

## **CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN EQUIPO PARA ENSAYO DE ROTORES EÓLICOS EN PEQUEÑA ESCALA**

**D. Schupbach<sup>1</sup>, F. Gagliano<sup>1</sup>, A. D. Otero<sup>2</sup>, R. Sosa<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica – Facultad de Ingeniería – UBA

<sup>2</sup>Grupo de Investigaciones en Sistemas Energéticos Primarios (ISEP) - Departamento de Electrotecnia - Facultad de Ingeniería – UBA

<sup>3</sup>Laboratorio de Fluidodinámica – Departamento de Ingeniería Mecánica - Facultad de Ingeniería – UBA

Av. Paseo Colón 850 - C1063ACV - Buenos Aires - Argentina

Tel. +54 (11) 4343-0092 int.383 e-mail: rsosa@fi.uba.ar

**RESUMEN:** Se describe el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Por un lado se diseñó y construyó un pequeño banco de ensayos que permite estudiar generadores eólicos de paso variable y con diferentes geometrías de las aspas. Dicho equipo permitirá, entre otras cosas, el relevamiento de la curva de potencia extraída por el generador en función de la velocidad del viento incidente. Por otro lado, se implementó un algoritmo basado en la teoría BEM que permite tanto estimar la curva de potencia para un generador eólico a partir del conocimiento de la geometría de las aspas del mismo como determinar el alabeo y la cuerda del aspa ideal para un conjunto de perfiles alares dados a lo largo del aspa y condiciones de diseño del generador definidas previamente.

**Palabras clave:** energía eólica, banco de ensayos, rotores en escala, algoritmo BEM, paso variable

### **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo describe el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Los resultados expuestos en el presente trabajo son parte de un proyecto que busca desarrollar las facilidades que permitan estudiar, tanto en el ámbito académico como en el de la investigación aplicada, la obtención de energía eléctrica a partir de la energía eólica.

El proyecto integral incluye, además de la construcción del rotor eólico en sí, la digitalización de una balanza aerodinámica para el estudio de las curvas características de los perfiles alares, la implementación de un algoritmo de cálculo, basado en la teoría BEM (teoría del elemento de pala o Blade Element Momentum), para la validación de los resultados experimentales obtenidos con el rotor a escala y la construcción de distintos moldes para poder fabricar diferentes tipos de aspas.

De esta manera se espera poder disponer de un equipo versátil para poder relevar experimentalmente y estimar numéricamente las curvas de potencia que se pueden obtener en un generador eólico teniendo como variables: las aspas a emplear (con cuerda y alabeo, variables a lo largo de la envergadura) y el paso de las mismas (que podrá a su vez ser controlado dinámicamente).

En el marco del presente trabajo se exponen los avances realizados en el diseño, la construcción y la validación preliminar del rotor eólico. Esta etapa incluyó: la implementación del sistema de control de paso de las aspas, el diseño e implementación de un dispositivo para medir el torque generado por el equipo, y la instrumentación necesaria para medir la velocidad de la corriente libre y la velocidad de giro del rotor. Se realizaron, a su vez, ensayos preliminares con aspas que consisten en secciones del perfil alar NACA 0012 con alabeo y cuerda constantes. De esta forma se logró una primera comparación entre el cálculo teórico y los resultados experimentales.

Para determinar el tipo de rotor a diseñar, a priori, se tuvieron en cuenta los siguientes puntos. Como factor limitante se adoptó el diámetro del túnel de viento más grande disponible en el laboratorio de Fluidodinámica de la FIUBA ( $D_{TUNEL} = 60$  cm). Si se adoptara un diámetro lo suficientemente pequeño como para evitar efectos de bloqueo en el túnel las palas resultantes serían demasiado esbeltas y esto dificultaría mucho su fabricación, con lo cual se aceptó trabajar con  $D = 40$  cm para el rotor. Cabe destacar que si bien el diámetro elegido es demasiado grande respecto del diámetro del túnel, se optó por trabajar asumiendo bloqueo del túnel pero priorizando la facilidad constructiva de las aspas, cabe mencionar a su vez que las dimensiones del equipo permiten su fácil traslado para ser ensayados en túneles de mayor diámetro.

Considerando el rango de velocidades del túnel de viento (de 5 a 20 m/s) se optó por trabajar en el rango de velocidades del flujo libre comprendidas entre 12 y 15 m/s.

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Mecánica

<sup>2</sup> Investigador Adjunto CONICET

<sup>3</sup> Investigador Asociado CONICET

Se consideró que los  $\lambda$  óptimos se encontrarían entre 6 y 7 que es lo usual considerando el número de palas utilizado ( $\lambda$  es la TSR - Tip Speed Ratio, la relación entre las velocidades perimetral y del viento en la punta de la pala) y como número de palas, se adoptó  $B = 3$  que es lo usual en las máquinas comerciales actualmente (Burton, 2001) y además facilita, entre otras cosas, el balanceo del rotor. De esta forma, se estimó que para una velocidad del flujo libre de  $U_f = 12\text{m/s}$  y con  $\lambda = 6$  el rotor estaría girando a 3500rpm siendo este valor el límite superior adoptado, para la velocidad de giro del rotor en el diseño.

Con estos cálculos preliminares la potencia disponible en la corriente de viento de ensayo es de:  $P_{Wind} = \frac{1}{2}\rho U_f^3 A = 130W$  (donde  $U_f$  es la velocidad de la corriente libre,  $A$  es el área del rotor como actuador de disco y  $\rho$  es la densidad del aire a la temperatura ambiente).

De la potencia disponible, el mejor caso sería tener una turbina ideal, lo cual considerando el límite de Betz (Manwell et al., 2002)  $C_{PBetz} = 0,59$  esto representaría unos 70W en el eje del rotor. Está claro que al no ser un diseño de pala perfecto, y teniendo en cuenta todas las pérdidas, fallas constructivas, y la escala del modelo, la potencia que esperamos obtener es bastante menor.

Afinando un poco más los datos para el diseño se analizó la potencia generada por el rotor cuando empleamos un perfil NACA 0012 para las condiciones de diseño de  $U_f = 12\text{m/s}$  y  $\lambda = 6$ . Del algoritmo implementado en Matlab® se desprende teóricamente, incluyendo las pérdidas de estela y de punta de pala, que la potencia a obtener es de 55W, a eso debemos descontar las pérdidas del mecanismo, por ejemplo en los rodamientos.

Con estos parámetros, velocidad de rotación y potencia, se seleccionó el generador a utilizar, resultando en un motor de corriente continua (CC) de la marca Remmsi, trabajando como generador, el cual tiene una potencia nominal de 100W a 3000rpm, en 24V. Este motor, nos permite además poder intercambiar distintos rotores para trabajar a otras velocidades de rotación si surgiera a futuro la necesidad.

El hecho de utilizar un motor de CC, brinda la posibilidad que al montar un par de palas de prueba, se pueda verificar por ejemplo el balanceo del rotor antes de colocar el equipo en el túnel de viento, alimentando el motor con una fuente de tensión variable. Trabajar a 3500 rpm representa una tensión en bornes del generador superior a la nominal, del orden de 28V (en vacío) lo cual no es un problema para la electrónica que maneja la resistencia de carga.

Una vez definido el generador a utilizar se procedió en una primera etapa a diseñar el ensamblado de todo el rotor eólico incluyendo la disposición de los mecanismos que permiten variar el paso de las aspas, las bancadas que soportan al generador y la ubicación del sensor de fuerza para medir el torque generado (Figura 1). En la Figura 1 a su vez se presenta una fotografía con el equipo ya construido y dispuesto en la sección de prueba del túnel de viento.

En la sección siguiente se describe todo el diseño y desarrollo necesario para lograr la instrumentación del equipo

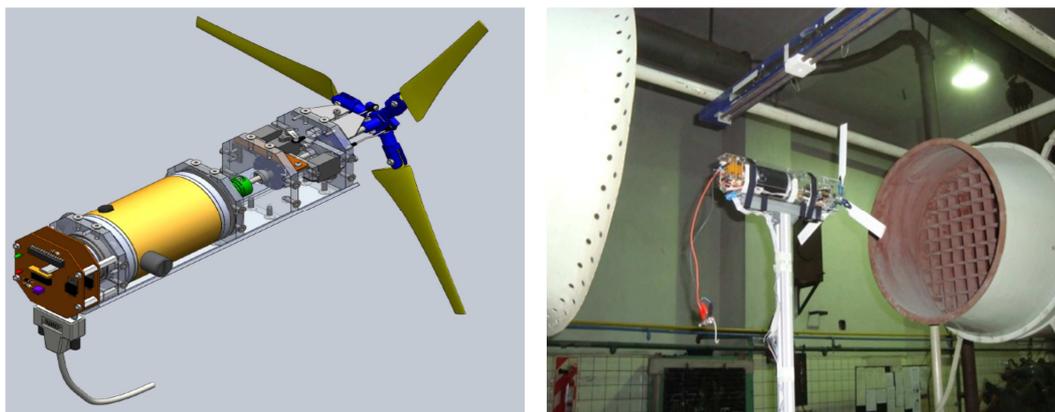


Figura 1. (Izquierda) Diseño del ensamblaje y disposición de las piezas del generador. (Derecha) Vista del generador montado en la sección de prueba del túnel de viento.

## DISEÑO DE LA ELECTRÓNICA NECESARIA PARA LA INSTRUMENTACIÓN DEL GENERADOR

Para el desarrollo de la electrónica, fue necesario primero aislar los parámetros necesarios para el trabajo, es decir, las variables a manejar tanto de entrada como de salida. Tomando a la electrónica del sistema como una caja negra, ésta debe ser capaz de leer las siguientes variables en tiempo real: RPM del rotor, velocidad de la corriente  $U_f$ , torque en el generador. También debe ser capaz de setear o escribir: paso de las palas y porcentaje de frenado.

Se describe a continuación la estrategia para manejar cada una de estas variables (Bolton, 2007).

### Lectura de las RPM

Para la lectura de la velocidad angular del rotor, se utiliza un encoder, fabricado con un disco ranurado y un detector óptico, seguido de un circuito acondicionador de señal, para generar a la salida una onda cuadrada de frecuencia proporcional a la velocidad de giro del eje. El disco ranurado posee 10 ranuras, con lo cual genera 10 pulsos en cada revolución del eje. Cada vez que se interrumpe el haz del emisor infrarrojo, se genera un pulso en la salida, el cual es leído por el micro controlador y almacenado automáticamente en un contador de eventos interno, el principio se ilustra en la Figura 2. En dicha figura también se muestra una fotografía donde se aprecia el montaje del sensor en una de las bancadas del motor.

Para determinar la velocidad, se lee la cantidad de pulsos almacenados en el contador del micro en un periodo de tiempo, con lo cual se puede conocer la frecuencia. La señal del lector pasa además por un buffer TTL 7407 y al igual que todas las

señales del sistema está accesible en la placa principal o placa base, para ser monitoreada por medio de un osciloscopio, por ejemplo.

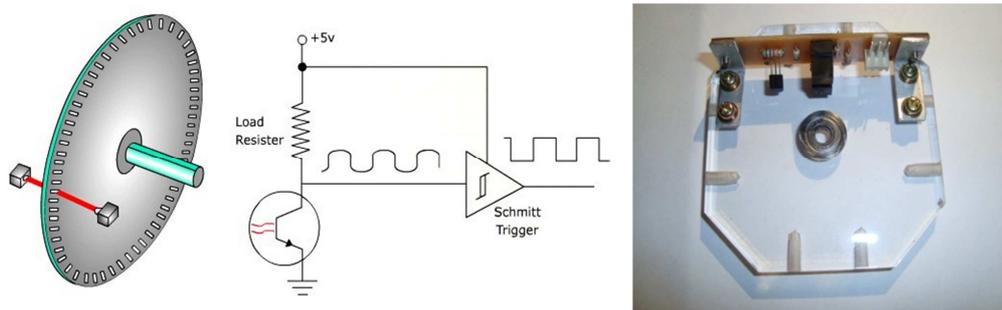


Figura 2. Esquema del principio de funcionamiento del encoder óptico y detalle del montaje del sensor en la bancada del motor

#### Lectura de Velocidad de corriente $U$

Para medir la velocidad de la corriente libre, se utiliza un tubo Pitot, junto con un sensor de presión diferencial, el cual posee incorporada la electrónica necesaria para realizar el acondicionamiento de señales del sensor de  $\Delta p$ . El sensor de presión diferencial posee una salida en tensión de 0V a 5V para velocidades medidas como alturas de columna de agua entre 0 y 1" de columna de agua.

Dado que el sensor de presión ya posee su propia electrónica, lo único que fue necesario realizar fue un circuito seguidor, implementado con un Amplificador Operacional LM741. El objetivo de este circuito es simplemente aislar las señales entre el amplificador propio del sensor de presión del Pitot y el micro controlador. La salida entra directamente al convertidor A/D del micro controlador y se incorpora a las variables leídas, para luego ser enviada a la PC junto con todos los otros parámetros. Se agregó en la entrada del amplificador una resistencia de pull-down para que la entrada quede puesta a tierra cuando no se conecta el sensor al equipo, esto evita que el operacional tenga valores aleatorios en la salida, con esto se leerá 0V en la entrada analógica del A/D del micro controlador.

#### Medición del Torque

La estrategia consiste en utilizar un sistema de palanca, la cual está montada en el motor de CC utilizado como freno. La palanca convierte el torque en el rotor  $Q$ , en una fuerza a una distancia  $d$ , del centro de rotación del eje. Dada las dimensiones del dispositivo, cuyo cuerpo no supera los 8cm de lado, y para evitar sistemas de palanca para el conexionado de celdas de carga, se optó por un sensor de fuerza de tipo piezoeléctrico, principalmente por su tamaño. Todo este sistema tiene como ventaja, su muy bajo costo frente a torquímetros dinámicos comerciales, reducido tamaño y relativamente fácil implementación de la electrónica asociada. Del análisis preliminar de potencia a obtener de la corriente de viento, para el túnel de viento disponible, velocidades de rotación, etc, se concluyó que un sensor de 1500gr a 30mm de distancia del eje es lo correcto, facilitando además el montaje en el dispositivo (esto se puede observar en la Figura 3). Con esta configuración, el sistema permitirá medir torques en el eje de hasta 5N.cm.

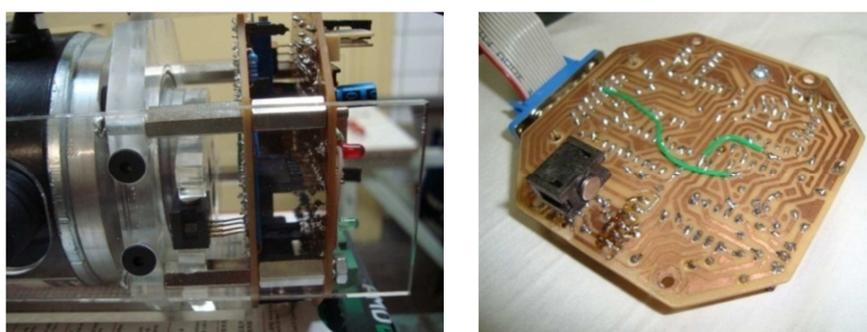


Figura 3. (Izquierda) Detalle del montaje del sensor de fuerza y el sistema de palanca. (Derecha) Detalle del montaje del sensor de fuerza en la placa de circuito impreso

El sensor piezoeléctrico de fuerza seleccionado, de tipo puente de Wheatstone, es el FSG-15N1A de Honeywell. La señal obtenida, es amplificada por un amplificador de instrumentación AD620 y luego leída por un canal del conversor A/D del microcontrolador PIC16F873A. Para alimentar el sensor, se utiliza un regulador de tensión de tipo diodo Zener, de 10V.

El sensor posee una sensibilidad de 0,24 mV/grf, lo cual a fondo de escala representa una tensión del puente de 360mV. Para obtener por ejemplo, 5,1V al medir 1000gf, que representan 3N.cm, la ganancia necesaria en el AD620 es de 20,25.

Para poder realizar modificaciones en la ganancia del amplificador, se previó tener 2 modos de operación, uno con ganancia fija y otro con ganancia variable, lo cual permite además ajustar el amplificador en un cierto rango de interés y provee mayor versatilidad al equipo. Así tendremos:

Modo fijo: Ganancia de 23,4545. Se obtiene por resistencia fija al 1% de tolerancia  
 Modo variable: Ganancia entre 26 y 50. Se obtiene por una resistencia variable en una de las plaquetas.

El circuito AD620, es un amplificador de instrumentación de fácil implementación y configuración, y su ganancia queda determinada solo por el valor de una resistencia externa ( $R_G$ ) según:  $G = \frac{49,4 k\Omega}{R_G} + 1$ .

Dado el tamaño del sensor y la disposición de las placas de electrónica en el dispositivo, esto permitió prever el montaje del sensor directamente en la placa como se muestra en la Figura 2 y se detalla en la Figura 3.

#### *Paso de las Palas*

Para el seteo del ángulo de posicionamiento o pitch de las palas, se utilizan servomotores de CC del tipo de aeromodelismo, los cuales requieren de una señal cuadrada de ancho de pulso variable (PWM) como "set point" para su posición. Las grandes ventajas que tienen son su bajo costo, alto nivel de integración, y facilidad de control para esta aplicación. En la Figura 4 se observan las características de la señal PWM requerida. Es necesario tener entre cada pulso unos 10-20ms y el ancho de pulso entre 1-2ms, siendo el ángulo proporcional a este ancho de pulso.

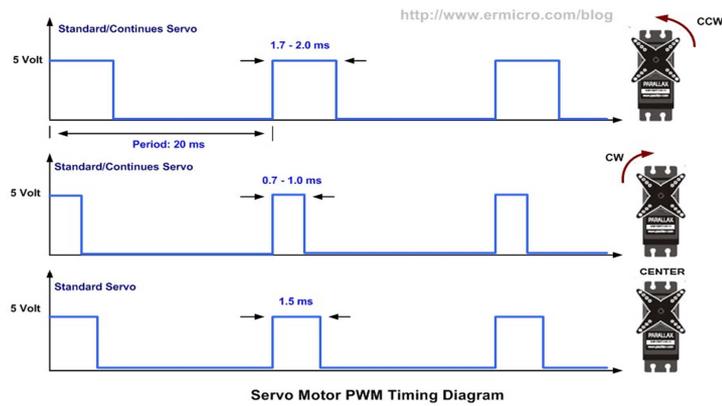


Figura 4 Detalle del PWM para control de posición del servomotor

Estas señales PWM se generan dentro del micro controlador utilizando como base de tiempos la rutina principal del programa, la cual cada aproximadamente 10ms genera los pulsos del ancho correcto, ya sea para los servos que giran a derecha o bien a izquierda, necesario esto debido a que no todos están montados en la misma posición, como se observa en la Figura 5.

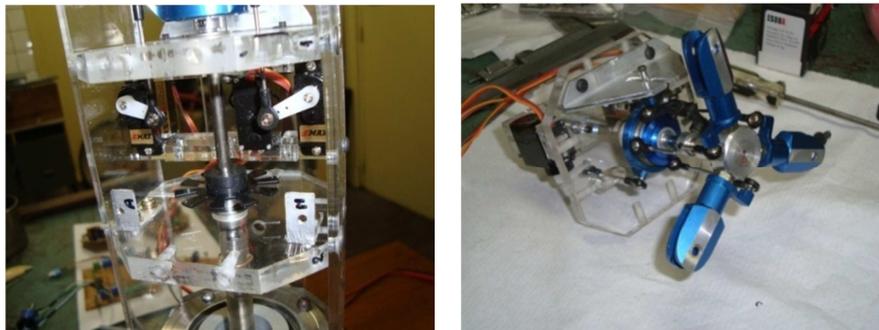


Figura 5. (Izquierda) Detalle del montaje de los servos en el equipo. (Derecha) Detalle del rotor modificado para trabajar con 3 palas.

Estas señales pasan por un buffer TTL 7407, cuyo objetivo es absorber la corriente consumida por los servos y aislarlos del micro controlador ante eventuales malas conexiones, cortocircuitos, o inclusive falla del servo, etc. Se realizó el mando del paso con 3 servomotores, debido a que esta solución optimizaba el espacio y evitaba la fabricación de piezas adicionales para comandar el sistema del rotor, obtenido este a partir de un rotor modificado de helicóptero de aeromodelismo KDS450, el cual se adaptó para soportar 3 palas, como se observa en detalle en la Figura 5.

#### *Frenado variable del Rotor*

El frenado del rotor se realiza por medio del motor de CC utilizado como generador, la potencia obtenida en el rotor es disipada en forma de calor en una lámpara o un resistor. La tensión generada por este será proporcional a su velocidad angular, pero la corriente dependerá de la resistencia interna del generador/motor y de la carga. Para poder tener un amplio margen de trabajo en el frenado del rotor, se optó por conectar la resistencia de carga a través de un sistema PWM (Modulación por ancho de pulso) el cual permite obtener prácticamente cualquier nivel de frenado del rotor en un amplio

rango de velocidades angulares. Como ejemplo en la Figura 6 se observa lo que sucede para una tensión de 5V a la que se le aplica PWM, la carga verá tensión variable en sus terminales.

La señal PWM se genera a partir del modulo interno del micro controlador, con una frecuencia base de 1kHz y ancho de pulso variable entre 0 % (i.e. sin carga) y 100 % (i.e. totalmente cargado). Como elemento interruptor para el chopeo se adoptó un transistor MOSFET IRF630 de canal N, el cual soporta hasta 9A de corriente lo cual es más que suficiente para nuestra aplicación.

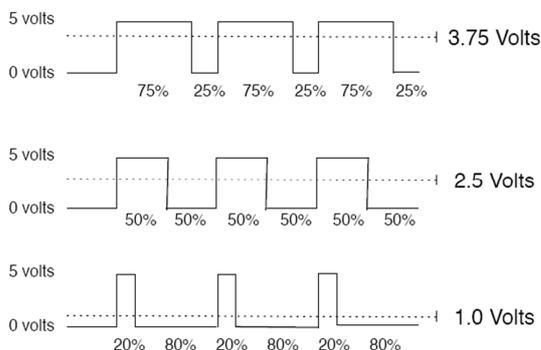


Figura 6. Detalle de funcionamiento de un PWM

#### Agrupación de los circuitos

Se materializaron los circuitos en 2 plaquetas diferentes montadas en paralelo, de manera que todo quede dentro del cuerpo del prototipo. Para el diseño de los circuitos impresos se recurrió a un Software de CAD específico. Previamente se definió la ubicación de las placas en la estructura, y luego de algunas componentes como el sensor de fuerza, conectores, etc. En total se construyeron 4 placas de circuito impreso, las cuales tienen las siguientes funciones:

Placa del micro controlador (Placa 1): Esta placa posee el Microcontrolador PIC16F873, el conector necesario para su programación, la bornera de conexión para el generador, la bornera de conexión para la carga, un led de encendido, uno de monitoreo básicamente utilizado para desarrollo del software. También se encuentran los 3 conectores para los servomotores y el transistor MOS para el manejo por PWM de la carga.

Placa del sensor de Fuerza (Placa 2): Esta placa posee el sensor de fuerza, el amplificador del mismo (AD620), con la posibilidad de utilizarlo con ganancia fija o bien ganancia variable según lo requiera la experiencia. También se encuentra el circuito seguidor para la señal del tubo pitot, el circuito MAX232 cuya función es generar los niveles de tensión para el puerto RS-232. El regulador de tensión de +5V LM7805 también es parte de esta placa, como también el conector DB-15 para la conexión del cable a la placa base.

En la Figura 7 se observa una vista de las placas anteriores, con una descripción de sus principales partes y conectores.

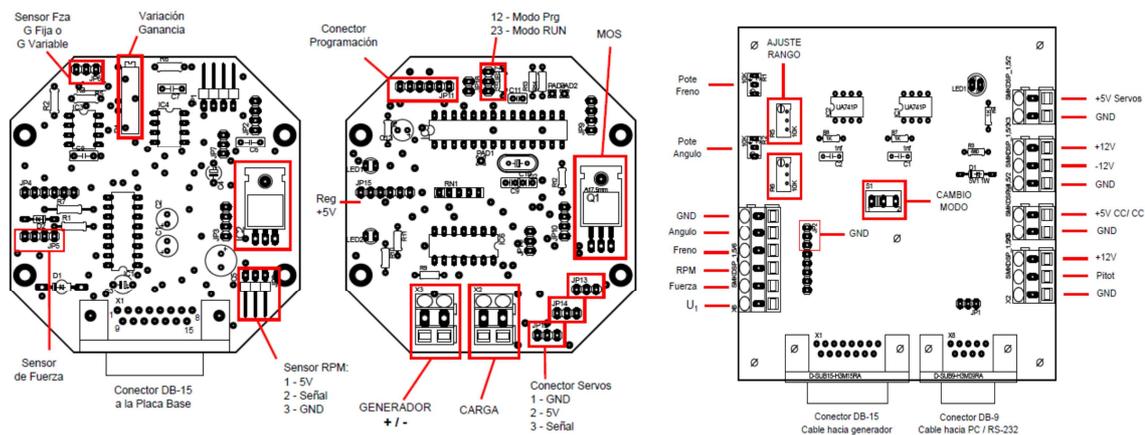


Figura 7. (Izquierda y centro)Detalle las placas del Microcontrolador y el sensor de fuerza. (Derecha) Detalle de la placa base y sus conexiones

Placa de RPM (Placa 3): Esta placa tiene la función de sostener el sensor óptico para detectar las RPM del eje, y además posee el acondicionamiento de señal para generar una onda cuadrada (ver Figura 3).

Placa BASE (Placa 4): En esta placa se concentran todas las conexiones, la alimentación, y los comandos manuales tanto de paso y de freno, los mismos implementados con potenciómetros multivoltas, para obtener una mejor resolución. Las señales de freno y paso también pasan por un circuito seguidor antes de dirigirse al micro controlador en la Placa 1. Esta placa posee además conexión para alimentar el sensor del tubo Pitot con 12V, y posee una bornera, o bien un conector en línea, para el monitoreo de todas las señales. En la Figura 7 se puede observar una descripción de las conexiones de la placa y componentes.

## IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO BEM

Para calcular las curvas de potencia del generador se utilizó un método análogo al presentado por Manwell et al. (2002) con pequeñas variaciones respecto de los desarrollos que allí figuran.

El método se basa en la teoría de la cantidad de movimiento del elemento de aspa. En dicha teoría se igualan las fuerzas correspondientes a un elemento de longitud diferencial de aspa con las correspondientes a la conservación de la cantidad de movimiento de la corriente de fluido que atraviesa un anillo de radio determinado y espesor diferencial del rotor. De esta forma se obtiene un par de ecuaciones para los factores de inducción, las que al depender de los coeficientes de sustentación y arrastre, y por ende del ángulo de ataque y de incidencia que dependen de estos factores, deben resolverse iterativamente.

Por otro lado, en el cálculo se tuvo en cuenta las pérdidas en las puntas de las palas. Estas pérdidas se deben a que parte del flujo que incide sobre los perfiles alares que forman el aspa en vez de circular en la forma correspondiente lo hace alrededor de la punta del aspa, reduciendo la sustentación y disminuyendo la potencia extraída. Las pérdidas de este tipo son más importantes cuanto más cerca de la punta del aspa esté la estación considerada. Este efecto puede considerarse a través de un factor  $F$  propuesto por Prandtl (ver Manwell et al., 2002, y citas allí). Este factor se aplica modificando las fuerzas obtenidas de la conservación de las cantidades de movimiento lineal y angular de la corriente de fluido.

Además, se utilizó una variante basada en la relación empírica de Glauert (1926 y 1935) en caso que la estela detrás del rotor se vuelva turbulenta. Manwell et al. (2002) exponen un método que tiene en cuenta todas estas situaciones pero considera que la fuerza de arrastre es nula. En este trabajo no se utilizó esta última hipótesis de forma de mejorar el cálculo en caso de perfiles que no sean delgados donde el arrastre puede ser importante.

A continuación, se describen brevemente las ecuaciones resultantes del método utilizado. Definiendo la solidez local del rotor ( $\sigma$ ), que es una característica dada por la geometría del mismo, como:

$$\sigma(r) = \frac{Bc(r)}{2\pi r} \quad (1)$$

donde  $B$  es el número de palas,  $c(r)$  la cuerda del perfil en función de la distancia al eje de giro ( $r$ ). Partiendo de los valores iniciales para los factores de inducción axial,  $a$ , y angular,  $a'$ , en cada estación dados por:

$$a_0(r) = \left[ 1 + \frac{4\sin^2(\varphi(r))}{\sigma(r)C_{Lopt}(r)\cos(\varphi(r))} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$a'_0(r) = \left[ \frac{4\cos(\varphi(r))}{\sigma(r)C_{Lopt}(r)-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

Donde  $\varphi(r)$  es el ángulo de incidencia que optimiza la extracción energética, produciendo el máximo coeficiente de sustentación en cada sección ( $C_{Lopt}$ ). Estos valores son obtenidos mediante el método de Manwell et al. (2002) para diseño de la forma óptima del aspa considerando rotación en la estela detrás del rotor y arrastre aerodinámico nulo ( $C_D = 0$ ).

Luego se resuelve iterativamente (los subíndices indican el número de iteración), el siguiente procedimiento en cada estación del aspa:

1. Calcular el ángulo de incidencia ( $\varphi$ , ángulo entre la velocidad relativa y el plano de rotación) en cada estación según:

$$\varphi_i(r) = \tan^{-1} \left( \frac{1-a_{i-1}(r)}{(1+a_{i-1}(r))\lambda_r} \right) \quad (4)$$

2. Calcular el factor de pérdidas en la punta del aspa como

$$F_i(r) = \left( \frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left( \exp \left( -\frac{\frac{B}{2} \left( \frac{1-r}{R} \right)}{R \sin(\varphi_i(r))} \right) \right) \quad (5)$$

Donde  $R$  es el radio del generador,  $\lambda_r$  es la relación entre la velocidad perimetral de la pala en la posición  $r$  y la del viento (speed ratio).

3. Calcular el ángulo de ataque real como:

$$\alpha_i(r) = \varphi_i(r) - \theta_p(r) \quad (6)$$

Donde  $\theta_p$  es el ángulo de alabéo.

4. Obtener los coeficientes de sustentación  $C_{L_i}(r)$  y arrastre  $C_{D_i}(r)$  en función del ángulo de ataque  $\alpha_i(r)$ ;

5. Calcular el coeficiente de empuje local definido por

$$C_{T_i}(r) = \frac{\sigma(r)(1-a_{i-1}(r))^2 [C_{L_i}(r)\cos(\varphi_i(r)) + C_{D_i}(r)\sin(\varphi_i(r))]}{\sin^2(\varphi_i(r))} \quad (7)$$

Si  $C_{T_i}(r) > 0,96$  utilizar la corrección basada en la relación empírica de Glauert para estela turbulenta y calcular el factor de inducción axial según

$$a_i(r) = \frac{1}{F_i(r)} [0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{Ti}(r))}] \quad (8)$$

Si  $C_{Ti}(r) < 0$ , 96 calcular el factor de inducción axial según

$$a_i(r) = \left\{ 1 + \frac{4F_i(r)\sin^2(\varphi_i(r))}{\sigma(r)[C_{Li}(r)\cos(\varphi_i(r)) + C_{Di}(r)\sin(\varphi_i(r))]} \right\}^{-1} \quad (9)$$

6. Calcular el factor de inducción angular según

$$a'_i(r) = \frac{(1-a_i(r))\sigma(r)[C_{Li}(r)\cos(\varphi_i(r)) + C_{Di}(r)\sin(\varphi_i(r))]}{4F_i(r)\lambda_r\sin^2(\varphi_i(r))} \quad (10)$$

7. Verificar convergencia  $|a_i(r) - a_{i-1}(r)| < \text{Tol}$  y  $|a_{0i}(r) - a_{0i-1}(r)| < \text{Tol}$  en todas las estaciones para un dado valor de la tolerancia Tol. Una vez convergido, dada la velocidad relativa local

$$U_{rel}(r) = \sqrt{\frac{U^2(1-a_i(r))^2}{\sin^2(\varphi_i(r))}} \quad (11)$$

donde  $i$  es el número de iteración en el que se alcanzó la convergencia, se calculan las fuerzas de sustentación y arrastre.

$$dF_L(r) = \frac{1}{2}\rho(U_{rel}(r))^2 C_{Li}(r)c(r) \quad (12)$$

$$dF_D(r) = \frac{1}{2}\rho(U_{rel}(r))^2 C_{Di}(r)c(r) \quad (13)$$

Finalmente el torque diferencial debido a la fuerza tangencial operando a una distancia  $r$  desde el centro estará dado por  $dQ = BrdF_T = Br(dF_L(r)\sin(\varphi(r)) - dF_D(r)\cos(\varphi(r)))$ . A partir del conocimiento del torque y de la velocidad de giro del rotor ( $\Omega$ ) podremos calcular el coeficiente de potencia para el generador como:

$$C_p = \frac{P}{P_{wind}} = \frac{\int_{r_h}^R \Omega dQ}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 U^3} \quad (14)$$

## CURVAS DE POTENCIA

En esta sección presentamos los primeros resultados obtenidos tanto con el generador en el túnel de viento como con el algoritmo implementado en Matlab®.

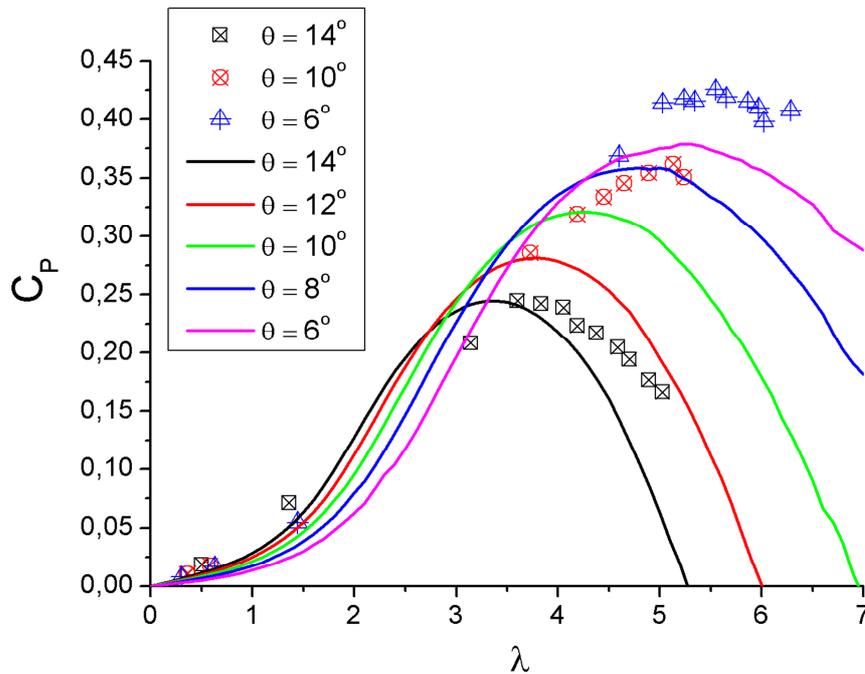


Figura 8. Curvas  $C_p$  vs  $\lambda$  para distintos valores del ángulo de pitch. Línea llena: resultados numéricos, símbolos: resultados experimentales obtenidos con el generador.

En esta primera etapa del proyecto hemos estudiado el comportamiento del generador empleando un perfil simétrico NACA0012. Las aspas en el generador no poseen alabeo y se han estudiado distintos ángulos de pitch ( $\theta$ ).

En la Figura 8 se presentan las curvas de  $C_p$  vs  $\lambda$  obtenidas con el programa para un perfil NACA0012 (tomando las curvas de  $C_L$  vs  $\alpha$  y  $C_D$  vs  $\alpha$  de la bibliografía y para  $Re = 170.000$  (Abbott, 1959) para distintos ángulos de pitch (curvas con línea llena). A su vez se presentan en dicha figura los valores experimentales hallados para el generador considerando tres ángulos de pitch diferentes (símbolos,  $\theta = 14^\circ$ ,  $\theta = 10^\circ$  y  $\theta = 6^\circ$ ). Los resultados experimentales se obtuvieron fijando la velocidad del flujo libre en el túnel de viento ( $U_f = 12$  m/s) y variando el nivel de frenado del motor eléctrico.

Se puede observar que el comportamiento de las curvas  $C_p$  vs  $\lambda$  respecto del parámetro  $\theta$  es similar tanto para las curvas teóricas como para las curvas obtenidas con el generador. En ambos casos a mayor ángulo de pitch se obtienen menores valores de  $C_p$  y a menores valores de  $\lambda$ . En cuanto a las diferencias podemos notar dos cosas: por un lado las curvas obtenidas con el generador presentan valores más altos que las curvas teóricas, y por otro lado para valores de pitch bajos las curvas experimentales parecen presentar un sostenimiento de la potencia obtenida a diferencia de la caída brusca presentada en las curvas teóricas más allá de los máximos de  $C_p$ . Las mencionadas diferencias pueden ser explicadas debido a la influencia que tiene el número de  $Re$  en las curvas de  $C_L(\alpha)$  y  $C_D(\alpha)$ . De hecho se han empleado para el cálculo teórico datos experimentales para  $Re$  más elevados que el  $Re$  experimentado por las aspas del generador (que en nuestro caso resultan del orden de  $Re = 70.000$ ). Por su parte la diferencia del comportamiento del  $C_p$  más allá de los valores máximos está vinculada a la falta de datos experimentales confiables para los  $Re$  de trabajo y para ángulos de ataque elevados (estando el perfil en pérdida) (Viterna, 1982). De ahí la importancia que representa la posibilidad de disponer de valores experimentales de las curvas de  $C_L(\alpha)$  y  $C_D(\alpha)$  para los  $Re$  y los  $\alpha$  estudiados.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado una primera parte de un trabajo que tiene como objetivo el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Se ha descrito todo el trabajo de instrumentación del generador y se han presentado resultados preliminares comparando las curvas de potencia obtenidas con el modelo y las obtenidas con el código numérico desarrollado en el marco del presente trabajo y basado en la teoría BEM.

Se ha logrado construir un equipo robusto y versátil que permite estudiar generadores eólicos en pequeña escala empleando distintos tipos de aspas y un paso variable. Los primeros resultados (obtenidos para aspas que consisten en secciones del perfil alar NACA 0012 sin alabeo y con cuerda constante) muestran una buena correspondencia del comportamiento de las curvas  $C_p$  vs  $\lambda$  respecto del parámetro  $\theta$ . Por otro lado las diferencias encontradas entre las curvas teóricas y las experimentales refuerzan la idea de continuar con la etapa siguiente del proyecto que consiste en la digitalización de una balanza aerodinámica para el estudio de las curvas características de los perfiles alares en el rango de  $Re$  y de ángulos de ataque que son de interés.

## REFERENCIAS

Bolton W. (2007) *Mecatrónica*. Alfaomega, 2da Edición

Burton T. (2001). *Wind Energy Handbook*. Wiley.

Glauert H. (1926) A general theory of the autogyro. British ARC, 1111.

Glauert H. (1935) Airplane propellers. *Aerodynamic theory*, 4:169–360.

Manwell J. F., McGowan J. G. and Rogers A. L. (2002) *Wind energy explained: Theory, design and application*. Wiley, Chichester, UK.

Viterna L. A. and Janetzke D. C. (1982) Theoretical and Experimental Power from Large Horizontal-Axis Wind Turbines. NASA TM-82944

**ABSTRACT** This paper describes the design, construction and validation of a device to test small-scale wind rotors. Thus it seeks to develop tools that allow the theoretical and experimental study of wind energy power conversion in order to use them in the field of education and applied research. On the one hand, a small test bench was designed and built that allows the study of variable pitch wind turbines with different blade geometries. This equipment will allow the survey of the power curve drawn by the generator according to the incident wind speed. On the other hand, we implemented an algorithm, based on BEM theory, which allows both: to estimate the power curve for a wind generator from knowledge of the blades geometry and to determine the ideal twist and chord blade distribution for an airfoil and design conditions previously defined for the generator.

**Keywords:** wind energy, bench test, small scale rotors, BEM algorithm, variable pitch