

Estudio de Controles de Paso de Pala para Generador eólico de Baja Potencia, UTN1899

Bufanio Ruben Domingo*, De Villafior Alejandro Blas*, Ruscio Juan Pablo*,
Rubido Javier, Garbuglia Hugo, Stortoni Carlos

Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional
ruben.bufanio@speedy.com.ar, devillab@speedy.com.ar, jpruscio@hotmail.com
javierrubido@yahoo.com.ar, hugogar@ciudad.com.ar, damy16@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo forma parte del avance del proyecto PID UTN1899 y tiene el propósito de incrementar capacidades en el área energética, en particular la eólica.

Es por ello con el objetivo de obtener mejor desempeño de las turbinas eólicas respecto a la producción de energía total en relación a su vida útil, y teniendo en cuenta las características particulares de las condiciones atmosféricas, por ejemplo el alto nivel de turbulencia, es que se estudian diferentes métodos de control para turbinas de baja potencia en condiciones de trabajo por encima del viento nominal.

Este estudio en particular investiga el desempeño de un aerogenerador de potencia nominal 200 W de paso variable, fundamentalmente en la zona de carga total, con la idea de realizar comparaciones de desempeño respecto al amortiguamiento de las cargas aerodinámicas como a la de potencia obtenida, contra otro de paso fijo con control de potencia en Stall o por acción de Furling.

Debido a que el desarrollo está pensado para baja potencia con la finalidad de sencillez y costos reducidos, es que se elabora un sistema de control de paso variable mecánico a través de acción centrífuga.

Para lo anterior se aprovecha la construcción, en etapa previa, de un aerogenerador de 700 W, incluyendo su electrónica asociada, con rotor por control de potencia por pérdida aerodinámica "Stall" (de paso fijo) y furling. Dada la necesidad de ensayo en túnel de viento se lo escala en otro de menor diámetro, como se indicó, de potencia nominal 200 W. Se muestran luego los primeros resultados obtenidos con las respectivas conclusiones.

Palabras Claves: Eólica, Paso de Pala, Control de potencia

1. INTRODUCCIÓN

Como se indicó en el resumen, se dio comienzo (a finales de año 2012) a la construcción de un prototipo de generador eólico de 700 W de potencia (Hugh Piggott), con control de potencia por furling y paso de pala fijo. El estudio de condiciones de viento que pueden afectar su vida útil en la zona de carga total hicieron al desarrollo de un sistema de control mecánico, que acciona de manera conjunta y sincronizada el paso de pala por fuerza centrífuga con el objetivo de mitigar cargas aerodinámicas en el sector de regulación de potencia. Dada las dimensiones con que se cuenta de túnel de viento, fue necesario escalar el primer prototipo a otro de menor diámetro de longitud de pala 0.6 m.

Antes de comenzar, con lo investigado, se presenta un resumen de lo hecho al momento, para luego dar detalle del modelo aerodinámico del rotor, desarrollo del sistema de paso variable por acción de centrífugos, tanto en su modelado, construcción y sistema electrónico de adquisición del ángulo de paso de pala. Dato, este último, de gran importancia para analizar desempeño y contrastar a través del software de modelado y simulación aerodinámica.

Dada la dinámica del sistema rotórico y por lo tanto previo a los ensayos en túnel de viento fue necesario armar un banco de pruebas para un mejor y más sencillo análisis del funcionamiento del sistema centrífugo. En lo que sigue, más adelante, se muestra detalle de tal tarea.

2. OBJETIVO DE LA PROPUESTA

La Figura 1 muestra el perfil alar de la pala construida, cuyo diseño para facilitar su realización manual tiene similitud a un NACA 4412, [1, cap. 3] con cuyas coordenadas a través de software informático, QBlade [9], permite mostrar por medio de Figura 2 a), la relación del coeficiente de sustentación "CL", en puntera de pala, respecto del ángulo de ataque del viento incidente y la Figura 2 b) la curva de potencia mecánica en función de la velocidad del viento. A partir de ellas se muestra el sector de trabajo buscado [1], [2], con la idea de que el paso de pala o pitch ubique el funcionamiento en una zona estable (sector lineal) de la curva de "CL" para vientos por encima del nominal, evitando de esta manera regular en condiciones inestables por Stall o por acción del furling. Se prioriza el estudio de la curva CL vs. Alpha sobre otras curvas aerodinámicas como "glide coefficient" dado que el trabajo apunta a la zona de control de potencia.

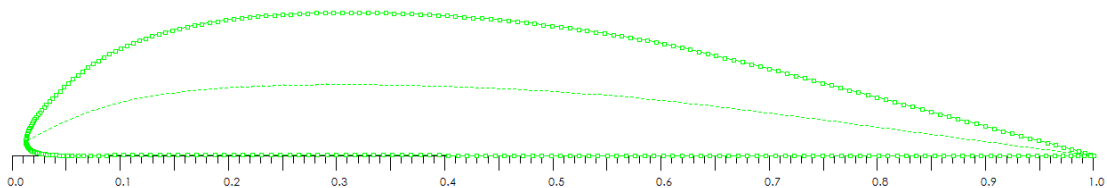


Figura 1, perfil de puntera de pala utilizado en el estudio

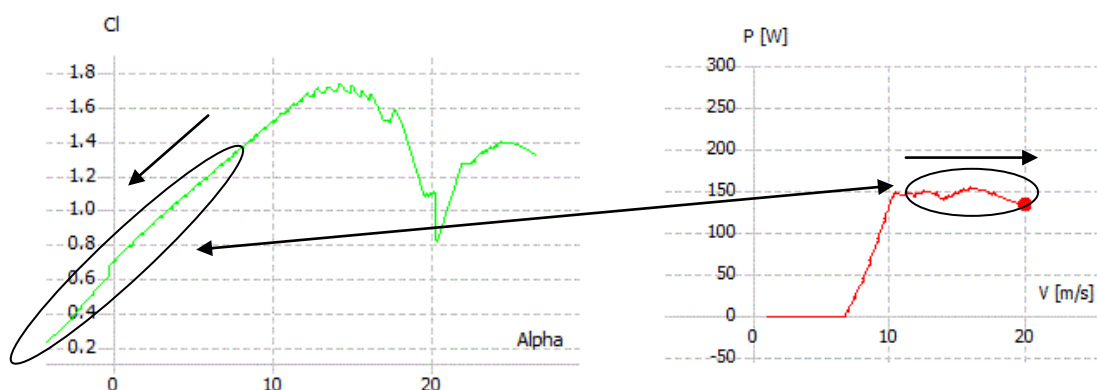


Figura 2, a) CL en función de ángulo de ataque, b) Potencia de salida en función de velocidad de viento

3. ETAPAS DESARROLLO AEROGENERADOR CON PASO DE PALA FIJO

Se construyó de manera completa una turbina eólica de 700 W de potencia con generador sincrónico a imanes permanentes de polos no salientes PMSG, [3].

A modo de resumen, ya que el detalle se presentó en evento anterior (2014), se indican las etapas de su realización.

Construcción de generador sincrónico a imanes permanentes

- a) Determinación de número de vueltas y sección de bobinas de estator
 - b) Armado de molde estator
 - c) Montaje de bobinas generador y conexión dentro de molde estator
 - d) Determinación de tipo y cantidad de imanes de rotor (n° de polos)
 - e) Construcción de rotor generador con imanes permanentes
- Construcción de rotor aerodinámico
- a) Determinación de material y dimensiones aerodinámicas para la construcción de las palas
 - b) Construcción de palas
 - c) Ensamblaje de las palas y equilibrio de rotor
- Construcción sistema mecánico
- a) Construcción cuerpo aerogenerador
 - b) Desarrollo de tren de transmisión mecánico
 - c) Construcción cola aerogenerador (furling)
- Sistema eléctrico
- a) Cálculo de rectificador y regulador de voltaje
 - b) Estimación de dimensionamiento de baterías y dump load.
 - c) Armado de configuración eléctrica y etapa de control
- Ensamble y prueba aerogenerador
- a) Montaje generador eléctrico y prueba previa con variador de velocidad/motor eléctrico.
 - b) Montaje de caja estanca para distribución de energía generada y furling

4. DESARROLLO DE SISTEMA MECÁNICO DE CONTROL DE PASO DE PALA

El control de paso de pala, se muestra en forma esquemática en Figura 3a) y 3b). Se puede observar el sistema mecánico completo, con apertura conjunta y sincronizado de palas.

En él, masas ubicadas en la raíz de cada una de ellas al girar accionan por fuerza centrífuga la apertura o paso de pala. Un resorte ubicado en el centro del cubo compensa dicha fuerza y permite calibrar la velocidad de giro de inicio de apertura [4], [5].

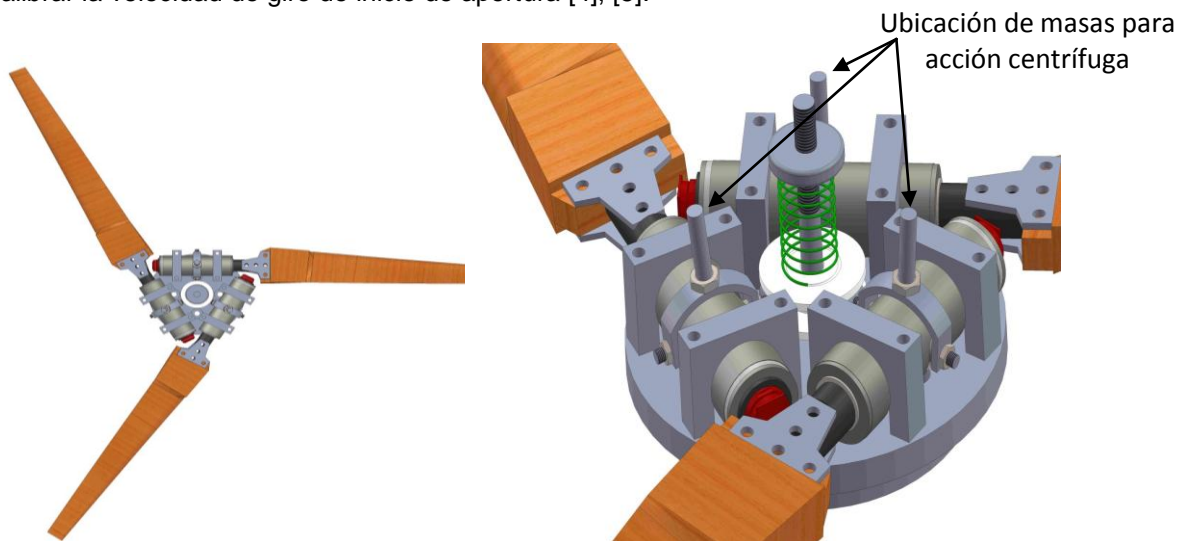


Figura 3, a) Rotor completo, b) Cubo con sistema mecánico de paso de pala variable por fuerza centrífuga

4.1 DETALLE Y MODELIZACIÓN DEL SISTEMA CENTRÍFUGO

A continuación se presenta en Figura 4 un corte transversal del sistema de cambio de paso de pala centrífugo.

Donde:

- m_1 = masa del vástago que contiene las masas de calibración
- m_a = masa agregada para la calibración centrífuga
- m_3 = masa del vástago de soporte del cilindro de interface deslizante
- m_4 = masa del cilindro de interface deslizante con el sincronizador
- m_5 = masa de la horquilla en "U"
- m_9 = masa del eje interno de la pala
- F_1 = fuerza centrífuga de M_1 y M_a

- F2 = fuerza elástica del resorte
- F3 = fuerza centrífuga de M3
- F4 = fuerza centrífuga de M4
- F5 = fuerza centrífuga de M5
- F9 = fuerza centrífuga de M9
- FR1 = fuerza de roce del cilindro interface deslizante con el sincronizador
- FR2 = fuerza de roce de la camisa de nylon interna contra el cilindro exterior
- ω = velocidad de giro
- Kr = constante elástica del resorte
- Ke = coeficiente de fricción (nylon/acero)
- X = compresión del resorte
- β = ángulo de pitch

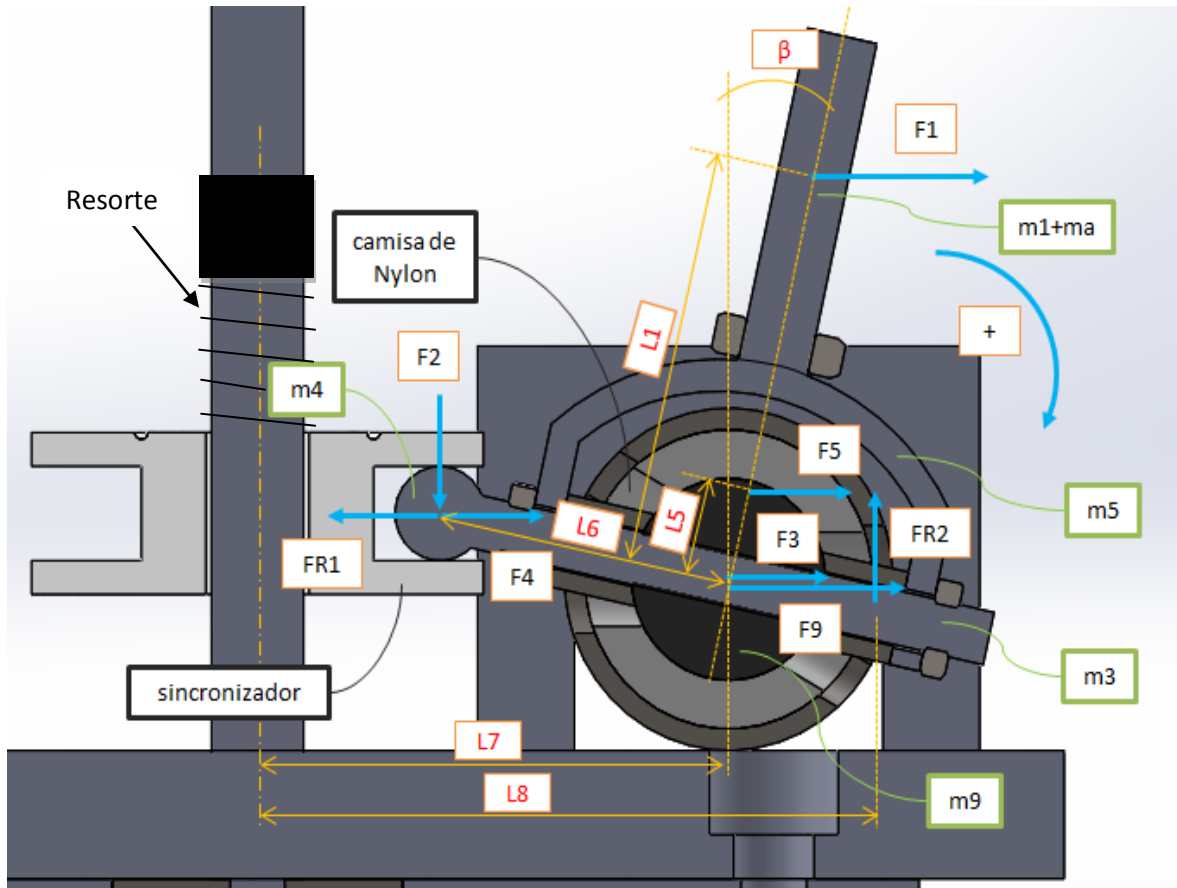


Figura 4, corte transversal del sistema de cambio de paso de pala centrífuga

Se plantea el equilibrio de momentos respecto al eje interno de la pala y se obtienen las siguientes ecuaciones de velocidad de giro versus ángulo de pitch para el camino de apertura y cierre del sistema. Cabe aclarar que se desprecia por los valores obtenidos el momento aerodinámico respecto de los otros del sistema.

Apertura del sistema centrífugo en "ida": Velocidades de giro en aumento

$$\omega = \frac{(\sqrt{Kr(X + L6 \sin \beta)(Ke^2 L7 - Ke^2 L8 + L6 \cos \beta + KeL6 \sin(\beta))})}{\sqrt{3} / (\sqrt{(KeL7^2 m1 - KeL7L8m1 + KeL7^2 m3 - KeL7L8m3 + KeL7^2 m4 - KeL7L8m4 + KeL7^2 m5 - KeL7L8m5 + KeL7^2 m9 - KeL7L8m9 + KeL7^2 ma - KeL7L8ma + L1L7m1 \cos \beta - KeL6L7m4 \cos \beta + KeL6L8m4 \cos \beta + L5L7m5 \cos \beta + L1L7ma \cos \beta + KeL1L7m1 \sin \beta - KeL1L8m1 \sin \beta + KeL5L7m5 \sin \beta + L6L7m4 \sin \beta - KeL5L8m5 \sin \beta + KeL1L7ma \sin \beta - KeL1L8ma \sin \beta + L1^2 m1 \cos \beta \sin \beta - L6^2 m4 \cos \beta \sin \beta + L5^2 m5 \cos \beta \sin \beta + L1^2 ma \cos \beta \sin \beta))}} \quad (1)$$

Cierre del sistema centrífugo en “vuelta”: Velocidades de giro en disminución

$$\omega = \frac{\sqrt{Kr(X + L6 \sin \beta)(Ke^2 L7 - Ke^2 L8 + L6 \cos \beta - KeL6 \sin(\beta))}}{\sqrt{3} \sqrt{(-KeL7^2 m1 + KeL7L8 m1 - KeL7^2 m3 + KeL7L8 m3 - KeL7^2 m4 + KeL7L8 m4 - KeL7^2 m5 + KeL7L8 m5 + -KeL7^2 m9 + KeL7L8 m9 - KeL7^2 ma + KeL7L8 ma + L1L7 m1 \cos \beta + KeL6L7 m4 \cos \beta - KeL6L8 m4 \cos \beta + L5L7 m5 \cos \beta + L1L7 ma \cos \beta - KeL1L7 m1 \sin \beta + KeL1L8 m1 \sin \beta - KeL5L7 m5 \sin \beta + L6L7 m4 \sin \beta + KeL5L8 m5 \sin \beta - KeL1L7 ma \sin \beta + KeL1L8 ma \sin \beta + L1^2 m1 \cos \beta \sin \beta - L6^2 m4 \cos \beta + L5^2 m5 \cos \beta \sin \beta + L1^2 ma \cos \beta \sin \beta)}} \quad (2)$$

En Figura 5 se muestra el plot de las ecuaciones de más arriba, modeladas a través del software “mathemática”, estas permiten evaluar en forma teórica la acción, como principal, de la “Ma”; masa de centrífugos, “X”; precompresión de resorte, “ke”, coeficiente de fricción nylon-acero; kr constante elástica del resorte.

Por otro lado los gráficos de línea continua dan los datos teóricos de las ecuaciones anteriores y los de puntos los obtenidos en banco de prueba. El conjunto de curvas superiores indican la acción en apertura y las de más abajo el de cierre.

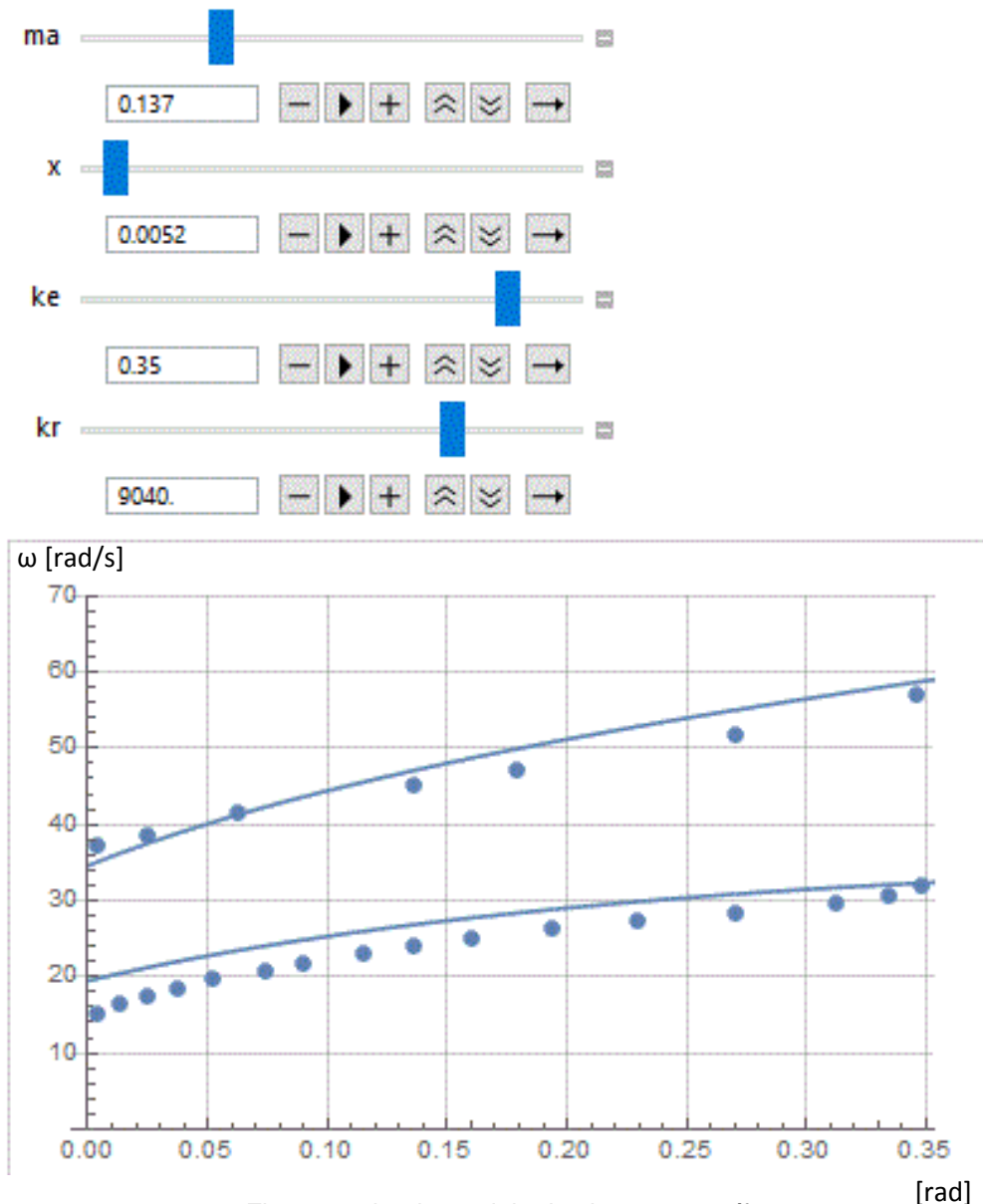


Figura 5, plot de modelo de sistema centrífugo

De la separación de las curvas, de apertura y cierre, de gráfico anterior se desprende que el modelo se comporta con una histéresis. Este efecto es indeseable ya que produce una caída en la potencia absorbida del viento en el momento de retorno desde las velocidades superiores a la nominal o hacia inferiores.

Del análisis paramétrico del coeficiente de fricción del sistema "Ke", se concluye que con su reducción se disminuye el efecto de la histéresis.

4.2. DETALLE DE CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA CENTRÍFUGO

Realizado el modelo a través de aplicativo informático, y analizado teóricamente, se pasó al mecanizado del cubo del aerogenerador

En las siguientes Figura 6 se muestra parte del desarrollo constructivo del control de paso de pala a través de centrifugos.



Figura 6, Mecanizado de control de paso de pala variable con centrifugo

5. DESARROLLO DE PLACA ELECTRONICA PARA ADQUISICIÓN DE ÁNGULO DE PASO DE PALA

Para el análisis del desempeño en túnel de viento se ha construido un dispositivo electrónico [6] cuyo circuito se muestra en Figura 8 y placa electrónica y sensores en la Figura 7a) y 7b). Dicho desarrollo se fundamenta a través de la board LPCXpresso con la programación del microcontrolador de 32 bits LPC1769. Este último es alimentado por una conversión de potencia interna de elevado rendimiento (Buck), lo cual hace de su conjunto un sistema de bajo consumo de corriente, menor a los 0.1 A. Posibilitando a su vez, toda la electrónica, ser alimentada con una batería comercial de 9V.

La placa electrónica es adosa al cubo del aerogenerador, por lo cual gira solidaria a este. Sensores magnéticos ubicados en la raíz de cada pala, conectan por medio de sus cables a la electrónica de la placa principal, y entregan una tensión proporcional al ángulo barrido por cada pala.

Las medidas de ángulos se transmiten vía Bluetooth, a una frecuencia de 1 Hz, y son recibidas por un ordenador o teléfono móvil. Luego, para analizar desempeño, se asocian con las del ensayo en banco de pruebas o túnel de viento.

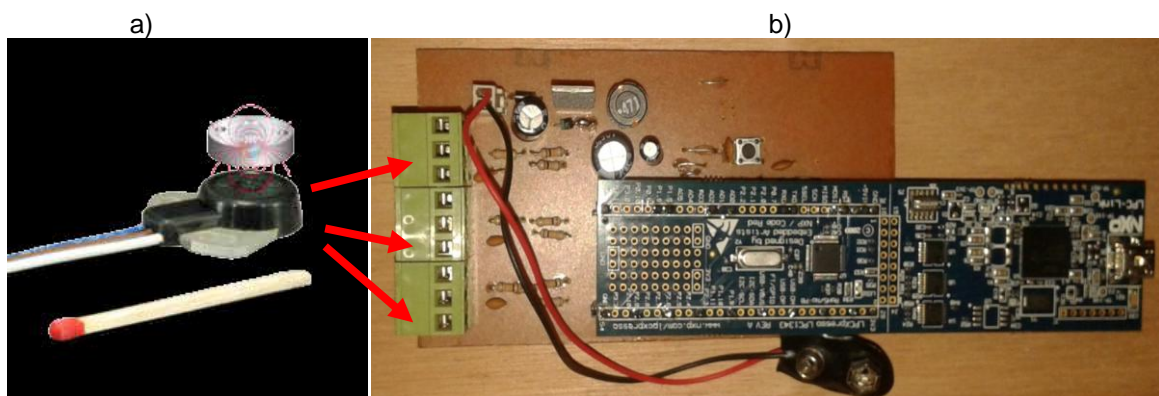


Figura 7, a) sensores magnéticos, b) placa electrónica de transmisión del ángulo de paso de pala

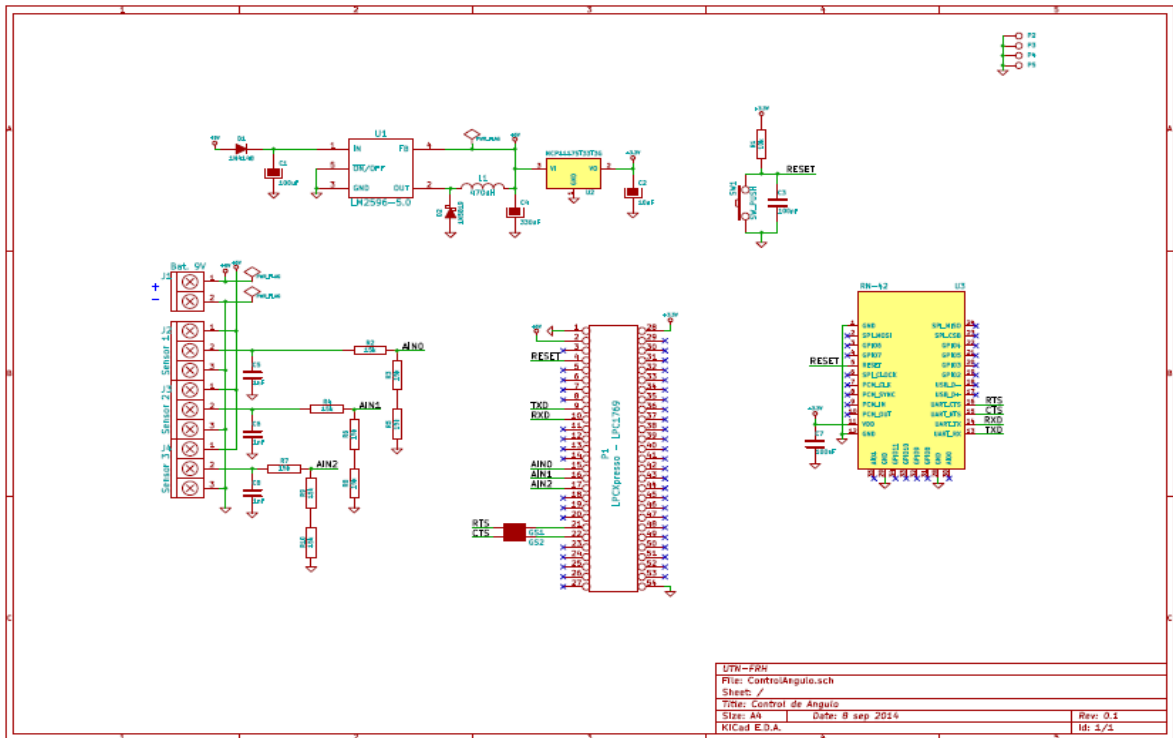


Figura 8, Circuito electrónico para el censado del ángulo de paso de pala

6. DETERMINACIÓN DEL PITCH POR MEDIO DE MODELADO AERODINÁMICO DEL SISTEMA

Como se comenta en apartados anteriores se utiliza la teoría de BEM (elemento de pala) [7], [8] para establecer las condiciones previas de funcionamiento del sistema de control de potencia por paso de pala. Posterior a los ensayos, con los resultados, se vuelve a evaluar desempeños con mismo método.

Para aplicar la teoría se divide la pala en la mayor cantidad de porciones posibles, se dan condiciones de entrada como velocidad de giro, velocidad de viento, n° de palas, coeficientes del perfil en función del ángulo de ataque (sustentación y resistencia), etc. A partir de aquí, y para cada elemento de pala, con las ecuaciones de más abajo como principales, se realiza un proceso iterativo hasta lograr convergencia en los índices de inducción axial y radial.

A través de dichos valores se puede estimar el ángulo de paso de pala necesario para la zona de regulación de potencia. Dado lo laborioso de la tarea y la existencia de software especializado en dicha teoría, es que se utiliza el programa QBlade, [9], mismo por permitir una gran cantidad de otras posibilidades de aplicación para con este trabajo.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{N.c.C_L}{8.\pi.r} \left[\frac{1}{\tan \varphi.\sin \varphi} + \frac{\varepsilon}{\sin \varphi} \right] \quad (3)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{N.c.C_L}{8.\pi.r} \left[\frac{1}{\cos \varphi} - \frac{\varepsilon}{\sin \varphi} \right] \quad (4)$$

$$\alpha = \varphi - (\beta + \theta) \quad (5)$$

$$C_{pi} = 4.a'.(1-a)\lambda^2.\left(\frac{r_i}{R}\right)^2 \quad (6)$$

$$C_{Ptotal} = \frac{2.\left[\sum_{i=1}^B \Delta r_i C_{pi} r_i\right]}{R^2} \quad (7)$$

$$P = C_{Ptotal} \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2 \quad (8)$$

Donde:

a = factor de inducción axial

a' = factor de inducción radial

N= n° de palas, para este caso 3

c = longitud de la cuerda
 r = distancia desde la raíz a cada centro de porción de pala
 φ = ángulo de componente de viento resultante respecto al plano de rotación
 β = ángulo de paso de pala
 θ = "twist" de pala
 α = ángulo de ataque
 C_L = coeficiente de sustentación
 C_D = coeficiente de resistencia
 $\varepsilon = C_D/C_L$
 λ = relación de velocidades de punta pala
 V = velocidad del viento
 R = radio de la pala
 ρ = densidad del aire
 Δr = longitud del elemento de pala
 $i = n^\circ$ de elemento de pala
 E = cantidad total de elementos de pala
 C_{pi} = coeficiente de potencia de elemento de pala
 C_{ptotal} = coeficiente de potencia total
 P = potencia total

7. ESTRATEGIA DE CONTROL

En base a lo anterior se estima la apertura o ángulo del paso de pala siguiendo el siguiente criterio. Se establece una brecha en la zona nominal de un 20% de la potencia ya que esta permite una variación de velocidad de entre 60rpm a 80rpm, [4], necesaria para posibilitar la acción del sistema centrífugo.

$$P = P_i + \left(\frac{P_f - P_i}{V_f - V_i} \right) (V - V_i) \quad (9)$$

P = potencia
 P_i = potencia de inicio del control
 P_f = potencia final del control
 V = velocidad de viento
 V_i = velocidad de viento inicial del control
 V_f = velocidad final del control

Dada la variación de control de potencia, se establece a través del conocimiento de la constante de torque electromagnético, lineal en función de la velocidad de giro (banco de prueba con generador cargado resistivamente), las velocidades angulares de equilibrio.

$$\omega_e = \sqrt{\frac{P}{K_e}} \quad (10)$$

ω_e = velocidad angular de equilibrio
 K_e = constante electromagnética en [Nm] / [rad/s]

Con la potencia obtenida de ecuación 9) y la velocidad de viento se define un coeficiente de potencia de trabajo

$$C_p = \frac{2P}{\rho V^3 A} \quad (11)$$

C_p = coeficiente de potencia
 A = área de rotor

A través de la velocidad angular de equilibrio para una velocidad de viento definida se obtiene la relación de puntera de trabajo

$$\lambda = \frac{\omega_e R}{V} \quad (12)$$

Definido lo anterior se obtiene por medio del aplicativo informático el paso de pala que satisface a cada coeficiente de potencia y su relación de punta de pala.

Por otro lado se ingresa, en el aplicativo, por el tipo de máquina y datos experimentales, un rendimiento mecánico y eléctrico de 0.8 y 0.87 respectivamente.

A través de Figuras 10, 11 y 12 se muestra potencia, paso de pala y ángulos de ataques necesarios en función de la velocidad del viento. Cabe aclarar que aunque BEM sobre estima la potencia de pico entre un 10% a 15%, se minimiza dicho desvío aplicando las correcciones “de Prandtl + termino de fuerza nula en puntera”, “de CL por centrifugado de capa límite” y “de CD por variación de número de Reynolds”.

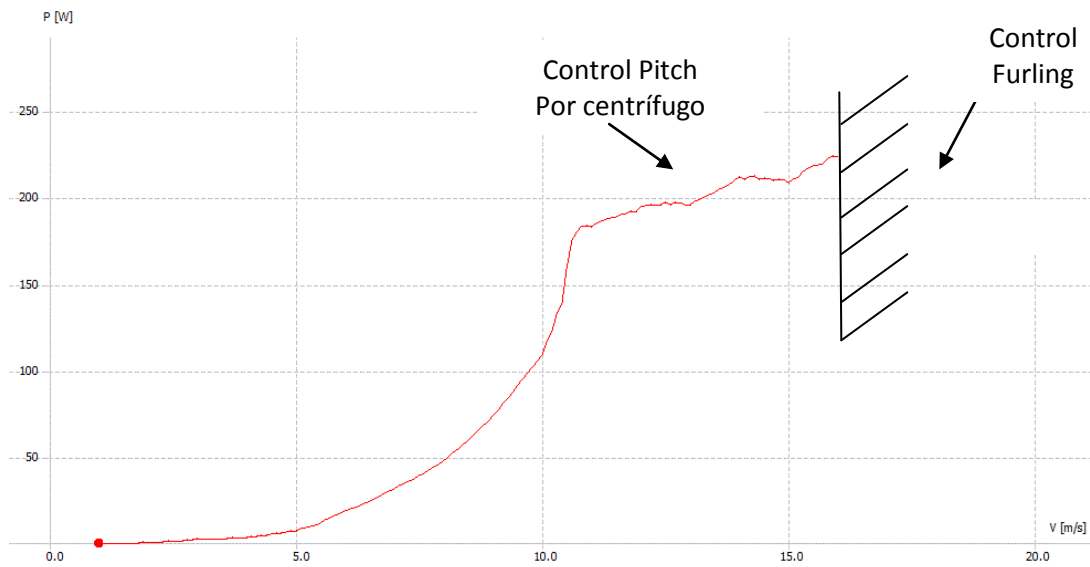


Figura 10, potencia de salida eléctrica en función de velocidad de viento

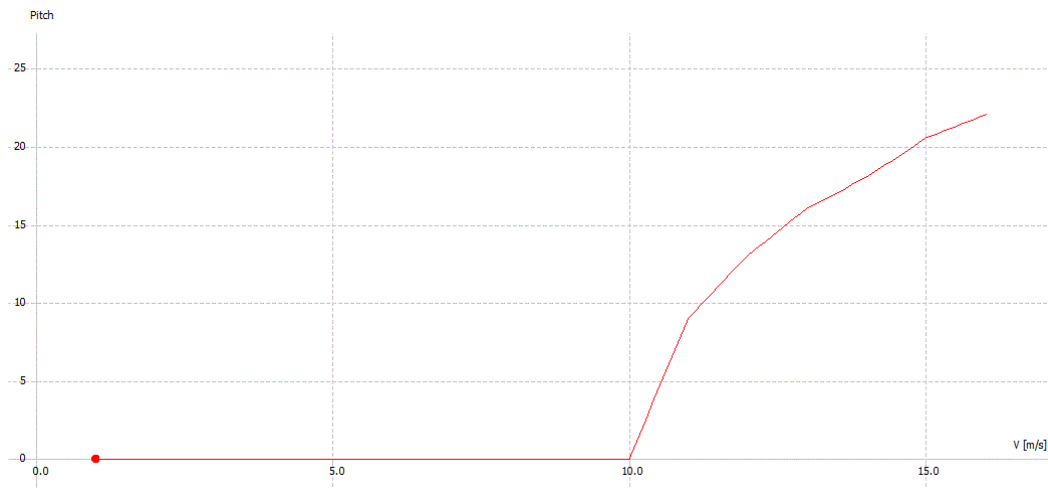


Figura 11, paso de pala consigna en función de la velocidad de viento

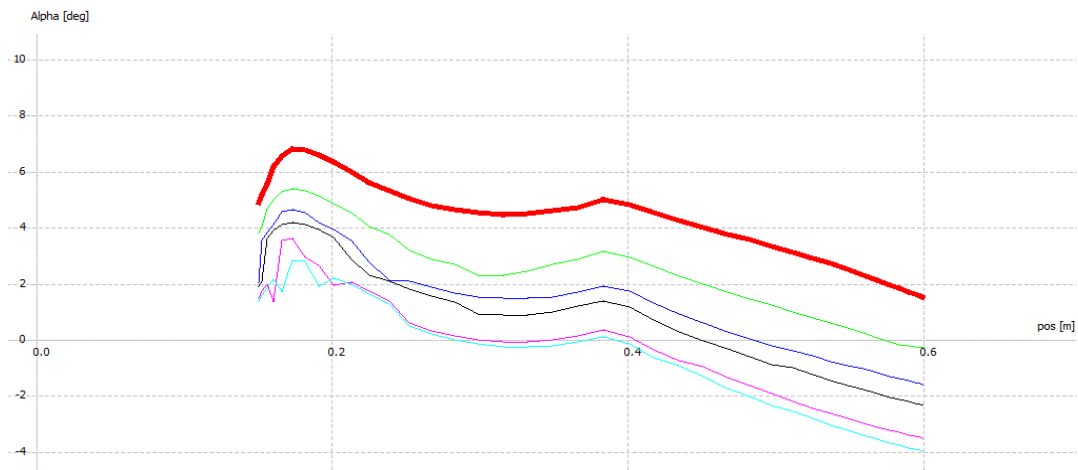


Figura 12, ángulos de ataque a obtener sobre la envergadura del perfil para velocidades de viento entre 11 m/s (curva superior de color rojo), hasta la de 16 m/s (curva inferior de color cian).

8. CALIBRACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA MECANICO EN BANCO DE PRUEBA

Se construyó en el laboratorio de mecánica de la FRH un banco de pruebas con motor y variador de velocidad, Figura 9. Esto permite ensayar y evaluar desempeños del sistema electromecánico del aerogenerador y llegar a hacer trabajar al mismo de acuerdo a lo establecido por el análisis teórico, y estrategia de control.



Figura 9, banco de pruebas utilizado para prueba de sistema mecánico y desempeño de centrífugos

8.1 MEDIDAS OBTENIDAS DE BANCO DE PRUEBAS

Como se indicó en aparatado anterior se realizan ensayos previos en banco de prueba a los de túnel de viento. En la siguiente Tabla 1 se da detalle de algunos de los resultados principales obtenidos.

Tabla 1, medidas en banco de prueba

R_o (Ω) 2	B_m [Wb/m ²] 0.191	Sh 0.0015	Pares polos 6	$V(L-L)$ rms/rpm 0.0295	$V_o/V(F-F)$ 1.167	Br (imán Bo Ne) 1.14 [Wb/m ²]
rpm de rotor (variador)	$V(F-F)$ rms Multim.	V_o (V)	P_o (W)	I_o (A)	T_e (Nm)	Paso Pala [°] Fi (flujo) [Vs] 0.038
300	9.44	10.44	54.50	5.22	1.97	0
350	10.93	12.36	76.38	6.18	2.33	0
400	12.45	14.24	101.39	7.12	2.69	0
450	13.95	16.11	129.77	8.06	3.04	2
500	15.44	17.95	161.10	8.98	3.38	2.5
550	16.93	19.74	194.83	9.87	3.72	4
600	18.40	21.48	230.70	10.74	4.05	7
650	19.90	23.27	270.75	11.64	4.39	12
700	20.65	24.2	288	12.1	4.56	20

Donde:

$R(o)$ = Resistencia de carga

B_m = Inducción magnética de trabajo

Sh = Sección de "hierro"

$V(L-L)$ = Tensión línea a línea salida generador

$V(o)$ = Tensión de salida sobre la carga

Br = Inducción remanente de imanes

Fi = Flujo magnético de enlace

$I(o)$ = Corriente de salida

T_e = Torque electromagnético

P = pares de polos

I_f = Corriente de fase de generador

Para un generador PMSG (generador sincrónico a imanes permanentes) de polo no salientes [10]:

$$Te = \frac{3}{2} * P * Fi * \hat{I}f \quad (13)$$

9. ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

A continuación, en Figuras 12, se presentan imágenes del trabajo experimental, más abajo en Figuras 13 y 14, a través de los resultados obtenidos, la potencia de salida y paso de pala en función de las velocidades de viento.

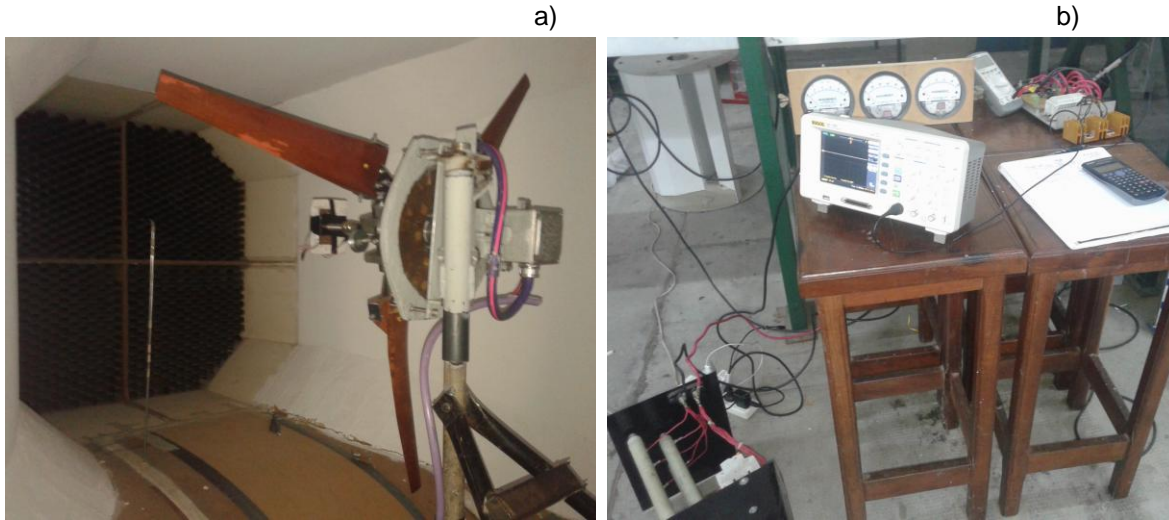


Figura 12, a) Aerogenerador en túnel de viento, b) Electrónica e Instrumental de adquisición de datos

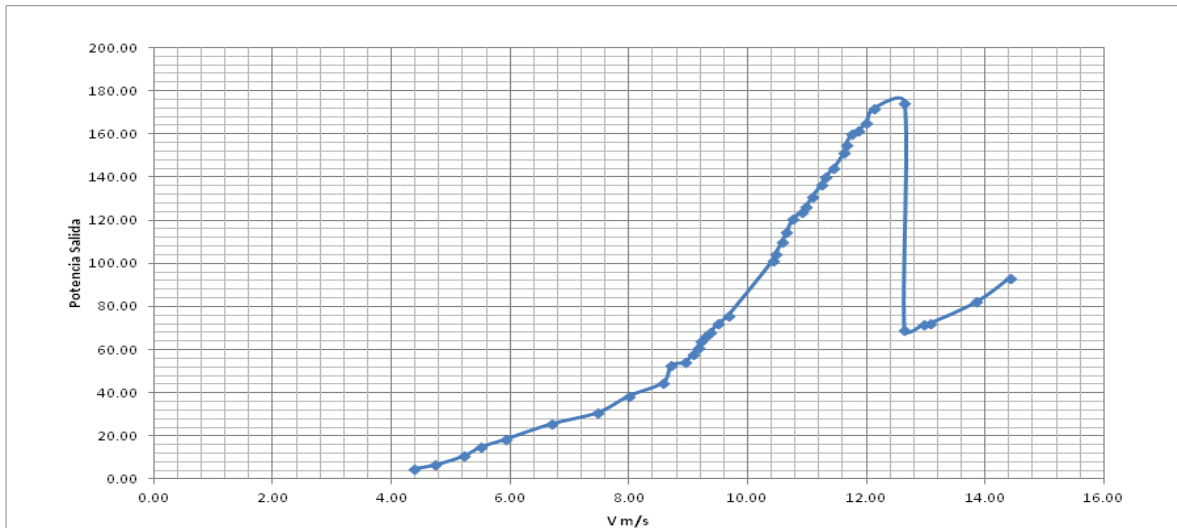


Figura 13, potencia de salida en función de velocidad del viento

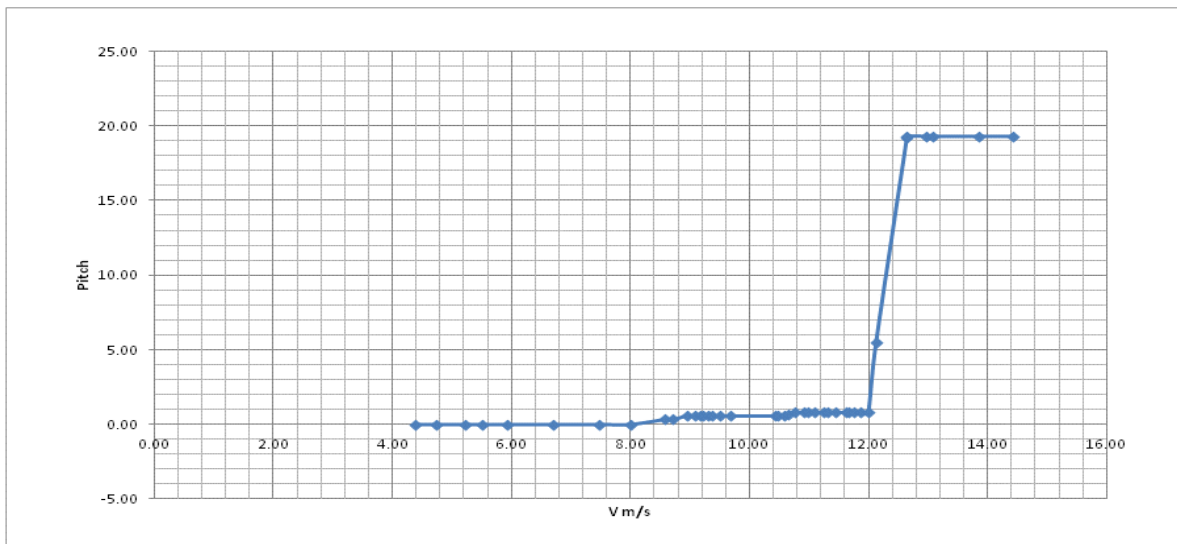


Figura 14, paso de pala en función de velocidad del viento

10. CONCLUSIONES

De la comparación entre lo planificado a través de modelos teóricos con ensayos en banco de prueba y túnel de viento se determina lo siguiente:

Aunque se encuentran diferencias de desempeño en la zona de regulación de potencia por encima de un viento nominal de alrededor 11.8 m/s, ya que el paso de pala se hace dentro una variación pequeña de giro entre los 680 rpm y 700 rpm, se logra el objetivo de llevar al sistema de generación a un control de potencia en zona estable es decir para ángulos de ataques bajos, lo cual conduce a un control efectivo por sustentación sin desprendimiento de capa límite y trabajar por lo tanto en una zona de menores cargas aerodinámicas. En este punto se estudia, en principio, la posibilidad de reducir el ángulo de cierre del centrífugo de manera de compensar la caída de captura de potencia.

Se ratificó de manera experimental, tanto en banco de prueba como en el túnel de viento, el muy buen desempeño del sistema electrónico de adquisición de ángulo de paso de pala.

Es necesario optimizar el sistema mecánico de centrífugos. Un decremento de los rozamientos disminuiría la histéresis entre la apertura y cierre de las masas centrífugas con lo que se volvería en la curva de potencia hacia vientos menores de manera cercana a la curva de potencia de "ida"; esta disminución en la histéresis de potencia mejoraría, además de controlar potencia, la producción de energía.

Es necesario realizar un estudio teórico del sistema contemplando su dinámica, de manera de obtener resultados sobre masas centrífugas, coeficientes de resortes, estados de precompresión, y rozamientos que lleven a un mejor desempeño, en especial respecto a la gradualidad en la apertura del paso de pala y en la exactitud de la zona de velocidades de giro en que el sistema de control de potencia deba trabajar.

Aunque las referencias hacen intuir los posibles resultados, es de gran importancia comparar cargas aerodinámicas y producción de energía respecto al sistema de paso fijo y control por furling.

Por último es necesario, con estudios previos, mejorar el perfil de la pala y adecuarlo al control de potencia buscado. Por las simulaciones y ensayos realizados, al ser su parte interna (intrados) plana (facilidad de construcción) no da un comportamiento aerodinámico óptimo en la zona de control.

10. REFERENCIAS

- [1] Burton, T. Sharpe, D. Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2001). Wind Energy Handbook. London: John Wiley and Sons, Ltd.
- [2] Wood, David. (2011). Small Wind Turbines, Analysis, Design, and Application. London: Springer.
- [3] Krause, P., Wasinczuk, O. & Sudhoff, S. (2002). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (2da Ed.). New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [4] Eckhard, Gauterin. Niels, Harborth. (2011). Centrifugal Pitch Systems for Small Wind Turbines. 7th EAWC PhD Seminar on Wind on Wind Energy in Europe.
- [5] Martínez del Pezzo, Andrés. Menghini, Matías. Scarabino, Ana. Actis, Marcos. (2009). Diseño y Construcción de un Aerogenerador de 1.5 kW. Asades, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Área Aeronáutica, Facultad Ing. UNLP, Argentina.
- [6] Rashid, M. (2001). Power Electronics Handbook. Canada: Academic Press.
- [7] Manwel, J.F., McGowan, J.G. & Rogers, A.L. (2002). Wind Energy Explained. University of Massachusetts, Amherst, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- [8] Munteanu, I., Bratcu, A., Cutululis, N. & Seanga, E. (2008). Optimal Control of Wind Power Systems. London: Springer-Verlag London Limited.
- [9] Marten, David. (2015). QBlade@outlook.com. TU Berlín, Alemania.
- [10] Wu, B., Yongqiang, L., Zargari, N. & Kouro, S. (2011). Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen:

Al Ing. Pablo Ridolfi y al Ing. Fidel Santos, de la cátedra de Técnicas Digitales II, área electrónica, por su colaboración en el desarrollo de la placa electrónica de adquisición del ángulo de paso de pala. Al laboratorio de motores del área de mecánica y al Ing. Miguel Aguirre del laboratorio de aerodinámica y fluidos del área de aeronáutica. Como a toda la comunidad educativa de la Facultad Regional Haedo que de una u otra forma han contribuido con esta investigación.