

## Determinación experimental de las curvas de desempeño de un perfil aerodinámico NACA 4415

Luciana Olazábal

José Alberto Cataldo

Pablo Ernesto Pais

Instituto de Mecánica de los Fluídos e Ingeniería Ambiental, Montevideo, Uruguay

lolazabal@fing.edu.uy

### Resumen:

La generación de ruido en las palas de una turbina eólica está principalmente determinada a partir de la variación de los esfuerzos de sustentación y arrastre en las mismas debidas a la turbulencia atmosférica incidente y al desprendimiento de la capa límite corriente abajo de la turbina. Como parte de los trabajos orientados a la optimización del modelo de generación de ruido del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, se diseñó y construyó una balanza aerodinámica que, operada en un túnel de viento, permite evaluar el desempeño aerodinámico de perfiles en punta en diferentes condiciones de operación y luego vincularlo a generación de ruido. La balanza aerodinámica fue calibrada, y se evaluó el desempeño aerodinámico de un perfil NACA4415. Como resultado del análisis se obtuvieron curvas de coeficientes de sustentación y arrastre en función del ángulo de ataque y se compararon con curvas disponibles en la bibliografía.

**Palabras clave:** Aerodinámica, perfil aerodinámico, túnel de viento, aerogenerador, acústica ambiental.

### Abstract:

The generation of noise in the blades of a wind turbine is mainly determined by the variation of the lift and drag forces in them due to the incident atmospheric turbulence and the detachment of the boundary layer downstream of the turbine. As part of the work done at the Institute of Fluid Mechanics and Environmental Engineering aimed at optimizing the noise generation model, an aerodynamic scale was designed and built. This scale operates in a wind tunnel, and helps evaluating the aerodynamic performance of profiles in different operating conditions to them to noise generation. The aerodynamic scale was calibrated, and the aerodynamic performance of a NACA4415 profile was evaluated. As a result of the analysis, coefficients of lift and drag coefficients were obtained as a function of the angle of attack and were compared with the curves available in the literature.

**Keywords:** Aerodynamics, aerodynamic profile, wind tunnel, wind turbine, environmental acoustics.

### Resumo:

A geração de ruído nas pás de uma turbina eólica é determinada principalmente pela variação das forças de sustentação e arrasto, devido à turbulência atmosférica incidente e à separação da camada limite a jusante da turbina. Como parte do trabalho de otimização do modelo de geração de ruído do Instituto de Mecânica dos Fluidos e Engenharia Ambiental, foi projetada e construída uma balança aerodinâmica que, utilizada num túnel de vento, permite avaliar o desempenho aerodinâmico de perfis em diferentes condições de operação e assim, vinculá-lo à geração de ruído. A balança aerodinâmica foi calibrada e nela foi avaliado o desempenho aerodinâmico de um perfil NACA4415. Como resultado da análise, os coeficientes de sustentação e de arrasto foram obtidos em função do ângulo de ataque e foram comparados com as curvas disponíveis na literatura.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica, perfil aerodinâmico, túnel de vento, turbina eólica, acústica ambiental.

## 1. INTRODUCCIÓN

En una turbina eólica, el ruido de origen aerodinámico resulta predominante frente al producido por otros mecanismos. Esto conlleva a que la generación de 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 de la Universidad de la República de Uruguay se han realizado estudios que permitieron determinar que las palas del aerogenerador se comportan como una serie de fuentes puntuales emisoras de ruido aerodinámico. En el modelo de generación desarrollado, las principales causas de la variación de presión en el entorno (y, por lo tanto, de generación de ruido), son las fluctuaciones de la velocidad incidente en la pala y el desprendimiento de la capa límite turbulenta corriente abajo de la misma (Deambrosi et al., 2016). Merece destacarse que este desarrollo se basó en los conceptos presentados por Van den Berg (Van den Berg, 2006).

Para el estudio de dichas causas se diseñó y construyó una balanza aerodinámica con la que evaluar el desempeño aerodinámico de un perfil estándar NACA 4415. Este desempeño se caracteriza determinando los coeficientes de sustentación, de arrastre y de par de torsión del perfil. 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. Luego se verificaron las curvas de desempeño del perfil NACA 4415 presentadas por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica de los Estados Unidos (Abbott, 1958).

## 2. MODELO DE EMISIÓN

Para determinar la producción de ruido en una turbina eólica, el modelo considera los fenómenos que ocurren cuando una corriente de aire turbulenta interactúa con la sección de la pala de un aerogenerador, para diferentes condiciones de operación.

El modelo divide las palas del aerogenerador en dovelas para luego tomar cada diferencial de pala como una fuente puntual de ruido. Luego, la emisión

total de ruido será la suma de las emisiones de todas las dovelas.

Entonces para cada sección de pala se calcula el ruido producido por los dos principales fenómenos de generación aerodinámica de ruido: el “ruido del borde de ataque” y el “ruido del borde de fuga”. Para estos cálculos son necesarios los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación, que se pueden obtener experimentalmente utilizando un perfil aerodinámico estandarizado en un túnel de viento.

### 2.1 El ruido del borde de ataque

El ruido del borde de ataque es causado por la fluctuación del campo de presiones alrededor de la pala, producida por la turbulencia incidente. Es decir, el nivel de ruido emitido por una sección de pala puede ser estimado considerando la variación temporal de la velocidad y la interacción pala-flujo en la sección de análisis. Esto es posible al combinar la teoría de la turbulencia y algunos conceptos aerodinámicos aplicados a la ingeniería eólica (Deambrosi et al., 2016).

Las fluctuaciones del campo de presiones están dadas por la variación de los esfuerzos de sustentación. El esfuerzo de sustentación se calcula utilizando el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) de la Ecuación 1.

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

Ecuación 1

Donde  $F_y$  es el valor medio de la componente vertical,  $\rho$  es la densidad del aire de la zona de trabajo,  $v$  es la velocidad del flujo en la sección de aproximación,  $b$  es el largo del perfil aerodinámico y  $l$  es la longitud de la cuerda del perfil. En este caso,  $b = 80$  cm.

El carácter adimensional del coeficiente de sustentación permite su aplicación al caso real luego de haberlo determinado experimentalmente con un piloto de laboratorio.

### 2.2 El ruido del borde de fuga

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 causado por el desprendimiento de la vorticidad contenida en la capa límite.

El espesor del desprendimiento de la capa límite está determinado por los esfuerzos de arrastre que se ejercen sobre el perfil. Existe un coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) análogo al de sustentación, que permite calcular el esfuerzo de arrastre (Ecuación 2).

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

Ecuación 2

Ambos valores  $C_D$  y  $C_L$  son parte de los datos a ingresar en el modelo de predicción de niveles de presión sonora. Ante la esperable sensibilidad del modelo al uso de estos coeficientes, se procura obtenerlos en forma experimental para los perfiles que se emplean en las máquinas con las que se trabaja en Uruguay. Es por ello que se construyó una balanza aerodinámica con la cual efectuar los ensayos necesarios para la determinación de estos coeficientes. A continuación se presentará la balanza aerodinámica, el proceso de puesta a punto de la técnica de medición y su calibración, para luego exponer el procedimiento de toma de datos y las curvas de desempeño obtenidas. Los resultados, exitosos en la reproducción de las curvas de desempeño aerodinámico de la bibliografía (Abbot, 1958), permiten anticipar resultados válidos para su uso en el modelo numérico de predicción de niveles de presión sonora cuando se trabaje con réplicas a escala de los perfiles de interés.

### 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Túnel de viento

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

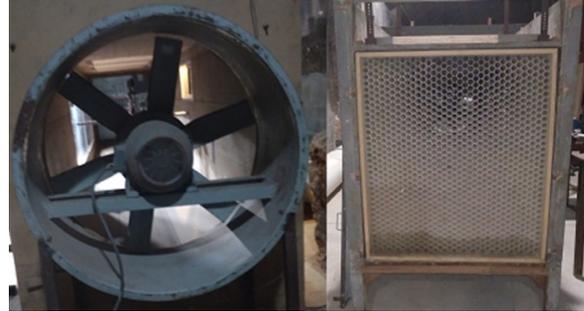


Figura 1. Ventilador (izquierda) y enderezador de flujo (derecha).



Figura 2. Cámara de ensayos.

#### 3.2 Equipo de medición

La balanza es externa a la cámara de ensayos. El contacto entre ésta y el túnel de viento se evita, ya que la balanza se apoya en el suelo, a través de soportes laterales independientes del túnel. Con esto se previenen posibles interferencias en la salida de datos.

Cada soporte incluye el apoyo de una varilla que atraviesa el álabe por su centro de masa, lo que permite que se apoye sobre los soportes pero evitando el contacto con el túnel. Además, cada soporte cuenta con un sistema de celdas de carga que permite realizar la medición y apoyar el sistema en el suelo a través de un pie.

En la figura 3, se presenta un detalle y una fotografía de los componentes de uno de los soportes. Los soportes se componen de dos celdas de carga, que permiten medir la componente vertical de fuerza. Las dos celdas verticales se apoyan simultáneamente sobre un brazo con libertad de giro en el plano de la figura 3. Sobre el mismo brazo se encuentra una tercera celda, que permite medir fuerzas de dirección horizontal.

En la figura 4 se esquematizan tanto el estado de cargas que permite describir la balanza, como las magnitudes que se miden.

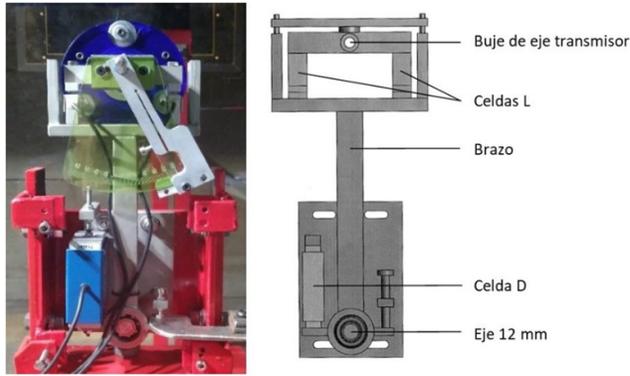


Figura 3. Brazo y celdas de carga adjuntas.

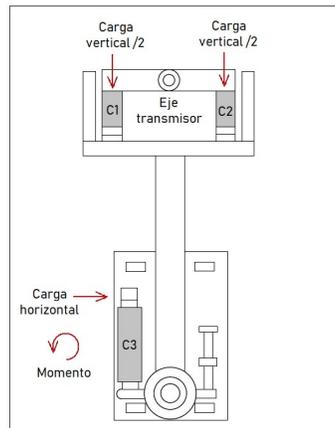


Figura 4. Estados de carga de un lado de la balanza.

La medición de las fuerzas sobre cada celda se ejecuta realizando un muestreo digital de la salida de datos de cada una, utilizando un sistema National Instruments modelo SCXI1000 que posee una resolución de 1.526  $\mu\text{V}$ , estando compuesto por un módulo de conexión modelo SCXI1314, un sistema de adquisición modelo SCXI1600 (16 bits) y un acondicionador de señal modelo SCXI1520 de 8 canales. La señal recibida es enviada a una computadora donde es procesada con un programa realizado con LabWindowsCVI.

#### 4. PROCESO DE CALIBRACIÓN

El proceso de calibración consiste en someter el eje del álabe a distintas configuraciones de carga conocidas, dentro de los rangos en los que se busca trabajar, esto es entre 35 y 350 gramos para la fuerza de arrastre y cargas de entre 100 g y 1500 g para la sustentación. Las cargas se producen mediante una balanza y pesas previamente calibradas, sometiendo el eje a una serie de esfuerzos puramente horizontales, puramente verticales y a una serie de momentos

acompañados de un esfuerzo vertical. En la figura 5 se presenta un esquema de la balanza de calibración.

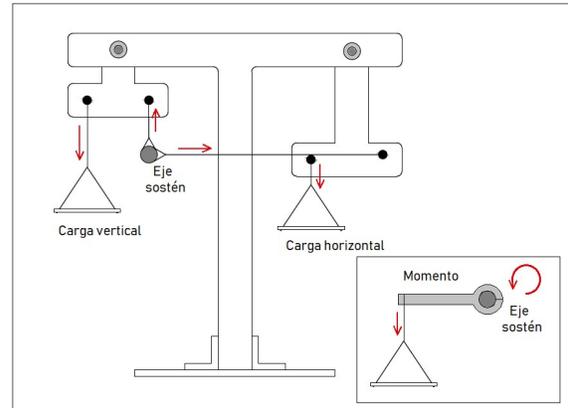


Figura 5. Balanza de calibración.

Se parte de la hipótesis de que la respuesta de la balanza es tal que cada componente del estado de carga (horizontal, vertical y momento de torsión) se puede escribir como una combinación lineal de las indicaciones de cada una de las seis celdas de carga (tres por lado). La ecuación 3 muestra un ejemplo del cálculo de la componente horizontal de esfuerzo sobre la barra  $F_x$ .

$$F_x = C_{x0} + C_{x1} \cdot I_1 + C_{x2} \cdot I_2 + C_{x3} \cdot I_3 + C_{x4} \cdot I_4 + C_{x5} \cdot I_5 + C_{x6} \cdot I_6 \quad (3)$$

Siendo  $C_{xi}$  el coeficiente de la curva de calibración correspondiente a la celda  $i$  para calcular la componente horizontal del esfuerzo sobre la barra e  $I_i$  la indicación de la celda  $i$ .

El caso análogo para la componente vertical se presenta en la ecuación 4.

$$F_y = C_{y0} + C_{y1} \cdot I_1 + C_{y2} \cdot I_2 + C_{y3} \cdot I_3 + C_{y4} \cdot I_4 + C_{y5} \cdot I_5 + C_{y6} \cdot I_6 \quad (4)$$

Siendo  $C_{yi}$  el coeficiente de la curva de calibración correspondiente a la celda  $i$  para calcular la componente vertical del esfuerzo sobre la barra.

Durante el proceso de calibración se ensayaron diferentes estados de carga: una carga vertical pura tomando valores desde 100 g hasta 1500 g con saltos de 100 g, una carga horizontal pura en un rango de valores de 35 g a 350 g con saltos de 35 g, y una carga para momento en un rango de 50 g a 500 g con saltos de 30 g. Utilizando toda esta información se

determinaron los coeficientes que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de la curva de calibración

Coeficiente de la fórmula	Dirección horizontal	Dirección vertical	Momento
$C_0$	-0,30	-1,76	19,63
$C_1$	-29,35	-0,34	-4,76
$C_2$	39,21	104,74	139,38
$C_3$	-38,38	100,37	1479,24
$C_4$	-3,41	0,51	52,82
$C_5$	-6,42	103,98	-1516,51
$C_6$	-2,96	102,35	-131,54

Una vez determinadas las curvas de calibración, se procedió a determinar el error asociado a la calibración. Obsérvese en la figura 6 un gráfico del error absoluto. Para calcularlo se toma, para cada estado de carga, la diferencia entre el valor de las pesas y el valor medido con el equipo.

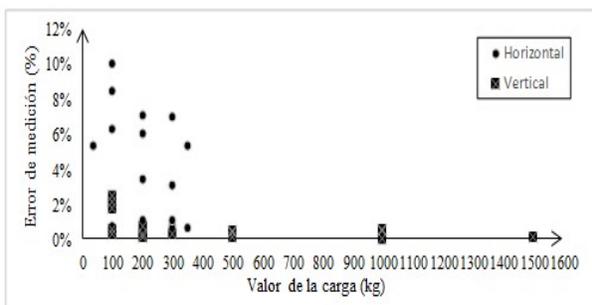


Figura 6. Error obtenido en la calibración.

## 5. PROCESO DE MEDICIÓN

El paso previo a cada prueba realizada con el dispositivo consta de una pequeña calibración que, como se observa en 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 adjudicado a cómo la barra se encuentra condenada al dispositivo de medición. Durante los ensayos se mide la temperatura en el interior de la zona de trabajo, valor con el cual se determinará la densidad del aire.

Una vez calibrado el momento se enciende el ventilador y se ajusta la velocidad de rotación para lograr la velocidad de viento en la que se desea trabajar, midiéndola con un tubo de Pitot conectado previamente al túnel de viento. Una vez estabilizado el valor de la velocidad, 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 y de la componente horizontal 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 calcular los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre,  $C_L$  y  $C_D$ , definidos según las ecuaciones 1 y 2.

Este proceso de medición fue realizado para un rango de velocidades de aproximación que va desde 2,0 m/s a 5,4 m/s, mientras que los ángulos de ataque estudiados fueron de  $-10^\circ$  hasta  $15^\circ$ . Con esta serie de datos fue posible construir el gráfico de la figura 8, que corresponde a una de las curvas de desempeño del perfil NACA 4415 ensayado (figura 7).

Cabe destacar el hecho de que los números de Reynolds con los que se trabajó en estos ensayos son significativamente menores (inferiores a  $2.9 \times 10^5$ ) a los Reynolds de trabajo de los ensayos realizados para obtener los datos bibliográficos (Abbott, 1958), que son superiores a  $3.0 \times 10^6$ .

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El perfil aerodinámico ensayado es un perfil estandarizado NACA 4415 cuyas dimensiones pueden encontrarse en Abbott, 1958.

En la figura 8 se presentan las curvas coeficiente de sustentación – ángulo de ataque obtenidas para la serie de velocidades analizadas. En la misma figura se presenta la forma de la misma curva obtenida por Abbott, 1958.

Se puede observar que, en general, el comportamiento del perfil coincide con el extraído de Abbott, 1958. A menores velocidades, las curvas se alejan de la curva teórica del NACA 4415, en especial para ángulos de ataque negativos. Para ángulos de

ataque positivos y valores de velocidad mayores a 4 m/s ( $Re=2.6 \times 10^5$ ) las curvas son de similar magnitud.

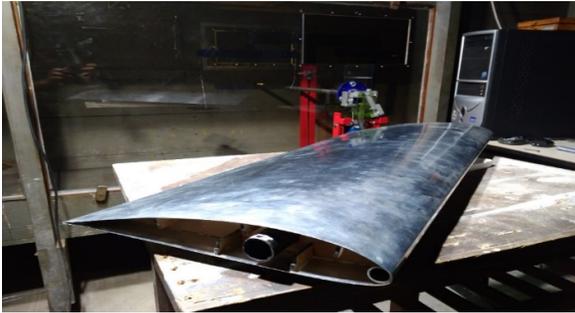


Figura 7: Modelo NACA 4415

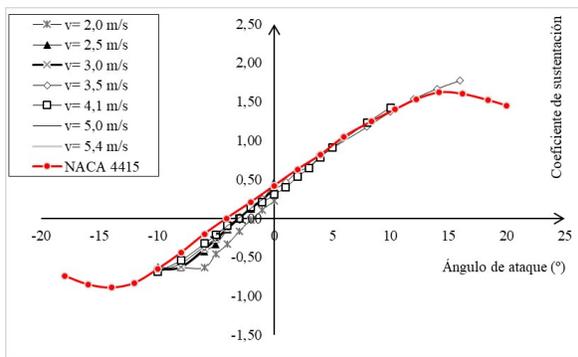


Figura 8. Curvas de desempeño determinadas en laboratorio y curva obtenida de bibliografía (NACA4415 tomada de Abbott, 1958).

En el caso de los ángulos negativos, la entrada en pérdida del perfil se da para un menor ángulo de ataque en la curva obtenida por Abbott que en las obtenidas en los ensayos ( $-12^\circ$  contra  $-8^\circ$ ). Para los ángulos positivos sucede lo contrario ya que, en los puntos ensayados, la entrada en pérdida se da para mayores ángulos de ataque que en la curva de Abbott. Además, todas las curvas presentan un comportamiento similar en cuanto a la pendiente del tramo recto; la diferencia entre la curva teórica y las curvas experimentales es relativamente reducida.

Por otra parte, en las curvas obtenidas experimentalmente, la entrada en pérdida se da aproximadamente en el mismo punto.

En el caso de la figura 9 se ve una clara separación de las curvas ensayadas con la curva teórica sobre los valores extremos de  $C_L$ . Esto es atribuible a la diferencia de un orden en el valor del Reynolds de trabajo empleado por Abbott (1958) y por los autores.

En la figura 9 se presenta la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre (segunda curva de desempeño).

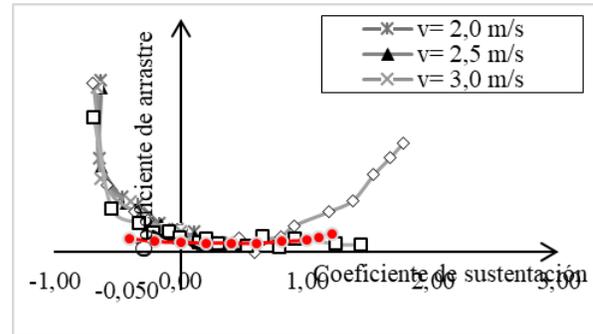


Figura 9. Relación  $C_L-C_D$  obtenida de bibliografía y determinada en laboratorio para distintas velocidades (tomada de Abbott, 1958)

## 7. 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. Los resultados obtenidos en la etapa de puesta a punto y calibración llevan a pensar que deben sustituirse los valores de  $C_D$  y  $C_L$  tomados de la bibliografía por valores experimentales a la hora de aplicarlos en el modelo numérico de predicción de niveles ambientales de presión sonora producidos por el funcionamiento de aerogeneradores de gran porte. Sin embargo, esto último solo podrá confirmarse al analizar los resultados de introducir estos nuevos coeficientes en el modelo predictivo.

## REFERENCIAS

- Abbott (1958). *Theory of wing sections*. Dover Publications, Nueva York
- 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>>.

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