



FIA 2018

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

ESTUDIO DE GENERACIÓN DE RUIDO ASOCIADO A LA INTERACCIÓN ENTRE UN PERFIL AERODINÁMICO Y UN FLUJO TURBULENTO

PACS: 43.50.+y

Autores: Olazábal Barrios, Luciana; Gianoli Kovar, Pablo; Cataldo Ottieri, José; González Fernández, Alice Elizabeth.

Institución: Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería (UdelaR)

Dirección: Av. Julio Herrera y Reissig 565, Cod.11300.

Localidad:Montevideo

País:Uruguay

Tel.+598-2714-2714 int.253

lolazabal@fing.edu.uy; pgianoli@fing.edu.uy; elizabet@fing.edu.uy; jcataldo@fing.edu.uy

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

ABSTRACT

As part of the work aimed at the development of a Wind Turbine Noise Generation model at the Institute of Fluid Mechanics and Environmental Engineering, the generation of noise associated with the interaction between an aerodynamic profile and a turbulent flow, due to the generation and release of the boundary layer that is generated on it was attempted. By means of an aerodynamic scale operated in a wind tunnel, the aerodynamic performance curves of the profiles were surveyed, measuring, in addition, the noise levels emitted in different operating conditions.

RESUMEN

Como parte de los trabajos orientados al desarrollo de un modelo de Generación de Ruido por Turbinas Eólicas en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, se abordó la generación de ruido asociado a la interacción entre un perfil aerodinámico y un flujo turbulento, debido a la generación y al desprendimiento de la capa límite que se genera sobre el mismo. Utilizando una balanza aerodinámica operada en un túnel de viento se relevaron las curvas de desempeño aerodinámico de los perfiles, midiéndose además, los niveles de ruido emitido en diferentes condiciones de operación.

INTRODUCCIÓN

En una turbina eólica, el ruido de origen aerodinámico resulta predominante frente al producido por otros mecanismos. Esto conlleva a que la generación ruido no se pueda asignar a un punto particular del aerogenerador, sino que toda la estructura (torre, góndola, pero principalmente la pala) se comporta como una fuente emisora. En el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental se han venido llevando adelante estudios que han permitido determinar que la pala del aerogenerador se comporta como una serie de fuentes emisoras de ruido aerodinámico, donde las principales causantes de la variación de presión en el entorno, son las fluctuaciones de la velocidad incidente (y consecuentemente los esfuerzos de interacción) y el desprendimiento de la capa límite turbulenta corriente abajo de la pala (Deambrosi, et al., 2016). Merece destacarse que este desarrollo fue basado en los conceptos presentados en la tesis doctoral de Van den Berg (2006).

FIA 2018

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

Para analizar la producción de ruido en una turbina eólica, se propuso describir el proceso que ocurre cuando una corriente de aire turbulenta interactúa con una sección de la pala de un aerogenerador, para diferentes condiciones de operación del perfil de la pala. Para esto se diseñó y construyó una balanza aerodinámica que permite evaluar el desempeño aerodinámico del perfil. Este desempeño se caracteriza determinando los coeficientes de sustentación, de arrastre y de par de torsión.

Como primera instancia de este estudio se desarrolló un dispositivo práctico para medir la sustentación y el arrastre de un perfil aerodinámico que se extiende a lo ancho de la sección de prueba de un túnel de viento, y se verificaron las curvas de desempeño presentadas del perfil aerodinámico estandarizado por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica de los Estados Unidos, NACA 4415 (Abbott, 1958).

En una segunda instancia se procedió a medir niveles de presión sonora dentro del túnel a distintas velocidades (ruido de fondo) y luego niveles de presión sonora con el perfil instalado, para realizar un estudio comparativo.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Túnel de viento

El túnel de viento opera en succión y tiene una zona de trabajo de 5,3 m de longitud con una sección recta de 1 m por 0,9 m. El aire es movido con un ventilador axial siendo la velocidad nominal de 6,65 m/s. En el extremo corriente arriba se tiene un enderezador de flujo tipo panel de abeja con una celda hexagonal de 15 mm de lado y una longitud de 150 mm. En la figura 1 se presentan los dos extremos del túnel y en la figura 2, una vista lateral.



Figura 1. Ventilador (izquierda) y enderezador de flujo (derecha).



Figura 2. Cámara de ensayos

FIA 2018

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

Equipo de medición

La balanza empleada es externa a la cámara de ensayos, por lo que se sostiene a través de dos soportes, uno a cada lado del túnel de viento, apoyados en el suelo e independientes a los del túnel de viento, con lo que se evita el contacto entre la balanza y el túnel, previniendo posibles interferencias en la salida de datos.

Cada soporte incluye el apoyo del objeto sobre el cual se desea medir las fuerzas, un sistema de celdas de carga que permite realizar la medición y el apoyo del sistema al suelo.

En la Figura 3, se puede observar un detalle y una fotografía de los componentes de uno de los apoyos del objeto sobre el cual se desean medir las fuerzas aerodinámicas. Éste se compone de dos celdas de carga, que permiten medir la componente vertical de fuerza. Luego, el brazo sobre el que se apoyan puede girar libremente en el plano de la figura 3 en el que, a su vez, se encuentra una tercera celda, que permite medir fuerzas de dirección horizontal.

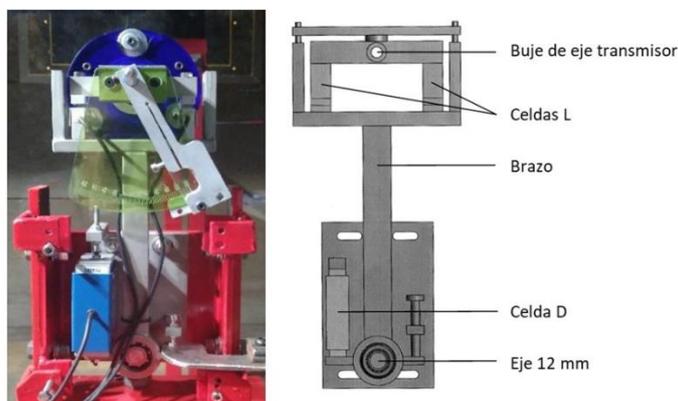


Figura 3. Brazo y celdas de carga adjuntas.

En la figura 4 se presenta en forma esquemática el estado de cargas que permite describir la balanza, así como las magnitudes que se miden.

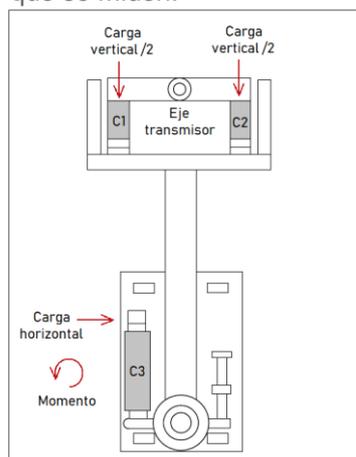


Figura 4. Estados de carga de un lado de la balanza.

La medición de las fuerzas que se realiza en cada celda se ejecuta realizando un muestreo digital de la salida de cada una, utilizando 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. Luego, la señal es enviada a una computadora en la cual se procesa con un programa realizado con LabWindowsCVI.



FIA 2018

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

PROCESOS DE MEDICIÓN

Curvas de desempeño aerodinámico

El paso previo a cada prueba realizada con el dispositivo consta de una calibración, que, observando la figura 3, consiste en agregar o quitar un momento en el sentido saliente a la figura, de manera que la diferencia entre las indicaciones de las dos celdas que obtienen la sustentación de un lado de la barra, coincida con la diferencia entre las indicaciones de sus celdas opuestas, evitando que en la salida de datos se tenga implícitamente un aporte de momento dado por cómo la barra se encuentra condenada al dispositivo de medición. Durante el ensayo se mide la temperatura en el interior de la zona de trabajo.

Una vez calibrado el momento, se enciende el ventilador, ajustando la velocidad de rotación para lograr la velocidad de viento en la que se desea trabajar. Esta última se mide con un tubo de Pitot conectado previamente al túnel de viento. Una vez estabilizado este último valor, se pasa al registro de datos utilizando el programa de muestreo y almacenamiento.

La medición se realiza con una frecuencia de muestreo de 2000 Hz, tomando 20000 datos por registro, por lo que el tiempo de registro corresponde a 10 segundos. Luego, estos valores son procesados de manera de obtener los valores medios de la componente vertical F_y y de la componente horizontal F_x de la fuerza, así como del par de torsión.

La resultante vertical corresponde a la fuerza de sustentación y la resultante horizontal a la fuerza de arrastre por lo que es posible inferir el valor de los coeficientes de sustentación y arrastre, C_L y C_D , definidos según las ecuaciones (3) y (4).

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho v^2 b l} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho v^2 b l} \quad (4)$$

Donde: F_x es el valor medio de la componente horizontal de la fuerza, F_y es el valor medio de la componente vertical, ρ es la densidad del aire en la zona de trabajo, v es la velocidad del flujo en la sección de aproximación, b es el largo del perfil aerodinámico (80 cm) y l la longitud de la cuerda del perfil.

Este proceso de medición ha de repetirse, para cada velocidad de aproximación en estudio, para una serie de ángulos de ataque, de modo de poder determinar las curvas de desempeño del perfil.

Niveles de presión sonora dentro del túnel de viento

Para las mediciones de niveles de presión sonora se empleó un sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2250. El mismo fue colocado dentro del túnel, entre el álabe y el ventilador, a una distancia de 1 m del borde de fuga (ver Figura 5). Las medidas fueron tomadas para varias condiciones de ángulo de ataque y velocidades de viento, además de tomar medidas en ausencia del perfil, para la misma serie de velocidades, para su posterior comparación. En la Tabla 1 se presentan las configuraciones de ángulos y velocidades empleadas. La duración de cada medición fue de 1 minuto.

FIA 2018

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

v (m/s)	$\alpha_{\text{ataque}} (^{\circ})$
2,8	0
	5
	10
	15
4,7	0
	5
	10
	15
6	0
	5
	10
	15

Tabla 1: Configuraciones empleadas en el ensayo.



Figura 5: Sonómetro en funcionamiento.

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 EXPERIMENTALES

Perfil aerodinámico

En la figura 6 se aprecia el perfil ensayado



Figura 6: Modelo NACA 4415

En la Figura 7 se presentan las curvas de coeficiente de sustentación – ángulo de ataque obtenidas para la serie de velocidades analizadas. En la misma figura se presenta la forma de esta curva obtenida de Abbott (1958).

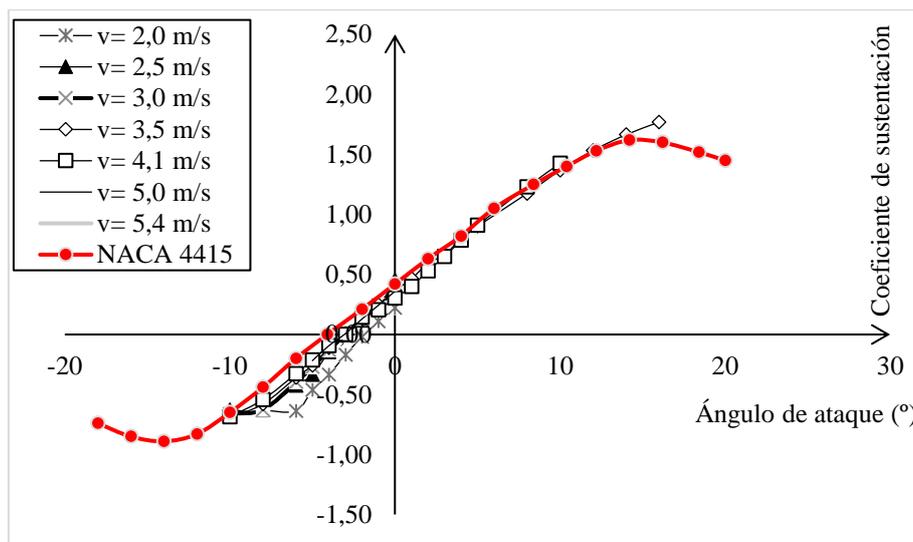


Figura 7. Curvas de desempeño determinadas en laboratorio y curva obtenida de bibliografía (NACA4415 tomada de Abbott, 1958).

Se puede observar que, en general el comportamiento relevado del perfil coincide con el extraído de la bibliografía. A menores velocidades, las curvas se alejan de la curva teórica del NACA 4415, en especial para ángulos de ataque negativos. Se destaca que el número de Reynolds resulta, en estos casos, significativamente menor (inferior a 2.9×10^5) al que se tenía durante los ensayos informados en la bibliografía que resultaron superiores a 3.0×10^6 . Para ángulos de ataque positivos y valores de velocidad mayores a 4 m/s ($Re > 2.1 \times 10^5$) las curvas son de similar magnitud.

Si se analiza la entrada en pérdida del perfil, la curva obtenida de la bibliografía, para valores de sustentación negativos, entra en pérdida en un ángulo mayor que las obtenidas en los ensayos que se presentan (-12° contra -8°), mientras que para la sustentación positiva ocurre lo contrario. En la Figura 8 se presenta la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre para las mediciones realizadas.

FIA 2018

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

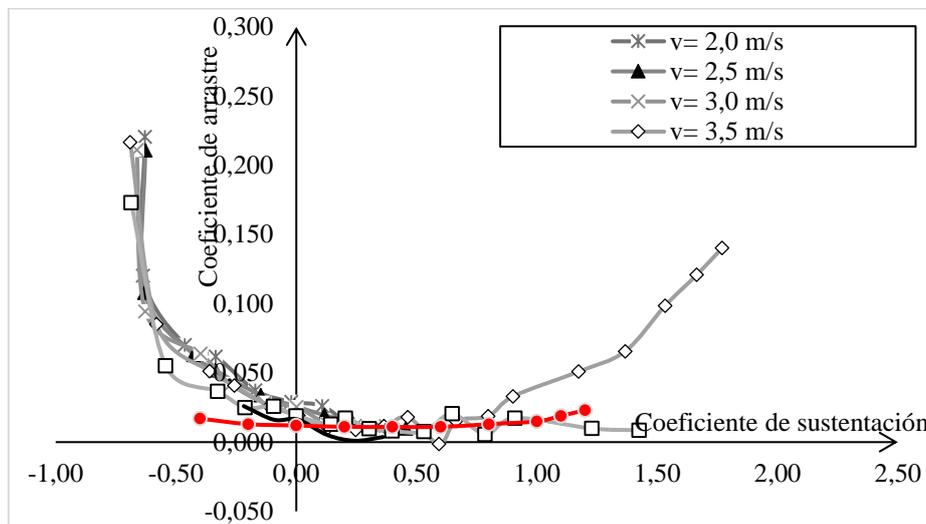


Figura 8. Relación C_L-C_D obtenida de bibliografía (curvas grises) y determinada en laboratorio (curva roja) para distintas velocidades (tomada de Abbott, 1958)

Niveles sonoros generados por el perfil

A partir de los resultados de Schlichting [4] se determinó el espesor de la capa límite del perfil NACA 4415 para las distintas velocidades ensayadas. A partir de este resultado y el número de Strouhal se pudo determinar las frecuencias teóricas de desprendimiento de vórtices.

Una de las entradas necesarias en el cálculo del espesor de la capa límite δ , con la que se calcula la frecuencia de desprendimiento de vórtices, es la distancia de transición de flujo laminar a turbulento x (ver Figura 9). Para su obtención se realizó un estudio visual de la interacción del perfil aerodinámico con el flujo turbulento (ver Figura 10), donde, empleando humo artificial se identificó, para distintos ángulos de ataque, el desprendimiento de la capa límite turbulenta. Se observó que, hasta 10° no se ve separación, en 12° parece haber una incipiente separación cerca del borde de fuga y de ahí en adelante ésta se va corriendo hacia el borde de ataque. Dados estos resultados se concluye que el cálculo de la frecuencia de desprendimiento de vórtices únicamente tiene sentido para el ángulo de 15° , ya que en los demás ángulos empleados para la medición aún no se da este fenómeno.

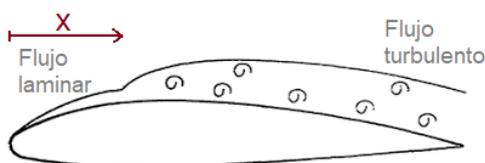


Figura 9: Distancia x de transición de flujo laminar a turbulento.

Fueron calculadas las composiciones espectrales en BTO de cada caso estudiado, y se compararon mediante resta aritmética los espectros correspondientes a las distintas velocidades con el perfil y sin el mismo. En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos de x , δ y de las frecuencias de desprendimiento de vórtices tanto teórica como calculada. La frecuencia calculada corresponde a las frecuencias en las que es notable la diferencia entre el ensayo con perfil y sin perfil.

La altura de la capa límite se mantuvo para los tres casos, dentro de los 10 mm.

Nótese que, a mayor velocidad, la capa límite turbulenta tiende a pegarse al perfil, por lo que es esperable (y así resultó), que el desprendimiento de vórtices se dé más cerca del borde de ataque para velocidades menores (ver Tabla 2).

FIA 2018

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

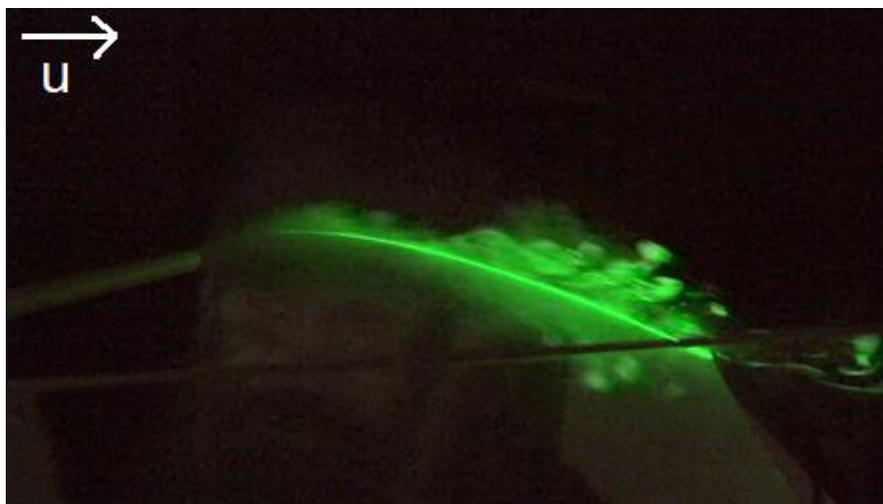


Figura 10: Vórtices desprendidos en el ensayo con un ángulo de ataque de 16º

v (m/s)	$\alpha_{\text{ataque}} (^{\circ})$	x (m)	δ (mm)	f _{calculada} (Hz)	f _{medida} (Hz)
2,8	15	0,16	10,0	40,8	40
4,7	15	0,16	9,0	76,3	80
6,0	15	0,2	10,2	86	40

Tabla 2: Resultados y comparación de frecuencias de desprendimiento de vórtices.

CONCLUSIONES

El proceso de calibración de la balanza aerodinámica permitió ajustar las celdas de carga con errores absolutos menores al 10 %, dentro del rango de valores de operación habitual. La suposición de independencia entre las indicaciones de las celdas de carga es correcta.

Las curvas de desempeño del perfil aerodinámico NACA 4415 determinadas utilizando la balanza aerodinámica de la Facultad de Ingeniería tienen un comportamiento similar al presentado en los principales manuales de diseño de aerogeneradores.

La generación de ruido por parte del perfil NACA 4415 en las dos velocidades más bajas ensayadas, mostró que las frecuencias de desprendimiento experimentales resultan acordes a las teóricas, pero en el caso de la velocidad más alta el fenómeno no pudo ser identificado.

Los resultados obtenidos en los ensayos se integran al modelo de predicción de niveles sonoros del IMFIA.

REFERENCIAS

1. Abbott., 1958. *Theory of wing sections*. Dover Publications, Nueva York
2. Deambrosi Papini, M., Hernández Castellani M. N., González Fernández A. E. , Cataldo Ottieri, J. A., "Prediction of environmental sound pressure levels due to large wind turbines". 5 Sep. 2016 <
<http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0168.pdf>>.
3. Van den Berg, G. P. 2006 "The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise". Doctoral Thesis from the University of Groningen, Netherlands. Mayo, 2006
4. Schlichting, H., 1979. *Boundary-Layer Theory*. Southern Methodist University.

AVISO DE RESPONSABILIDAD

Los autores son los únicos responsables del material impreso incluido en este documento.