más pequeñas, el impacto del ruido de baja frecuencia en las viviendas próximas no sólo depende del tamaño de las turbinas. Por ejemplo, se encontró que la inestabilidad del flujo detrás de la torre cuando el rotor se encuentra ubicado en la dirección del viento contribuía significativamente con el nivel de presión sonora total en hasta 20 dB en LFN.

Las diferencias observadas entre la emisión de ruido de turbinas eólicas pequeñas y grandes (en cuanto a tamaño y potencia), tanto en lo relativo a ruido total como a emisión de ruido de baja frecuencia, son mucho menores que las diferencias existentes entre distintas marcas, modelos y configuraciones de aerogeneradores.

El ruido en ambientes exteriores se considera dominado por el ruido en el rango de frecuencias entre 200 Hz y 2000 Hz tanto para turbinas eólicas pequeñas como grandes, por lo que la eventual molestia no está asociada con ruido de baja frecuencia. Estudios realizados por la Universidad de Salford (citado en DELTA, 2010) mostraron que, para la misma intensidad, los tonos de baja frecuencia no son percibidos como más molestos que los tonos de frecuencias más altas.

El nivel de ruido de baja frecuencia en interiores ( $L_{pA,LF}$ , que es el parámetro más relevante para la evaluación de impacto del ruido de baja frecuencia en interiores) se incrementa en alrededor de 1 dB para las turbinas eólicas de gran tamaño en comparación con los aerogeneradores pequeños. Si es esperable que los niveles sonoros en el exterior estén próximos a los máximos niveles admisibles, entonces es recomendable verificar también cuál será el impacto en los niveles de ruido en interiores, especialmente en las bajas frecuencias.

## **Modelo predictivo**

El modelo Nord2000 se desarrolló en el período 1996-2000, con una primera versión en 2001 (DELTA, 2002) la cual fue revisada en el 2006. Se considera uno de los nuevos modelos europeos de predicción de ruido.

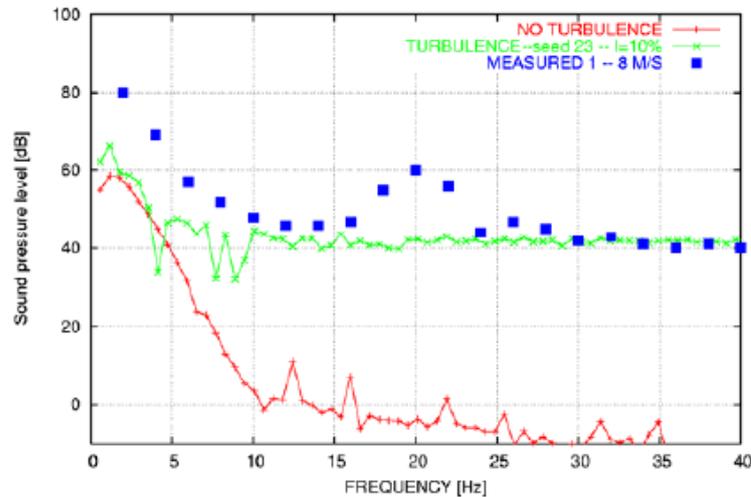
El modelo se basa en la teoría geométrica de los rayos y la teoría de la difracción e incorpora los cálculos en bandas de tercios de octava. Segmenta los terrenos no llanos en un número determinado de segmentos en línea recta. Por otro lado, el efecto de la dispersión por objetos tales como las zonas de viviendas o los bosques pueden ser incluidos. En referencia al efecto del suelo, éste se caracteriza por su impedancia y rugosidad.

## **Comparación con valores medidos**

Al aplicar el modelo de cálculo, se identificó una serie de parámetros del diseño de la turbina -y otros parámetros no relacionados con la turbina-, que inciden en las emisiones de LFN. Entre los parámetros más importantes se puede mencionar: la velocidad del rotor, la configuración ya sea viento arriba o viento abajo, la inestabilidad/turbulencia del flujo incidente.

Además, se han calculado las características de directividad de LFN, así como la reducción de ruido en función de la distancia a la turbina. En general, para el rotor ubicado contra el viento, en la configuración estándar, los niveles calculados de LFN son bajos.

Se realizaron mediciones y simulaciones a diferentes distancias de una turbina Siemens de 3,6 MW. Para el caso de 8 m/s, se compararon los niveles sonoros medidos y simulados. Si no se considera la influencia de la turbulencia atmosférica, las diferencias entre los niveles de presión sonora medidos y calculados son mayores, como se muestra en la Figura 6.7. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los valores medidos no están corregidos por el ruido de fondo y esto podría explicar parte de las discrepancias. Otro motivo de los apartamientos obtenidos tiene que ver con cómo el ruido de banda ancha (en este caso principalmente el ruido del flujo turbulento incidente) aumenta los niveles sonoros, también en las bajas frecuencias.



**Figura 6.7. Comparación de niveles de presión sonora medidos y calculados a una distancia de 145 m en la dirección del viento.** Fuente: Aagaard, H. 2008.

En el presente caso, además de corregir las mediciones por el contenido de ruido de banda ancha, fue a su vez probada la simulación aerodinámica con la turbulencia en el flujo de entrada. Cuando se incluye la turbulencia en el flujo de entrada (en el presente caso, la intensidad de la turbulencia es del 10 %, curva verde en la figura 6.7) se obtiene un buen ajuste entre los valores calculados y medidos.

De lo dicho, resulta que la interacción pala - torre sólo contribuye al nivel de LFN para frecuencias por debajo de 10 Hz a 15 Hz. Para frecuencias mayores, el ruido de baja frecuencia se debe más a la interacción de las palas con las heterogeneidades en el flujo de entrada, como la turbulencia.

La perturbación que se manifiesta en el gráfico alrededor de 20 Hz podría ser debida a una frecuencia discreta del tren de tracción. Por debajo de 10 Hz el ruido de fondo domina las mediciones.

### **Características del Modelo de Propagación**

Los modelos de propagación deben predecir el nivel de presión sonora generado por una fuente puntual en un cierto receptor, en bandas de tercio de octava entre 25 Hz y 10.000 Hz, a partir de la potencia acústica de la fuente, expresada también en bandas de tercio de octava. A su vez, deben poder predecir los niveles sonoros en una variedad de condiciones

climáticas, equilibrando la precisión y la eficiencia de tiempo de cálculo de acuerdo con la tecnología informática actual.

Los nuevos métodos de predicción de los países nórdicos permiten el cálculo para condiciones climáticas específicas, incluidos los *movimientos turbulentos de la atmósfera*.

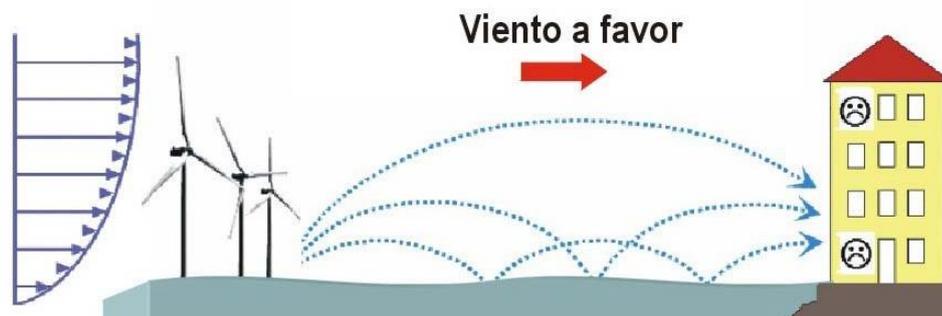
En el caso de suelo no plano y no homogéneo, apantallamientos múltiples y propagación en un ambiente heterogéneo con gradiente vertical de velocidad de sonido, se han introducido modificaciones semi-analíticas heurísticas para obtener un modelo general.

Parámetros meteorológicos como el viento y el gradiente de temperatura se utilizan para aproximar el perfil vertical de velocidades del sonido. La velocidad eficaz del sonido es la suma de la velocidad de los sonidos y el componente de la velocidad del viento en la dirección de propagación.

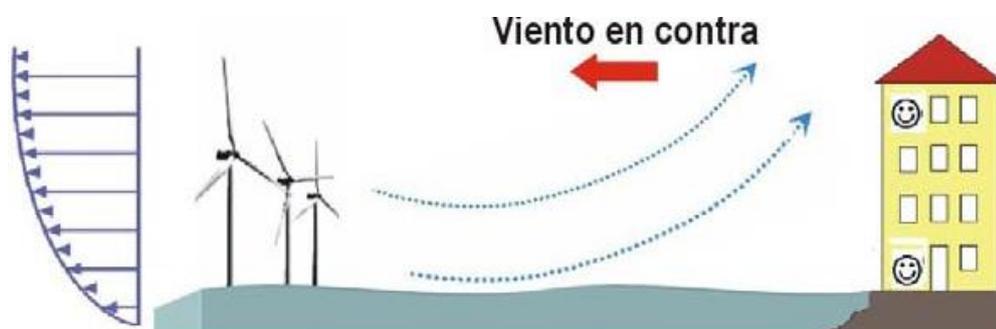
Si la velocidad del sonido varía según la altura (el gradiente vertical de la velocidad del sonido es diferente de 0), se produce **refracción atmosférica**. La refracción es el efecto por el que una onda sonora se desvía (“se curva”) hacia regiones donde la velocidad del sonido es menor.

En la dirección en que sopla el viento, la velocidad del sonido aumenta con la altura, por lo que las ondas sonoras se “curvan” hacia la tierra. Lo mismo ocurre si la temperatura aumenta con la altura (condición de inversión térmica, gradiente de temperatura positivo) lo que frecuentemente ocurre en la noche (Figura 6.8). Pero en dirección viento en contra, o si la temperatura disminuye con la altitud (gradiente de temperatura negativo), el sonido tiende a sufrir una refracción que lo aleja de la tierra, “curvando” los rayos hacia arriba (Figura 6.9).

Entonces, viento abajo se tendrá la condición más desfavorable porque los rayos se curvan hacia la tierra, en tanto viento arriba se tendrá la condición más deseable, dado que los rayos se curvan hacia arriba.



**Figura 6.8. Esquema de propagación de las ondas sonoras con viento a favor.** Fuente. Cueto Ancela, et al. 2006.



**Figura 6.9. Esquema de propagación de las ondas sonoras con viento en contra.** Fuente: Cueto Ancela, et al. 2006.

En Nord2000, la refracción se modela mediante el uso de rayos curvados. La curvatura de los rayos depende del perfil de sonido y la velocidad vertical se determina utilizando un método semi-analítico. En este enfoque, se asume que la velocidad del sonido varía linealmente con la altura por encima del suelo, en cuyo caso los rayos se consideran como arcos circulares, lo que conduce a ecuaciones bastante simples. Al promediar en tiempos cortos, los efectos de correlación basados en variaciones a corto plazo de datos meteorológicos se incluyen en los parámetros y condiciones de resistencia en la turbulencia.

La absorción del aire se obtiene de acuerdo a la norma ISO 9613-2.

En zonas donde la propagación del sonido es demasiado compleja para un modelo determinista, ha sido necesario utilizar un modelo de dispersión estadística. Un modelo de estas características no puede predecir exactamente el nivel de presión sonora en un cierto punto, sino más bien el nivel de presión sonora promedio a una determinada distancia de la fuente. Por lo tanto, el cono de sombra del sonido detrás de un

objeto y el aumento del nivel sonoro en frente del objeto no se toma en cuenta.

Se supone que este modelo de propagación es aplicable para todo tipo de fuentes. Aunque sólo se han desarrollado módulos para tránsito rodado y ferroviario, es esperable que, si se tiene una correcta descripción de las fuentes de emisión en su origen, resulte de aplicación para el cálculo de niveles de inmisión sonora asociados con ruido proveniente de aerogeneradores o de plantas industriales.

### **Modelo Nord2000 y Modelo Europeo Harmonoise (DELTA, 2010)**

El modelo Nord2000 y el modelo europeo Harmonoise son ambos modelos semi-analíticos de rayos, aunque el primero utiliza rayos circulares mientras que el segundo se basa en la analogía de la curvatura de la Tierra en el sitio. La curvatura de la Tierra, por su parte, se basa en círculos que se asumen también como perfiles lineales de velocidad de sonido. Se espera que la exactitud de los dos métodos sea casi igual también en la gama de baja frecuencia.

### **Recomendaciones Internacionales**

A nivel internacional, se recomienda por parte de expertos de la Unión Europea, usar el método Nord2000 para la predicción de la propagación al aire libre del sonido generado por turbinas eólicas. Sin embargo de momento no hay pronunciamiento internacional en Directivas que lo recojan. El método es rápido en comparación con el modelo de ecuación de onda y el software está disponible.

Dado que la mayor cantidad de problemas con ruido de aerogeneradores se asocia con sus elevadas emisiones en frecuencias bajas y muy bajas, como Nord2000 trabaja en el intervalo de frecuencias de 25 Hz a 10.000 Hz deberá ser objeto de revisión para dar mayor tranquilidad en cuanto a sus resultados.

## **6.5. SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS**

Existen programas que predicen niveles sonoros ambientales y que, de acuerdo con sus autores o propietarios de la licencia, son aplicables para calcular los niveles sonoros ambientales esperables ante la instalación de un parque eólico.

Si bien el esquema de cálculo suele ser el de la Norma ISO 9613-2, que es un método explícito y que no requiere de cálculos complejos, muchas veces se prefiere el uso de esos programas debido a sus salidas gráficas.

En los últimos años se ha demostrado que este método de cálculo presenta falencias para el caso de emisiones sonoras de aerogeneradores de gran porte. Asimismo, las salidas gráficas que expresan resultados a través de curvas de igual nivel sonoro muchas veces trazan estas curvas interpolando en casos o por métodos que no siempre son los más aplicables a la propagación de ondas sonoras.

En la Tabla 6.7. se sintetizan las principales características de cada uno de los programas mencionados.

	Open Wind	Wind Farm	WindPro	ExSound2000
<b>Tipo de software</b>	Libre (Demo)  Comercial (software completo)	Libre (Demo)  Comercial (software completo)	Comercial	Comercial
<b>Desarrollador</b>	AWS Truewind, USA	ReSoft Ltd., (Reino Unido)	EMD International A/S, Dinamarca	DELTA (Dinamarca), SINTEF (Noruega), SP (Suecia)
<b>Módulos</b>	Cálculo de flujo de viento  Optimización de costos de la energía  Ruido  Sombras	Diseño y utilidades  Rendimiento energético y optimización  Rendimiento energético de múltiples aerogeneradores  Análisis de viento  Cálculo de ruido  Visualización	Base (incluye catálogos actualizados)  Energía  Red eléctrica y planificación  Economía  Ambiente (incluye ruido)  Visualización	Predicción de niveles sonoros
<b>Método de cálculo</b>	ISO 9613-2	ISO 9613-2  Normativa Danesa	DIN ISO 9613-2  ISO 9613-2 Alemana  ISO 9613-2 Reino Unido  Normativa alemana  Normativa Danesa  Normativas Suecas  Normativa Holandesa  Nord2000	Nord2000
<b>Datos de entrada (la elección del)</b>	Ubicación de los aerogeneradores	Ubicación de los aerogeneradores  Modelo de los	Ubicación de los aerogeneradores  Potencia sonora en	Ubicación de los aerogeneradores  Potencia sonora en

<b>método determina los input requeridos)</b>	Potencia sonora en BO	aerogeneradores	BO	BTO
	Altura del receptor	Zonas donde se evaluará el nivel sonoro	Altura del receptor	Ubicación receptor
	Humedad relativa	Velocidad (o intervalo de velocidades) del viento a 10 m de altura	Humedad relativa	Altura del receptor
	Temperatura	Método de cálculo (cada uno pide cierta información)	Temperatura	Humedad relativa
	Atenuación del suelo G [0, 1]		Atenuación del suelo G [0, 1] próximo a fuente, próximo a receptor y entre medio de ambos (permite calcular sin considerar G)	Temperatura a nivel del suelo
			Modelo de cálculo	Gradiente de temperatura
				Desviación estándar del gradiente de temperatura
				Rugosidad del suelo
				Dirección del viento
				Desviación estándar de la velocidad del viento
				Altura de medición de la velocidad del viento
				Turbulencia por viento
				Turbulencia por temperatura

**Tabla 6.7. Cuadro comparativo de algunos programas de uso corriente**

## **7. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS DEL TRABAJO, JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN**

### **7.1. G.P. VAN DEN BERG**

El Dr. Godefridus (Frits) van den Berg es uno de los expertos europeos líder en el tema ruido generado por las turbinas eólicas.

El inicio de sus trabajos se relaciona con un conflicto en la frontera entre Holanda y Alemania, a causa de los niveles sonoros registrados en inmisión una vez instalado un parque eólico que se esperaba no generara ningún inconveniente en ese sentido.

Su Tesis Doctoral, dada a conocer en 2006 generó una conmoción en el ambiente técnico y científico, al mostrar las importantes subestimaciones en que se podía incurrir al aplicar la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613-2 en ciertas condiciones meteorológicas.

El estudio se basa en medidas realizadas en el Parque Eólico de Rhede, ubicado al Noroeste de Alemania, próximo a la frontera con Holanda. Este parque, de 30 MW de potencia, está constituido por 17 aerogeneradores de 1,8 MW, 98 m de altura de buje y 3 palas de 35 m de largo cada una. La velocidad de giro de estos aerogeneradores es variable: de 10 rpm con velocidades de viento de 2,5 m/s a 22 rpm con velocidades de 12 m/s o mayores (las velocidades del viento están referidas a la altura de buje). Cerca del parque eólico se encuentra una serie de viviendas rurales rodeadas de árboles y campos dedicados a la agricultura. La vivienda más próxima se encuentra a 500 m hacia el Oeste del aerogenerador más cercano.

Los estudios ambientales previos mostraban un nivel sonoro de inmisión esperado de 43 dBA, valor 2 dBA por debajo del límite establecido en la normativa alemana. Sin embargo, una vez que el parque comenzó a operar, los vecinos más cercanos manifestaron fuertes quejas por el ruido, fundamentalmente durante el anochecer y entrada la noche. Incluso vecinos que se encontraban a distancias mayores a 1.900 m manifestaban molestia por el ruido generado.

A partir de esta situación, para evaluar el nivel sonoro de inmisión real, se realizaron mediciones en horario nocturno, en dos puntos ubicados a 400 m y 1.500 m del parque eólico respectivamente. Como resultado se obtuvo que los niveles sonoros de inmisión resultaron ser superiores a los esperados durante la mayor parte del tiempo. Al analizar las velocidades de viento más frecuentes durante la noche (3 y 4 m/s a 10 m de altura),

los niveles sonoros se elevaban unos 15 dB a 18 dB por encima de lo esperado.

De ellos, 3 dB son atribuibles a limitaciones en el modelo de propagación utilizado, pero los otros 15 dB se deben a la subestimación de la velocidad del viento a la altura de la turbina.

En la evaluación previa se había utilizado una relación fija entre la velocidad del viento a la altura de referencia (10 m) y la velocidad del viento a la altura de buje (98 m), pero los resultados de las mediciones mostraron que la velocidad del viento a la altura de buje en la noche era **2,6 veces superior a la estimada**, con respecto a la misma velocidad del viento durante el día. Esto aumentaba la velocidad de giro del aerogenerador y, consecuentemente, el nivel de ruido. Además, a altas velocidades de giro, el aerogenerador produce un sonido de rápido golpeteo, que aumenta aún más la molestia causada.

Los estudios realizados tenían por objeto investigar la percepción de los parques eólicos por los residentes viviendo en las proximidades de estas instalaciones. En los mismos se menciona que tres de cada cuatro participantes manifestaron que los silbidos que emiten las aspas es una descripción correcta del ruido generado por las turbinas eólicas. Quizás el carácter del sonido es la causa del relativamente alto nivel de molestia. Otra mención que realizan es que el ruido nocturno es más elevado y no disminuye como sucede con la mayoría de otras fuentes de ruido que son menos pronunciadas durante la noche.

### **7.1.1. Hipótesis**

Las principales hipótesis de las que parte el autor son:

1. La estabilidad atmosférica, que ocurre mayormente durante la noche, causa mayores velocidades del viento a la altura de buje (debido a la menor mezcla existente en estos tipos de flujos) que las que se calculan suponiendo un estado neutro y un perfil logarítmico sin factores de corrección. En consecuencia, los niveles en inmisión en los receptores considerados son mayores que los esperados.
2. El sonido impulsivo se puede percibir en condiciones estables, debido al menor ruido de fondo vinculado a menores velocidades del viento a nivel del suelo. En noches calmas, el ruido del parque eólico se puede oír a grandes distancias (varios kilómetros) cuando las palas de los aerogeneradores giran a gran velocidad.

La primera conclusión a partir de los resultados obtenidos es que considerar en el modelo un perfil logarítmico (correspondiente a atmósfera neutra) no representa el perfil del viento en la noche. En particular, para

turbinas altas, implica una subestimación significativa de los niveles sonoros en inmisión. Por otra parte se menciona que la condición de atmósfera estable, situación que se presenta generalmente durante la noche, y el contraste mayor durante la noche entre el ruido de fondo y el ruido provocado por los aerogeneradores explica la cantidad y severidad de las quejas recibidas luego de la puesta en operación del parque eólico.

Asimismo entre los resultados se destacan:

- El ruido generado por las turbinas eólicas es más molesto que otros ruidos de la misma magnitud. Cuando se lo compara con otras fuentes de ruido, como carreteras, ferrocarril, ruido industrial, el grado de molestia del sonido de las turbinas de viento es sorprendentemente alto. Las principales fuentes de ruido en general no causan molestias graves por debajo de 42 dBA. En cambio para las turbinas de viento, la sensación de molestia grave (en interiores) se produce en niveles inferiores, por debajo de 40 dBA.
- El sonido de los aerogeneradores no disminuye por la noche y no siempre es un sonido suave, sino que puede atraer la atención especialmente durante la noche por su ritmo y el contraste con un entorno tranquilo.

En este sentido, se destaca el artículo publicado por el Dr. G. P van den Berg "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound" (2003), en el cual se analiza la diferencia observada entre la predicción de niveles sonoros de inmisión de un parque eólico y los niveles reales medidos en horario nocturno, siendo los primeros subestimados cuando se utiliza un perfil de viento correspondiente a atmósfera neutra.

### **7.1.2. Conclusiones de los estudios de GP. van den Berg (2006)**

A continuación se presentan las principales conclusiones de van den Berg, 2006, p.155 (transcripción):

*"La estabilidad atmosférica tiene un efecto significativo en el sonido de aerogeneradores, especialmente para las turbinas modernas, de gran altura.*

*En primer lugar, está relacionada con un fuerte cambio en el perfil de viento que causa la altitud, haciendo que los vientos en altura sean mayores pero al mismo tiempo, el viento cerca del suelo puede llegar a ser relativamente débil.*

*Altos niveles de inmisión sonora por lo tanto puede ocurrir en los bajos niveles de sonido ambiental, un hecho que no ha sido reconocido en las*

*evaluaciones de ruido, donde por lo general se presupone una atmósfera neutra o inestable. Como resultado, el sonido de turbinas eólicas que se enmascara bien con el ruido ambiente durante el día, no es enmascarado durante la noche.*

*En segundo lugar, el cambio de perfil del viento provoca un cambio en el ángulo de ataque de las palas de la turbina. Esto aumenta el nivel del (infra) sonido de espesor, así como el nivel de ruido del borde de salida (TE), sobre todo cuando la hoja pasa por la torre. Este sonido se modula a la frecuencia de paso de la pala, pero es en sí mismo un sonido de alta frecuencia, audible, y de hecho su componente dominante es el ruido de la turbina.*

*El aumento periódico del nivel de sonido cuando la pala pasa por la torre de la turbina, el silbido de la pala, es un fenómeno bien conocido. Menos conocido es el hecho de que el aumento de la estabilidad atmosférica genera mayores cambios en el ángulo de ataque sobre el plano del rotor que se suman al cambio cerca de la torre. Esto se traduce en una capa turbulenta de gran espesor en la frontera TE, que a su vez provoca un mayor nivel de ruido y un cambio a frecuencias algo más bajas. El aumento calculado en el nivel de ruido del silbido es de 1-2 dB a 6.4 dB, dependiendo de la condición de estabilidad.*

*En tercer lugar, la estabilidad atmosférica implica una disminución de la turbulencia de pequeña escala. Las grandes fluctuaciones en la velocidad del viento (a la escala de una turbina) desaparecen, y la coherencia en la velocidad del viento aumenta aún a distancias muy grandes (varios km). Como resultado, las turbinas están expuestas a un viento más constante y giran a una velocidad más similar, con menos fluctuaciones. Debido a la quasi sincronización, los silbidos de las palas pueden llegar al mismo tiempo por un período de tiempo y aumentar el nivel de ruido. La diferencia de fase entre las turbinas determina si esta ampliación se produce: el que los pulsos del silbido coincidan en un lugar depende de la diferencia de fase y del tiempo de propagación del sonido. En un área donde dos o más turbinas tienen emisiones sonoras comparativamente fuertes, el lugar donde se producirá esta amplificación se extenderá por el área con una velocidad determinada por la diferencia en la frecuencia de rotación. La magnitud de este efecto por lo tanto depende no sólo de la estabilidad atmosférica, sino también del número de turbinas de viento y de la distancia al receptor. Este efecto no está dentro de los que se esperaba cuando se comenzó a estudiar el fenómeno, pero tiene una gran incidencia en los niveles sonoros ambientales.*

*Diferencias de nivel  $L_{A,Máx} - L_{A,mín}$  en períodos de 5 minutos (correspondientes a las alturas del pulso del silbido de la pala) tomados de periodos de medición más largos mostraron que es usual registrar*

*cambios de nivel de aproximadamente 5 dB y, menos frecuentemente, de hasta 8 dB o 9 dB. Esta diferencia de nivel no disminuye con la distancia, sino que incluso puede aumentar en un 1 dB cuando la distancia del parque eólico al receptor pasa de 400 m hasta 1500 m. El agregado de 3 dB a 5 dB, en comparación con una sola turbina, está de acuerdo con los impulsos que llegan al mismo tiempo a partir de dos o tres turbinas de aproximadamente el mismo nivel de emisión sonora.*

*El aumento en el nivel del silbido de la pala crea una nueva percepción de sonido, fluctuante, que es débil o ausente en condiciones de atmósfera neutra o inestable. La frecuencia de pasaje de la pala es un parámetro importante, dado que es la que marca la modulación de amplitud (no como frecuencia de infrasonidos). La percepción humana es más sensible a las frecuencias de modulación de cerca de 4 Hz de sonido con una frecuencia de aproximadamente 1 kHz. La hipótesis de que las fluctuaciones son importantes se basa en las descripciones dadas por oyentes no advertidos (ingenuos), así como por los residentes: el sonido de turbinas como "chapoteo", "susurro", "aplausos", "golpes" u "olas". No está claro hasta qué punto la fluctuación determina la molestia relativamente alta causada por el sonido de aerogeneradores y el deterioro de la calidad del sueño. Se necesita más investigación sobre la percepción y la molestia del sonido de turbinas eólicas, partiendo de supuestos correctos en el nivel y el carácter del sonido. También el nivel de exposición sonora de las fluctuaciones de ruido en interiores debe ser investigado para poder evaluar los efectos sobre la calidad del sueño.*

*Es obvio que en las mediciones de ruido de turbinas de viento deben tener en cuenta la estabilidad atmosférica.*

*Cuando el carácter impulsivo del sonido se evalúa, esto debería hacerse en relación con una atmósfera estable, ya que es la condición relevante para la impulsividad. También la inmisión sonora debe evaluarse en condiciones estables en todos los casos en que la noche es el período crítico para el ruido. La velocidad del viento a baja altura no es un indicador suficiente para el desempeño de turbinas eólicas. En concreto, cuando el nivel de ruido ambiental se considera como un enmascarador de sonido de turbinas eólicas, tampoco los sonidos deberían estar relacionados con la velocidad del viento a la altura de referencia a través de un perfil neutro de viento (posiblemente implícito). En condiciones estables, el sonido que el viento induce en un micrófono no es tan fuerte como se suele pensar (en lo que hace a la "relación señal – ruido"), dado que en estas condiciones la velocidad del viento a la altura de buje va acompañada por velocidades de viento de micrófonos de relativamente baja altura. Por lo tanto, las mediciones de ruido de aerogeneradores son más sencillas cuando se hacen en atmósfera estable, lo que concuerda*

*bien con que la noche se considere el periodo más sensible en cuanto a niveles de inmisión de ruido.” (G.P. van den Berg, 2006, p.150).*

### **7.1.3. Entrevista**

Dr. Frits (G.P.) van den Berg es referente a nivel mundial en la temática de ruido de aerogeneradores de gran porte. Actualmente es asesor en Salud Ambiental del GGD - Servicio de Salud Pública - de Ámsterdam, Holanda. Desde 2002 ha estado involucrado en la temática de ruido de aerogeneradores de gran porte. Fue pionero en el estudio sobre la influencia de la estabilidad atmosférica en los niveles de ruido generados por turbinas eólicas, culminando su Ph.D. en esta línea en el año 2006. Ha escrito un gran número de informes, ponencias y artículos de referencia en la temática.

El Dr. van den Berg ha sido a través de sus admirables estudios e investigaciones en el tema, la base y motivación de la tesis de Maestría, por lo que un hito importante en el trabajo de tesis ha sido el intercambio y diálogo con el Dr. van den Berg, que se materializa luego de intercambios por correo electrónico, con una entrevista el día 24 de junio de 2014 en el GGD en la ciudad de Ámsterdam.

De esta reunión de trabajo se resaltan los siguientes puntos que fueron especialmente transmitidos por el Dr. van den Berg:

- El Dr. van den Berg transmitió su interés en conocer la *situación de Uruguay en lo que refiere a la energía eólica y en particular a la temática de ruido de aerogeneradores* y las metodologías de predicción utilizadas en el país.
- De su Tesis Doctoral, mencionó especialmente que de las entrevistas que realizó a los pobladores y vecinos de parques eólicos, la *percepción y molestias* generadas por el ruido de los aerogeneradores dependía considerablemente de las sensibilidades de las personas a ciertos factores vinculados a los parques y otros externos, como ser los niveles sonoros y el tipo de emisión, como también de factores ambientales del entorno (como ser otras fuentes presentes, emprendimientos en la zona, impacto visual del parque), estado anímico de la persona, entre otros.
- En lo que refiere a las *condiciones de estabilidad de la atmósfera*, si bien en su estudio evidenció la incidencia de la condición de estabilidad en la variación de los niveles sonoros, considera que el análisis y estudio en detalle de la incidencia de la estabilidad sobre los niveles sonoros, y el obtener una ecuación de predicción que vincule ambas variables, presenta una complejidad significativa por la gran cantidad

de factores que intervienen (factores atmosféricos) que asimismo tienen una variabilidad importante en el tiempo.

- Considera que el estudio aplicado a *pequeña escala* (microturbinas) en particular en la ciudad puede resultar muy interesante, teniendo en consideración la diversidad de emisores de niveles sonoros que pueden existir, que dificulten el estudio; y en este sentido el interés del análisis de la propagación de los niveles sonoros dependerá de cada caso.
- Especialmente mencionó que sería muy interesante para este caso -de aerogeneradores- el estudio del *fenómeno de la turbulencia* y en particular en las zonas de turbulencia de pasaje álabe-pala, donde considera amerita un estudio específico de este fenómeno.

## **7.2. COMPARACIÓN DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA MEDIDOS Y CALCULADOS**

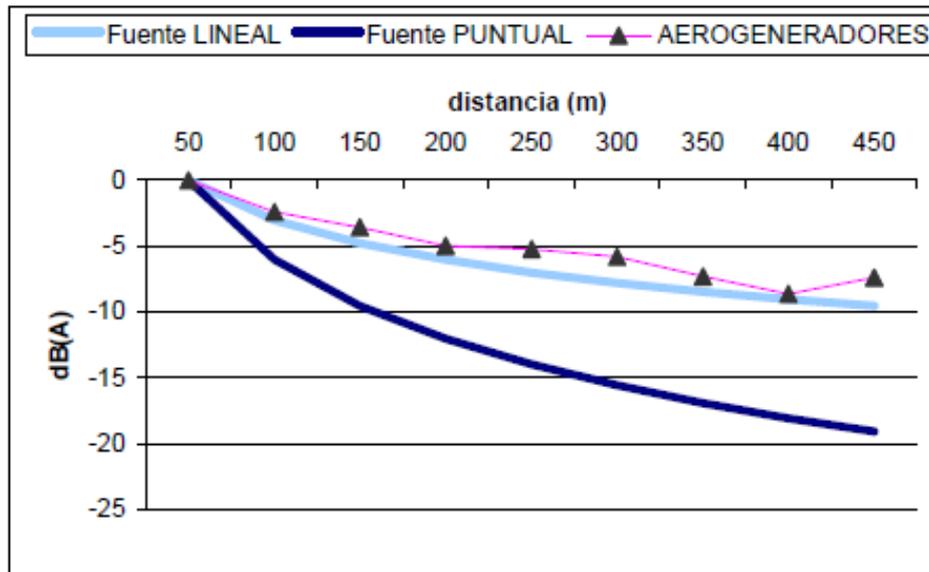
### **Análisis experimental del decaimiento de niveles sonoros (Martínez et al., 2002)**

El estudio realizado por Martínez et al. (2002) con el objetivo de analizar la ley de decaimiento de los niveles sonoros se realizó sobre un Parque Eólico en España denominado “La Cuerda”.

Se trata de un parque de aerogeneradores de porte mediano, que cuenta con 47 máquinas GAMESA GI47/660 de 660 kW cada una, 55 m de altura de buje, rotor con tres palas situado a barlovento (o sea, las palas tienen el primer contacto con el viento), 47 m de diámetro, sistema activo de orientación y otro sistema para regulación de la velocidad.

Al analizar la ley de decaimiento de los niveles sonoros, Figura 7.1., puede verse que se ajusta mejor a un decaimiento lineal que cuadrático. El Parque se comportara más como una fuente lineal que como un conjunto de fuentes puntuales independientes.

Este resultado coincide con el que algunos años después obtendría Martín Bravo et al. (2008), según se presenta en la sección 7.2.



**Figura 7.1. Decaimiento de niveles sonoros en el Parque Eólico “La Cuerda”.** Fuente: Martínez et al. 2002.

### **Comparación de niveles medidos y calculados por diferentes modelos, según Kaliski y Duncan (2008)**

Kaliski y Duncan (2008) trabajan en un parque eólico en Nueva Inglaterra, en Estados Unidos. Se trata de un parque de 100 MW, con 67 aerogeneradores distribuidos en un área de 8 km<sup>2</sup> de tierras agrícolas planas. La altura de buje de las turbinas es de 80 m y el diámetro del rotor, que es de 3 palas, es también 80 m.

Su objetivo era comparar las predicciones de diferentes modelos de propagación y de un mismo modelo con diferentes condiciones de absorción del suelo, contra mediciones realizadas en dos puntos a distancias de 120 m y 610 m de distancia.

Efectúan mediciones nocturnas, en el horario entre las 22 hs (10 P.M.) y las 10 hs (10 A.M.), tomando niveles sonoros en bandas de tercio de octava cada 1 minuto. Simultáneamente se mide en sitio la velocidad y dirección del viento a la altura del buje, la frecuencia de rotación de las palas y la producción de energía de cada aerogenerador. Estos valores se toman en intervalos de 10 minutos de duración.

A los efectos del cálculo predictivo, los autores aplican el software Cadna A (de la empresa alemana Datakustik GmbH), que permite efectuar la

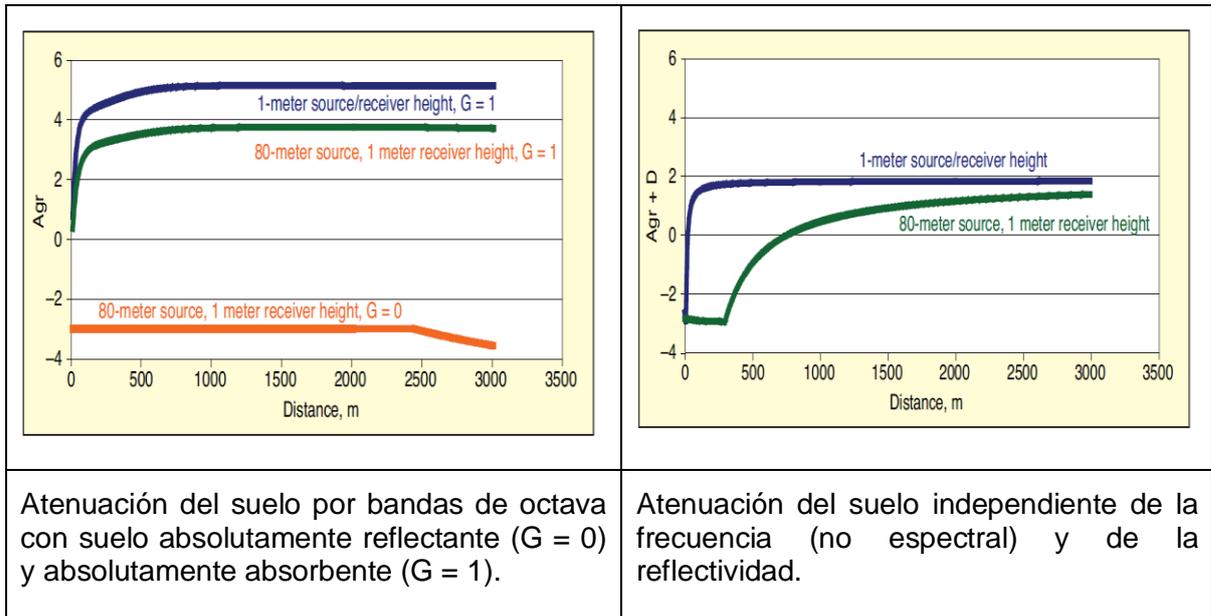
modelación según la Norma ISO 9613 e incorporar o no los ajustes meteorológicos que propone CONCAWE.

Como podría esperarse que los ajustes meteorológicos fueran de importancia en la modelación, para cada período de 10 minutos monitoreado con las turbinas en operación, se efectúa una batería de corridas del modelo, considerando los siguientes casos:

- ISO 9613, meteorología estándar con atenuación espectral del suelo y  $G = 1$  (suelo poroso).
- ISO 9613, meteorología estándar con atenuación espectral del suelo y  $G = 0$  (suelo duro).
- ISO 9613, meteorología estándar con atenuación no espectral del suelo.
- ISO 9613, meteorología estándar sin atenuación del suelo.
- Ajustes de CONCAWE para clases de estabilidad D/E con vientos de más de 3 m/s, atenuación espectral del suelo y  $G = 1$ .
- Ajustes de CONCAWE para clases de estabilidad D/E con vientos de más de 3 m/s y atenuación no espectral del suelo.
- Ajustes de CONCAWE para clases de estabilidad D/E con vientos de más de 3 m/s y sin atenuación del suelo.

Algunos de los resultados publicados por los autores se presentan en las Figuras 7.2 y 7.3.

Nótese (Figura 7.2) que, cuando la fuente es de 80 m de altura, la atenuación espectral del suelo es aproximadamente 2 dB menor que cuando la fuente es de baja altura. Para atenuación no espectral del suelo y altura de fuente de 80 m, en los primeros 750 m se obtiene atenuación negativa debido a reflexiones en el suelo.

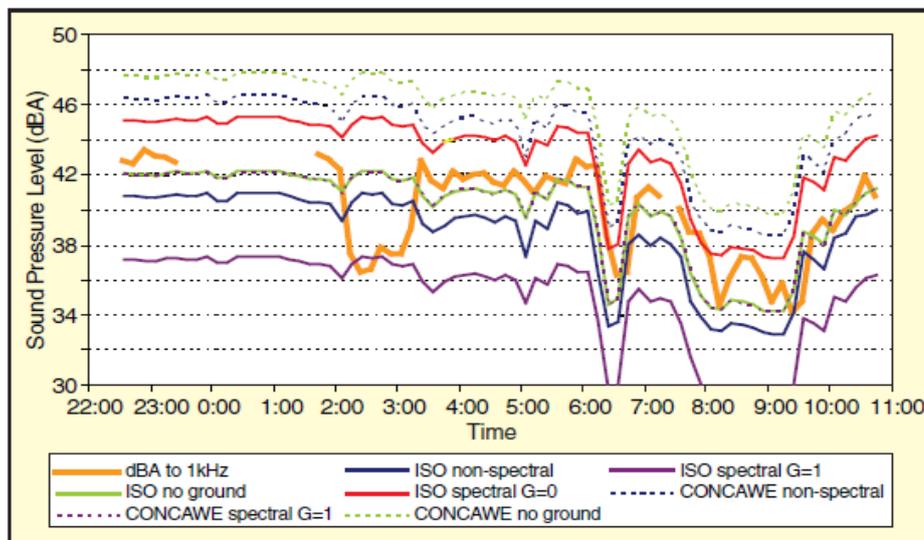


Atenuación del suelo por bandas de octava con suelo absolutamente reflectante ( $G = 0$ ) y absolutamente absorbente ( $G = 1$ ).

Atenuación del suelo independiente de la frecuencia (no espectral) y de la reflectividad.

**Figura 7.2. Comparación de la atenuación del suelo para distintas hipótesis y alturas de fuente de 1 m y 80 m (tomado de Kaliski y Duncan, 2008)**

En la Figura 7.3. se comparan los resultados de diferentes esquemas de modelación con niveles sonoros medidos a 610 m de la fuente (curva de mayor espesor en color naranja). Los niveles medidos oscilaron entre 34 dBA y 43 dBA.



**Figura 7.3. Comparaciones de los niveles sonoros monitoreados a 610 m de distancia con niveles modelados. Fuente: Kaliski y Duncan. 2008.**

Para determinar objetivamente cuál de los métodos de cálculo empleados es el que logra el mejor ajuste, se realizaron análisis de regresión que se presentan a continuación (Figura 7.3.).

De la comparación y ajuste realizado resulta:

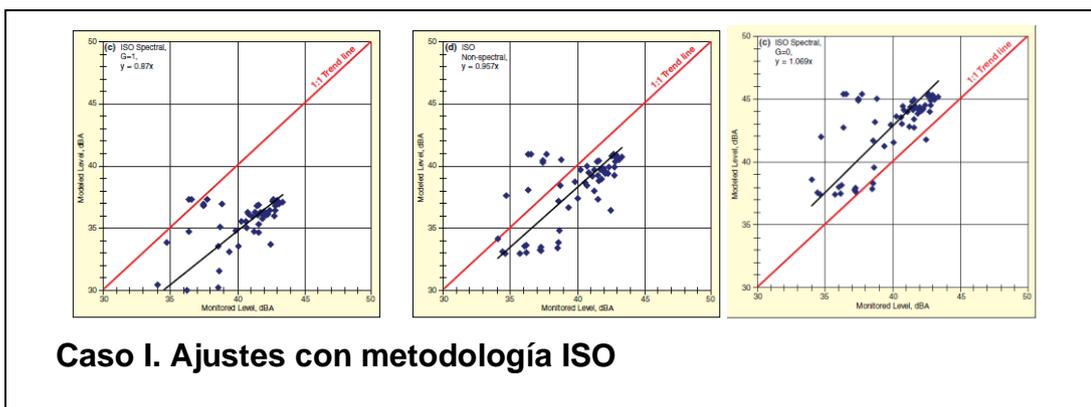
**Caso I. La metodología ISO:**

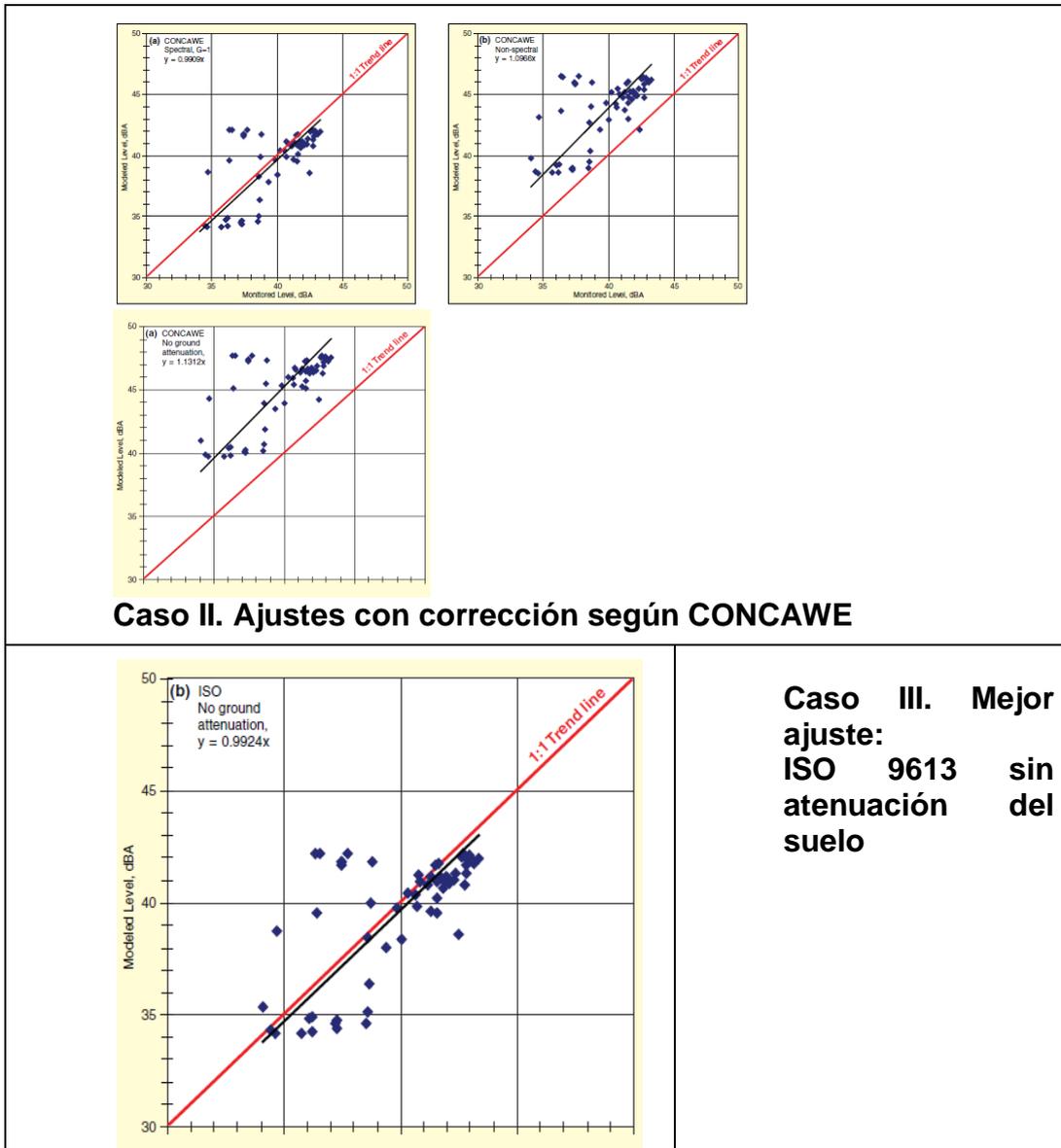
- con *atenuación no espectral del suelo* da un buen ajuste. Los niveles sonoros promedio del modelo subestiman levemente los niveles monitoreados.
- Con *atenuación espectral del suelo y  $G = 0$* , esta metodología da resultados moderadamente precisos, aunque sobreestima levemente.
- Con *atenuación espectral del suelo y  $G = 1$* , subestima significativamente los niveles sonoros esperados.

**Caso II. La metodología CONCAWE:**

- *combinada con atenuación espectral del suelo* tiene un coeficiente de correlación de 0,9909 y, en promedio, subestima apenas los niveles sonoros esperados.
- *con atenuación no espectral del suelo* sobreestima los niveles sonoros medidos y sin atenuación, los sobreestima aún más.

**Caso III. La metodología ISO sin atenuación del suelo** da el mejor ajuste en todas las corridas, con un coeficiente de correlación de 0,9924 (Figura 7.4. caso III).





**Figura 7.4: Comparación de niveles medidos y niveles calculados.**  
Fuente: Kaliski y Duncan. 2008.

En resumen, el mejor ajuste se logró con la metodología ISO sin considerar atenuación del suelo (correlación de 0,9924). El segundo mejor ajuste se obtuvo al aplicar CONCAWE con atenuación espectral del suelo (coeficiente de 0,9909).

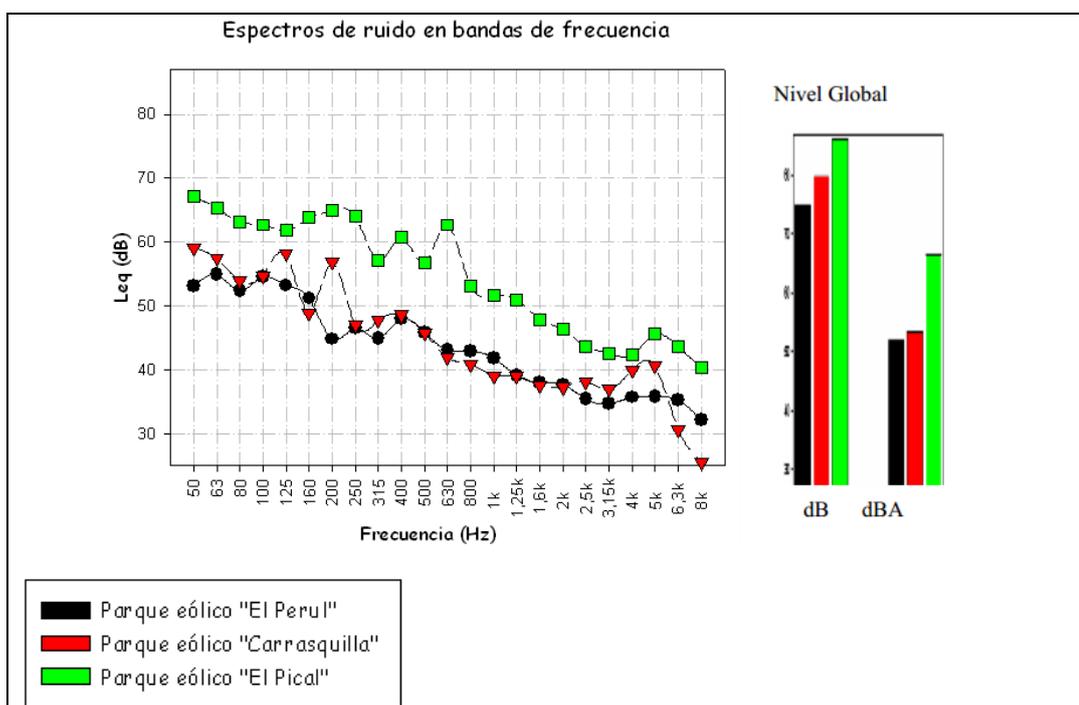
## Estudios de modelación de la fuente sonora según Martín Bravo et al. (2008)

Martín Bravo et al. (2008) han realizado estudios del impacto que causa este tipo de instalaciones en el ambiente desde el punto de vista acústico. Para ello se han realizado medidas en tres parques en España con distintas fechas de instalación (años 2000, 2002 y 2006), se han elaborado los mapas acústicos en las inmediaciones y se ha estudiado el espectro de emisión.

Como resultados obtenidos de los estudios se destacan:

- *Espectro de ruido*

El ruido emitido tiene componentes de baja frecuencia principalmente (Figura 7.5).



**Figura 7.5. Espectro de ruido en bandas de frecuencia medido en cada uno de los parques eólicos.** Fuente: Martín Bravo et al. 2008.

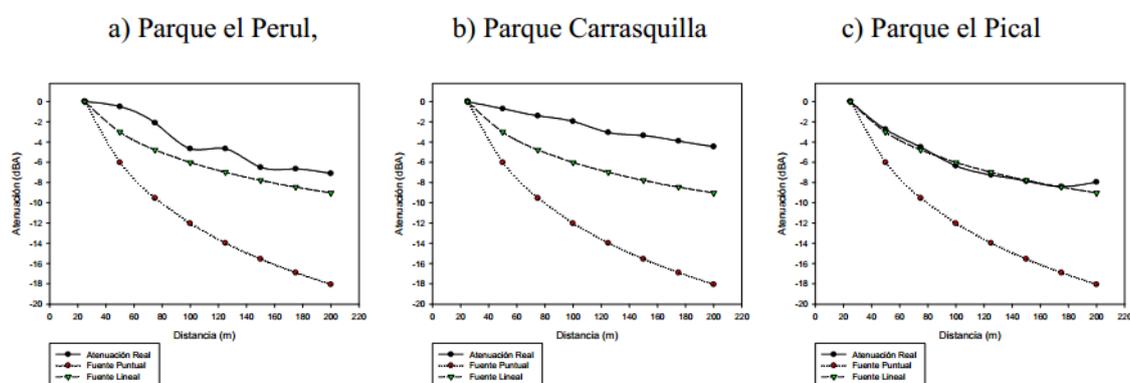
Las gráficas de la figura dan una idea de la distribución frecuencial del sonido producido por los aerogeneradores estudiados. La componente de baja frecuencia es relativamente importante, al haber niveles altos en bandas de frecuencia por debajo de 160 Hz.

Según Martín Bravo et al. (2008), al hablar de contaminación sonora es común aludir sólo a sonidos audibles dejando fuera los sonidos de baja

frecuencia que apenas son detectados por el oído, que influyen de manera considerable en la salud y calidad de vida del ser humano, agudizándose por el efecto de vibración que produce.

- *Modelación de la fuente sonora*

Idealmente el nivel sonoro producido por una fuente decrece con la distancia. Para el estudio se aplican los modelos de fuente puntual y fuente lineal, y se comparan con los datos obtenidos en las mediciones, Figura 7.6, de lo cual resulta que los aerogeneradores se asemejan más a un modelo de fuente lineal que puntual.



**Figura 7.6. Comportamiento de los aerogeneradores como fuente puntual y fuente lineal.** Fuente: Martín Bravo et al. 2008.

En resumen, según los estudios de Martín Bravo et al. (2008), en lo que refiere a los resultados espectrales del ruido producido por los aerogeneradores, estos muestran que en general, se trata de un ruido en el que predominan las bajas y medias frecuencias, resultando un sonido fundamentalmente en el rango de las frecuencias graves.

Por otro lado, en lo que refiere a los resultados de la modelización de la fuente sonora muestran que los aerogeneradores se aproximen mejor al comportamiento de una fuente lineal que puntual. Con lo cual, la atenuación por divergencia geométrica varía con la distancia, en lugar de la distancia al cuadrado como es considerada por la Norma ISO 9613-2.

### **Moller & Pedersen (2010)**

En los estudios de Moller, H.; Sejer Pedersen, C. (2010) sobre ruido en bajas frecuencias de aerogeneradores, para la estimación de los niveles de presión sonora en campo abierto en exteriores,  $L_p$ , posición viento abajo, se calcula de acuerdo con la metodología de la Norma ISO 9613-2, utilizando banda de tercio de octava en lugar de bandas de octava.

Como caso de estudio se consideraron 48 aerogeneradores de entre 0,6 y 2,75 MW. Se analiza la variación de los niveles sonoros en exteriores e interiores de 4 hogares ubicados a una distancia de los aerogeneradores de entre 90 a 525 metros.

Para la estimación de los niveles sonoros se considera:

- $A_{gr} = - 1.5 \text{ dB}$
- $A_{bar} = 0$
- $A_{misc} = 0$
- $A_{atm}$  para  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $w = 80 \%$
- distancia de referencia  $d_0 = 1 \text{ m}$

Al igual que la Norma ISO, se asume para realizar los primeros cálculos propagación esférica (reducciones del nivel de presión sonora de 6 dB al duplicar la distancia) como se presenta a continuación:

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \log\left(\frac{d}{1 \text{ m}}\right) - 11 \text{ dB} - \alpha d + 1.5 \text{ dB}$$

Sin embargo, a partir del estudio de caso se observó un ajuste más adecuado si se considera propagación cilíndrica sobre los 200 metros de distancia.

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \log\left(\frac{200 \text{ m}}{1 \text{ m}}\right) - 10 \text{ dB} \log\left(\frac{d}{200 \text{ m}}\right) - 11 \text{ dB} - \alpha d + 1.5 \text{ dB}$$

Moller y Pedersen hacen referencia a que durante ciertas condiciones atmosféricas (por ejemplo en inversión térmica) puede existir a cierta altura una zona de sonido reflectante, con lo cual la propagación se asemeja más a propagación cilíndrica (la cual solo reduce el nivel de presión sonora en 3 dB al duplicar la distancia).

Sin embargo se menciona que son necesarios mayores conocimientos sobre la ocurrencia de los diferentes fenómenos vinculados con las condiciones atmosféricas.

Se hace referencia en este sentido que si bien es normalmente asumido que la velocidad del viento se incrementa logarítmicamente con la altura, diferentes autores como ser van den Berg, G.P. (2005) muestran que el perfil de velocidad del viento se desvía del perfil logarítmico. También se menciona que la altura de referencia de 10 metros resulta inadecuada con los tamaños de las turbinas modernas.

Por otro lado, es interesante notar que los resultados del estudio confirman que el espectro de ruido de baja frecuencia es mayor para

turbinas mayores (> 2 MW) que para turbinas menores (< 2 MW). La diferencia es muy significativa para las bandas de tercios de octava de entre 63 y 250 Hz,

### **7.3. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE NIVELES SONOROS**

#### **7.3.1. Consideraciones a nivel internacional**

En el marco de los temas y líneas de antecedentes específicos se plantean a nivel internacional diversos aspectos y recomendaciones para la aplicación del método de cálculo y para la estimación de los niveles sonoros.

Teague y Foster (2008) plantean lo siguiente:

- Para la modelación y estimación de los niveles sonoros se cuenta y son de uso corriente diversos programas/software los cuales toman diversas consideraciones. El algoritmo de propagación que se elija debe ser el más ajustado y acorde para la situación particular.

Como ejemplo, la metodología CONCAWE es la única que incorpora efectos meteorológicos en los cálculos de las predicciones de los niveles sonoros. En tanto la metodología ISO 9613, al igual que CONCAWE, incluyen la absorción del aire.

Según los autores, la metodología CONCAWE tiende a dar niveles más altos. La precisión en general suele variar entre 2 dB y 5 dB.

- La modelación de niveles sonoros se debe realizar por lo menos hasta 1.500 metros de las turbinas (borde más cercano), considerando la topografía del terreno.
- La potencia acústica emitida se debe considerar en bandas de tercio de octava.
- Los niveles a informar se deben redondear al entero correspondiente o, a lo sumo, al 0,5 dB (debido a la incertidumbre existente).
- Las mediciones deben considerar la composición espectral del sonido, y deben caracterizarse otros ruidos en la zona, si los hubiera.
- En caso de que, una vez en operación, el parque genere ruido claramente audible en algún receptor, se requiere realizar

adicionalmente mediciones en campo y una evaluación subjetiva del ruido existente.

### **7.3.2. Propuesta de cálculo - IMFIA**

En lo que refiere al método de cálculo y la predicción de los niveles de presión sonora ambientales, si bien es de uso corriente la Norma ISO 9613-2 y algunos países (en particular de la Unión Europea) han establecido algunos ajustes y modificaciones de la norma a su región, es un tema que a nivel internacional y en particular para Uruguay no se ha resuelto aún.

Es por ello que se espera contar con nuevas propuestas para mejorar la aproximación que se utiliza actualmente de la ISO 9613-2, que se ha constatado puede llegar a subestimar ampliamente los niveles sonoros esperados en los receptores.

En el estudio realizado por el IMFIA-DIA (2012), en el marco del Convenio con el MIEM para el Proyecto Impacto Acústico de Aerogeneradores, se presenta una propuesta de cálculo de los niveles sonoros para Uruguay en base a modificaciones a introducir en el método de cálculo actualmente en uso que es la Norma ISO 9613-2.

### **Ajustes al método de cálculo de la Norma ISO 9613-2**

El método de cálculo propuesto en el marco del estudio realizado por el IMFIA (ver diagrama de flujo Figura 7.7. y Figura 7.8.) pretende mejorar los resultados de la aplicación de la Norma ISO 9613-2 a través de ciertos ajustes, sin modificar sus principales hipótesis de cálculo.

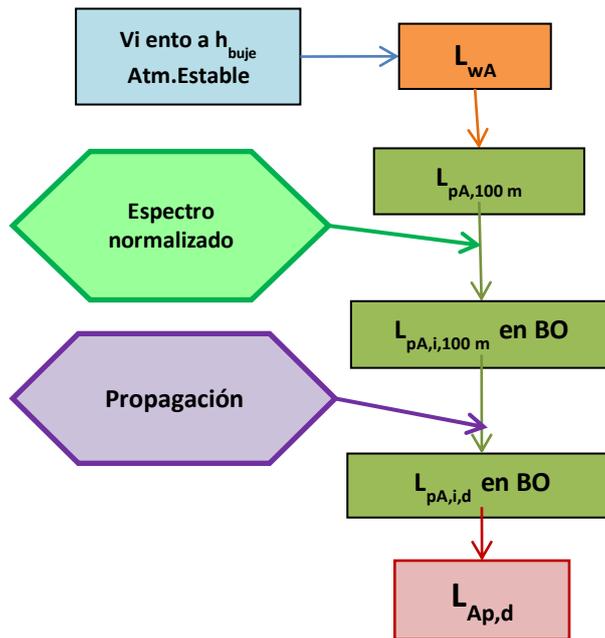


Figura 7.7. Diagrama conceptual de la propuesta de método de cálculo de niveles sonoros en inmisión. Fuente: IMFIA. 2012.

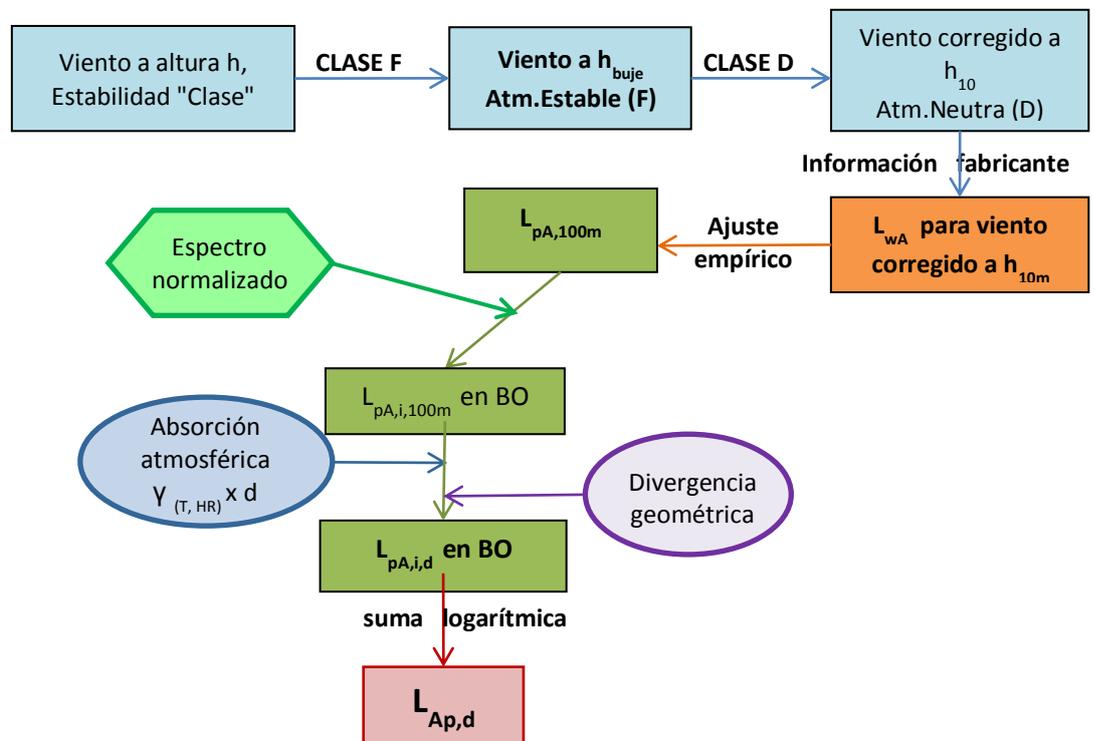


Figura 7.8. Diagrama de la propuesta de método de cálculo de niveles sonoros en inmisión. Fuente: IMFIA. 2012.

La información de partida incluye:

- coordenadas y altura de emisores y receptores de interés;
- rosa de vientos que permita conocer frecuencias de velocidad y dirección del viento durante el año;
- permanencia de las distintas condiciones de estabilidad atmosférica durante el año;
- temperaturas y humedades relativas medias y extremas en el área de estudio;
- potencia acústica de los aerogeneradores en función de la velocidad del viento tanto en escala A como en bandas de frecuencias normalizadas.
- velocidad del viento a diferentes alturas en la vertical.

### Metodología para el cálculo

A continuación se presenta la forma de cálculo de las variables requeridas para obtener el nivel de presión sonora a una distancia d.

#### a) Velocidad del viento a 10 m de altura

La velocidad del viento a 10 m de altura tiene gran relevancia debido a que es el dato que usualmente se emplea para referir el valor de  $L_{WA}$ .

A continuación se presentan los pasos para el cálculo de la velocidad del viento a 10 metros.

Se considera que la distribución vertical de velocidades se puede ajustar según una función logarítmica con la altura, de la siguiente forma dependiendo de la condición de la atmósfera.

$$v = \frac{u_*}{k} * \left( \ln \frac{z}{z_0} - \varphi_1 \right) \rightarrow v_{buje} = v_{ref} * \frac{\left( \ln \frac{z_{buje}}{z_0} - \varphi_1 \right)}{\left( \ln \frac{z_{ref}}{z_0} - \varphi_1 \right)}$$

Siendo:

$u^*$  = Velocidad de corte

k = Constante de Von Kármán

$z_0$  = Rugosidad del terreno

$v_{buje}$  = Velocidad del viento a la altura del buje

$v_{ref}$  = Velocidad del viento medida a una altura  $z_{ref}$

$z_{buj e}$  = Altura del buje

$z_{ref}$  = Altura de referencia a la que se ha medido la velocidad del viento  $v_{ref}$

$\varphi_1$  = Función que depende de la clase de estabilidad atmosférica (ver Tabla 7.1.)

Clases de estabilidad		Fórmula
Designación	Descripción	
A	Fuertement e inestable	$\varphi_1 = 2 * \ln\left(\frac{1 + \phi_m^{-1}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \phi_m^{-2}}{2}\right) - 2 \arctan(\phi_m^{-1}) + \frac{\pi}{2}$ siendo $\phi_m = (1 - 15 * \xi)^{-1/4}$
D	Neutra	0
F	Fuertement e Estable	$\varphi_1 = -\delta * \xi$

**Tabla 7.1. Función  $\varphi_1$  en función de la estabilidad según Pasquill**

Donde:

$$\xi = z / L$$

$\delta$  = aproximadamente igual a 4,7

L = Longitud de de Monin Obukhov (ábacos  $L^{-1} = L^{-1}(z_0, \text{estab})$ )

En resumen:

$$v_{buj e} = v_{ref} * \frac{\left(\ln \frac{z_{buj e}}{z_0} - \varphi_1\right)}{\left(\ln \frac{z_{ref}}{z_0} - \varphi_1\right)} = v_{ref} * \frac{\left(\ln \frac{z_{buj e}}{z_0} + \delta \cdot \xi\right)}{\left(\ln \frac{z_{ref}}{z_0} + \delta \cdot \xi\right)} = v_{ref} * \frac{\left(\ln \frac{z_{buj e}}{z_0} + 4,7 \frac{z_{buj e}}{L}\right)}{\left(\ln \frac{z_{ref}}{z_0} + 4,7 \frac{z_{ref}}{L}\right)}$$

**Si no se conoce la clase de estabilidad a que corresponde el dato de velocidad con que se cuenta, a los efectos de calcular la velocidad a la altura del buje se asumirá atmósfera estable.**

Una vez obtenida la velocidad del viento a la altura del buje, se debe calcular la velocidad a 10 m de altura, que es la que usualmente se emplea en las tablas que relacionan velocidad del viento con la potencia

acústica emitida. **Se aplicará para ello la misma fórmula, pero suponiendo condición de atmósfera neutra:**

$$v_{10m} = v_{buje} * \frac{\left( \ln \frac{z_{10m}}{z_0} \right)}{\left( \ln \frac{z_{buje}}{z_0} \right)}$$

Ésta será la velocidad del viento a ingresar en la tabla proporcionada por el fabricante para determinar el nivel de potencia sonora del aerogenerador.

### **b) Nivel de presión sonora a 100 m de la máquina**

Si bien el nivel de presión sonora ponderado en escala A que es impuesto por un aerogenerador en su entorno depende de varios factores, en la propuesta se considera como hipótesis que los niveles de presión sonora a 100 m de distancia de la máquina tienen la misma composición espectral que la potencia acústica emitida.

Se asume que a 100 m de distancia de un aerogenerador los efectos de la divergencia geométrica, absorción atmosférica y de otros posibles fenómenos que puedan generar diferencias en las leyes de decaimiento de sonidos, son despreciables.

Nivel de presión sonora en escala A a 100 m de un aerogenerador:

$$L_{pA} = 0,75 L_{WA} - 25,6$$

La ecuación propuesta por el IMFIA–DIA es compatible con el ajuste experimental de G.P. van den Berg (2003), que encuentra una diferencia de 58 dBA entre  $L_{WA}$  y  $L_{pA}$  a 400 m de distancia; si se asume decaimiento lineal, las diferencias esperables serán de 55 dBA a 200 m y de 52 dBA a 100 m, valor muy similar al que resulta del ajuste realizado.

Para obtener los niveles de presión sonora a 100 m de la fuente en bandas de octava o de tercio de octava, se asume que el espectro tiene la misma forma que el espectro de potencia acústica. Así, los niveles  $L_{pA}$  a 100 m y en cada banda se obtendrán a partir del valor de  $L_{pA}$  sumando aritméticamente las correcciones respectivas y presentadas en espectro normalizado de potencia sonora de aerogeneradores en bandas de tercio de octava (Fuente: DELTA, 2002).

### **c) Niveles de presión sonora a distancia $d$ de la máquina**

Para obtener los niveles de presión sonora a una distancia  $d$  de la máquina mayor que 100 m, se considera únicamente atenuaciones por absorción atmosférica y divergencia geométrica.

#### Absorción atmosférica:

El decaimiento en dB debido a la absorción atmosférica en un tramo de longitud  $d$  se calcula de la misma forma que la Norma ISO 9613-2:

$$\gamma_i \text{ (dB/km)} * d \text{ (m)} / 1000$$

Siendo:

$\gamma_i$  se refiere a la absorción atmosférica en la banda de frecuencias  $i$ -ésima y se expresa en dB/km.

y depende de la temperatura y de la humedad relativa ambiente. Sus valores son empíricos y están publicados, entre otras fuentes, en la Norma ISO 9613-1.

Este término sólo es considerado para los casos en que la distancia  $d$  sea mayor que 100 m, con motivo de que se considera que el fenómeno físico es efectivo para las altas frecuencias y cuando el sonido recorre grandes distancias.

Los valores de los coeficientes de absorción  $\alpha_i$  en condiciones estándares de temperatura y humedad relativa son los considerados por la Norma y se presentan en la Tabla 6.5. Están dados en bandas de octava normalizadas centradas entre 63 Hz y 8000 Hz y expresados en dB/km; para frecuencias más bajas, se considerará  $\alpha_i=0$ .

#### Divergencia geométrica:

La divergencia geométrica se refiere a la atenuación que sufre una onda sonora a lo largo de su desplazamiento por el medio de propagación.

Según propuesta del IMFIA, a los efectos de los cálculos se asume una ley de decaimiento del tipo:

$$L_2 = L_1 - 10 * \log (d_2/d_1)^{n_i}$$

El IMFIA propone emplear los siguientes valores de  $n_i$  en bandas de octava normalizadas:

Frecuencia (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
n	0,2	0,4	0,5	0,7	1,5	1,7	1,7	1,3	1,0	0,2

**Tabla 7.2. Valores propuestos para el exponente  $n$  según bandas de octava normalizadas.** Fuente: IMFIA. 2012.

**Ecuación para el cálculo del nivel de presión sonora en escala A y a una distancia  $d$  del aerogenerador**

A partir de lo anterior resulta el nivel en cada banda de octava como:

$$L_{pA,d,i} = L_{pA,100m,i} - \gamma_i * d[m]/1000 - 10 * \log(d[m]/1000)^{n_i}$$

Por último, se obtiene el nivel sonoro en escala A sumando logarítmicamente los niveles obtenidos para cada banda:

$$L_{pA,d} = \sum_{f=16 \text{ Hz}}^{f=8000 \text{ Hz}} 10^{\frac{L_{pA,d,f}}{10}}$$

## 8. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA NORMA ISO 9613-2

### 8.1. HIPÓTESIS Y CONSIDERACIONES

#### Ecuación de onda

La norma en su metodología de cálculo parte de la ecuación de onda, con lo cual se asume como válidas las hipótesis consideradas (sección 4.1.).

Realizando un análisis de las mismas, considerando el marco teórico presentado, se mencionan a continuación las hipótesis que a priori no deberían ser asumidas para nuestro caso de interés de aerogeneradores de gran porte.

#### 1. *Fluido perfecto*

Se considera que el fluido está en reposo, es decir las velocidades y desplazamientos debidos a las perturbaciones son pequeños, y no hay vórtices, ni sumideros.

Como se mencionó en el apartado 5.3.2 donde se hace referencia a la turbulencia, se genera un flujo turbulento alrededor del perfil y en particular cuando la pala pasa por la torre. En consecuencia, esta hipótesis que se considera no sería válida para el caso de aplicación.

#### 2. *Procesos adiabáticos*

Los procesos vibratorios que suelen interesar a la acústica en los fluidos son lo suficientemente rápidos, por lo que se consideran adiabáticos.

En este caso donde el flujo es turbulento (difusivo por definición) no resulta válida a priori la consideración de proceso adiabático.

En resumen, se considera que para el caso de interés de aerogeneradores se requiere un estudio y análisis específico de las tres hipótesis mencionadas de forma de verificar su consideración o plantear una propuesta de implementación acorde al caso. En particular en lo que refiere a la hipótesis (1), de acuerdo a van den Berg (2006), se evidencian zonas de turbulencia en la zona de pasaje álabe-pala por lo cual ameritaría un estudio específico.

## **Consideraciones para la aplicación del método de cálculo la Norma ISO 9613-2**

La norma considera ciertas hipótesis para llegar al método de cálculo de los niveles de presión sonora, que en principio no serían aplicables al caso de estudio y se considera requieren de un análisis detallado. Estas son:

### *1. Fuente puntual*

La norma considera al emisor (aerogenerador) como una fuente puntual, con lo cual la propagación del sonido desde la fuente en este caso sigue una ley de decaimiento cuadrático con la distancia. Esto implica un decaimiento de los niveles del sonido con la distancia sustancialmente mayor que si consideramos la fuente como lineal. Sin embargo, dado que la fuente principal de emisión de ruido aerodinámico son los álabes de la turbina, a la escala espacial de interés (primeros 2 a 3 km desde el pie del aerogenerador) no puede considerarse que se trate de una fuente puntual, sino como una fuente bidimensional. Autores como Martín Bravo (2008) hacen referencia que al comparar los datos medidos con los calculados por distintas formas de propagación, la mejor aproximación resulta la de considerar propagación lineal.

### *2. Topografía del terreno*

El método de cálculo para determinar la absorción del terreno sólo es válido cuando el terreno es relativamente plano, ya sea horizontal o con una pendiente continua.

Por el contrario, la ubicación y selección de sitios para la implantación de aerogeneradores más apropiada a las condiciones de mayor viento es justamente en las zonas de topografía compleja (cumbre de la colina). Por lo que, esta consideración que adopta la norma (de topografía plana) no es la situación corriente de aplicación para el caso de aerogeneradores.

### *3. Estabilidad atmosférica*

En lo que refiere a las condiciones de estabilidad de la atmósfera, el método de cálculo de la Norma corresponde a condiciones de “atmósfera neutra, inestable o inversión térmica moderada con la base a nivel de piso”. Sin embargo, la mayor parte de los problemas en cuanto a las molestias causadas por el ruido en campo abierto, ocurren para atmósfera fuertemente estable (clase F). Las condiciones de neutralidad ocurren en

días con viento o cuando la nubosidad impide el calentamiento o enfriamiento rápido de la superficie terrestre. Las condiciones inestables normalmente se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación. Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento a 10 metros de altura es escaso o nulo. El perfil de velocidad del viento en altura está directamente relacionado con las condiciones de estabilidad de la atmósfera.

#### 4. *Velocidad del viento*

Las condiciones de aplicación de la Norma consideran que la velocidad del viento debe estar comprendida entre 1 m/s y 5 m/s, medida a una altura de entre 3 m y 11 m sobre el nivel del piso y como promedio en un corto período de tiempo.

Estas condiciones no necesariamente se corresponden al rango de velocidades de funcionamiento de aerogeneradores. Para alturas típicas y velocidades de viento de funcionamiento de aerogeneradores (entre 4 m/s y 25 m/s a la altura del buje), los valores que resultan a una altura de 10 metros son considerablemente mayores (entre 1 m/s y 15 m/s para el caso estable e inestable respectivamente) que los que considera la norma (entre 1 y 5 m/s).

A su vez, no debe perderse de vista, que **el nivel sonoro se relaciona con el cubo de la velocidad del viento incidente**, por lo que una diferencia que quizás pueda parecer de poco interés en esta última puede introducir grandes diferencias entre los niveles sonoros esperados y los que realmente han de tener lugar.

## 8.2. MÉTODO DE CÁLCULO

### **Estimación de la potencia acústica emitida**

Para la estimación de la potencia acústica emitida se considera atmósfera neutra.

Sin embargo, siendo la condición crítica “atmósfera estable” se ha constatado a nivel internacional por varios autores (como G.P. van den Berg, 2006) que el valor de potencia acústica emitida considerando atmósfera neutra es subestimado.

## Estimación de los factores de atenuación

Las hipótesis consideradas por la Norma condicionan la metodología de cálculo empleada. Es por ello, que los factores de atenuación considerados por la Norma se ven directamente influenciados por las hipótesis establecidas.

### a) Divergencia geométrica

Como fue mencionado, la norma considera al emisor como “fuente puntual”, sin embargo, por las características de la fuente no resulta apropiada esta consideración.

Asimismo y en otro orden, la norma al considerar una ley de decaimiento cuadrático para fuente puntual, toma como distancia de referencia  $d_0$  de 1 metro como se observa a continuación.

$$A_{div} = 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 11 \text{ dB}$$

Siendo:

$d$  es la distancia desde la fuente al receptor en metros,

$d_0$  es la distancia de referencia (1 m).

Para el caso de interés de aerogeneradores no resulta apropiada la consideración de 1 metro como valor de referencia, debido a que el sitio a esa distancia se encuentra debajo del aerogenerador. En este sentido, resulta interesante tomar en consideración que la norma británica *The British Standards Institution BSI:1997* sobre control de ruido, toma como distancia de referencia  $d_0$  10 metros, lo cual se considera más apropiado para el caso.

### b) Absorción atmosférica

La atenuación por absorción atmosférica resulta de la disipación parcial de energía sonora y su transformación en calor debido a varios procesos moleculares. La atenuación debida a este fenómeno durante la propagación a través de una distancia  $r$  en metros, se puede calcular como:

$$A_{\text{atm}} \text{ (dB)} = \alpha r / 1000$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación del aire en dB/km. Este coeficiente depende de la frecuencia, de la temperatura ambiental y de la humedad relativa. Los valores indicados por la norma ISO 9613 – 2 se han definido para la propagación del sonido al aire libre, a una presión ambiental de 101,3 kPa (una atmósfera normal al nivel del mar).

A priori la absorción atmosférica podría tener mayor incidencia en la dirección perpendicular al plano del rotor.

En esta línea resulta interesante tener presente que para el caso de interés de aerogeneradores las condiciones de temperatura y humedad relativa, no tienen por qué ser las mismas en emisor y receptor, por lo que es necesario ser muy cuidadoso a la hora de seleccionar las condiciones de cálculo.

### **c) Efectos del terreno**

La corrección por efectos del terreno sólo tiene sentido cuando el terreno es plano presenta valores de corrección para alturas de emisor y receptor hasta los 10 m. Por lo que no se aplica para el caso de aerogeneradores.

Es interesante notar que para la determinación de la atenuación la *Norma ISO 9613-2* propone métodos distintos según se trate de distancias cortas (inferiores a 100 metros) o de largas distancias (superiores a 100 metros).

### **d) Atenuación por presencia de apantallamientos o barreras**

Si bien la norma ISO 9613-2 plantea una metodología de cálculo para este término, siendo que el alcance del trabajo de tesis es para los casos sin presencia de barreras este factor de corrección no se analiza.

### **Otros efectos y atenuaciones a destacar que no son considerados explícitamente por la Norma:**

- **Condiciones Meteorológicas:  $K_{\text{met}}$**

Las características de la atmósfera como medio en el que se propaga una onda acústica dependen fundamentalmente de las distribuciones espaciales de temperatura y de velocidad de viento.

Si bien las variaciones tanto de la velocidad del viento y los gradientes de temperatura de la atmósfera generan variaciones sobre los niveles de

presión sonora en el receptor, este factor de corrección  $K_{met}$  no es considerado en forma explícita en la Norma ISO 9613-2. Esto se debe a que cuando se hacen consideraciones de propagación en campo libre (hipótesis de la norma), se supone que el medio en el que se propaga la onda es homogéneo. Sin embargo la atmósfera es un medio que no cumple con dichas propiedades.

Cabe destacar que este factor de corrección es considerado en el Reporte 41/81 de CONCAWE, el cual depende de las condiciones de la atmósfera y de la distancia a la fuente. En particular el modelo considera una simplificación que es función sólo de la velocidad del viento y de la distancia a la fuente (Figura 6.4. y 6.5).

Asimismo el modelo nórdico, Nord2000, permite en su método de cálculo considerar las condiciones climáticas, incluidos los movimientos turbulentos de la atmósfera; por lo que a priori no se considera prudente descartar su consideración en el método de cálculo.

- **Efectos por la altura de la fuente ( $K_{height}$ )**

Esta corrección, considerada en el Reporte 4/81 de CONCAWE, toma en cuenta el efecto que generan las emisiones de una fuente de gran altura, el cual difiere según el ángulo con que inciden en el terreno las emisiones, y se reflejan.

Si bien para el caso de topografía plana este factor de corrección no es considerado, no sucede lo mismo para el caso de topografía compleja, en el cual pueden generarse múltiples reflexiones de ladera. Para este último caso, según CONCAWE, el valor  $K_{height}$  se debe reducir en 3 dB.

- **Atenuación por sombra sonora – Refracción**

La atenuación por sombra sonora es aquella que se produce en las posiciones situadas por delante de las fuentes sonoras en la dirección del viento y es debido al efecto de la refracción del sonido hacia arriba.

Si bien la refracción del sonido tiene un efecto importante sobre los niveles de presión sonora en el receptor, este factor de corrección no es considerado en forma explícita en la Norma ISO 9613-2.

En lo que refiere al método de cálculo del Modelo de CONCAWE se entiende está considerado este factor en el factor de corrección por altura de la fuente.

Asimismo, es importante destacar que el modelo nórdico Nord2000 adopta la refracción atmosférica en su modelo y recomienda su consideración.

### **8.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO**

Aunque el método de cálculo detallado trabaja por bandas de octava normalizadas, la Norma indica que cuando la información disponible está dada por valores en escala A la metodología sigue siendo válida si se emplean para el cálculo los procedimientos simplificados, coeficientes y fórmulas correspondientes a la banda de 500 Hz.

Si bien en caso de no contar con los espectros sonoros de emisión en bandas de octava es entonces admisible trabajar en escala A, los errores e incertidumbres se van multiplicando al trabajar con datos de entrada menos desagregados. En particular no debe perderse de vista que uno de los problemas principales vinculados con la propagación del ruido de aerogeneradores tiene que ver con las bajas frecuencias, y éstas son muy castigadas en la escala de ponderación frecuencial A, por lo que se pueden obtener niveles aparentemente admisibles expresados en dBA pero que de todos modos son susceptibles de ocasionar molestias a grandes distancias debido a su composición espectral. Por lo tanto, no es recomendable trabajar en escala A para este tipo de emisor.

Por otro lado, la norma prevé aplicar una minoración para considerar los niveles sonoros en períodos prolongados, en la hipótesis de que las condiciones más críticas no se mantienen todo el tiempo. Sin embargo, cuando está en juego un posible problema de molestias, no parece prudente aplicar esta minoración para considerar que los niveles sonoros predichos no ocurrirán durante el 100 % del tiempo.

#### **Velocidad del viento y condiciones de estabilidad**

Con frecuencia se asume que existe una relación fija entre la velocidad del viento en el centro del aerogenerador y a una altura de referencia de 10 metros. Es importante resaltar que esta relación es válida en una atmósfera neutra. En la normativa no se presentan otras relaciones para sonido de turbinas eólicas en condiciones de atmósfera estable e inestable.

La validez del método de cálculo de la Norma incluye condiciones de inversión térmica moderada con la base a nivel de piso. De acuerdo con la Teoría de la Parcela, en condiciones estables el movimiento vertical de una parcela en la atmósfera se inhibe mientras que, en condiciones inestables, la parcela tiende a continuar su movimiento apartándose de la posición inicial. Las condiciones inestables normalmente se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación. Se cuenta con condiciones de atmósfera neutra durante los días con viento o cuando una capa significativa de nubes impide el calentamiento o enfriamiento rápido de la superficie terrestre. Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento es

escaso o nulo. La atmósfera estable durante la noche causa niveles de ruido de fondo menores que los esperados a nivel del suelo, por lo que el contraste durante la noche entre el ruido de fondo y el ruido provocado por los aerogeneradores es mayor, de acuerdo a las investigaciones realizadas. Estas condiciones están directamente relacionadas con el perfil de velocidades de viento en altura.

Para calcular la velocidad del viento a la altura del buje para luego determinar la potencia acústica emitida se supone, de acuerdo a las consideraciones de la norma, atmósfera neutra.

Si se considera que el perfil de velocidades varía con la altura en forma exponencial de la siguiente forma:

$$V_{h_2}/V_{h_1} = (h_2/h_1)^m$$

se observa el ajuste del exponente  $m$  a partir de datos experimentales (Figura 8.1), de acuerdo a van den Berg G.P. (2006).

Clases de Pasquill	Nombre	m
A	Muy inestable	0,09
B	Moderadamente inestable	0,20
C	Neutro	0,22
D	Levemente estable	0,28
E	Moderadamente estable	0,37
F	Muy estable	0,41

**Tabla 8.1. Clase de estabilidad y exponente m.**

Fuente: van den Berg, G.P. 2006

Según G.P. van den Berg (2006), estos valores de  $m$  conducen a niveles de potencia acústica más ajustados a la realidad, ya que los valores bibliográficos usuales del coeficiente  $m$ , que relaciona velocidades del viento a alturas diferentes en función de la clase de estabilidad atmosférica, no necesariamente proporcionan el mejor resultado.

Sin embargo, por lo general para las alturas de interés en el caso de aerogeneradores es más apropiado emplear el perfil de velocidades logarítmico, a través de la siguiente ecuación que relaciona la velocidad del viento  $v_h$  a una altura  $h$  y la velocidad del viento  $v_{ref}$  a una altura de referencia  $h_{ref}$  (usualmente de 10 m), como el perfil de viento logarítmico

que emplea una rugosidad de superficie  $z$  como único parámetro.

$$v_h = v_{ref} \frac{\log\left(\frac{h}{z}\right)}{\log\left(\frac{h_{ref}}{z}\right)}$$

Esta ecuación es una aproximación del perfil de viento en la capa límite turbulenta de una atmósfera neutra, cuando el aire se mezcla por la turbulencia resultante de la fricción con la superficie del suelo. En estados de atmósfera estable o inestable el perfil de viento cambia y no puede ser determinado por la ecuación anterior.

En una atmósfera estable, dada la velocidad a 10 m de altura, a la altura de buje del aerogenerador ocurre una velocidad de viento mayor que la correspondiente al perfil neutro. Esto genera un mayor nivel sonoro de emisión, y a su vez es menor el sonido inducido por el efecto del viento sobre la vegetación, ya que la velocidad del viento por debajo de la altura de 10 m es menor. En consecuencia, para encontrar la velocidad de viento a una altura  $h$  a partir de la velocidad a una altura de referencia  $h_{ref}$  se debe incorporar una corrección como se plantea en la ecuación (4), siendo  $\psi_m$  un término dependiente de la altura y de la longitud de Monin–Obukhov:

$$v_h = v_{ref} \frac{\left[ \log\left(\frac{h}{z}\right) - \psi_m \right]}{\left[ \log\left(\frac{h_{ref}}{z}\right) - \psi_m \right]}$$

En la Tabla 8.2. se presenta una estimación de la clase de estabilidad dependiendo de los parámetros antes mencionados, velocidad del viento a 10 metros de altura e índice de radiación neta. Las condiciones que no cubre la norma son las correspondientes a las clases F y G, que corresponden a índices de radiación -1 y -2. Estos valores corresponden a condiciones nocturnas con nubosidad mayor o menor que 3/8 respectivamente y velocidades del viento a 10 m de altura que pueden ser de hasta 1,75 m/s (6,3 km/h) en el primer caso y de hasta 3,25 m/s (11,7 km/h) cuando la nubosidad es inferior a 3/8, es decir, cuando el índice de radiación neta es de -2.

Velocidad del viento a 10m (m/s)		Índice relativo de radiación neta						
		4	3	2	1	0	-1	-2
0	0.75	A	A	B	C	D	F	G
0.75	1.75	A	B	B	C	D	F	G
1.75	2.75	A	B	C	D	D	E	F
2.75	3.25	B	B	C	D	D	E	F
3.25	3.75	B	B	C	D	D	D	E
3.75	4.75	B	C	C	D	D	D	E
4.75	5.25	C	C	D	D	D	D	E
5.25	6	C	C	D	D	D	D	D
6	99	C	D	D	D	D	D	D

**Tabla 8.2. Clases de estabilidad en función del índice de radiación neta y el rango de velocidades del viento (tomado de IMFIA, 2012)**

Si las condiciones atmosféricas son extremadamente estables, ocurre un fenómeno de inversión térmica y el aire a menor temperatura en superficie es cubierto por una capa de aire cálido que descansa sobre éste. En el caso de estabilidad, se disipa menos energía en turbulencia y, en consecuencia, la velocidad en altura es mayor que en los casos de atmósfera neutra e inestable, condición ésta que no está dentro de las de validez del método de cálculo.

En cuanto a la atenuación por efectos meteorológicos  $K_{met}$ , si bien este factor de corrección no es considerado en forma explícita en la Norma ISO 9613-2, CONCAWE si lo considera haciendo referencia a que la variación de la velocidad del viento y de los gradientes de temperatura de la atmósfera tienen un efecto importante sobre los niveles de presión sonora en el receptor.

### Precisión del método de cálculo

Con la información disponible en la Norma en referencia a la precisión del método, no es posible estimar el error que se obtendría de la aplicación de este método de cálculo si la fuente tiene una altura de 90 m ya que, aún si el receptor tuviera altura nula (0 m), el promedio superaría ampliamente los 30 m (altura considerada por la norma).

Se hace mención a que si la altura promedio entre emisor y receptor está entre 5 m y 30 m y la distancia entre ambos no supera los 100 m, el error de cálculo de la Norma es de  $\pm 1$  dB.

La Norma presenta la precisión del método para distancias entre emisor y receptor que no superan los 1000 m; para distancias mayores, en general las curvas aparecen con trazo cortado, indicando que los gráficos deben entenderse más bien como una tendencia.

## 9. CASO DE ESTUDIO

### 9.1. CAMPAÑAS DE MEDICIÓN Y RESULTADOS

#### 9.1.1. Ubicación del caso de estudio

Se consideró como caso de estudio el Parque Eólico de Kentilux, ubicado en el Departamento de San José en el km 42 por la Ruta 1 y muy próximo al Río de la Plata (ver Figura 9.1).

Este parque eólico se encuentra dentro del predio de la Estancia Magdalena (predio y parque privado). Al momento de realizar las mediciones estaba equipado con 5 aerogeneradores de 2 MW cada uno (5 – V90 – 2.0MW HH80), lo que totalizaba una potencia total instalada de 10 MW.

El parque fue ampliado con 4 aerogeneradores de 1,8 MW (4 – V100 – 1.8MW HH80), lo que completa a la fecha una potencia instalada de 17,2 MW.



**Figura 9.1. Parque Eólico “La Magdalena”.** Fotos: izquierda E. González; derecha F. Bianchi.

En el marco del Proyecto “Impacto acústico de aerogeneradores” como parte del convenio realizado entre la UdelaR y el MIEM en el año 2011, fue elegido el presente parque eólico para estudio y análisis como caso piloto, por sus características topográficas y accesibilidad. El parque se ubica en una zona de topografía principalmente plana, y con ello se reducen las variables y dificultades mayores que implicaría trabajar con una topografía compleja.

En la zona donde se encuentra este parque eólico existen diversas actividades de carácter agrícola-ganadero intensivo. Las parcelas de campo siempre están cultivadas y hay actividad frecuente de maquinaria y equipos de riego; también hay ganado. Esto determinó ciertas dificultades al momento de realizar las mediciones y limitó las posibilidades reales de realizar mediciones significativas de niveles sonoros asociados con el parque eólico.

En la siguiente imagen se aprecian los puntos de emplazamiento de cada aerogenerador, así como los centros poblados o de actividad en la zona circundante.



**Figura 9.2. Ubicación del Parque Eólico de Kentilux.**

Fuente: Kentilux S.A. 2010.

### 9.1.2. Campañas de medición

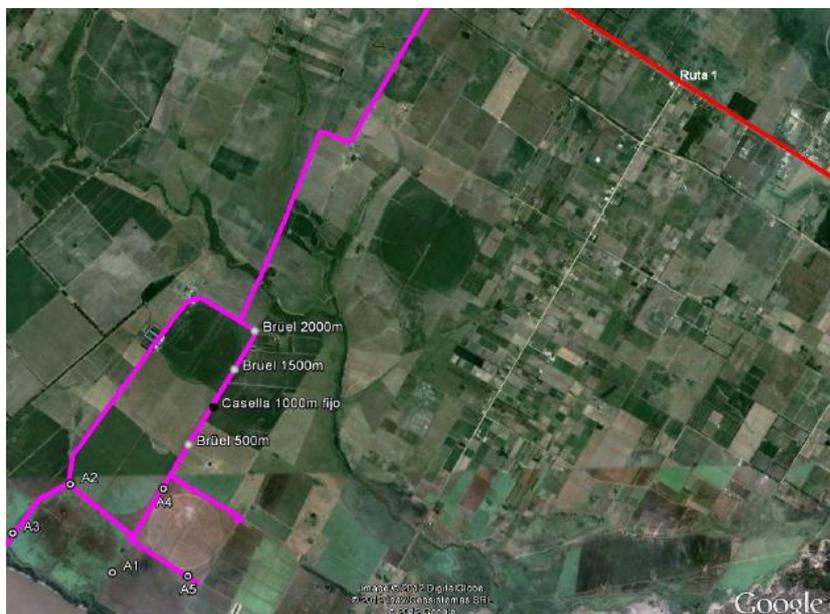
#### Puntos de medición

Para la medición se consideraron los puntos sobre el camino existente, coincidiendo con la dirección preferencial de los vientos en la zona (dirección NE como se puede ver en la Figura 9.2).

Los puntos de medición fueron los siguientes:

- A4: al pie del aerogenerador.
- Hacia el Suroeste de A4: a 100 m, 200 m, 300 m.
- Hacia el Noreste de A4: a 100 m, 300 m, 500 m, 1000 m y 1500 m.

La selección de los puntos de medición, donde se considera como referencia el aerogenerador 4 (A4) en la dirección NE sobre el camino existente y a barlovento, fue para no contar con la interferencia en las mediciones de las emisiones sonoras de los restantes aerogeneradores (ver Figura 9.3).



**Figura 9.3. Ubicación de fuentes y receptores considerados** (sobre imagen de Google Earth)

Se realizaron mediciones puntuales a lo largo del camino en horario diurno y nocturno durante el transcurso del año 2012. Se mantuvo un sonómetro fijo (Casella 633 C) para tener datos de larga duración y se efectuaron las mediciones manuales. El punto elegido para montar el

equipo de monitoreo continuo se ubicó a 1000 m del Aerogenerador A4 (ver Figura 9.3 y 9.4), en línea con el camino hacia la dirección Noreste.

Para poder caracterizar simultáneamente los niveles sonoros en distintos puntos, se realizaron mediciones a distintas distancias con un sonómetro portátil (Brüel&Kjaer), manteniendo en operación el equipo fijo Casella a 1000 metros de A4. De esta manera se obtuvieron registros de niveles sonoros simultáneos tanto a barlovento como a sotavento del aerogenerador.



**Figura 9.4. Parque Eólico Kentilux S.A.**

Foto: F. Bianchi.

Luego de un proceso de verificación y validación de los datos, se realizaron una serie de mediciones durante el año 2012, y finalmente las fechas consideradas para este análisis fueron:

**Campaña I. 19 y 20 de abril**

**Campaña II. 8 y 9 de mayo**

**Campaña III. 15 y 16 de mayo**

**Campaña IV. 17 de mayo**

Es importante mencionar la relevancia de realizar las mediciones por un período de tiempo extendido. IMFIA (2012b) sugiere un período mínimo de 24 horas de medición, para que sean consideradas las distintas condiciones meteorológicas a lo largo del día.



**Figura 9.5 Mediciones puntuales a distintas distancias.**

Fotos: F. Bianchi.

### Niveles de presión sonora medidos

Datos medidos en campo:

- Niveles de presión sonora para distancias de 100 m, 300 m, 500 m, 1000 m y 1500 m.
  - En cuanto al período de tiempo de las mediciones, se consideraron 30 minutos consecutivos, y luego se discretizaron cada 10 minutos, en los mismos intervalos de tiempo en que fue promediada la velocidad del viento.
  - Se trabajó con niveles de presión sonora en bandas de tercio de octava expresados en escala Z ( $L_{Z_{eq}}$ ). Dado que los resultados de los métodos de cálculo están expresados en dBA, al igual que valores recomendados y estándares, para comparar los resultados medidos con los calculados, fue necesario expresarlos y trabajar también en dBA.

- Dirección del viento.
- Velocidad del viento.
- Temperatura.
- Humedad Relativa.

A continuación se presentan los niveles sonoros medidos en campo en el Parque Eólico Kentilux, de acuerdo a lo mencionado (Fuente: IMFIA, 2012).

Nomenclatura adoptada:

- I. Campaña del 19 y 20 de abril
- II. Campaña del 8 y 9 de mayo
- III. Campaña del 15 y 16 de mayo
- IV. Campaña del 17 de mayo

Niveles sonoros,  $LZ_{eq}$  (en dB(Z)), medidos a una distancia de  $d = 100$  m para cada una de las campañas realizadas I, II, III y IV, y para cada banda de octava.

#	Frecuencia (Hz)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
I	50,4	51,2	55,2	42,9	42,8	42,3	37,1	33,7	29,3	22,1	12,6
II	52,1	54,9	57,4	46,9	47,8	47,2	45,1	43,4	38,2	30,4	24,2
III	60,6	61,5	56,1	50,1	51,0	49,8	46,4	43,8	38,1	28,5	13,9
IV	63,1	63,6	53,5	47,1	41,5	40,6	37,0	32,9	26,3	15,2	14,3

**Tabla 9.1 Niveles sonoros a una distancia de  $d = 100$  m.**

Niveles sonoros, en  $LZ_{eq}$  (en dB(Z)), medidos a una distancia de  $d = 300$  m para cada una de las campañas realizadas I, II, III y IV, y para cada banda de octava.

#	Frecuencia (Hz)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
I	50,1	52,5	48,4	40,1	33,7	34,5	29,0	24,4	19,5	12,5	12,1
II	50,1	52,5	48,4	40,1	33,7	34,5	29,0	24,4	19,5	12,5	12,1
III	61,9	61,9	52,9	46,3	40,4	40,9	36,6	32,3	23,6	12,5	11,9
IV	62,7	63,4	53,4	46,9	40,9	40,4	36,8	32,9	26,1	15,1	14,0

**Tabla 9.2 Niveles sonoros a una distancia de  $d = 300$  m.**

Niveles sonoros, en  $LZ_{eq}$  (en dB(Z)), medidos a una distancia de  $d = 500$  m para cada una de las campañas realizadas I, II, III y IV, y para cada banda de octava.

#	Frecuencia (Hz)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
I	49,3	50,7	49,4	39,3	32,1	27,1	22,7	18,3	17,6	12,5	12,0
II	49,8	52,1	48,5	41,3	34,2	31,6	28,1	24,0	18,9	13,8	17,1
III	61,8	61,6	50,9	44,0	39,0	35,3	31,4	26,0	17,7	12,3	12,0
IV	60,8	60,0	50,5	43,8	38,8	34,6	30,3	26,9	24,5	14,7	12,8

**Tabla 9.3 Niveles sonoros a una distancia de  $d = 500$  m.**

Niveles sonoros, en  $LZ_{eq}$  (en dB(Z)), medidos a una distancia de  $d = 1000$  m para cada una de las campañas realizadas I, II, III y IV, y para cada banda de octava.

#	Frecuencia (Hz)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
I	48,5	52,9	43,3	32,8	24,5	17,4	11,1	15,0	12,8	11,6	12,0
II	46,7	49,7	40,3	35,3	26,4	23,5	14,8	12,0	13,0	11,6	12,2
III	56,5	63,0	45,1	37,4	26,7	23,7	16,6	12,1	10,5	11,5	11,8
IV	57,0	58,6	48,5	37,9	30,6	23,9	17,3	13,6	22,9	12,6	12,3

**Tabla 9.4 Niveles sonoros a una distancia de  $d = 1000$  m.**

Niveles sonoros, en  $LZ_{eq}$  (en dB(Z)), medidos a una distancia de  $d = 1500$  m para cada una de las campañas realizadas I, II y III, y para cada banda de octava.

#	Frecuencia (Hz)										
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
I	47,6	53,3	46,0	27,8	17,7	13,0	8,4	11,9	12,4	11,4	11,9
II	40,7	46,3	36,6	30,7	17,9	15,2	10,1	14,6	13,8	11,3	11,9
III	55,6	56,7	48,7	31,9	20,3	21,2	16,8	14,5	11,7	11,5	11,8

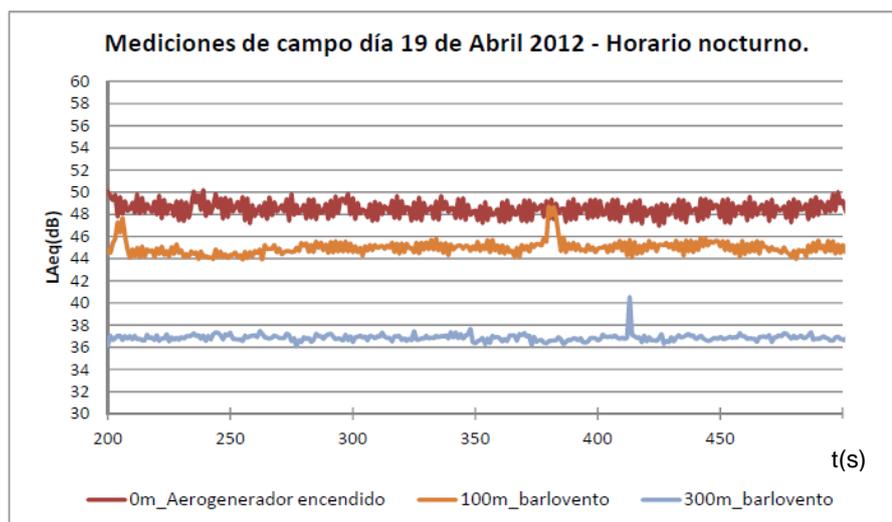
**Tabla 9.5 Niveles sonoros a una distancia de  $d = 1500$  m.**

## 9.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 9.2.1. Modulación de los niveles sonoros medidos

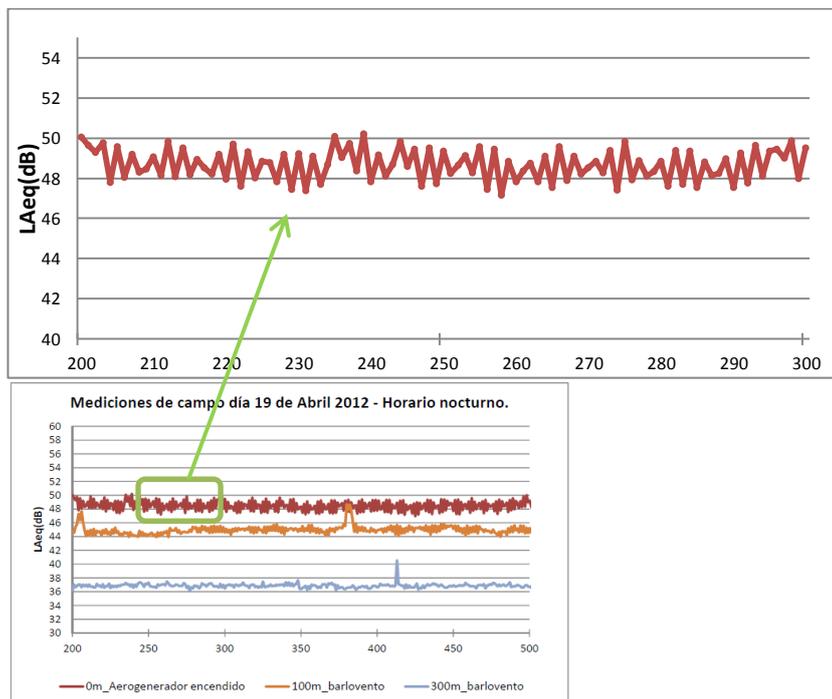
Las personas perciben las modulaciones con frecuencias del orden de 1 Hz, como ocurre en el habla (la periodicidad de las sílabas) y el ritmo musical. La modulación del nivel de sonido también se puede detectar cuando se está muy cerca de un aerogenerador, se puede oír el silbido de las palas al bajar.

En la Figura 9.5. se presentan resultados de las mediciones de campo para la *Campaña I: 19 de abril* a distintas distancias. De la figura se puede apreciar la comprobación de la modulación de las amplitudes de la emisión sonora del aerogenerador, uno de los resultados claves de van den Berg, G.P. (2006).



**Figura 9.6. Mediciones puntuales a distintas distancias; nótese la modulación de los niveles sonoros.** Fuente: IMFIA. 2012b.

A continuación se presenta una ampliación de una de las gráficas de la Figura 9.6. para observar de forma más clara como se aprecia la modulación de los niveles sonoros.



### 9.2.2. Comparación de niveles de presión sonora calculados y medidos

#### Cálculo de Niveles de Presión Sonora

Se trabajó en reproducir los datos obtenidos en las campañas de medición, aplicando dos de los programas que contaban con los mejores auspicios: WindPro y ExSound2000.

Los valores calculados por el modelo se comparan con el **L<sub>A90</sub> medido cada 10 minutos en campo**, en los mismos intervalos de tiempo en que fue promediada la velocidad del viento.

Para ambos programas, se selecciona el tipo de aerogenerador con el cual se desea trabajar, en este caso: V90, 2 MW, con altura de buje = 80 m.

Para la aplicación del programa WindPro, se elige el método de cálculo ISO 9613-2 general. El programa calcula el nivel de presión sonora esperado en los receptores solicitados. A modo de ejemplo se presenta en la Tabla 9.6 los niveles de presión sonora según la distancia a A4 y las variaciones de la velocidad del viento a 10 metros de altura.

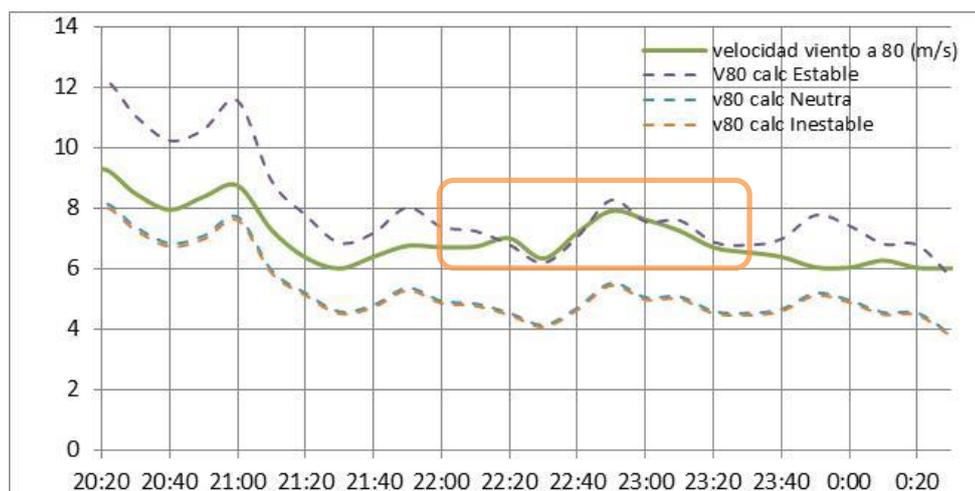
Velocidad del viento a 10 m de altura (m/s)	Potencia acústica emitida (dBA)	Nivel de presión sonora (dBA) aportado por aerogeneradores según distancia a A4				
		100 m	300 m	500 m	1000 m	1500 m
4	94,4	44,1	36,6	32,6	26,9	23,2
5	99,4	49,1	41,6	37,6	31,9	28,2
6	102,5	52,2	44,7	40,7	35,0	31,3
7	103,6	53,3	45,8	41,8	36,1	32,4
8	104	53,7	46,2	42,2	36,5	32,8
9	104	53,7	46,2	42,2	36,5	32,8
10	104	53,7	46,2	42,2	36,5	32,8
11	104	53,7	46,2	42,2	36,5	32,8
12	104	53,7	46,2	42,2	36,5	32,8

**Tabla 9.6. Niveles de presión sonora en receptores seleccionados calculados según ISO 9613-2 aplicando WindPro®**

### Condición de estabilidad atmosférica

Para conocer la condición de estabilidad atmosférica en cada intervalo de medición, se calcula la velocidad del viento a 80 m de altura a partir de la velocidad medida a 40 m en el mástil de Kentilux S.A. El cálculo se realiza suponiendo atmósfera estable, inestable y neutra.

Las curvas se superponen en un mismo gráfico (ver Figura 9.7.) con la velocidad medida a 80 m, lo que permite inferir por comparación la condición de estabilidad atmosférica en cada intervalo de medición.



**Figura 9.7. Evolución de la velocidad del viento a 80 m (medida y calculada). Fuente: IMFIA. 2012.**

## Diferencia entre los niveles sonoros medidos y estimados

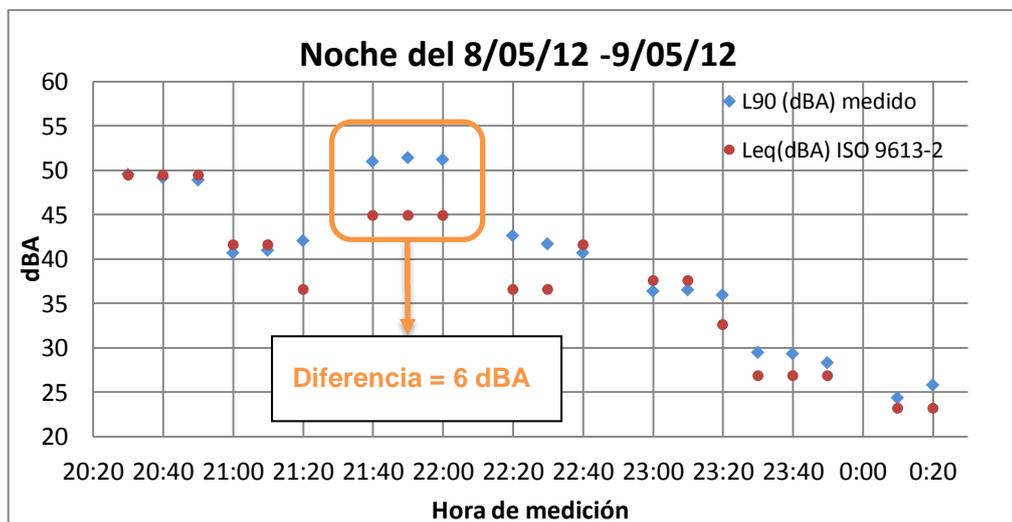
En este apartado se comparan los niveles de presión sonora calculados, considerando el método de cálculo de la ISO 9613-2 y del Nord2000 (utilizando los programas WindPro y ExSound respectivamente), con los valores medidos en campo.

### a) Niveles calculados utilizando ISO 9613-2

Se presenta a continuación un gráfico comparativo de los niveles sonoros medidos y calculados con la metodología de la ISO 9613-2, en escala A, para la campaña del 8 y 9 de mayo y para distintas distancias.

Si bien en algunos períodos de tiempo hay una coincidencia prácticamente total entre los valores calculados y los medidos (Figura 9.8), en otros los valores calculados son inferiores a los medidos, con lo cual, se puede decir que los valores calculados subestiman los niveles medidos (reales).

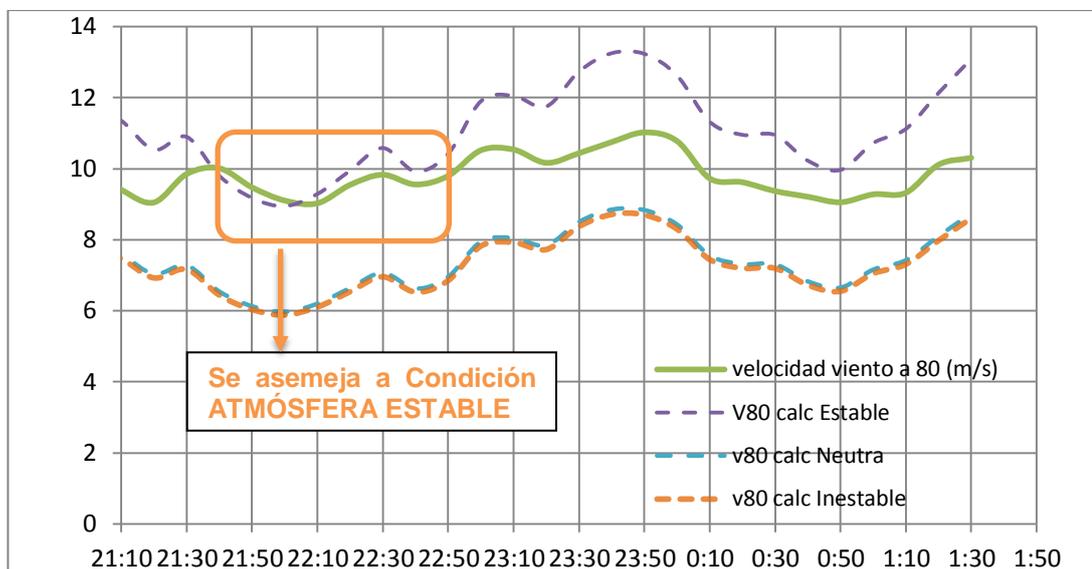
Se visualizan diferencias que pueden llegar a ser de hasta 6 dBA (período entre 21:40 – 22:00 horas), y lo que resulta más interesante de esto es que en este período se tienen condiciones que se asemejan a atmósfera estable (como se desprende de la Figura 9.9).



**Figura 9.8. Comparación de niveles de presión sonora calculados y medidos para distintas distancias. Fuente: IMFIA. 2012.**

Del análisis de la figura resulta que los datos medidos en esta fecha y hora, se asemejan a los calculados para condición de atmósfera estable (coincidiendo en el intervalo de 21:40 y 22:50 horas).

*Campaña: Noche del 8/05/12 - 9/05/12*



**Figura 9.9. Evolución de la velocidad del viento a 80 m (medida y calculada).** Fuente: IMFIA. 2012.

*b) Niveles calculados utilizando Nord2000*

A continuación se presenta a modo de ejemplo, una tabla comparativa con los niveles de presión sonora obtenidos con el programa ExSound2000 y los niveles medidos para distancias de 500, 1000 y 1500 metros desde el punto A4. Cabe destacar que la comparación se realizó también para las restantes campañas (fechas) de medición, siendo los resultados obtenidos muy similares se presenta a continuación y a modo de ejemplo la campaña de del 16 de mayo.

Distancia a A4 (m)	$L_{A,eq}$ exSOUND 2000 con absorción atmosférica	$L_{A,eq}$ exSOUND 2000 sin absorción atmosférica	$L_{A90}$ medido 16/05/12
500	35,9	39,1	40
1000	26,2	31,1	31
1500	10,8	15,8	30

**Tabla 9.7. Comparación de resultados obtenidos con ExSOUND 2000, para la campaña del 16 de mayo de 2012.**

A las distancias que se está realizando el cálculo es conceptualmente necesario considerar la absorción atmosférica, más allá de que numéricamente parezca más exitosa la predicción si se la deja de lado.

En lo que refiere a distancias de 1500 m del aerogenerador, resulta una diferencia considerable entre el calculado y el medido lo cual puede

deberse a que para el cálculo de los niveles sonoros no estamos considerando el ruido de fondo existente.

*Diferencia entre los niveles medidos y estimados según la distancia a la fuente:*

De las mediciones realizadas resulta que a mayor distancia de la fuente, las diferencias entre los valores medidos y estimados son mayores.

Es en este sentido que de acuerdo al estudio realizado por IMFIA (2012b), se propone como método de cálculo una ecuación de propagación hasta cierta distancia cercana a la fuente (de 100 metros) y luego de esta distancia se proponen los coeficientes “n” de la atenuación por divergencia geométrica que mejor ajustan al caso de estudio.

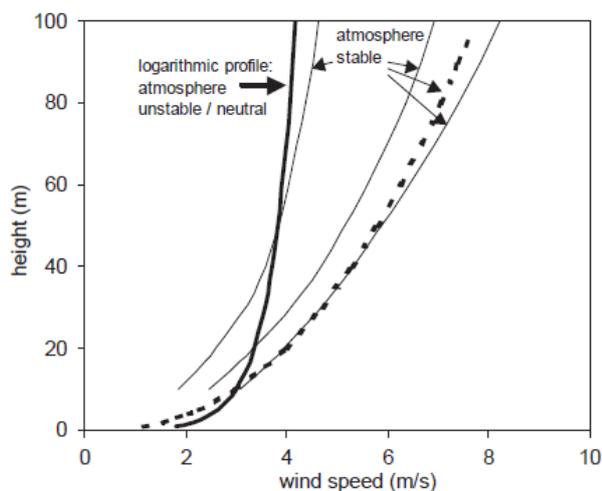
### **9.2.3. Incidencia de las condiciones atmosféricas en la variación de los niveles sonoros**

Las diferentes condiciones de estabilidad de la atmósfera tienen implicancias en las velocidades del viento a la altura de buje y en consecuencia los niveles de presión sonora varían en este sentido.

Para el caso de estabilidad atmosférica, que ocurre mayormente durante la noche cuando el viento es escaso o nulo a nivel del suelo, causa mayores velocidades del viento a la altura del aerogenerador que para el caso de estado neutro y un perfil vertical del viento de tipo logarítmico. Como la energía acústica emitida está directamente relacionada con la velocidad del viento a la altura del buje, en consecuencia, para el caso de atmósfera estable los niveles de presión sonora en inmisión en los receptores considerados resultan mayores que los esperados. Si se suma a lo anterior que en atmósfera estable durante la noche se tiene niveles de ruido de fondo menores que los esperados, el contraste durante la noche entre el ruido de fondo y el ruido provocado por los aerogeneradores es mayor, lo que puede explicar las molestias generadas (van den Berg, 2006).

Cuando las condiciones son extremadamente estables, ocurre el denominado fenómeno de inversión térmica y el aire a menor temperatura en superficie es cubierto por una capa de aire cálido que descansa sobre éste.

Estas condiciones están directamente relacionadas con el perfil de velocidades de viento en altura. En el caso de estabilidad, se tiene significativamente menor mezcla y, en consecuencia, la velocidad en altura es mayor que en los casos de atmósfera neutra e inestable, tal como se ilustra en la Figura 9.10., generando mayores emisiones sonoras.



**Figura 9.10. Perfiles de viento medidos en una atmósfera estable (línea fina), y perfil de viento logarítmico para atmósfera neutra e inestable (línea gruesa). Fuente: van den Berg, GP. 2006.**

#### **9.2.4. Análisis de los fenómenos de propagación**

En general la propagación del sonido en campo abierto se ha estudiado desde una base experimental y de forma cualitativa, ya que el fenómeno de propagación sonora presenta una gran complejidad y cantidad de variables que intervienen en el problema que dificultan su análisis en forma cuantitativa. Esto hace que en la actualidad no se cuente con un único modelo de predicción de la propagación sonora en espacios abiertos. En lo que refiere a aerogeneradores no se cuenta con modelos específicos de predicción de la propagación de las ondas sonoras en espacios abiertos; y además, algunos modelos que se suelen aplicar con ese fin, contemplan las condiciones atmosféricas como un factor determinante en la propagación o atenuación del ruido ambiental y otros, no lo contemplan explícitamente.

#### **Representación de la Fuente Emisora**

El sonido que perciben los receptores acústicos depende directamente de las características de emisión de las fuentes generadoras de ese sonido, pero también depende de los procesos de transmisión a los que se ve sometido el sonido desde los puntos de emisión hasta los puntos de recepción.

En primer lugar se ha de considerar la forma en que se representa la propia fuente emisora, por ejemplo fuente plana, lineal o puntual, puesto que ello determina la ley con que se va a atenuar el nivel de presión sonora a medida que aumenta la distancia a la fuente.

Además de la atenuación por divergencia hay otros fenómenos de relevancia que también afectan a la propagación del sonido en cuanto a su magnitud y/o dirección, como son la refracción, la absorción, la reflexión y la difracción.

Los fenómenos de propagación pueden conducir a leyes de decaimiento de tipo cilíndrico (si se trata de una fuente lineal), esférico (fuente puntual) o plano (fuente plana).

En este punto se analiza a continuación las variaciones de los niveles sonoros con la altura considerando por un lado el caso de fuente puntual, y por otro el caso de fuente lineal. El análisis se realiza para las distintas condiciones de estabilidad de la atmósfera.

### Fuente Puntual

En este primer análisis se considera fuente puntual o decaimiento cuadrático.

Para calcular el nivel de presión sonora explicitando cómo incide en él una variación en el valor de Z, primero se debe escribir  $L_p$  en función de  $L_w$ , la impedancia acústica Z y la distancia d a la fuente, siendo  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ :

$$L_w = L_I + 10 \log \frac{S}{S_0} = 10 \log \left( \frac{I_{old}}{I_0} \cdot \frac{I_{new}}{I_{new}} \right) + 10 \log \frac{S}{S_0} = 10 \log \left( \frac{I_{new}}{I_0} \cdot \frac{I_{old}}{I_{new}} \right) + 10 \log S = L_{I,new} + 10 \log \left( \frac{I_{old}}{I_{new}} \right) + 10 \log S = L_{I,new} + 10 \log \left( \frac{Z_{new}}{Z_{old}} \right) + 10 \log S$$

Siendo numéricamente  $L_I = L_p$  y considerando  $z_{old} = 443 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  se obtiene:

$$L_{p,new} = L_w - 10 \log \left( \frac{Z_{new}}{Z_{old}} \right) - 10 \log S = L_w - 10 \log (z_{new}) + 26 - 20 \log d - 11$$

$$\mathbf{L_p = L_w - 10 \log z - 20 \log d + 15}$$

### Fuente Lineal

En un segundo caso se considera fuente lineal (o propagación cilíndrica) y se calcula el nivel de presión sonora ( $L_p$ ), para un nivel de potencia sonora  $L_w = 100 \text{ dBA}$ .

La ecuación para calcular el nivel de presión sonora para el caso de fuente lineal es la siguiente:

$$\mathbf{L_p = L_w - 10 \log z - 10 \log d + 18}$$

Para el estudio se supone una potencia de la fuente de  $L_W = 100$  dBA y se calculan los niveles de presión sonora a distancias de 100 y 1000 metros de la fuente.

A continuación se presenta, a modo de ejemplo, los niveles resultantes para la *clase de estabilidad A*. Cabe resaltar que se realizó el cálculo de los niveles de presión sonora para las distintas clases de estabilidad; con motivo de que no se aprecian variaciones sustantivas según la clase de estabilidad, se presenta a continuación y a modo de ejemplo para la clase de estabilidad A.

h (m)	T (°C)	Decaimiento cuadrático		Decaimiento lineal	
		Lp _ 100 m (dBA)	Lp _ 1000 m (dBA)	Lp _ 100 m (dBA)	Lp _ 1000 m (dBA)
10	19,8	49	29	72	62
100	18,1	49	29	72	62

**Tabla 9.8. Niveles de presión sonora para altura de 10 y 100 m y para distancia de 100 y 1000 metros de la fuente.**

Como se puede observar en la Tabla 9.8, se calcularon los niveles de presión sonora a 100 y 1000 metros de distancia a la fuente para alturas de 10 y 100 metros. Para los cálculos se considera el gradiente de temperatura definido según las categorías de Pasquill Gifford de acuerdo al estado de estabilidad de la atmósfera.

De acuerdo a los valores obtenidos, se puede observar que no se aprecian variaciones de los niveles con la altura.

Los valores resultantes para el caso de decaimiento cuadrático no resultan significativos en cambio para el caso lineal los niveles sonoros resultan considerablemente mayores que para el caso de fuente puntual, siendo de 62 dBA a una distancia de 1000 m.

#### *Apreciaciones:*

De acuerdo al análisis realizado, los niveles presión sonora no varían significativamente para las distintas condiciones atmosféricas (atmósfera estable, neutra e inestable), como tampoco resultan variaciones significativas para las distintas alturas de medición y en consecuencia para la variación de la temperatura con la altura.

Sin embargo se desprenden algunos resultados muy interesantes, como ser:

- *Los niveles de presión sonora son considerablemente mayores para el caso de fuente lineal que para el caso de fuente puntual.*
- *Los niveles de presión sonora resultan perceptibles a 1 km de distancia para el caso de fuente lineal.*

### Factores de atenuación de los niveles sonoros

A continuación se presenta un análisis de los términos de atenuaciones de los niveles sonoros considerados por la Norma y aplicables al caso de estudio.

#### e) Divergencia geométrica

La disminución de los niveles de presión sonora que tiene lugar a medida que se incrementa la distancia a una fuente emisora es dependiente de la forma de los frentes de onda, es decir, del tipo de emisión (fuente puntual, lineal o plana).

A continuación se presentan en forma resumida y comparativa la forma de cálculo que consideran las normas presentadas en el capítulo 6:

	CONCAWE	ISO 9613-2	AU 4959–2010 (Australia)	NZS 9808:2010 (Nueva Zelanda)
<b>Div. Geom.</b>	$10 \log (4\pi d^2)$ $= 20 \log (d/d_0) + 11$		$10 \log (2 \pi d^2)$	$20 \log(d) + 11$
<b>Obs.</b>	Considera fuente puntual. Adopta una ley de decaimiento cuadrática.		Se considera una fuente que se propaga en un semi-espacio.	Adopta la metodología de la Norma ISO 9613-2, con ciertas consideraciones particulares.

**Tabla 9.9. Forma de cálculo de la atenuación por divergencia geométrica para las cuatro metodologías de cálculo.**

Si se considera al emisor como *fente puntual*, y tal como se ha expuesto en apartados anteriores, la presión sonora disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente. Introduciendo los valores de los términos constantes (densidad del aire y velocidad del sonido) y expresando el resultado en forma de niveles (dB), la atenuación debida a este fenómeno se puede calcular como:

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

Donde  $r$  es la distancia desde la fuente puntual en metros.

Si se considera al emisor como *fente lineal*, que genera frentes de onda cilíndricos, la presión sonora disminuye con la distancia a la fuente, y entonces la atenuación correspondiente a una distancia  $r$  de la fuente (en metros) se puede calcular como:

$$A_{\text{div}} \text{ (dB)} = 10 \log r + 7,9$$

A modo de ejemplo y para obtener valores comparativos de atenuaciones para ambos tipos de fuente y su comportamiento a medida que nos alejamos del emisor, se presenta a continuación una tabla comparativa de los valores de atenuación de los niveles sonoros que resultan de considerar fuente puntual y fuente lineal, y distancia a la fuente de 100 y 1000 metros.

---

	FUENTE PUNTUAL	FUENTE LINEAL
	$A_{\text{div}} \text{ (dB)} = 20 \log r + 11$	$A_{\text{div}} \text{ (dB)} = 10 \log r + 7,9$
$r = 100 \text{ m}$	51	28
$r = 1000 \text{ m}$	71	38

---

**Tabla 9.10. Atenuación por divergencia geométrica para dos distancias dadas, según se considere fuente puntual o lineal.**

#### **Apreciaciones:**

El método de cálculo generalmente utilizado para calcular la atenuación por divergencia geométrica es la metodología que propone la Norma ISO 9613-2, la cual considera fuente puntual o propagación esférica.

Si se trata de una fuente lineal, como se puede apreciar en la tabla anterior, las diferencias con la propagación cuadrática son relevantes (de la mitad del valor). Por lo que, si al aerogenerador como emisor se le asigna una ley de decaimiento lineal, los valores de niveles de ruido en inmisión calculados resultarían significativamente mayores que los resultantes de aplicar la norma ISO.

### f) Absorción atmosférica

Se considera una temperatura de 20°C y humedad relativa de 75 % característica de la zona, de lo que resultan los siguientes coeficientes  $\alpha$  de atenuación atmosférica por banda de octava normalizada (de acuerdo a la Norma ISO 9613-2) y la atenuación correspondiente para distancias de 100 metros y 1000 metros.

	f (Hz)						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$ (dB/km)	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9
$K_{atm}$ (d = 100 m)	0,01	0,03	0,11	0,28	0,5	0,9	2,29
$K_{atm}$ (d = 1000 m)	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9

**Tabla 9.11. Atenuación por absorción atmosférica para dos distancias dadas y para frecuencias en bandas de octava.**

El coeficiente de absorción atmosférica se expresa en dB/km en cada banda de octava, y depende de la temperatura y de la humedad relativa ambiente. Los factores de atenuación, de acuerdo a la Norma ISO, no deben ser mayores a 15 dB, por lo que el valor para 4 kHz a una distancia de 1km de acuerdo a la Norma se debe considerar de 15 dB.

Los niveles de atenuación que se logran sólo son significativos en las altas frecuencias y a grandes distancias de la fuente, pero es justamente a grandes distancias que las diferencias entre los valores medidos y los esperados acusan mayores diferencias. Las bajas frecuencias no sufren absorción significativa por parte de la atmósfera.

#### Apreciaciones:

La atenuación de las ondas sonoras en ambientes tanto abiertos como cerrados es diferente para sonidos de diferente frecuencia: los sonidos de baja frecuencia sufren una atenuación mucho menor que los de alta frecuencia. Si se considera la propagación de las emisiones acústicas de los aerogeneradores, la distancia a la que las componentes de frecuencias inferiores a 200 Hz pueden ser audibles –es decir, superan el umbral de la audición para esas frecuencias- puede ser de algunos kilómetros. Por lo tanto, para frecuencias bajas el término de atenuación

por absorción atmosférica podría ser despreciado. Asimismo, se considera que el término puede despreciarse para distancias cercanas a la fuente (100 metros).

Es importante mencionar que para el cálculo de los niveles de ruido ambiental, el coeficiente de atenuación atmosférica debe estar basado en valores promedio determinados para las características del ambiente de cada localidad. Por lo que se recomienda estimar los coeficientes para el caso de Uruguay. En esta línea resulta interesante tener presente que para el caso de interés de aerogeneradores las condiciones de temperatura y humedad relativa, no tienen por qué ser las mismas en emisor y receptor, por lo que es necesario ser muy cuidadoso a la hora de seleccionar las condiciones de cálculo.

### **g) Efectos del terreno**

En lo que hace a efectos del terreno sobre la propagación del sonido, las consideraciones generales en cuanto al tipo de suelo tomadas por CONCAWE, las cuales son similares a la Norma ISO 9613-2, considera:

1. Suelo acústicamente duro (por ejemplo, agua u hormigón) en que la corrección es simplemente -3 dB para todas las bandas de frecuencia y para todas las distancias, suponiendo radiación hemisférica desde la fuente;
2. Suelo con impedancia acústica finita, para el que se dan relaciones de atenuación empíricas en función de la distancia a la fuente y la frecuencia. Se consideran las bandas de octava normalizadas centradas entre 63 Hz y 4.000 Hz, y se presentan resultados tanto en forma gráfica como a través de ecuaciones sencillas.

### **Consideraciones de la Norma ISO 9613-2:**

- Es interesante notar que para la determinación de la atenuación la *Norma ISO 9613-2* propone métodos distintos según se trate de distancias cortas (inferiores a 100 metros) o de largas distancias (superiores a 100 metros).
- Si bien no hay ninguna recomendación explícita acerca de la altura de la fuente ni la del receptor, es de hacer notar que esta corrección sólo tiene sentido cuando ninguno de ambos supera los 10 m de altura, por lo que no resulta apropiada la metodología de cálculo planteada para el caso de aerogeneradores de gran porte.
- Terreno relativamente plano, ya sea horizontal o con una pendiente continua. Este requisito no se cumple en muchos de los casos de

interés como, por ejemplo, los vinculados a propagación en topografías complejas (serranías).

### **Simplificación analizada por el Reporte 4/81 de CONCAWE:**

En la Figura 6.2 se presenta las curvas de atenuación en función de la distancia a la fuente que incluye el Reporte de CONCAWE para las bandas de octava normalizadas con frecuencias centrales entre 63 Hz y 4000 Hz. El Reporte indica explícitamente que no deben ser empleadas para distancias inferiores a 100 m entre fuente y receptor y para velocidades del viento hasta 7 m/s.

Asimismo, el Reporte plantea simplificaciones en cuanto a este factor, considerando la corrección  $k_{gr}$  como independiente de la distancia, constatando que no ocurría mayor pérdida de precisión (en la tabla 6.4. se presenta el factor por bandas de octava).

### **De acuerdo a Kaliski y Duncan (2008):**

Es interesante hacer referencia que de los estudios y mediciones realizadas por Kaliski y Duncan resulta que cuando no se considera la absorción del terreno los resultados son mejores.

### **IMFIA (2012b):**

De acuerdo a los estudios realizados por el IMFIA (2012b), con motivo de que es una fuente de gran altura, y en particular para el caso de estudio de terreno plano, no se considera relevante la incidencia de este factor de atenuación.

### **Consideraciones:**

Para el caso de aplicación no es considerado este término como factor de atenuación debido a que no resulta relevante la incidencia del terreno como factor de atenuación en el caso de estudio: fuente de gran altura y topografía plana.

Sin embargo y por otro lado, para el caso de topografía compleja se requiere analizar este caso en particular, por lo que se recomienda el estudio en profundidad de este factor. Para ello se sugiere analizar el modelo de CONCAWE.

#### **h) Atenuación por presencia de apantallamientos o barreras**

Como las condiciones del caso de estudio son: terreno plano y campo libre, sin presencia de obstáculos ni barreras, no se cuenta con este factor de atenuación.

En cambio para el caso de terreno ondulado no se puede despreciar los efectos del terreno. La ISO 9613-2 plantea una metodología de cálculo para este término para topografía compleja.

## 10. APLICABILIDAD DE LA NORMA ISO 9613-2

### 10.1. HIPÓTESIS Y CONSIDERACIONES DE LA ISO

En un análisis general, y como fue mencionado en la sección 8.1. y estudiado (cuanti-cualitativamente) en el capítulo 9 a través de la interpretación de datos y el análisis de los fenómenos de propagación, se resume a continuación las hipótesis y consideraciones de la Norma que no serían aplicables al caso de interés de aerogeneradores y en particular a las condiciones en Uruguay:

Hipótesis y consideraciones de la Norma ISO 9613-2	Aplicabilidad al caso de aerogeneradores
<b>Fuente puntual</b>	<p>No resulta representativo el considerar al emisor “aerogenerador” como una fuente puntal (siendo la fuente principal de ruido los álabes de la turbina y la escala espacial de interés 1 a 3 km).</p> <p>No resulta apropiado considerar una distancia de referencia de 1 metro (debajo del aerogenerador).</p>
<b>Topografía del terreno plano</b>	<p>No es aplicable a topografía compleja. Si bien para el caso de estudio puntual de la tesis (topografía plana) es aplicable, en general la situación corriente de aplicación para el caso de aerogeneradores es la topografía compleja.</p>
<b>Condiciones de atmósfera neutra o inestable</b>	<p>La mayor parte de los problemas en cuanto a molestias en campo abierto, ocurren para atmósfera fuertemente estable.</p>
<b>Velocidad del viento</b>	<p>Las condiciones de aplicación de la Norma (velocidad del viento entre 1 y 5 m/s medida a una altura de entre 3 y 11 m) no corresponden al rango de funcionamiento de aerogeneradores (entre 6 y 15 m/s a una altura de 10 m).</p>

## 10.2. FACTORES DE ATENUACIÓN Y APLICABILIDAD DEL MÉTODO DE CÁLCULO AL CASO DE AERGENERADORES Y EN URUGUAY

Las hipótesis consideradas por la Norma condicionan la metodología de cálculo empleada. Es por ello, que los factores de atenuación considerados por la Norma se ven directamente influenciados por las hipótesis establecidas.

A continuación se resumen las apreciaciones a resaltar en cuanto a los factores de atenuación de los niveles sonoros considerados por la Norma. También se analiza su aplicabilidad al caso de estudio de aerogeneradores y en el Uruguay.

Factores de atenuación de los niveles sonoros de la Norma ISO 9613-2	Aplicabilidad del método de cálculo al caso de aerogeneradores y en Uruguay	Recomendaciones & comentarios
<b>Divergencia geométrica</b>  $(A_{div})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La norma considera fuente puntual o propagación esférica para el cálculo de este factor lo que no resulta apropiado para el caso.</li> <li>• Del análisis resulta que se estaría subestimando significativamente el nivel de ruido en inmisión.</li> <li>• No resulta apropiado para este caso considerar una distancia de referencia de 1 metro (debajo del aerogenerador).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se recomienda considerar al aerogenerador como fuente puntual.</li> <li>• No se recomienda considerar decaimiento cuadrático.</li> </ul>
<b>Absorción atmosférica</b>  $(A_{atm})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se presentan discrepancias en cuanto a la forma de cálculo.</li> <li>• El término de atenuación puede ser despreciado para frecuencias bajas y para distancias cercanas a la fuente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar las condiciones de cálculo de acuerdo al sitio de implantación; las condiciones de temperatura y humedad no tienen por qué ser las mismas en emisor y receptor.</li> <li>• Coeficiente de atenuación atmosférica debe estar basado en</li> </ul>

		valores promedio determinados para cada localidad.
<b>Efectos del terreno</b> <b>(<math>A_{gr}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No tiene sentido su aplicación para el caso de aerogeneradores; debido a que para el cálculo de este factor la norma considera topografía plana y altura menor a 10 metros tanto para el emisor como para el receptor.</li> </ul>	Para el caso de topografía compleja se recomienda el estudio en profundidad de este factor calculado con la metodología de cálculo de la ISO; y se sugiere también analizar el modelo de CONCAWE.
<b>Atenuación por presencia de barreras</b> <b>(<math>A_{barr}</math>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siendo el caso de estudio - topografía plana sin presencia de barreras – no fue considerado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La norma plantea una metodología de cálculo, que se recomienda su análisis detallado.</li> <li>De acuerdo a la norma la atenuación no ser mayor que 20 dB en el caso de difracción única (es decir, barreras finas) y 25 dB en el caso de doble difracción (barreras gruesas).</li> </ul>
<b><math>A_{fol}</math>, <math>A_{site}</math>, <math>A_{hous}</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No son considerados, por no aplicarse al caso de interés de aerogeneradores en ambiente rural.</li> </ul>	En caso de otras condiciones, como topografía compleja o presencia de edificaciones de gran porte deben ser considerados.
<b>Factores o efectos no considerados</b>	<p>Diferencias mayores entre lo medido y lo calculado en atmósfera estable.</p> <p>A mayor distancia de la fuente las diferencias entre los valores medidos y estimados son mayores (la Norma utiliza el mismo método de cálculo para las distintas distancias desde la fuente).</p>	<p>Se sugiere considerar la condición de estabilidad de la atmósfera.</p> <p>Otras metodologías o propuestas de cálculo, como IMFIA (2012b), considera distintas ecuaciones de propagación de acuerdo a la distancia a la fuente.</p>

*Resultados y conclusiones:*

Del análisis realizado de las hipótesis y consideraciones de la norma, y de los resultados presentados en las tablas anteriores, se puede inferir que la metodología de cálculo de la norma no debería ser aplicada al caso de aerogeneradores y en particular a las condiciones en Uruguay.

## **11. REFLEXIONES FINALES**

### **11.1. CONCLUSIONES GENERALES**

En el presente capítulo se mencionan las conclusiones generales de esta tesis.

Se espera a través del presente trabajo, contribuir a mejorar las herramientas disponibles para la predicción de los niveles sonoros y la evaluación ambiental de parques eólicos en el Uruguay, en particular a través del análisis de la aplicabilidad de la metodología de cálculo de la Norma ISO 9613 Parte 2 para la predicción de los niveles sonoros asociados con aerogeneradores en ambiente rural.

#### **11.1.1. Sobre la aplicabilidad de la ISO al caso de aerogeneradores**

Diversos investigadores, como G.P. van den Berg, Kaliski & Duncan, entre otros, han constatado que la norma ISO 9613-2, para el caso de aerogeneradores de gran porte, requiere de aportes sustanciales en el mejoramiento de los parámetros considerados. Por lo que es necesario continuar avanzando en el desarrollo de un método de cálculo más preciso.

#### **Hipótesis y consideraciones de la norma**

- Ecuación de onda como punto de partida

La norma ISO parte de los principios básicos de la ecuación de onda y considera tres aspectos que a priori se considera no deberían ser asumidos para el caso de aerogeneradores, y se recomienda el análisis específico:

1. Fluido en reposo
2. Flujo no turbulento
3. Procesos adiabáticos

- Tipo de fuente puntual

La norma considera al emisor como una fuente puntual, y en este caso la propagación del sonido sigue una ley de decaimiento cuadrático con la distancia.

Desde el punto de vista conceptual, y presentado en la bibliografía por distintos autores, dado que la fuente principal de emisión de ruido aerodinámico son los álabes de la turbina y a la escala espacial de interés

(primeros 2 a 3 km desde el pie del aerogenerador) no puede considerarse que se trate de una fuente puntual.

- Topografía del terreno

La norma es válida para topografía plana; no siendo aplicable en su totalidad para los casos de topografía compleja, sitios para la ubicación de aerogeneradores más apropiada que coincide con las condiciones de mayor viento.

- Condiciones de estabilidad de la atmósfera

La mayor parte de los problemas en cuanto a molestias en campo abierto, ocurren para atmósfera fuertemente estable. Sin embargo, el método de cálculo de la Norma corresponde a condiciones de “atmósfera neutra, inestable o inversión térmica moderada con la base a nivel de piso”.

- Velocidad del viento

Las condiciones de aplicación de la Norma son para velocidad del viento entre 1 y 5 m/s medida a una altura de entre 3 y 11 m sobre el nivel del piso, las cuales no corresponden al rango de funcionamiento de aerogeneradores, entre 6 y 15 m/s a una altura de 10 m.

## **Método de cálculo de los niveles sonoros**

### **I. Estimación de la potencia acústica emitida**

La potencia acústica emitida se obtiene considerando atmósfera neutra. Siendo la condición crítica, atmósfera estable, este valor de potencia acústica emitida resulta subestimado considerando atmósfera neutra.

Por lo que, se recomienda considerar atmósfera estable para la estimación de la potencia acústica emitida.

### **II. Estimación de los factores de atenuación de los niveles sonoros**

- Divergencia geométrica ( $A_{div}$ )

Como se hace referencia en el apartado anterior, hipótesis de la norma, la cual considera fuente puntual o propagación esférica para el cálculo de este factor. Debido a las características del tipo de fuente, no se recomienda considerar al aerogenerador como fuente puntual.

Por otro lado, en lo que refiere a la consideración de 1m como distancia de referencia, no resulta apropiada esta consideración, debido a que nos encontramos debajo del aerogenerador a esta distancia. Se recomienda considerar 10 metros como distancia de referencia.

- Absorción atmosférica ( $A_{atm}$ )

En lo que refiere al término de absorción atmosférica, no se presentan discrepancias en cuanto a la forma de cálculo presentada por la norma.

- Efectos del terreno ( $A_{gr}$ )

La norma considera terreno plano y solo es posible la aplicación de la metodología de la ISO para los casos en que la altura del emisor y receptor no superan los 10 metros de altura.

Si bien para el caso de aerogeneradores en topografía plana se considera que no es relevante la incidencia del terreno como factor de atenuación por la altura de la fuente, para el caso de topografía compleja se recomienda el estudio en profundidad. Para ello se sugiere analizar el modelo de CONCAWE.

- Atenuación por presencia de barreras ( $A_{barr}$ )

Si bien para el caso de estudio (topografía plana sin presencia de barreras) no se analizó este factor de atenuación, la norma plantea una metodología de cálculo específica que se recomienda su análisis detallado.

- Atenuaciones debidas a la vegetación ( $A_{fol}$ ), a presencia de emplazamientos industriales ( $A_{site}$ ) y edificaciones ( $A_{hous}$ )

Para el caso de interés de aerogeneradores de gran porte instalados en ambientes rurales las atenuaciones debidas a la vegetación, a presencia de emplazamientos industriales y edificaciones carecen de interés.

### **Efectos y factores no considerados explícitamente por la Norma**

- Condiciones Meteorológicas:  $K_{met}$

Este factor permite en su método de cálculo considerar las condiciones climáticas, incluidos los movimientos turbulentos de la atmósfera; por lo que a priori no se considera prudente descartar su consideración en el método de cálculo. Es considerado por el modelo de CONCAWE y el Nord2000.

- Efectos por la altura de la fuente ( $K_{\text{height}}$ ) y refracción atmosférica

Esta corrección toma en cuenta la incidencia en el terreno de las emisiones, y su refracción. Resulta relevante su consideración para el caso de topografía compleja. Es considerado por el modelo de CONCAWE y Nord2000.

- Ponderación frecuencial en las mediciones

Las bajas frecuencias son muy castigadas en la escala de ponderación frecuencial A, por lo que se pueden obtener niveles aparentemente admisibles expresados en dBA pero que de todos modos son susceptibles de ocasionar molestias a grandes distancias debido a su composición espectral. Por lo que, no es recomendable trabajar en escala A para este tipo de emisor.

#### *Conclusión:*

Como conclusión general, por lo explicitado recientemente en el análisis de las hipótesis y consideraciones de la norma, y del método de cálculo, se puede inferir que la metodología de cálculo que plantea la norma no sería aplicable al caso de aerogeneradores.

#### **11.1.2. Sobre la aplicabilidad de la ISO al caso de estudio en Uruguay**

Del caso de estudio resultan los siguientes puntos a destacar:

- **Modulación de la emisión sonora**

Se observa y comprueba la modulación de las amplitudes de la emisión sonora del aerogenerador, lo que se asocia con el giro de la pala y la generación de turbulencia en la interacción pala - torre. Lo que evidencia la presencia de un fenómeno que no está siendo considerado por la norma.

- **Diferencias entre lo medido y lo calculado**

Del análisis del caso de estudio resulta de los datos medidos y de los valores calculados a partir del método de la norma, se constata lo mencionado por van den Berg, en lo que refiere a la subestimación de los valores reales ante la ocurrencia de ciertas condiciones ambientales.

En particular para en determinados períodos de tiempo – que coinciden con condiciones de atmósfera estable- los valores calculados a partir del método de cálculo de la Norma ISO son inferiores a los medidos en campo, con diferencias que pueden llegar al orden de los 6 dBA. Esto

evidencia que la condición e hipótesis establecida por la Norma de atmósfera neutra presenta problemas en cuanto a su representatividad para el caso de estudio.

- **Método de cálculo de los niveles sonoros**

- **Estimación de los factores de atenuación de los niveles sonoros**

En cuanto a la estimación de los factores de atenuación por la norma se resaltan los siguientes resultados que fueron obtenidos a través del análisis de los datos del caso de estudio:

- Divergencia geométrica ( $A_{div}$ )

La hipótesis de fuente puntual o propagación esférica que toma la norma no resulta apropiada al caso de aerogeneradores, subestimando los niveles sonoros en inmisión.

- Absorción atmosférica ( $A_{atm}$ )

El término de atenuación puede ser despreciado para distancias cercanas a la fuente.

Se recomienda la selección del coeficiente de atenuación atmosférica basado en valores promedio determinados para la localidad en estudio y tomando la precaución de que las condiciones de temperatura y humedad no tienen por qué ser las mismas en emisor y receptor.

*Conclusión:*

Por lo mencionado, se concluye que el método de cálculo que plantea la norma no resulta aplicable al caso de aerogeneradores y no se recomienda la aplicabilidad de la ISO para la predicción de los niveles sonoros generado por este tipo de fuente en el Uruguay.

### **11.1.3. Sobre otros métodos de cálculo de reciente aparición**

En este sentido, cabe mencionar que con motivo de las diferencias que se evidencian de la aplicabilidad de la Norma ISO 9613-2, existen a nivel internacional modelos de cálculos que establecen opciones de ajustes a la Norma que están relacionados con las exigencias de los distintos países o regiones, y la aplicabilidad y requerimiento de la zona del emplazamiento.

Dentro de las normativas internacionales de reciente aparición se encuentra:

- Norma Australiana y la Norma Neocelandesa (2010)
- Modelo Nord2000, siendo este último uno de los mejores modelos de propagación disponibles en la actualidad, el cual considera los fenómenos turbulentos y de refracción atmosférica en el modelo de cálculo.

Como método de cálculo para el Uruguay se cuenta con la reciente propuesta del IMFIA (2012b). Esta propuesta de cálculo es un ajuste simplificado de la Norma ISO 9613-2 que considera ciertas apreciaciones mencionadas sobre la aplicabilidad de la norma al Uruguay; que debería ser ajustado considerando también las condiciones de estabilidad de la atmósfera y un mayor número de datos de campo.

### **Hallazgos relevantes como aportes para mejorar el método de cálculo de los niveles sonoros**

- *Nord2000*

Modelo recomendado a nivel internacional por parte de expertos de la Unión Europea para la predicción de la propagación al aire libre del sonido generado por turbinas eólicas. Permite el cálculo para condiciones climáticas específicas, incluidos los *movimientos turbulentos de la atmósfera* (datos de entrada: la turbulencia por viento y la turbulencia por temperatura).

- Requerimientos del modelo de cálculo a seleccionar

Se considera relevante que el modelo de cálculo considere fenómenos turbulentos de la atmósfera y procesos de difusión.

Debe ser aplicable para abordar los fenómenos en bajas y altas frecuencias, y se recomienda la estimación de los niveles sonoros en bandas de octava o tercios de octava.

Los modelos deben ser de fácil implementación.

El tipo y cantidad de información requerida debe estar disponible o debe poderse obtener con precisión, en tiempos y a costos razonables.

## **11.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO**

En el marco de este proyecto se logró comprender y describir los fenómenos asociados con la generación y propagación del ruido aerodinámico vinculado al funcionamiento de aerogeneradores, para el caso particular de topografía plana.

Si bien el caso de *topografía compleja* implica una mayor cantidad de variables y condicionantes al estudio, es asimismo la ubicación mayoritaria de los parques eólicos, por lo que se visualiza de interés el estudio en profundidad de este caso.

Dado que el fenómeno físico implica fenómenos turbulentos, con lo cual las hipótesis de conservación de la energía y de flujo adiabático deben ser reconsideradas, resulta de interés analizar en detalle los *fenómenos asociados con flujo turbulento*. Y en este sentido la aplicabilidad y ajuste del Modelo Nord2000, modelo que considera turbulencia atmosférica (pero que trabaja en el intervalo de frecuencias de 25 Hz a 10.000 Hz con lo cual deberá ser objeto de revisión). Otro fenómeno a considerar es la *refracción atmosférica*, tanto a distancias cercanas a la fuente como especialmente en la zona cercana al receptor.

Por otro lado, para los estudios y el análisis exhaustivo de los modelos y metodologías de predicción, es relevante contar con una mayor cantidad de datos de campo y en diferentes condiciones meteorológicas, como por ejemplo contar con datos para diferentes condiciones de estabilidad de la atmósfera.

En lo que refiere a la ley de divergencia y en particular al cálculo de las atenuaciones por divergencia geométrica. Del análisis surge una pregunta específica como línea de investigación a futuro: *¿Cómo deben ser tomadas las condiciones atmosféricas (estabilidad) en el exponente “n” de la ley de divergencia?*

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aagaard Madsen, H. Low frequency noise from MW wind turbines – mechanisms of generation and its modeling. Department of wind energy: Risø National Laboratory. Technical University of Denmark (DTU). Roskilde, Denmark, 2008.

Acoustic Ecology Institute. Wind Farm Noise: 2009 in Review. Research, public concerns, and industry trends. A Special Report from the Acoustic Ecology Institute. 45 Cougar Canyon Santa Fe, NM 87508 USA, 2010.

Arenal, M.; González, J.; González, P.; Tarrero, A. Contribución al estudio de la influencia de las variables meteorológicas en la propagación del sonido en exteriores. Tecniacústica 2000. Valladolid, 2000.

Arenal, M.; González, J.; Machimbarrena, M.; Tarrero, A. Influencia de los fenómenos turbulentos en la propagación del sonido en exteriores. Tecniacústica 2001. La Rioja, España, 2001.

Bellhouse, G. Low frequency noise and infrasound from Wind turbine generators: a literature review. Energy Efficiency and Conservation Authority. New Zealand, Bel Acoustic Consulting, June 2004.

Bernabeu Taboada, D. Efectos del ruido sobre la salud. Biblioteca-Medica Ruido (PEACRAM) - Plataforma Estatal de Asociaciones Contra el Ruido (PEACRAM). Febrero 2009.

Bianchi Falco, F. Análisis estadístico de los datos de campo obtenidos entre el 19 de abril y el 17 de mayo de 2012. Informe interno de investigación DIA-IMFIA. Uruguay, 2012a.

Blanc-Benon, P.; Juve, D. Outdoors sound propagation in complex environments: recent developments in the PE method. Tecniacústica 2002. Sevilla, España. 2002.

Cataldo, J. Elementos Acústicas en Aerogeneradores. Notas Curso Acústica Ambiental, Posgrado en Ingeniería Ambiental – IMFIA – Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Emisiones Acústicas en Aerogeneradores. Uruguay, 2013.

Catálogo Vestas V90-2,0 MW. Consultado en: [www.vestas.com](http://www.vestas.com).

Catálogo Vestas V90-3,0 MW. Consultado en: [www.vestas.com](http://www.vestas.com).

CETESB L11032, Determinação do nível de ruído em ambientes internos e externos de áreas habitadas: método de ensaio. Año 1993.

Cinar, I; Sensogut, C. Evaluation of Environmental Factors Affecting Noise Propagation. Springer Science. Environ. Monit. Assess. 2008. 153-382 p.

Cueto Ancela, J.L.; Rivas Calvete, S.; Hernández Molina, R. Metodología para la evaluación del impacto sonoro producido por los parques eólicos en Andalucía. Tecniacústica 2006. España, 2006.

Decreto Supremo N° 146 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile. Establece norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas, elaborada a partir de la revisión de la norma de emisión contenida en el decreto N° 286 de 1984 del Ministerio de Salud. Chile. 1997.

Decreto Lei 292-2000. Lei Geral do Ruído. Portugal. 2000.

Decreto 349/005, Reglamento de la Evaluación de Impacto Ambiental. MVOTMA. Uruguay. 2005.

Decretos 77/006, que promovió las formas alternativas de generación de energía eléctrica. Uruguay, 2007.

Decreto 403/009, encomienda a UTE la realización de procedimientos competitivos para la contratación de 300 MW eólicos, y reglamenta la primera etapa, de un total de 150 MW. Uruguay, 2009.

Decreto 159/011, encomienda a UTE la celebración de contratos con privados por 150 MW, provenientes de energía eólica. Uruguay, 2011.

Decreto 424/011, de promoción de suscripciones de contratos de compraventa de energía eléctrica. Uruguay, 2011.

DELTA. Jorgen Kragh, B. P., et. al. Acoustics & Vibration; Svein A. Storeheier, SINTEF, Telecom and Informatics; Hans G. Jonasson, SP Swedish National Testing and Research Institute, Acoustics. "Nordic environmental noise prediction methods, Nord2000. Summary report. general nordic sound propagation model and applications in source related prediction methods". Client: Nordic Noise Group. Denmark, Mayo 2002.

DELTA. EFP-06 PROJECT. Low frequency noise from large wind turbines. Selection of a propagation model. Performed for Danish energy authority. AV 136/08 rev 1. Project n°: A401929-3. Denmark, Abril 2008.

DELTA. EFP-06 PROJECT. Low frequency noise from large wind turbines. Final report. Performed for Danish energy authority. AV 1272/10. Project n°: A401929. Denmark, 21 Noviembre 2010.

Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. 25 de junio de 2002.

Dooling, R. Avian Hearing and the Avoidance of Wind Turbines. Technical Report. Report to National Renewable Energy Laboratory. National Technical Information Service, U. S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, NREL/TP-500-30844, 2002.

Everest and Pohlmann. Master Handbook of Acoustics, 5th. edition, Mc Graw Hill, 2009.

Fernández Díez, P. Energía Eólica. I.S.B.N. 84-8102-019-2. Santander, España: Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T., 1993. 23 p.

González, A. E. Los mapas de ruido como instrumentos de gestión ambiental. Conferencia dictada en el marco de los 15 años del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Medellín, Colombia, 2010.

González, A. E. Impacto Acústico de Aerogeneradores: Aproximación inicial a los radios de influencia en el entorno (2011). Informe interno de pre-investigación. DIA-IMFIA, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay, 2011.

González, A. E; Rezzano Tizze, N.; Bianchi Falco, F. Algunas limitaciones de la Norma ISO 9613 – Parte 2 para el estudio de propagación de ruido de aerogeneradores de gran porte. Reunión Regional de Acústica AUA 2011. Montevideo, Uruguay, octubre 2011.

Hanning, C. Wind turbine noise, sleep and health. Sleep disturbance and wind turbine noise, The Society for Wind Vigilance, Abril, 2010.

Harrison, John P. Inadequacy of wind turbine noise regulations and their application. Presentation to the Annual Conference of the Canadian Acoustics Association, October 2009 – Niagara-on-the Lake, Canada. Physics Department, Queen's University, Kingston, 2009.

Huikwan, K.; Potty, G. R.; Miller, J. H.; Smith, K. B.; Dossot, G. Long range propagation modeling of offshore wind turbines using finite element and a parabolic equation models. Acoustics 2012, Hong Kong, República Popular China. Mayo 2012.

IMFIA. Impacto acústico de aerogeneradores. Subproyecto B. Informe Final. Medidas de prevención y mitigación para el impacto sonoro de aerogeneradores de gran porte. Actividad en el marco del Convenio Específico entre la Universidad de la República – Facultad de Ingeniería y

el Ministerio de Industria, Energía y Minería – Dirección Nacional de Energía, Uruguay, 2011.

IMFIA. Impacto acústico de aerogeneradores. Subproyecto A. Informe de avance. Metodología para estudiar el impacto sonoro de aerogeneradores de gran porte. Actividad en el marco del Convenio Específico entre la Universidad de la República – Facultad de Ingeniería y el Ministerio de Industria, Energía y Minería – Dirección Nacional de Energía, Uruguay, 2012a.

IMFIA. Impacto acústico de aerogeneradores. Subproyecto A. Informe de Cierre. Metodología para estudiar el impacto sonoro de aerogeneradores de gran porte. Actividad en el marco del Convenio Específico entre la Universidad de la República – Facultad de Ingeniería y el Ministerio de Industria, Energía y Minería – Dirección Nacional de Energía, Uruguay, 2012b.

IRAM. Norma Argentina 4062\*, Tercera edición, 2001 – 05 – 10. Ruidos molestos al vecindario. Método de medición y clasificación. Argentina, 2001.

International Organization for Standardization. ISO 7196:1995 (E): Acoustics – Frequency – Weighting Characteristic for Infrasound Measurements. Geneva, Switzerland, 1995.

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, Switzerland, 1996.

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

International Organization for Standardization. ISO 226:2003. Acoustics -- Normal equal-loudness-level contours. 2003.

International Standard IEC. “Wind turbine generator systems: Design requirements”, 3<sup>o</sup> Edition. IEC 61400-1. 2005-08.

Jakobsen J. Low frequency sound from wind turbines, proceedings Low Frequency Noise and Vibration. Maastricht, 2004.

Jodziewicz, L. American Wind Energy Association. AWEA. Wind Energy Siting Handbook. Document Prepared for AWEA by: Tetra Tech EC, Inc. (Project Manager: Aileen Giovanello) and Nixon Peabody LLP (Project Manager: Carolyn S. Kaplan). Washington, 2008.

Jornadas de Convergencia en Contaminación Acústica 2008. Memorias de las Jornadas. Número de volúmenes: 1. Editorial: MVOTMA – DINAMA. Uruguay. 2008.

Kaliski, K.; Duncan, E. Propagation Modeling Parameters for Wind Power Projects. 2008. Based on a paper presented at Noise-Con 2007, Institute of Noise Control. Engineering, Reno, NV, October, 2007.

Kaliski, K.; Duncan, E. Calculating annualized sound levels for a wind farm. En: 159<sup>th</sup> Meeting Acoustical Society of America/NOISE-CON 2010. Baltimore, Maryland, 2010.

Kamperman, G.; James, R. Guidelines for Selecting Wind Turbine Sites. Sound & Vibration, July 2008. 8-12p.

Kentilux S.A. Proyecto de generación de energía eólica conectada a la red. INVECO. Montevideo. Mayo, 2010.

Kinsler, Frey, Coppins and Sanders, Fundamentals of Acoustics, 4th. Edition, Wiley & Sons, 2000.

Kundu and Cohen, Fluid Mechanics, 2nd. edition, Academic Press, 2002.

Kogan Musso, Pablo (2004). Análisis de la eficiencia de la ponderación “A” para evaluar efectos del ruido en el ser humano. Valdivia, Chile, 2004.

Landau y Lifshitz, Mecánica de Fluidos, Vol. 6 del Curso de Física Teórica, Ed. Reverté, 2001.

Leventhall, H.G. Low frequency noise and annoyance. Noise Health. 2004. Consultado en:  
[www.noiseandhealth.org/text.asp?2004/6/23/59/31663](http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2004/6/23/59/31663)

Ley N° 17.852. Contaminación Acústica. Uruguay. 2004.

Manning, C. J., The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighboring Communities, Report 4/81, CONCAWE, 1981.

Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of Wind Turbines. 2<sup>nd</sup>. edition. ISBN 978-1-84407-438-9. 2008.

Martín Bravo, M. A.; Tarrero, A. I.; Bravo, D.; Copete, M.; González, J.; Machimbarrena, M.; García, L. Impacto acústico de los parques eólicos y su evolución. Acústica 2008, Coimbra, Portugal, 2008.

Martínez, Juan; Ferri, Marcelino; Alba, Jesús; Ramis, Jaime; García, José Ma. Evaluación acústica medioambiental del Parque Eólico “La Cuerda”. Tecniacústica 2002, Sevilla, España, 2002.

Medina Forero, O.; Quiñones Bolaños, E. Modelos de transporte y propagación de ondas sonoras en campos abiertos: una mirada desde la física. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena. Colombia. 2010.

Ministerio de Industria, Energía y Minería. Política Energética 2005-2013. MIEM-DNE. 2005.

Ministerio de Industria, Energía y Minería. Mapa Energético. Planificación, Estadística y Balance. MIEM-DNE. Abril 2013.

Ministerio de Industria, Energía y Minería. Proyectos instalados y en desarrollo en Uruguay. [www.energiaeolica.gub.uy](http://www.energiaeolica.gub.uy); Junio 2014.

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Recopilación normativa sobre contaminación acústica. 2ª. Edición actualizada. Montevideo, MVOTMA. 1998.

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Criterios establecidos para la instalación y operación de parques eólicos. División Evaluación de Impacto Ambiental. Montevideo, MVOTMA. 2012.

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Propuesta Técnica GESTA 2013 para la Reglamentación de la Ley 17.852 – Decreto Ruido. Documento Borrador. Montevideo, MVOTMA. 2013.

Miyara, F. Control de Ruido. Libro digital, edición propia. Rosario, Argentina, 1999.

Moller, H.; Sejer Pedersen, C. Low frequency noise from large wind turbines. Denmark, 2010.

Moorhouse, A.; Hayes, M.; von Hunerbein, S.; Piper, B.; Adams, M. Research into Aerodynamic Modulation of Wind Turbine Noise: Final report. Contract no NANR233. Universidad de Salford (UK), julio 2007.

Núñez Pereira, Ismael. Elementos de Acústica, Posgrado en Ingeniería Ambiental – IMFIA – Facultad de Ingeniería. Instituto de Física – Facultad de Ingeniería. Montevideo, Universidad de la República. 2013.

Norma Danesa Statutory Order on Noise from Windmills (Nr. 304, Dated 14 May 1991) “Description of Noise Propagation Model Specified by

Danish” producida por The Danish Ministry of the Environmental Agency for Environmental Protection. 1991.

Orozco-Medina, Martha, Orozco-Barocio, Arturo, Figueroa-Montano, Arturo, Ochoa-Ramos, Norma. Discusión en torno a los efectos del ruido ambiental en el sistema inmune. 160<sup>th</sup> ASA meeting, 7o Congress FIA, 17o Congress IMA, 2nd Pan-American and Iberian Meeting on Acoustics, Cancún, México, 15 - 19 November 2010.

Organización Mundial de la Salud (OMS). [www.who.int/en/](http://www.who.int/en/)

Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías para el ruido urbano. Editado por: Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, Dietrich H Schwela. Documento de la OMS sobre Guías para el ruido urbano, resultado de la reunión del grupo de trabajo de expertos llevada a cabo en Reino Unido, 1999.

Organización Mundial de la Salud (OMS). Constitución de la OMS. Documentos básicos, suplemento de la 45<sup>a</sup>. edición. 2006.

Parrondo Gayo, Jorge Luis. Acústica Ambiental. Ediciones de la Universidad de Oviedo. Asturias, España. 2006.

PEACRAM. Plataforma Estatal de Asociaciones Contra el Ruido. Obtenido de <http://www.peacram.com>. 2001.

Pitzer, A.; Rezzano, N. Efectos del perfil de viento nocturno en el ruido de un aerogenerador. Análisis del artículo: “Effects of the wind profile at night on wind turbine sound” de G.P. van den Berg, Journal of Sound and Vibration (2003). Trabajo final del curso “Acústica Arquitectónica y Ambiental”, Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Montevideo, Febrero, 2011.

Radle, A. L. The Effect Of Noise On Wildlife: A Literature Review. 2007.

Rogers, A. L.; Manwell, J. M.; Wright, S. Wind Turbine Acoustic Noise Renewable Energy Research Laboratory Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Massachusetts at Amherst. Junio 2002.

Rogers, A. L. Wind Turbine Noise, Infrasound and Noise Perception. Renewable Energy Research Laboratory. University of Massachusetts at Amherst. Enero 2006.

Rudolphi, E. Wind turbine noise emission. Wind speed measurements below hub height give poor accuracy. Estocolmo, Suecia, 2003.

Standards Australia. Australian Standard AU 4959-2010 Acoustics— Measurement, prediction and assessment of noise from wind turbine generators. ISBN 0 7337 9363 0. 2010.

Standards New Zealand. New Zealand Standard NZS 6808:2010 Acoustics – Wind Farm Noise. 2010.

Szewczak, J. M.; Arnett, E. Preliminary Field Test Results of an Acoustic Deterrent with the Potential to Reduce Bat Mortality from Wind Turbines, 2006a.

Szewczak, J. M.; Arnett, E. Ultrasound emissions from wind turbines as a potential attractant to bats: a preliminary investigation, 2006b.

Teague, P.; Foster, R. Acoustic Assessment of Wind Farms – A Practical Perspective. 2006.

Tech Environmental, Inc. Acoustic study of four VESTAS V80 wind turbines. Eastham, Massachusetts. Febrero, 2008.

The British Standards Institution. BS 5228: Part 1:1997. Noise and vibration control on construction and open sites. Part 1. Code of practice for basic information and procedures for noise and vibration control. Second edition May 1997. Issue 1, April 1999. BSI 04-1999. ISBN 0 580 26845 4. 1999.

Van den Berg, G. P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. Journal of Sound and Vibration, 2003.

Van den Berg, G.P. The Beat is Getting Stronger: The Effect of Atmospheric Stability on Low Frequency Modulated Sound of Wind Turbines. Noise Notes, Volume 4 number 4, 2004.

Van den Berg, G.P. Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground. First international meeting on turbine noise: Perspectives for control. Berlin. 2005.

Van den Berg, G. P. 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. Mayo, 2006.

Wagner, S.; Bareiss, R.; Guidatti, G. Wind Turbine Noise. European Commission (DGXII), EUR 16823. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 1996.

WHO, World Health Organization. Night Noise Guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe. Denmark. 2009.

WHO LARES. Large Analysis and Review of European housing and health Status. 2004.

**Entrevista**

Van den Berg, G.P. Junio 2014.