

DESARROLLO DE UN ROTOR EÓLICO EXPERIMENTAL A ESCALA Y SU ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

Daniel Schupbach^a, Franco Gagliano^a, Roberto Sosa^{b,d} y Alejandro D. Otero^{c,d}

^a*Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UBA*

^b*Laboratorio de Fluidodinámica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UBA*

^c*Grupo de Investigaciones en Sistemas Energéticos Primarios (ISEP), Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UBA*

^d*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

Palabras Clave: turbina eólica, túnel de viento, rotores a escala, paso variable

Resumen.

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un generador eólico de pequeña escala, capaz de trabajar a diferentes regímenes de viento y velocidad de rotación variable. El mismo puede utilizar distintos tipos de aspas y el paso de las mismas se puede variar por medio del sistema de control. Además, este generador en escala cuenta con un sistema de instrumentación capaz de relevar los siguientes parámetros de trabajo: velocidad del viento, velocidad angular del eje, paso de las aspas y torque en el eje. Esto a fin de estudiar su comportamiento en distintas condiciones de ensayo. Este equipo permite, entre otras cosas, el relevamiento de la curva de potencia extraída por el generador en función de la relación de velocidades en la punta del aspa (*tip speed ratio*), λ .

Además, se comparan resultados obtenidos en experimentos numéricos realizados mediante un algoritmo basado en la teoría del momentum del elemento de aspa (*blade element momentum, BEM*) con los de ensayos en túnel de viento de la curva de potencia para un generador eólico de aspas rectangulares utilizando el modelo a escala.

De esta manera se presenta el desarrollo de herramientas que permiten el estudio teórico y práctico de la conversión de energía eólica en eléctrica, con el objetivo de ser utilizadas tanto en el ámbito de la educación como de la investigación aplicada, y se aplican estas herramientas a un caso de estudio particular. Se reportan las conclusiones de esta etapa.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Este trabajo es 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 conversión de energía eólica en eléctrica. 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 del momentum del elemento de aspa (*Blade Element Momentum, BEM*), para la validación de los resultados experimentales obtenidos con el rotor a escala y la construcción de moldes para fabricar diferentes 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 la geometría de las aspas, el paso de las mismas (que podrá ser controlado dinámicamente), la velocidad de viento, la velocidad de rotación y el torque en el rotor. En el marco del presente trabajo se exponen los avances realizados en el diseño, la construcción y la validación preliminar del rotor eólico.

2. DISEÑO DEL GENERADOR EÓLICO A ESCALA

2.1. Túneles de viento

El túnel de viento utilizado para ensayar el rotor a pequeña escala pertenece al Laboratorio de Fluidodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UBA. Este túnel es cerrado, aspirado, con cámara de ensayos abierta, de geometría cilíndrica, de 60 cm de diámetro y alcanza velocidades de 20 m/s. La velocidad del escurrimiento es regulada mediante un diafragma. En la figura 1 se puede observar un esquema del túnel con sus partes principales.

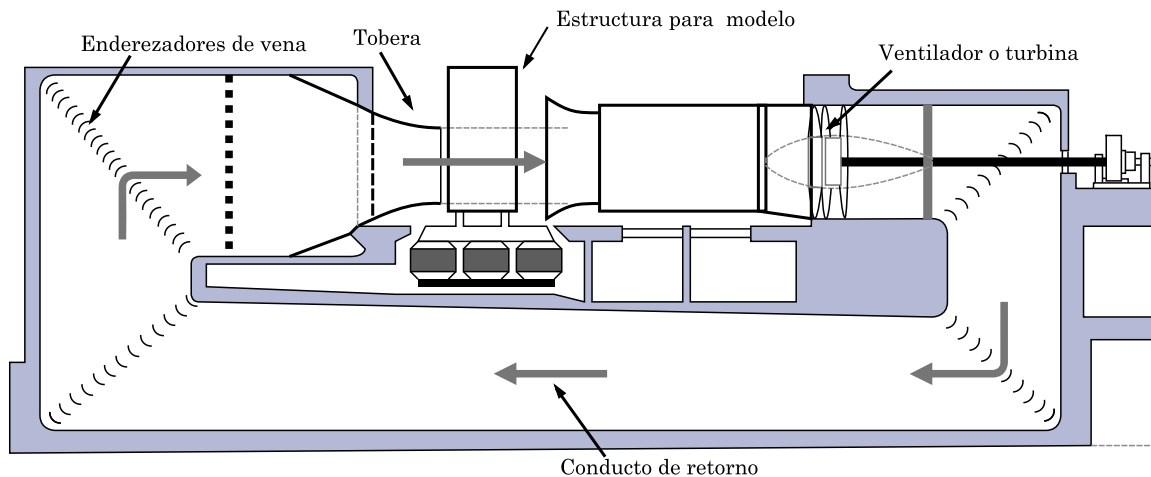


Figura 1: Partes principales del túnel de viento cerrado, de cámara abierta.

Inicialmente, se relevó el perfil de velocidades de viento en el túnel para verificar la uniformidad del mismo sobre el plano donde se montó el modelo. Los resultados obtenidos se observan en la figura 2. Puede verse que la velocidad es uniforme en los 40 cm de diámetro centrales, disminuyendo hacia los extremos.

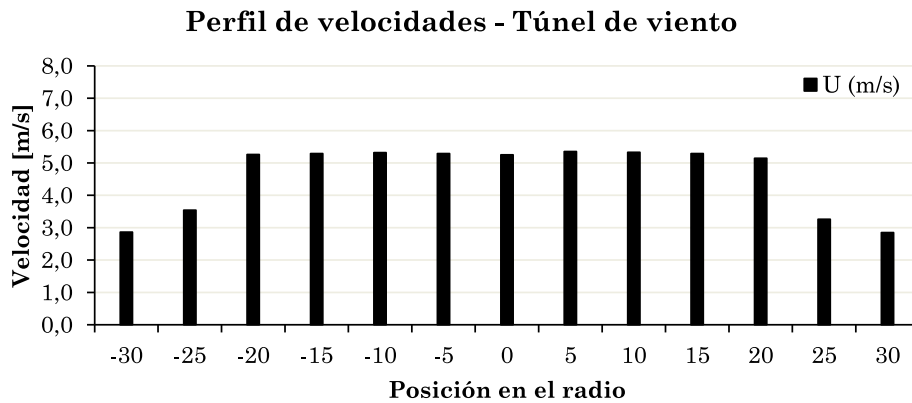


Figura 2: Perfil de velocidad en el túnel de viento.

2.2. Parámetros de diseño del rotor

Para determinar las características del rotor a diseñar, se consideraron los siguientes puntos:

- El diámetro del túnel es un factor limitante, con lo cual se decidió que el modelo no debería exceder los 40 cm, por lo cuál se adoptó un radio del rotor $R = 0,2\text{m}$.
- Como velocidad óptima de trabajo se optó por $U_\infty = 12 \text{ m/s}$, cercana a la velocidad nominal de muchas turbinas comerciales.
- Como relación de velocidades de punta de aspa ($\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty}$) óptimo se planteó trabajar con $\lambda = 6$, similar a la de las máquinas a plena escala.
- El número de aspas se fijó en $B = 3$ que es lo usual para valores de λ similares y facilita además el balanceo y la construcción del rotor.
- El perfil aerodinámico elegido para las aspas fue el NACA 0012, ya que se trata de un perfil cuya geometría y, por ende, su fabricación es relativamente sencilla. Se disponía, además, de aspas rectangulares de aeromodelismo con dicho perfil.

La potencia disponible en la corriente de viento, para los valores seleccionados de los parámetros, es:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A = 130 \text{ W} \quad (1)$$

donde U es la velocidad de la corriente libre, A es el área del rotor y ρ es la densidad del aire a la temperatura de interés, la cual se adopta en este trabajo igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$ a nivel del mar y a temperatura ambiente. La velocidad angular de trabajo óptima para $U_\infty = 12 \text{ m/s}$ y $\lambda = 6$ es:

$$\Omega = \frac{\lambda U_\infty}{R} = 360 \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

lo cual corresponde a $\frac{30}{\pi}\Omega \approx 3438 \text{ rpm}$. Una turbina ideal (de acuerdo a la teoría de Betz (Manwell et al., 2002)) podría extraer 77 W de la corriente de aire en las condiciones de diseño.

Una vez definidos los parámetros de velocidad de rotación y potencia, se seleccionó el generador a utilizar, resultando en un motor (marca Remmsi) de corriente continua (CC) de 24 V trabajando como generador, el cual tiene una potencia nominal de 100 W a 3000 rpm . Este motor permite, por sus dimensiones, ser intercambiado en caso de ser necesario trabajar a distinta

velocidad o potencia. El diseño adoptado permite instalar otros motores de iguales dimensiones pero distintos parámetros nominales, lo cual habilita en el futuro a realizar ensayos de rotores eólicos de diferentes características utilizando la misma estructura.

El hecho de utilizar un motor de corriente continua como generador brinda la posibilidad de, alimentándolo por medio de una fuente externa de tensión variable, poner a prueba el funcionamiento del equipo, verificar el balanceo, etc. por ejemplo cuando se cambia el juego de aspas.

2.3. Conjunto generador-rotor

La estructura necesaria para soportar todos los elementos debió ser tal que mantuviese perfectamente alineado el eje del rotor de paso variable con el eje del motor de CC utilizado como generador. Para este fin se dividió la estructura en cuaderñas o bancadas, sobre dos de las cuales se montaron los rodamientos del árbol del rotor y otras dos sobre las cuales se montó el motor de CC con su mecanismo de pivote para la medición de torque.

El motor utilizado como freno/generador tiene la capacidad de pivotar según su eje longitudinal para permitir la medición del torque (ver sección 2.4.3). Para esto, se lo montó sobre dos rodamientos. Los rodamientos están acoplados a las bancadas mediante dos piezas adaptadoras que se atornillaron al motor y permiten el montaje de los rodamientos, de forma tal que el freno es libre de rotar sobre su eje. A una de estas piezas adaptadoras se sujeta una palanca de longitud calibrada que transfiere la carga al sensor de fuerza desde donde se obtiene la lectura del torque que está generando el rotor. El acople entre el árbol del rotor y el del motor se realizó con un elemento elástico, de manera de atenuar las vibraciones que se pudieran producir por las diferencias geométricas de alineación entre ambos árboles y las propias del rotor y el generador.

El rotor fue construido a partir de un rotor modificado de helicóptero de aeromodelismo y adaptado para soportar tres aspas. El rotor de paso variable se maneja por una cadena cinemática que fija su posición en tres puntos, gracias a lo cual, moviéndolos de forma paralela al eje de giro, se obtiene el mismo cambio en el paso de las aspas. Este es el caso particular de ascenso/descenso del helicóptero en la aplicación original del rotor adaptado.

La única parte mecánica del sistema que requiere calibración es la cadena cinemática de actuación del paso. Se puede tomar como referencia el ángulo de paso en la punta del aspa, $\theta_{p,0}$, que es el ángulo entre la línea de la cuerda del perfil en la punta del aspa y el plano de rotación del rotor. Si algún aspa se encontrase desfasada respecto a las otras luego de su montaje, se puede corregir su paso utilizando la regulación de la pieza de mando correspondiente.

En la figura 3 se puede observar una foto del conjunto generador-rotor instrumentado completo montado para realizar los ensayos en el túnel de viento.

2.4. Instrumentación electrónica del generador

Para el desarrollo del sistema electrónico fue necesario primero identificar los parámetros necesarios para el trabajo, es decir las variables a utilizar tanto de entrada como de salida en el sistema. Tomando la electrónica del sistema como una caja negra, ésta debía ser capaz de leer los siguientes parámetros:

- Torque del generador, Q
- Velocidad angular del rotor, Ω
- Velocidad de la corriente libre, U

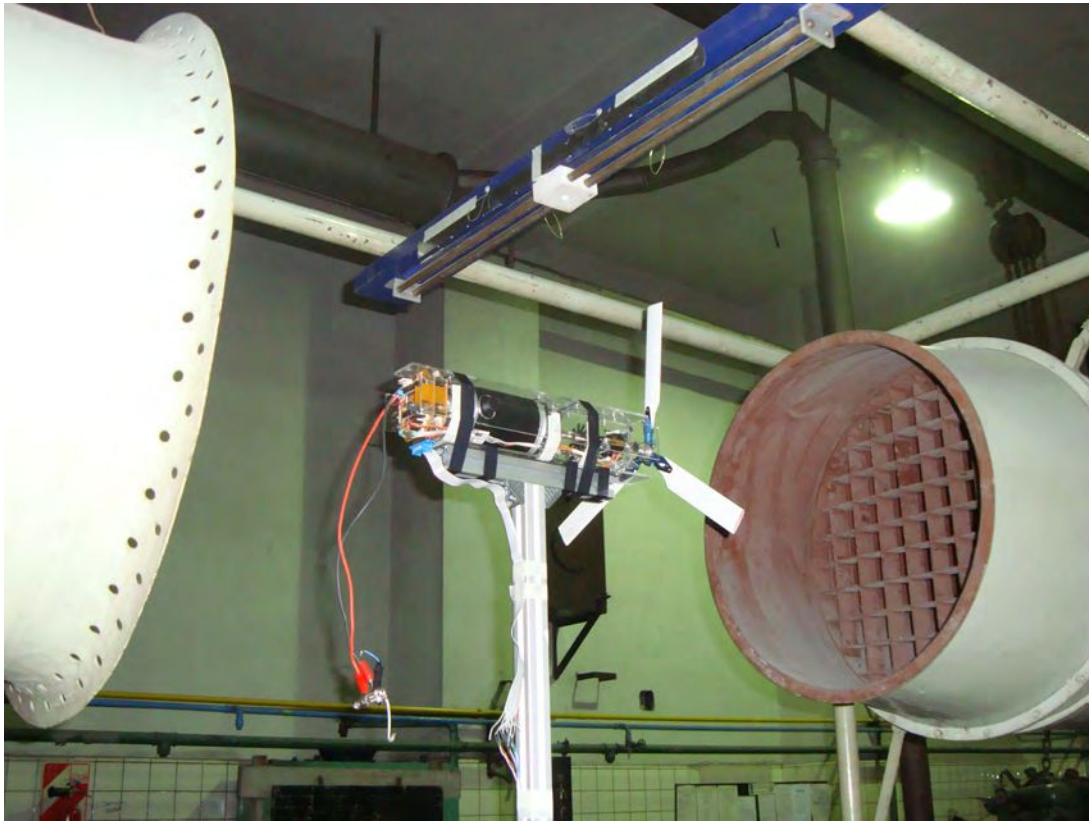


Figura 3: Conjunto generador – rotor montado en el túnel de viento

Por otro lado, también debía ser capaz de controlar en el equipo:

- Paso de las aspas, $\theta_{p,0}$
- Nivel de frenado

2.4.1. Lectura de la velocidad angular, Ω

La lectura de la velocidad angular del rotor se realiza mediante 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 30 ranuras, con lo cual genera 30 pulsos por cada revolución del eje. Cada pulso posee un flanco ascendente y uno descendente, el primero de los cuales es leído por el microcontrolador y almacenado automáticamente en un contador de eventos interno.

La velocidad se determina leyendo la cantidad de pulsos almacenados en el contador del microcontrolador en un período de tiempo dado, con lo cual se puede conocer la frecuencia. Debido a las vibraciones del eje, puede suceder que los flancos ascendente y descendente posean ruido, que puede ser interpretado como falsos pulsos. Para evitar esto se instaló, luego de verificar este fenómeno, un circuito del tipo *schmitt trigger 74LS14* en serie; este obtiene una onda cuadrada independientemente del ruido.

2.4.2. Lectura de la velocidad de corriente libre, U

La velocidad de la corriente libre se mide con un tubo Pitot junto con un sensor de presión diferencial con su amplificador. Además, se realizaron mediciones de velocidad en el túnel de

viento utilizando un sistema PIV (Particle Image Velocimetry) con el fin de comparar los valores obtenidos con los del tubo Pitot. Siendo el método PIV más preciso, permite contrastar ambos y tener una idea del error obtenido en la determinación de la velocidad de la corriente libre, U . Se encontró que el error es aproximadamente un 2 %.

2.4.3. Medición del torque, Q

La estrategia para llevar adelante dicha medición consiste en utilizar un sistema de palanca montado en el motor utilizado como freno. El brazo de palanca permite medir el torque en el rotor, Q , como una fuerza aplicada a una distancia del centro de rotación del eje. Dadas las dimensiones del dispositivo, cuyo cuerpo no supera los 80 mm 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. Todo este sistema tiene como ventaja el muy bajo costo frente a torquímetros dinámicos comerciales, su reducido tamaño y relativamente sencilla implementación de la electrónica asociada. Del análisis preliminar de potencia a obtener de la corriente de viento, se concluyó que un sensor de 14,7 N a 30 mm de distancia del eje es apropiado, facilitando además el montaje en el dispositivo. Con esta configuración, el sistema permite medir torques en el eje de hasta 0,5 Nm.

2.4.4. Paso de las aspas

La configuración del paso de las aspas es realizada por servos de corriente continua para aeromodelismo, del tipo EMAX ES08A analógicos. Estos requieren una señal cuadrada de ancho de pulso variable (PWM) como *set point* para su posición. Las ventajas que tienen son su bajo costo, alto nivel de integración y relativa facilidad de control para esta aplicación. Estas señales se generan dentro del microcontrolador que comanda la electrónica del sistema.

2.4.5. Frenado variable del rotor

Como se dijo previamente, el frenado del rotor se realiza por medio de un motor utilizado como generador, que disipa la potencia obtenida en el rotor en forma de calor en una lámpara o en una resistencia. La tensión generada por éste será proporcional a su velocidad angular, siendo la nominal de 24 V para 3000 rpm.

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, que permite obtener un frenado variable del rotor en un amplio rango de velocidades angulares. Como ejemplo, en la figura 4 se observa lo que sucede para una tensión de 24 V a la que se le aplica PWM: la carga estará sometida a una tensión eficaz variable en sus terminales dependiendo el ciclo de trabajo de la señal.

A la salida del generador se conectó en serie un rectificador constituido por un diodo en serie y un capacitor en paralelo con el objeto de mantener constante la tensión que alimenta el módulo PWM y evitar los picos transitorios debidos al colector del motor/generador. También se optó por aislar la señal de disparo del transistor de potencia.

3. RESULTADOS

Luego de construido el equipo, se efectuaron los ensayos para el rotor con aspas rectangulares, y se comparó los resultados con los calculados por la teoría del BEM. El programa que realiza los cálculos según esta teoría está basado en los desarrollos expuestos por [Manwell et al.](#)

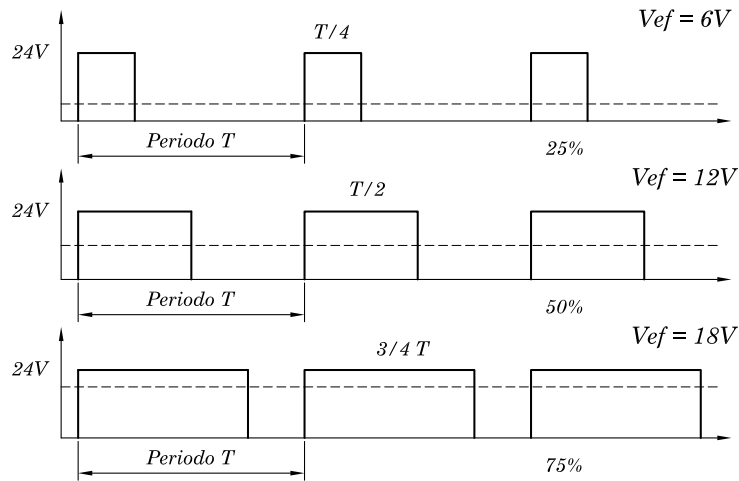


Figura 4: Detalle del funcionamiento de un sistema PWM

Velocidad de flujo libre (U)	12 m/s
Velocidad angular (Ω)	$360 \text{ s}^{-1} = 3437 \text{ rpm}$
Perfil	NACA0012
Ángulo de ataque óptimo (α)	8°
Radio del rotor	0,2 m
Densidad del aire (ρ)	$1,225 \text{ kg/m}^3$

Tabla 1: Variables de entrada

(2002); Burton et al. (2001). En la figura 5 se observa el generador en condiciones de ensayo. En la misma se aprecia el generador en régimen, el túnel de viento a 12 m/s, el tubo Pitot y el elemento disipador, en este caso una lámpara halógena.

Se consideró un régimen de funcionamiento nominal dado por los valores de los parámetros de la tabla 1, los cuales fueron elegidos de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.2. El rotor fue llevado desde el máximo λ (aproximadamente 4000 rpm) y de ahí hasta que se volviera inestable y se detuviera, en sucesivos incrementos de frenado por medio del dial de freno, manteniendo el paso de las aspas y la velocidad del túnel constantes; esto fue realizado con ángulos de calaje comprendidos entre 0° y 14° .

La potencia extraída del rotor se presenta adimensionalizada en el coeficiente de potencia C_P dado por la siguiente expresión:

$$C_P = \frac{P}{P_{wind}} = \frac{\Omega Q}{P_{wind}} \quad (3)$$

donde Ω es la velocidad angular, Q el torque extraído y P_{wind} la potencia disponible. En el caso de los ensayos numéricos el torque $Q = \int_{r_h}^R dQ$, donde dQ es el aporte al torque de una sección anular del plano del rotor calculada mediante BEM y en los experimentos en el túnel de viento es una de las variables relevadas.

3.1. Incertidumbres en la medición del C_P

Es importante conocer cuál es la dependencia del factor de potencia de las variables medidas y su sensibilidad a la variación de las mismas. Analizaremos a continuación la influencia que tienen en el cálculo del coeficiente de potencia y la incertidumbre en su medición.

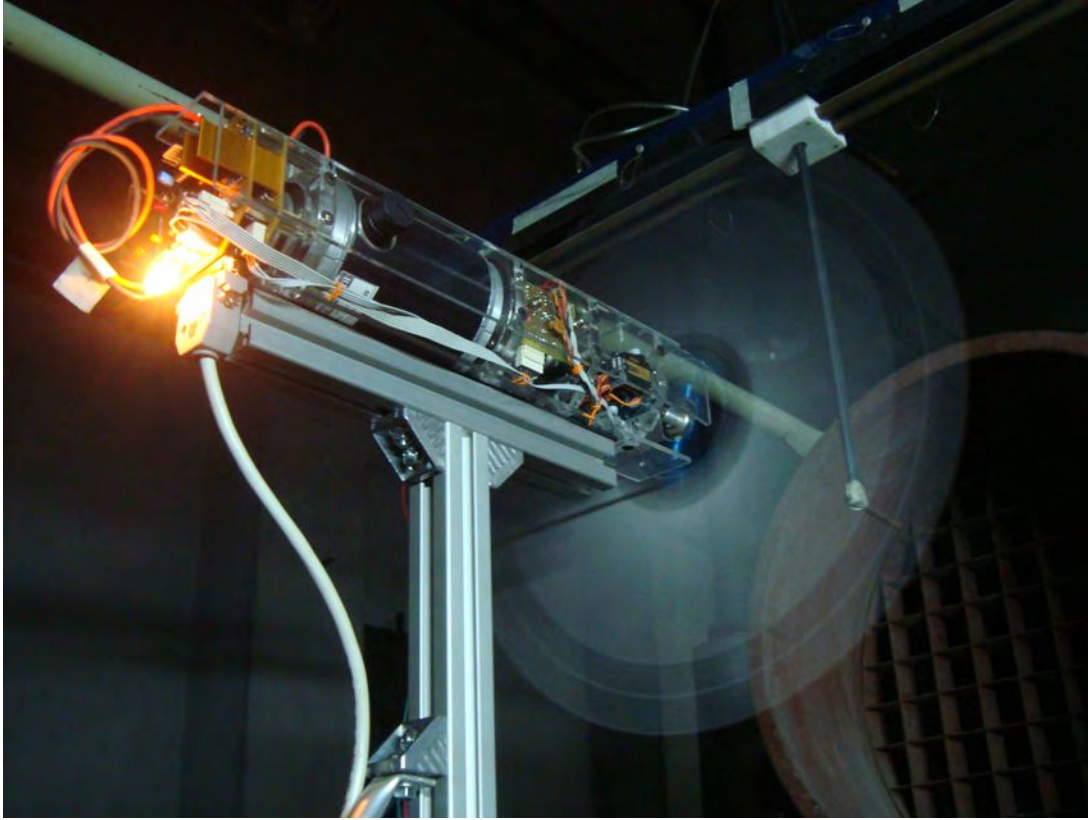


Figura 5: Generador en proceso de ensayo en túnel de viento

Aplicando la fórmula general de propagación de errores al coeficiente de potencia:

$$\Delta C_P = \left| \frac{\partial C_P}{\partial \Omega} \right| \Delta \Omega + \left| \frac{\partial C_P}{\partial Q} \right| \Delta Q + \left| \frac{\partial C_P}{\partial \rho} \right| \Delta \rho + \left| \frac{\partial C_P}{\partial U} \right| \Delta U + \left| \frac{\partial C_P}{\partial A} \right| \Delta A. \quad (4)$$

Considerando en este caso que la densidad del aire es constante, $\Delta \rho = 0$, y que también lo es el área del rotor, $\Delta A = 0$, el error relativo en el cálculo del C_P se puede escribir como

$$\varepsilon_{C_P} = \varepsilon_{\Omega} + \varepsilon_Q + 3\varepsilon_U, \quad (5)$$

donde ε_x representa la incertidumbre relativa de la variable x .

A modo de ejemplo, se reemplazaron los valores promedio relevados de la medición de C_P en función de λ para las variables relevantes para un ángulo de calaje de 6° . Los valores de los Δ se consignaron como la mitad de la diferencia entre máximos y el mínimos medidos, salvo ΔU , cuyo valor de 2% se obtuvo como fuera expuesto en 2.4.2. En la figura 6 se observa el aporte que tiene cada uno de los errores al error relativo total del coeficiente de potencia. En esta figura, se observa una gran influencia de la medición del torque para valores de λ altos.

3.2. Curvas $C_P - \lambda$ calculadas por teoría del BEM y experimentales

El desempeño de las turbinas eólicas en cuanto a la conversión energética se puede describir en general por medio la potencia obtenida en función de la velocidad del viento. El comportamiento aerodinámico de las aspas dependerá de λ y de su paso. La curva $C_P - \lambda$ posee toda la información necesaria para conocer el desempeño del rotor para todo el rango de operación, ya que en el λ se encuentran la velocidad de rotación y la de corriente libre, y el C_P es la relación

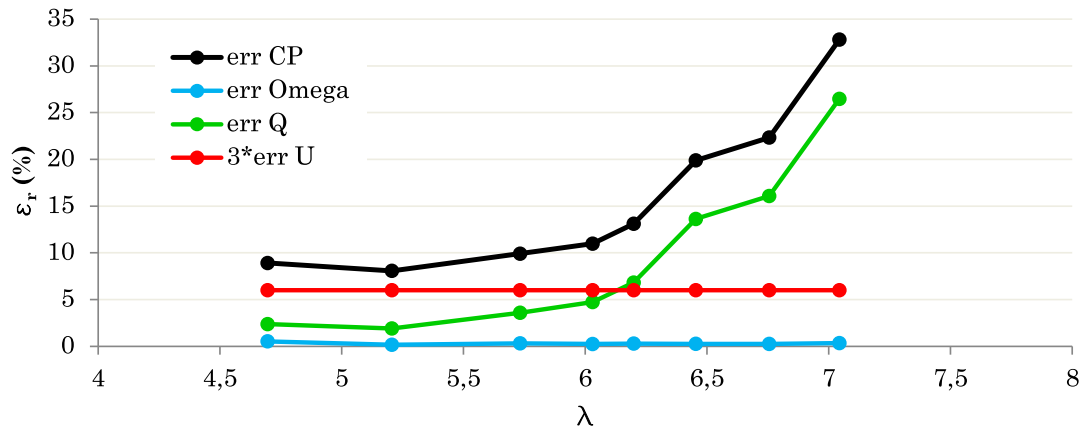


Figura 6: Incertidumbre en el cálculo del coeficiente de potencia en función de la relación de velocidades de punta de aspa

entre la potencia que se obtiene en el rotor y la disponible en la corriente de viento. Los datos de esta curva se pueden obtener de forma numérica o por ensayos. Al realizar los cálculos de forma numérica, se debe tener en cuenta que los coeficientes de sustentación y arrastre (C_l y C_d) varían con las características del escurrimiento, y no siempre están disponibles las características del perfil para los números de Reynolds de trabajo, que en este caso son inferiores a 10^6 .

Sobre la base de los coeficientes aerodinámicos tabulados por [Sheldahl y Klimas \(1981\)](#), se corrió el programa de cálculo de la teoría del BEM y se obtuvieron los resultados mostrados en este capítulo para distintos parámetros de funcionamiento. Los datos tabulados de C_l y C_d se presentan en [Sheldahl y Klimas \(1981\)](#) para ángulos de ataque entre -180° y $+180^\circ$, observando curvas muy similares para diferentes Re luego de los 20° , lo cual permite inferir que luego de los 20° los coeficientes fueron obtenidos por algún método similar al método de Viterna ([Viterna y Janetzke, 1982](#)). Los coeficientes utilizados para el modelo del BEM se tomaron de los datos tabulados para $Re = 40000$.

En una primera etapa se realizaron ensayos con aspas que consisten en secciones del perfil alar NACA 0012 rectas (sin alabeo) y con longitud de cuerda constante. En la figura 7 se comparan los resultados obtenidos en los ensayos de tunel de viento del modelo de rotor a escala con los resultados del algoritmo BEM variando λ , para las aspas rectangulares a distintos ángulos de calaje. Las primeras poseen el máximo coeficiente de potencia (0,218) a 10° y a $\lambda = 4,95$, mientras que en las segundas se encuentra a 6° y a $\lambda = 5,5$ y asume un valor de 0,256. La diferencia porcentual entre los coeficientes de potencia máximos es de un 16%.

Se observa, a su vez, que las curvas $C_p - \lambda$ obtenidas con el generador presentan un comportamiento de $C_{P,máx}$ en función del ángulo de calaje similar al presentado en las curvas BEM. Así en la figura se observa inicialmente un incremento de $C_{P,máx}$ con $\theta_{p,0}$ (de 6° a 10° para el generador y de 4° a 6° para las curvas BEM) y luego el $C_{P,máx}$ decrece con $\theta_{p,0}$.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los detalles constructivos de un sistema de medición de potencia en tiempo real para pequeños rotores eólicos, permitiendo el control a lazo abierto del ángulo de calaje de las aspas y la carga aplicada al rotor. En el desarrollo de este trabajo se diseñó y construyó un sistema electrónico de instrumentación para medir cada una de las variables

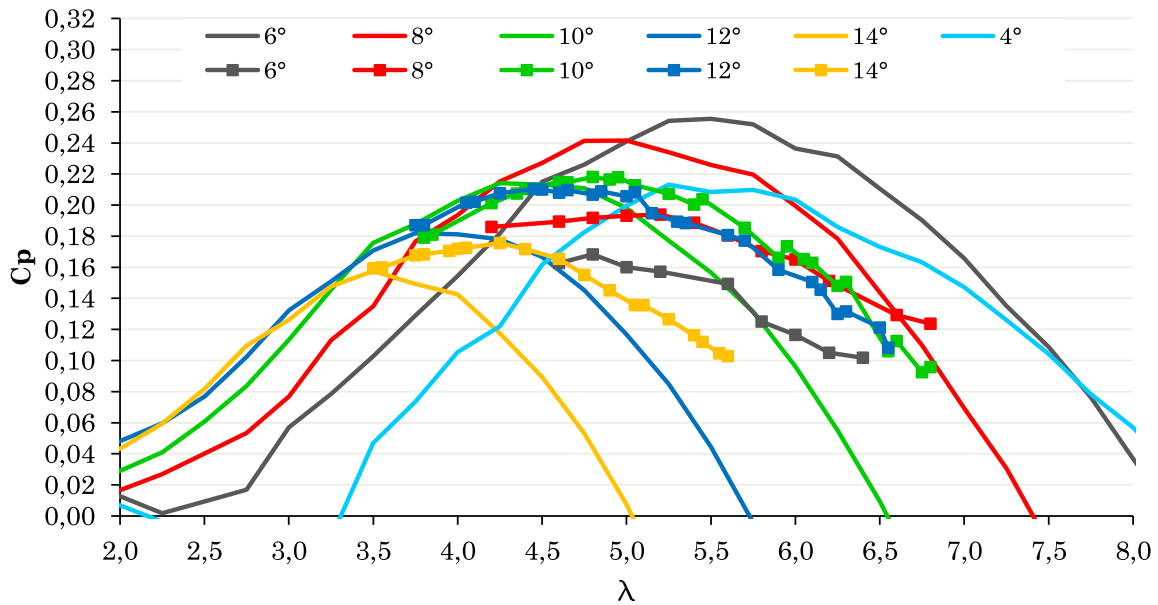


Figura 7: Curvas $C_P - \lambda$ según BEM y experimentales de las aspas rectangulares a distintos pasos

involucradas en los ensayos del rotor, como también una interfaz para la visualización y el almacenamiento de datos. De esta forma, se logró el desarrollo de una instalación sobre la cual se pueden realizar futuros estudios sobre aspas, tareas académicas, docentes y de investigación, sentando también un importante antecedente para este tipo de desarrollo en FIUBA.

Se comparan resultados experimentales obtenidos mediante este modelo a escala con los obtenidos mediante un modelo numérico basado en la teoría del momentum del elemento de aspa (BEM) para un rotor de aspas rectangulares. A pesar de las fuertes hipótesis de la teoría del BEM y los errores del sistema de medición desarrollado, los ensayos del rotor resultan consistentes con los resultados que arroja la teoría. Las discrepancias entre los resultados experimentales y los calculados por medio de la teoría intentarán ser salvadas en futuros trabajos mediante el relevo de nuevos coeficientes de sustentación y arrastre en una balanza de perfiles instrumentada a tal fin y mejoras en el sistema de medición.

Como futuras extensiones en el marco de este proyecto se puede mencionar:

- Calcular y fabricar aspas con diferentes geometrías y perfiles, que incluso puedan variar a lo largo de la misma.
- Fabricar y realizar mediciones de los coeficientes aerodinámicos de perfiles en la balanza de perfiles. En primer lugar del NACA 0012, pero además, algunos perfiles comunes en turbinas eólicas como el NACA 4412 y el DU 93-W-210, cuyos modelos ya fueron construidos en el transcurso de este trabajo.
- Mejorar las rutinas de algoritmo BEM para utilizar datos interpolados de flujos a distintos números de Reynolds y poder incluirlos en sus rutinas iterativas.
- Ensayar el generador eólico en un túnel de viento de mayor sección de trabajo para evaluar la influencia del efecto de bloqueo.
- Agregar al sistema la capacidad de medir el empuje sobre el rotor.

- Sobre la base del cálculo de incertidumbre derivado en sección anterior, trabajar para reducir los errores en las mediciones que mayor influencia tienen en el cálculo del coeficiente de potencia.

REFERENCIAS

Burton T., Sharpe D., Jenkins N., y Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*. Wiley, Chichester, UK, 2001.

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

Sheldahl R. y Klimas P. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. Informe Técnico, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1981.

Viterna L.A. y Janetzke D.C. Theoretical and experimental power from large horizontal-axis wind turbines. Informe Técnico, National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, OH (USA). Lewis Research Center, 1982.