

Diseño y construcción del modelo a escala de un aerogenerador de eje horizontal para estudios experimentales

Milich, Franco G. francomilich@hotmail.com; Alvarez y Alvarez, Gisela M.

giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar; Chuaire, Mauricio L. mauricio_chuaire@hotmail.com;

Veroli, Cesar G. gveroli@yahoo.com.ar; Wittwer, Adrián R. a_wittwer@yahoo.es

Universidad Nacional del Nordeste – Facultad de Ingeniería

Resumen

En los últimos años, en nuestra región, fundamentalmente Brasil, Chile, Uruguay y Argentina han impulsado fuertemente el desarrollo e instalación de aprovechamientos eólicos, debido a que generan un menor impacto ambiental si se compara con otras fuentes de energía. Con el objeto de optimizar el funcionamiento de los aerogeneradores individualmente o en un parque eólico, es fundamental el estudio de la interacción de la estructura de los mismos y la capa límite atmosférica. Una de las formas de estudiar este comportamiento es mediante ensayos experimentales en túneles de viento utilizando modelos a escala reducida.

En este trabajo se describen las etapas de diseño y construcción del modelo a escala de un generador eólico de tres palas de eje horizontal. A partir de los aspectos aerodinámicos vinculados a este tipo de dispositivo, se diseñaron los componentes del aerogenerador y se evaluaron un conjunto de parámetros relacionados al funcionamiento y eficiencia del modelo. El modelo fue construido usando la técnica de impresión 3D de las componentes e incluye un dispositivo para el posicionamiento relativo de las palas con relación a la dirección del viento incidente.

Finalmente, el modelo fue montado en el túnel de viento “Jacek Gorecki” de la UNNE y se realizaron ensayos que permitieron una primera evaluación de las características de funcionamiento del aerogenerador a través de la medición de RPM, potencia y torque. Los ensayos se realizaron con viento incidente uniforme considerando dos velocidades distintas; 5,26 m/s y 6,76 m/s. El ángulo que determina la posición de las palas con respecto al viento incidente ha sido modificado para obtener los valores de los parámetros respectivos correspondientes a cada situación.

Palabras clave: diseño y construcción, modelo a escala, aerogenerador

INTRODUCCIÓN

Con el objeto de optimizar el funcionamiento de los aerogeneradores individualmente o en un parque eólico, es fundamental el estudio de la interacción de la estructura de los mismos y la capa límite atmosférica. Una de las formas de estudiar este comportamiento es mediante ensayos experimentales en túneles de viento utilizando modelos a escala reducida.

En este trabajo se describen las etapas de diseño y construcción del modelo a escala de un generador eólico de tres palas de eje horizontal. A partir de los aspectos aerodinámicos vinculados a este tipo de dispositivo, se diseñaron los componentes del aerogenerador y se evaluaron un conjunto de parámetros relacionados al funcionamiento y eficiencia del modelo.

Finalmente, el modelo fue montado en el túnel de viento "Jacek Gorecki" de la UNNE y se realizaron ensayos que permitieron una primera evaluación de las características de funcionamiento del aerogenerador a través de la medición de RPM, potencia y torque.

OBJETIVOS

El objeto específico del trabajo es el desarrollo de modelos a escala reducida de un aerogenerador y la evaluación experimental de sus características tecnológicas. El desarrollo está centrado en el diseño y construcción de un modelo de generadores eólicos de eje horizontal, contemplando los criterios de semejanza comúnmente utilizados para este tipo de

estudio experimental, es decir, semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Para el control de velocidad, será implementado un dispositivo con base en un pequeño generador conectado a una resistencia variable mediante la cual se podrá medir la tensión y corriente generada y además calcular la potencia que genera el modelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción del modelo

- **Diseño de las palas**

Selección del perfil aerodinámico:

La elección del perfil para el modelo a desarrollar, se realizó priorizando una mayor eficiencia aerodinámica definida como el cociente entre el coeficiente de sustentación (C_L) y el coeficiente de arrastre (C_D). Se buscó que el modelo cumpla las siguientes condiciones: que el aumento del C_L 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 estas consideraciones y los trabajos realizados por Villanueva Salazar, I. [1] y Capeller [2] el perfil seleccionado fue un perfil NACA 4412. Según la definición NACA, el nombre

4412 representa las siguientes características del perfil. El primer dígito especifica la combadura máxima en porcentaje de la cuerda (4%). El segundo indica la posición de la combadura máxima en décimas de cuerda (40%). Los dos últimos números indican el espesor máximo del perfil en porcentaje de la cuerda (12%).

Geometría del aspa:

Según Gundtoft [3], la geometría ideal de la hélice se construyó sobre la base de la teoría de Schmitz, que ha desarrollado un modelo un poco más detallado y sofisticado del flujo en el plano del rotor. De acuerdo a esta teoría, es posible calcular el ángulo de paso (β) y la longitud de cuerda (C) ideales teniendo en cuenta el número de palas (B), el radio de la pala (r), el valor de relación de velocidad de punta de pala (TSR), el ángulo de ataque (α) y el coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico (CL) elegido usando las Ecuaciones (1) y (2).

$$\beta_{(r)Schmitz} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{TSR r}\right) - \alpha \text{ [rad]} \quad (1)$$

$$C_{(r)Schmitz} = \frac{1}{B} \frac{16\pi r}{C_L} \sin^2\left(\frac{1}{3} \arctan\left(\frac{R}{TSR r}\right)\right) \text{ [m]} \quad (2)$$

Para determinar el diámetro del modelo se tuvo en cuenta el área de la cámara de ensayo del túnel donde se realizarían los ensayos y empleando las Ecuaciones (1) y (2) se determinaron las dimensiones del perfil alar. El coeficiente de sustentación (CL) se obtuvo empleando el programa AirFoil Tools [4], en función del ángulo de ataque (α), del número de Reynolds y de

ciertas condiciones de rugosidad. Los valores finalmente adoptados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1

| R (mm) | TSR | B | α | CL |
|--------|-----|---|----------|------|
| 295 | 5 | 3 | 5 | 0.92 |

Luego, en base a los valores obtenidos, se determinó la configuración de las palas en función del ángulo de paso y la cuerda en relación al radio incremental. Una vez establecidas las dimensiones de cuerda del modelo en función del radio, se utilizaron esos valores en el software Airfoil Tool [4], que permite obtener los valores de contorno y de línea de curvatura media del perfil (Figura 1). El procedimiento se repitió hasta cubrir el largo de la pala.

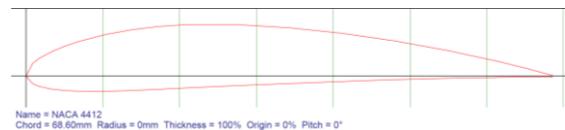


Figura 1: Perfil aerodinámico en el inicio de la pala (Fuente: Software Airfoil Tool).

La Figura 2 ilustra los sucesivos planos donde se indican los perfiles ubicados en forma radial y una vista de la pala que permite ver su configuración general.

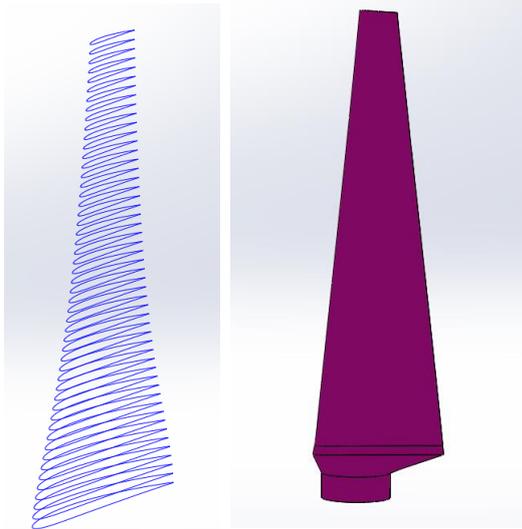


Figura 2: Perfil aerodinámico en el inicio de la pala
(Fuente: Software Airfoil Tool).

Mecanismo de giro de las palas:

Para evaluar el comportamiento aerodinámico del rotor ante diferentes direcciones relativas del viento incidente respecto al ángulo de las palas se diseñó un mecanismo que permite cambiar el ángulo de ataque de las hélices del aerogenerador. Este sistema permite cambiar la posición de la hélice desde un ángulo de ataque de 0° hasta 90° . Esta última posición se denomina de bandera.

El mecanismo es accionado por un servomotor tipo Futaba S3003 es comandado por un controlador de Arduino. El servomotor está vinculado mediante una leva a la cremallera que se mueve axialmente sobre el eje del rotor y comanda las bielas, a través del soporte exterior de un rodamiento de bola SKF 61808. Las bielas, a partir del movimiento axial del porta-biela, generan un movimiento de rotación a los platos que soportan a las hélices modificando el ángulo de ataque de

las mismas. El eje del rotor de la aeroturbina está soportado por dos rodamientos YAR 204 F2 alojados en una caja porta rodamiento especialmente diseñada para su alojamiento y vinculación con la torre de soporte del rotor. La torre, que incluye una base de soporte, es la encargada de mantener todo el sistema rotor en equilibrio estático. En la Figura 3 se observan los distintos elementos mencionados.

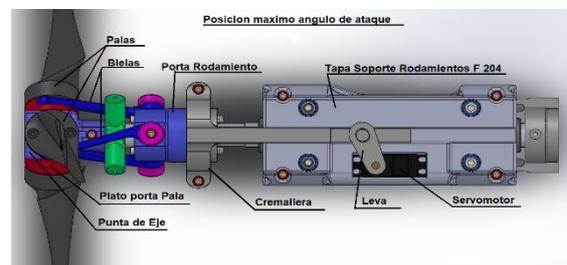
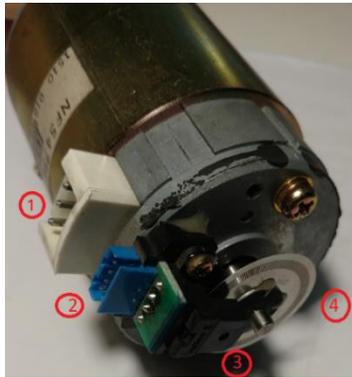


Figura 3: Vista Superior del eje del rotor y el mecanismo de giro de las palas.

- **Selección del generador**

Para la generación de energía eléctrica se utilizó un motor de corriente continua con imanes permanentes y escobillas tipo NISCA NF5475E, porque debido a sus características se puede usar tanto como motor o como generador (Figura 4). El motor trae incorporado un encoder óptico Agilent HEDS-9710 con un disco de censado de 200 perforaciones y dos canales de salida de señal. La tensión generada era controlada mediante un microcontrolador Arduino, que controla las rpm del aerogenerador, las rpm del eje del aerogenerador y la temperatura del servomotor Futaba S3003. En la Figura 5 se observa el esquema de conexión, donde en la pantalla se van a observar las

distintitas rpm del eje del modelo y las del motor, la temperatura del servomotor. Con dos multímetros digitales se toman las lecturas de corriente y tensión respectivamente.



- 1 Terminal salida de generación.
- 2 Terminal de conexión para alimentación de encoder y salida de los dos canales de señal.
- 3 Sensor Óptico.
- 4 Disco perforado (200).

Figura 4: motor NF5475E usado como generador eléctrico.

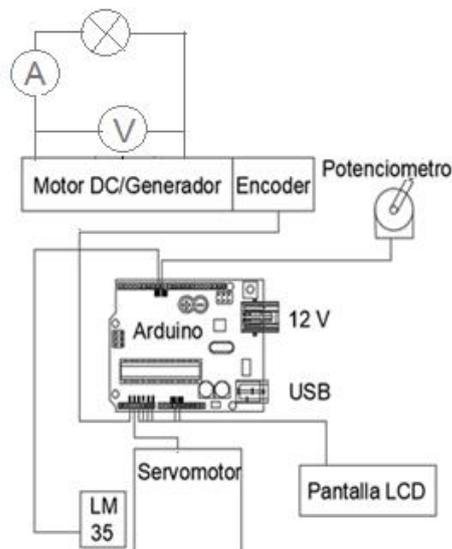


Figura 5. Esquema del circuito

- **Estimativa de pérdidas internas del aerogenerador**

Con el objeto de cuantificar la energía consumida para vencer las pérdidas internas del aerogenerador, se realizó un ensayo del motor DC en vacío, y luego acoplado al eje del aerogenerador sin

colocar las palas, de esta manera no se tienen en cuenta las pérdidas aerodinámicas

Ensayo del generador en vacío

Consiste en alimentar el motor de corriente continua con una tensión estable de 24 Volt a través de una fuente DC (Zúrich DF1730SI20A). Se miden los parámetros de funcionamiento usando un multi-tester digital (JA-890G), de acuerdo al esquema de conexión de Figura 6, y se calcula la potencia consumida. El ensayo se realiza con tensión de 24 volt que es la nominal de funcionamiento del motor DC.

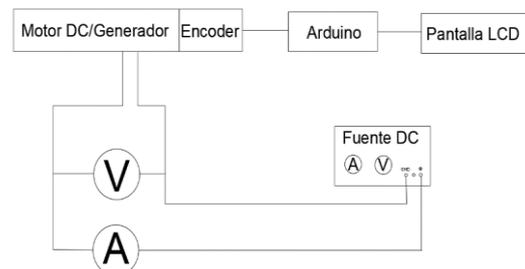


Figura 6: Esquema de conexión.

Con la tensión de la fuente DC en 24 volts se obtienen 3160 RPM en el motor y se miden 23,9 voltios y 0,23 amperes con el multi-tester, de manera que la potencia en vacío es 5.497 watts.

Ensayo del generador acoplado al eje del aerogenerador

Se repite el procedimiento anterior, esta vez con el eje del aerogenerador acoplado al motor DC a través de una correa dentada, para estimar las pérdidas. Con la

tensión de la fuente DC en 24 volts, ahora se obtienen 3069 RPM en el motor, se miden 23,9 voltios y 0,33 amperes con el multi-tester, de manera que la potencia en acoplamiento es 7,887 watts. La potencia consumida internamente por el aerogenerador es de 2,39 watts.

A modo de conclusión, es posible expresar que se aprecia una pérdida de potencia elevada, relacionada con la fricción en los rodamientos, el rendimiento en la transmisión por correa dentada, el roce de las escobillas internas del motor DC y el peso en movimiento de los distintos elementos móviles.

- **Ensayos del modelo en el túnel de viento de la UNNE**

Los túneles de viento son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre un modelo. La finalidad de los ensayos en túneles de viento es suministrar a los diseñadores información sobre las particularidades del viento en las proximidades del modelo en consideración y proveer información sobre la distribución de presiones y sobre las cargas globales producidas por el viento en el modelo. Si la estructura es flexible y susceptible de experimentar fenómenos dinámicos, los ensayos en túnel de viento pueden proporcionar los datos necesarios sobre las vibraciones inducidas por el viento.

En este trabajo se buscaba comprobar el funcionamiento del aerogenerador bajo condiciones de viento controladas, evaluar el comportamiento del sistema de posicionamiento de aspas con viento incidente uniforme y a distintas velocidades, analizar la estabilidad de piezas, tanto estáticamente como dinámicamente, verificando posibles vibraciones, evaluar el sistema de adquisición de datos y lectura de los parámetros monitoreados (RMP, posición y temperatura del servomotor) y, finalmente, realizar mediciones de RPM, tensión y corriente para distintas velocidades de viento incidente.

El Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE cuenta con un túnel de viento (Figura 7) de baja velocidad del tipo de capa límite, cuya cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho por 1,8 m de alto y 22,4 m de longitud, lugar donde se llevaron a cabo los ensayos del modelo a escala reducida del aerogenerador [5].

Figura 7



Túnel de Viento Jacek Gorecki de la Facultad de Ingeniería de la UNNE



Modelo del aerogenerador montado en la sección de ensayos.

• Descripción de experimento e instrumental

Los ensayos se realizaron en condiciones de flujo totalmente controladas y el viento incidente estaba completamente caracterizado a través de sus parámetros medios y turbulentos. Los ensayos se realizaron con dos velocidades distintas para la evaluación y optimización de los parámetros adimensionales como TSR y número de Reynolds.

El modelo del aerogenerador fue montado fijamente en la mesa II del túnel, luego se ubicaron los cables que conectan a la batería de 12 Volt, la pantalla LCD y al motor DC usado para la generación con la carga.

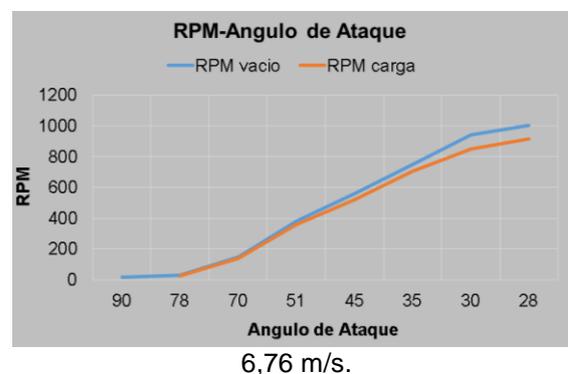
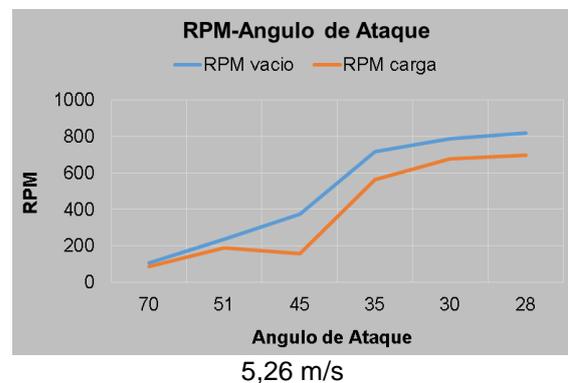
Una vez encendido el ventilador del túnel, se ubicaron las aspas del aerogenerador en posición de bandera, luego se fueron moviendo las palas para los distintos ángulos de ataque evaluados. En cada posición, se realizan mediciones en vacío y

con carga, con las lámparas conectadas. El proceso se realizó para dos velocidades de viento incidente; 5,26 m/s y 6,76 m/s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el gráfico de la Figura 8 se observa la evolución de las RPM en vacío y con carga a medida que varía el ángulo de las palas para ambas velocidades de operación del túnel de viento. Se observa el aumento de las RPM a medida que las palas del aerogenerador se posicionan con menor ángulo de ataque, con excepción del pasaje de 51 a 45° donde se comprueba una disminución de las RPM con carga.

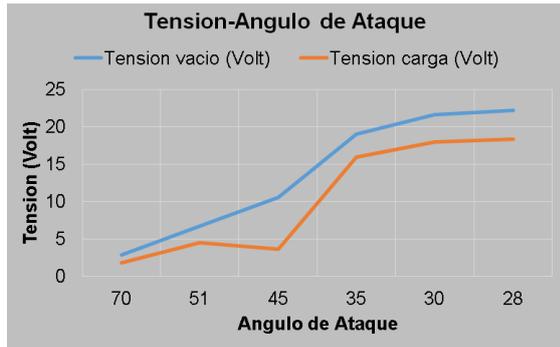
Figura 8: Variación de las RPM en vacío y con carga en el túnel de viento a:



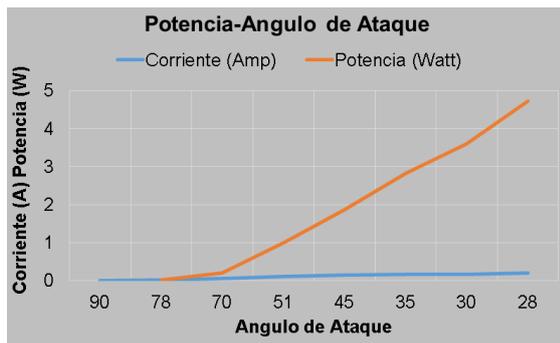
En la Figura 9, se indica como varía la tensión generada en vacío y con carga en

función del ángulo, donde también se puede observar como disminuye la tensión al conectar la carga y también la disminución de tensión cuando se produce el pasaje de 51 a 45°.

Figura 9: Variación de la tensión en vacío y con carga en el túnel de viento a:



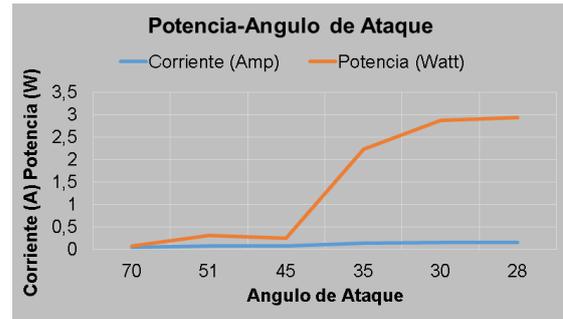
5,26 m/s



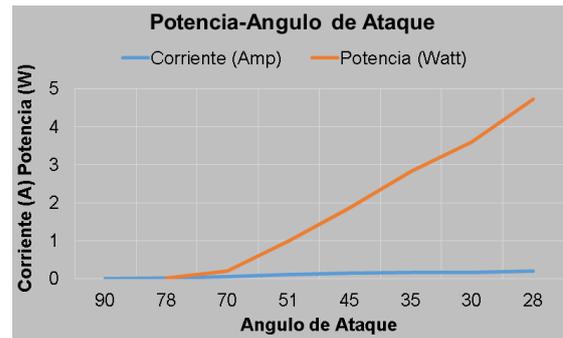
6,76 m/s.

En la Figura 10 se indica la variación de la corriente y de la potencia con la carga conectada. Es posible observar que el valor de la corriente se mantiene estable en casi todas las posiciones. Se observa también que la potencia consumida, al ser prácticamente constante la corriente, sigue la evolución de la tensión.

Figura 10: Variación de la corriente y la potencia con carga en el túnel de viento a:



5,26 m/s



6,76 m/s.

En general, se observó que entre las 520 rpm y 570 rpm se producen vibraciones en el modelo del aerogenerador. Los valores del parámetro adimensional TSR son adecuados cuando el ángulo de ataque se aproxima a 30°. En el ensayo a velocidad de 5,26 m/s se evidencia un error experimental cuando el ángulo pasa de 51 a 45°.

Conclusiones

En primer lugar, el desarrollo realizado indica que es posible la construcción de modelos a escala de este tipo empleando la técnica de impresión en 3D en escalas adecuadas para ensayos en túnel de viento.

Los ensayos preliminares sirvieron de base para probar el funcionamiento del modelo ensamblado, los dispositivos de control de palas, la medición de velocidad de giro y el

dispositivo de generación de energía eléctrica, y permitieron una evaluación cualitativa general del dispositivo.

Finalmente, los ensayos en el túnel de viento permitieron verificar el funcionamiento del dispositivo de control y de generación bajo situaciones controladas y con flujos de características conocidas. Con respecto a la semejanza de las características del flujo en la estela, los valores de TSR obtenidos permiten prever un comportamiento adecuado del modelo habilitando la realización de futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] 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.

[2] Capeller, B. (2016), “Comparaçãõ experimental entre pás com ângulo de passo fixo e variável para turbinas eólicas”, Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia, Universidade de Caxias do Sul (UCS).

[3] Gundtoft, S. (2009), “Wind turbines”, University College of Aarhus.

[4] Airfoil Tools (2017). NACA 4412. Disponible en:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>

[5] Laboratorio de Aerodinámica, Túnel de viento de capa límite. Resistencia. Disponible en:
<http://ing.unne.edu.ar/tunel/pagina%20tunel.htm> (26/12/2017).

