

Control multivariable descentralizado de un aerogenerador experimental de pequeña potencia

Sergio Frago Herrera

Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España, e-mail: p52frhes@uco.es

Francisco Vázquez Serrano

Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España, e-mail: fvazquez@uco.es

Fernando Morilla García

Departamento de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, Madrid, España, e-mail: fmorilla@dia.uned.es

Resumen

En este trabajo se presentan los primeros resultados de una estrategia de control multivariable descentralizada aplicada sobre un aerogenerador experimental de pequeña potencia. El equipo tecnológicamente pertenece a los sistemas de velocidad variable y paso variable (VS-VP) e incorpora un generador eléctrico de corriente continua de imanes permanentes (PMG). El trabajo plantea la problemática del control del lazo de potencia de generación, y como mediante una extrapolación de los métodos utilizados en equipos de gran potencia se llega a una solución para lograr una regulación eficiente de la misma y conseguir una capacidad de actuación multivariable. En el trabajo también se muestran una serie de resultados de ensayos de la estrategia multivariable diseñada operando con el lazo de potencia conjuntamente con un lazo de control de velocidad.

Palabras Clave: control de potencia, control multivariable, aerogenerador experimental, control PWM.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de sistemas de control para aerogeneradores de velocidad variable presenta una dificultad importante en cuanto a su control, ya que se trata de procesos multivariables con grandes no linealidades, con fuertes perturbaciones, diversas restricciones y gran interacción entre sus variables. Bajo este escenario se debe generar eficientemente la potencia eléctrica P_g y al mismo tiempo regular la velocidad de giro de la turbina ω_r [14]. Las estrategias de control multivariable aportan muchos beneficios con respecto a las estrategias de control

convencionales, tales como la reducción de las fluctuaciones en la potencia y velocidad frente a cambios en la intensidad del viento. Los autores en [6] analizan en más detalle la problemática de control de este tipo de sistemas y presentan los objetivos de la línea de investigación enmarcada en el campo del control multivariable de aerogeneradores. Este trabajo representa una primera aproximación de una de estas técnicas de control multivariable sobre un equipo experimental, abordando inicialmente el problema que plantea la necesidad de añadir un lazo de control de potencia.

Los sistemas de conversión de energía eólica presentan dos modos de operación de acuerdo a como se establezca su conexión con la red eléctrica. En los aerogeneradores de velocidad fija, el sistema está directamente conectado a la red y su velocidad rotórica está impuesta por la frecuencia de la red. En los sistemas de velocidad variable un convertidor electrónico se inserta entre el generador y la red [10], [12], por lo que la velocidad rotórica puede cambiar independientemente de la frecuencia de la red.

Los objetivos de regulación de un aerogenerador cambian de acuerdo a la velocidad del viento [5]. A velocidades del viento bajas, se persigue extraer la máxima cantidad de energía posible. Es en este punto donde el modo de velocidad variable es especialmente útil, puesto que el convertidor electrónico ayuda a maximizar la eficiencia de la conversión mediante un control del par del generador [4].

Los algoritmos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) buscan una optimización del proceso de generación eólica generando puntos de consigna cambiantes, que sitúen al aerogenerador en el punto de rendimiento máximo. Estas estrategias de control recurren frecuentemente al uso de variadores de frecuencia, convertidores de corriente continua (buck,

boost, cuk) o montajes más complejos (montajes en tipo puente, back-to-back) [2], [11], [13], que actúan sobre el elemento eléctrico del sistema, dado que el modo de operación a velocidad variable requiere de una velocidad variable del generador eléctrico.

El documento está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se muestra la estructura de control multivariable planteada. En la sección 3 se presentan las principales características del aerogenerador experimental, así como, del sistema de adquisición y control. En la sección 4 se analiza del tipo de convertidor diseñado para poder modificar el punto de operación del sistema. La sección 5 muestra la topología utilizada para el diseño del circuito modulador de carga. La sección 6 presenta los lazos de control implementados y los primeros resultados de la estrategia de control multivariable aplicada. Finalmente en la sección 7 se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros.

2. SOLUCIÓN DE CONTROL MULTIVARIABLE

La estrategia de control multivariable sigue la estructura planteada en [6]. Esta estrategia presenta dos salidas a controlar, potencia y velocidad, y dos entradas manipuladas, que son el ángulo de paso de pala y el par generado. La velocidad se controla mediante el ángulo de paso de pala (Pitch), y la potencia a su vez debe ser controlada mediante una modificación del par de salida. En un generador de corriente de corriente continua el par de salida es directamente proporcional a la corriente generada y es esta la que debe ser manipulada en último término. Debido a la simplicidad del generador eléctrico, la modificación de la corriente no resulta tan directa.

Casi la totalidad de los aerogeneradores de mediana y gran potencia disponen de generadores eléctricos de corriente alterna (asíncronos o síncronos). El control de potencia en este tipo de sistemas se lleva a cabo mediante técnicas de control vectorial que permiten modificar la corriente, tensión y frecuencia de salida a través de un conjunto rectificador-convertidor-inversor para que el sistema trabaje sobre el punto de operación deseado [2], [3], [9].

En sintonía con el procedimiento de control de los equipos de gran potencia y extrapolando la problemática de estos al equipo experimental de pequeña potencia, el uso de un convertidor electrónico es una posible solución a la problemática de control de potencia. Este convertidor busca una modificación de la corriente que circula a través de la carga i_a controlando su ciclo de trabajo α . Esta modificación de la corriente conlleva inherentemente una variación de la carga aparente vista por el generador eléctrico y por tanto de su tensión de salida

V y en consecuencia la potencia generada [1]. Visto desde el controlador multivariable, la variable α pasa a reflejarse como una variable manipulada en sustitución de la corriente generada.

Con este convertidor basado en la implantación de un circuito electrónico con topología de amplificador en inversión de tensión con semiconductor de potencia MOSFET, es posible realizar una modulación de la carga del generador eléctrico, figura 1. El circuito dispone de un microcontrolador de bajo coste que realiza la función de generación de la señal PWM de conmutación del MOSFET.

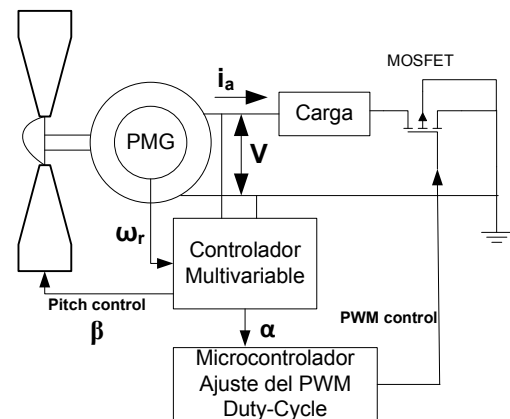


Figura 1: Esquema general de control multivariable

3. EQUIPO EXPERIMENTAL

El aerogenerador de pequeña potencia empleado en este trabajo, figura 2 es el modelo EOLICC de velocidad y paso variable del fabricante Astrienne Didact. El equipo se compone de un rotor bihélice con acoplamiento directo a un generador de corriente continua de imanes permanentes trabajando en modo stand-alone. Incorpora también un mecanismo de rotación de hélice a través de un servomotor de corriente continua. El rotor está situado en el interior de un pequeño túnel de viento que permite canalizar todo el flujo de aire en dirección transversal al plano del rotor. Incorpora un ventilador comandado por un variador de velocidad que permite establecer las condiciones de viento. En [6] se recoge de manera más detallada los parámetros característicos y de diseño de este aerogenerador.



Figura 2: Aerogenerador experimental

Sobre el aerogenerador se miden cuatro señales analógicas: ángulo de paso de pala, velocidad de rotación, tensión generada y velocidad del viento. Las señales son capturadas mediante módulos de entrada analógicos de la clase 5B de National Instruments insertados sobre un backplane analógico del mismo fabricante. Estos módulos transmiten la señal a una tarjeta serie PCI-6035E de National Instruments insertada en un PC. El ordenador actúa de controlador a través de la estrategia de control en tiempo real desarrollada mediante la toolbox de Simulink Real-Time Windows Target. La figura 3 muestra una parte del programa de control desarrollado en Simulink.

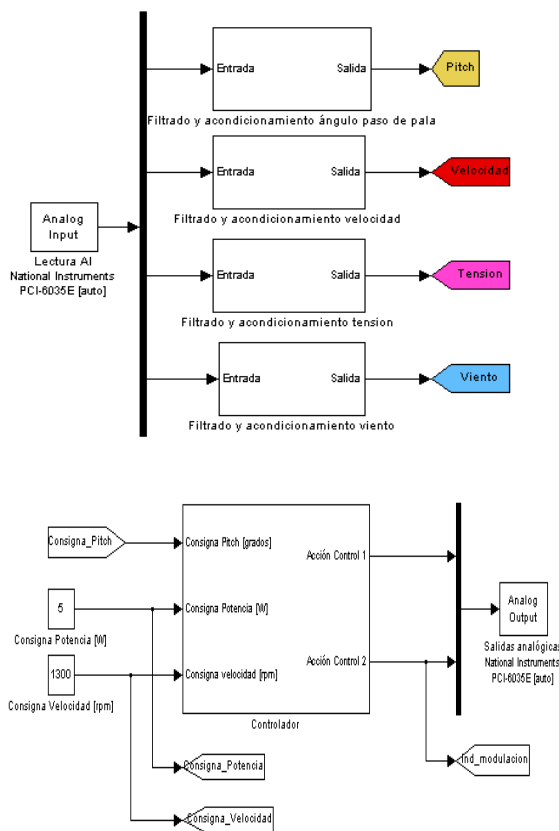


Figura 3: Diagramas de bloques del sistema real en Simulink

4. VARIACIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN

El generador eólico es capaz de operar en lazo abierto a cualquier velocidad angular constante, siempre y cuando se den unas condiciones de viento favorables. En esta situación de régimen estacionario (1)-(5), por un lado el par aerodinámico τ_a es completamente compensado por el par de fricción mecánica en suma con el par electromagnético generado τ_{em} , y por otro lado la fuerza electromotriz del generador eléctrico es igual a la suma de caídas de tensión en la resistencia de carga R_L y armadura R_a .

$$0 = \tau_a - B_t \omega_r - \tau_{em} \quad (1)$$

$$\tau_a = \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (3)$$

$$0 = k\phi\omega_r - \alpha R_L i_a - R_a i_a \quad (4)$$

$$\tau_{em} = \frac{V^2}{R_L \omega_r} \quad (5)$$

B_t es el coeficiente de fricción viscosa total, R el radio del rotor, ρ es la densidad del aire, $C_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia, v es la velocidad del viento, λ es el coeficiente de velocidad específica, k es la constante de proporcionalidad del generador eléctrico, ϕ es la constante de acoplamiento del flujo magnético del generador eléctrico y V es la tensión de salida del generador eléctrico.

En esta situación existe una condición de ligadura entre el ángulo de paso de pala β , la corriente de armadura i_a y el índice de modulación α para alcanzar una velocidad angular ω_r de equilibrio.

Las estrategias de control implantadas en los sistemas de gran potencia persiguen desplazar el punto de operación del sistema para poder alcanzar un punto de operación a máxima potencia. Algunas de ellas basan su desarrollo en el conocimiento de la característica de rendimiento del sistema (C_p). Existen diversas topologías de control con la misma finalidad [1]:

- Control del coeficiente de velocidad específica λ
- Control feedback de potencia
- Control por perturbación y observación (P&O) o hill-climbing searching (HCS)

Todas ellas al final generan una señal de error que entra al controlador encargado de regular el

convertidor electrónico. La finalidad última de este convertidor es modificar las condiciones eléctricas, para que se produzca una variación del par electromagnético generado, y se alcance un punto diferente estacionario con otra velocidad y otra potencia.

El modelo estacionario no lineal planteado en (1)-(5) no presenta solución analítica. Las curvas de potencia y par de un aerogenerador de características similares al equipo experimental se muestran en las figuras 4 y 5. Estas representan la solución gráfica del modelo para diferentes velocidades de viento. Se observa que para cada velocidad del viento existe un punto específico estable donde la potencia de salida es máxima.

La intersección de la curva de par generador y la curva de par aerodinámico determina el punto de operación del aerogenerador. Por tanto para situar al aerogenerador en diferentes puntos de operación estables es necesario insertar un control sobre el generador eléctrico que permita modificar la curva de par de este.

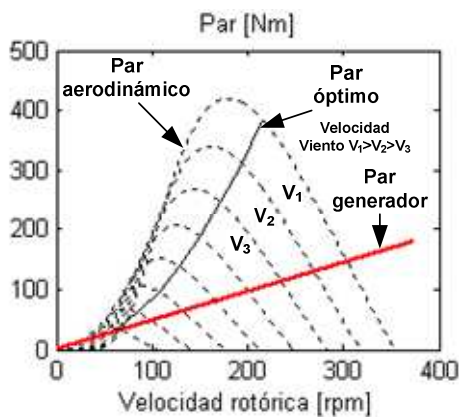


Figura 4: Característica par-velocidad de la turbina y el generador eléctrico para diferentes velocidades del viento

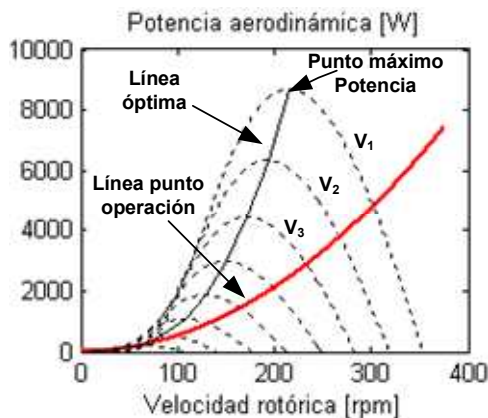


Figura 5: Curvas de potencia a varias velocidades del viento

El aerogenerador experimental, como se ha comentado, incorpora un generador eléctrico de corriente continua de imanes permanentes. Este generador eléctrico tecnológicamente es simple, como se indicaba en la sección 2, lo cual realmente dificulta la capacidad de control sobre el mismo. No existe ninguna variable intrínseca del generador que pueda ser manipulada para producir un cambio en las condiciones de corriente del mismo, como es el caso por ejemplo del flujo de corriente de campo en generadores síncronos.

En este tipo de generador eléctrico la ubicación de la curva de par generado está estrechamente ligada tanto con la corriente generada, como con el valor de la resistencia de carga acoplada. En la figura 6 se observa el efecto que tiene sobre la curva de par generado una variación del valor de resistencia acoplada. Este efecto es similar al producido por una variación de la corriente generada.

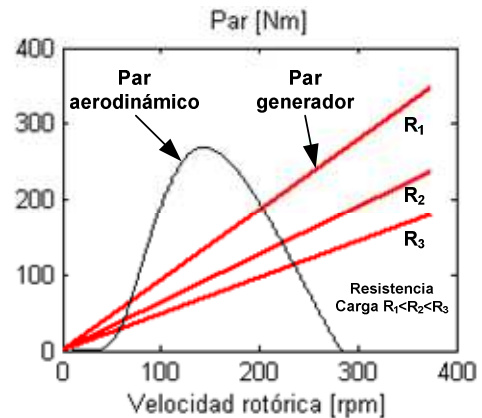


Figura 6: Efecto de la variación de la resistencia de carga

Desde un punto de práctico, la resistencia de carga no puede ser considerada como una variable manipulada en el sistema de control multivariable, puesto que generalmente la carga del generador eléctrico en sistemas conectados a red o en modo stand-alone, es una imposición al sistema. Por este motivo es necesario que el control encargado de desplazar la curva de par sea capaz de modificar las condiciones de carga aparente (virtual) vista desde el generador eólico. La modificación de la carga aparente, siendo la carga real puramente resistiva como es el caso, está ligada, bien a una variación en la tensión aplicada a la resistencia, o bien a una variación de la intensidad que circula por la misma. Es por este motivo por el que se justifica que el circuito diseñado para el control de potencia busca una modificación de la corriente de armadura i_a que circula por la resistencia de carga.

El controlador multivariable genera la señal de control que se ha denominado índice de modulación de carga α . Esta señal como se ha indicado en la sección 2 se corresponde con el ciclo de trabajo del circuito de conmutación, pero como se observa en el modelo no lineal estacionario, conceptualmente y desde un punto de vista matemático es tratada también como un porcentaje de reducción de la corriente de salida del generador eléctrico.

5. CIRCUITO MODULADOR DE CARGA

La topología del circuito modulador implementada se basa en un montaje como amplificador en inversión de tensión a través de transistor MOSFET. Este montaje persigue generar un corte (similar a un montaje chopper) en la intensidad circulante por la resistencia de carga a frecuencias lo suficientemente elevadas para disminuir el rizado que se pudiera ocasionar en la tensión de salida y en la resistencia aparente.

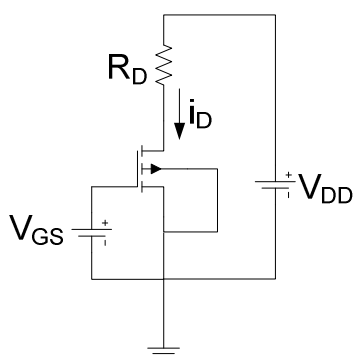


Figura 7: Topología del circuito modulador de carga

El esquema del circuito aparece en la figura 7. En este esquema R_D representa la resistencia de carga acoplada al generador eléctrico, i_D es la corriente de armadura o de salida del generador, V_{DD} es la fuerza electromotriz del generador eléctrico o tensión de salida y V_{GS} es la tensión puerta-fuente del semiconductor.

Un aspecto que es necesario a tener en cuenta en la selección de la topología es la ubicación del semiconductor en el montaje. Es necesario que toda la intensidad disponible circule por la carga para evitar tener un dato erróneo del nivel de generación del sistema. Por este motivo es necesario ubicar el semiconductor en serie con la resistencia de carga.

El semiconductor utilizado es el MOSFET de acumulación IRFZ44N. Es un transistor de potencia con buena respuesta a la conmutación, capaz de trabajar a frecuencias elevadas y con unos límites máximos de funcionamiento muy por encima de los

requerimientos del circuito. El MOSFET trabaja en modo conmutación situándose continuamente entre el modo de corte y saturación. La lógica de conmutación se establece a través de la tensión V_{GS} y es una tarjeta de control Arduino la que genera tal señal a través de la técnica PWM. La tarjeta de control recibe por parte de controlador multivariable una señal de control intermedia que establece el ciclo de trabajo de la señal PWM. De esta forma, jugando con los tiempos de corte y saturación se puede lograr una modulación de carga con bastante resolución.

Arduino Duemilanove es una placa con microcontrolador basada en el ATmega168. Dispone de 14 pines con entradas/salidas digitales, 6 de los cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM capaces de operar con una resolución de 10 bits, lo que supone alcanzar 1024 puntos en la variable manipulada, a una frecuencia de aproximadamente 1.9 KHz. En la figura 8 se observa el montaje del prototipo del circuito, como banco experimental de ensayos. Destacar la selección de varias resistencias variables de potencia que permiten experimentar muchas configuraciones diferentes de carga.

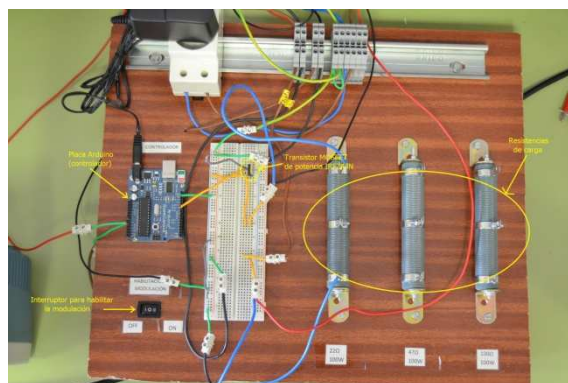


Figura 8: Banco de pruebas experimental

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA ESTRATEGIA MULTIVARIABLE

6.1. CONTROL DE POTENCIA

El esquema de control de potencia P_g se presenta en la figura 9. La potencia generada se mide como potencia calorífica disipada en una carga puramente resistiva (6).

$$P_g = \frac{V^2}{R_L} \quad (6)$$

El controlador en base al error de potencia cometido genera la señal intermedia de control α dirigida hacia el circuito modulador de carga. Esta señal, como se ha comentado, establece el ciclo de trabajo del

semiconductor generando un efecto de conmutación en la intensidad de salida. Este proceso permite generar una resistencia aparente determinada y por tanto efectuar un desplazamiento indirecto de la curva de par electromagnético que permita modificar el punto de operación del sistema.

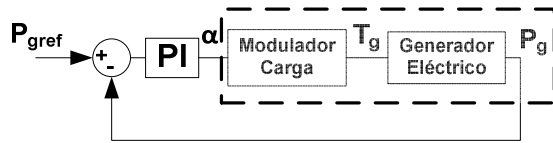


Figura 9: Esquema de control de potencia generada

La sintonía del controlador se ha realizado en base a un modelo identificado en un punto de trabajo de la dinámica enmarcada con línea discontinua en la figura 9. La identificación ha sido realizada sobre un punto de trabajo con una velocidad del viento de 30 Km/h (8.33 m/s) y un ángulo de paso de pala de unos 14°. Inicialmente se estimula al sistema con un índice de modulación α del 70% y se deja evolucionar hacia un estacionario. Seguidamente se incrementa un 10% la variable manipulada hasta alcanzar el nuevo estacionario. Una vez estabilizado se reduce un 10% hasta alcanzar de nuevo el punto de operación inicial.

El modelo se ha aproximado a un modelo de primer orden sin retardo (7). La figura 10 muestra la validación del modelo obtenido en comparación con la salida de la planta.

$$\frac{P_g(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_1}{1 + \tau_1 s} \quad (7)$$

$$K_1 = 0.0371 \text{ y } \tau_1 = 1$$

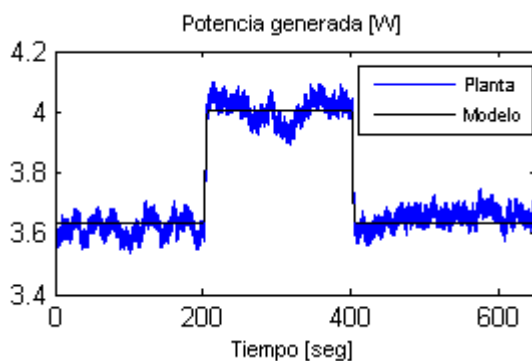


Figura 10: Ajuste y validación del modelo de primer orden para una velocidad del viento de 8.33 m/s, un índice de modulación entre 70%-80%-70% y un pitch de 14°

El controlador ha sido sintonizado para obtener una respuesta en lazo cerrado sobreamortiguada con una ganancia proporcional $K_{p1} = 0.5 \text{ W/\%}$ y un tiempo integral $T_{i1} = 1 \text{ s}$.

5.2 CONTROL DE VELOCIDAD

La figura 11 muestra la estructura de control de la velocidad angular. Este lazo de regulación ha sido desarrollado en profundidad por los autores en [6]. En él existe un lazo exterior encargado de corregir el error de velocidad angular ω_r , estableciendo consignas para un lazo interior. Este lazo interior regula la posición del ángulo de paso de pala β , actuando sobre el servomecanismo de rotación de las palas, para influir sobre el comportamiento aerodinámico del equipo, intentado conseguir la velocidad deseada. Sobre la aerodinámica es donde se manifiesta de manera más abrupta los efectos de la perturbación del viento

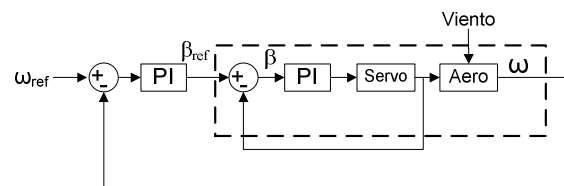


Figura 11: Esquema de control en cascada de la velocidad angular

El modelo obtenido representa la dinámica enmarcada con línea discontinua en la figura 11. Al igual que en el lazo de potencia, se ha considerado un modelo de primer orden sin retardo (8). Este modelo representa una dinámica promedio de diferentes modelos obtenidos en varios puntos de operación.

$$\frac{\omega_r(s)}{\beta_{ref}(s)} = \frac{K_2}{1 + \tau_2 s} \quad (8)$$

$$K_2 = -0.48 \text{ y } \tau_2 = 32.38$$

5.3 RESULTADOS DEL CONTROL MULTIVARIABLE

Con el ensayo planteado se puede observar como la estrategia de control multivariable descentralizada es capaz de estabilizar al sistema en diferentes puntos de operación.

El perfil de viento generado para el ensayo se compone de un viento medio de 30 Km/h (8.33 m/s) con una intensidad de turbulencia de aproximadamente 3 %, figura 12.

El aerogenerador parte de unas condiciones de carga resistiva real fija de 22 Ω y una resistencia aparente (virtual) cercana a los 40 Ω , con un índice de modulación del 63%, figura 13. Inicialmente se deja estabilizar al sistema en un punto de operación de velocidad rotórica inferior a la velocidad nominal (2300 rpm). El aerogenerador en este punto trabaja a

una velocidad rotórica de 1075 rpm y una potencia disipada en la resistencia de 3 W.

En torno a los 100 segundos de ensayo se efectúa un cambio de consigna de velocidad estableciendo el nuevo valor en las 1200 rpm. Se observa como el control de pitch rápidamente actúa disminuyendo el ángulo de paso de pala para alcanzar la nueva consigna. En el lazo de potencia se aprecia una ligera perturbación, que el controlador de par rechaza disminuyendo el índice de modulación.

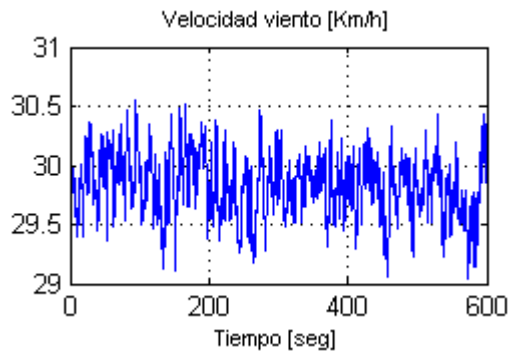
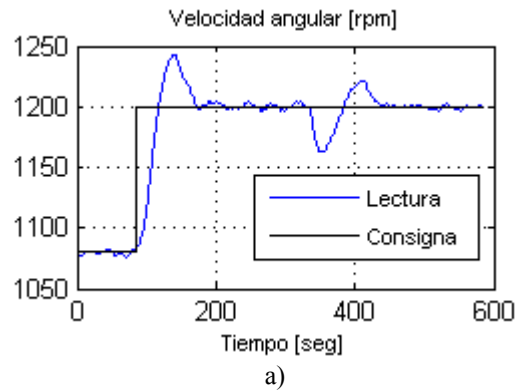


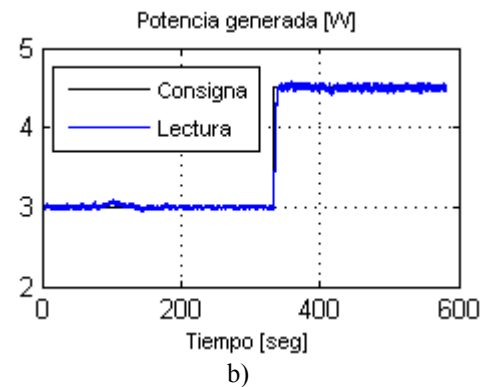
Figura 12: Perfil de velocidad de viento

El cambio de consigna de velocidad obliga a situar al sistema en un punto de operación estable de mayor velocidad, sin perder la consigna de generación de potencia. Para solventar este problema se observa claramente como el circuito modulador modifica la resistencia aparente vista por el generador, aumentándola para contrarrestar el efecto de aumento de la velocidad.

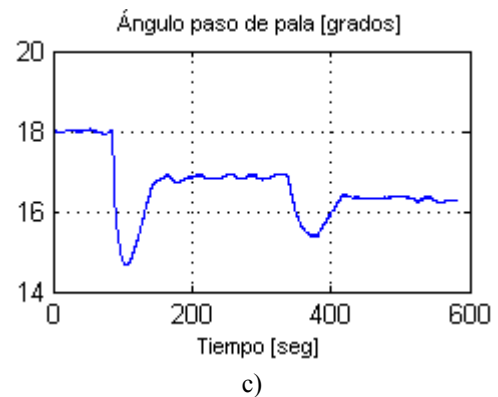
A los 350 segundos de ensayo se modifica la consigna de potencia manteniendo la consigna de velocidad. En este caso se pide al sistema una potencia generada de 4.5 W. El controlador de par actúa aumentando el índice de modulación de carga y por consecuencia disminuyendo la carga aparente acoplada. En este cambio de consigna se aprecia que la perturbación en el lazo de velocidad es mayor que en el caso contrario. El control de pitch tiene que reducir el ángulo de paso de pala para contrarrestar la pérdida de velocidad fruto del desplazamiento de la curva de par del generador.



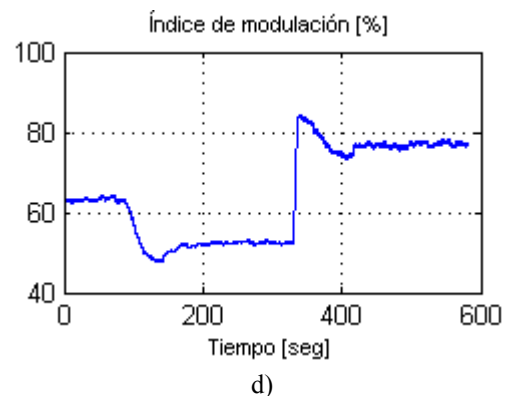
a)



b)



c)



d)

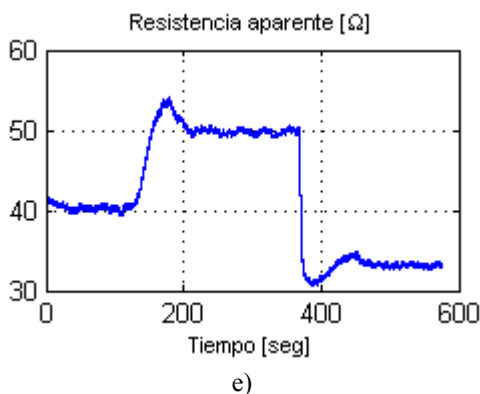


Figura 13: Registro del ensayo de control multivariable descentralizado, a) velocidad rotórica, b) potencia generada, c) ángulo de paso de pala, d) índice de modulación y e) resistencia aparente.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado una primera aproximación de una de las técnicas de control multivariable sobre un sistema de generación de energía eólica. Sobre un equipo experimental de pequeña potencia se ha abordado la problemática de control que presentan estos equipos fundamentalmente en el control de la potencia de generación y se ha demostrado como una estrategia multivariable, en este caso descentralizada, puede estabilizar al sistema en cualquier punto de operación.

En base a un planteamiento teórico previo se ha mostrado el proceso de diseño de la electrónica necesaria para conseguir un control de potencia a través de la modificación de corriente de carga y el desplazamiento de la curva de par generado y de esta forma dotar al sistema experimental de carácter multivariable.

Con los últimos ensayos efectuados ha quedado de manifiesto la interacción que existe entre lazos de control, que en determinadas aplicaciones se podría considerar no deseada. Como trabajo futuro se plantea el estudio de técnicas de minimización de interacción entre variables de control a través de redes de desacople [7], [8].

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Excelencia P10-TEP-6056 Junta de Andalucía, España

Referencias

- [1] Abdullah, M.A., Yatim, A.H.M., Wei, C. (2011). "A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System." IEEE First Conference on Clean Energy and Technology CET. Kuala Lumpur (Malasia).
- [2] Barakati, S.M., Kazerani, M., Aplevich, J.D. (2008). "A Mechanical Speed-Sensorless Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System including a Matrix Converter". Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical in the 21st Century. Pittsburgh (PA), EE.UU.
- [3] Baroudi, J.A., Dinavahi, V., Knight, M. (2007). "A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators". *Renewable Energy*, vol 32, pp 2369-2385.
- [4] Bianchi, F., Mantz R.J., et al. (2004). "Power Regulation in Pitch-Controlled Variable Speed WECS Above Rated Wind Speed". *Renewable Energy*, vol 29, pp 1911-1922.
- [5] Boukhezzer, B., Lupu L., et al. (2007). "Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbine". *Renewable Energy*, vol 32, pp 1273-1287
- [6] Frago, S., Vázquez, F., Morilla, F. (2013). "Control de Velocidad mediante de Paso de Pala para un Aerogenerador Experimental de Pequeña Potencia" presentado para las XXXIV Jornadas de Automática del Comité Español de Automática. Terrassa (España).
- [7] Garrido, J., Vázquez, F., Morilla, F. (2011). "An Extended Approach of Inverted Decoupling". *Journal of Process Control*, vol 21, pp 55-68.
- [8] González, M., Garrido, J., et al (2011). "Multivariable Centralized Control with Decoupling Feedforward Compensation for Residential Wind Turbine". *18th World*
- [9] Haque, Md., Negnevitsky, M., Muttaqui, M. (2010). "A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine with a Permanent-Magnet Synchronous Generator". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 46, no 1, pp 331-339

- [10] Kortabarria, I., Ibarra, E., Martínez de Alegría, I., et al. (2010) “*Power Converters used in Grid Connected Small Wind Turbines: Analysis of Alternatives*”. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and drives. Brighton, UK.
- [11] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. (2006). “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”. *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol 53, no 2, pp 486-494.
- [12] Miller, A., Muljadi, E., Zinger, DS. (1997) “A Variable Speed Wind Turbine Power Control”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 12, no 2, pp 181-186.
- [13] Muljadi, E., Pierce, K., Migliore, P. (2000). “Soft-stall Control for Variable-Speed Stall-Regulated Wind Turbines”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* vol 85, pp 277-291.
- [14] Vázquez, F., González, M., Garrido, J., Morilla, F. (2012). “Control Multivariable: aplicación al control de un aerogenerador”. *X Simposio CEA de Ingeniería de Control*. Barcelona (España).