



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INTERACCIÓN ENTRE AEROGENERADORES Y VIENTOS DE CAPA LÍMITE: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

Adrián R. Wittwer¹, Acir M. Loredou-Souza², Rodrigo Dorado², Gervásio Annes Degrazia³
Gisela Alvarez y Alvarez¹, Julián Medina¹, Franco Milich¹

¹ Laboratorio de Aerodinámica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo-e: a_wittwer@yahoo.es

² Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal de Rio Grande do Sul.

³ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

RESUMEN

La extracción de energía eólica utilizada para generar electricidad, se realiza empleando aerogeneradores dispuestos en parques eólicos. Desde la perspectiva de la aerodinámica de las palas, los aerogeneradores han sido bastante estudiados pero la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite atmosférica todavía no está totalmente analizada. La interacción entre el viento incidente y los aerogeneradores en un parque eólico provoca déficit de velocidad y aumento en los niveles de turbulencia en la estela de las turbinas eólicas.

En este trabajo, se describen las condiciones requeridas para la realización de experimentos en el túnel de viento con el fin de evaluar de parámetros característicos del flujo en parques eólicos considerando la influencia del tipo de terreno, de los aerogeneradores y su interacción con el viento incidente. Como hipótesis general se plantea que, a partir del análisis dimensional y los criterios de semejanza, es posible modelar los vientos de capa límite atmosférica, la influencia de la topografía local y las condiciones aerodinámicas de la turbina en movimiento. Se presentan los resultados de mediciones en la estela del modelo a escala 1:450 de un aerogenerador Unipower de 3 palas, de 100 m de altura de la torre, realizadas en el túnel de viento “Jacek Gorecki” de la UNNE.

La técnica de evaluación espectral de la turbulencia es aplicada a varias mediciones de las fluctuaciones de velocidad. Esto permite analizar la configuración espectral en diferentes rangos de frecuencia y las diferencias del comportamiento del viento incidente con relación al escurrimiento en la estela de la turbina. Finalmente, el estudio permite establecer conclusiones respecto a los parámetros usados para reproducir adecuadamente la interacción fluido-estructura, como así también, verificar la importancia de considerar los efectos topográficos en este tipo de ensayos.

Palabras Claves: Turbinas eólicas, túnel de viento, turbulencia.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica es un recurso renovable, limpio, de gran potencial que permite reducir las emisiones de gases contaminantes al reemplazar el uso de combustibles fósiles, utilizando la fuerza del viento para generar electricidad y empleando para ello aerogeneradores. En un generador aislado, la energía cinética extraída es la diferencia entre la energía cinética a barlovento y a sotavento del equipo, motivo por el cual resulta importante el estudio de la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite turbulenta de la atmosfera. Para optimizar la extracción de energía de acuerdo al potencial disponible es necesario un estudio exhaustivo de los fenómenos turbulentos asociados a este proceso.

En un parque eólico el escurrimiento turbulento es caracterizado por la múltiple superposición de estelas que provocan pérdidas de potencial; por lo cual la disposición de los aerogeneradores deberá ser tal que la estela de una turbina perturbe lo menos posible a otra que se encuentre a sotavento. Algunos trabajos muestran que aerogeneradores operando dentro de un parque pueden tener una pérdida en la potencia generada de hasta el 40%, si se compara con la turbina operando de manera aislada [1,2]. Para poder realizar el estudio de las características de la turbulencia se requiere del análisis de la superposición de estelas, los efectos de la capa límite y la topografía local bajo condiciones controladas. Este tipo de análisis puede ser realizado en un túnel de viento de capa límite utilizando modelos a escala reducida.

El trabajo está orientado al diseño y la realización de experimentos en el túnel de viento empleando modelos a escala reducida para la evaluación de parámetros característicos del flujo medio y de la turbulencia en la proximidad de aerogeneradores y su interacción con el flujo de capa límite incidente. Como hipótesis general se plantea que, a partir del análisis dimensional y las leyes de semejanza, es posible modelar los vientos de capa límite atmosférica, y las condiciones aerodinámicas de la turbina en movimiento. Se presentan los resultados preliminares obtenidos de un estudio experimental que incluye perfiles de velocidad media, intensidad de turbulencia y de las características espectrales de la turbulencia obtenidos en la estela de una turbina empleando un modelo en escala 1/450 de un aerogenerador UNIPOWER de 3 aspas.

2. CRITERIOS DE SEMEJANZA

Para lograr el modelado exacto del comportamiento del aerogenerador en el túnel de viento, se requiere semejanza geométrica, cinemática y dinámica. En general, para lograr un modelado confiable del fenómeno se requiere, en primer lugar, simular adecuadamente las características de



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

la capa límite atmosférica. Luego, se debe modelar el comportamiento de la turbina para lo que es necesario considerar criterios de semejanza que vinculan al aerogenerador con el viento incidente.

Simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento consiste en desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan dentro del túnel. La simulación aproximada del flujo, es representativa del viento natural para condiciones atmosféricas neutralmente estable y levemente inestable. Existen diferentes métodos que permiten reproducir las propiedades de la turbulencia representativas de la atmósfera real.

En este trabajo se emplea el método de Counihan [3] que emplea generadores de vorticidad en combinación con una barrera y elementos de rugosidad. La Figura 1 muestra los dispositivos de simulación de la capa límite atmosférica de estabilidad neutra en la sección de ensayos del túnel de viento. Las características del viento simulado corresponden a un perfil de la ley potencial con un exponente $\alpha = 0.27$ y altura gradiente $z_g = 1.20$ m.

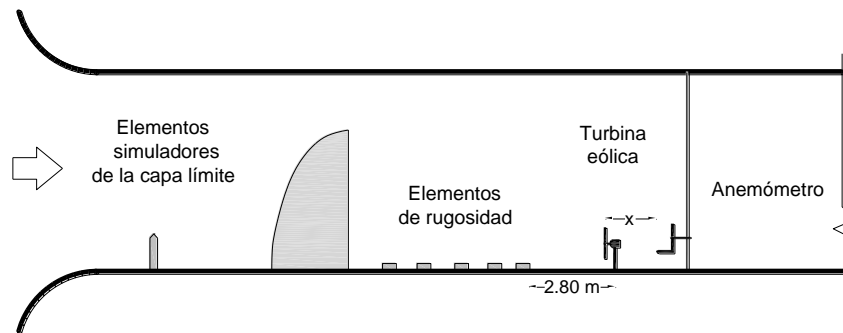


Figura 1: Disposición de los simuladores de la capa límite atmosférica y del modelo de la turbina.

Para el modelado exacto de los aerogeneradores, además de la semejanza geométrica, se requiere la igualdad en el modelo y prototipo de una serie de parámetros adimensionales que incluyen la relación de velocidades en el extremo de la pala (tip speed ratio), el número de Reynolds de la turbina, el coeficiente de empuje y el coeficiente de potencia, que garantizan la semejanza cinemática y dinámica [4]. En este trabajo no se desarrolló un modelo con semejanza completa, pero se tiene en cuenta la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala y la velocidad de corriente libre,

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (1)$$

y el número de Reynolds de la turbina,

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} \quad (2)$$



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

donde Ω es a velocidad angular del rotor, U la velocidad de la corriente libre, ν es la viscosidad cinemática del aire, R y D son el radio y el diámetro del rotor.

En este trabajo se empleó un modelo de turbina eólica de 0,33 m de altura total y con un rotor de 0,22 m de diámetro correspondiente a un aerogenerador UNIPOWER de tres palas montado en una torre de 100 m de altura y con un rotor de 100 m de diámetro (Figura 1). La escala geométrica empleada fue de 1/450 y el número de Reynolds, Re , de los ensayos fue de 1.63×10^5 . La velocidad de rotación de la turbina se mantuvo aproximadamente constante durante las mediciones y resulta importante aclarar que, como en estudios similares [5] no se puede garantizar la semejanza dinámica del fenómeno en el modelo reducido.

3. EQUIPAMIENTO Y MEDICIONES REALIZADAS

Las mediciones fueron realizadas en el túnel de viento de capa límite "Jacek Gorecki" de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, que es de circuito abierto, posee una longitud total de 39.65 m y la cámara de ensayos tiene 2.4 m de ancho \times 1.8 m de alto \times 22.8 m de largo (Figura 2). Posee dos mesas de ensayos giratorias de 1.2 m de diámetro, una al inicio de la cámara de ensayos y la otra al final. El accionamiento es producido por un ventilador axial de 2.25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW. La velocidad máxima en vacío dentro de la cámara de ensayos es de 25 m/s.



Figura 2: Túnel de viento Jacek Gorecki

Con el objeto de caracterizar el flujo turbulento antes y después de la turbina se midieron velocidades fluctuantes del viento empleando un anemómetro de hilo caliente montado en un sistema de posicionamiento remoto (Figura 3). Las series numéricas representativas de la velocidad fueron obtenidas con una frecuencia de muestreo de 1024 Hz durante 128 segundos. Antes de la adquisición de las series, un filtro electrónico pasa-bajos fue ajustado a 0.1 y 0.3 kHz. Las mediciones fueron realizadas para caracterizar el viento incidente, y después, en la estela del aerogenerador.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos descritos en la sección anterior. Las principales características de los puntos de medición (altura z , velocidad media U , desviación estándar de la fluctuaciones de velocidad σ_u) en los que fue realizado el análisis espectral son indicadas en la Tabla 1. También se indica la frecuencia de ajuste del filtro pasabajos (FPB). En primer lugar, se muestran los perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia y, luego, se presentan los espectros correspondientes a la componente longitudinal de las fluctuaciones de velocidad. Los perfiles se obtuvieron considerando 15 puntos de medición distribuidos entre $z = 10$ mm y $z = 640$ mm, mientras que para el análisis espectral se consideraron solo 7 puntos para viento incidente y 7 puntos para el caso de viento en la estela en la posición $x = 225$ mm.

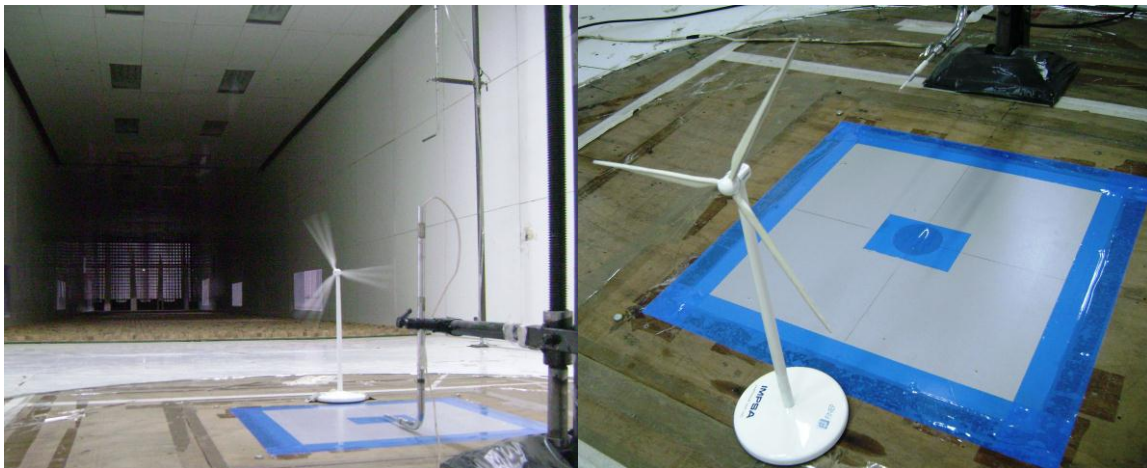


Figura 3: Turbina siendo ensayada en el túnel de viento

Tabla 1. Parámetros característicos das mediciones.

Viento incidente				Viento en la estela ($x=225$ mm)			
z [mm]	U [m/s]	σ_u [(m/s)]	FPB [Hz]	z [mm]	U [m/s]	σ_u [(m/s)]	FPB [Hz]
10	8.29	1.30	300	10	8.27	1.71	100
120	9.03	1.24	300	120	7.95	1.33	100
170	9.31	1.25	300	170	8.11	1.36	300
225	9.77	1.22	300	225	8.75	1.43	100/300
280	10.16	1.25	300	280	9.45	1.42	300
330	10.52	1.15	300	330	10.15	1.33	100
430	10.86	1.04	300	430	10.85	1.15	100



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

3.1. Perfiles verticales de velocidad media e intensidad de turbulencia

En la Figura 4 se indican los perfiles verticales de velocidad media adimensional U/U_{ref} y de intensidad de turbulencia normalizada u_{rms}/U_{ref} para el viento incidente y en la estela generada por el aerogenerador. Se incluyen los perfiles medidos en dos posiciones a sotavento del plano determinado por las palas del rotor que corresponden a $x = 225$ mm y 1185 mm, y el perfil correspondiente al viento incidente cuyas características se aproximan al de la ley potencial con exponente 0.19. La altura de referencia es $z_{ref} = 540$ mm y fue definida en forma arbitraria, de forma tal que las variaciones de velocidad que se producen en la estela deben considerarse en relación a este parámetro de referencia. Los perfiles de velocidad media indican mayores disminuciones de velocidad media en la región que corresponde a la mitad inferior del rotor y, como se podía suponer, en la posición a sotavento más próxima al modelo ($x = 225$ mm). Para la otra posición ($x = 1185$ mm) es posible observar la tendencia a la reconstrucción del perfil original.

Con respecto a la distribución vertical de la intensidad de turbulencia, para el viento incidente se verifican valores aproximadamente constantes en la parte inferior de la capa límite simulada, hasta $z \approx 300$ mm, lo cual es acorde con valores experimentales para flujos de capa límite de este tipo. Los incrementos más visibles de u_{rms}/U_{ref} se verifican para el perfil ubicado en la posición más próxima al modelo ($x = 225$ mm), específicamente en los puntos de medición ubicados en la parte inferior y sobre el eje del rotor. En la ubicación más sotavento ($x = 1185$ mm) se observan valores aproximadamente constantes que indican una difusión vertical de las fluctuaciones que se producen en las proximidades del modelo. Al igual que en los perfiles de velocidad, la intensidad de turbulencia fue normalizada con la velocidad media en la altura $z_{ref} = 540$ mm, parámetro que debe ser considerado al analizar las variaciones de los valores fluctuantes entre los perfiles.

3.2. Evaluación de la resolución de los espectros de turbulencia

La función de densidad auto-espectral o espectro de potencia representa la variación en función de la frecuencia, del valor cuadrático medio de la fluctuación de velocidad en función del tiempo $u(t)$, proporcionada por una serie numérica continua adquirida con un intervalo de tiempo t , y queda expresada por:

$$S_u(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T u^2(f, B_e, t) dt \quad (3)$$

donde B_e es el ancho de banda (resolución del espectro), y T un tiempo de integración adecuado en función de las escalas de turbulencia. La integral de esta función permite obtener la varianza de la fluctuación de velocidad σ_u^2 .



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Para analizar los espectros en términos de su resolución en función de las frecuencias, son evaluados los espectros con relación al número de bloques, cantidad de valores por bloque y efecto de promediado, apenas en una posición ($z = 170$ mm). En la Figura 5, en base a una misma medición fueron obtenidos tres espectros en esta posición para el viento incidente, que aparecen superpuestos. El espectro identificado como “ $z = 170$ mm – baja” está orientado a describir las bajas frecuencias, fue obtenido utilizando 8 bloques de 16384 valores y presenta menor efecto de promediado. El segundo, “ $z = 170$ mm – media” obtenido a partir de 32 bloques de 4096 valores, permite describir las frecuencias intermedias y altas. Finalmente, utilizando 256 bloques de 512 valores, fue obtenido el espectro “ $z = 170$ mm – alta”, descriptivo de las altas frecuencias. De forma semejante fueron obtenidos los espectros correspondientes a la misma posición vertical ($z = 170$ mm) para el escurrimiento en la estela ($x = 225$ mm) presentados en la misma Figura 5 que son descriptivos de las frecuencias bajas, intermedias y altas, respectivamente.

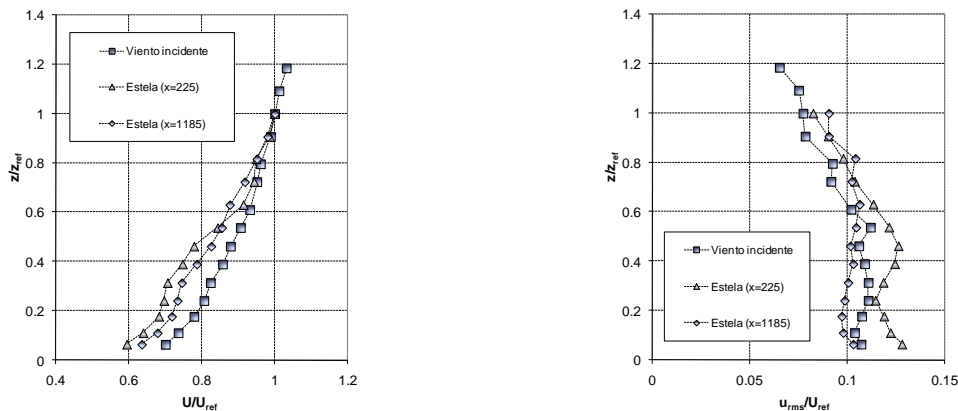


Figura 4: Perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia.

Esta evaluación se realiza para tener una impresión general del comportamiento espectral en todo el rango de frecuencias. Aumentando el número de bloques, disminuye la resolución en las bajas frecuencias, pero la media de los bloques permite visualizar mejor lo que ocurre en las frecuencias intermedias y altas. En particular, para las mediciones realizadas, permite determinar que la configuración de los espectros en las bajas frecuencias para el viento en la estela no presenta alteraciones significativas e, por lo tanto, el análisis comparativo será realizado solamente por los espectros descriptivos de las medias y altas frecuencias.

3.3. Evaluación de la configuración espectral y del efecto de filtrado

En la Figura 6, a la izquierda, se presentan los espectros para el viento incidente en 5 posiciones verticales, indicándose en forma complementaria la pendiente $-5/3$ que define la región inercial.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

En todos los casos la resolución espectral es definida a partir de una serie de 131072 valores dividida en 32 bloques de 4096. La señal analógica es filtrada mediante un pasa bajos a 300 Hz. Es posible verificar una gran similitud entre los espectros correspondientes a las posiciones $z = 120, 225, 330$ y 430 mm. Las pequeñas diferencias que se producen en el espectro restante ($z = 10$ mm) muy posiblemente se deben a la proximidad de piso que genera efectos localizados.

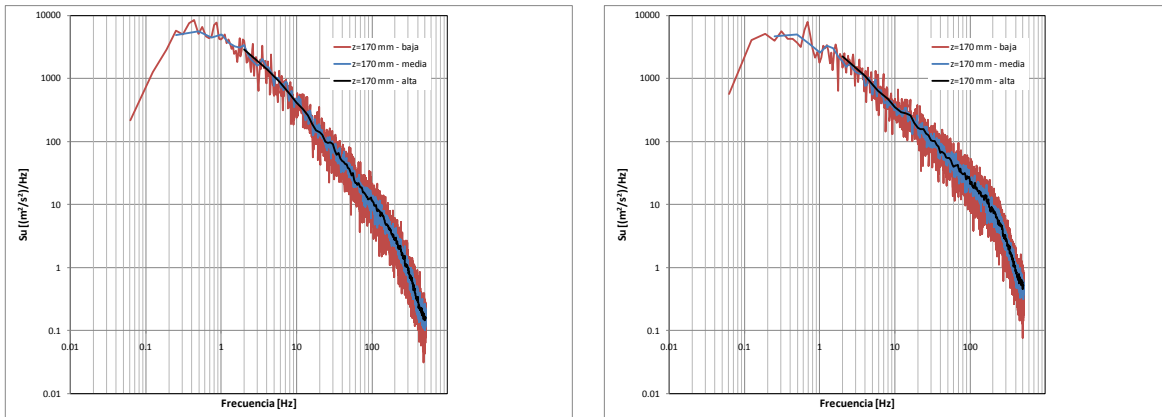


Figura 5: Espectro de viento incidente ($z = 170$ mm) y en la estela ($z = 170$ mm, $x = 225$ mm).

De igual forma, en la Figura 6, a la derecha, se presentan los espectros S_u para el viento en la estela ($x = 225$ mm) en las mismas posiciones verticales, indicándose también la pendiente $-5/3$. La resolución espectral es definida de la misma manera, pero en este caso la señal analógica es filtrada a 100 Hz. Es posible verificar mayores diferencias entre los espectros que en el caso anterior, e inclusive para las frecuencias medias y altas establecer comportamientos diferentes en las posiciones inferiores a $z = 225$ mm y las dos posiciones superiores.

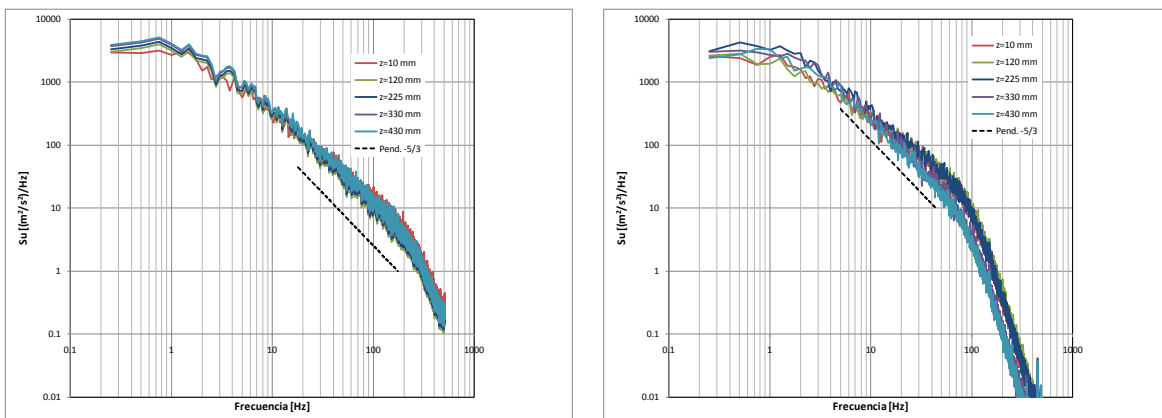


Figura 6: Espectro de viento incidente con filtrado a 300 Hz y en la estela con filtrado a 100 Hz.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Los efectos del filtrado analógico de la señal anemométrica en distintas frecuencias en cada situación se pueden percibir claramente. Asimismo, los efectos del modelo del aerogenerador generan modificaciones de la configuración espectral que varían de acuerdo a la posición vertical analizada. Para evaluar estos efectos, a continuación se realiza un análisis comparativo de los espectros de viento incidente y de los obtenidos en la estela del modelo.

3.4. Comparación de las características espectrales del viento incidente y en la estela.

Finalmente, se realiza una comparación de los espectros obtenidos para el viento incidente y en la estela de la turbina. Para una mejor visualización de las diferencias, en este análisis se utiliza una resolución espectral a partir de 256 bloques que mejoran el efecto de promediado. En la Figura 7, a la izquierda, los espectros correspondientes a la posición $z = 170$ mm muestran algunas diferencias en las frecuencias más bajas y, a partir de los 15 Hz, la separación del espectro en la estela con relación a la clara definición de la región inercial (pendiente $-5/3$) en el espectro del viento incidente. El efecto es previsible a partir de la turbulencia adicional producida por la turbina. Entre 200 y 300 Hz, se percibe nítidamente el efecto del filtro pasa-bajos. En la posición $z = 280$ mm, la separación de los espectros es menor que en la posición anterior (Figura 7, derecha).

En todas las posiciones se observó un aumento de la intensidad de las fluctuaciones en la estela con relación al escurrimiento incidente, no obstante en la posición $z = 280$ mm el incremento es mayor (del orden del 6 %). La representación bi-logarítmica de los espectros no permite visualizar este comportamiento, pero es muy posible que ese incremento de energía de las fluctuaciones quede concentrado en las frecuencias menores.

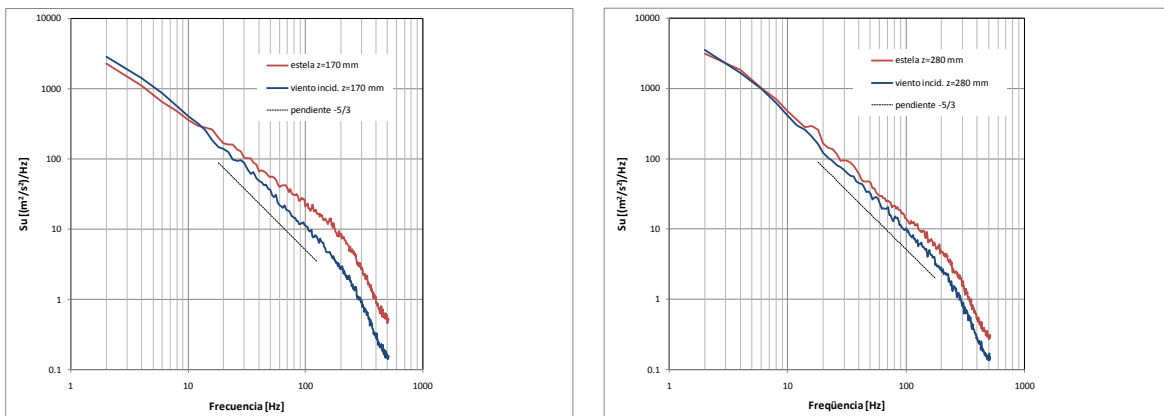


Figura 7: Comparación espectral del viento incidente y en la estela - $z = 170$ mm (izquierda) - $z = 280$ mm (derecha).



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

3.5. Análisis de los resultados.

La evaluación de los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia en la estela está restringida a dos posiciones a sotavento del rotor pero igualmente permite observar zonas de disminución de velocidad media y aumento de turbulencia, así como la reconfiguración de las características del viento en la posición más a sotavento.

El análisis de la resolución espectral, permite definir la cantidad de valores de la serie numérica y el número de bloques que se adecue al rango de frecuencias requerido para este tipo de análisis. Asimismo, la variación de la frecuencia del filtrado analógico pasa-bajo permite determinar qué valores son más adecuados para este tipo de fenómeno. No obstante, pueden requerirse modificaciones en función de las variaciones de velocidad del viento medio y del giro del rotor.

Finalmente, la comparación de los espectros característicos del viento incidente y de los obtenidos en la estela permiten observar las modificaciones en la distribución de energía de las fluctuaciones producto de la turbulencia introducida por el generador eólico. No obstante, el análisis se restringe a una posición a sotavento del rotor ($x = 225$ mm) y algunos puntos de medición en dirección vertical. Por otro lado, es importante señalar nuevamente que la velocidad media del viento y del rotor se mantuvieron aproximadamente constantes en todos los ensayos, por lo que a continuación, deberá evaluarse como influye la variación de estos parámetros en las características del flujo en la estela.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la técnica de análisis espectral de la componente longitudinal de turbulencia en modelos a escala reducida de aerogeneradores en túnel de viento. En primer lugar se analizan los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia del viento incidente y del viento en la estela del modelo. Una serie de mediciones preliminares permite el análisis de la configuración de los espectros en los diferentes rangos de frecuencia, el efecto de filtrado analógico de la señal, y las diferencias en el comportamiento espectral del viento incidente con respecto al escurrimiento en la estela de la turbina. Los resultados obtenidos, además del análisis de las modificaciones de las características espectrales del escurrimiento, permiten definir la resolución y el ajuste del filtrado para poder realizar una evaluación espectral adecuada a este tipo de fenómeno. A continuación, serán evaluadas las funciones de autocorrelación de las fluctuaciones de velocidad y serán desarrollados nuevos ensayos en que los valores de la relación adimensional de velocidades permitan garantizar la semejanza del fenómeno, a partir del control de velocidad del generador eólico.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnológicas
Santiago del Estero - República Argentina

5. REFERENCIAS

- [1] Crespo, A., Hernandez, J., Frandsen, S. Survey of Modelling Methods for Wind Turbine Wakes and Wind Farms, *Wind Energy*, 2, 1-24, 1999.
- [2] Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Højstrup, J., Nielsen, P., Thøgersen, M. Analytical modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms, *EWEC 2004*, November 22-25, London, UK, 2004.
- [3] Counihan, J. "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel", *Atmospheric Environment*, 3, 197-214, 1969.
- [4] Neff, D., Meroney, R., McCarthy, E., Davis, E. "Upstream and Lateral Wind Turbine Wake Effects on Nearby Wind Turbine Performance" *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*. 36, pp. 1405 -1414, 1990.
- [5] Cal, R. B., Lebrón, J., Castillo, L., Kang, H., Meneveau, C., Experimental study of the horizontally averaged flow structure in a model wind-turbine array boundary layer, *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, 2, 013106, 2010.