

CONTROL Y EXPERIMENTACIÓN DEL AEROGENERADOR SÍNCRONO MULTIPOLAR DE VELOCIDAD VARIABLE TWT1650

Mario García-Sanz¹, Eduardo Torres²

¹*Departamento de Automática y Computación. Universidad Pública de Navarra.*

31006 Pamplona, Spain. Email: mgsanz@unavarra.es

²*M.Torres, Diseños Industriales, S.A. Ctra. Pamplona-Huesca Km 9. 31119 Torres de Elorz, Spain. Web: www.mtorres.es. Email: eduardo.torres@mtorres.es*

Resumen: En un contexto internacional de fuerte innovación tecnológica en energías renovables, el presente artículo describe la nueva familia de aerogeneradores síncronos multipolares de velocidad variable y gran potencia diseñados por M.Torres. Tras varios años de investigación multidisciplinar, y más de diez prototipos de 1.5 MW y 1.65 MW en campo, los aerogeneradores TWT (Torres Wind Turbine) han demostrado excelentes prestaciones, superiores a los sistemas asíncronos convencionales. Los controladores del sistema se han diseñado mediante técnicas avanzadas de control robusto QFT, desarrolladas a partir de modelos teóricos y datos experimentales de campo, y combinadas con esquemas adaptativos, metodología multivariable y elementos predictivos. Tras una síntesis del panorama actual y una descripción del aerogenerador, el artículo muestra resultados experimentales de control ante condiciones de viento medias y extremas.

Copyright © 2004 CEA-IFAC

Palabras Clave: Energía Eólica, Control Robusto QFT, Generadores Síncronos Multipolares de Velocidad Variable.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década hemos asistido a una gran revolución tecnológica en el campo de las energías renovables, y más en concreto en el desarrollo de la energía eólica. Los pequeños aerogeneradores asíncronos de jaula de ardilla de unos pocos kilowatios, típicos en los años 80, han evolucionado hasta los más modernos generadores actuales, con máquinas síncronas multipolares de velocidad variable, avanzados sistemas de control y potencias superiores al Megawatio.

Los excelentes resultados alcanzados con las nuevas máquinas han disparado las previsiones mundiales de crecimiento del sector eólico para los próximos años. Así, la *European Wind Energy Association* (2004),

en su informe “*Wind Force 12*”, prevé que la generación de energía a partir del viento en el año 2020 será de 3000 TWh, lo cual supondrá el 12% del consumo mundial de energía eléctrica previsto para dicho año. La potencia instalada pasará de los 40.3 GW actuales en 2004 a casi 1200 GW en 2020, con una inversión total estimada de 692000 millones de euros. Además, el precio de la energía eólica, situado en 2003 en 804 euro/kW instalado y 3.79 céntimos de euro/kWh, se reducirá a 512 euro/kW instalado y 2.45 céntimos de euro/kWh en 2020. El empleo directo creado en el sector pasará de las 90000 personas en 2004 a 180000 personas en 2020. Los beneficios medioambientales serán también muy notables. Las emisiones de CO₂ a la atmósfera se reducirán en 1.8 millones de toneladas anuales para 2020.

Una evaluación comparativa del crecimiento de la energía eólica con otros sectores viene recogido en el libro “*Vital Signs 2000*”, publicado por el *Worldwatch Institute* (2000), y en documentos análogos (IEA 2001), (European Comisión 1997). En ellos los autores hacen las siguientes observaciones:

- En el año 2000, la industria de aerogeneradores estaba creciendo más rápido que el sector de ordenadores personales, y casi tanto como el mercado de telefonía móvil. (Probablemente a día de hoy haya superado también a la telefonía móvil).
- Desde ese mismo año, ocho países del oeste europeo han aumentado considerablemente los impuestos a las actividades que atentan contra el medioambiente, creando un contexto favorable para las energías renovables (siguiendo el Protocolo de Kyoto -1997-, recientemente ratificado también por Rusia -2004-).
- Para el futuro, el *Worldwatch Institute* coincide con la *European Wind Energy Association*, previendo también que para 2020 la energía eólica suministrará aproximadamente el 11% ó 12% de la demanda eléctrica mundial. Además predice una producción energética adicional en sistemas viento-hidrógeno para alimentar al sector automovilístico, aeronáutico, etc.

En este contexto, el presente artículo muestra inicialmente una panorámica general del control de turbinas eólicas, para seguidamente profundizar en los resultados de investigación alcanzados por los nuevos aerogeneradores TWT1650 diseñados por M.Torres.

Se trata de máquinas sin multiplicadora (eje directo del rotor al generador), de velocidad variable y con control independiente del ángulo de pitch de cada pala. Dispone de un generador síncrono multipolar, un doble convertidor electrónico AC-DC-AC que gobierna toda la potencia del estator, un gran rotor de 72 metros de diámetro (82 m en los nuevos prototipos), una potencia entregada a red de 1650 kW, y un avanzado sistema de control (Figura 1).

Tras varios años de investigación, el primer prototipo TWT comenzó a trabajar en el parque eólico de Cabanillas (Navarra) en Agosto de 2001. Desde entonces se ha continuado con un ambicioso proyecto de investigación altamente multidisciplinar, instalándose varias áreas experimentales (Unzué, Olite, Pueyo, etc.). Cada una de ellas cuenta con 5 MW de potencia instalada, y con tres prototipos de diferente diseño aerodinámico, electrónico, mecánico y de control.

Los aerogeneradores han sido altamente sensorizados y monitorizados, recogándose un elevado conjunto de datos de campo de toda naturaleza (eléctricos, mecánicos, térmicos, atmosféricos, etc). A partir de

los mismos se han calculado modelos matemáticos para diferentes puntos de trabajo, y ante las condiciones atmosféricas más extremas. Dichos modelos han sido la base de diseño de las estrategias de control robusto QFT, combinadas con esquemas adaptativos, metodología multivariable y elementos predictivos, que han servido para optimizar el comportamiento y aumentar la fiabilidad de los aerogeneradores (García-Sanz, 1998-2004).



Fig. 1. Montaje del Aerogenerador TWT. Parque eólico de Unzué, Navarra. (Cortesía de M.Torres).

La organización del artículo es la siguiente. El segundo apartado sintetiza algunos conceptos generales de control de aerogeneradores. El tercero resume las características del TWT1650, e introduce algunas cuestiones del diseño mecánico y eléctrico. El cuarto apartado presenta las estrategias utilizadas en el diseño del sistema de control, y el quinto muestra resultados experimentales de campo del comportamiento del aerogenerador ante condiciones medias y extremas de viento.

2. CONCEPTOS DE CONTROL

La integración del sistema de control en el comportamiento dinámico de un aerogenerador puede entenderse mejor mediante el modelo simplificado de máquina de eje horizontal presentado en la Figura 2.

Dicho modelo presenta un eje de transmisión que conecta un gran volante de inercia (las palas - rotor)

con el generador (con o sin multiplicadora). Sobre el rotor el viento aplica el par aerodinámico T_a , y sobre el generador se aplica el par eléctrico antagonista T_e , bien desde la red o bien desde una electrónica de potencia. La aceleración o deceleración de la máquina depende de si la diferencia de pares ($T_a - T_e$) es positiva o negativa respectivamente.

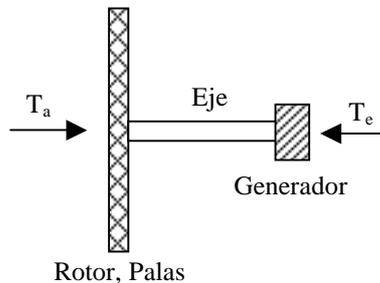


Fig. 2. Modelo simple de aerogenerador

El par aerodinámico T_a aplicado al rotor depende de la velocidad del viento V , del ángulo de ataque de las palas β (pitch) y de la velocidad del rotor Ω , tal que,

$$T_a = \frac{\rho \pi R^2 C_p V^3}{2 \Omega} \quad (1)$$

donde C_p es el coeficiente aerodinámico, ρ es la densidad del aire y R el radio del rotor.

El coeficiente aerodinámico C_p es una familia de funciones no-lineales que dependen de V y Ω , para cada β , según la ecuación (2) y la Figura 3.

$$C_p = f_{Non-linear} \{ [V, \Omega] \beta \} \quad (2)$$

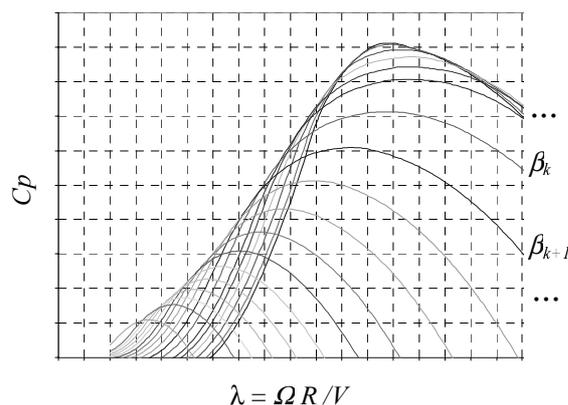


Fig. 3. Curvas típicas de rendimiento aerodinámico C_p de las palas.

Por otro lado el par eléctrico antagonista T_e depende de la conexión del generador a la red. Si la conexión es directa T_e dependerá del par aerodinámico y de la dinámica del sistema, y la máquina será de velocidad constante.

Sin embargo, si existe un convertidor electrónico de potencia AC-AC entre el generador y la red, entonces T_e dependerá del sistema de control, y la máquina será de velocidad variable.

En este caso, en la zona de vientos menores que el punto nominal (Figura 4, Zona 1), la máquina puede obtener mucho mejor rendimiento C_p que en el caso de velocidad constante, ya que dado un ángulo de pitch β , al variar el viento V y sacar al rotor de su máximo C_p (véase Figura 3) el sistema de control puede variar el par eléctrico antagonista T_e , y con ello variar la velocidad Ω el rotor y volver al punto de C_p máximo.

El concepto de velocidad variable es conocido desde hace muchos años. Sin embargo, en el año 1992, una empresa norteamericana, posteriormente adquirida por *General Electric* (GE), consiguió patentar el esquema en su aplicación a aerogeneradores (US Patent 1992, 1994). Desde entonces, y a diferencia del mercado eólico europeo, el mercado norteamericano de velocidad variable ha estado comandado por GE.

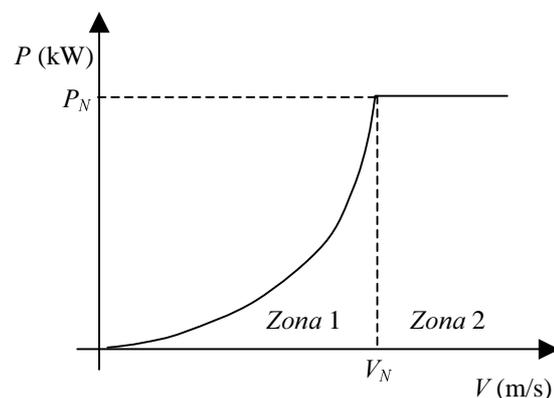


Fig. 4. Curva de Potencia/Velocidad de viento

Por otro lado los aerogeneradores pueden también dividirse en convencionales y multipolares. Los primeros disponen de un multiplicador mecánico que eleva la velocidad inicial del rotor antes de aplicarla al generador. Los segundos, sin embargo, prescinden de dicha etapa mecánica a costa de elevar el número de polos del generador.

Respecto al sistema de control del aerogenerador, uno de los puntos importantes y también más complejos es el modelo dinámico del mismo. En la última década se ha abordado este tema en repetidas ocasiones. Destacan los excelentes trabajos de Leithead y Rogers (1996 a y b), Bongers y Engelen (1987), y Sheinman y Rosen (1991 a y b).

En cuanto al diseño de las leyes de control pueden consultarse la revisión panorámica de La Salle *et al.* (1980), los sistemas adaptativos de Leith y Leithead (1997), y los controladores robustos de Houppis, Rasmussen y García-Sanz (2005).

En cuanto a los sistemas de simulación destaca el software *Bladed*, creado por Garrad Hassan (1997, 2003). Referencias con datos experimentales de campo pueden encontrarse en Torres y Garcia-Sanz (2004).

La normativa actual más avanzada en diseño de aerogeneradores puede encontrarse en los tratados de Germanischer Lloyd (1994, 2004) y en la norma europea IEC 61400. En cuanto a mediciones de campo, la red europea MEASNET, creada en 1996, estableció los procedimientos de medida y la nomenclatura general a seguir.

Entre los estudios técnicos más completos pueden destacarse tres excelentes libros: Freris (1990), Burton *et al.* (2001) y Manwell *et al.* (2002).

La importante innovación tecnológica y la mayor complejidad de diseño del sistema multipolar de velocidad variable hace que sean todavía pocas las empresas que ofertan al mercado internacional este tipo de aerogeneradores, aún obteniendo más prestaciones y mejor comportamiento. Entre los pocos fabricantes existentes destacan Enercon (Alemania), M.Torres (España) y Lagerwey (Holanda). En ese contexto, los siguientes apartados muestran las novedades singulares que aporta la máquina multipolar TWT1650 de M.Torres.

3. DESCRIPCIÓN DEL TWT

3.1. Diseño Mecánico

El diseño mecánico del TWT fue optimizado mediante cálculos avanzados de elementos finitos y experimentación dinámica sobre bancos de ensayo a escala real, altamente monitorizados. Se prestó una especial atención a la fatiga mecánica de los materiales, los esfuerzos mecánicos extremos, y las resonancias estructurales de los elementos del sistema. El objetivo principal del diseño fue garantizar la fiabilidad del aerogenerador ante cualquier evento y circunstancia. En segundo término se optimizó también el coste económico total del mismo. La Figura 5 muestra un esquema del aerogenerador TWT en 3D.

Como se ve en dicha Figura, el rotor de la máquina está constituido por tres palas unidas al buje por medio de rodamientos tipo corona, con dentado en el aro interior, para facilitar el engrane de un motor-reductor. Este rodamiento permite girar la pala alrededor de su eje y mantener la potencia constante por encima de la velocidad nominal del viento (Figura 4, Zona 2).

El buje es de fundición nodular y está acoplado al eje principal. A través del interior del eje es posible acceder directamente al buje, facilitando la realización de inspecciones y labores de mantenimiento.



Fig. 5. Esquema 3D del aerogenerador TWT.

3.2. Diseño Eléctrico

El Generador incorporado en el TWT, también de diseño M.Torres, está conectado directamente al eje del rotor (Figura 5), y es síncrono multipolar (Figura 6). Produce energía eléctrica en corriente alterna a frecuencia variable, para posteriormente rectificarla y ondularla a la frecuencia de red. El generador tiene excitación independiente y dispone de sensores de control de temperatura. Ha sido diseñado en clase F con un alto grado de protección.



Fig. 6. Rotor del generador síncrono multipolar (Cortesía de M.Torres)

La energía producida por el aerogenerador síncrono multipolar, a frecuencia variable, es rectificadora a corriente continua y posteriormente ondulada a la frecuencia de la red mediante dos puentes trifásicos reversibles controlados mediante IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) –Figura 7-. El sistema electrónico de potencia permite regular el factor de potencia ($\cos \Phi$) de la máquina en su punto de conexión a red. El usuario puede demandar de modo

dinámico tanto un coseno de Phi unidad, como capacitivo o inductivo.

Los convertidores aseguran una calidad de suministro eléctrico a la red con bajo nivel de armónicos y de flicker, según las Normas IEC 61400 y UNE-EN-61400-21.

El diseño eléctrico fue también optimizado mediante la combinación de cálculos electromagnéticos por elementos finitos, y simulaciones avanzadas de electrónica de potencia.

Además se llevó a cabo una experimentación adicional sobre un banco de ensayos de plena potencia, especialmente desarrollado por M.Torres para el caso (Figura 8). Se analizó en detalle el rendimiento del sistema, su fiabilidad ante eventos críticos, y la calidad de onda producida (Chen y Spooner, 2001).

Las principales características del Aerogenerador TWT 1650 se describen en la Tabla I.

Tabla I. Características TWT1650.

Rotor		Datos de Operación	
Diámetro	72 m	Velocidad Viento Arranque	3 m/s
Área barrida	4072 m ²	Velocidad Viento Nominal	12 m/s
Número de Palas	3	Velocidad Viento Parada (1)	25 m/s durante 1 minuto
Posición	Barlovento	Velocidad Viento Parada (2)	30 m/s durante 0.1 seg.
Velocidad Nominal Rotor	20 rpm	Velocidad Viento Supervivencia	70 m/s
Rango de Velocidad del Rotor	Variable: 6 a 22 rpm	Generador	
Control	Pitch controlado por motores independientes en cada pala.	Tipo	Síncrono Multipolar de accionamiento directo
Torre		Potencia a la red	1650 kW
Tipo	Tubular cónica de acero	Tensión	650 V
Altura buje	60 m	Góndola	
Peso	88000 Kg	Construcción	Acero Monocasco
Protección contra corrosión	Baño epoxy	Peso (rotor + buje)	73000 Kg
		Yaw	Sistema activo con motores eléctricos
		Protección contra corrosión	Baño epoxy

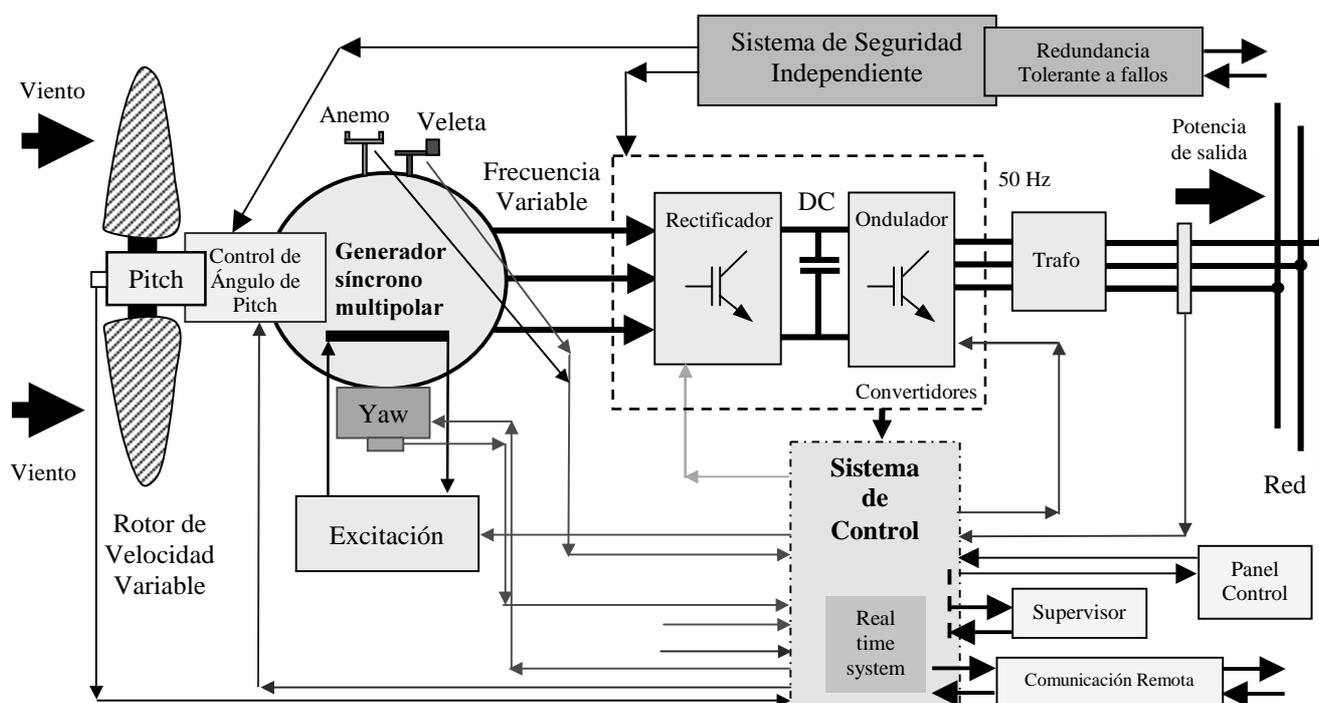


Fig. 7. Diagrama de Bloques Eléctrico y de Control del TWT



Fig. 8. Banco de Ensayos para Aerogeneradores de hasta 3 MW de potencia (Cortesía de M.Torres).

4. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Las estrategias de control del aerogenerador TWT tienen como finalidad alcanzar cuatro objetivos simultáneos:

- La atenuación de las cargas mecánicas transitorias aplicadas por el viento, tanto en sus valores máximos como en su correspondiente fatiga asociada.
- La robustez y fiabilidad de funcionamiento en cualquier régimen de viento y ante cualesquiera eventos y condiciones de trabajo.
- La optimización de la energía capturada a cada velocidad de viento (Figura 4, Zona 1).
- La calidad de onda de la generación eléctrica a red, reduciendo el nivel de los posibles armónicos y del flicker, y controlando el factor de potencia y la potencia activa según demande el operador de red.

El sistema de control utiliza técnicas avanzadas de control robusto QFT en combinación con esquemas adaptativos y predictivos, dentro de un marco multivariable (García-Sanz, 1998-2004). El diseño cumple las Normas IEC 61400 y Germanischer Lloyd (2004).

Las principales propiedades del sistema de control del aerogenerador son las siguientes:

- Está provisto de algoritmos de seguimiento del rendimiento aerodinámico óptimo para cada velocidad de viento, y de elementos de corrección asociados a los cambios de temperatura.
- Es capaz de amortiguar los impulsos introducidos por el viento, de modo que se minimicen los esfuerzos mecánicos y la fatiga de la máquina.
- Posee unas estrategias avanzadas de control que le permiten generar desde baja (3 m/s) hasta muy

alta velocidad de viento (30 m/s) con plena fiabilidad y a pesar de la alta no-linealidad y el carácter multidisciplinar de los modelos.

- Por filosofía de diseño el sistema puede adecuarse con facilidad a los requerimientos ante huecos de tensión en la red, cumpliendo las especificaciones de E.ON y REE, que requieren aguantar conectado ante la situación de hueco.
- Además el software de control es parametrizable, permitiendo adaptar la dinámica de la máquina a los requerimientos del cliente y a las características del emplazamiento.

El sistema de seguridad es totalmente autónomo y redundante al sistema de control central (Figura 7), de modo que ante fallos del mismo la máquina es capaz de parar suavemente y con seguridad. El equipo de control y las variables de funcionamiento más significativas pueden ser monitorizadas y almacenadas de manera local y remota.

Cada pala tiene un sistema de movimiento y control del ángulo de paso (pitch) totalmente independiente. Mediante su regulación se controla la velocidad del rotor y se optimiza la potencia generada en los diferentes regímenes de viento. Su carácter redundante, un motor por pala, y la existencia de un sistema de almacenamiento de energía en cada pala, otorgan al aerogenerador una muy alta fiabilidad, siendo capaz de controlar la máquina ante los eventos más graves (cortocircuitos, fallos en motores, etc.).

Además, entre los problemas críticos más destacables, inherentes al proceso y su entorno, están:

- La necesidad de algoritmos adicionales de seguridad para poder trabajar con vientos de alta intensidad de turbulencia y velocidad extrema;
- La gran complejidad matemática del modelo del sistema, presente en forma de fuertes no-linealidades, carácter multivariable y variación de parámetros en el tiempo -véanse ecuaciones (1), (2) y Figura 3-;
- Y la imposibilidad de medir directamente la velocidad del viento que experimenta la turbina, debido a la alta incertidumbre en el anemómetro y la gran influencia del movimiento de las palas sobre el mismo (Leith y Leithead, 1997).

La mencionada complejidad del modelo matemático del sistema y la alta fiabilidad exigida, llevó a combinar diversas estrategias de control avanzado, tales como técnicas de control robusto QFT (Horowitz y Sidi, 1972; Horowitz, 1991; Houpis, Rasmussen y García-Sanz, 2005), esquemas adaptativos (Leith y Leithead, 1996), metodología multivariable (García-Sanz *et al.*, 2002, 2004) y algunos elementos de carácter predictivo, para gobernar automáticamente el aerogenerador.

Las variables a gobernar por el sistema de control son: la potencia eléctrica del sistema, el par mecánico en el eje, la velocidad del rotor, el ángulo de ataque de las palas y su velocidad en la variación de pitch, la orientación de la góndola, el factor de potencia, la corriente del generador, la tensión del bus DC, la corriente de excitación, temperaturas, etc.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Sistema de orientación de Góndola (yaw)

El TWT dispone de un sistema eléctrico de orientación activa que posiciona la góndola frente al viento. Mediante dos veletas que proporcionan de modo redundante la dirección del viento, y a partir de la información suministrada por un encoder de posición, un controlador predictivo-adaptativo (García-Sanz, 1998-2004) acciona los motores de orientación para seguir la dirección del viento (Figura 9).

El sistema de orientación comienza a funcionar con una velocidad de viento de 2.5 m/s, y en caso de corte en el suministro de la red la góndola queda frenada.

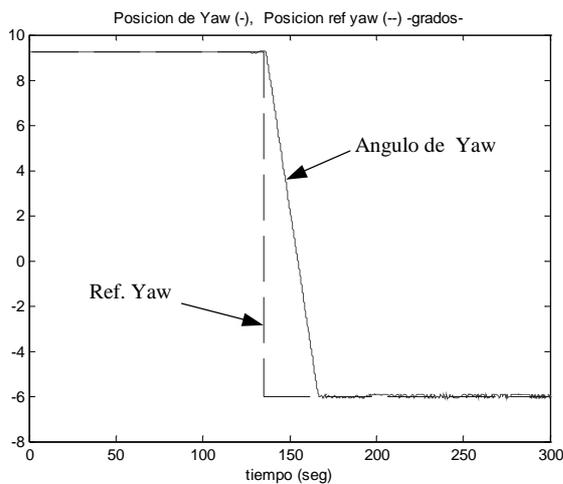
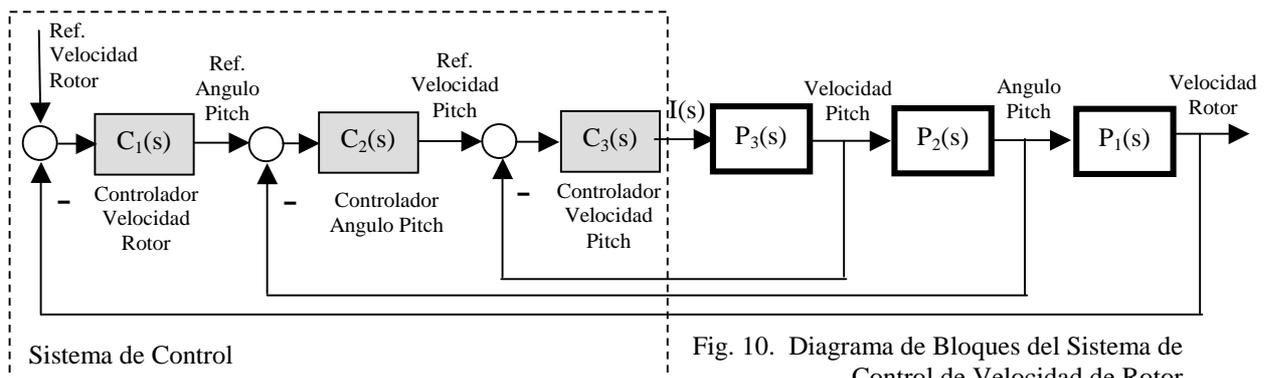


Fig. 9. Control de Yaw. Datos de campo.



5.2. Sistema de control de velocidad del rotor

Por encima de la velocidad de viento nominal, alrededor de 12 m/s (Figura 4, Zona 2), el sistema de control del ángulo de pitch de las palas buscará el mantenimiento de la velocidad del rotor dentro del rango permitido, en nuestro caso alrededor de 20 rpm. ($\pm 10\%$). Así, ante una ráfaga de viento, el controlador cambiará el ángulo de ataque de las palas para gobernar la velocidad del rotor siguiendo la referencia deseada.

No obstante, en condiciones extremas de viento, dicho requerimiento puede ser difícil de satisfacer mediante controladores convencionales, en particular si se trata de un aerogenerador de gran potencia, donde la capacidad del sistema de actuación de pitch puede ser bastante limitada en términos relativos.

En este apartado se analizan los resultados reales de campo, obtenidos por los nuevos controladores robustos QFT en el gobierno del TWT.

La Figura 10 muestra el diagrama de bloques básico de los tres controladores en cascada utilizados para gobernar la velocidad del rotor: El controlador de velocidad de rotor propiamente dicho $C_1(s)$, el controlador de ángulo de pitch $C_2(s)$, y el controlador de velocidad de pitch $C_3(s)$.

A continuación se muestran los resultados reales de campo obtenidos con el TWT, instalado en el parque eólico de Cabanillas, ante dos casos de muy diferentes condiciones de viento: un caso de velocidad media de viento y un caso extremo de muy alta velocidad.

Caso 1: Velocidad de Viento Media. 04 Febrero 2003. Parque Eólico de Cabanillas (Navarra).

La Figura 11 muestra el comportamiento del aerogenerador ante grandes ráfagas (gran intensidad de turbulencia) y sobre una moderada velocidad media de viento de 15 m/s, con variaciones entre 12 m/s y 19 m/s. El sistema de control presenta un buen comportamiento, siguiendo perfectamente la referencia de velocidad del rotor (20 rpm), y rechazando las perturbaciones introducidas por el viento mediante un suave movimiento de las palas.

Caso 2: Muy Alta Velocidad de Viento. 06 Abril 2003. Parque Eólico de Cabanillas (Navarra).

La Figura 12 muestra el comportamiento del aerogenerador ante grandes ráfagas (gran intensidad de turbulencia) y sobre una muy alta velocidad media de viento de 25 m/s, con variaciones de hasta 30 m/s.

El sistema de control presenta también un buen comportamiento, siguiendo perfectamente la referencia de velocidad del rotor (20 rpm), y rechazando las perturbaciones introducidas por el viento mediante un suave movimiento de las palas, y a pesar de la fuerte no-linealidad del sistema en esas condiciones.

En definitiva, los datos reales de comportamiento en campo del TWT muestran con claridad cómo las nuevas estrategias avanzadas de control robusto-adaptativo implementadas son capaces de gobernar al sistema en muy diferentes puntos de operación (desde viento bajo hasta viento extremo) a pesar de la alta no-linealidad del sistema.

Además, los controladores diseñados evitan con claridad las sobrevelocidades del rotor. Este es un punto muy crítico del sistema.

Habitualmente los aerogeneradores no son capaces de aguantar una velocidad de giro del rotor de más del 25% de la velocidad nominal, debido a las limitaciones estructurales de la pala. En nuestro caso una velocidad de giro de 25 rpm podría romper la pala, y con ello probablemente tirar la torre por desequilibrio. Por otro lado, aunque la inercia del rotor sea elevada, si no hubiera un sistema de control bien diseñado, el viento podría incrementar la velocidad del rotor desde su valor nominal hasta el valor límite en menos de un segundo. Además el problema no se puede resolver incrementando excesivamente la actividad del controlador de pitch, ya que eso redundaría en graves problemas de fatiga mecánica para las palas y la máquina.

Con todo, los resultados experimentales alcanzados en campo por el controlador diseñado, y ante vientos de todo tipo, han sido muy satisfactorios, evitando las sobrevelocidades mediante suaves movimientos de pala, lejos de los niveles de fatiga mecánica

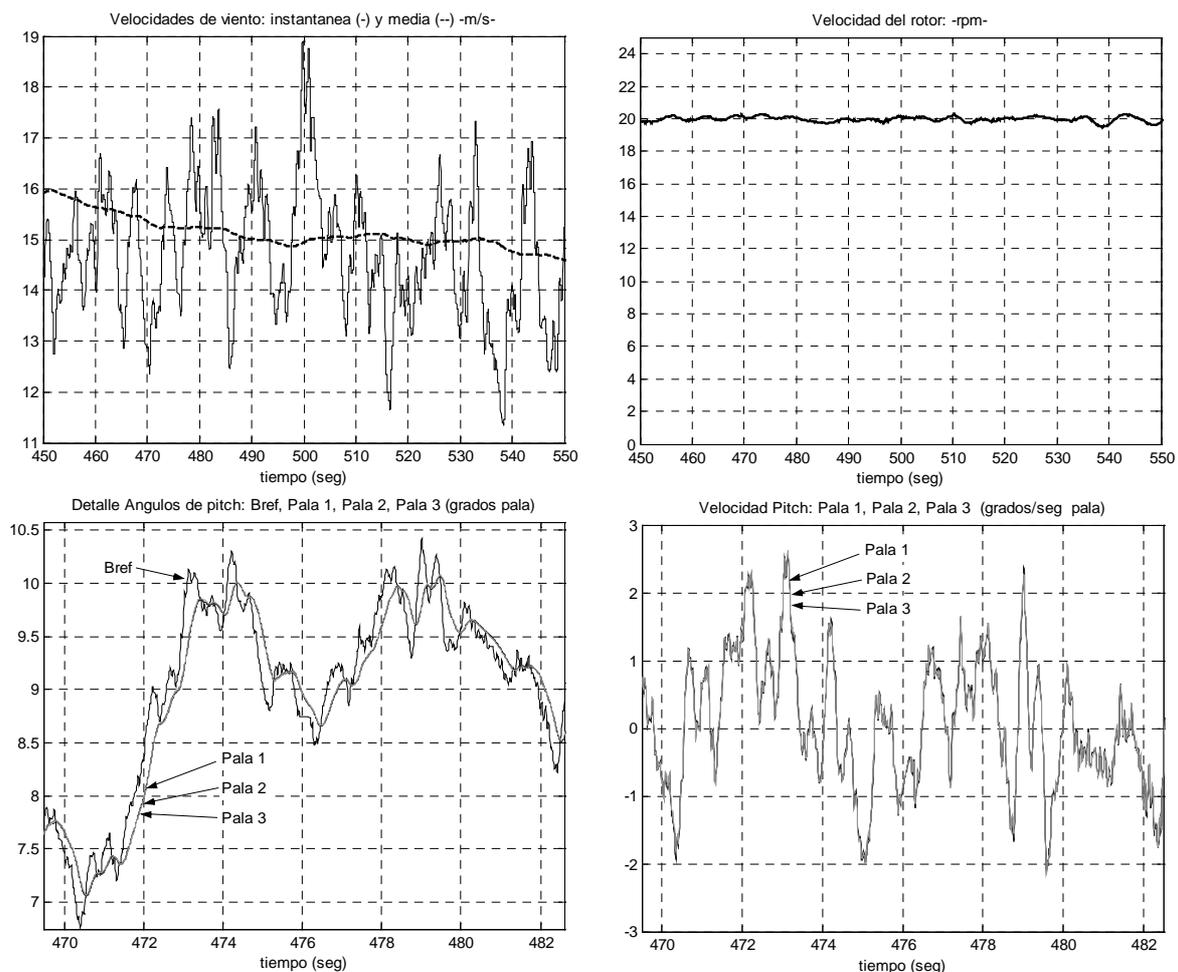


Fig. 11. TWT ante condiciones de viento medias. Datos de campo (4 Febrero 2003).

a) Velocidad de viento; b) Control velocidad rotor; c) Control ángulo pitch; d) Control velocidad pitch;

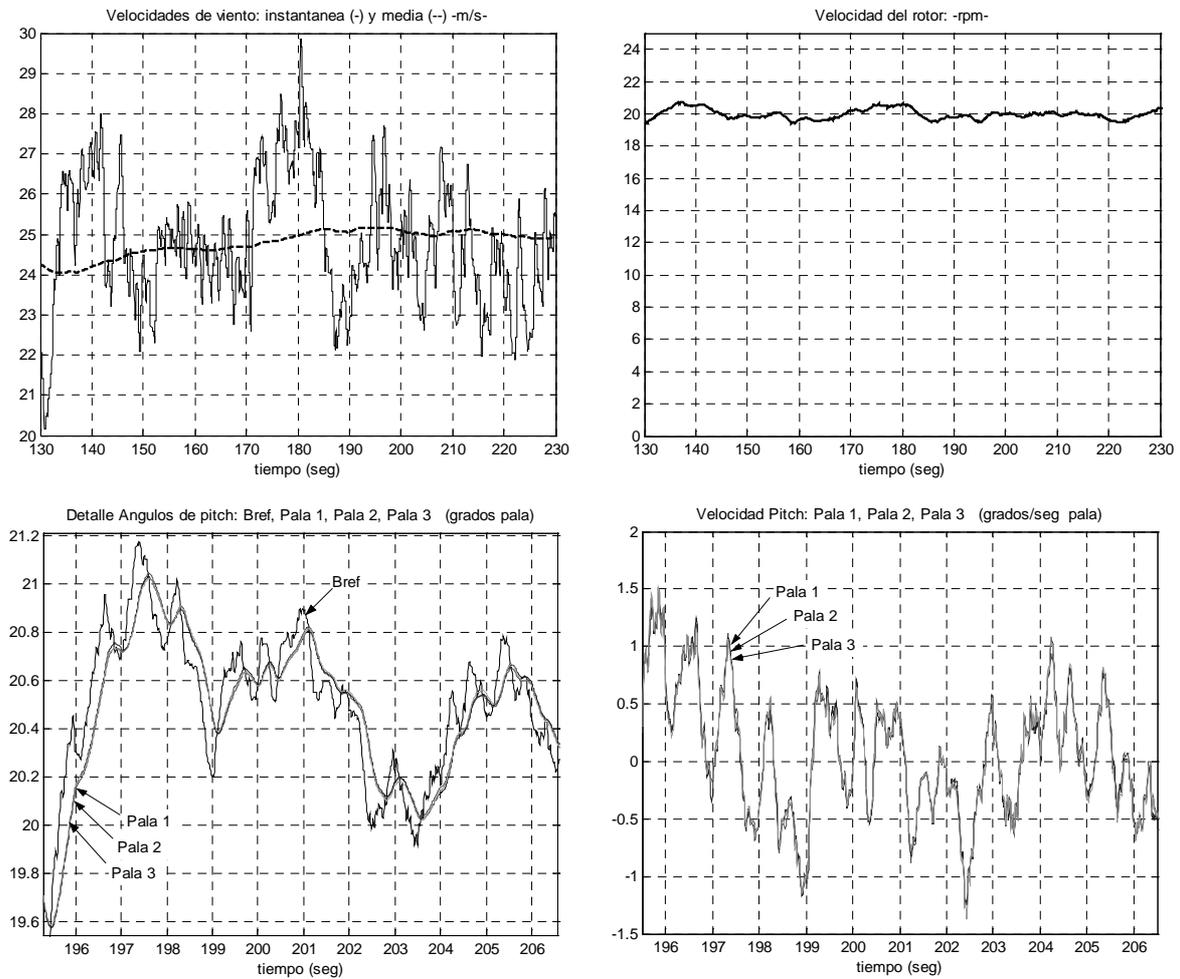


Fig. 12. TWT ante condiciones de viento extremas (hasta viento de 30 m/s). Datos de campo (6 Abril 2003).
a) Velocidad de viento; b) Control velocidad rotor; c) Control ángulo pitch; d) Control velocidad pitch.

6. CONCLUSIONES

El presente artículo ha sintetizado el panorama de control de turbinas eólicas, y ha profundizado en los resultados de investigación alcanzados por los nuevos aerogeneradores TWT de M.Torres (Figura 13).

Se trata de sistemas sin multiplicadora (eje directo), de velocidad de rotor variable y con control independiente del ángulo de pitch en cada pala. Disponen de un generador síncrono multipolar, un doble convertidor electrónico AC-DC-AC (*full power*), un gran rotor de 72 metros de diámetro (82 m en los nuevos prototipos), una potencia entregada a red de 1650 kW, y un avanzado sistema de control.

El artículo ha mostrado y evaluado algunos de los más representativos resultados experimentales de campo del TWT bajo condiciones medias y extremas de viento y utilizando estrategias avanzadas de control robusto. (Figura 14).



Fig. 13. Construcción de nuevos prototipos. Detalle de Planta de M.Torres.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo dado por la *Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)* en el proyecto DPI2003-08580-C02-01, la colaboración del *Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (I.D.A.E.)* y del Gobierno de Navarra.



Fig. 14. El aerogenerador TWT en operación en el parque eólico de Cabanillas, Navarra. (M.Torres).

REFERENCIAS

- Bongers, P.M.M., y Van Engelen, T.G. (1987). A theoretical model and simulation of a wind turbine. *Wind Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 344-350.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. y Bossanyi, E. (2001). *Handbook of wind energy*. John Wiley.
- Chen, Z. y Spooner, E. (2001). Grid power quality with variable speed wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 16, No. 2.
- De la Salle, S.A., Reardon, D., Leithead, W.E. y Grimble, M.J. (1990). Review of wind turbine control. *International Journal of Control*, Vol. 52, No. 6, pp. 1295-1310.
- European Commission (1997). *Energy for the Future, Renewable Sources of Energy - White Paper for Community Strategy and Action Plan, COM(97) 559 final (26/1/1997)*.
- European Wind Energy Association, EWEA (2004), *Wind Force 12*, a blue print to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020. Forum of Energy & Development, Greenpeace and BTM Consult ApS, Oct.
- Freris, L.L. (1990), *Wind energy conversion systems*. Prentice Hall.
- García-Sanz, M. (1998-2004). Sistemas de control del TWT1500 y del TWT1650. Informes internos de M.Torres.
- García-Sanz, M., y Egaña, I. (2002). Quantitative Non-diagonal Controller Design for Multivariable Systems with Uncertainty. *International Journal of Robust and Non-Linear Control*. Isaac Horowitz Special Issue, Part 2. Vol. 12, pp. 321-333.
- García-Sanz, M., Egaña, I., y Barreras, M. (2004). Design of QFT non-diagonal controllers for reference tracking and external disturbances rejection in uncertain MIMO systems. Aceptado para su publicación *IEE Control Theory and Applications*.
- Garrad Hassan. (1997, 2003). *Bladed for windows*. Bristol, England.
- Germanisher Lloyd. (1994, 2004). *Rules and regulations*. Hamburg, Germany.
- Horowitz, I. y Sidi, M. (1972). Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time-domain tolerances, *International Journal of Control*, vol. 16, no.2, pp. 287-309.
- Horowitz, I. (1991). Survey of quantitative feedback theory. *International Journal of Control*, 53(2), pp. 255-291.
- Houpis, C.H., Rasmussen, S.J., y García-Sanz, M. (2005). *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications*. Marcel Dekker: 2nd edition, NY, USA.
- IEA 35th meeting of experts (2001), *Long term R&D needs for wind energy*. For the time frame 2000-2020, Proceedings, Holland: FOI, Aeronautics FFA, SE 172 90 Stockholm, Sweden, March 2001.
- International Electro-technical Commission. IEC 61400 *Wind Turbine Generator Systems*.
- Leith, D.J., y Leithead, W.E., (1996), Appropriate realization of gain-scheduled controllers with application to wind turbine regulation. *International Journal of Control*, Vol. 65, No. 2, pp. 223-248.
- Leith, D.J., y Leithead, W.E., (1997), Implementation of Wind Turbine Controllers. *International Journal of Control*, Vol. 66, pp. 349-380.
- Leithead, W.E., y Rogers, M.C.M. (1996 a). Drive-train characteristics of constant speed HAWT's: Part I – Representation by simple dynamic models. *Wind Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 149-174.
- Leithead, W.E., y Rogers, M.C.M. (1996 b). Drive-train characteristics of constant speed HAWT's: Part II – Simple characterisation of dynamics. *Wind Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 175-201.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G. y Rogers, A.L. (2002). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley.
- MEASNET, Network of measuring institutes in Europe. (1996). Leuven.
- Sheinman, Y. y Rosen, A. (1991 a). "A dynamic model for performance calculations of grid-connected horizontal axis wind turbines. Part II: Validation". *Wind Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp 229-239.
- Sheinman, Y. y Rosen, A. (1991 b). A dynamic model for performance calculations of grid-connected horizontal axis wind turbines. Part I: Description model. *Wind Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp 211-228.
- Torres, E. y García-Sanz, M. (2004). Experimental Results of the Variable Speed, Direct Drive Multipole Synchronous Wind Turbine: TWT1650. *Wind Energy*, Vol. 7, No. 2, pp. 109-118.
- United States Patent 5083039, *Variable speed wind turbines*, Jan., 21, 1992.
- United States Patent 5289041, *Speed control system for a variable speed wind turbine*, Feb. 22, 1994.
- Worldwatch Institute (2000), *Vital Signs 2000*, , ISBN 0-393-32022-7.