



Universidad del Istmo

Campus Tehuantepec

División de Estudios de Posgrado
Maestría en Ciencias en Energía Eólica

Análisis numérico y experimental de la emisión de ruido aerodinámico en aerogeneradores de pequeña potencia

T E S I S

que para obtener el título de:
Maestro en Ciencias en Energía Eólica

Presenta:

Ing. Armando Rios Ruiz

Director:

M.D.M. José Rafael Dorrego Portela

Codirector:

Ing. Andrea Rivarola

Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Febrero 2021.

Resumen

El ruido aerodinámico emitido por aerogeneradores de pequeña potencia puede afectar la calidad de vida de las personas residentes en localidades cercanas al sitio de emplazamiento de la tecnología, alterando la salud tanto física como psíquica de los mismos. La solución de este inconveniente a corto y mediano plazo requiere de la realización de investigaciones teóricas y experimentales enfocadas al estudio de los aspectos relacionados con la causa de la generación de ruido y las diversas formas de su posible mitigación. Dado que, en la actualidad, la tecnología de aerogeneradores de pequeña potencia no ha sido desarrollada a gran escala, se carece información al respecto, por lo que este tema constituye un nicho de investigación.

El objetivo de esta tesis es estudiar la emisión de los niveles de presión sonora mediante modelación teórica y validación experimental en aerogeneradores de pequeña potencia. Con este fin, la pregunta de investigación es la siguiente: ¿Cómo validar experimentalmente los modelos BPM y BM de emisión de ruido aerodinámico, aplicado en aerogeneradores de pequeña potencia?

La pregunta de investigación se responde a través de la aplicación de los modelos semi-empíricos BPM y BM, utilizando la información de diseño de la pala del aerogenerador a estudiar, continuando con un análisis experimental acatando las normas IEC 61400-11 y la NOM-SEMARNAT-081, que se refieren a la metodología de medición de los niveles de presión sonora y de los límites permisibles de decibelios en los horarios de labor y descanso de los residentes cercanos respectivamente. Los valores de niveles de presión sonora medidos llegan a validar los modelos semi-empírico al contar con valores de error menores al 6 % por lo que se considera que los modelos propuestos y la metodología de medición experimental tienen un margen de error pequeño.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se recomienda continuar con los estudios experimentales en aerogeneradores de pequeña potencia, para aumentar los registros de los datos medidos, ya que con suficiente información se puede establecer la distancia idónea para la instalación de la torre del aerogenerador y aprovechar el recurso eólico de la zona del Istmo de Tehuantepec, con tecnología de energías renovables e incrementar la producción de energía eléctrica mediante el uso de recurso eólico.

Se recomienda realizar pruebas experimentales en horarios nocturnos, por lo que se presumen que en dicha horas del día la emisión sonora de los aerogeneradores suele aumentar, no se tiene registros en la tecnología de aerogeneradores de pequeña potencia, lo cual podría afectar a la aceptación de esta tecnología.

Agradecimientos

Así como es interesante la apertura de toda acción u obra, la conclusión también lo es, por lo que me es grato enarbolar mis agradecimientos sinceros y respetuosos, quienes fueron la columna vertebral de mi Posgrado, que a continuación menciono:

A mis padres, el Profesor Armando Rios Arrazola y la Enfermera Guillermina Ruiz Santiago, como también a mi hermana Licenciada en Idiomas Amor Aylin Rios Ruiz por el apoyo en estos 25 años de vida y la paciencia que me tienen al convivir conmigo todos los días.

A mi director de tesis el M.D.M José Rafael Dorrego Portela por toda la paciencia y dedicación en la tutorías impartidas en el Posgrado.

Mis compañeros de Posgrado Alan Alfredo Ramirez Reyes, Eduardo Ortiz García, Eusebio García Vásquez y Juan Carlos Vicente Ramirez, por todos los recuerdos y experiencias compartidas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de manutención brindado en estos 2 años de estudio de la Maestría en Ciencia en Energía Eólica.

Ellos fueron quienes me apoyaron incondicionalmente en dar un paso más en el escalón de la vida.

Acrónimos

<i>BPM</i>	Brooks, Pope y Marcolimi	
<i>BM</i>	Brooks y Marcolimi	
<i>IEC</i>	Comisión electrotécnica Internacional	
<i>dB</i>	Decibelios	
<i>C_{lmax}</i>	Coefficiente de sustentación máxima	
<i>Cda</i>	Cuerda	
<i>N_{psfvp}</i>	Nivel de presión sonora debido a la formación del del vórtice en la punta	[dB]
<i>N_{psce}(A)</i>	Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado	[dB(A)]
<i>NES</i>	Nivel de exposición sonora	[dB(A)]
<i>NACA</i>	Comité asesor nacional para la aeronáutica	
<i>Nps</i>	Niveles de presión sonora	[dB(A)]
<i>NPs</i>	Niveles de potencia sonora	[dB(A)]
<i>Re</i>	Numero de Reynolds	

Símbolos

Z	Ponderación Z	[dB]
c	Velocidad del sonido	[m/s]
λ	Longitud de onda	[m]
P	Periodo	[-]
I	Intensidad acústica	[dB]
π	Número Pi	[-]
r	Distancia	[m]
N_{iS}	Nivel de intensidad de sonido	[dB]
f	Frecuencia	[Hz]
E_A	Exposición sonora	[dB]
E_0	Exposición sonora de referencia	[dB]
t_0	Tiempo de referencia	[s]
ρ	Densidad	[Kg/m ³]
p	Presión estática	[Pa]
w	Watt	[-]
α	Ángulo de ataque	[°]
A_m	Amplitud	[-]
L	Longitud del segmento	[m]
ϕ	Diámetro del rotor	[m]
U_{eje}	Velocidad del viento a la altura del eje	[m/s]
U_{punta}	Velocidad punta de la pala	[m/s]
Pa	Presión	[pascales]
δ_0	Espesor de la capa límite no desprendida	[m]
C	Temperatura	[Celsius]

Índice general

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
Acrónimos	iv
Símbolos	v
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes o estado del arte	3
1.3 Planteamiento del problema	7
1.3.1 Enunciado del problema	7
1.4 Justificación	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Hipótesis	10
1.7 Alcances y limitaciones	11
1.7.1 Alcances	11
1.7.2 Limitaciones	11
1.8 Estructura de la tesis	12
2. Marco teórico	13
2.1 Análisis del sonido	14
2.1.1 Ponderación	17
2.1.2 Suma de decibelios	18
2.1.3 Parámetros estándares sobre el ruido	19
2.2 Los aerogeneradores como fuente de emisión de niveles de presión sonora	20
2.2.1 Ruido aerodinámico de los aerogeneradores	22
2.3 Aeroacústica	23
2.3.1 Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluido	23
2.3.2 Las ecuaciones de la aeroacústica lineal	24
2.3.2.1 La ecuación de ondas homogéneas	24
2.3.3 Ecuación de onda inhomogénea	25

2.4	Analogía aeroacústica de Lighthill	26
2.4.1	Ecuación de Lighthill	27
2.5	Aerodinámica	29
2.5.1	Distribución de velocidades en el perfil	30
2.5.2	Capa límite	31
2.5.3	Teoría de momento para cada elemento de la pala (BEM)	31
2.6	Fuentes de ruido acústico en los aerogeneradores	32
2.7	Modelos de predicción para los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores	37
2.7.1	Modelos clase I	38
2.7.2	Modelos de clase II	40
2.8	Predicción el ruido asociado a los aerogeneradores	42
2.8.1	Consideraciones para estimar el ruido producido por los aerogeneradores	43
2.9	Teoría de la propagación del sonido en campo libre	43
2.10	Método de medición: Norma IEC 61400-11	44
2.10.1	Micrófono	44
2.10.2	Determinación de la velocidad del viento con un anemómetro	45
2.10.3	Mediciones acústicas	45
2.10.4	Dirección del viento	45
2.10.5	Correcciones debido al ruido ambiente de fondo	46
2.10.6	Nivel de potencia acústica aparente	46
2.10.7	Otras condiciones atmosféricas	46
2.10.8	Velocidad del viento	46
2.11	Posición de medición	47
2.12	NOM-081-SEMARNAT-1994	48
2.12.1	Objeto	48
2.12.2	Campo de aplicación	48
3.	Análisis numérico del ruido	50
3.1	Selección de los modelos de predicción	51
3.2	Modelo original BPM	51
3.3	Demostración del modelo BPM	56
3.4	Niveles de presión sonora ponderadas en A	61
3.5	Nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta de la pala	62
3.5.1	Contribución de los niveles de presión sonora calculados con el modelo BM	64
3.6	Niveles de potencia sonora (NPs)	65
4.	Medición experimental	67
4.1	Descripción de la zona de estudio	68
4.1.1	Descripción del aerogenerador	69
4.2	Mediciones de campo	70
4.2.1	Mediciones de los niveles de presión sonora	70
4.2.2	Medición de las variables meteorológicas	74
4.2.3	Medición de ruido ambiente	75

5. Resultados	79
5.1 Resultado de los modelos BPM y BM de predicción de emisión sonora . .	79
5.2 Resultados del modelo de propagación propuesto	79
5.3 Validación de los modelos BPM y BM mediante el análisis experimental .	81
6. Conclusiones y recomendaciones	83
6.1 Conclusiones	83
6.2 Recomendaciones	84
Bibliografía	85

Índice de figuras

Figura 2.1.	Onda senosoidal.	14
Figura 2.2.	Escala comparativa entre nivel de presión sonora en Decibelios. . .	15
Figura 2.3.	Curva de audición.	16
Figura 2.4.	Ponderaciones.	17
Figura 2.5.	Espectro de ruido de los aerogeneradores.	20
Figura 2.6.	Espectro de ruido de baja frecuencia de los aerogeneradores. . . .	21
Figura 2.7.	Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora.	22
Figura 2.8.	Nivel de potencia sonora en la superficie de una pala.	23
Figura 2.9.	Separación del campo de flujo real.	26
Figura 2.10.	Parámetros geométricos de los perfiles.	29
Figura 2.11.	Distribución de velocidades alrededor del perfil.	30
Figura 2.12.	Distribución de presión alrededor del perfil.	30
Figura 2.13.	Capa límite.	31
Figura 2.14.	Segmentos de la pala.	32
Figura 2.15.	Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro del ruido total calculado de acuerdo con los métodos de Grosveld para un aerogenerador con rotor viento arriba.	33
Figura 2.16	Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida.	34
Figura 2.17	Desprendimiento de los vórtices en un borde de salida romo. . . .	34
Figura 2.18.	Desprendimiento de la capa límite en el borde de salida.	35
Figura 2.19.	Separación stall.	35
Figura 2.20.	Formación de vórtice en la punta de la pala.	36
Figura 2.21.	Flujo turbulento incidente.	36
Figura 2.22.	Montaje de Micrófono.	45
Figura 2.23.	Posición de medición acústica en un aerogenerador de eje horizontal.	48
Figura 3.1.	Ángulos de direccionalidad.	52
Figura 3.2.	Perfil A 18.	56
Figura 3.3.	Pala evaluada.	56
Figura 3.4.	Niveles de presión sonora respecto a α	57
Figura 3.5.	Niveles de presión sonora respecto a la zona de presión del perfil aerodinámico.	57
Figura 3.6.	Niveles de presión sonora respecto a la zona de succión del perfil aerodinámico.	58
Figura 3.7.	Niveles de presión sonora Total ($N_{p\text{total}}$).	58
Figura 3.8.	Emisión de niveles de presión sonora a 10 m/s.	59

Figura 3.9.	Emisión de niveles de presión sonora a 9 m/s.	59
Figura 3.10.	Emisión de niveles de presión sonora a 8 m/s.	60
Figura 3.11.	Emisión de niveles de presión sonora a 7 m/s.	60
Figura 3.12.	Emisión de niveles de presión sonora a 6 m/s.	60
Figura 3.13.	Emisión de niveles de presión sonora a 5 m/s.	61
Figura 3.14.	Emisión de niveles de presión sonora total a diferentes velocidades de viento.	61
Figura 3.15.	Ponderación A.	62
Figura 3.16.	Niveles de presión sonora del aerogenerador en ponderación A. . .	62
Figura 3.17.	Niveles de presión sonora producido por los vórtices en la punta de la pala.	64
Figura 3.18.	Representación gráfica de los niveles de presión sonora producido por los vórtices en la punta de la pala.	65
Figura 3.19.	Distribución de presiones en el perfil aerodinámico de la punta de la pala.	65
Figura 4.1.	Ubicación geográfica del aerogenerador de pequeña potencia. . . .	68
Figura 4.2.	Ubicación del aerogenerador de pequeña potencia RTO en la venta, Juchitán.	68
Figura 4.3.	Aerogenerador RTO.	69
Figura 4.4.	Midiendo los niveles de presión sonora emitidos por el aerogenerador.	71
Figura 4.5.	Sonómetro EXTECH EN300.	73
Figura 4.6.	Anemómetro UNI-T UT362	74
Figura 4.7.	Niveles de presión sonora del medio ambiente.	77
Figura 4.8.	Niveles de presión sonora del aerogenerador en funcionamiento. .	77
Figura 4.9.	Niveles de presión sonora del medio ambiente y del aerogenerador.	78
Figura 5.1.	Propagación de los niveles de presión sonora.	81
Figura 5.2.	Validación de los modelos de predicción de niveles de presión sonora vs las mediciones del aerogenerador y el medio ambiente. .	82

Índice de tablas

Tablas 2.1. Respuesta de frecuencias relativas a la curva de ponderación A. . . .	18
Tablas 2.2. Longitud de rugosidad.	47
Tablas 2.3. Límites máximos permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994.	49
Tablas 3.1. Datos de la pala.	56
Tablas 3.2. Niveles de presión sonora y potencia sonora.	66
Tablas 4.1. Especificaciones generales.	72
Tablas 4.2. Niveles de sonido.	72
Tablas 4.3. Niveles de presión sonora (Nps) o ruido del medio ambiente.	75
Tablas 4.4. Niveles de presión sonora (Nps) con el aerogenerador en funcionamiento + ruido del medio ambiente.	76
Tablas 5.1. Resultados total los modelos BPM y BM.	79
Tablas 5.2. Niveles de presión sonora propagados en el medio ambiente.	81
Tablas 5.3. Validación de los modelos de predicción de niveles de presión sonora vs las mediciones del aerogenerador y el medio ambiente.	82

Introducción

1.1 Introducción

La investigación tecnológica sobre energías renovables es de gran importancia en la sociedad. El sistema de energía actual en su 80 % es producido por combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) los cuales están en fase de agotamiento y son fuentes de energía contaminantes. El uso irracional de combustibles fósiles ha provocado el deterioro del medio ambiente y con ello los cambios climáticos.

El desarrollo de las fuentes renovables de energía constituye una opción para hacer frente a la problemática medioambiental, donde la energía eólica podría desempeñar un papel importante ya que su transformación en otro tipo de energía no contribuye en la generación de gases de efecto invernadero, los cuales son responsables del calentamiento global y el cambio climático. No obstante, la tecnología de aprovechamiento de la energía eólica (aerogeneradores) manifiesta otros efectos que se consideran impactos ambientales: impacto visual y ruido, que constituyen inconvenientes para los pobladores de comunidades cercanas a los sitios de instalación de la tecnología.

A través del tiempo han sido realizadas diversas investigaciones teóricas y experimentales cuyos resultados permiten predecir la causa, del ruido y su propagación, así como las modificaciones tecnológicas para su mitigación [1][2]. Estas investigaciones en su mayoría han sido efectuadas en sistemas de grandes y medianas potencias, lo que significa que son menos los estudios de tipo teórico-experimental en los aerogeneradores de pequeña potencia.

Se han reportado estudios teóricos y modelos de la generación-propagación del ruido aerodinámico en aerogeneradores de pequeña potencia [3][4], sin embargo, no han sido validados de forma experimental. Considerando todo lo anterior, se presenta el siguiente trabajo en el que se realizaron estudios experimentales y de modelación matemática de estos fenómenos; los resultados permitirán explicar y predecir la generación de ruido aerodinámico en un aerogenerador de 1kW de potencia nominal en condiciones de viento de la región del Istmo de Tehuantepec. Eventualmente, los resultados servirán además como bases para propuestas de mejoras del diseño.

La mayor importancia de este estudio se destaca por el hecho de que los aerogenera-

dores suelen ser instalados cerca de viviendas. Donde está latente la posibilidad de que el ruido o contaminación acústica producido pueda alterar la comunicación oral, el sueño, la capacidad de realizar tareas complejas y el nivel estrés de los residentes de la localidad.

De esta manera, la contaminación acústica afecta negativamente a la salud física y psíquica, y es una de las causas del deterioro de la calidad de vida.

1.2 Antecedentes o estado del arte

La propagación del ruido es una temática de gran relevancia para el estudio. Con el objetivo de implementar métodos para su mitigación, a continuación se mencionan algunos de los trabajos acerca de este tema:

A. Tadamas [4] desarrolló y validó el primer método numérico basado en el principio para predecir el ruido irradiado de las palas de la turbina de viento de eje horizontal (HAWT). El ruido irradiado al campo acústico fue predicho por el código basado en la ecuación de Ffowcs Williams Hawkins (FWeH), usando ambas formulaciones, no permeable original y formulación permeable. Un solucionador de CFD disponible comercialmente, ANSYS CFX 11.0, se utilizó para calcular los parámetros de flujo y alrededor de la superficie de la pala que fue requerido para los códigos FWeH. Una capacidad del solucionador para modelar el campo del flujo alrededor de la turbina de viento las palas se validaron comparando con los resultados experimentales de las palas del aerogenerador NREL Phase VI. Los códigos FWeH fueron validados usando resultados acústicos del rotor de helicópteros UH-1H en el vuelo estacionario y Hartzell propulsor del avión en el movimiento delantero, que fueron medidos en el túnel de viento. Entonces los códigos acústicos desarrollados de FWeH fueron aplicados para calcular el ruido irradiado del viento de la fase VI de NREL palas de turbina.

NOM-081-SEMARNAT-1994 [5]. La norma propone que las emisiones de ruido proveniente de las fuentes fijas, alteran el bienestar del ser humano y el daño que produce, con motivos de la exposición, depende de la magnitud y del número por unidad de tiempo de los desplazamientos del umbral de audición. Por ello, resulta necesario establecer los límites máximos permisibles de emisión de este contaminante.

G. Guidati [6] presenta un modelo mejorado para el ruido de la turbulencia incidente y se emplea para simular la interacción de ráfagas turbulentas con el borde de ataque y de salida de la pala. El modelo se basa en la analogía acústica de HOWE y hace uso del método de los elementos finitos para predecir el flujo medio, la dispersión y reflexión de ondas acústicas en la superficie de la pala. Los resultados experimentales que se obtuvieron en un túnel de viento de resonancia con una técnica de matriz acústica, indican que el nivel de ruido total está dominado por el borde de salida de ruido. En las simulaciones este resultado sólo puede confirmarse si se aplica una condición Kutta en el borde de arrastre, es decir, la velocidad teóricamente infinita alrededor del borde de arrastre se cancela vertiendo el vórtice del borde de arrastre. Otras simulaciones demuestran que el modelo es capaz de predecir con precisión la diferencia en la radiación acústica desde el borde de salida de ruido entre las diferentes palas. Un primer intento de diseñar una pala silenciosa resultó ser exitoso.

T. Gömcen [7] detalla que el ruido aerodinámico que se genera cuando el rotor se encuentra con un caudal, contiene ruido de auto-ruido y turbulencia sin caudal. El actual modelo semiempírico se combina con CFD (Dinámica de fluidos computacional, por sus siglas en inglés) y cálculo aerodinámico para mejorar la precisión del modelo de predicción. Al hacer cálculos CFD, los parámetros de la capa límite para algunos tipos de palas se almacenan como una base de datos que se utiliza directamente para el modelo de pre-

dicción de ruido. El espectro de ruido total para una turbina de viento dada se compara con el experimento y el resultado de estímulo que se obtiene. El nivel de presión sonora en el punto receptor se corrige aún más mediante el acoplamiento con el modelo de propagación de sonido. Una turbina eólica se considera como una fuente de sonido dipolo colocada a la altura del buje. Para determinar los cambios de nivel de presión sonora, se consideran varios factores: difusión geométrica, directividad, absorción de aire, efecto de viento, gradiente de temperatura y efecto de la tierra.

La norma IEC-61400-11 [8] muestra los procedimientos de medición que permiten caracterizar las emisiones de ruido de una turbina eólica. Esto implica métodos de medición adecuados a la evaluación de emisión de ruido en los lugares cerca de la máquina, a fin de evitar errores debidos a la propagación del sonido, pero lo suficientemente lejos para considerar el tamaño de la fuente finita. Los procedimientos de los métodos presentados en la norma permiten caracterizar las emisiones de ruido de un único aerogenerador de una manera coherente y precisa.

BWEA [9] en este trabajo se brinda información a los usuarios proporcionada por los desarrolladores de pequeños aerogeneradores e investigadores sobre la calidad y rendimiento de cada aerogenerador así como una garantía de la certificación de los requerimientos de seguridad y funcionamiento.

Christian A. Henin [10] propone que cuando los aerogeneradores se encuentran en cercanías de lugares residenciales, se debe tener cuidado de garantizar que los parques eólicos en operación no causen molestias indebidas o interfieran en la calidad de vida de los residentes. Esto sugiere que el ruido producido por los aerogeneradores debe estar a un nivel razonable respecto con los niveles de ruido ambiente. Con el objetivo de determinar los niveles de emisión de ruido de generadores eólicos de eje horizontal, en este trabajo se analizaron y aplicaron los procedimientos establecidos por la norma 61400-11. Se advierte que los resultados no se correlacionan perfectamente con los proporcionados por el fabricante. Trabajos de investigaciones previos citan numerosos factores como posibles responsables de la dispersión: los gradientes de viento, tamaño del generador, la dirección del viento, la turbulencia producida por el viento y los defectos en la construcción de la pala.

T. Göçmen [11] realizó un proceso de optimización de seis perfiles aerodinámicos que se utilizan ampliamente en turbinas eólicas de pequeña escala en términos de los criterios de emisión y rendimiento de ruido y los cálculos numéricos se realizan para una típica turbina eólica de 10 kW. El objetivo principal de este proceso de optimización es disminuir la emisión de ruido aumentando el rendimiento aerodinámico de una turbina eólica de pequeña escala ajustando el nivel forma del perfil.

Simao Santos Rodrigues [12] propuso que la producción de energía eólica ha estado aumentando en las últimas décadas, con más áreas geográficas siendo utilizadas como parques eólicos y turbinas eólicas de gran generación que se están construyendo. Con este desarrollo, también sea ha aumentado el impacto de la energía eólica en el medio ambiente y en la salud humana. Muchas investigaciones se han hecho para predecir y reducir el ruido generado por las turbinas eólicas. El código de predicción de Aero-acústicos desarrollado fue validado contra los datos de medición de las turbinas eólicas fase II y AOC

15/50 de NREL y utilizado en el marco de optimización, utilizando el algoritmo genético NSGA-II. La geometría de la pala fue parametrizada usando curvas NURBS para las formas transversales de la pala y curvas para las distribuciones de torcedura. Se realizaron varias optimizaciones en palas de las dos turbinas anteriores. El resultado óptimo de las soluciones indican que en los parámetros obtenidos y su geometría se discuten en detalle. Ya que las soluciones variaron de un aumento de la producción anual de energía del 139,9 % a una reducción en los niveles de ruido de 10,7 %. Se demostró que se podía obtener una reducción significativa del ruido a expensas de una menor penalización aerodinámica.

Seunghoon Lee [13] este estudio predice y mide el ruido aerodinámico de un aerogenerador de 10 kW. Las predicciones numéricas incluyen el ruido de turbulencia de absorción, turbulencia de capa límite que arrastra el ruido del borde, y ruido del borde de arrastre. La medición del ruido se efectúa con micrófonos de campo libre en una posición de referencia según el Norma IEC 61400-11. A pesar de que el ruido final del borde de la punta es de baja predicción en el viento de bajas velocidades, las tendencias espectrales de los resultados de la predicción en general coinciden bien con las de los datos experimentales de las turbinas. También se encuentra que, para las pequeñas turbinas eólicas, el ruido del borde de la punta de arrastre puede ser una importante fuente de ruido.

Eva González Moujir [14] estableció que aunque se haya determinado una probabilidad de impacto mínimo se deberá seguir un control de las emisiones acústicas de cada aerogenerador puesto que, factores como desequilibrios en el mecanismo o el paso del tiempo pueden modificar el estado aerodinámico inicial del mismo y, por tanto, su emisión de ruido. Además, la etapa de vigilancia ambiental cobra especial importancia para certificar que el parque ha sido naturalizado para las especies marinas y por tanto certificar que existe un equilibrio con el entorno. En caso de una posible “repotenciación” del parque, añadiendo más filas, se deberán tener en cuenta los aspectos comentados de forma que el espacio sigan siendo suficientes, ya que de esta forma sí existiría “efecto suma” por el posicionamiento que se dispone y el nivel de potencia sonora total del parque aumentará.

Alex Siu Hong [15] este trabajo presenta un estudio comparativo entre BPM (Brooks, Pope y Marcolini) y TNO (Organización Holandesa para la Investigación Científica Aplicada) modelos para la predicción de ruido aerodinámico de borde de fuga con especial énfasis en aplicaciones de turbinas eólicas. En este trabajo, se proponen dos versiones mejoradas del modelo BPM y sus actuaciones se comparan con dos recientes modelos anisotrópico TNO que requieren información más detallada de la capa límite que los modelos basados en BPM. Los dos los modelos mejorados actuales se denotan como BPMM-P y BPMM-B, donde el primero utiliza un método de panel con interacción viscoso-inviscididad implementada y la segunda emplea un bidimensional Reynolds-Navier-Stokes promediado modelo para los cálculos de la capa límite. Comparando los espectros de sonido previstos con los datos de medición existentes para siete diferentes palas probados en el estudio actual, se demuestra que el modelo BPMM-P exhibe resultados superiores a éstos por los otros modelos para la mayoría de los casos a pesar de la simplicidad sin considerar Anisotropía. El modelo BPMM-PVII se combina con la teoría de línea de elevación no lineal de Prandtl para calcular e investigar el ruido tridimensional del rotor características de un aerogenerador NREL Eau Phase-6. Se demuestra que el enfoque ac-

tual puede proporcionar una solución eficiente para la predicción de la aerodinámica del rotor y el ruido facilitando el diseño y el desarrollo industrial para turbinas eólicas de bajo ruido.

G.P. van den Berg [16] menciona que los niveles de sonido cerca de un parque eólico en la noche eran mucho más altos de lo que se esperaba. Esto es causado por fuertes vientos a la altura del buje especialmente cuando a nivel del suelo hay poco viento, como es bastante usual por la noche. Este efecto meteorológico común y conocido aún no ha sido reconocido con respecto al ruido de las turbinas eólicas. Para determinar los niveles de potencia sonora de la turbina tuvieron que desviarse del procedimiento de medición estándar recomendado. Sin la cooperación del operador del parque era imposible funcionar apenas una turbina o ninguna turbina en absoluto. También un tablero duro, reflexivo como recomendado era impráctico o imposible de utilizar. La impulsividad se determina generalmente con una sola turbina en funcionamiento. Concluimos que los pulsos sonoros, no son claramente audibles en el propio parque eólico, son causados por la interacción de varias turbinas. El caso descrito aquí muestra que los modelos de cálculo deben ser verificados periódicamente para verificar su corrección, especialmente en las nuevas situaciones/aplicaciones y donde una reacción fuerte de la comunidad puede indicar que un modelo no cubre la realidad. Esto no sólo se aplica al caso de turbinas eólicas. Aunque los procedimientos estándar son necesarios y útiles, un efecto negativo es que hace a los ciudadanos más dependientes de los expertos.

1.3 Planteamiento del problema

1.3.1 Enunciado del problema

Las emisiones sonoras en aerogeneradores pueden tener dos orígenes diferentes, el ruido mecánico, y el ruido aerodinámico. El ruido aerodinámico es el de mayor emisión acústica en un aerogenerador y se clasifica en tres grupos, considerando diversos mecanismos aerodinámicos de generación se encuentran los siguientes: el sonido de baja frecuencia, el sonido de entrada de la turbulencia y el ruido propio de la superficie sustentadora; este último contiene un sonido de banda ancha y se origina principalmente por el flujo de aire alrededor de las palas. El ruido aerodinámico aumenta a medida que aumenta la velocidad del viento.

Es un hecho que el ruido emitido por aerogeneradores de pequeña potencia es un tema poco estudiado; sin embargo, su estudio se hace relevante en la actualidad debido a que los aerogeneradores de pequeña potencia encuentran su aplicación fundamentalmente cuando se instalan en zonas residenciales, en estas condiciones es necesario analizar el efecto del ruido que estos emiten sobre las personas. Si el ruido provocado por el aerogenerador supera el límite superior permisible, su uso puede ser descartado. Existen, normas nacionales e internacionales que establecen los límites permisibles del ruido que pueden soportar las personas.

Las investigaciones o estudios del ruido que actualmente se realizan se enfocan fundamentalmente a describir la causa y naturaleza del mismo, y al desarrollo de métodos para su mitigación. Se realizan para ello, estudios experimentales y modelados matemáticos. Los modelos teóricos tienen la ventaja de que no solo explican el fenómeno, sino también pueden predecir su comportamiento en determinadas condiciones. No todos los modelos pueden aplicarse en cualquier región para predecir el fenómeno.

El modelo BPM y BM ha sido empleado para predecir la emisión de ruido en aerogeneradores; sin embargo, no se ha reportado que hay a sido validado con mediciones experimentales en las condiciones específicas del Istmo de Tehuantepec. Este trabajo pretende precisamente realizar la validación experimental de estos modelos, aplicado a aerogeneradores de pequeña potencia, y en las condiciones específicas de la región del Istmo de Tehuantepec. Esto nos lleva a formular la pregunta ¿Cómo validar experimentalmente el modelo BPM y BM de emisión de ruido aerodinámico, aplicado a aerogeneradores de pequeña potencia, en condiciones de velocidades de viento específicas del Istmo de Tehuantepec?

1.4 Justificación

El resultado obtenido en este trabajo será la validación experimental de los modelos matemáticos de estudio de la predicción de la emisión de los niveles de presión sonora en las condiciones específicas del Istmo de Tehuantepec, aplicado a aerogeneradores de pequeña potencia. El mismo servirá de referencia para la validación de trabajos realizados o trabajos futuros, y la predicción del comportamiento del ruido para diferentes perfiles de palas de aerogeneradores de pequeña potencia en ciertas condiciones. Entre los programas que pueden ser empleados están los modelos de elementos finitos, tales como el COMSOL MULTIPHYSICS® y el módulo de predicción de ruido implementado en el software QBlade®.

En la región del Istmo de Tehuantepec, específicamente en el emplazamiento ubicado en la universidad del Istmo, campus Juchitán se cuenta con una estación de pruebas de aerogeneradores de pequeña potencia, se realizara la evaluación y certificación de aerogeneradores de pequeña potencia. Unas de las evaluaciones que se podrá realizar es el ensayo de ruido aerodinámico de los aerogeneradores y compararlos con el procedimiento descrito en este trabajo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estudiar la emisión de los niveles de presión sonora mediante modelación teórica y validación experimental en aerogeneradores de pequeña potencia.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar la compilación de los datos del viento de estaciones meteorológicas.
- Determinar las velocidades y direcciones predominantes mensuales y anuales del viento a la altura del buje del aerogenerador.
- Revisar las normas internacionales para el procedimiento del estudio de ruido.
- Caracterizar el sitio de instalación del aerogenerador.
- Realizar el análisis mediante modelación teórica del ruido acústico.
- Realizar el análisis experimental del ruido acústico según las normas IEC 61400-11 y NOM-SEMARNAT-081.

1.6 Hipótesis

Validar experimentalmente los modelos BPM y BM que predicen la emisión de niveles de presión sonora desprendida de la capa límite turbulenta en el borde de salida y de los vórtices en la punta de la pala, generada por la interacción del viento y los perfiles aerodinámicos de la pala de un aerogenerador de pequeña potencia en las condiciones de viento del Istmo de Tehuantepec, que permitirá establecer la distancia idónea de instalación, y proponer mejoras en el diseño de la geometría de palas.

1.7 Alcances y limitaciones

1.7.1 Alcances

Se realizará la validación de los modelos BPM y BM de predicción de niveles de presión sonora debido por el desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y de los vórtices en la punta de la pala en un aerogenerador de un kilo-watt potencia nominal, mediante la metodología diseñada por la norma IEC 61400-11 y NOM-SEMARNAT-081, implementada por los datos de las condiciones eólicas del Istmo de Tehuantepec.

1.7.2 Limitaciones

- La universidad del Istmo dispone de bases de datos de estaciones de la región del Istmo de Tehuantepec. Sin embargo, para realizar un estudio en un emplazamiento diferente requiere de más estaciones anemométricas de la región.
- No se dispone de los instrumentos correspondiente que pide la norma IEC, sin embargo se cuenta con un sonómetro que cumple con la calibración suficiente para realizar dicho análisis experimental.

1.8 Estructura de la tesis

En la tesis se presenta la validación del análisis matemático de los niveles de presión sonora, mediante un análisis experimental. La estructura de la tesis está dividida por los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1 es un apartado introductorio en el que se describe los antecedentes del tema, la justificación, el planteamiento del problema y los objetivos de este trabajo.
- En el capítulo 2 se introduce a la teoría de los métodos empleados para el análisis del ruido emitido por los aerogeneradores.
- En el capítulo 3 se describe el análisis teórico a detalle del modelo BPM.
- En el capítulo 4 se presenta la metodología de la norma IEC 61400-11 y NOM-SEMARNAT-081, la cuales detallan los procesos en el que se analizan los aerogeneradores.
- En el capítulo 5 se argumenta los resultados de la validación obtenidos al evaluar los datos del análisis experimental con respecto al análisis matemático.
- Por último se presenta las conclusiones generales y recomendaciones para trabajos a futuro.

Capítulo 2

Marco teórico

El sonido emitido por los aerogeneradores se irradia por encima del suelo, por lo general entre 50 y 150 m de altura. A medida que el sonido se propaga, frecuentemente se reduce cuanto más lejos del aerogenerador se encuentra el receptor. El tipo de suelo y las condiciones meteorológicas influyen en la atenuación del sonido con la distancia. En el cálculo de los niveles de presión sonora en una vivienda, es común que se empleen diferentes velocidades del viento y alturas en los receptores. En Suecia, por ejemplo, se utiliza una velocidad del viento de 8 m/s a una altura de 10 metros, viento abajo del aerogenerador al receptor. En algunos países, los entes gubernamentales han recomendado determinados cálculos para estimar los niveles de presión sonora. Sin embargo, el algoritmo simplificado no tiene en cuenta las variaciones meteorológicas tales como la temperatura y la humedad relativa (que influyen en la absorción de aire), y en su lugar asume una situación media. Un perfil de velocidad del viento que no sea el perfil real podría conducir a una propagación inadecuada del sonido dando como resultado niveles de presión sonora mayores o menores que los esperados. El modelo simplificado utilizado hoy en día debe ser validado con las mediciones de los niveles de presión sonora y contrastado con otros modelos de cálculo [17].

2.1 Análisis del sonido

Como se menciona en [17] la acústica es la rama de la física que estudia el sonido, el cual se define como la variación de presión producida en un medio (sólido, líquido o gaseoso) por un elemento que vibra y que el oído humano puede detectar. En cambio, el ruido se define como un conjunto de sonidos no armónicos o descompasados que no nos es grato. Así pues, como ya se ha dicho, el ruido no es más que un sonido indeseado, molesto y desagradable y su clasificación no es tanto una cuestión acústica como psicológica. Por tanto, los parámetros que debemos conocer del ruido, para proceder a su reducción o eliminación, son los mismos que los del sonido. La variación de presión de sonido más simple produce la formación de una onda senosoidal como la representada en la Figura 2.1.

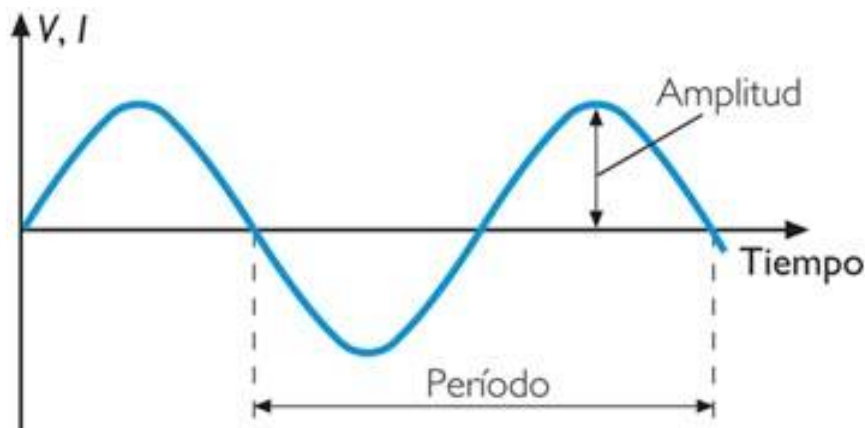


Figura 2.1. Onda senosoidal.

Esta onda sinusoidal, presenta una serie de características o magnitudes que la definen, las cuales son:

- Velocidad del sonido (c): En el aire al nivel del mar y a temperatura de 20 °C, es aproximadamente de 340 m/s.
- Longitud de onda (λ): Hace referencia a la distancia entre crestas o senos sucesivos en una onda sinusoidal. Se relaciona con la frecuencia.
- Periodo (P): Es el tiempo transcurrido entre dos picos o senos sucesivos. Se relaciona con la frecuencia.
- El nivel o amplitud (Am): Mide las variaciones de presión, es decir, la amplitud de la onda. Dado que las variaciones de presión audibles se encuentran en una gama muy amplia, se adoptó para su medición una unidad logarítmica llamada Decibelio (dB) en la que interviene una magnitud de referencia, que es precisamente la mínima presión audible o presión de umbral.

$$dB = 20 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.1)$$

Donde $P_0 = 20 \mu N w / w^2$ es equivalente a $20 \mu Pa$ en unidades de presión, como también se puede expresar en términos de potencia como $W_0 = 10^{-12}$ Watts.

Se puede definir el nivel de potencia sonora como la (NP_s) potencia sonora de una fuente expresada en watts, transformada a una escala logarítmica, expresándose en decibelios.

$$NP_s = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.2)$$

De igual manera definimos nivel de presión sonora (Nps), en este caso en referencia a presión, que de igual forma al expresarla sobre una escala logarítmica viene dada en decibelios, la diferencia de escalas entre ambas unidades se representa en la Figura 2.2.

$$Nps = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.3)$$

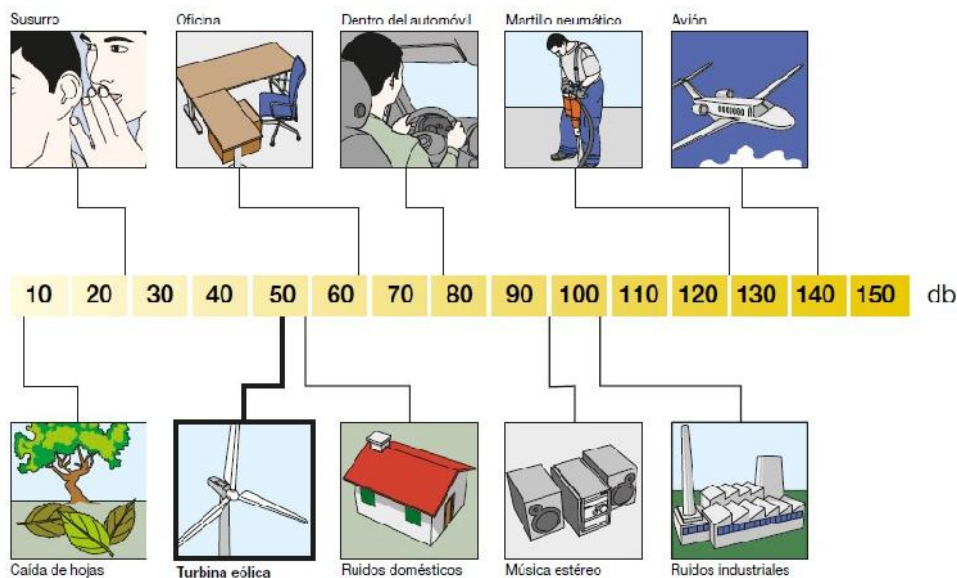


Figura 2.2. Escala comparativa entre nivel de presión sonora en Decibelios.

Las ondas sonoras se acompañan de un flujo de energía, se define la intensidad del sonido " I ", en una dirección específica y en un punto del campo sonoro como la potencia (en watt) media de sonido por unidad de área nominal a la dirección de propagación de la onda. Si estuviéramos hablando de una fuente pequeña que emite una potencia de sonido " w " watts en forma esférica en un medio no disipativo, la intensidad acústica a una distancia " r " sería:

$$I = w / 4\pi r^2 \quad (2.4)$$

Se puede comprobar que, a una distancia suficientemente lejos de la fuente de ruido, la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión de sonido, es decir, existe una relación entre la intensidad sonora y la presión sonora, que es la siguiente:

$$I = p^2 / \rho c \quad (2.5)$$

Donde “ I ” es la intensidad acústica, “ p ” es la presión del sonido, “ ρ ” es la densidad del medio y “ c ” es la velocidad del sonido en el medio.

Y de igual forma existe un Nivel de intensidad del sonido (N_{is}), en decibelios, siendo igual a 10 veces la razón entre la intensidad de un sonido I y la intensidad sonora de referencia I_0 es de $10^{-12}W/m^2$.

$$N_{is} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) dB \quad (2.6)$$

Frecuencia (f): Es el número de variaciones de presión por unidad de tiempo, midiéndose en ciclos por segundo o Hercios (Hz).

Los ruidos generalmente están compuestos por variaciones de presión de diferentes frecuencias. El sistema auditivo humano está capacitado para oír sonidos de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20,000 Hz.

No todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 Hz y 6,000 Hz, es decir, como se comprueba en las curvas de audición de la Figura 2.3, el oído humano se comporta “algo sordo” en bajas y altas frecuencias.

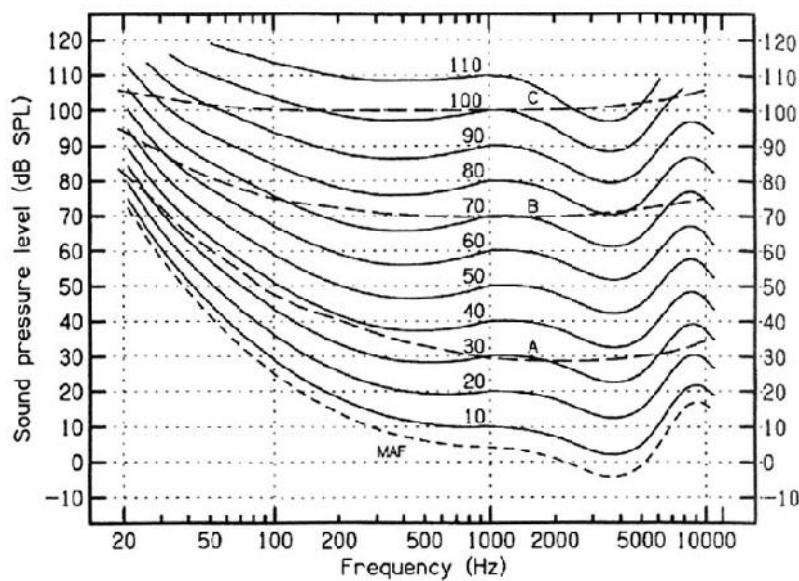


Figura 2.3. Curva de audición.
Fuente: [9].

La banda de frecuencias en la que fluctúa la voz humana está comprendida entre los 500Hz y los 2.000Hz .

Dada la amplia banda o gama de frecuencias audibles, para realizar estudios de ruido no es posible analizarlas una a una, por lo que ha sido dividida dicha banda en 10 bandas mas pequeñas denominadas octavas que se denominan y conocen por su frecuencias centrales: $31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2.000, 4.000$ y 8.000Hz . Para estudios de mayor precisión, se definen bandas de menor ancho, denominadas tercio de octava, a saber $1/3$ de la bandas anteriores.

El análisis de frecuencia de bandas de octava es necesario para investigar una fuente sonora, y predecir las características de aislamiento necesarias para las barreras antiruido, recintos aislantes o para medir la reducción de ruido entre muros comunes. También es de gran valor cuando se quiere diseñar un sistema de control de ruidos, para definir las modificaciones mínimas necesarias que hagan al sistema útil para las especificaciones requeridas. El análisis se realiza con un sonómetro y un juego de filtros en banda de octava acoplado a él o con un analizador de espectros.

2.1.1 Ponderación

Puesto que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias, resulta lógico que al efectuar una medición de ruido se tenga en cuenta esta particularidad.

Para ello, se establecen y se han normalizado diferentes curvas de ponderación Figura 2.4, las cuales siguen aproximadamente la misma ley que el oído en cuanto a sensibilidad en función de la frecuencia.

- Curva A, se aproxima a la curva de audición de baja sensibilidad.
- Curva B, se aproxima a la curva de audición de media sensibilidad.
- Curva C, se aproxima a la curva de audición de alta sensibilidad.

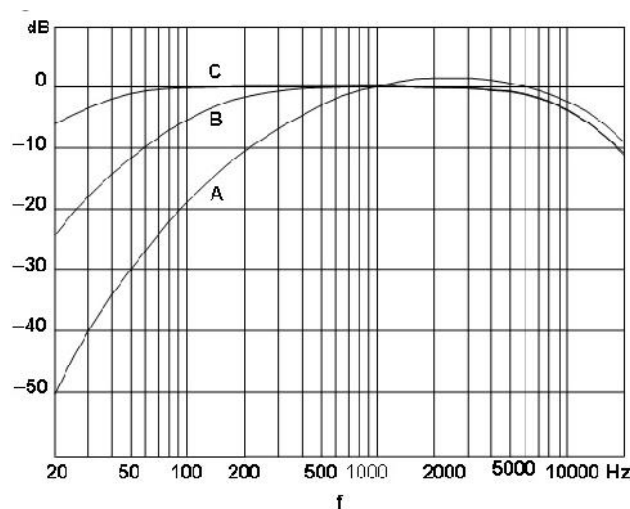


Figura 2.4. Ponderaciones.

El nivel sonoro más utilizado es con ponderación A, ya que es la que más protege al hombre contra la agresión del ruido, por lo que cuando el nivel sonoro este ponderado se suele representar el valor acompañado con dB(A), obteniéndose así los niveles sonoros ponderados. Los valores de las curvas están recogidos en la Tabla 2.1 para la ponderación A con respecto a las frecuencias más utilizadas.

Tabla 2.1. Respuesta de frecuencias relativas a la curva de ponderación A.

Frecuencia, Hz.	ponderación A, dB
31.5	-44.7
63	-26.2
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1000	0
2000	1.2
4000	1
8000	-1.1

2.1.2 Suma de decibelios

El decibelio es una cantidad engañosa, ya que pequeñas diferencias en el número de decibelios representan una variación muy importante en la cantidad de energía transmitida, y por tanto en su agresividad. La equivalencia de dos sonidos con 30 dB cada uno no es de 60 dB, la combinación no es la suma de los niveles individuales, sino que su equivalencia sonora se incrementa solo en 3 dB, es decir, la combinación de ambos sonidos supone que el nivel sonoro aumente hasta 33 dB.

La fórmula general para sumar decibelios es:

$$dB_T = 10 \log \sum_{t=1}^n 10^{dB_t/10} \quad (2.7)$$

Es de mucha utilidad la combinación de niveles, pues se hace necesario en casos como:

- Para calcular el nivel sonoro que resulta de la combinación de fuentes de ruido.
- Para determinar el nivel sonoro combinado de una fuente más el ruido de fondo.
- Para calcular el nivel de presión sonora global a partir de niveles de banda de octava o niveles de banda de tercios de octava.
- Para calcular el nivel de ponderación A para un espectro determinado de bandas de octava.
- Para combinar el nivel de presión sonora de dos o más fuentes de sonido.
- Para calcular el nivel sonoro con ponderación A a partir de los niveles de potencia sonora de bandas de octava.

2.1.3 Parámetros estándares sobre el ruido

En este apartado se van a describir los parámetros que suelen utilizarse para cuantificar los sonidos tanto estables como variables.

El principal requisito que debe cumplir un parámetro o criterio sobre el ruido es que sus valores tengan una correspondencia con la percepción del ruido, además de ser fácil de medir y predecir, así como fácil de entender y aplicable a cualquier fuente de ruido. Debido a que es difícil que un solo parámetro cumpla con todos estos requisitos, se propone un conjunto diferente de parámetros, siendo los más comunes los siguientes:

Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado $N_{psce}(A)$ aquel nivel continuo en dB(A) el cual, produciría la misma energía sonora en el mismo tiempo que el suceso dado. Normalmente el periodo de observación se entiende que es de 24 horas a menos que se indique lo contrario.

$$N_{psce} = 10 \log \left[1/24 \sum 10^{0.1L_{1h}(i)} \right] \quad (2.8)$$

Siendo L_{1h} el nivel sonoro equivalente en 1 hora.

Nivel de exposición sonora, NES : aquel nivel constante en dB(A) que, para una duración de un segundo tiene la misma cantidad de energía acústica que el suceso de ruido dado ponderado A índice útil para calcular los niveles sonoros que resultan de cualquier combinación de fuentes sonoras.

$$NES = 10 \log (E_A/E_0) \quad (2.9)$$

Correspondiéndose “ E_A ” es la exposición sonora con ponderación A, en pascales al cuadrado segundo. “ $E_0 = p_0^2 t_0$ ” es la exposición sonora de referencia y “ t_0 ” el tiempo de referencia es un segundo.

Si se produce una n serie de sucesos acústicos durante el intervalo de tiempo T , se calculará con la expresión siguiente:

$$L_{eq} = 10 \log \left[(1/T) \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{AE}(i)} \right] \quad (2.10)$$

Siendo “ $L_{AE}(i)$ ” el nivel de exposición sonora de cada suceso.

2.2 Los aerogeneradores como fuente de emisión de niveles de presión sonora

El sonido de los aerogeneradores proviene de una serie de mecanismos de producción de sonido relacionados con diferentes interacciones entre las palas del rotor y el aire. La emisión de ruido de los aerogeneradores puede tener dos orígenes diferentes: el ruido mecánico y el ruido aerodinámico [18].

En funcionamiento normal, el ruido mecánico se produce por el movimiento de engranajes y accesorios, y por lo general es de baja frecuencia como se muestra en las Figuras 2.5 y 2.6. La emisión de ruido se encuentra determinada no sólo por las características del aerogenerador sino también por su estado de mantenimiento [19].

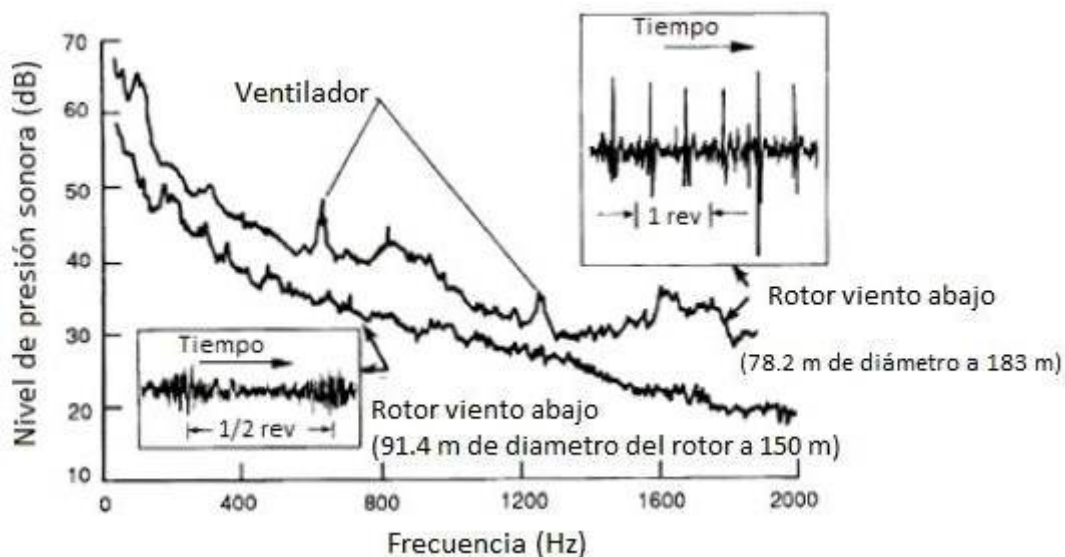


Figura 2.5. Espectro de ruido de los aerogeneradores.
Fuente: [16].

El ruido producido por las partes mecánicas tiene una energía dominante en el intervalo de frecuencias comprendido entre 100Hz y 1000Hz y puede contener componentes tonales discretos. El ruido tonal es conocido por ser más molesto que el ruido sin tonos [19] [20]. Los aerogeneradores de principios de los ochenta o antes, emiten ruido de tipo mecánico, que puede ser oído en los alrededores del aerogenerador, o en el peor de los casos incluso a distancias de hasta 200m . Sin embargo, un estudio realizado en 1995 sobre las prioridades en investigación y desarrollo de los fabricantes daneses de aerogeneradores mostraba que ninguno de los fabricantes consideraba que el ruido mecánico fuese un problema, por lo que no era necesario seguir investigando en esa área. La razón era que en un plazo de tres años los niveles de emisión de ruido se habían reducido a la mitad, debido a los avances tecnológicos [20]. El tamaño de los aerogeneradores ha aumentado y el ruido mecánico no aumenta tan significativamente con las dimensiones del aerogenerador como lo hace el ruido aerodinámico [21].

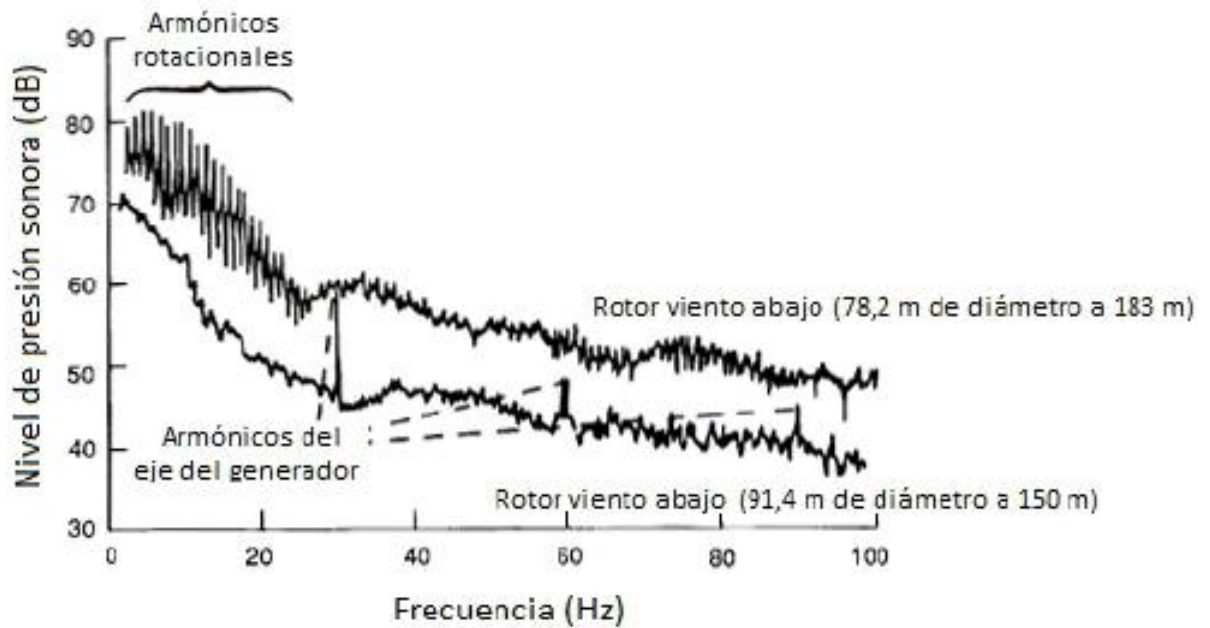


Figura 2.6. Espectro de ruido de baja frecuencia de los aerogeneradores.
Fuente: [17].

Se han obtenido logros cuantificables en cuanto a la reducción del ruido mecánico en los aerogeneradores de gran tamaño 1 MW . Entre ellos se destaca el aislamiento acústico de la góndola, y los sistemas de amortiguación de vibraciones y cargas [22].

Por otra parte, los picos espectrales que aparecen en la Figura 2.6, asociados con las emisiones acústicas debido a la operación de los ventiladores para la refrigeración del generador, se pueden eliminar si el aerogenerador utiliza un radiador de aceite en lugar del ventilador. Los aerogeneradores pequeños ($> 1\text{ MW}$) no suelen tener este tipo de mejoras y probablemente tendrán una mayor contribución de esta fuente [22].

El ruido mecánico tiene un patrón de radiación que puede ser asimétrico y altamente direccional, lo que permite identificar claramente esto en un espectro. En resumen, el ruido mecánico es de carácter tonal y por lo general, se puede despreciar [22].

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

El ruido aerodinámico de las palas se considera generalmente que es la fuente de ruido dominante. Se trata de un ruido de banda ancha inherente a la operación del aerogenerador, que se produce en la interacción de la corriente de aire y el rotor. La parte principal del ruido aerodinámico se produce en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 y 2000 Hz [23].

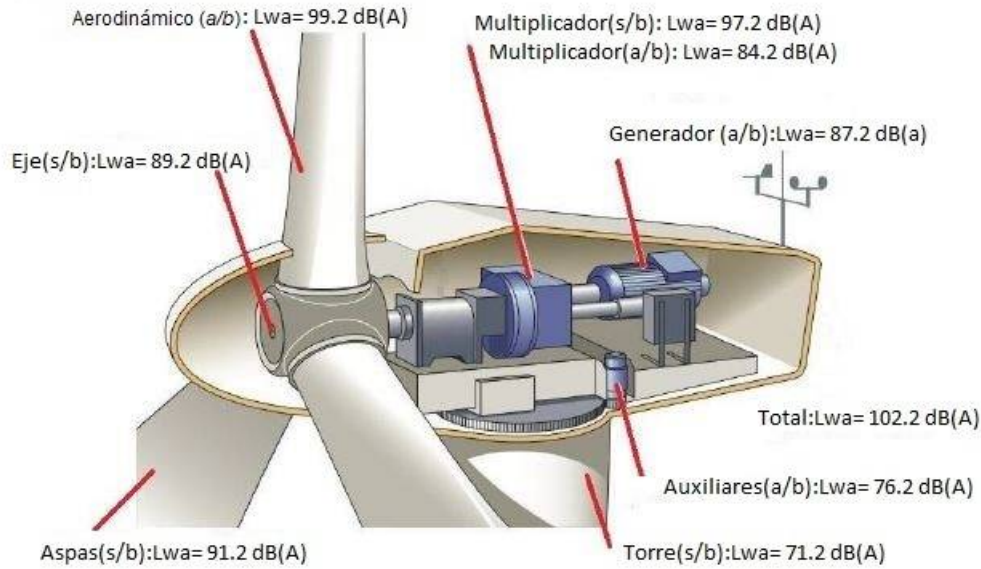


Figura 2.7. Fuentes de emisión y nivel de potencia sonora.
Fuente: [10].

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

2.2.1 Ruido aerodinámico de los aerogeneradores

El ruido puede ser de carácter tonal o de banda ancha, y puede ser causado por varios mecanismos, tales como la turbulencia que se produce en la capa límite que se desarrolla sobre la superficie de la pala. El ruido debido al flujo turbulento incidente y el ruido debido al borde de salida del perfil aerodinámico pueden contribuir globalmente en los niveles de potencia sonora de un aerogenerador [24].

Cuando el aerogenerador está en operación, el ruido que se emite debido a la interacción entre el flujo del aire y las palas depende de las características de estas. Debido a que la superficie de las palas suele tener un acabado liso, una buena parte del ruido se origina en el borde de salida de éstas. En su generación inciden también las condiciones ambientales, como la velocidad del viento a la altura del eje, el gradiente de temperatura y la humedad del aire [25].

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

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

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

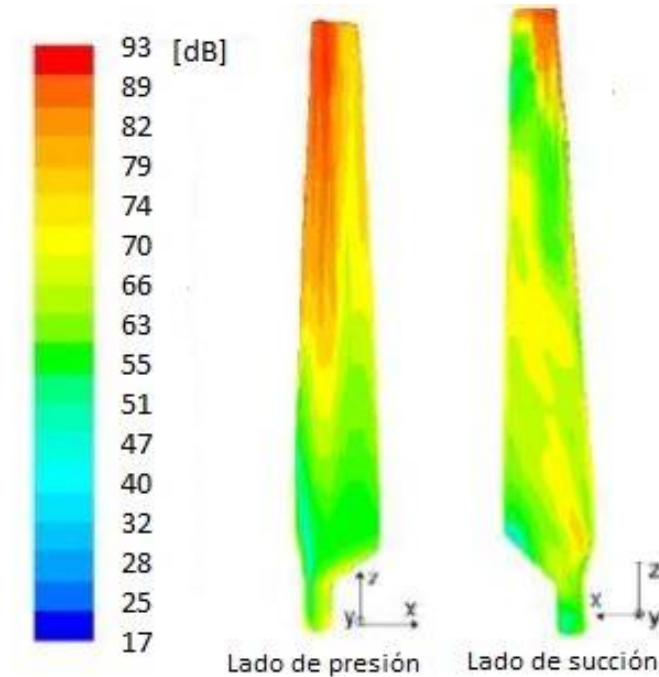


Figura 2.8. Nivel de potencia sonora en la superficie de una pala.
Fuente: [17].

2.3 Aeroacústica

2.3.1 Ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluido

La mecánica de fluido se ocupa del estudio de los fluidos, en reposo o en movimiento, así como sus interacciones con el entorno que lo rodea. Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos la materia solo puede presentarse en 2 estados: sólido y fluido. La distinción técnica entre ambos estados radica en el comportamiento de ambos ante un esfuerzo tangencial y cortante. Al considerar los fluidos como un medio continuo se asume que es posible definir una partícula de fluido cuyo tamaño sea grande comparado con las escalas molecular, pero pequeño comparados a otras escalas relevantes de longitud del problema. El comportamiento del fluido puede describirse entonces en términos de propiedades macroscópicas (velocidad, presión, temperatura, etc.) y de sus derivadas espaciales y temporales, puestas que todas las propiedades del fluido son en función de la posición y el tiempo.

El análisis de cualquier problema de mecánica de fluidos comienza necesariamente con el enunciado de las leyes fundamentales que gobiernan el movimiento del fluido,

además de las ecuaciones constitutivas del fluido y de las condiciones apropiadas por la geometría y el entorno, las leyes fundamentales son representaciones matemáticas de las leyes de conservación física, a saber:

- La masa del fluido se conserva.
- La tasa de cambio del momento o cantidad de movimiento en un fluido es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre el mismo (segunda ley de Newton).
- Los cambios de energía que experimenta el fluido equivale a la cantidad de calor suministrada al fluido mas el trabajo realizado por las fuerzas externas sobre el mismo (primera ley de la termodinámica).

2.3.2 Las ecuaciones de la aeroacústica lineal

La aeroacústica puede definirse como el estudio de los campos de presión no estacionarios asociados con el flujo de un fluido. Por lo tanto, un modelo que permita el análisis de las propiedades aeroacústica de un campo de flujo, debe estar sustentado en las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos. La teoría aeroacústica clásica, es una aproximación de primer orden en la que los efectos no lineales son despreciados, puesto que en general el sonido es una pequeña perturbación del estado estacionario de un flujo y de los efectos no lineales son perturbaciones de segundo orden [25].

2.3.2.1 La ecuación de ondas homogéneas

Por lo general, los valores de la viscosidad y la conductividad térmica son muy pequeños, por lo que en la practica es habitual despreciar sus efectos en la propagaciones de las perturbaciones acústicas, entonces la ecuaciones de Euler lineales para la parte fluctuante del campo son:

$$\frac{\delta \rho'}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_i} (\rho_0 v'_i + \rho'_0 v_{i0}) = 0 \quad (2.11)$$

$$\rho_0 \frac{\delta v'_i}{\delta t} + (\rho_0 v'_j + \rho'_0 v_{j0}) \frac{\delta v_{i0}}{\delta x_j} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho_0 v_{j0} v'_i) = - \frac{\delta p'}{\delta x_i} \quad (2.12)$$

$$\rho_0 \frac{\delta s'}{\delta t} + (\rho_0 v'_i + \rho'_0 v_{i0}) \frac{\delta s_0}{\delta x_i} + \rho_0 v_{i0} \frac{\delta s'}{\delta x_i} = 0 \quad (2.13)$$

Las ecuaciones de Euler lineales se toman como punto de partida para construir una gran variedad de problemas aeroacústica, y son la base de una gran parte de los códigos de aeroacústica computacionales.

Se tiene mayor explicación cuando el flujo base es un flujo uniforme, pues en dicho caso todas las derivadas de las variables del flujo se anulan:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} + v_i 0 \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} = 0 \rightarrow \frac{D \rho'}{Dt} + \rho_0 \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v'_1}{\partial t} + \rho_0 v_{j0} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} = -\frac{p'}{\partial x_i} \rightarrow \rho_0 \frac{Dv'_i}{Dt} = -\frac{\partial \rho'}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

$$\rho_0 \frac{\partial s'}{\partial t} + \rho_0 v_{i0} \frac{\partial s'}{\partial x_i} = 0 \rightarrow \rho_0 \frac{Ds'}{Dt} = 0 \quad (2.16)$$

A partir de las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 es posible obtener una ecuación de onda tomando la derivada de la ecuación y restando la divergencia de la ecuación:

$$\frac{D^2 \rho'}{Dt^2} - \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.17)$$

Esta ecuación es prácticamente una ecuación de onda, excepto por el hecho de que en ella aparecen las fluctuaciones de densidad y de presión, y sería mucho más conveniente tratar con solo una de las variables. Para eliminar las fluctuaciones de densidad es necesario establecer una relación entre ella y las fluctuaciones de presión, que dependerá de las propiedades termodinámicas del fluido. Puesto que estamos utilizando una teoría lineal es posible linealizar la relación entre la presión y la densidad [25]:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \\ \rho' &= \rho - \rho_0 \approx \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} (\rho - \rho_0) = \\ c_0^2 \rho' c_0^2 &= \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Donde la constante c_0 se escribe siempre al cuadrado puesto que toma un valor positivo. Sustituyendo 2.18 en la ecuación 2.17 se obtiene la ecuación de onda para la presión acústica:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{D^2 \rho'}{Dt^2} - \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.19)$$

La ecuación de onda 2.19 se denomina ecuación de onda para problemas de convección, puesto que involucra fuentes estacionarias emitiendo en un medio que se mueve uniformemente, tal y como ocurre en la mayoría de los problemas aeroacústicos.

La teoría aeroacústica lineal clásica resulta como un flujo base que se toma el estado estacionario de un fluido uniforme en reposo. En este caso $v_0 = 0$, y la ecuación de onda se reduce a:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2.20)$$

La ecuación 2.20 es la ecuación fundamental de la teoría aeroacústica lineal. Por tratarse de una ecuación lineal, la suma de dos soluciones de esta ecuación también es una solución de la misma. La ecuación 2.20 describe las propiedades de un campo de sonido en el espacio y en el tiempo, y su evolución.

2.3.3 Ecuación de onda inhomogenea

La ecuación de onda 2.20 es una ecuación homogénea que describe la propagación del sonido en todo el espacio excepto en la región fuente, una ecuación de onda válida

para todo espacio se obtiene cuando la fuente acústica se especifican como fuente propiamente dichas en las ecuaciones lineales de masa, momento y energía, dando lugar a una ecuación de onda inhomogénea [25].

Denotando por $\rho_0 q$ el término fuente de masa, el término fuente de momento como $\rho_0 F_i$, y el término fuente de entropía como p_{0q} , las ecuaciones Euler lineales para un flujo base uniforme (ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23) se escribe como:

$$\frac{D\rho'}{Dt} + \rho_0 \frac{\partial v^2}{\partial x_i} = \rho_0 q \quad (2.21)$$

$$\rho_0 \frac{Ds'}{Dt} = -\frac{\partial \rho'}{\partial x_i} + \rho_0 F_i \quad (2.22)$$

$$\rho_0 \frac{Ds'}{Dt} = \rho_0 H \rightarrow \frac{Dp'}{Dt} - c_0^2 \frac{D\rho'}{Dt} = \rho_0 H \quad (2.23)$$

2.4 Analogía aeroacústica de Lighthill

Una analogía aeroacústica consiste en una reformulación de las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos que permiten separar los mecanismos de generación de sonido de los mecanismos de propagación del mismo. En la parte del flujo donde se genera el sonido se le denomina región fuente, mientras que la parte del flujo en la que se propaga el sonido y donde se coloca el punto de observación del mismo se denomina región de propagación, en la Figura 2.9 se ilustra la separación del flujo en estas dos regiones. La diferencia entre el campo de flujo real y una extrapolación del flujo de referencia a la región fuente define la fuente de sonido.

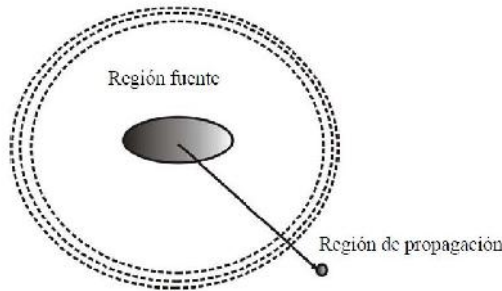


Figura 2.9. Separación del campo de flujo real.
Fuente: [25].

Por tanto, la analogía aeroacústica considera fuentes acústicas clásicas equivalentes radiando como si todo el método fluido estuviera en reposo. La distinción entre la región fuente y la región de propagación requiere un profundo conocimiento del flujo en el que se desarrolla el problema, cuestión que puede ser muy tedioso en muchas ocasiones.

El objetivo fundamental de la analogía de Lighthill es estimar el sonido producido por un campo de flujo fluctuante, empleando para ello una metodología consistente en la

separación del problema en dos partes, una primera parte dirigida a la caracterización del campo del flujo fluctuante a partir de principios de la mecánica de fluidos que no guarden relación en la propagación de perturbaciones acústicas en el medio, y la segunda parte dirigida a la estimación del sonido generado por dicho campo de flujo.

2.4.1 Ecuación de Lighthill

Lighthill, siguiendo la metodología indicada en los párrafos anteriores se considera un campo de flujo fluctuante limitado a una cierta región pequeña de un volumen de fluido, de forma que el resto del fluido permanezca en reposo. De este modo es posible comparar las ecuaciones de gobierno de las fluctuaciones de densidad en el flujo real con las correspondiente a un campo acústico uniforme en reposo que coincidirá con dicho flujo real fuera de la región fuente. La diferencia entre ambos conjuntos de ecuaciones puede considerarse como el efecto de un campo de fuerza externa fluctuante actuando sobre el medio acústico en reposo. Si el campo de fuerzas externas fluctuantes se determina a priori a partir del estudio del campo de flujo real mediante procedimientos fluidodinámicos, y dicho campo actúa sobre el medio acústico uniforme para el reposo, el sonido radiado estará gobernado por las leyes ordinarias de la Aeroacústica.

Existen dos razones fundamentales que llevaron a Lighthill a su formulación original a adoptar esta metodología. En primer lugar, puesto que no se considera la influencia del sonido sobre el campo de flujo que lo genera, puede considerarse el sonido como forzado por un campo de fuerza externa fundamental, de modo análogo a lo que ocurre con una oscilación forzada. En segundo lugar, si el campo libre se toma como el medio acústico uniforme en reposo, no es necesario considerar las modificaciones que sobre el sonido resultante ejercería el movimiento del medio que por lo general es difícil de cuantificar, pero que de esta forma son remplazadas por términos fuentes equivalentes.

Se reformula entonces las ecuaciones de la mecánica de fluidos en orden a derivar una ecuación de ondas sin introducir a priori ninguna hipótesis y sin emplear el proceso de linealización. Las ecuaciones exactas de conservación de la masa y del momento en ausencia de términos fuentes son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.25)$$

Donde $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$, es tensor de tensiones, siendo p la presión estática y τ_{ij} el tensor de tensiones viscosas.

Si se toma la derivada temporal de la ecuación (2.24) y se le resta la divergente de la ecuación (2.25) se obtiene:

$$\partial^2 \rho / \partial t^2 = \partial^2 \rho / \partial x_i^2 + \partial^2 (\rho v_i v_j - \tau_{ij}) / \partial x_i \partial x_j \quad (2.26)$$

Si la ecuación (2.26) se suma a ambos lados de la igualdad el termino $e_0^2 \partial^2 \rho / \partial x_i^2$ donde e_0 es una velocidad constante, la ecuación no varía, y se obtiene así un operador de ondas actuando sobre el lado izquierdo de dicha ecuación:

$$\partial^2 \rho / \partial t^2 - e_0^2 \partial^2 \rho / \partial x_i^2 = \partial^2 (\rho x_i v_j - \tau_{ij}) / \partial x_i \partial x_j + \partial^2 (p - e_0^2 \rho) / \partial x_i^2 \quad (2.27)$$

La clave consiste en comparar la ecuación previa con la que se obtendría, bajo condiciones normales, para un medio acústico uniforme y en reposo en el que se introduce las perturbaciones siguientes:

$$\rho' = \rho - \rho_0 \quad (2.28)$$

$$p' = p - p_0 \quad (2.29)$$

$$v' = v - v_0 \quad (2.30)$$

Donde ρ_0 , p_0 y v_{i0} , son respectivamente la densidad, la presión y la velocidad en la región de referencia.

Además, por tratarse de un medio acústico uniforme y en reposo se cumple que $v_{i0} = 0$ y la densidad ρ_0 y la presión p_0 , son constantes. Introduciendo las perturbaciones en la ecuación(2.24), se obtiene la ecuación de Lighthill:

$$\partial \rho / \partial t^2 - c_0^2 (\partial^2 \rho / \partial x_i^2) = \partial^2 T_{ij} / \partial x_i \partial x_j \quad (2.31)$$

Donde T_{ij} es el tensor de tensiones de Lighthill, definido como:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + (p - c_0^2 \rho) \delta_{ij} - \tau_{ij} \quad (2.32)$$

La ecuación de Lighthill es una ecuación de ondas aplicable directamente a las fluctuaciones de densidad, $p' = p - p_0$. Cuando se aplica a un problema real de aeroacústica la ecuación (2.28) se reduce a una ecuación de onda homogénea a distancia alejadas de la región fuente, puesto que todos los términos del lado derecho se anulan. De acuerdo a las hipótesis razonables relacionadas con la propagación de ondas acústicas, el término $\rho v_i v_j$, conocido como tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds, puede despreciarse en el campo acústico que rodea la región fuente, así como también pueden despreciarse las pérdidas debidas a la fricción, T_{ij} y la conducción de calor, para distancias de propagación comparables a la longitud de onda. En la aproximación lineal la contribución $(p - c_0^2 \rho)$ se anula cuando se identifica la velocidad constante c_0 con la velocidad isentrópica del sonido en esa región: $c_0^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$.

El término que aparece en el lado derecho de la ecuación (2.31) define las fuentes acústicas equivalentes correspondientes a un medio acústico uniforme y en reposo en la posición del observador y para la variable acústica p' . Dependiendo del problema a estudiar es posible realizar una elección diferente del flujo de referencia y de la variable acústica. Por ejemplo, para el medio acústico uniforme y en reposo es posible escribir la ecuación de Lighthill para la presión en lugar de la densidad:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho v_i v_j - \tau_{ij}) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{p'}{c_0^2} - \rho' \right) \quad (2.33)$$

Que también es directamente aplicable a las fluctuaciones de presión acústica, $p' = p - p_0$. No obstante, la ecuación (2.33) es menos habitual que la ecuación (2.31), puesto que las fluctuaciones de densidad están relacionadas directamente con los efectos de compresibilidad, mientras que las fluctuaciones de presión pueden existir para compensar aceleraciones Inerciales en el fluido. La producción de sonido como consecuencia de la transferencia no estacionaria de calor o por la combustión, constituyen ejemplos en los que el análisis se simplifica cuando se emplean las fluctuaciones de presión acústica p' .

El tensor de Lighthill, T_y , incorpora tres procesos aeroacústicos básicos que resultan en la generación de sonido por una parte la convección con el flujo a través de las fuerzas convectivas no lineales descritas por el tensor de tensiones fluctuantes de Reynolds, $\rho v_i v_j$, por otra la disipación gradual del sonido por la viscosidad a través del tensor de tensiones viscosas, τ_{ij} , y finalmente, la desviación de un comportamiento isentrópica del sonido a través del término $(p' - c_0^2 \rho')$. Matemáticamente el tensor de Lighthill corresponde a una distribución de cuadrupolos acústicos.

2.5 Aerodinámica

En aerodinámica se desean perfiles delgados, con bajo arrastre y con suave “*stall*”, que suelen tener un C_{lmax} bajo. Los pasos fundamentales para diseñar un pala son: determinación de parámetros optimizados (cuerda, ángulos de ataque, grosor) y adecuación de la punta para disminuir el ruido. El empleo de secciones del pala con forma de perfil de ala ha demostrado proporcionar elevados coeficientes de potencia [26].

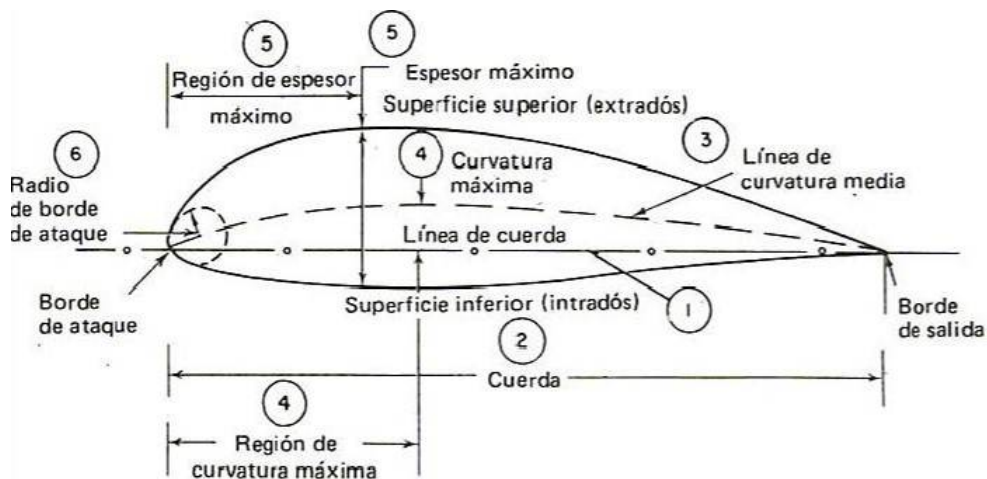


Figura 2.10. Parámetros geométricos de los perfiles.

Fuente: [26].

2.5.1 Distribución de velocidades en el perfil

Este incremento de las velocidades de vientos en la parte superior del perfil puede ser visualizado al tomar en cuenta de que el aire, al topar con el borde de ataque, se distribuye por la parte superior e inferior del perfil pero las líneas de corriente deben juntarse en el borde de salida. Debido a la curvatura positiva del perfil, el aire que pasa por la superficie superior tiene una mayor distancia que recorrer que el aire que pasa por la parte inferior del perfil. Mientras que las partículas que se mueven en ambas líneas de corriente fluyen a alrededor del perfil en la misma unidad de tiempo, las partículas que tengan una mayor distancia que recorrer lo deberán hacer a mayor velocidad [26].

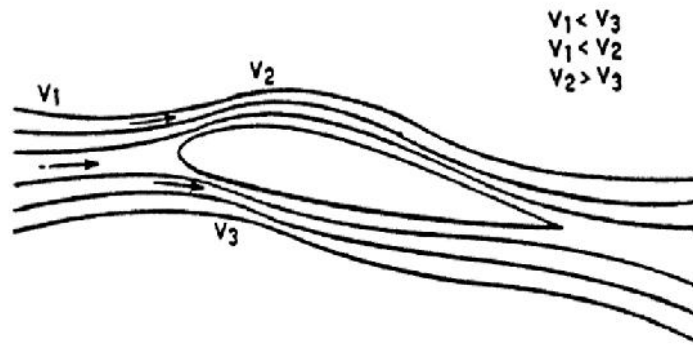


Figura 2.11. Distribución de velocidades alrededor del perfil.

De acuerdo a la ecuación de Bernoulli, cuando se incrementa la velocidad, se produce un aumento de la presión dinámica, lo que trae una disminución de la presión estática. Por este motivo, en un perfil se reduce la presión estática sobre el extrados por incremento de la velocidad [26].

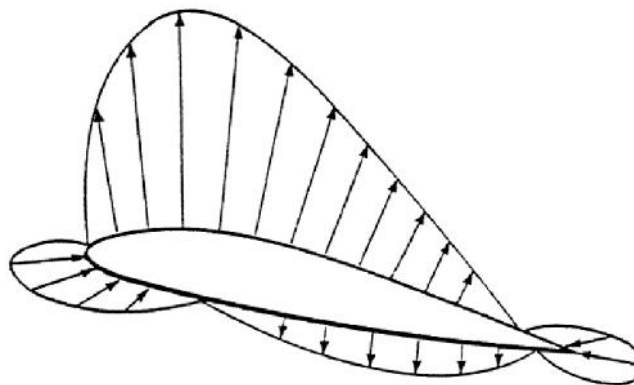


Figura 2.12. Distribución de presión alrededor del perfil.

Fuente: [26].

2.5.2 Capa límite

La capa molecular de aire en contacto con la superficie permanece adherida a esta, después existe un deslizamiento entre las diferentes capas, que conforme están a más distancia de la superficie, tienen una velocidad mayor hasta un punto en el que la velocidad de la capa de aire correspondiente es la de la corriente libre. La distancia entre la superficie del perfil (velocidad cero) y el punto donde la velocidad es la de la corriente libre, se denomina capa límite (el espesor es desde cero hasta el 99 % de la corriente libre.) Cuando el movimiento del aire dentro de la capa límite es en forma de capas paralelas, se la denomina laminar (esto ocurre en los puntos próximos al borde de ataque) [26].

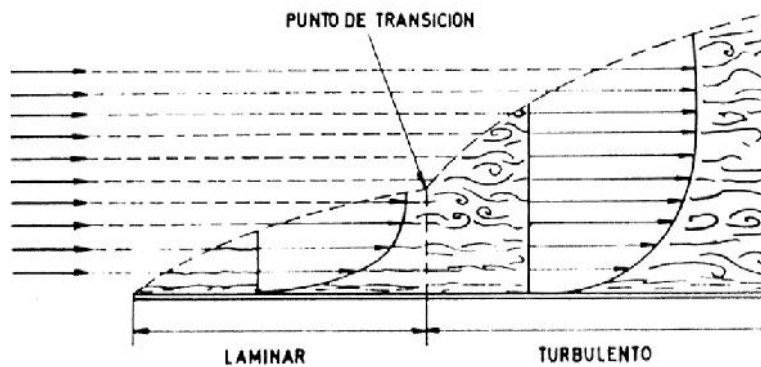


Figura 2.13. Capa límite.

Fuente: [26].

Conforme el aire se va alejando del borde de ataque, las fuerzas disipan mas energía de la corriente de aire haciendo que el espesor de la capa límite aumente, la capa límite empieza a sufrir unas perturbaciones de tipo ondulatorio que como consecuencia aumenta el espesor de la capa límite pasando a ser turbulenta.

2.5.3 Teoría de momento para cada elemento de la pala (BEM)

Se explica la teoría de momento en el diseño del rotor de un aerogenerador, considerando los efectos de las características de la geometría del rotor como las distribuciones de cuerda y ángulo de torsión del perfil aerodinámico de la pala. Para aplicar el análisis del elemento de la pala, se supone que: La pala está dividida en N secciones. Este análisis se basa en algunas suposiciones que incluyen la no interacción aerodinámica entre diferentes elementos de la pala [26].

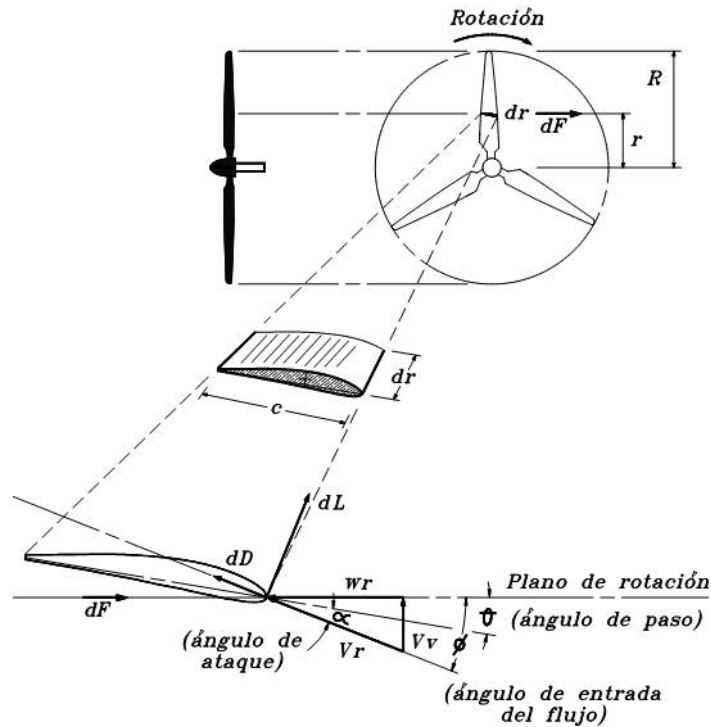


Figura 2.14. Segmentos de la pala.

Fuente: [26].

2.6 Fuentes de ruido acústico en los aerogeneradores

Las mediciones realizadas identifican tres fuentes principales de ruido en los aerogeneradores [27]:

- Flujo turbulento incidente: Producido por las fluctuaciones de carga aerodinámicas causadas por la turbulencia del flujo de aire incidente cuando interactúan con las aspas.
- Desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida: Producido por el flujo turbulento desarrollado en la capa límite sobre la superficie aerodinámica del pala al desprenderse en el borde de salida.
- Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida: Producido por los vórtices causados por la turbulencia en el borde de salida.

Otra posible fuente de ruido es la formación de vórtices en la punta de la pala. Esta fuente no es tan significativa como las tres listadas anteriormente. Sin embargo, geometrías inusuales relacionadas con la punta de la pala, podría resultar en un ruido mucho más importante [27].

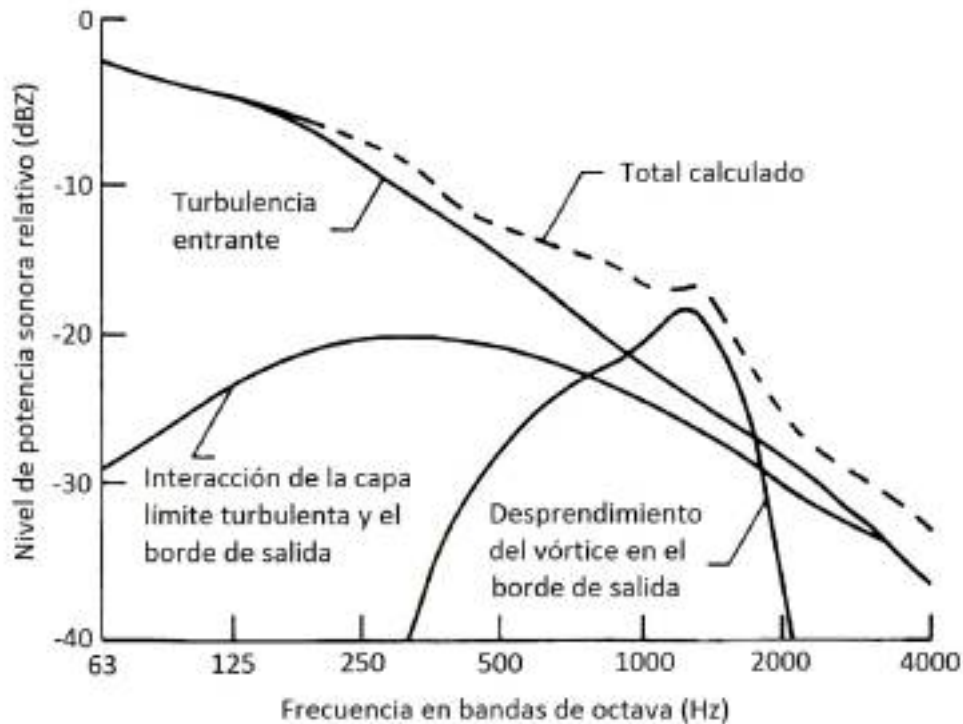


Figura 2.15. Contribuciones relativas de las diferentes fuentes de ruido al espectro del ruido total calculado de acuerdo con los métodos de Grosveld para un aerogenerador con rotor viento arriba.

Fuente: [27].

La Figura 2.15 muestra las contribuciones relativas de las fuentes de ruido al espectro de ruido total calculado de acuerdo con los métodos de Grosveld para un aerogenerador de gran tamaño con rotor viento arriba. Los cálculos están en bandas de tercios de octava para cada una de las diferentes fuentes de ruido identificadas. También se incluye la suma de las contribuciones de estos componentes [27] y [28]. Como se observa en esta el flujo turbulento incidente contribuye al ruido total en todo el intervalo de frecuencias y domina el espectro a frecuencias por debajo de aproximadamente 500 Hz.

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

— **Emisión de ruido debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida:** A números de Reynolds bajos, se desarrolla en gran medida una capa límite laminar sobre la superficie aerodinámica del aspa, cuya inestabilidad produce el desprendimiento de los vórtices y el ruido asociado al borde de salida [28].

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

Esta fuente de ruido depende de la forma y el espesor del perfil aerodinámico del borde de salida (ver Figura 2.16). Si el espesor del borde de salida es mayor que el espesor de

la capa límite en el borde posterior, esta fuente será dominante en el ruido global. Por esta razón, para reducir los niveles de potencia sonora, deben utilizarse los bordes de salida aerodinámicos en las palas de los aerogeneradores.

—**Emisión de ruido debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:** Es el ruido producido por la interacción entre la capa límite turbulenta y el borde de salida de la pala. El ruido es generado por la convección de la capa límite turbulenta adjunta al aspa dentro de la estela de la superficie aerodinámica y que en el borde de salida se desprende. La capa límite turbulenta toma lugar con un número de Reynolds alto y/o ángulos moderados de ataque. A números de Reynolds altos, la capa límite turbulenta se desarrolla sobre la mayor parte de la superficie aerodinámica. el ruido se produce a medida que esa capa límite turbulenta se desprende desde el borde de salida [28].

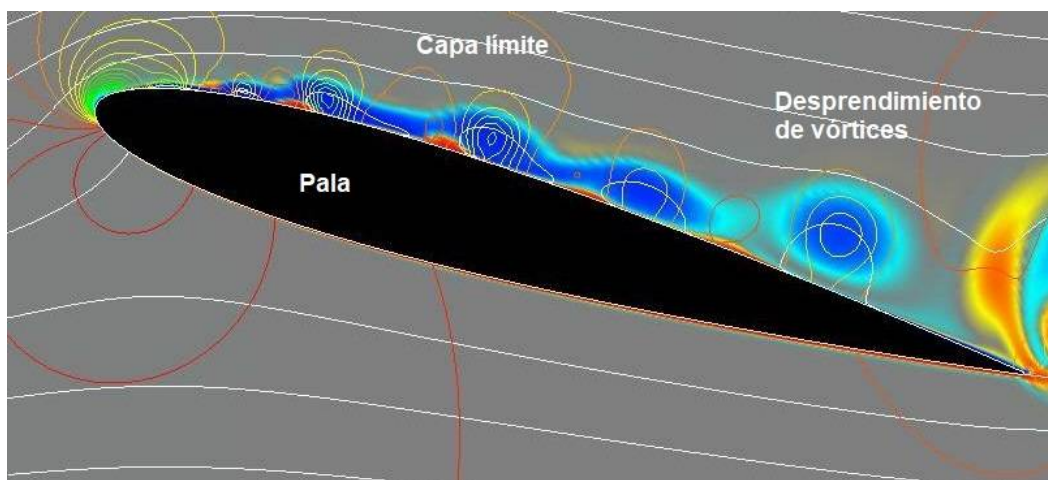


Figura 2.16. Desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida.
Fuente: [28].

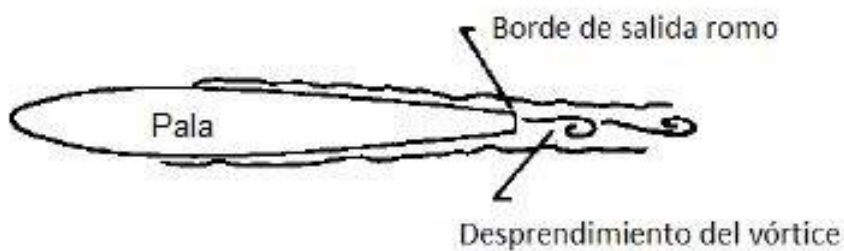


Figura 2.17. Desprendimiento de los vórtices en un borde de salida romo.
Fuente: [28].

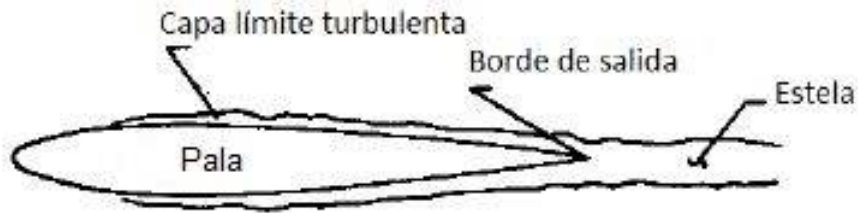


Figura 2.18. Desprendimiento de la capa límite en el borde de salida.
Fuente: [28].

La Figura 2.18 muestra el desprendimiento de la capa límite en el borde de salida del perfil aerodinámico. Cuando la superficie aerodinámica del aspa se desplaza con ángulos de ataque altos ocurre la separación de la capa límite, y se le denomina nivel de potencia sonora debido a la separación Stall (ver Figura 2.19). En el lado de succión de la superficie aerodinámica, bajo el espesor de la capa límite, las estructuras turbulentas se forman y dominan la producción de ruido. En condiciones de parada, el ruido puede ser 10 dB más alto que el irradiado por la capa límite turbulenta a ángulos de ataque bajos.

— **Emisión de ruido debido a la formación del vórtice en la punta de la pala:** Dado que no existen límites alrededor de la punta de la pala, el flujo asume una característica tridimensional en esta región promovida por el diferencial de presión entre las superficies aerodinámicas. El flujo converge desde el lado de presión hacia el lado de succión formando un vórtice en la punta como se muestra en la Figura 2.20. Este vórtice presenta un núcleo turbulento que reforzará la emisión de ruido al conducir esta turbulencia sobre el borde hacia la región de la estela del rotor.

— **Emisión de ruido debido al flujo turbulento incidente:** Aunque esta fuente de ruido es intrínsecamente aerodinámica, tiene que ver más con la capa límite atmosférica y las condiciones de flujo viento arriba, que con el propio perfil aerodinámico. Por esta razón se considera aparte de las otras fuentes aerodinámicas.



Figura 2.19. Separación stall.
Fuente: [28].



Figura 2.20. Formación de vórtice en la punta de la pala.
Fuente: [28].

Este ruido, que depende de las condiciones atmosféricas, es causada por la interacción entre la pala y el flujo turbulento del viento. La turbulencia atmosférica provoca variaciones del ángulo de ataque en las palas de los aerogeneradores y esto a la vez causa fluctuaciones en las fuerzas de sustentación y resistencia.

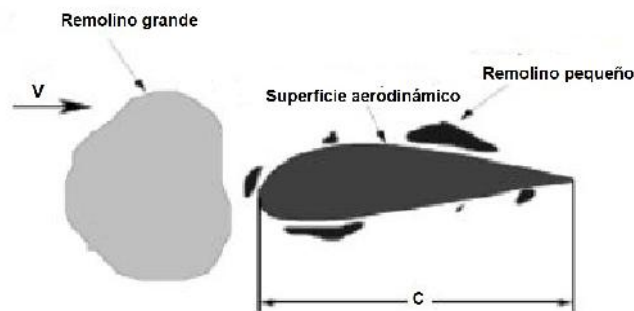


Figura 2.21. Flujo turbulento incidente.
Fuente: [28].

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

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

Varios efectos aumentan la amplitud de las fluctuaciones con carácter silbante y están relacionados con el aumento de la estabilidad atmosférica. Para que sea audible (recono-

cible), debe corresponder a un cambio en el nivel sonoro de por lo menos 1 dB. Según van den Berg [29], se estima que, al pasar por la torre, el nivel de potencia sonora varía aproximadamente en 2.1 (+-) 0.4 dB. Esto se debe, en parte, a la menor velocidad del viento que se tiene corriente arriba de la torre y que afecta el flujo en el extremo inferior del aspa.

La mayor cantidad de energía se encuentra en las frecuencias más bajas. Sin embargo, la mayor parte de este sonido no es perceptible para el oído humano. El sonido en las frecuencias más altas se absorbe mejor durante la propagación a través de la atmósfera [29].

2.7 Modelos de predicción para los niveles de potencia sonora de los aerogeneradores

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

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

Según Lowson, los diferentes modelos de predicción se pueden clasificar en tres clases. Los modelos clase I son predicciones que dan una estimación del nivel global en banda ancha como una función algebraica sencilla de los parámetros básicos del aerogenerador. Estos modelos requieren parámetros de entrada simples, como el diámetro del rotor, la potencia y la velocidad del viento. Los modelos clase II son predicciones que consideran en forma separada los diversos mecanismos que causan el ruido en los aerogeneradores, utilizan parámetros de entrada seleccionados más complejos y proponen estimar el nivel de potencia sonora en bandas de frecuencias. Los modelos clase III son modelos más refinados cuyas predicciones utilizan información completa acerca de los mecanismos de ruido relacionados con una descripción detallada de la geometría del rotor y la aerodinámica. Hasta ahora, no hay modelos de este tipo que estén disponibles para su implementación [30].

Los modelos clase I son fáciles de implementar y la información necesaria es fácil de conseguir. Sin embargo, los niveles de potencia sonora estimados son valores en banda ancha y no permiten calcular la dependencia que éste tiene con la frecuencia. Los modelos clase II son mucho más difíciles de aplicar debido a la cantidad de información que se requiere. Sin embargo, son capaces de predecir el ruido producido en bandas de frecuencia [30].

Se puede elegir el modelo a utilizar en función de la descripción que se requiere hacer del ruido y de la cantidad de información disponible acerca del aerogenerador para

suministrar al modelo. Los modelos de clase I se pueden utilizar como una estimación preliminar de ruido esperado de los aerogeneradores. Sin embargo, los estudios detallados requieren la aplicación de modelos de clase II.

Después de investigar los diferentes modelos de predicción para estimar el nivel de potencia sonora en banda ancha, Zidan concluye que existe una variación considerable entre los resultados de los primeros tres modelos simples que se incluyen para la clase I y el resto de los modelos que requieren más parámetros de entrada para su aplicación. Los niveles de potencia sonora estimados con los modelos de clase I no difieren mucho de un modelo a otro [30].

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

2.7.1 Modelos clase I

A continuación se muestran algunos modelos para la predicción de ruido de un aerogenerador que puede ser clasificados en la categoría de clase I.

- Modelo de Lowson: ha sido desarrollado como un método muy simple para obtener el nivel de potencia sonora total con parámetros de entrada simple [30].

$$NPs = 10\log(P_w) + 50 \quad (2.34)$$

En la cual:

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

P_w = Potencia nominal del aerogenerador, W .

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

- Modelo de Hau: Ecuación desarrollada para estimar el nivel de potencia sonora total [31].

$$NPs = 22\log(\phi) + 72 \quad (2.35)$$

En la cual:

NPs = Nivel de potencia sonora, $dB(A)$.

ϕ = Diámetro del rotor, m .

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

- Modelo de Hagg (I)= Desarrollado par estimar el nivel de potencia total teniendo en cuenta un parámetro mucho mas importante como lo es la velocidad en la punta

de la pala del rotor [31].

$$NPs = 50\log(U_{punta}) + 10\log(\phi) - 4 \quad (2.36)$$

En la cual:

NPs = Nivel de potencia sonora, $dB(A)$.

ϕ = Diámetro del rotor, m .

U_{punta} = Velocidad punta de la pala del rotor, m/s .

- Modelo de van den Berg (I)= Modelo desarrollado par estimar el nivel de potencia total a partir la velocidad de giro del aerogenerador [32].

$$NPs = 67.1\log(Vr) + 15.4 \quad (2.37)$$

En la cual:

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

Vr = Velocidad rotacional del aerogenerador, rpm .

- Modelo de van den Berg (II)= Es otro modelo para estimar el nivel de potencia sonora total pero esta vez en función de la velocidad del viento a la altura del eje [32].

$$NPs = -0.022U_{eje}^4 + 0.78U_{eje}^3 - 10U_{eje}^2 + 55.3U_{eje} - 12.3 \quad (2.38)$$

En la cual:

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

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

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

- Modelo de Hagg (II)= Sirve para estimar el nivel de presión sonora total tomando en consideración muchos más parámetros de los aerogeneradores [32].

$$Nps = 63.3\log(U_{punta}) + 11.5\log(n_a A_a / A_r) + 2.5\log(C_{fa}) + 20\log(\phi/r) - 10\log(\phi) - 27.5 \quad (2.39)$$

En la cual:

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

U_{punta} = Velocidad en la punta de la pala del rotor, m/s .

n_a = Numero de palas

A_a = Área de la pala, m^2

A_r = Área del rotor, m^2

C_{fa} = Coeficiente de fuerza axial

ϕ = Diámetro del rotor, m

r = Distancia entre el eje del rotor y el receptor, m .

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

2.7.2 Modelos de clase II

Los modelos para la predicción de los niveles de presión sonora debido a la interacción viento-aerogenerador, pueden ser clasificado en esta clase. En estos modelos, la pala del aerogenerador está dividida en segmentos, cada uno tiene su propia cuerda, longitud, ángulo de ataque, velocidad de flujo libre y por lo tanto cada segmento tiene su propia contribución al nivel de presión sonora total emitido. Los niveles de presión sonora de los diferentes segmentos de la pala tienen que ser sumados para producir los niveles de presión sonora de cada una de las fuentes de ruido. El número de segmentos de la pala se decide de acuerdo al diseño de la pala o en sus defectos por el cambio de geometría a lo largo del tramo. El nivel de presión sonora estimado está en banda de tercios de octava.

El nivel de presión sonora permite calcular el nivel de potencia sonora estimando el nivel de presión sonora lo más cercano posible del eje del aerogenerador. Modelos como el de Brooks, Pope y Marcolini (BPM), requieren de una buena cantidad de datos de entrada, además de ser muy específicos, son de difícil consecución. El modelo semi-empírico desarrollado por Brooks, Pope y Marcolini para estimar el ruido producido por los aerogeneradores se basa en la interacción entre el perfil aerodinámico de la pala y la turbulencia inducida por sí misma.

Las siguientes ecuaciones se derivan de los datos experimentales obtenidos en pruebas realizadas en un túnel de viento con modelos de perfiles aerodinámicos NACA 0012 con bordes de salida muy afilados:

Para la capa límite no desprendida:

$$\delta_0 = 10^{[1.6569 - 0.9045(\log Re_{Cda}) + 0.0596(\log Re_{Cda})^2]} * Cda \quad (2.40)$$

Para capa límite desprendida:

$$\delta_0 = 10^{[3.0187 - 1.5397(\log Re_{Cda}) + 0.1059(\log Re_{Cda})^2]} * Cda \quad (2.41)$$

$$\delta_0^* = 0.0601 * Re_{Cda}^{-0.114} \quad Re_{Cda} \leq 0.3 * 10^6 \quad (2.42)$$

$$\delta_0 = 10^{[3.411 - 1.5397(\log Re_{Cda}) + 0.1059(\log Re_{Cda})^2]} * Cda \quad Re_{Cda} > 0.3 * 10^6 \quad (2.43)$$

donde:

Re_{Cda} = Número de Reynolds

Cda = Longitud de la cuerda de la pala, m .

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

Para el lado de presión de la superficie aerodinámica para la capa límite no despren-

da y desprendida:

$$\delta_p = 10^{[-0.04175*\alpha+0.00106*\alpha^2]} * \delta_0 \quad (2.44)$$

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

$$\delta_s = 10^{[0.0679*\alpha]} * \delta_0^* \quad 0 \leq \alpha \leq 7.5 \quad (2.45)$$

$$\delta_s = 0.0162x10^{[0.3066*\alpha]} * \delta_0^* \quad 7.5 \leq \alpha \leq 12.5 \quad (2.46)$$

$$\delta_s = 52.42x10^{[0.0258*\alpha]} * \delta_0^* \quad 12.5 \leq \alpha \leq 25 \quad (2.47)$$

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

$$\delta_s = 10^{[0.0679*\alpha]} * \delta_0^* \quad 0 \leq \alpha \leq 7.5 \quad (2.48)$$

$$\delta_s = 0.381x10^{[0.1516*\alpha]} * \delta_0^* \quad 7.5 \leq \alpha \leq 12.5 \quad (2.49)$$

$$\delta_s = 14.296x10^{[0.0258*\alpha]} * \delta_0^* \quad 12.5 \leq \alpha \leq 25 \quad (2.50)$$

donde:

α = Ángulo de ataque

— **Niveles de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite en el borde de salida:** depende de la forma y el espesor del perfil aerodinámico del borde de salida. Solo en caso de borde de salida romos o de gran espesor, esta fuente puede dominar el ruido total. El nivel de presión sonora debido al desprendimiento de los vórtices de la capa límite laminar en el borde de salida está dada por:

$$L_{pdvcllbs} = 10\log(M^{5.5}tLD_h/r^2) + G_4((t/\delta_a vg)\Psi_5((t/\delta_a vg)\Psi * St_2/St_{peak3})) \quad (2.51)$$

— **Niveles de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida:** Para este caso Brooks, Pope y Marcolini determinaron una relación proporcional empírica entre el espesor del desplazamiento de la capa límite turbulenta y el ruido emitido por la superficie aerodinámica. Además, desarrollaron modelos para cada lado de presión y el lado de succión de la superficie aerodinámica como función del número de Reynolds y el ángulo de ataque, y según si la capa límite se ha desprendido o no. El nivel de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y el nivel de presión sonora debido a la separación Stall están dado por:

$$Nps_{total} = 10\log_{10} (10^{Nps_{\alpha/10}} + 10^{Nps_{s/10}} + 10^{Nps_{p/10}}) \quad (2.52)$$

con:

$$Nps_p = 10\log_{10} \left(\frac{\delta_p^* M^5 L d_h}{r_c^2} \right) + A \frac{St_p}{St_1} + (K1 - 3) + \Delta K1 \quad (2.53)$$

$$Nps_s = 10\log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L d_h}{r_c^2} \right) + A \frac{St_s}{St_1} + (K1 - 3) \quad (2.54)$$

$$N_{ps_\alpha} = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L d_l}{r_c^2} \right) + B \frac{St_s}{St_2} + K_2 \quad (2.55)$$

—**Nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta de la pala**
Está dado por:

$$N_{ps_{fvp}} = 10 \log \left(\frac{M^2 M_{max}^3 h^2 D_h}{r_2} \right) - 30.5 [\log(St_2) + 0.3]^2 + 126 \quad (2.56)$$

2.8 Predicción el ruido asociado a los aerogeneradores

Los modelos de predicción han sido desarrollados para estimar los niveles de presión sonora en un sitio de emplazamiento como consecuencia de la emisión de ruido de una fuente específica para una serie de condiciones determinadas. Los modelos de predicción describen el proceso de estimación teórica de los niveles de presión sonora dentro de una región de interés. Es importante reconocer que los datos de salida de un modelo de predicción de ruido sólo representan una estimación de los niveles de presión sonora reales que pueden ocurrir en el tiempo y el espacio, considerando un cierto periodo de tiempo en que todos los fenómenos son estacionarios. Una parte fundamental de la evaluación es el método utilizado para predecir los niveles de presión sonora asociados a los aerogeneradores en los receptores sensibles ubicados en las inmediaciones del parque eólico. Si un método de predicción subestima los niveles de presión sonora, aunque sea marginalmente, podría llevar a suspender el funcionamiento del parque eólico durante la fase operacional con el fin de lograr el cumplimiento de los niveles permisibles de ruido. Por el contrario, un método de predicción que sobreestime los niveles de presión sonora puede hacer que el suelo disponible para la producción de energía eólica sea subutilizado [33].

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

Cuando el nivel de potencia sonora se ha determinado, el siguiente paso es calcular qué cantidad de energía acústica llegará al receptor. En contraste con la condición de propagación esférica, la propagación exterior es mucho más compleja debido a la influencia de las condiciones climáticas, la vegetación, la forma del terreno y los diferentes tipos de suelo. El efecto total de las condiciones climáticas sobre la propagación del sonido puede dar lugar a diferencias en el nivel de presión sonora de hasta 20 a 25 dB. Cuanto más largo sea el camino de transmisión del sonido, mayores serán estas diferencias [34].

2.8.1 Consideraciones para estimar el ruido producido por los aerogeneradores

Todavía no se cuenta con un procedimiento estándar aplicable directamente para estimar el ruido generado por los aerogeneradores. La mayoría de los cálculos predictivos de los niveles de presión sonora asociados a los aerogeneradores se hacen aplicando modelos empíricos. Generalmente los modelos empíricos no producen buenos resultados para fuentes de gran altura, pero en este caso se aplica para un aerogenerador de pequeña potencia que suele instalarse a alturas menores a los 30 m.

Dada la extensa variedad de usos que tiene un modelo de predicción de ruido, como calcular la direccionalidad, Intensidad acústica y potencia sonora incidente; así como la amplia variedad de factores que influyen en los niveles de presión sonora en campo abierto, no existe un procedimiento para definir un modelo detallado que sea adecuado para cada aplicación. La propagación del sonido en espacios abiertos esta sujeta a múltiples influencias físicas de la trayectoria de propagación. Independiente del método utilizado para la predicción, se necesita datos de entrada precisos para calcular las pérdidas en la propagación. Para distancias menores a 100 metros, para cual los efectos meteorológicos desempeñan un papel de menor importancia, las propiedades del suelo, generalmente dadas por la impedancia de la superficie, son las más importantes.

2.9 Teoría de la propagación del sonido en campo libre

El sonido en el campo libre se propaga de manera relativamente esférica, dependiendo de la directividad de la fuente. Es decir, el nivel de presión sonora es igual a una distancia determinada de la fuente, con independencia de su dirección. Incluso una fuente altamente directiva, se comporta como omnidireccional cuando la longitud de la onda de emitida es considerablemente mayor al tamaño de la fuente. Cuando hablamos de la propagación del sonido consideramos un espacio donde no existen reflexiones del sonido ni este es absorbido por obstáculo de ninguna clase, es decir, no hay superficie límite: el suelo. Sin embargo, la propagación del sonido como fenómeno teórico es importante estudiarla para conocer las características que no tienen que ver con la geometría o los materiales, si no con la fuente sonora.

La propagación del sonido en espacio abiertos está sujeta a múltiples influencias físicas de la trayectoria de propagación, independiente del método utilizado para la predicción, se necesita datos de entrada precisos para calcular las pérdidas en la propagación. Los fenómenos de propagación de las ondas sonoras en el campo libre son muy complejos y se deben considerar un gran número de parámetros. Los principales están relacionados con las características físicas del medio como la presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.

2.10 Método de medición: Norma IEC 61400-11

Esta parte de la norma IEC 61400-11 presenta los procedimientos de medición que permiten caracterizar las emisiones de ruido de un aerogenerador. Esto implica el uso de métodos de medición adecuados a la evaluación de emisión de ruido en los lugares cerca de la máquina, a fin de evitar errores debidos a la propagación del sonido, pero lo suficientemente lejos para considerar el tamaño de la fuente como finita. Los procedimientos de los métodos presentados por la norma permiten caracterizar las emisiones de ruido de un único aerogenerador de una manera coherente y precisa.

La norma IEC 61400-11 define los procedimientos que se utilizan en la medición, análisis y reportes de las emisiones acústicas de un generador eólico. Estos procedimientos garantizan la precisión y la coherencia de las mediciones acústicas y no-acústicas. La aplicación del método descrito en la norma proporciona los niveles de potencia acústica aparente ponderados en A, espectros, y tonalidad a valores enteros de velocidades del viento entre 6 y 10 m/s de cada aerogenerador.

Las mediciones se realizan en lugares cercanos al aerogenerador con el fin de minimizar la influencia de los efectos del terreno, las condiciones atmosféricas o el ruido provocado por el viento. Para tener en cuenta el tamaño del aerogenerador que se está probando, se utiliza una distancia de referencia basada en las dimensiones del aerogenerador.

Las mediciones de los niveles de presión sonora y velocidades del viento se realizan simultáneamente durante cortos períodos de tiempo y sobre una amplia gama de velocidades del viento. Las velocidades del viento medidas se convierten en velocidades del viento correspondientes a una altura de referencia de 10 metros y una longitud de rugosidad de referencia de 0.05m. El término longitud de rugosidad es la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser nula. Los niveles sonoros estandarizados son determinados a velocidades del viento de 5, 6, 7, 8, 9 y 10 m/s , utilizados para el cálculo de los niveles de potencia acústica aparente ponderados en A.

La directividad del viento se determina comparando los niveles de presión sonora ponderada en A, en tres posiciones adicionales alrededor de la turbina, con aquellos medidos en la posición definida como referencia.

2.10.1 Micrófono

El micrófono se montará en el centro de una placa dura y plana con el diafragma del micrófono en el plano perpendicular a la placa y con el eje del micrófono apuntando hacia la turbina de viento, como en la Figura 2.22. La placa deberá ser circular con un diámetro de por lo menos un metro y compuesta de madera dura (contrachapado, terciado, aglomerado) con un espesor de por lo menos 12mm o de metal con un espesor de al menos 2.5mm. El protector de viento, para ser usado con el micrófono montado en el suelo, estará compuesto de un protector primario y en caso necesario, un secundario. El protector de viento principal consistirá en una mitad de una esfera de espuma poliuretánica

porosa con un diámetro de aproximadamente 90mm , que se centra en el diafragma del micrófono.

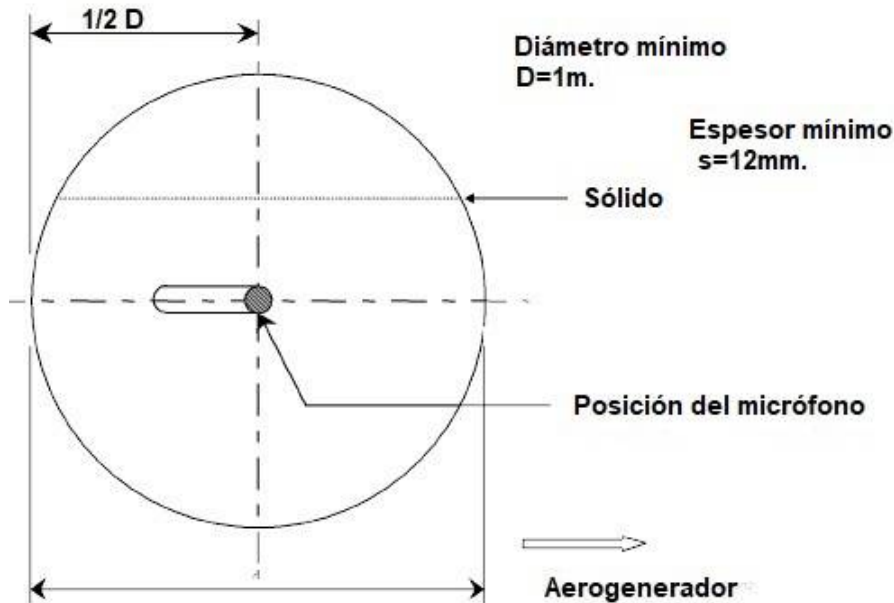


Figura 2.22. Montaje de Micrófono.

2.10.2 Determinación de la velocidad del viento con un anemómetro

El anemómetro para medir la velocidad del viento. Los resultados de las mediciones de velocidad del viento se ajusta y la rugosidad de referencia. También es adecuado hacer mediciones de ruido ambiente de fondo, cuando el aerogenerador se encuentra inmovilizado. Los datos de velocidad del viento serán recogidos y promediados aritmeticamente durante el mismo período de las mediciones acústicas.

Durante las mediciones, el anemómetro no podrá estar dentro de cualquier porción de estela del rotor del aerogenerador o de otra estructura. La estela de un aerogenerador se considera que se extiende a 10 diámetros del rotor a favor del viento.

2.10.3 Mediciones acústicas

Las mediciones acústicas permitirán determinar la emisión de ruido del aerogenerador en las velocidades de $5, 6, 7, 8, 9$ y 10m/s donde se obtendrá el nivel de potencia sonora aparente y los niveles de presión sonora.

2.10.4 Dirección del viento

La dirección del viento se observará en tiempo real, para garantizar que los lugares de medición se mantienen dentro de rango respecto a la posición de el aerogenerador y la veleta que tiene incluida. La dirección del viento se calculará como la media durante el mismo período que las mediciones de ruido.

2.10.5 Correcciones debido al ruido ambiente de fondo

Todos los niveles de presión sonora medidos se corregirán por la influencia del ruido ambiente de fondo, se registrarán los datos cuando el ruido del aerogenerador sea menor que el ruido de fondo.

2.10.6 Nivel de potencia acústica aparente

Mediante el cálculo de los niveles de presión sonora se calculará los niveles de potencia sonora aparente que será explicado más adelante en el punto 3.5.2.

2.10.7 Otras condiciones atmosféricas

La temperatura del aire y la presión se medirán y registrarán por lo menos cada 2 hrs.

2.10.8 Velocidad del viento

Las velocidades del viento medidas a una altura z , se corregirán a la velocidad del viento V_s para las condiciones de referencias asumiendo los perfiles de viento en la ecuación 2.54:

$$V_s = V_Z \left[\frac{\ln \left[\frac{z_{ref}}{z_{0ref}} \right] \ln \frac{H}{z_0}}{\ln \left[\frac{H}{z_{0ref}} \right] \ln \frac{z}{z_0}} \right] \quad (2.57)$$

donde:

z_{0ref} =es la longitud de rugosidad de referencia de 0.05 m.

z_0 =es la longitud de la rugosidad.

H =es la altura al centro del rotor.

z_{ref} =es la altura de referencia, 10 m.

z =es la altura del anemómetro.

V_z = velocidad del viento a una altura z , m/s.

La ecuación 2.54 utiliza los siguientes principios:

– La corrección para la altura de medición z a la altura del centro de rotor H utiliza un perfil de viento logarítmico con una longitud de rugosidad del lugar z_0 para explicar las condiciones del sitio real.

– La corrección de la altura de centro de rotor H a condiciones de referencia utiliza un perfil de viento logarítmico con una longitud de rugosidad de referencia Z_{0ref} . Esto describe la característica del ruido independientemente del terreno.

La longitud de rugosidad z_0 puede ser calculada a partir de mediciones de la velocidad del viento a varias alturas o estimada de acuerdo a la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Longitud de rugosidad.

Tipo de terreno	Longitud de rugosidad z_0
Agua, nieve o superficie de arena.	0.0001 <i>m</i>
Tierra abierta, plana, césped cortado, suelo desnudo.	0.01 <i>m</i>
Tierra de sembrado con alguna vegetación.	0.05 <i>m</i>
Barrios, ciudades, bosques, muchos árboles y arbustos.	0.3 <i>m</i>

2.11 Posición de medición

Se utilizará una posición para ubicar el micrófono, la posición deberá estar dispuesta según un patrón estándar de medición con respecto al eje vertical de la torre de la turbina de viento, como se indica en la vista en planta en la Figura 2.23. La posición de medición requerida a favor del viento es identificada como la posición de referencia. La dirección de las posiciones deberá tener una precisión de 15 relativa a la dirección del viento en el momento de la medición. La distancia horizontal R_0 desde la línea central vertical de la torre del aerogenerador a cada posición del micrófono.

Se utilizará una posición para ubicar el micrófono. deberá estar dispuesta según un patrón estándar de medición con respecto al eje vertical de la torre del aerogenerador.

En la Figura 2.23 se muestra la distancia de referencia R_0 para los aerogeneradores de eje horizontal dada por:

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (2.58)$$

Donde:

H =es la distancia vertical desde el nivel del suelo hasta el centro del rotor.

D =es el diámetro del rotor.

R_1 =es la distancia de instalación del micrófono al centro del rotor.

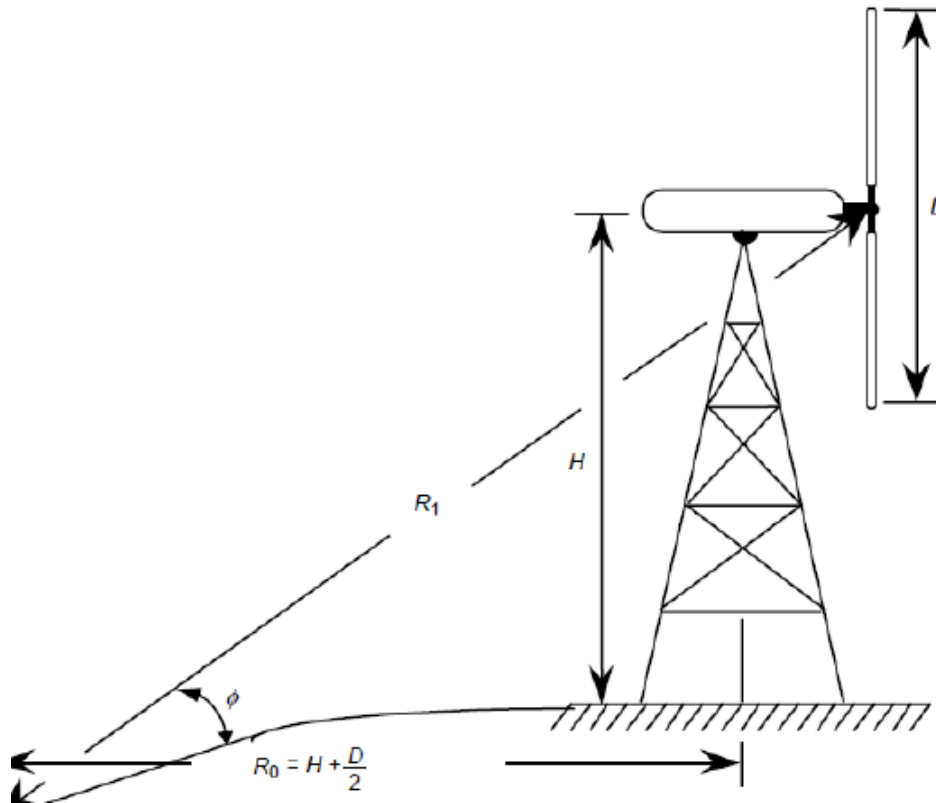


Figura 2.23. Posición de medición acústica en un aerogenerador de eje horizontal.

2.12 NOM-081-SEMARNAT-1994

2.12.1 Objeto

Esta norma oficial mexicana establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido que genera el funcionamiento de las fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina su nivel emitido hacia el ambiente.

2.12.2 Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana se aplica en la pequeña, mediana y gran industria, comercios establecidos, servicio público o privado y actividades en la vía pública.

Considerando que la contaminación acústica es un problema ambiental importante con cada vez mayor presencia en la sociedad moderna, debido al desarrollo de actividades industriales, comerciales y de servicios que constituyen fuentes tanto fijas como móviles que generan diferentes tipos de ruido, que de acuerdo a su intensidad, frecuencia y tiempo de exposición, repercuten no sólo en los seres humanos sino en los seres vivos que conforman los ecosistemas en los que se encuentra inmersa la población humana.

Que el artículo 4to. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establece el derecho de toda persona a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar,

mandato constitucional que implica la protección del conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

Que el artículo 155 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, prohíbe las emisiones de ruido en cuanto se rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. Que en este sentido, la Dirección General de Industria, previa valoración técnica, sometió el presente instrumento, mismo que tiene como finalidad precisar los límites máximos permisibles del nivel sonoro en ponderación A emitidos por las fuentes fijas, atendiendo a la actividad generadora del mismo, las zonas en las cuales puede producirse y los horarios en los cuales puede generarse; modificaciones que no crean nuevos requisitos o procedimientos, sino que únicamente precisa e individualiza aspectos técnicos importantes para la determinación de niveles aceptables de ruido y, por lo que he tenido a bien expedir en la siguiente Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Límites máximos permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994.

Zona	Horarios	Límite máximo permisible dB (A)
Residencial	6:00 a 22:00	55
	22:00 a 6:00	50
Industrias y comercios	6:00 a 22:00	68
	22:00 a 6:00	65
Escuelas	durante el juego	55
Ceremonias, festividades y eventos.	4 horas	100

Análisis numérico del ruido

El continuo desarrollo de la tecnología eólica, así como su aceptación como una tecnología viable para la producción de energía eléctrica, puede conducir en un futuro a que una mayor cantidad de personas radiquen en localidades cercanas a parques eólicos o que implementen la tecnología de pequeña potencia en sus hogares, por lo que es adecuado interesarse en su impacto ambiental. El cálculo del nivel de presión sonora asociado a los aerogeneradores es importante para obtener la licencia de construcción y el permiso de funcionamiento por parte de las autoridades para la instalación de parques eólicos en áreas con una gran densidad de población. De forma general, en la práctica es mucho más fácil calcular el nivel de presión sonora que medirlo, pues este análisis debe hacerse antes de instalar el parque eólico. Así pues, en casi todo el mundo, las autoridades se apoyan en los cálculos a la hora de conceder la licencia de construcción de un parque eólico.

Calcular los niveles de presión sonora a partir de modelos de predicción de ruido representa una gran ventaja dado que, en situaciones reales, durante la realización de las mediciones las condiciones cambian y se presentan otros sonidos que interfieren en las mediciones. Debido a esto, evidentemente los modelos de predicción se han convertido en una de las herramientas más importantes para evaluar los niveles de presión sonora. Sin embargo, un modelo de predicción nunca se ajusta plenamente a la realidad. Incluso un modelo de predicción perfecto no reproduce la realidad si los valores de entrada no concuerdan con ella. La gestión de los riesgos asociados con el uso de modelos de predicción acústica requiere una comunicación clara de los aspectos pertinentes entre los profesionales y los usuarios finales de la información. Por tanto, es necesario que todas las partes involucradas tengan alguna apreciación de lo que se trata cuando se utilizan modelos de predicción de ruido y la diversidad de enfoques que se pueden adoptar.

3.1 Selección de los modelos de predicción

Tomando en cuenta la información en las referencias [20], [22] y [29] explicado en el punto 2.6, se considera que de las 3 fuentes principales donde se produce ruido aerodinámico en las palas del aerogenerador de pequeña potencia, se tienen en cuenta el ruido que se desprende de la capa límite turbulenta en el borde de salida y el ruido producido por la punta de la pala, ya que la pala esta construida de una geometría inferior a las usualmente analizadas, por lo tanto, no se ve afectada por el flujo turbulento incidente. Procediendo a utilizar el modelo semi-empírico BPM y el cálculo de niveles de presión producido por los vórtices en la punta de la pala con el modelo BM, que predicen los niveles de presión sonora debido al desprendimiento de la capa límite turbulenta en el borde de salida y en la punta de la pala.

3.2 Modelo original BPM

El modelo BPM hace la predicción de los niveles de presión sonora (Nps) del borde de salida del perfil aerodinámico en un espectro de 1/3-octava basándose en las siguientes ecuaciones:

$$Nps_{total} = 10\log_{10} (10^{Nps_{\alpha}/10} + 10^{Nps_s/10} + 10^{Nps_p/10}) \quad (3.1)$$

con:

$$Nps_p = 10\log_{10} \left(\frac{\delta_p^* M^5 L d_h}{r_c^2} \right) + A \frac{St_p}{St_1} + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (3.2)$$

$$Nps_s = 10\log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 L d_h}{r_c^2} \right) + A \frac{St_s}{St_1} + (K_1 - 3) \quad (3.3)$$

$$Nps_{\alpha} = 10\log_{10} \left(\frac{\delta_{\alpha}^* M^5 L d_l}{r_c^2} \right) + B \frac{St_s}{St_2} + K_2 \quad (3.4)$$

Donde los subíndices “p”, “s” y “α” denotan el lado de presión, el lado de succión y el ángulo de ataque respectivamente, δ^* es el espesor del desplazamiento de la capa límite; M es el número incidente Mach; “ r ” es la distancia del observador desde el borde de salida; “ St ” es el número de Strouhal; St_1 , St_2 , K_1 , ΔK_1 , y K_2 son otras funciones o constantes empíricas derivadas de datos experimentales; A y B son funciones empíricas de forma espectral de 1/3 de octava y son funciones de Reynolds; L es la longitud del segmento y d_h , d_l son las funciones de directividad de alta y baja frecuencia para el ruido del borde de salida dado por:

$$d_h = \frac{2\text{sen}^2(\theta/2) \text{sen}^2\phi_c}{(1 + M\cos\phi_c)[1 + (M - M_c)\cos\phi_c]} \quad (3.5)$$

$$d_l = \frac{\text{sen}^2(\theta/2) \text{sen}^2\phi}{(1 + M\cos\theta)^4} \quad (3.6)$$

Las funciones de directividad expresadas en la ecuaciones 3.5 y 3.6, pueden corregir los valores de niveles de presión sonora de acuerdo con la posición del observador respecto a la fuente. Como resultado en algunas direcciones el nivel de presión sonora tendrá un valor más bajo que en otras.

Una fuente sonora es direccional cuando emite con mayor amplitud hacia una dirección, en tanto en otras direcciones la emisión tiene un cierto grado de reducción. Al determinar si la amplificación convectiva y la direccionalidad pueden explicar cuantitativamente la fuente asimétrica en la distribución de la fuente medida. Estos conceptos los introducen BPM con el ejemplo de un observador estacionario y un aspa en movimiento, tal como se muestra en la Figura 3.1, donde la pala es la fuente de ruido a ser considerada, además, se presenta un sistema de coordenadas local con ϕ y θ , siendo los ángulos de direccionalidad mientras r es la distancia entre la pala y la posición del observador. Por lo tanto, el factor de direccionalidad del sonido puede ser normalizado por el ruido de borde de salida emitido en la posición.

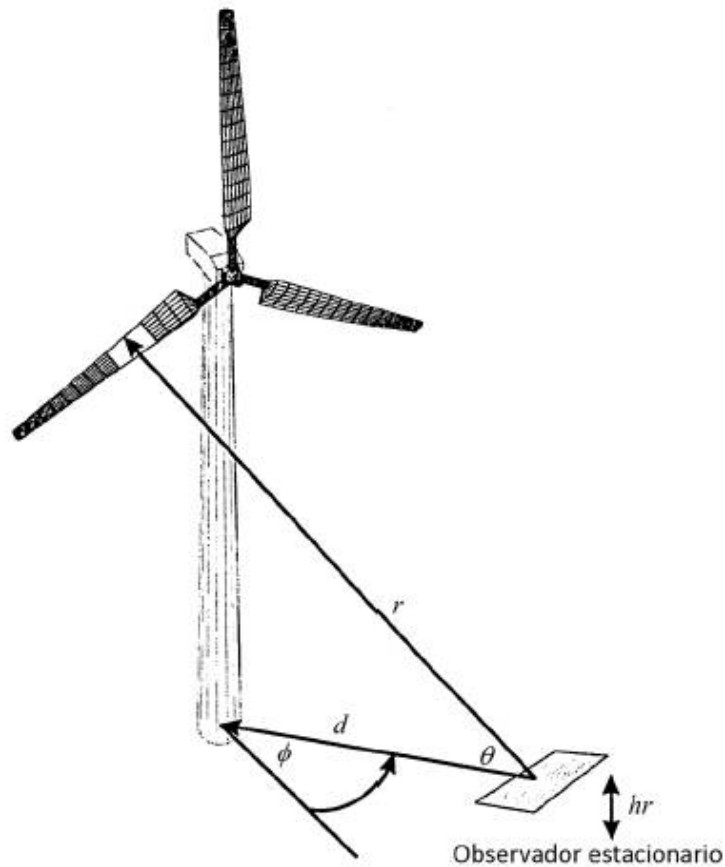


Figura 3.1. Ángulos de direccionalidad.
Fuente: [29].

El término más relevante en estas ecuaciones del 3.2 a 3.4 es el argumento del logaritmo, y el valor numérico que podría tomar sería inferior a la unidad (debido en gran parte al número de Mach), por lo tanto, el valor resultante del logaritmo de este término tendría un signo negativo. Hay un valor para el espesor de la capa límite para cada segmento de la pala debido a la variación de la longitud de la cuerda y el cambio de velocidad a lo largo de la longitud de la pala, por lo tanto, el número de Reynolds varía en cada segmento. L

es la longitud del borde de ataque de la pala en las ecuaciones 3.22 a 3.23.

De acuerdo a la definición del número de Strouhal, para valores altos (del orden de 1) el flujo es dominado por la viscosidad. Para valores bajos (del orden de 10^{-4} y menores) la parte cuasi estable del flujo (de alta velocidad) domina la oscilación. Los valores intermedios del número de Strouhal se caracterizan por la aparición de vórtices, para este caso son:

$$St_p = \frac{f * \delta_p^*}{U} \quad (3.7)$$

$$St_s = \frac{f * \delta_s^*}{U} \quad (3.8)$$

$$St_1 = 0.2 * M^{-0.6} \quad (3.9)$$

$$St_2 = St_1 \quad \alpha < 1.33 \quad (3.10)$$

$$St_2 = St_1 * 10^{0.0054(\alpha-1.33)^2} \quad 1.33 < \alpha < 12.5 \quad (3.11)$$

$$St_2 = St_1 * 4.72 \quad 12.5 < \alpha \quad (3.12)$$

$$\bar{St}_1 = \frac{St_1 + St_2}{2} \quad (3.13)$$

A y B son funciones de forma espectral dada por:

$$A(a) = A_{min}(a) + A_R(a_0)[A_{max}(a) - A_{min}(a)] \quad (3.14)$$

$$B(b) = B_{min}(b) + B_R(b_0)[B_{max}(b) - B_{min}(b)] \quad (3.15)$$

Las curvas de interpolación sobre las cuales se basa A son:

$$A_{min}(a) = \sqrt{67.552 - 886.788 * a^2} - 8.219 \quad a < 0.204 \quad (3.16)$$

$$A_{min}(a) = -32.665 * a + 3.981 \quad 0.204 \leq a \leq 0.244 \quad (3.17)$$

$$A_{min}(a) = -142.795 * a^3 + 13.656 * a^2 - 57.757 * a + 6.006 \quad 0.244 < a \quad (3.18)$$

$$A_{max}(a) = \sqrt{67.552 - 886.788 * a^2} - 8.219 \quad a < 0.13 \quad (3.19)$$

$$A_{max}(a) = -15.9 * a + 1.098 \quad 0.13 \leq a \leq 0.321 \quad (3.20)$$

$$A_{max}(a) = -4.669 * a^3 + 13.491 * a^2 - 16.699 * a + 1.149 \quad 0.321 < a \quad (3.21)$$

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

$$a = \left| \log \frac{St}{St_{pico}} \right| \quad (3.22)$$

El coeficiente de interpolación A_R está dado por:

$$A_R(a_0) = \frac{-20 - A_{min}(a_0)}{A_{max}(a_0) - A_{min}(a_0)} \quad (3.23)$$

Por último, a_0 se determina así:

$$a_0(Re_c) = 0.57 \quad Re_c < 9.52e^4 \quad (3.24)$$

$$a_0(Re_c) = -9.57e^{-13}(Re_c - 8.57e^5)^2 + 1.33 \quad 9.52e^4 \leq Re_c \leq 8.57e^5 \quad (3.25)$$

$$a_0(Re_c) = 1.33 \quad 8.57e^5 < Re_c \quad (3.26)$$

Las curvas de interpolación sobre que se basa B son:

$$B_{min}(b) = \sqrt{16.888 - 886.788 * a^2} - 4.019 \quad b < 0.13 \quad (3.27)$$

$$B_{min}(b) = -83.607 * b + 8.138 \quad 0.13 \leq b \leq 0.145 \quad (3.28)$$

$$B_{min}(b) = -817.81 * b^3 + 355.21 * b^2 - 135.024 * b + 10.619 \quad 0.145 < b \quad (3.29)$$

$$B_{max}(b) = \sqrt{16.888 - 886.788 * a^2} - 4.019 \quad b < 0.1 \quad (3.30)$$

$$B_{max}(b) = -31.33 * b + 1.854 \quad 0.1 \leq b \leq 0.187 \quad (3.31)$$

$$A_{max}(a) = -80.541 * b^3 + 44.174 * b^2 - 39.381 * b + 2.344 \quad 0.187 < b \quad (3.32)$$

en la cual b es la relación del número de Strouhal:

$$b = \left| \log \frac{St_s}{St_2} \right| \quad (3.33)$$

El coeficiente de interpolación B_R está dado por:

$$B_R(b_0) = \frac{-20 - b_{min}(b_0)}{B_{max}(b_0) - B_{min}(b_0)} \quad (3.34)$$

Por último, b_0 se determina así:

$$b_0(Re_c) = 0.3 \quad Re_c < 9.52e^4 \quad (3.35)$$

$$b_0(Re_c) = -4.48e^{-13}(Re_c - 8.57e^5)^2 + 0.56 \quad 9.52e^4 \leq Re_c \leq 8.57e^5 \quad (3.36)$$

$$b_0(Re_c) = 0.56 \quad 8.57e^5 < Re_c \quad (3.37)$$

K_1 es una función de amplitud y esta dada por:

$$K_1 = -4.31 \log(Re_c) + 156.3 \quad Re_c < 2.47e^5 \quad (3.38)$$

$$K_1 = -9\log(Re_c) + 181.6 \quad 2.47e^5 \leq Re_c \leq 8e^5 \quad (3.39)$$

$$K_1 = 128.5 \quad 8e^5 < Re_c \quad (3.40)$$

$\Delta K1$ es un término correctivo para la contribución del lado de presión para ángulo de ataque diferente a cero:

$$\Delta K1 = \alpha[1.43\log(Re)] \quad Re \leq 5000 \quad (3.41)$$

$$\Delta K1 = 0 \quad Re > 5000 \quad (3.42)$$

$K2$ es otra función de amplitud, pero con respecto al nivel de presión sonora debido a la separación y está determinado por:

$$K2 = K1 - 1000 \quad \alpha < \gamma_0 - \gamma \quad (3.43)$$

$$K2 = K1 + \sqrt{\beta^2 - (\beta/\gamma)^2(\alpha_* - \gamma_0)^2} + \beta_0 \quad \gamma_0 - \gamma < \alpha < \gamma_0 + \gamma \quad (3.44)$$

$$K2 = K1 - 12 \quad \gamma_0 + \gamma < \alpha \quad (3.45)$$

En la cual:

$$\gamma = 27.094M + 3.31 \quad (3.46)$$

$$\gamma_0 = 23.094M + 4.651 \quad (3.47)$$

$$\beta = 72.65M + 1.74 \quad (3.48)$$

$$\beta_0 = -34.19M - 13.82 \quad (3.49)$$

Los niveles de presión sonora se obtiene mediante la integración de las contribuciones de todas las fuentes acústicas sobre la longitud de la pala. Además, se considera que el rotor del aerogenerador es una fuente puntual dipolo, y que la longitud de onda del sonido radiado es mucho más corta que la distancia al receptor. El aerogenerador se puede asemejar a una fuente puntual dipolo dado que se caracteriza por tener 2 fuentes puntuales próximas, alineadas en la dirección perpendicular al rotor, que vibran con la misma amplitud y en la misma frecuencia, pero de fases opuestas (un desfase de 180°), es decir que mientras una perturba el aire que la rodea aumentando su presión y la otra lo hace disminuyéndola.

3.3 Demostración del modelo BPM

En este apartado se muestra un ejemplo del modelo de predicción BPM donde se analizan los niveles de presión sonora desprendidos del borde de salida del perfil aerodinámico, se hace una demostración, obteniendo gráficas y tablas. Para obtener los datos de entrada de este análisis se evaluó un aerogenerador de 1 kW de potencia nominal, donde se evalúa en el rotor, exclusivamente la pala diseñada con un perfil aerodinámico ‘A18’, donde la relación Cl/Cd respecto a α es de 2 grados siendo este su ángulo de ataque óptimo y a un metro por ser la distancia de referencia del modelo.



Figura 3.2. Perfil A 18.

La pala es de 1 metro de longitud dividida en N segmentos, de los cuales solo se evalúan los 7 más lejanos, del centro del rotor, ya que sus velocidades tangenciales son mayores a los demás.

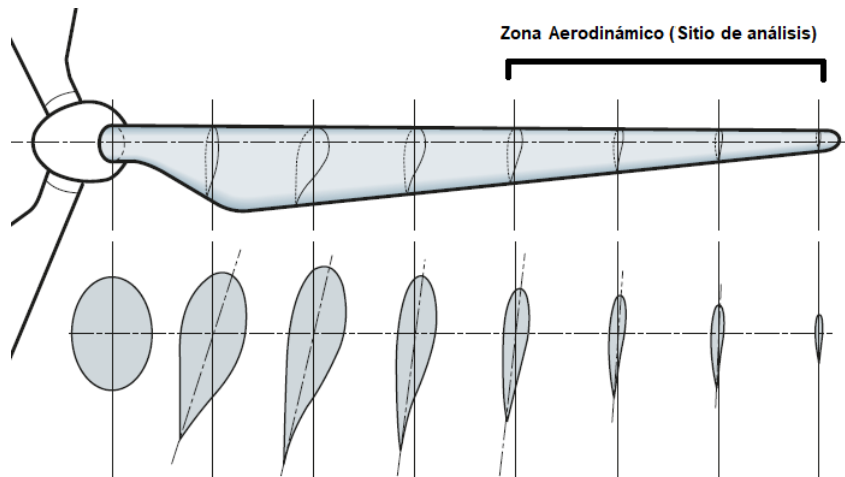


Figura 3.3. Pala evaluada.

Tabla 3.1. Datos de la pala.

Posición	Radio	Longitud	Cuerda
1	.98 m.		.031 m.
2	.9 m,		.035 m.
3	.81 m.		.039 m.
4	.73 m.	.085 m	.045 m.
5	.64 m.		.053 m.
6	.56 m,		.063 m.
7	.48 m.		.075 m.

En la gráfica 3.4 se puede notar gráficamente los niveles de presión sonora emitidos por el ángulo de ataque del perfil aerodinámico, en un espectro de frecuencias de $20Hz$ a $16000Hz$ y un rango de velocidades de 5 a $10m/s$ de velocidad del viento incidente, del segmento de la posición 1 de la Tabla 3.1, y calculado con la ecuación 3.4 del modelo BPM, se puede observar que en las velocidades de viento de mayor magnitud y a valor de bajas frecuencias se encuentran los niveles de presión sonora de $46.6dB$, confirmando que mediante más rápido sople el viento que impulsa al aerogenerador y las frecuencias sean bajas, las contribuciones sonoras de la pala aumentan.

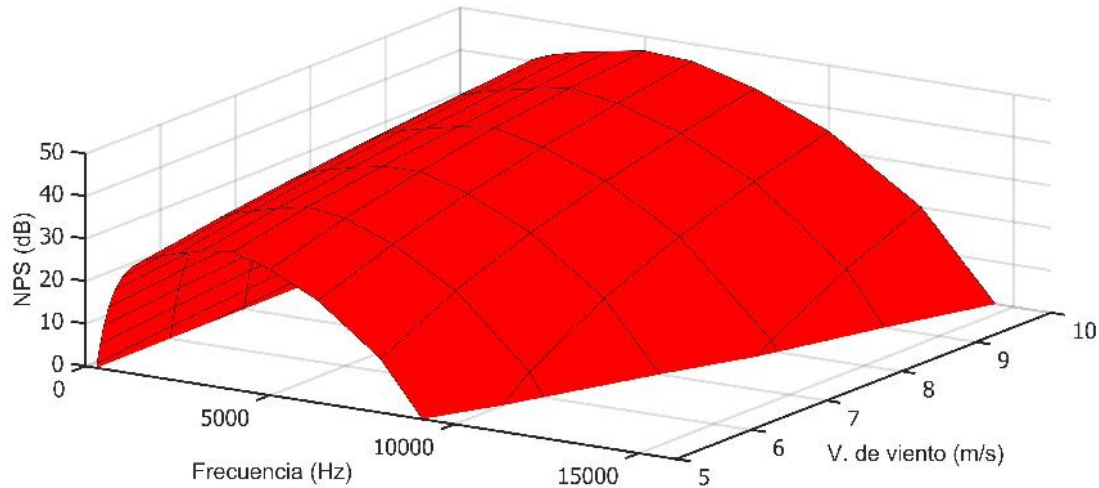


Figura 3.4. Niveles de presión sonora respecto a α .

En la gráfica 3.5 se muestra la contribución en el nivel de presión sonora emitidos por la zona de presión, donde al interactúan el viento con la geometría del perfil aerodinámico se crea una zona de presión que a su vez impulsa la pala. Calculado con la ecuación 3.2 del modelo BPM, se puede ver que los niveles de presión sonora tienen un comportamiento uniforme en toda la gráfica, y se nota que son mayores en las zonas con menor frecuencias pero con altas ráfagas de viento donde llegan a estar a $48dB$.

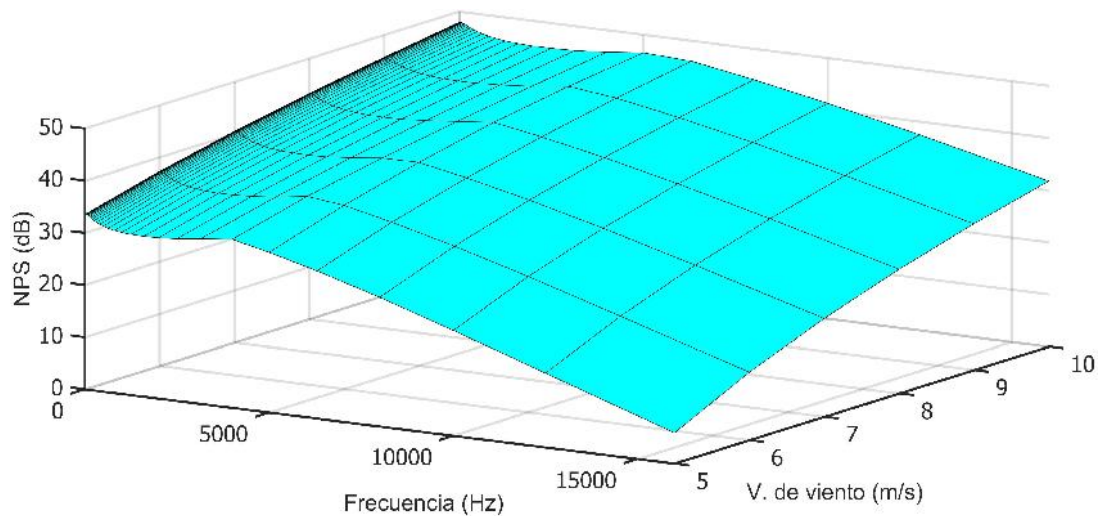


Figura 3.5. Niveles de presión sonora respecto a la zona de presión del perfil aerodinámico.

En la gráfica 3.6 se puede observar los niveles de presión sonora emitidos por la zona de succión, esto se produce cuando la capa limite del viento al bordear la zona más larga del perfil crea una zona de baja presión donde crea la sustentación de la pala. Por lo tanto, al desprenderse la capa limite del borde de salida del perfil aerodinámico emite perturbaciones de presión o niveles de presión sonora, mediante la ecuación 3.3 del modelo BPM se expresa matemáticamente este fenómeno aeroacústicos.

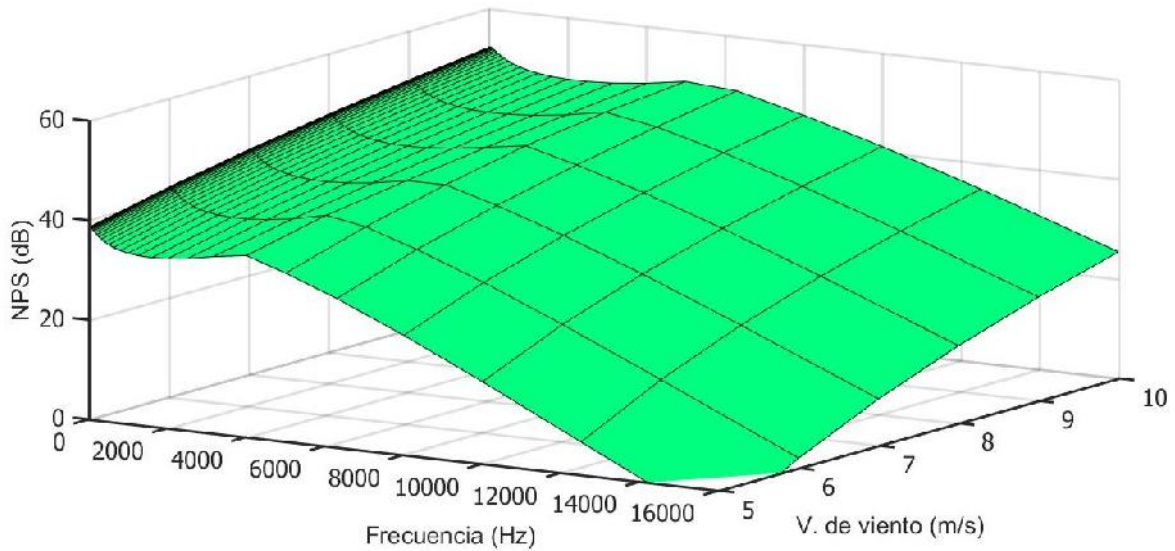


Figura 3.6. Niveles de presión sonora respecto a la zona de succión del perfil aerodinámico.

Contando con la información recavada con las gráfica 3.4 a 3.6, prosigue en sumar las contribuciones para obtener los niveles de presión sonora del perfil aerodinámico de dicha sección evaluada, en este caso la sección 1 de la Tabla 3.1, y así mostrar en la gráfica 3.7 los resultados del modelo BPM completo.

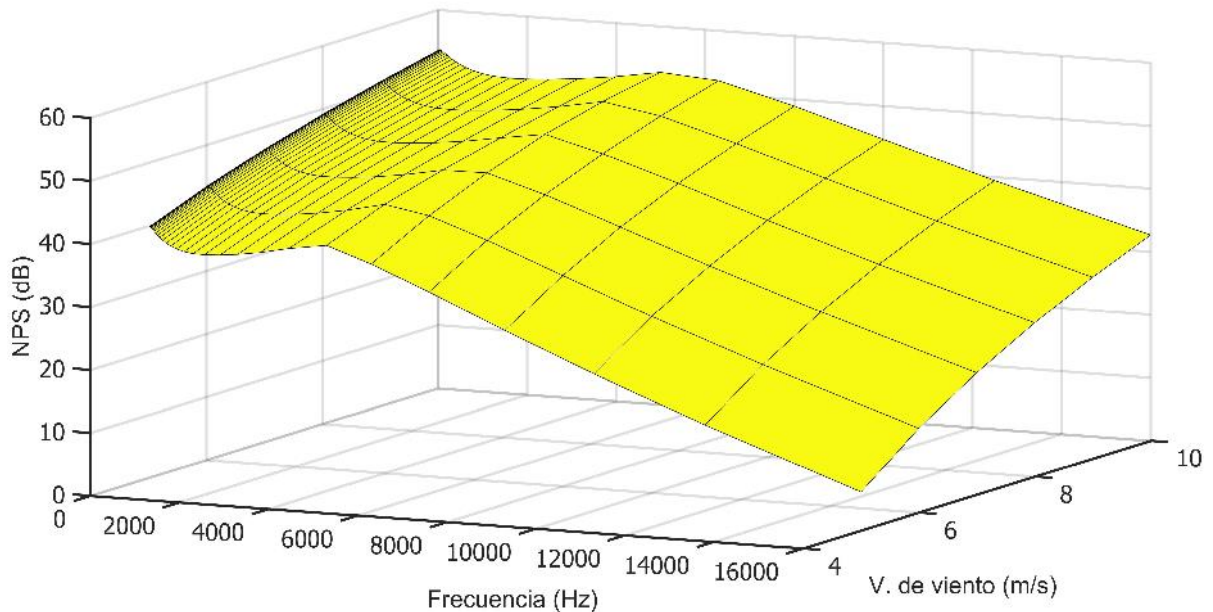


Figura 3.7. Niveles de presión sonora Total (Npstotal).

En las gráficas 3.8 a 3.13 se observan los niveles de presión sonora total de cada segmento mostrado en la Tabla 3.1, cada figura corresponde a una velocidad de viento incidente a lo largo de la pala, demostrando que mayor sea el radio a la posición del segmento respecto al centro del rotor del aerogenerador, va aumentando la emisión de niveles de presión sonora.

En las gráficas se puede observa los niveles de presión sonora emitido por ciertos rango de velocidades y en bajas frecuencias, como también la longitud seleccionada de la pala, los datos mostrados por el modelo BPM tienen un comportamiento donde los niveles de presión sonora suelen tener valores altos en los rangos de frecuencias bajas y demostrando un decremento a medida que la frecuencia va aumentando, pero también aumenta respecto mayor sea la velocidad de rotación del segmento seleccionado.

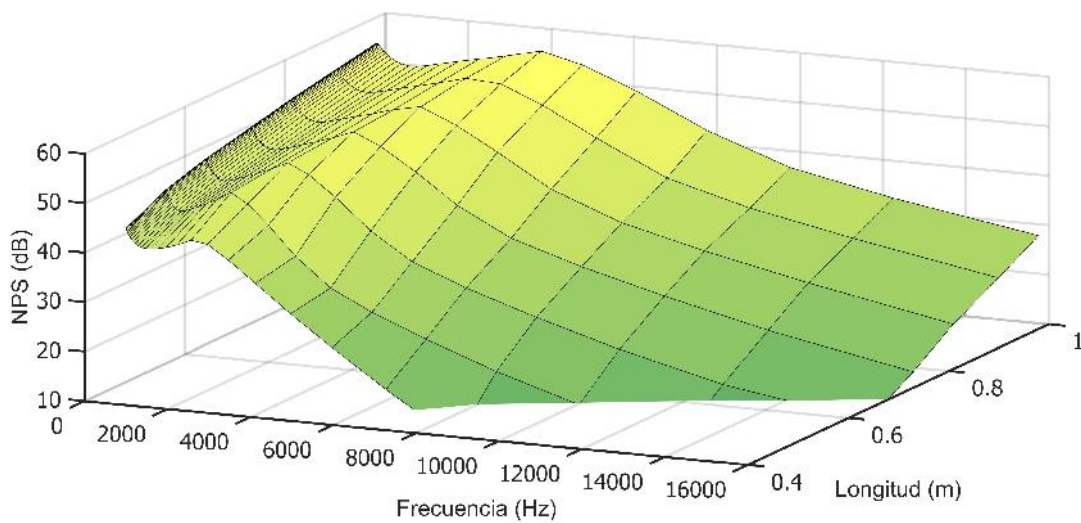


Figura 3.8. Emisión de niveles de presión sonora a 10 m/s.

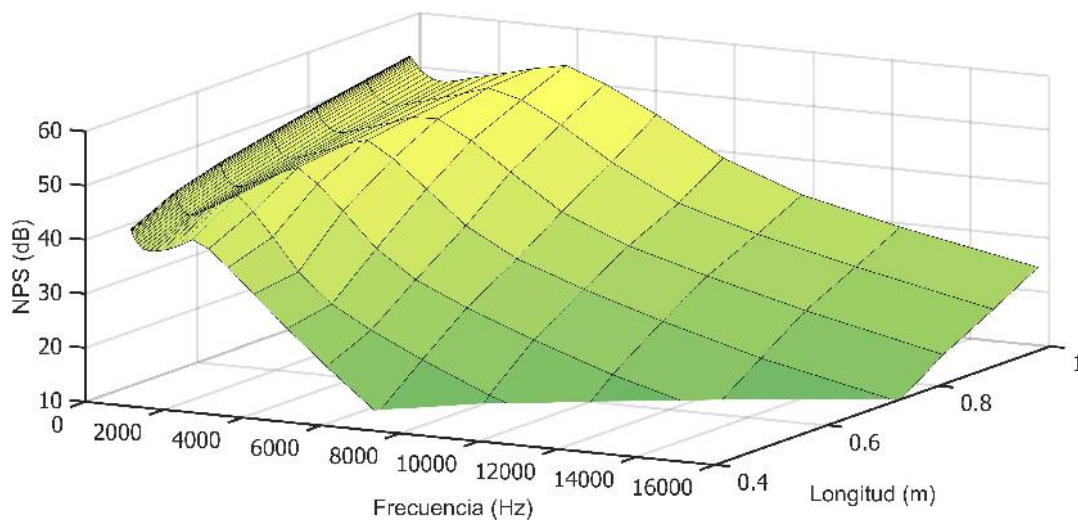


Figura 3.9. Emisión de niveles de presión sonora a 9 m/s.

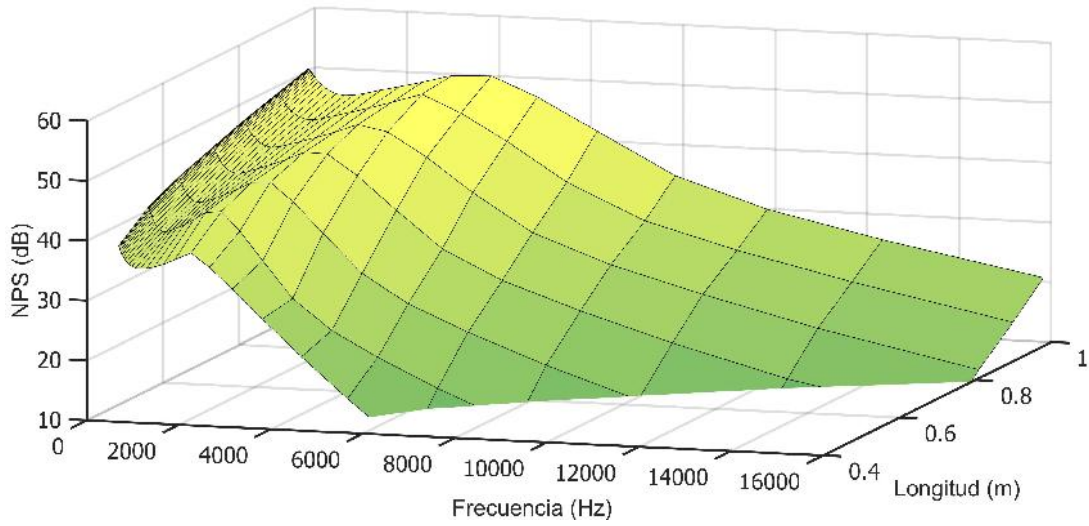


Figura 3.10. Emisión de niveles de presión sonora a 8 m/s.

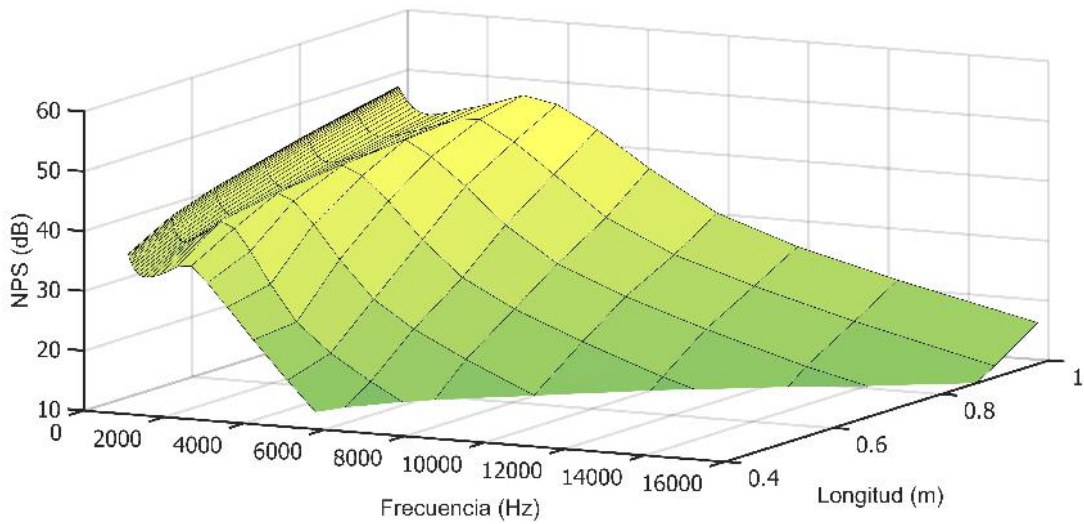


Figura 3.11. Emisión de niveles de presión sonora a 7 m/s.

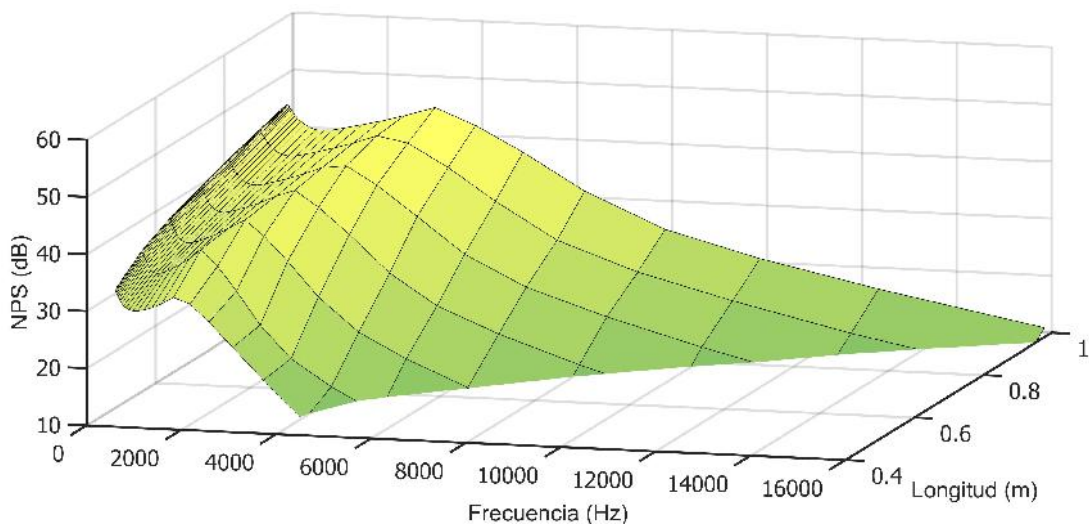


Figura 3.12. Emisión de niveles de presión sonora a 6 m/s.

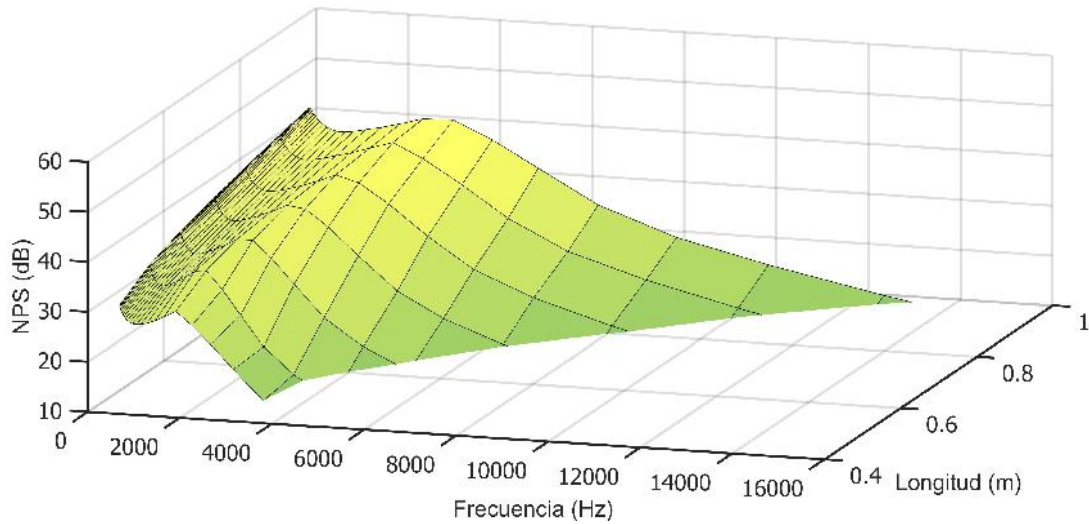


Figura 3.13. Emisión de niveles de presión sonora a 5 m/s.

Finalmente, se muestra la gráfica 3.14 en donde se nota los niveles de presión sonora a diferentes velocidades de viento. Donde se expresa la emisión del rotor completo, para así conseguir el valor de la contribución total. Se demuestra que el aerogenerador de 1 kW diseñado con 3 palas de 1 metro de longitud emite valores superiores a los 60 dB en su rango de velocidades altas.

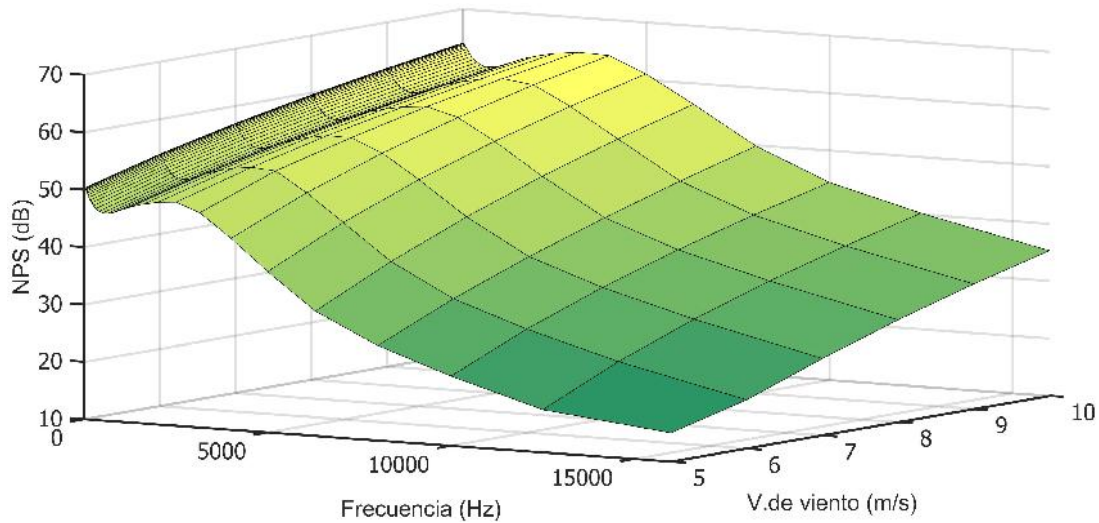


Figura 3.14. Emisión de niveles de presión sonora total a diferentes velocidades de viento.

3.4 Niveles de presión sonora ponderadas en A

La ponderación es una medida de tendencia central que es conveniente cuando un conjunto de datos tienen un valor correspondiente respecto a los demás datos. El objetivo de la ponderación A que se puede observar en la gráfica 3.15 es de ajustar la escala de frecuencias de los niveles de presión sonora a la respuesta en frecuencias (promedio) del oído humano.

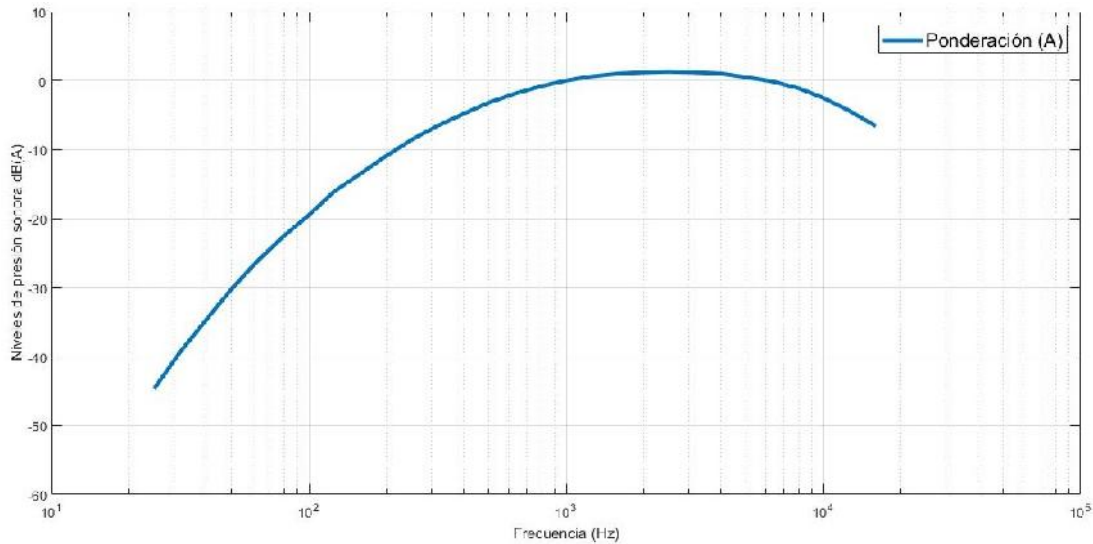


Figura 3.15. Ponderación A.

En la gráfica 3.16 adicionando los valores de la ponderación de la gráfica 3.15 en los datos de la gráfica 3.14 se obtienen los resultados mostrados, con esto se asegura que la emisión sonora del rotor del aerogenerador esta ajustado a la sensibilidad del oído humano y así reportar resultados cercanos a la realidad.

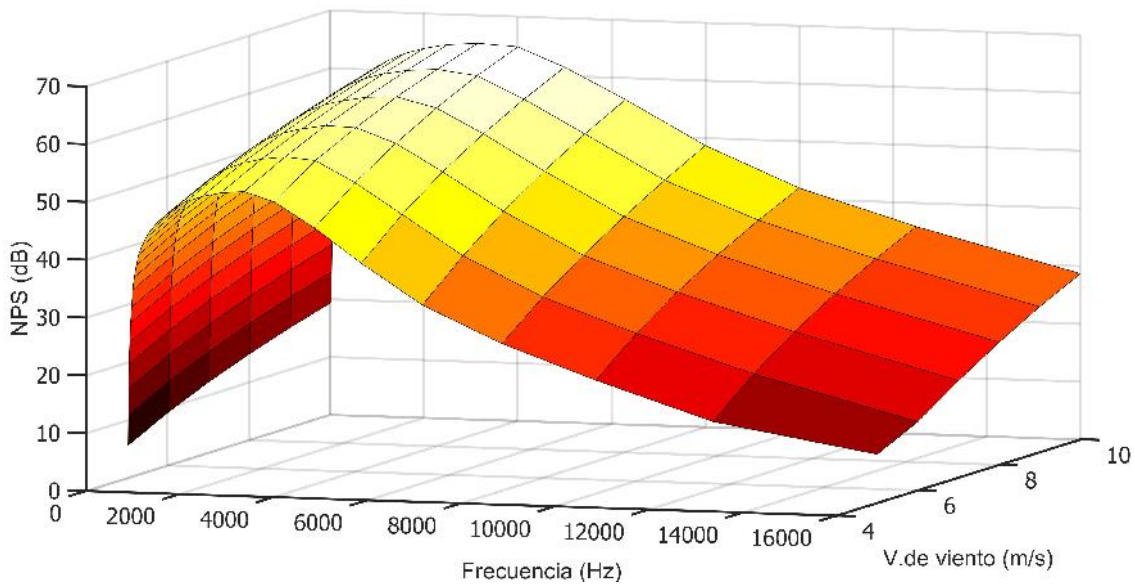


Figura 3.16. Niveles de presión sonora del aerogenerador en ponderación A.

3.5 Nivel de presión sonora debido a la formación del vórtice en la punta de la pala

El método de predicción propuesto en esta sección para el ruido de formación de vórtices de punta es el desarrollado por Brooks y Marcolini, procediendo a utilizar el modelo semi-empírico BM [35]. El ruido de la punta se irradia cuando el flujo turbulento

separado cerca de la región de la punta de la pala se desprende en forma de estela. Este tipo de ruido varía con el ángulo de ataque de la punta. La longitud del flujo separado en la región de la punta es función del ángulo de ataque de la punta y se hace referencia al número de Reynolds acorde a la cuerda. La formación de vórtice ocurre con un núcleo turbulento en el campo de flujo y la pendiente de la curva de elevación Está dado por:

$$N_{pfpva} = 10 \log \left(\frac{M^2 M_{max}^3 h^2 D_h}{r^2} \right) - 30.5 [\log(St2) + 0.3]^2 + 156 \quad (3.50)$$

en el cual:

M =Número incidente de Mach

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

h =Extensión de los vórtices en la punta de la pala, m .

D_h =Direccionalidad del sonido para altas frecuencias

r =Distancia al observador, m .

St'' =Número de Strouhal de la punta de la pala

El número de Strouhal de la punta de la pala se define por:

$$St'' = fl/U_{max} \quad (3.51)$$

y

$$U_{max} = Cda * M_{max} \quad (3.52)$$

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

$$M_{max} = (1 + 0.036\alpha_{punta}) * Cda \quad (3.53)$$

Para puntas redondeadas, la extensión de los vórtices en la punta de la pala, h , es:

$$h = 0.0008\alpha_{punta} * Cda \quad (3.54)$$

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

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

$$\alpha_{punta}^* = \left[\frac{\frac{\delta L^*}{\delta y}}{\left(\frac{\delta L^*}{\delta y} \right) y_{ref}} \right] * \alpha_{punta} \quad (3.55)$$

Para las palas de punta plana, la extensión de los vórtices en la punta de la pala está dada

por:

$$h = 0.023 + 0.0169\alpha_{punta} * Cd \quad 0 \leq \alpha_{punta}^* \leq 2 \quad (3.56)$$

$$h = 0.0378 + 0.0095\alpha_{punta} * Cda \quad 2 \leq \alpha_{punta}^* \quad (3.57)$$

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

3.5.1 Contribución de los niveles de presión sonora calculados con el modelo BM

En esta sección se implementa la aplicación de las formulas explicadas en el punto anterior, donde aplicando los datos de diseño de la pala de un metro de longitud que se muestran en las gráficas 3.2 y 3.3; el cual se le hace la prueba, se puede observar en la gráficas 3.17 la emisión de los niveles de presión sonora producidos por la punta de la pala del modelo BM, a diferentes velocidades tangenciales de desplazamiento, corrigiéndolo con la curva de ponderación A de la gráficas 3.15, notándose que mediante mayor sea la velocidad de la punta su contribución sonora es de 83 dB en rangos de frecuencias muy altas.

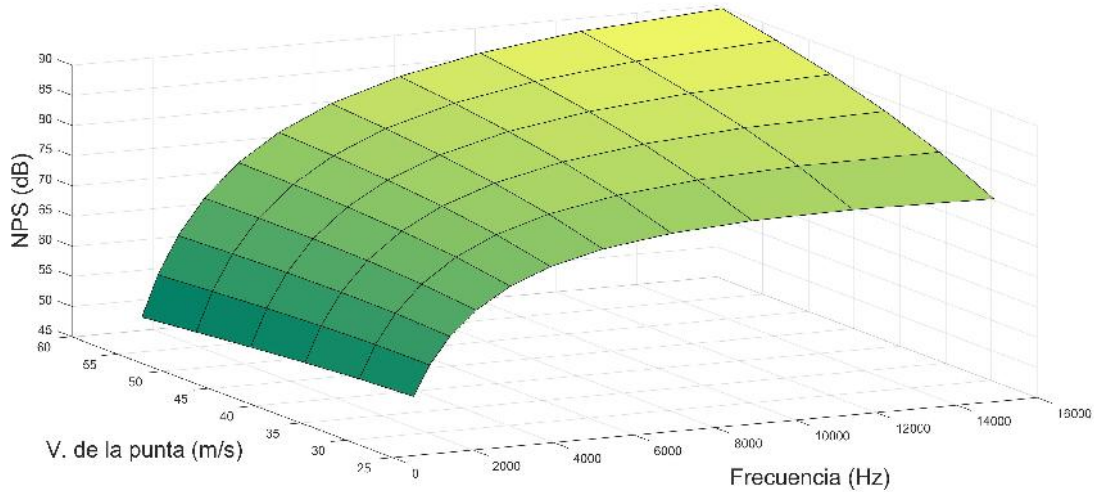


Figura 3.17. Niveles de presión sonora producido por los vórtices en la punta de la pala.

En la Figuras 3.18 y 3.19 se pueden observar las distribuciones de presiones en la punta de la pala, dado que es la zona con mayores velocidades tangenciales respecto a las velocidades de viento incidentes al rotor del aerogenerador.

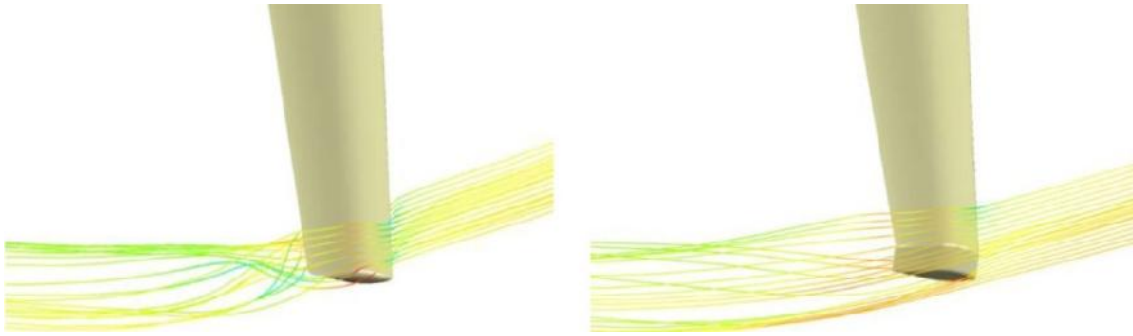


Figura 3.18. Representación gráfica de los niveles de presión sonora producido por los vórtices en la punta de la pala.

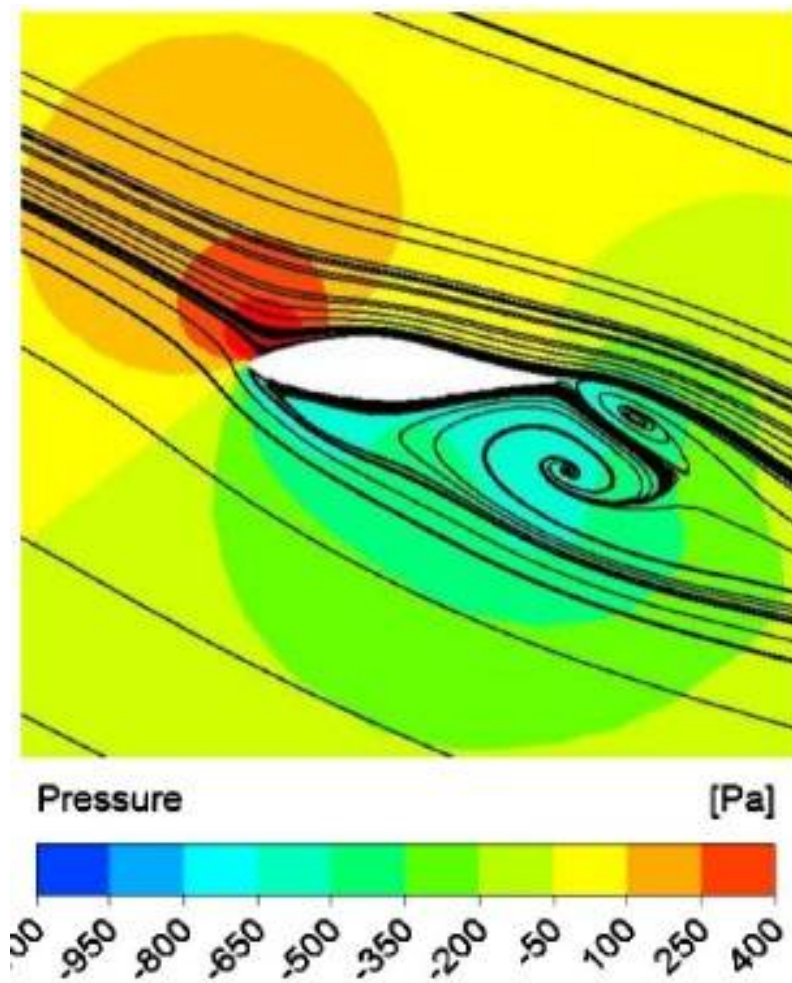


Figura 3.19. Distribución de presiones en el perfil aerodinámico de la punta de la pala.

3.6 Niveles de potencia sonora (NPs)

Para predecir el nivel de presión sonora en un receptor específico a cierta distancia del aerogenerador es necesario determinar los niveles de potencia sonora del aerogenerador

para distintas velocidades del viento.

Teniendo en cuenta las variables propuestas en el modelo BPM y de los niveles de presión sonora debido a los vórtices en la punta de la pala del modelo BM, se realizó un análisis detallado de los niveles de presión sonora en bandas de tercio de octava con los grupos de parámetros (variables independientes) y haciendo uso de la ecuación 2.7 de suma de decibelios. Los niveles de potencia sonora se calcularon a partir de la media geométrica (MG), la cual se define como la raíz enésima del producto de n término, por lo tanto su ecuación es la 3.58 y con la ecuación 3.59 se calcula los niveles de potencia sonora que se muestran en la Tabla 3.2.

$$MG = \sqrt[n]{x_1 * x_2 * x_3 * \dots * x_n} \quad (3.58)$$

$$NP_s = MG - 10 * \log_{10}(r^2) + 11 \quad (3.59)$$

Tabla 3.2. Niveles de presión sonora y potencia sonora.

Velocidad del viento	Nivel de presión sonora	Nivel de potencia sonora
10 m/s	71.2 dB	82.2 dB
9 m/s	71.1 dB	82.2 dB
8 m/s	70.9 dB	81.9 dB
7 m/s	70 dB	81 dB
6 m/s	69 dB	80 dB
5 m/s	67 dB	78 dB

Medición experimental

La fase inicial del estudio incluyó una revisión de la literatura y del estado actual de los conocimientos teóricos y experimentales sobre la propagación del sonido a distancias considerables, cerca del suelo. La validez y la pertinencia de la información obtenida en esta investigación han sido evaluadas y se ha utilizado para preparar un procedimiento de ingeniería para predecir los niveles de presión sonora proveniente del aerogenerador en un receptor específico a cierta distancia para una amplia gama de condiciones meteorológicas.

La siguiente etapa de la investigación consistió en un procedimiento experimental diseñado para probar la exactitud de la técnica de predicción desarrollada a partir del estudio de los capítulos siguientes. Esto comprendió la medición de los niveles de presión sonora en determinadas condiciones meteorológicas y la comparación con los niveles estimados.

4.1 Descripción de la zona de estudio

El aerogenerador de pequeña potencia de la empresa RTO, se ubica en la ciudad de Juchitán de Zaragoza, Oaxaca (México), en el ejido la Venta, en el centro comunitario climatérico Ejidal. Específicamente se encuentra en las coordenadas: $16^{\circ}34'33.77''N$, $94^{\circ}48'57.55.0''$ como se puede observar en las Figuras 4.1 y 4.2.

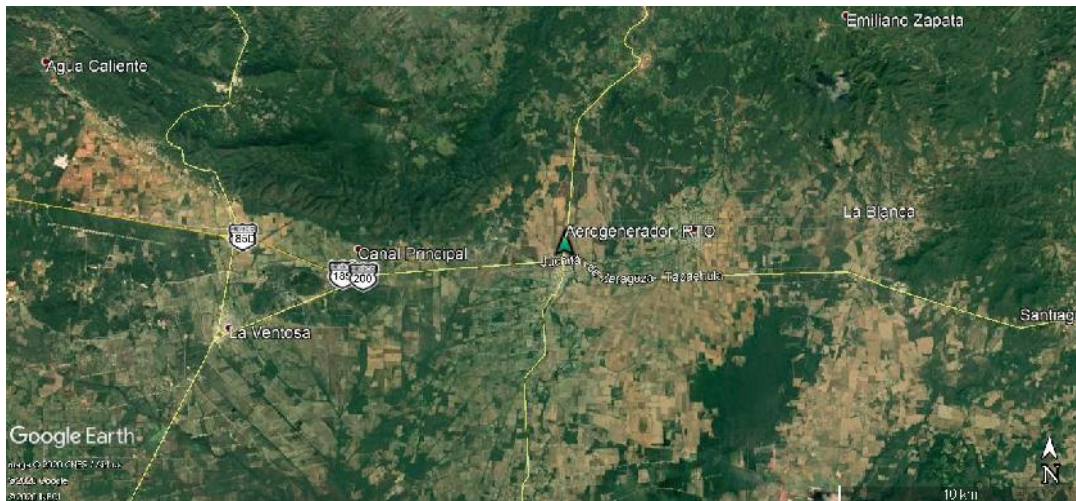


Figura 4.1. Ubicación geográfica del aerogenerador de pequeña potencia.

El aerogenerador de pequeña potencia de eje horizontal de un 1 kW de potencia nominal, se encuentra montado en una torre de $7m$ en el primer piso del centro comunitario climatérico Ejidal. Del tipo tripala, con control pasivo por medio de una aleta, con un generador sincrónico de imanes permanentes, en la Figura 4.3 se muestra una fotografía del aerogenerador .

Este aerogenerador fue elegido para la realización del estudio principalmente por su ubicación geográfica, la accesibilidad y excelente disposición de los responsables, permitiendo realizar las mediciones correspondiente.



Figura 4.2. Ubicación del aerogenerador de pequeña potencia RTO en la venta, Juchitán.

En la zona donde se encuentra instalado el aerogenerador de pequeña potencia existen actividades de carácter residencial, hay tránsito frecuente de automóviles, música, aves y animales domésticos. Las mediciones se realizaron a la altura del primer piso de las oficinas del ejido, primero a velocidades de viento bajas y sin el aerogenerador funcionando para a si identificar y medir el ruido ambiente.

4.1.1 Descripción del aerogenerador

Las características técnicas del aerogenerador:

Marca:	RTO
Modelo:	RTO 1 KW.
Altura del hub:	7 m.
Clase:	IEC S
Diámetro del rotor:	2.2 m.
Longitud de las palas:	1 m.
Cuerda (valor máximo y mínimo):	0.075 m y 0.031 m.
Área de barrido:	3.8 m ²
Potencia nominal:	1 KW.
Velocidad nominal:	550 rpm.



Figura 4.3. Aerogenerador RTO.

4.2 Mediciones de campo

En este apartado se obtiene mediciones de los niveles de presión sonora para un receptor específico a 8 metros de distancia del aerogenerador, así como las variables meteorológicas que permiten determinar la estabilidad atmosférica. En las mediciones se buscó la mejor ubicación al aerogenerador, evitando la interferencia de otras fuentes sonoras. Los niveles de presión sonora y las variables meteorológicas se midieron de manera simultánea, los datos de velocidad del viento y los niveles de presión sonora obtenidos simultáneamente se correlacionaron para deducir la relación entre las variables de ambas magnitudes.

4.2.1 Mediciones de los niveles de presión sonora

Teniendo en cuenta que el aerogenerador funciona y por lo tanto sólo genera ruido aerodinámico cuando la velocidad del viento supera cierto valor, por lo tanto genera a 5 m/s a la altura del eje. Además, la potencia sonora emitida por el propio aerogenerador depende de la velocidad del viento (en general aumenta cuando aumenta ésta).

En la medición de los niveles de presión sonora se caracterizó el área de estudio espacial y temporalmente, siguiendo las prescripciones de la norma IEC 61400-11 y por la ecuación 2.55 se calculó la distancia la cual se realizó la medición que fue de 8 metros aguas abajo del aerogenerador.

Las mediciones de los niveles de presión sonora se llevaron a cabo para una variedad de condiciones meteorológicas durante el día. En todos los casos hubo variaciones significativas en la velocidad del viento en el momento de la medición. El sonido medido incluye el ruido de fondo ambiental. El ruido de fondo ambiental se determinó por separado en el mismo sitio cuando el aerogenerador no está en funcionamiento.

Ningún paisaje está en silencio completamente. Por ejemplo, las aves y las actividades humanas emiten sonidos. A velocidades del viento alrededor de 2 m/s y superiores el ruido del viento en las hojas, arbustos y árboles pueden enmascarar gradualmente el ruido proveniente de los aerogeneradores. Esto hace que la medición del ruido de los aerogeneradores sea muy difícil.

El ruido de fondo es el ruido total de todas las fuentes de ruido, excepto el ruido del aerogenerador bajo consideración en el momento de las mediciones.

La contribución del ruido de fondo es un problema importante que puede afectar los resultados a medición del aerogenerador. Para hacer frente a esto, cada punto de medición se seleccionó de modo que estuvieran lo más lejos posible de las fuentes potenciales de ruido de fondo.

La forma más segura de tener en cuenta y separar el ruido de fondo es omitir cualquier medición en la que el nivel de presión sonora no sea al menos 6 dB más a lo que el nivel de fondo. De este modo, suponiendo que los niveles medidos conducen a un error inferior

a un dB. Este criterio se utilizó aquí.

Las mediciones se llevaron a cabo con un sonómetro EXTECH EN300, cuyas especificaciones técnicas se encuentra en las Tabla 4.1 y 4.2.



Figura 4.4. Midiendo los niveles de presión sonora emitidos por el aerogenerador.

Tabla 4.1. Especificaciones generales.

Pantalla	Pantalla LCD, Tamaño:41.4 x 31.5 mm. 5 en 1:
Medición	Anemómetro (Velocidad del viento+ Temperatura) Humedad (%HR+ Temperatura)
	Luz
	Termómetro (Tipo K)
Humedad de operación	Nivel de sonido 80 %HR Max.
Temperatura de operación	0 a 50 °C (32 a 122 °F)
Indicación de sobre carga	Indica —”
Salida de datos	Interfaz serial RS-232/usb
Fuente de energía	6 baterías CD 1.5 V.
Peso	335 g/0.74 lb (batería incluida)
Dimensiones	HWD 248 x 70 x 34 mm
Accesorios estándar	Manual de instrucciones 1 pza.

Tabla 4.2. Niveles de sonido.

Micrófono	Micrófono condensador electret de 1/2”
Escala de medición	35 a 130 dB, escala automática.
Resolución	0.1 dB
Respuesta de frecuencia	31.5 a 8,000 Hz
Ponderación	Red de ponderación .A”de frecuencia
Tiempo de respuesta	Rapido”
Precisión	Cumple IEC 61672 clase 2, Ponderación A, Respuesta rápida.

Nota: Las pruebas de especificación anteriores fueron realizadas bajo un ambiente de intensidad de campo RF menos a $3V/M$ y frecuencia menor a 30 MHz solamente.

Nota: La especificación especificadas es a $23 + -5$ °C.



Figura 4.5. Sonómetro EXTECH EN300.

Los registros de ruido se realizaron cuando los niveles de presión sonora provenían del aerogenerador y de eventos transitorios. Aparte de los sonidos inducidos por el viento en la vegetación u otras fuentes relevantes.

La distancia cubierta en las mediciones se vio afectada debido a las condiciones climáticas (dirección del viento) y los límites de la vivienda. Por lo tanto, sólo se consideraron para el análisis los niveles de presión sonora medidos que se encontraban sobre la línea trazada del aerogenerador y el punto de medición viento abajo del aerogenerador.

Con el fin de realizar un análisis significativo de estos datos, había que garantizar que los niveles de presión sonora utilizados para el estudio se refirieran únicamente al aerogenerador y no a cualquier otro ruido extraño. Mediciones que se vieron afectadas por fuentes de ruido extrañas se excluyeron del análisis.

4.2.2 Medición de las variables meteorológicas

Al intentar validar un modelo de predicción de ruido es importante disponer de mediciones de las variables meteorológicas que están relacionadas con las mediciones de ruido. Los principales factores que influyen en las atenuaciones meteorológicas son la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.

Es imprescindible disponer de las variables meteorológicas de estaciones que se ubiquen en las proximidades de la zona de estudio o en los mismo del aerogenerador. Para tener en cuenta el efecto de las condiciones meteorológicas en la propagación del sonido, es necesario obtener datos para diferentes estados meteorológicos típicos. Sin embargo, hay que señalar que la medición durante los periodos de lluvia no es práctica y por lo tanto estas condiciones fueron omitidos.

Los parámetros registrados incluyen la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura. Es importante la sincronización del tiempo entre las mediciones de ruido y las variables meteorológicas con el fin de poder correlacionar estas variables.

Ya que no se dispone de torres anemométricas cerca de la zona de estudio; las mediciones, las variables de velocidad del viento y la temperatura se realizaron con anemómetro de mano UNI-T UT361/362 que se muestra la Figura 4.6.



Figura 4.6. Anemómetro UNI-T UT362.

4.2.3 Medición de ruido ambiente

Realizando lo mencionado en los puntos 4.2.1 y 4.2.2, utilizando el anemómetro y sonómetro de la Figura 4.6 y 4.4, se puede observar en las Tablas 4.3 los niveles de presión sonora emitida por el medio (árboles, aves, personas y automóviles) a diferentes velocidades de viento, en estos datos se observa que los niveles de ruido ambiente están en un rango de 45 – 55 dB, en velocidades de viento inferiores ($x < 6$) de los que se planea evaluar los niveles de presión sonora emitidos por el aerogenerador, los datos meteorológicos registrados mediante la prueba fueron a una temperatura promedio de 34 °C, a una presión de 101.3 Pa y con una humedad relativa constante durante la medición.

Tabla 4.3. Niveles de presión sonora (Nps) o ruido del medio ambiente.

Velocidad del viento (m/s)	Nps promedio dB (ambiente)	Presión ATM	Humedad %HR	Temperatura	Hora
1.9	45.5	101.3 Pa	35 %	34°C	12.50 pm
3	48.5				12.55 pm
2.5	47.4				01:00 pm
3.4	49.1				01:05 pm
4.6	50.1				01:10 pm
4.1	54.5				01:15 pm
4.6	57.1				01.20 pm
4.7	59.6				01:25 pm
2.7	51.1				01.30 pm
3.5	57.1				01:35 pm
2.1	56.3				01.40 pm
2.8	53.9				01.45 pm
3	51.9				01.50 pm
2.8	53.9				01.55 pm
1.2	45.8				02.00 pm
2.1	51.3				02.05 pm
2.3	51.6				02:10 pm
1.6	44.4				02:15 pm
1.8	47.7				02:20 pm
2.7	52.9				02.25 pm
3.1	55.1				02:30 pm
3	51.6				02:35 pm
2.5	45.8				02.40 pm
3.3	63				02.45 pm
1.8	47.3				02.55 pm
2	49.3				03.00 pm
1.9	45.3				03.05 pm
3	45.9				03.10 pm
2.6	52.2				03.15 pm
1.3	50.3				03.20 pm
6.3	53.9	03.25 pm			
4	56	03:30 pm			
1.2	52.2	03.35 pm			

4. Medición experimental

Tabla 4.4. Niveles de presión sonora (Nps) con el aerogenerador en funcionamiento + ruido del medio ambiente.

Velocidad del viento (m/s)	Nps promedio dB (ambiente)	Presión ATM	Humedad %HR	Temperatura	Hora
5.5	63.9	101.3 Pa	35 %	34°C	11:10 am
3	67.4				11:15 am
2.5	67				11:20 am
3	72				11:25 am
2	64				11:30 am
7	69				11:35 am
4	61				11:40 am
7.5	62.8				11:45 am
3	62				11:50 am
4	64				11:55 am
2	59				12:00 pm
4	60				12:05 pm
2.5	57				12:10 pm
8	65				12:15 pm
7	63				12:20 pm
5	60				12:25 pm
4.6	63				12:30 pm
5	68				12:35 pm
2	60				12:40 pm
4	61.2				12:45 pm
2.3	56				12:50 pm
1.3	58				12:55 pm
2.7	57				01:00 pm
5	66				01:05 pm
4	62				01:15 pm
3	61				01:20 pm
5	62				01:35 pm
5.5	63.8				01:40 pm
4	67				01:45 pm
2	60				01:50 pm
2.3	63.7	01:55 pm			

La Tabla 4.4 muestra las mediciones realizadas en el análisis experimentales en la zona de aplazamiento con el aerogenerador en funcionamiento, donde los resultados obtenidos son mayores a los registrados anteriormente en la Tabla 4.3, pero es importante mencionar que el ruido escuchado emitido por el aerogenerador se presume que es de la punta de las palas que por lo tanto, los datos se cotejaron y se calculara la emisión del aerogenerador mediante el modelo BPM y el ruido de las puntas de las palas con el modelo BM.

Mediante los datos obtenidos con las mediciones experimentales, de los cuales solo se lograron obtener datos a baja velocidades, se optó por calcular la tendencia de la emisión sonora medidas por le medio ambiente, por medio de una interpolación lineal uno de

los métodos más sencillos. En general, en la interpolación lineal se utilizan dos puntos, (x_a, y_a) y (x_b, y_b) , para obtener un tercer punto interpolado (x, y) a partir de la siguiente fórmula:

$$y = y_a + (x - x_a)(y_b - y_a)/(x_b - x_a) \quad (4.1)$$

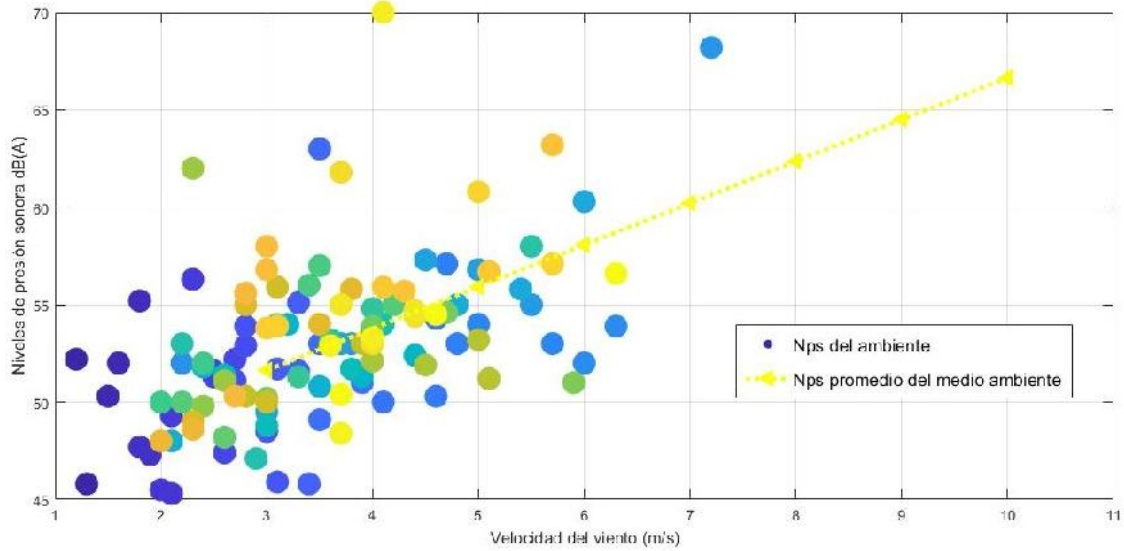


Figura 4.7. Niveles de presión sonora del medio ambiente.

De igual forma con la gráfica 4.8 y con la ecuación 4.1 se obtuvo la tendencia de los datos aun faltantes de los niveles de presión obtenidos al medir la emisión sonora del aerogenerador en funcionamiento, es importante mencionar que al realizar dichas mediciones, la actividades sociales de los pobladores era alta por lo que se registraron datos pocos confiables a los esperados.

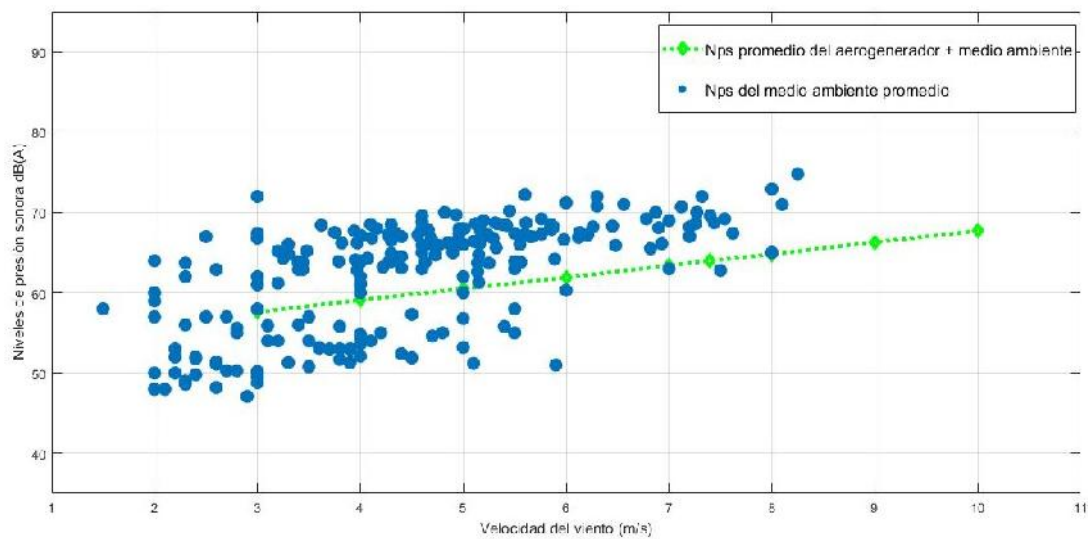


Figura 4.8. Niveles de presión sonora del aerogenerador en funcionamiento.

Y con los datos obtenidos en las gráficas 4.7 y 4.8 se cotejaron en la gráfica 4.9 donde se puede observar que los niveles de presión sonora del medio ambiente a velocidades de viento superiores a 10 m/s enmascaran los niveles de presión sonora emitidos por el aerogenerador.

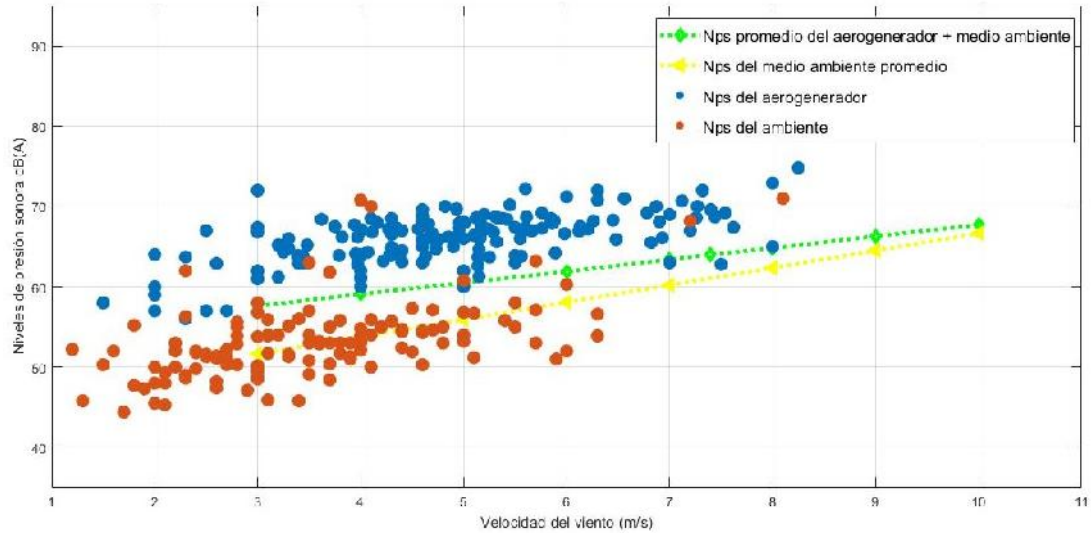


Figura 4.9. Niveles de presión sonora del medio ambiente y del aerogenerador.

Resultados

5.1 Resultado de los modelos BPM y BM de predicción de emisión sonora

Al tener los valores calculados de los modelos BPM y BM en el rango de velocidades de 5 a 10 m/s , se obtienen los valores de emisión sonora total del aerogenerador de pequeña potencia, de los cuales fluctuaron entre los 67 dB(A) y 71 dB(A), el primero de ellos corresponde a una velocidad de viento de 5 m/s y el segundo corresponde a una velocidad de viento de 10 m/s . El nivel de presión sonora puede aumentar o disminuir en función de la distancia viento abajo del aerogenerador para ciertas velocidades del viento. Debido a que los valores obtenidos con el modelo BM tienen mayores contribuciones, domina los resultados de la emisión del aerogenerador evaluado.

Tabla 5.1. Resultados total los modelos BPM y BM.

Velocidades del viento (m/s)	Predicción de niveles de Presión Sonora emitidos dB(A)		
	Modelo BPM	Modelo BM	Emisión total
5	29	67	67
6	34	69	69
7	38	70	70
8	41	70	70
9	44	71	71
10	47	71	71

5.2 Resultados del modelo de propagación propuesto

Como resultado de un amplio ejercicio de medición y análisis, se propuso dos modelos semi-empírico para el cálculo de los niveles de presión sonora a diferentes velocidades de viento y a 8 metros distancia proveniente de una fuente de ruido como es el caso de un aerogenerador de pequeña potencia que predice mejor la realidad, o por lo menos, se acerca mas a ella. Los resultados han arrojado un modelo bastante satisfactorio para pre-

decir el ruido proveniente del aerogenerador estudiado.

Lo más importante, el trabajo proporciona un enfoque semi-empírico que combina el modelo teórico y empírico para resolver el problema de la propagación del ruido a partir de las observaciones y los datos medido. El modelo teórico busca el entendimiento del fenómeno de propagación del ruido aplicado sistemáticamente, las leyes que rigen dicho fenómeno, sin embargo, es imposible capturar perfectamente todos los detalles del comportamiento real del proceso a través de ecuaciones matemáticas. El modelo empírico busca entonces contribuir a encontrar algunas relaciones que no se han logrado describir adecuadamente a través de funciones matemáticas, usando la información recogida experimentalmente especialmente cuando el proceso es demasiado complejo.

Se emplearon nuevos enfoques sobre algunos parámetros específicos en la propagación del ruido con el fin de mejorar la predicción en la propagación de los niveles de presión sonora, o por lo menos hacerlos más coherentes con la realidad. La realidad es muy compleja y los métodos analíticos tiene sus limitaciones. El modelo propuesto ofrece un compromiso entre la simplicidad y la exactitud en la predicción de los niveles de presión sonora asociado a los aerogeneradores. Algunos parámetros tienen más influencia que otros. El principal parámetro es la estabilidad atmosférica y la la velocidad del viento, que afectan tanto al nivel de potencia sonora del aerogenerador como a la propagación del ruido. La estabilidad atmosférica juega un papel importante en la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores. Como era de esperar, las condiciones estables ocurren predominantemente durante la noche, mientras que es más probable que las condiciones inestables ocurran durante el día.

Los procesos físicos de la atmósfera no pueden ser estudiados por separado debido a que interactúan entre sí. Por tanto, se deben estudiar todos estos parámetros simultáneamente porque de otro modo se obtendría una subestimación o sobre estimación en los niveles de presión sonora. De hecho, en la atenuación por efectos de la estabilidad atmosférica aparecen varios de los parámetros que ya se han contemplado en otras formas de atenuación. Y con la ley de atenuación de la ecuación 5.1, la cual corresponde a la propagación o divergencia esférica del sonido, cada vez que se duplica la distancia se produce una atenuación de 6 dB.

Cuando el nivel de potencia sonora se ha determinado, el siguiente paso es calcular qué cantidad de energía acústica llegará al receptor como se muestra en la gráfica 5.1. La propagación del sonido en el campo libre generalmente se ha estudiado desde una base experimental y de cualificación de sus propiedades, de tal manera que la rigurosidad cuantitativa se ha dificultado por la gran complejidad del fenómeno de propagación sonora y de la gran cantidad de variables que intervienen en el problema.

$$Np_{s_{d,e}} = NP_s - 11 - 20\log(Dis) \quad (5.1)$$

$Np_{s_{d,e}}$ = Niveles de presión sonora por divergencia esférica, dB.

NP_s = Niveles de potencia sonora, dB.

Dis = Distancia de propagación, m .

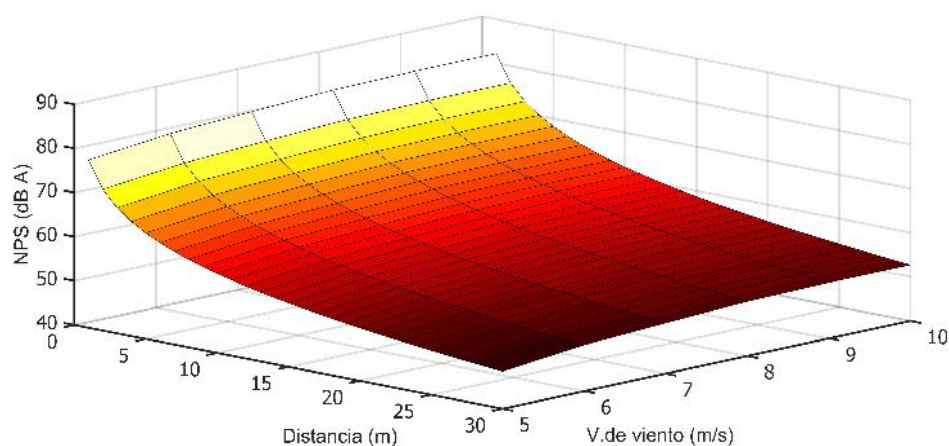


Figura 5.1. Propagación de los niveles de presión sonora.

Tabla 5.2. Niveles de presión sonora propagados en el medio ambiente.

Velocidades del viento (m/s)	Distancia de propagación		
	1 metro	10 metros	20 metros
5	78 dB	58 dB	51.9 dB
6	80 dB	60 dB	53.9 dB
7	81 dB	61 dB	54.9 dB
8	81.9 dB	61.9 dB	55.8 dB
9	82.2 dB	62.2 dB	56.1 dB
10	82.2 dB	62.2 dB	56.1 dB

En la gráfica 5.1 se muestra la disipación en el medio ambiente de los niveles de potencia sonora producidos por el aerogenerador en los rangos de velocidades de viento de 5 a 10 m/s, con la ecuación 5.1 de la ley de atenuación se calcularon los niveles de presión sonora incidente en las distancias circundantes a la zona de emplazamiento del aerogenerador como medida máxima de 30 metros de longitud.

5.3 Validación de los modelos BPM y BM mediante el análisis experimental

En la gráfica 5.2 muestra el comportamiento de los niveles de presión sonora versus velocidad de viento, obtenidos de manera experimental con el aerogenerador funcionando, a la distancia correspondiente establecido por la norma IEC 61400-11 que es de 8 metros de distancia. De los datos medidos fueron calculados los valores medios y de tendencia central de las velocidades en los casos en que no pudo ser medida. También fueron obtenidos los valores del modelo BPM, y los niveles de presión sonora producidos por los vórtices en la punta de la pala obtenidos por el modelo BM, los cuales fueron explicados en capítulos anteriores.

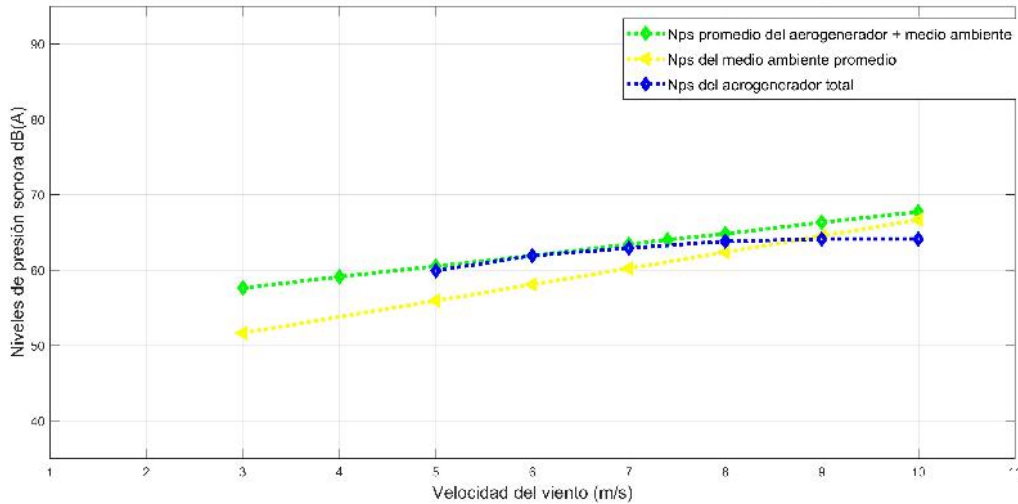


Figura 5.2. Validación de los modelos de predicción de niveles de presión sonora vs las mediciones del aerogenerador y el medio ambiente.

Continuando con la observaciones de la gráfica 5.2 con la Tabla 5.3 se puede notar que los valores Nps de los datos recabados experimentalmente con los datos calculados analíticamente con los modelos BPM y BM, la validación se puede demostrar al calcular el error porcentual con la ecuación 5.2 mostrando que en los rangos de velocidades evaluados los Nps el error no supera el 5.5 % .

$$Error_{porcentual} = ((x1 - x2)/x2) * 100 \tag{5.2}$$

Tabla 5.3. Validación de los modelos de predicción de niveles de presión sonora vs las mediciones del aerogenerador y el medio ambiente.

Velocidades del viento (/s)	NPS (dB)		Error (%)
	Análisis experimental; Aerogenerador + Ambiente	Análisis teórico: Aerogenerador	
5	61.9	59	4.6
6	63.4	61.9	2.3
7	64	62.9	1.7
8	64.8	63.8	1.5
9	66.3	64.1	3.3
10	67.7	64.1	5.3

Conclusiones y recomendaciones

En este documento se destacó el aporte realizado por diferentes investigadores en la idea de definir un modelo ideal para el estudio de los niveles de presión sonora que pueda ser aplicado a cualquier situación específica; lo cual se considera muy importante para unificar criterios que permitan describir de manera confiable y práctica el fenómeno de propagación del ruido proveniente de aerogeneradores. Esta labor es bastante ardua pues las condiciones de fronteras del sistema y su objeto de aplicación suelen variar de acuerdo a necesidades preestablecidas; sin embargo, teniendo en cuenta que los procesos de transporte, transferencia y difusión de la energía se consideran durante la medición, puede afirmarse con gran certeza que cada modelo puede complementarse de forma que pueda explicar de forma válida el fenómeno de transporte y propagación de ondas sonoras en la atmósfera, sin más restricciones que las ya establecidas por la simplificación o complejidad impuesta por los usuarios de los modelos.

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se realizó un estudio de los fenómenos aeroacústicos de emisión y propagación de los niveles de presión sonora en aerogeneradores de pequeña potencia, comúnmente conocido como ruido aerodinámico. A continuación se enumeran las conclusiones más importantes obtenidas:

- En el estudio matemáticos al tratarse de un aerogenerador de pequeña potencia al tener dimensiones inferiores a los aerogeneradores comúnmente estudiados, los modelos semi-empíricos BPM y BM fueron seleccionados para dicho estudio por ser los únicos modelos que pueden describir los fenómenos aeroacústicos que interactúan con el aerogenerador de pequeña potencia.
- En el estudio experimental de la propagación de ruido a través de las palas de longitud de un metro, diseñados con el perfil aerodinámico A18, en un aerogenerador de 1kW de potencia nominal y una torre de 7 metros de altitud; en condiciones climáticas del Ejido La Venta Juchitán, se midió a 8 metros de la torre que los niveles de presión sonora emitidos incrementan de 59 dB(A) a 64 dB(A) cuando las velocidades de viento cambian de 5 a 10 m/s.
- Se determinó que para el caso de este aerogenerador de pequeña potencia, debe ser instalado a 30 metros de distancia de la zona residencial más cercana, dado

que la propagación de los niveles de presión sonora a esa distancia son menores a 50 dB(A) así cumpliendo con la norma mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, los valores máximos permisibles de los niveles de presión sonora no superan los 50 dB(A) siendo el límite en horarios nocturnos y 55 dB(A) en horarios diurnos, mostrados en la tabla 2.3 donde también es aplicable a diferentes zonas de concentración humana.

- Otra conclusión se relaciona a la validación de los modelos teóricos con el análisis experimental, al tener una discrepancia menor al 5.5 % los modelos matemáticos semi-empíricos BPM y BM predicen los fenómenos aeroacústicos de forma cercana a la realidad descrito por la divergencia esférica de la propagación de los niveles de presión sonora.

6.2 Recomendaciones

Es necesario seguir avanzando en la consecución de un modelo para la predicción de la propagación del ruido proveniente de los aerogeneradores en el cual, se pueda abarcar simultáneamente medidas meteorológicas, acústicas de manera certera y verificable que permita la solución de este problema.

Verificar el desempeño el modelo de predicción de ruido propuesto en otros aerogeneradores, especialmente en aquellos que se encuentran ubicados en terrenos complejos. Claro que no se puede establecer que el modelo no cumple o este equivocado con solo realizar una sola prueba, de ser necesario se recomienda considerar los otros fenómenos de producción de niveles de presión sonora para futuros trabajos.

Continuar con los estudios experimentales en aerogeneradores de baja potencia, para aumentar en los registros de datos medidos, ya que con suficiente información se puede establecer la distancia idónea para la instalación de la torre donde se montara el aerogenerador y aprovechar el recurso eólico de la zona del Istmo de Tehuantepec con tecnología de energías renovables e incrementar la producción de energía eléctrica mediante el uso de recurso eólico.

Se recomienda realizar pruebas experimentales en horarios nocturnos, gracias a la información recabada de algunos antecedentes se conoce que la emisión sonora en horarios nocturnos producidos por los aerogeneradores superan por mucho al horario matutino, ya que durante la noche las contribuciones de ruido ambiente (sonidos de autos, música y actividad humana) disminuyen y destaca la emisión sonora calculada con los modelos BPM y BM.

Bibliografía

- [1] C. Q. Zhang. “Locating and tracking sound sources on a horizontal axis wind turbine using a compact microphone array based on beamforming”. *Applied Acoustics*, vol 146, pp.295-309, 2019.
- [2] S. S. Rodrigues. “Aeroacoustic optimization of wind turbine blades”. Tesis Doctoral. MSc Thesis, Instituto Superior Tecnico, Lisboa, 2012.
- [3] G. P. van den Berg, “Wind turbines at night: acoustical practice and sound research”. *Euronoise*, pag.160,2003.
- [4] A. Tadamasa, M. zangeneh, “Numerical prediction of wind turbine noise. *Renewable Energy*, vol. 36, no 7, p. 1902-1912, 2011.
- [5] D. O. de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, *Límites Máximos permisibles de emisión de ruido de Fuentes Fijas y su Método de emisión. México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)*,1994.
- [6] G. Guidati, S. Wagner, “Simulation of aerodynamic sound generation on airfoils in low mach-number flows”, in Proceedings of the 5th international Congress on Sound and Vibration, Adelaide,1977,pp 699-706.
- [7] T.Gömçen; B. Özerdem, “Airfoil optimization for noise emission problem and aerodynamic performance criterion on small scale wind turbines”. *Energy*, vol. 46, no 1, p. 62-71, 2012.
- [8] IEC, International Electrotechnical Commission 61400-11: “*Wind Turbine Generator Systems – Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques [S]*”, second ed., IEC, Switzerland, 2006.
- [9] BWEA, British Wind Energy Association Small Wind Turbine Performance and Safety Standard, Renewable Energy House, 2008.
- [10] C. Henin, “*Ruido de generadores eólicos: análisis y aplicación de la metodología de medición según normativa vigente*, 2 Congreso internacional de Acústica, 2010.
- [11] S. Lee, Soogab Lee, “Numerical and experimental study of aerodynamic noise by a small wind turbine”, *Renewable Energy*, pag.108-112, 2013.
- [12] E. González Moujir, “Metodología para la evaluación del impacto acústico en parques eólicos offshore: aplicación al caso de Cantabria”. 2013.

- [13] L. A. Siu Hong, “A study on the prediction of aerofoil trailing-edge noise for wind-turbine applications”. *Wind Energy*, vol. 20, no 2, p. 233-252, 2017.
- [14] S. Uosukainen. *Foundations of acoustic analogies*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2011.
- [15] D. G. Crighton. “The Kutta condition in unsteady flow..*Annual Review of Fluid Mechanics* 17.1, pp. 411-445, 1985.
- [16] K. M. Argüelles Díaz, “*Ruido aerodinámico tonal radiado por un ventilador axial en campo lejano: mecanismos de generación y propagación del mismo*. Universidad de Oviedo”, 2005.
- [17] A. Maestre, “Energía eólica: aerogeneradores”, máster en mantenimiento industrial y técnicas de diagnóstico.
- [18] O. D. S. Lloyd’s Register, “Low frequency noise emission from wind farms: potential health effects”. Copenhagen, 2009.
- [19] I. Höskolan Halmstad. *Noise annoyance from wind turbines: a review.*, Naturvårdsverket, 2003.
- [20] L. Conceicao, “Wind turbine noise prediction”. Dissertacao para obtencao do grau de mestre em engenharia aeroespacial. Instituto superior tecnico. Universidad técnica de lisboa. Lisboa, 2008.
- [21] O. D. S. Lloyd’s Register, “Low frequency noise emission from wind farms: potential health effects”, 2009.
- [22] E. Pedersen, H. I. Halmstad, *Noise annoyance from wind turbines: a review*. Naturvårdsverket, 2003.
- [23] S. Oerlemans, P. Sijtsma, and B. Méndez López. “Location and quantification of noise sources on a wind turbine.” *Journal of sound and vibration* 299. vol.4-5, pp. 869-883, 2007.
- [24] C. H. Hansen, “Fundamentals of acoustics”, Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control. World Health Organization, 2001, pp. 23-52.
- [25] M. Canals, “Modelación por elemento finito de parques eólicos”, Grado ingeniería en Universidad Politécnica de Madrid, España, 2016.
- [26] Fernández-Peña Mollá, Lucas. XFLR5 V4. *software de análisis de perfiles, planos y aviones: estudio y diseño de un CN-235*. BS thesis. 2012.
- [27] F. Grosveld, “Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines”. En: *Journal of Propulsion and Power*. American institute of aeronautics and Astronautics. Virginia, vol. 1, no 4, p. 292-299, 1985.
- [28] C. A. Londoño, A. E. Fernández, “Predicción de los niveles sonoros asociados a los parques eólicos”, 2017.
- [29] T. F. Brooks, D. S. Pope, , M. A. Marcolini, Airfoil self-noise and prediction, 1989.

- [30] G. Van den Berg, "The beat is getting stronger: the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound on wind turbines". En: *Journal of low frequency noise, vibration and active control.*, volume 24 no 21, pp 1-23, United Kingdom, 2005.
- [31] E. Zidan, T. and A. Elseabbagh, Comparison of sound power prediction models of wind turbines. En: *International conference on Advances in Agricultural, Biological and Environmental Sciences*. Dubai, 2014.
- [32] G. P. Van den Berg, "The sound of high winds. The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise.", 2006.
- [33] T. Evans, and J. Cooper, Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. En: *Acoustics Australia*. vol. 40, No. 1, Sidney, 2012.
- [34] M. Wondollek, "Sound from wind turbines in forest areas". Teknisk-naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten. Uppsala Universitet, Uppsala, 2009.
- [35] T. F. Brooks and M. A. Marcolini. "Airfoil tip vortex formation noise." *AIAA journal* vol. 24.2, pp. 246-252, 1986.
- [36] NASA. "Wind turbine acoustics". Hampton, 1990.
- [37] ISO 9613, "Atenuación del sonido durante la propagación en exteriores", Parte 1.
- [38] E. Quiñones, "Modelos de transporte y propagación de ondas sonoras en campo abierto: una mirada desde la física". En: V encuentro institucional de semilleros de investigación. Universidad de Cartagena, Cartagena, 2010.
- [39] D. Shepherd, (fecha de consulta 09/06/2020.) Ensayo sobre Psicoacústica. [Online] En: <http://www.docstoc.com/docs>
- [40] K. Kaliski, and E. Duncan. "Calculating annualized sound levels for a wind farm." *Proceedings of Meetings on Acoustics 159ASA*. Vol. 9. No. 1. Acoustical Society of America, 2010.
- [41] J. Cummings, "The variability factor in wind turbine noise..^{En}: *5th International Conference on Wind Turbine Noise*, Denver, 2013.
- [42] A. L. Rogers, J. F. Manwell. "Wind turbine noise issues. White paper by Renewable Energy Research Laboratory", University of Massachusetts at Amherst, Amherst, MA, 2004.