



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## OPTIMIZACIÓN DE MODELO DE RUIDO DEBIDO A GRANDES AEROGENERADORES A TRAVÉS DE RESULTADOS DE ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

Deambrosi Papini, Matteo<sup>1</sup>; González Fernández, Alice Elizabeth<sup>1</sup>; Gianoli Kovar, Pablo<sup>1</sup>, Olazábal Barrios, Luciana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería (UdelaR) Av. Julio Herrera y Reissig 565, Cod.11300.

Montevideo

Uruguay

Tel: +598-2714-2714 (253)

E-Mail: tteo.deam@gmail.com

**Palabras Clave:** Acústica ambiental, ruido de aerogeneradores, ruido aerodinámico

### ABSTRACT

The noise immission model due to large wind turbines, developed at the Institute of Fluids' Mechanics and Environmental Engineering (IMFIA), showed that the blades behave as a sequence of sources emitting aerodynamic noise; and that it can be estimated through the analysis of the temporal fluctuation of the atmospheric speed field. Laboratory work has been done to improve the model results. The blade section was simulated in a wind tunnel through prototype NACA 4415 and the lift and drag stresses fluctuations were measured with a load cell. The emission values are then propagated with the IMFIA's prediction model and the results are compared with measured immission sound pressure levels.

### RESUMEN

El modelo de inmisión sonora debido a aerogeneradores de gran porte, del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), determinó que la pala del aerogenerador se comporta como una secuencia de fuentes de ruido aerodinámico. La sección de pala fue simulada en laboratorio a partir de un perfil NACA 4415 y las variaciones de los esfuerzos de arrastre y sustentación se midieron con una celda de carga. Luego, los resultados de la simulación son ingresados al modelo de ruido del IMFIA obteniéndose así resultados que se pueden comparar con datos de ruido ambiente.

### INTRODUCCIÓN

En la República Oriental del Uruguay la energía eólica a tomado predominancia sobre otras fuentes de energía, alcanzando un 21 % de la producción energética total.

Entre el año 2013 y el año 2015 se registró un aumento de 800000 toneladas equivalentes de petróleo en energía eólica la producción de energía eólica.

Por otro lado desde el año 2005 los parque eólicos con producción superior a 10 MW son sometidos a estudio de impacto ambiental, requiriendo la estimación a priori de los niveles sonoros del entorno.

Previo al modelo desarrollado por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, la herramienta de cálculo en Uruguay era la norma ISO 9613-2, que supone el aerogenerador como una fuente de ruido puntual y unidireccional. En este contexto el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental ha venido desarrollando una metodología de cálculo del nivel sonoro en el entorno constituyendo el mismo en diversos componentes.

### COMPONENTES DEL MODELO

El modelo consta de tres modulos [6]:



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

- 1) Cálculo del espectro emitido a una distancia de 100 metros, considerando la producción de ruido aerodinámico
- 2) Propagación del nivel sonoro utilizando un ajuste empírico con una serie de datos.
- 3) Adición del ruido de viento como ruido de fondo.

### Modelo de emisión

El modelo de emisión considera que toda la estructura del aerogenerador (torre, góndola y principalmente la pala) se comporta como una fuente emisora de ruido. El modelo representa la fuente como un conjunto de secciones de pala emisoras. Para cada sección de pala se calcula el ruido producido en los dos principales fenómenos de generación aerodinámica de ruido: el “ruido del borde de ataque” y “el ruido del borde de fuga” [3].

El insumo para el cálculo es la velocidad incidente en la sección de pala y la densidad del aire a esa altura. La densidad y la velocidad al ingreso dependen, respectivamente, de la velocidad del perfil de velocidades atmosféricas y de la variación de densidad con la altura. Ambos perfiles en la altura dependen de la condición de estabilidad. Considerar la condición de estabilidad atmosférica para el cálculo del nivel sonoro emitido es uno de los avances del modelo que se propone.

El ruido del borde de ataque es causado por la fluctuación de la presión a lo largo de la pala producida por la turbulencia incidente. Es decir, que el nivel de ruido emitido por una sección de pala puede ser estimado tomando en cuenta la variación de la velocidad en el tiempo y la interacción pala-flujo en la sección de estudio; esto fue posible combinando la teoría de la turbulencia y la aplicación de conceptos de la aerodinámica aplicada a la ingeniería eólica.

El modelo de la turbulencia se basó en el espectro de Von Karman y una distribución de turbulencia en la altura considerando un perfil de velocidad e intensidad de turbulencia logarítmico. La producción de sustentación en la sección de pala depende del desempeño aerodinámico del perfil. El desarrollo de Taylor permite calcular la variaciones de sustentación producidas en el perfil debidas a pequeñas variaciones de velocidad (tales como las fluctuaciones turbulentas) y así el ruido emitido. El resultado de esta representación es un espectro de emisión con un pico cercano a 1 Hz y una intensidad cercana a 40 dBZ en esta frecuencia.

El ruido del borde de fuga se determina aplicando el espectro de turbulencia de Von Karman al espesor de la capa límite, determinando así el descenso de presión causada por el desprendimiento de la vorticidad contenida en la capa límite. Se aplicó, análogamente, el espectro de Von Karman al espesor de la capa límite que se forma corriente abajo del perfil, resultando un espectro de emisión cuyo pico es cercano a los 250 Hz y una intensidad cercana a los 70 dBZ en esa frecuencia. El ruido del borde de fuga resulta predominante al del viento en las frecuencias audibles y constituye el ruido típico de una turbina eólica.

El modelo de emisión integra el sonido emitido por toda la pala en un punto receptor a 100 metros del pie del aerogenerador, considerando solamente el efecto de la divergencia geométrica considerando la pala como un conjunto de dovelas y la absorción atmosférica de acuerdo con la Norma ISO 9613:Parte 1.

### Modelo de ruido de viento

Más allá de que sea necesaria la realización de una línea de base para conocer el ambiente sonoro del parque eólico previa su instalación, el ruido de viento estará siempre presente en la medición, incluso predominando sobre el ruido producido por el aerogenerador para largas distancias.

Se disponía de una serie de datos de ruido de viento tomados en estudios de líneas de base y se escogieron aquellos que fuesen representativos del nivel sonoro debido al viento, eliminando el efecto de otras fuentes contaminantes en caso de ser necesario [4].

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

La figura 1 ejemplifica los climas de ruido considerados para velocidades de viento de 3 m/s, 4 m/s y 5 m/s expresada en dBA. Estos espectros son de aplicación para terreno plano y moderadamente rugoso.

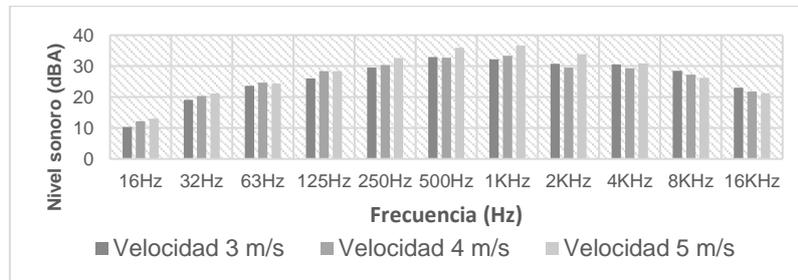


Fig. 1- Nivel sonoro de base

### Propagación del nivel sonoro

El nivel sonoro a corta distancia se ve bien representado por el modelo de emisión, no obstante, a mayores distancias los efectos de dispersión atmosférica acaban por eliminar el ruido agregado por la turbina. Otros efectos que pudieran considerarse, como son el efecto del suelo y el efecto de barreras no fueron tomados en cuenta, dado que la incidencia directa resulta predominante por la magnitud de la fuente emisora.

Para la inclusión de los efectos atmosféricos se consideró un coeficiente decaimiento geométrico dependiente de la frecuencia, debido a que la turbulencia entrante del viento atmosférico y la generada mecánicamente por la interacción del flujo con el aerogenerador hacen cuestionable la teoría de rayos a largas distancias (flujo rotacional), y otorga mejores resultados operar con un frente de onda paralelo al aerogenerador. La dispersión del ruido hacia la alta atmósfera y el intercambio de energía entre frecuencias provoca que en realidad el aerogenerador no se comporte como una fuente lineal ni puntual, sino que tiene distintos comportamientos en las distintas frecuencias [7].

El análisis de estos coeficientes de decaimiento geométrico frecuenciales se hizo ajustando una serie de datos de nivel sonoro ambiental tomada en el parque eólico Kentilux, ubicado 50 km al oeste del puerto de Montevideo (Ver figura 2), resultando los valores presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de decaimiento geométrico  $n(u,f)$  para distintas velocidades de viento

|                  | Banda de octava (Hz) |     |     |     |     |      |      |      |      |
|------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                  | 31,5                 | 63  | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Velocidad <9 m/s | 0,6                  | 0,3 | 0,9 | 2   | 2,1 | 2,4  | 2    | 1,4  | 1    |
| Velocidad >9 m/s | 0                    | 0   | 0,8 | 1,9 | 2,1 | 2,5  | 2,4  | 1,9  | 1,4  |

Considerando la tabla 1, la atenuación entre una distancia al eje de la torre  $d_1$  y una distancia al eje de la torre  $d_2$  se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Atenuación} = \text{Absorción Atmosférica} - 10 \times \log \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{n(u,f)} \quad (1)$$

La figura 2 muestra el decaimiento geométrico resultante a 600 metros del pie del aerogenerador.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

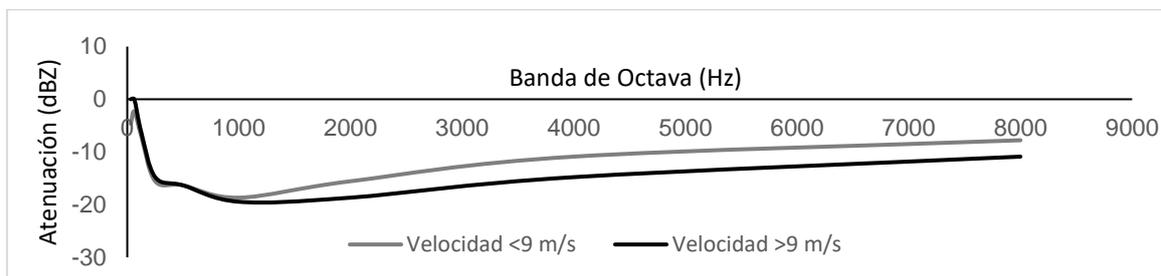


Fig. 1- Atenuación por frecuencia en 600 metros del aerogenerador

En la figura 2 puede observarse que para frecuencias bajas donde el ruido del viento es predominante, el decaimiento es prácticamente nulo. Luego aumenta hasta un pico las frecuencias donde se desencadena el proceso de cascada y comienza a disminuir nuevamente. [2]. Como es de esperar, estos efectos dispersivos se hacen menos intensos al disminuir la velocidad de viento.

#### TRABAJO EN LABORATORIO

El análisis en el laboratorio tiene como objetivo optimizar el modelo de generación. Una sección de pala se simuló utilizando un perfil aerodinámico NACA 4415, el efecto del viento se simuló en túnel de viento y los efectos del flujo se midieron con una celda de carga que permitió determinar los valores de fuerza media y las fluctuaciones de fuerza, así como la diferencia de ruido con y sin perfil.

Esto permitió ajustar los valores de coeficientes de sustentación y arrastre que el flujo genera en el aerogenerador y verificar el modelo de generación.

#### Dispositivo experimental

Básicamente está constituido por 3 componentes: un túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, un perfil aerodinámico construido a escala por personal del Instituto y un conjunto de celdas de carga para determinar los esfuerzos sobre el perfil aerodinámico.

El túnel de viento opera en succión. El área de operación mide 5,3 m de largo con una sección recta de 1 m por 0,9 m. El aire es succionado con un ventilador axial de velocidad nominal de 6,5 m/s, disponiendo de un ennderezador del flujo tipo panal de abeja flujo abajo (ver figura 3). La balanza aerodinámica es externa túnel, por lo que se sostuvo a través de soportes a ambos lados, apoyados en el suelo e independientemente al túnel de viento para evitar interferencias. En cada soporte se tiene un sistema de celdas de carga que permite realizar la medición de los esfuerzos sobre el perfil. Esta medición se realiza ejecutando un muestreo digital de la salida con un sistema National Instruments modelo SCXI1000 compuesto de un módulo de conexión modelo SCXI1314, un sistema de adquisición modelo SCXI1600 y un acondicionador de señal modelo SCXI1520.

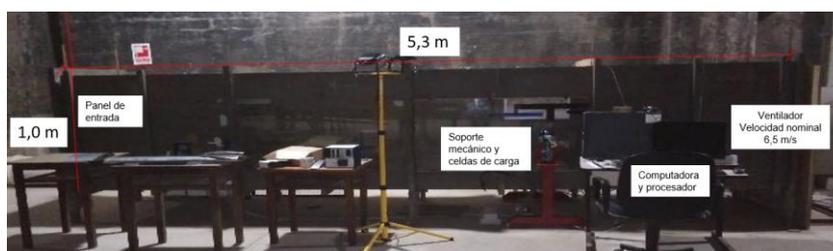


Fig. 3- Vista de la cámara de ensayos

La comparación directa de los esfuerzos en el modelo piloto con los esfuerzos que se producen en el aerogenerador no resulta del todo correcta sino que es necesario escalar el problema. Los



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

coeficientes adimensionales  $C_L$  y  $C_D$ , definidos según las ecuaciones (1) y (2) permiten relacionar los esfuerzos según las dimensiones del perfil y la velocidad y densidad de la corriente de aire [1].

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho v^2 b l} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v^2 b l} \quad (2)$$

$F_x$  es el valor medio de la fuerza horizontal en el intervalo de medición,  $F_y$  es el valor medio de la fuerza vertical,  $\rho$  es la densidad del aire en la zona de trabajo,  $v$  es la velocidad media del flujo en la sección de aproximación,  $b$  es el largo del perfil aerodinámico y  $l$  la longitud de la cuerda del perfil. La cuerda y el ancho del perfil miden 305 mm y 800 mm respectivamente en el piloto. Los valores de  $C_L$  y  $C_D$  varían según el ángulo de ataque. En el entorno de ángulo de ataque nulo resultan según las ecuaciones 3 y 4.

$$C_L = 5,7 \alpha + 0,32 \quad (3)$$

$$C_D = 0,011 \quad (4)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de ataque en radianes.

#### TRABAJO DE CAMPO

Además de los datos de mediciones de ruido de viento, se utilizaron diversas mediciones en campo para la calibración y validación del modelo. Los parques eólicos analizados se muestran en la figura 4.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

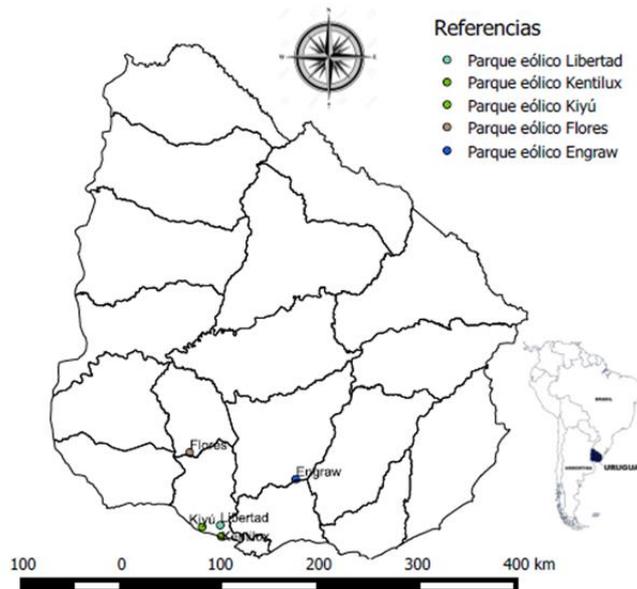


Fig. 4- Parques eólicos analizados

Para las mediciones de niveles de presión sonora se utilizaron dos equipos analizadores de Clase 1 (según norma IEC 61672): un sonómetro marca Casella CEL 63-C y un sonómetro marca Brüel&Kjær modelo 2250, ambos propiedad del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. En todos los casos se trabajó atendiendo a las precauciones y recomendaciones de rigor para medición de niveles sonoros. Todos los parques son en terreno levemente rugoso y plano. La cantidad de aerogeneradores por parque varía según la tabla 2.

Tabla 2. Cantidad de aerogeneradores en cada parque y aerogeneradores considerados en el cálculo

|                         | Número de aerogeneradores | Número de aerogeneradores considerados | Distancia disponibles (m) |
|-------------------------|---------------------------|--|---------------------------|
| Parque eólico Kentilux  | 5                         | 1                                      | 300-1500                  |
| Parque eólico Libertad  | 1                         | 1                                      | 100-300                   |
| Parque eólico Engraw    | 2                         | 1                                      | 200-400                   |
| Parque eólico Kiyú      | 53                        | 3                                      | 400-500                   |
| Parque eólico de Flores | 5                         | 1                                      | 700-800                   |

Los parques Kentilux y Engraw fueron utilizados para calibrar el modelo mientras que los parques Libertad, Kiyú y Flores para verificarlo.

Los parámetros de entrada para la simulación fueron la distancia entre el punto de medición y los aerogeneradores más cercanos, la velocidad de giro del rotor, la velocidad del viento a la altura del buje y la temperatura ambiente. En caso que el dato disponible fuera la velocidad a 10 metros de altura, la velocidad en el buje se calculó mediante una ley logarítmica. Cuando no se disponía del valor de frecuencia de giro del rotor, se estimó a partir de la velocidad.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

La comparación se hizo considerando el nivel equivalente en 10 minutos de medición, con escala de ponderación A. Se graficaron los residuos para cada valor de comparación obteniendo la dispersión de la figura 5 y los percentiles de la figura 6.

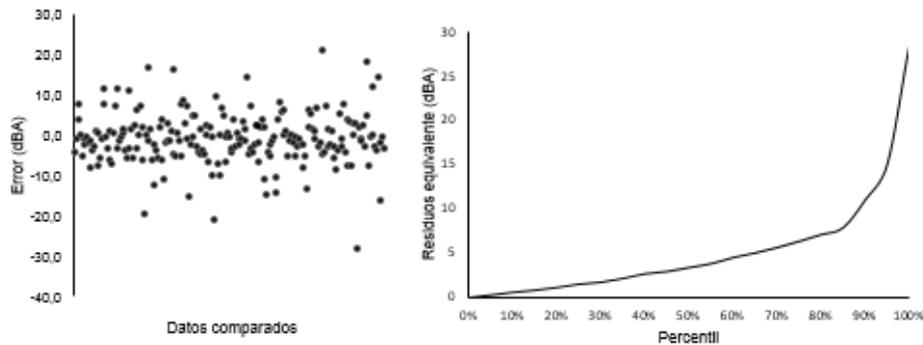


Fig 5. (Izq) - Dispersión de residuos del modelo

Fig. 6 (Der)- Permanencia de valores residuales

La figura 7 representa la mediana de los residuos por banda de octava.

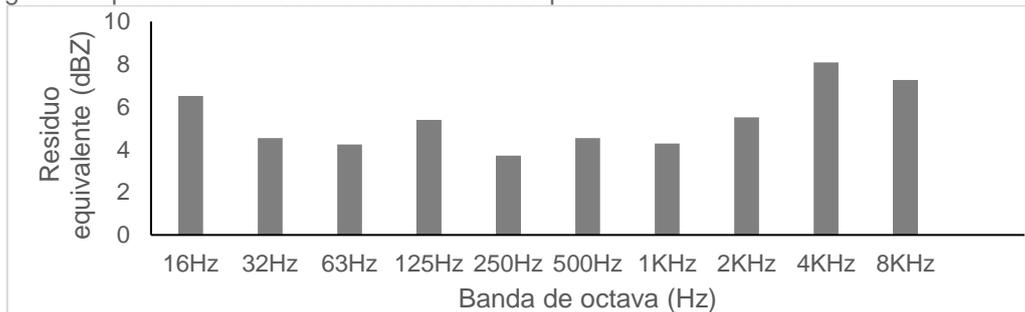


Fig. 7- Mediana de los residuos por banda de octava

La figura 8 presenta la variación del residuo del nivel sonoro equivalente en escala A, al aumentar la distancia.

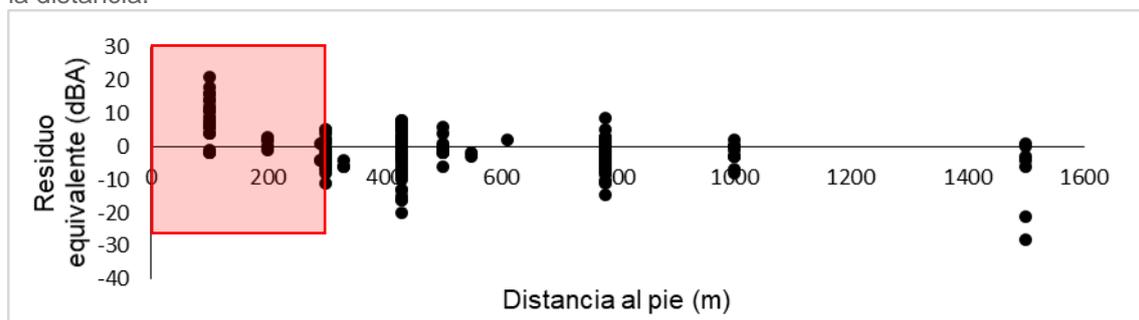


Fig. 2- Variación del residuo con la distancia. En la zona roja es zona "Non edificandi" para la normativa uruguaya.

## Conclusiones

El modelo del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental representa de manera ajustada los efectos de generación del ruido de fuga y la dispersión en la atmósfera; y se vuelve impreciso en la incorporación del ruido de fondo, por lo que se recomienda se aplique utilizando una línea de base propia de cada caso.

Los mejores ajustes son para distancias mayores a 500 metros y frecuencias medias.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Se debe mejorar además la descripción del decaimiento en la zona más próxima a la fuente.

## Referencias

- [1]. Abbott (1958). Theory of wing sections. Dover Publications, Nueva York.
- [2]. Attenborough K. (2014) *Sound Propagation in the Atmosphere*. In: Rossing T.D. (Eds) *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, New York, NY
- [3]. Deambrosi Papini, M., Hernández Castellani, M.N., González Fernández, A.E. y Cataldo Ottieri, J.A. (2016) Prediction of Environmental Sound Pressure Levels Due to Large Wind Turbines. International Congress on Acoustics ICA, Buenos Aires, septiembre 2016.
- [4]. Gianoli Kovar, P., Cataldo Ottieri, J. A., González Fernández, A. E., Montero Crucieé, J. (2016) *Characterization of the sound spectrum of the wind regarding environmental studies, focused in wind energy devices*. International Congress on Acoustics ICA 2016, Buenos Aires,
- [5]. González Fernández, A.E., Gianoli Kovar, P., Deambrosi Papini, M., Hernández Castellani, M. y Paz Urban, M. (2016) *Environmental Noise Due to Large Wind Turbines: What We Have Learnt*. International Congress on Acoustics ICA 2016, Buenos Aires,
- [6]. González, AE, Gianoli Kovar, P., Deambrosi Papini, M., Hernández Castellani, M. y Paz Urban, M. (2016) *Síntesis de resultados del Proyecto ANII FSE\_2013\_1\_10942 "Impacto Acústico de Aerogeneradores de Gran Porte": Modelo predictivo de niveles ambientales de presión sonora. [Resumen de los resultados del proyecto de investigación ANII FSE\_2013\_1\_10942 "Impacto acústico de grandes aerogeneradores": Modelo de predicción para niveles de presión acústica ambiental.]* 23 p. Septiembre 2016.
- [7]. González, A.E., Rezzano Tizzé, N.G., Gianoli Kovar, P.F., Paz Urban, M. (2017). Acoustic Impact Studies (AIS) of Wind Farms in Uruguay: A Methodology Proposal. Scientific Research Publishing. Agosto 2017.
- [8]. International Standard Organization (ISO) (1996) *International Standard 9613. Attenuation of Sound during Propagation Outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*.
- [9]. International Standard Organization (ISO) (1996) *International Standard 9613. Attenuation of Sound during Propagation Outdoors-Part 2: General Method of Calculation*.
- [10]. Van den Berg, G.P. (2003) *Effects of the Wind Profile at Night on Wind Turbine Sound*. *Journal of Sound and Vibration*