

## **DESARROLLO DE MODELOS A ESCALA REDUCIDA PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AEROGENERADORES**

**F. Milich<sup>1</sup>, M. Chuairé<sup>2</sup>, A. Wittwer<sup>3</sup>, G. Alvarez y Alvarez<sup>4</sup>, C. Veroli<sup>5</sup>, J. Basterra<sup>6</sup>, M. Adotti<sup>7</sup>**  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, C.P. 3500 – Resistencia, Chaco.  
Tel. 0362-4439039 – e-mail: francmilich@hotmail.com

*Recibido 29/07/17, aceptado 26/09/17*

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo general el estudio del funcionamiento de aerogeneradores y la interacción que provoca su disposición en parques eólicos. En esta etapa preliminar, se presentan los pasos desarrollados hasta el momento incluyendo la construcción del modelo, la verificación estructural de las palas, el cálculo teórico del torque y la evaluación experimental del dispositivo de generación. Si bien el trabajo es de carácter experimental, se presentan algunas simulaciones computacionales cuyos resultados permiten una primera aproximación al fenómeno. Resulta fundamental destacar la importancia de este tipo de desarrollo con el objeto de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero y el daño ambiental que ocasionan.

**Palabras clave:** estela aerodinámica, modelo a escala, aerogenerador, Perfil NACA 4412.

### **INTRODUCCION**

La energía eólica es una fuente de energía renovable y limpia, que ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar fuentes de energía a base de combustibles fósiles. Se obtiene a partir del desplazamiento del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas.

La fuerza del viento ha sido aprovechada desde la antigüedad para la navegación de barcos a vela, para la molienda de granos y para el bombeo de agua mediante molinos de vientos. Actualmente, siguen realizándose dichos tipos de aprovechamiento, a los que se agregó la producción de energía eléctrica mediante los aerogeneradores.

Para un generador aislado, la energía cinética extraída es la diferencia entre los flujos de energía cinética a barlovento y a sotavento del equipo. Durante los últimos años los aerogeneradores han sido bastante estudiados, pero la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite turbulenta de la atmosfera todavía no está totalmente entendida. Para maximizar la extracción de energía de acuerdo al potencial disponible es necesario aumentar el nivel de comprensión de los fenómenos asociados. Si bien se han realizado interesantes estudios relacionados con esta problemática, todavía no han sido lo suficientemente detallados como para poder establecer el balance total de energía cinética y de los flujos asociados en torno a un aerogenerador que opera en conjunto con otros dentro de un parque eólico.

A partir de estas consideraciones, se comenzó a desarrollar un modelo de aerogenerador a escala reducida para evaluar su comportamiento experimentalmente mediante ensayos en el túnel de viento de capa límite de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE).

<sup>1</sup> Estudiante avanzado de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

<sup>2</sup> Estudiante avanzado de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

<sup>3</sup> Dr. Investigador Facultad de Ingeniería, UNNE.

<sup>4</sup> Mg. Investigador Facultad de Ingeniería, UNNE.

<sup>5</sup> Profesor Facultad de Ingeniería, UNNE.

<sup>6</sup> Profesor Facultad de Ingeniería, UNNE.

<sup>7</sup> CPA IMIT CONICET.

Además de la fundamentación general relacionada al mejoramiento de la evaluación aerodinámica de parques eólicos, este trabajo específicamente pretende establecer conclusiones sobre los criterios de semejanza vinculados a los modelos a escala de este tipo de fenómeno.

Como objetivo general de la investigación se planteó la evaluación experimental de aerogeneradores incluyendo el análisis de la estela aerodinámica y los dispositivos de control de velocidad como así también la generación de energía eléctrica, utilizando el modelo a escala reducida en un túnel de viento. Existen algunos antecedentes de trabajos realizados con modelos a escala reducida (Bartl, 2011, Wittwer et al., 2016), sin embargo, están dirigidos al análisis de las características de la estela turbulenta que producen los modelos. En este caso, se evaluará el comportamiento aerodinámico del modelo sometido a diferentes condiciones de viento incidente y se analizará el sistema de control de velocidad de rotación del aerogenerador, incluyendo la posibilidad de estimar el rendimiento energético en diferentes condiciones de trabajo.

En este trabajo se presenta el diseño del modelo en base a los criterios de semejanza habitualmente usados en estudios modelo-prototipo y la construcción parcial de la turbina con la técnica de impresión 3D y mediante ensayos se determinó el motor de corriente continua que se utilizará como generador. Además, se analiza el diseño estructural evaluando los esfuerzos a los que estarían sometidas las aspas y las distintas piezas que conforman al mecanismo de anclaje y de transmisión de los movimientos del aerogenerador empleando dos alternativas de materiales poliméricos, poliácido láctico (PLA) y butadieno estireno (ABS), optándose por el PLA, debido a sus propiedades y características físico-mecánica. En cuanto a la selección del material para el eje del rotor y la torre del aerogenerador se optó por barras de aluminio por su bajo peso y resistencia a los esfuerzos generados en los mismos.

## **DISEÑO DEL MODELO**

El modelo desarrollado se diseñó en base a los criterios de semejanza habitualmente usados en estudios modelo-prototipo. Con relación al escurrimiento incidente, se utilizan condiciones de flujo uniforme con variación de la intensidad de turbulencia y flujos de capa límite. Siendo que con los modelos a escala se prevén realizar estudios modelo-prototipo, los criterios de semejanza permitirán trasladar los resultados a situaciones reales y realizar comparaciones de fenómenos a distintas escalas.

Uno de los desafíos de este tipo de estudio experimental es conseguir la semejanza modelo-prototipo. El número de Reynolds, definido con relación a la velocidad media en los ensayos y el diámetro del generador debe alcanzar valores lo suficientemente elevados los efectos turbulentos se reproduzcan en la estela (Cal et al., 2010). Por otro lado, la velocidad de rotación de la turbina debería mantenerse en valores tales que la relación adimensional de velocidades  $\lambda$  garantice la semejanza del fenómeno y se puedan evaluar las fuerzas de arrastre y el torque producido en el modelo reducido.

## **DISEÑO DE LAS PALAS**

En lo que respecta a la elección del perfil para nuestro rotor, se optó por aquellos de mayor eficiencia aerodinámica ( $Cl/Cd$ ), siendo  $Cl$  el coeficiente de sustentación y  $Cd$  el coeficiente de arrastre. Se seleccionó que modelo que cumpla las siguientes condiciones; que el aumento del  $Cl$  hasta su valor máximo sea paulatino y que no rompa abruptamente al incrementarse el ángulo de ataque, que alcance una situación de compromiso entre la máxima área transversal necesaria para un óptimo rendimiento aerodinámico y la mínima que soporte los esfuerzos a los que está sometida la pala, y finalmente, que presente simplicidad de fabricación de la pala.

Teniendo en cuenta lo antedicho, el perfil aerodinámico más recomendado para este caso es el NACA 4412. De acuerdo a la definición NACA, el primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (4% c), el segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda, (40%). Finalmente, los dos últimos dígitos describen el máximo espesor en porcentaje de la cuerda, (12%).

Con el fin de optimizar el rendimiento del aerogenerador, el ángulo de paso se determina como una función del radio de la pala de modo que a mayor distancia del centro de rotación, mayor es la componente de velocidad paralela al plano de rotación.

La geometría ideal de la pala está construida en base a la teoría Schmitz, que ha desarrollado un modelo detallado y sofisticado del flujo en el plano del rotor, que permite determinar la longitud de la cuerda ( $c$ ) y el ángulo de paso ( $\beta$ ) teniendo en cuenta los parámetros tales como; la relación de velocidad específica o periférica (TSR) Tip-Speed-Ratio, el número de palas ( $B$ ), el radio de la pala ( $r$ ), el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) y el coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico elegido ( $Cl$ ) (Gundtoft, 2009). Empleándose las ecuaciones (1) y (2) se calcularon el ángulo de paso y la longitud de cuerda.

$$\beta(r) = \frac{2}{3} \arctg\left(\frac{R}{TSR}\right) - \alpha \quad (1)$$

$$c(r) = \frac{1}{B} \frac{16 \pi r}{Cl} \left( \frac{1}{3} \arctg\left(\frac{R}{TSR}\right) \right) \quad (2)$$

El modelo adoptado cuenta con 3 aspas y la longitud de las mismas es de 297 mm, el ángulo de paso es de  $25^\circ$  y la cuerda al comienzo del aspa es de 76 mm. A partir de estos datos y empleando el programa Airfoil Tools se obtuvo el perfil alar para el aerogenerador (Figura 1) y una vez obtenidos los distintos tamaños de perfiles, se diseñó la hélice en el programa de diseño SolidWorks (Figura 2)

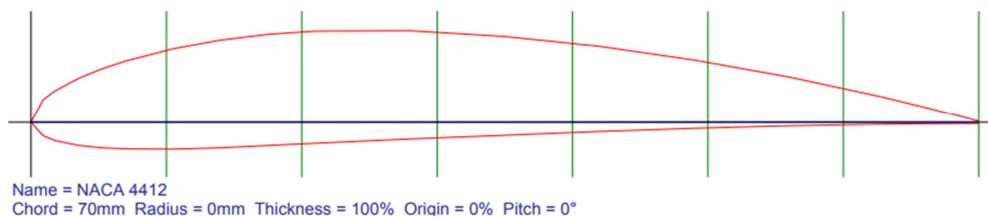


Figura 1: Perfil Alar obtenido empleando el programa Airfoil Tools

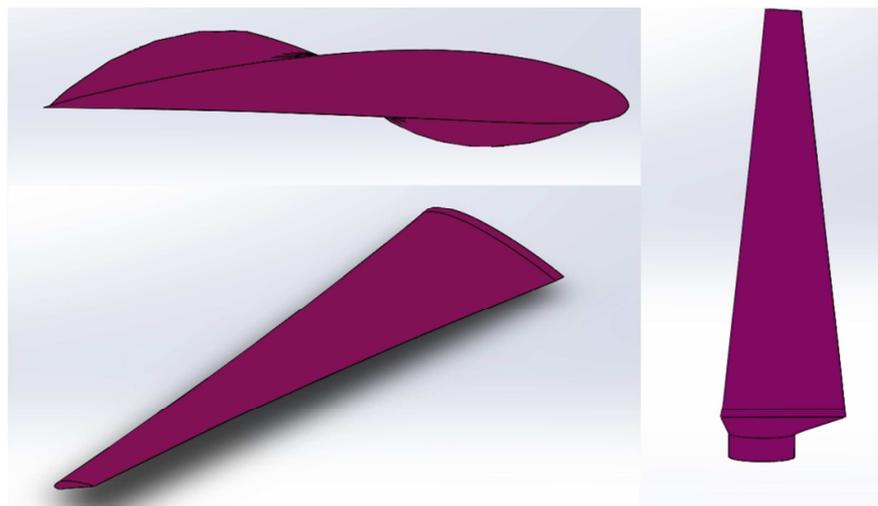


Figura 2: Vistas de la pala diseñada

## CONSTRUCCIÓN DE LAS PALAS

Una vez obtenidas las dimensiones de las palas, se trabajó en el diseño estructural evaluando los esfuerzos a los que estarían sometidas las aspas empleando dos alternativas de materiales poliméricos para su construcción en una impresora 3D (Fig. 3). Los polímeros empleados fueron poliacido láctico (PLA) y butadieno estireno (ABS), y se verificaron las cargas considerando las propiedades de cada uno de los materiales mencionados. En base a estas verificaciones, se optó por construir las aspas de la turbina y los mecanismos de anclaje y de transmisión de los movimientos con poliacido

láctico (PLA). Para la construcción se utilizó la impresora 3D CODEX 2020 de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, que se muestra en la Figura 3 junto con el modelo impreso de la pala. En la Figura 4 se presentan otras piezas impresas complementarias, necesarias el armado del aerogenerador.



*Figura 3: Impresora 3D de la Facultad de ingeniería y palas del modelo impresas.*



*Figura 4: Piezas impresas en la impresora 3D.*

## **MODELO DEL DISPOSITIVO DE GENERACIÓN**

La turbina estará adosada a un dispositivo de generación que permitirá evaluar la potencia que produce el rotor y controlar la velocidad de giro.

Para el generador se optó por el uso de un motor de corriente continua, el cual puede ser usado tanto como motor o como generador. Este tipo de motor cuenta con un imán permanente en el rotor que actúa como inductor del campo magnético, en el estator se encuentra el bobinado del cual se extrae la tensión de generación alterna. Dicha tensión se rectifica mediante dos puentes rectificadores (Fig. 5).

La tensión se medirá mediante un divisor de tensión y la corriente se determinará con un sensor ACS 712, ambas lecturas serán registradas y analizadas mediante una placa Arduino, la cual permitirá leer los valores respectivos y calcular la potencia. Así también, mediante esta placa se medirán las revoluciones por minuto a las que gira el aerogenerador y se controlará el mecanismo de posicionamiento de las palas. La potencia estimada que entregaría el aerogenerador es de 30 W, por lo cual se buscaron motores en ese rango de trabajo.



Siendo  $\rho$  la densidad del aire en  $[\text{kg/m}^3]$ ,  $w$  la velocidad relativa  $[\text{m/seg}]$ ,  $c$  cuerda del perfil en  $[\text{m}]$ ,  $r$  radio donde se analiza  $[\text{m}]$ . Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2.

Puntos	Velocidad Incidente Viento (m/s)	Velocidad Angular Aerogenerador		Fuerza del aspa completa (N)	Tensión en tornillos 3 mm (Mpa)	Fuerza del aspa completa + plato (N)	Tensión en tornillos 4 mm (Mpa)	Fuerza del aspa parte Superior (N)	Tensión en Unión del Aspa (MPa)
		$\omega$ (rad/s)	$\omega$ (rpm)						
1	4	67,23	641,97	34,2	3,66	42,28	5,19	28,01	0,06
2	4,5	75,63	722,21	43,2	4,63	53,52	6,57	35,45	0,07
3	5	84,03	802,46	53,4	5,71	66,07	8,12	43,76	0,09
4	5,5	92,44	882,71	64,6	6,91	79,94	9,82	52,95	0,11
5	6	100,84	962,95	76,8	8,23	95,14	11,69	63,01	0,13
6	6,5	109,24	1043,20	90,2	9,66	111,66	13,72	73,95	0,15
7	7	117,65	1123,44	104,6	11,20	129,50	15,91	85,77	0,18
8	7,5	126,05	1203,69	120,1	12,85	148,66	18,26	98,46	0,20

Tabla 1: Esfuerzos axiales en diferentes puntos de la hélice.

Velocidad Incidente [m/s]	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 14^\circ$	$\alpha = 5^\circ$ $\beta = 14^\circ$	$\alpha = 10^\circ$ $\beta = 14^\circ$	$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 14^\circ$
	U [Nm]	U [Nm]	U [Nm]	U [Nm]
2,00	0,006	0,018	0,031	0,041
2,50	0,010	0,028	0,049	0,064
3,00	0,014	0,040	0,071	0,091
3,50	0,019	0,055	0,096	0,125
4,00	0,025	0,071	0,126	0,163
4,50	0,032	0,090	0,159	0,206
5,00	0,039	0,111	0,197	0,254
5,50	0,047	0,135	0,238	0,308
6,00	0,056	0,160	0,283	0,366

Tabla 2: Torque U para diferentes velocidades de viento incidentes y ángulos de ataques del perfil.

Los valores permitirán determinar la potencia generada y de esta forma comparar los valores experimentales con estos cálculos teóricos. También podrá verificarse la potencia estimada con este procedimiento en relación a la potencia teórica obtenido mediante la expresión de Betz.

## MODELADO COMPUTACIONAL

Para realizar una estimación preliminar del comportamiento del modelo se realizaron simulaciones empleando el programa SolidWorks Flow Simulation. El empleo de esta técnica permitió efectuar un análisis del flujo en torno al modelo, determinar el efecto de las fuerzas de sustentación y de arrastre sobre el perfil alar y, a partir de esta evaluación, obtener el torque que se produce en el mismo a través del procedimiento anterior.

Como hipótesis se consideró un flujo de aire incidente uniforme y como condiciones de borde se definieron; una velocidad a la entrada del volumen de control del modelo, una presión igual a la presión atmosférica a la salida y condiciones de pared en las caras laterales del volumen (Fig. 6). Para analizar la interacción del modelo con el viento, se generó una región rotativa en el sector de las aspas, lo cual puede observarse en las vistas frontal y lateral de la Figura 7.

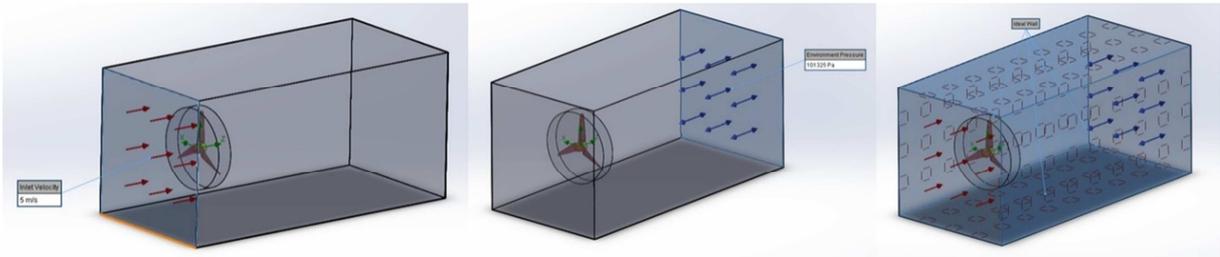


Figura 6. Condiciones de borde aplicadas al volumen de control.

Para realizar el mallado se empleó el mallador automático del programa Solid Works Flow Simulation. El programa estima un tamaño de elemento global para el modelo considerando su volumen, el área de superficie y otros detalles geométricos. El tamaño de la malla generada, cantidad de nodos y elementos, depende de la geometría y las cotas del modelo, así como de las especificaciones de tamaño de elementos, tolerancia de malla, control de malla y contacto.

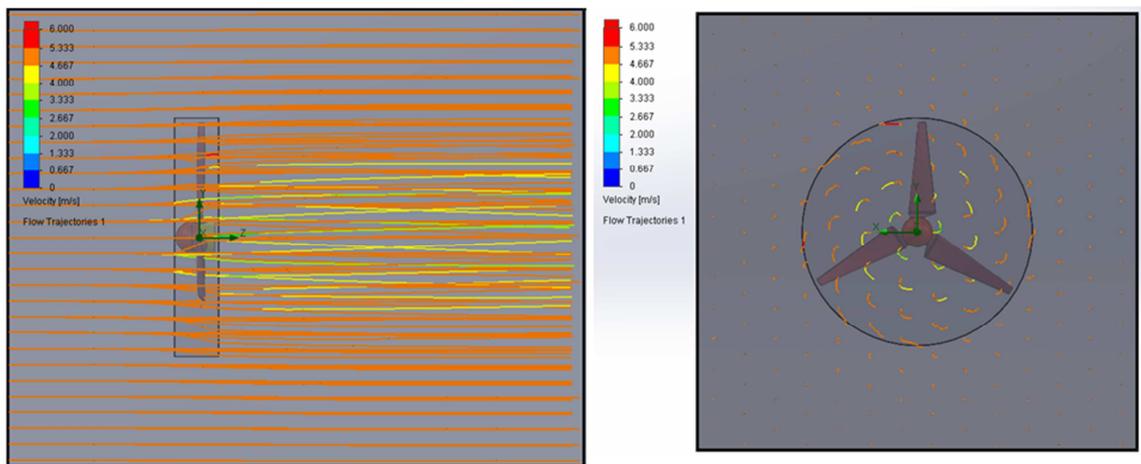


Figura 7. Análisis de la interacción del modelo con el viento empleando una región rotativa.

En la Figura 8 se observan los vectores de velocidades en el plano medio del aerogenerador.

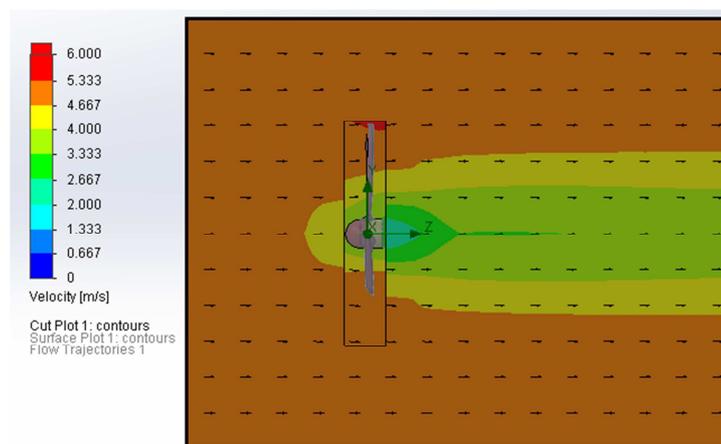


Figura 8: Contorno y vectores de velocidades en el plano medio del aerogenerador

La Figura 9 muestra cómo se modifican las líneas de corriente al pasar por el perfil dispuesto con un ángulo de ataque  $\alpha=0^\circ$ . En la Figura 10 se ve la interacción del viento con el perfil para un ángulo de ataque  $\alpha=0^\circ$  y la velocidad que adquiere el fluido en las regiones próximas.

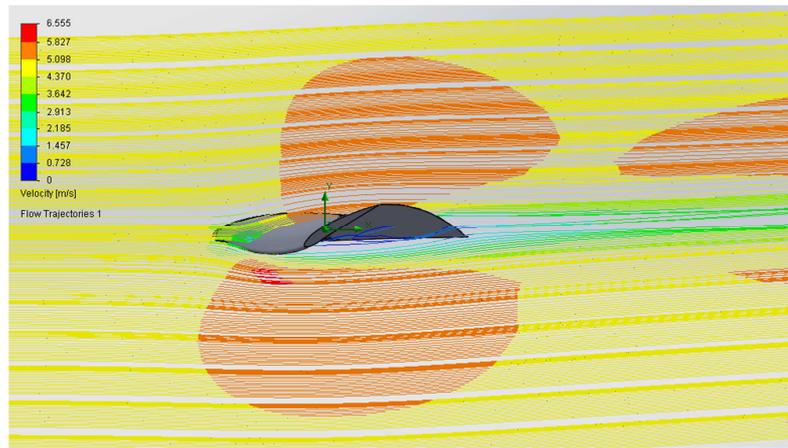


Figura 9: Líneas de corriente para un ángulo de ataque  $\alpha=0^\circ$ .

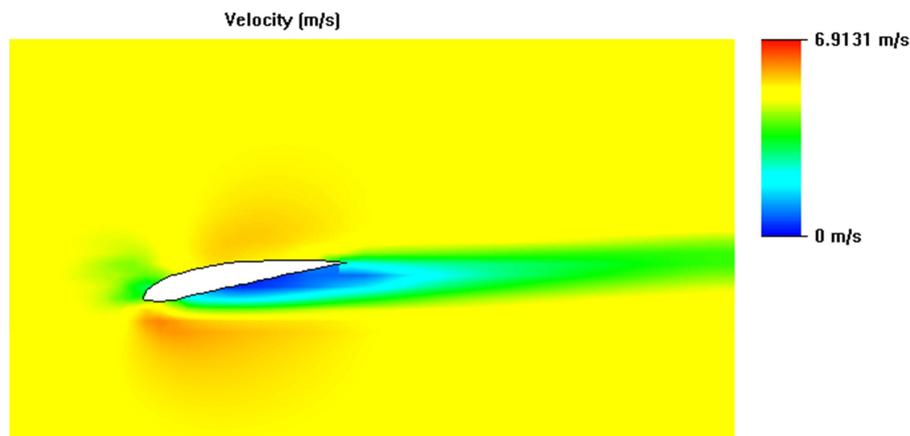


Figura 10: Interacción del viento con el perfil para un ángulo de ataque  $\alpha=0^\circ$ .

## ENSAYOS EN EL TÚNEL DE VIENTO

Como próximo paso, el modelo a escala reducida del aerogenerador se ensayará en el túnel de viento de capa límite de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Este túnel posee una cámara de ensayos de 2,4 m de ancho por 1,8 m de alto y 22,4 m de longitud. En primer término, se analizarán las características del viento incidente para las distintas condiciones previstas que incluyen flujo uniforme y flujo turbulento de capa límite. Las velocidades fluctuantes del viento serán medidas empleando un anemómetro de hilo caliente montado en un sistema de posicionamiento remoto (Wittwer et al., 2016). Este mismo sistema de medición permitirá analizar la configuración de la estela aerodinámica, las regiones de alta turbulencia y la extensión requerida para la “reconstrucción” del flujo incidente.

Finalmente, el generador eléctrico, a través de la medición de potencia de salida, permitirá analizar el funcionamiento y la performance del conjunto a distintas velocidades, la comparación con las estimaciones teóricas y el rendimiento aerodinámico del dispositivo.

## CONCLUSIONES

El desarrollo que tiene actualmente la generación eólica ha provocado que los aerogeneradores sean objeto de diferentes tipos estudios e investigaciones para optimizar su funcionamiento. En este marco, se están realizando distintos trabajos que incluyen estudios en prototipos de turbinas, modelos computacionales y experimentos con modelos a escala reducida. Para el estudio con modelos reducidos, el túnel de viento se convierte en una herramienta fundamental ya que permite modificar las condiciones de viento incidente y trabajar en condiciones controladas.

Para este tipo de análisis experimental y con el objeto de evaluar prototipos de aerogeneradores de gran porte, en la Facultad de Ingeniería de la UNNE se diseñó el modelo a escala de un generador de tres palas de aproximadamente 100 m de diámetro a escala real. En esta primera etapa se realizó la construcción parcial de la turbina y mediante algunos ensayos preliminares se determinó el motor de corriente continua que se utilizará como generador.

Además, una vez obtenidas las dimensiones de la turbina, se trabajó en el diseño estructural evaluando los esfuerzos a los que estarían sometidas las aspas, empleando dos tipos de materiales poliméricos para su construcción en la impresora 3D. Los polímeros empleados fueron poliláctico (PLA) y butadieno estireno (ABS), verificándose las cargas en cada caso. En base a estos cálculos, se optó por utilizar poliláctico para construir las palas, los mecanismos de anclaje y de transmisión de los movimientos.

Las cargas radiales y axiales a que va a estar sometido el aerogenerador se determinaron según el criterio de Villanueva Salazar (2010). Posteriormente, se seleccionaron rodamientos tipo YAR 204-F2, para sostener en voladizo el mecanismo rotor del aerogenerador y transmitir los esfuerzos a la torre. Finalmente, se efectuó una estimación preliminar del comportamiento del flujo en torno al modelo y de las fuerzas de sustentación y de arrastre sobre el perfil alar empleando el modelado computacional.

En una próxima etapa, se implementará el sistema más adecuado para el control de velocidad, y se evaluará el modelo del aerogenerador en el túnel de viento utilizando condiciones de flujo uniforme con variación de la intensidad de turbulencia y flujos de capa límite para el viento incidente.

## REFERENCIAS

- Bartl, J. (2011), Wake measurements behind an array of two model wind turbines, Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, EGI-2011-127 MSC EKV 866, Division of Heat and Power Technology, SE-100 44 Stockholm.
- Cal, R. B., Lebrón, J., Castillo, L., Kang, H., Meneveau, C. (2010), Experimental study of the horizontally averaged flow structure in a model wind-turbine array boundary layer, *Journal of renewable and sustainable energy*, 2, 013106.
- Gundtoft, S. (2009), "Wind turbines", University College of Aarhus.
- Villanueva Salazar, I. (2010) "Análisis dinámicos de las palas (Ehecamani) de un aerogenerador en túnel de viento"; Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional
- Wittwer, A.; Loredou Souza, A.; Dorado, R.; Annes Degrazia, G.; Alvarez y Alvarez G.; Medina J.; Milich, F. (2016), "Interacción entre aerogeneradores y vientos de capa límite: estudio experimental en túnel de viento", V Congreso de Ingeniería Mecánica V CAIM, Santiago del Estero.– Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Wittwer, A.; Dorado, R.; Alvarez y Alvarez G.; Degrazia, G. A.; Loredou Souza, A.; Bodmann, B (2016), Flow in the Wake of Wind Turbines: Turbulence Spectral Analysis by Wind Tunnel Tests, *American Journal of Environmental Engineering*, 6(4A): 109-115.

## ABSTRACT

The general purpose of this work is to study wind turbines and flow interaction in wind farms. In this preliminary stage, the model construction, the blades structural verification, the torque theoretical calculation and the generating device experimental evaluation are presented. Although the work is experimental, some computational simulations are presented whose results allow a first approximation to the phenomenon. It is important to emphasize the importance of this type of development in order to reduce the greenhouse gases emissions and the environmental damage they cause.

**Keywords:** Aerodynamic wake, scale model, wind turbine, NACA 4412 profile.