

# Comparación de estrategias de control multivariable sobre el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia

Sergio Fragoso Herrera, Francisco Vázquez Serrano, Juan Garrido Jurado  
Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio  
Leonardo Da Vinci, Córdoba, España,  
e-mail: [p52frhes@uco.es](mailto:p52frhes@uco.es) [fvazquez@uco.es](mailto:fvazquez@uco.es) [jgarrido@uco.es](mailto:jgarrido@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](mailto:fmorilla@dia.uned.es)

## Resumen

Los sistemas de conversión de energía eólica se pueden considerar como procesos multivariables con dos salidas (velocidad angular de giro y potencia generada) y dos entradas (ángulo de paso de pala, y de manera indirecta, par generado). Sin embargo, es habitual que estén controlados por sistemas de control descentralizados, que se diseñan sin tener en cuenta la interacción entre dichas variables. Este trabajo presenta un estudio comparativo de varios esquemas de control por desacoplo, que sí buscan una reducción de la interacción entre los lazos de control, con el esquema descentralizado clásico. El estudio se ha hecho en simulación sobre un modelo lineal obtenido por identificación para un aerogenerador real de pequeña potencia de velocidad y ángulo de paso de pala variable.

**Palabras Clave:** Control multivariable, desacoplo, aerogeneradores, identificación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de conversión de energía eólica o WECS (*Wind Energy Conversion Systems*) como la mayoría de los procesos industriales son complejos y multivariables en esencia. Se componen de varias variables de medida y varias señales de control, y a menudo presentan complejos acoplamientos entre ellas, lo cual puede dificultar el diseño del sistema de control.

Muchos métodos de control multivariable han sido implementados en aerogeneradores mediante diversos esquemas de control. En la Figura 1 se muestra el esquema de control multivariable general usado en este trabajo. En este esquema las variables a

controlar de velocidad angular  $\omega_r$  y potencia generada  $P_g$  son realimentadas hacia un controlador multivariable que establece los valores de las variables manipuladas de ángulo de paso de pala  $\beta$ , y de forma indirecta el par generado  $\tau_g$ , como se comentará más adelante.

Tradicionalmente la ingeniería de control ha resuelto el problema del acoplamiento mediante el uso de controladores monolazo PID [10], los cuales son adecuados cuando el nivel de interacción entre las diferentes variables no es muy elevado. Sin embargo, cuando las interacciones son más significativas, el desacoplamiento es tratado ineficientemente por parte de estos controladores. Es en este punto donde las estrategias de control multivariable centralizadas mediante técnicas de desacoplo [4] dan respuesta a la posible pregunta de si es posible reducir los efectos indeseados de la interacción que se producen en otras estrategias descentralizadas.

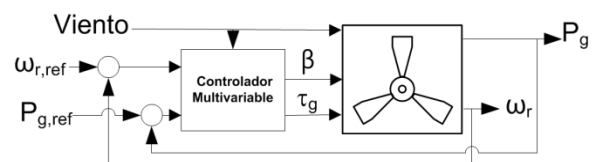


Figura 1: Esquema de control multivariable general

En este trabajo se proponen diversas estrategias de control multivariable por desacoplo que intentan mejorar el desempeño del sistema cuando las interacciones son significativas. Estas se aplican a, y toman como punto de partida para su diseño, el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia de velocidad y ángulo de paso de pala variable. Dicho modelo es obtenido por identificación a partir de un aerogenerador experimental ubicado en los laboratorios del Departamento de Informática y Análisis Numérico de la Universidad de Córdoba. Los parámetros técnicos, así como la descripción del sistema de adquisición y control utilizados aparecen documentados en [2].

El artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 presenta el modelo lineal obtenido del proceso de identificación en base a los datos experimentales. La sección 3 muestra todo el proceso de diseño de los controladores multivariables. En la sección 4 se presentan los resultados de comparación de las diferentes estrategias, y finalmente en la sección 5 se resumen las principales conclusiones

## 2. MODELO IDENTIFICADO

El aerogenerador experimental bajo estudio es un sistema fundamentalmente con dos entradas y dos salidas, donde el vector de entrada  $u$  está compuesto por el ángulo de paso de pala  $\beta$  en el rango 0-25°, y el ciclo de trabajo  $\alpha$  en el rango 0-100%. Este ciclo de trabajo determina la lógica de conmutación PWM de un semiconductor que forma parte de un circuito de electrónica de potencia acoplado entre la salida del generador eléctrico y la carga [3]. Este circuito permite modificar la resistencia de carga del aerogenerador, permitiendo manipular así la corriente de salida del mismo, y por tanto permitiendo modificar el par generado.

El viento es una variable manipulable en el aerogenerador experimental, para que se puedan recrear distintas condiciones de operación, pero desde el punto de vista de control tendrá la consideración de perturbación medible, como se muestra en la Figura 1.

El vector de salida  $y$  está compuesto por la velocidad angular de giro  $\omega_r$  en rpm, y por la potencia eléctrica generada  $P_g$  en W.

Por otro lado, el aerogenerador es un proceso esencialmente no lineal debido principalmente a su comportamiento aerodinámico. Tradicionalmente se utiliza el término  $C_p(\lambda, \beta)$  o coeficiente de potencia, que permite caracterizar esta dinámica no lineal, y que será descrito y obtenido experimentalmente en el siguiente apartado.

Las metodologías propuestas en este trabajo se basan en sistemas lineales, por lo que es necesario obtener un modelo lineal aproximado del proceso experimental de tal forma que este estuviera definido como se muestra en la expresión (1), donde la matriz  $G(s)$  representa la matriz de funciones de transferencia del proceso, y la matriz  $G_D(s)$ , la del modelo de perturbación asociado a la entrada de viento  $v$ .

$$\begin{pmatrix} \omega_r \\ P_g \end{pmatrix} = G(s) \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} + G_D(s)v \quad (1)$$

## 2.1. CURVA CARACTERÍSTICA DEL AEROGENERADOR. COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia  $C_p$  es el parámetro considerado más importante para el diseño del controlador en un WECS, especialmente en el caso de la regulación de la potencia generada [1]. Este parámetro representa la eficiencia del aerogenerador, y se define como la fracción de energía eólica extraída por la turbina del total de energía disponible que fluye a través del área barrida por el rotor.

El coeficiente de potencia es una función no lineal dependiente del coeficiente de velocidad específica  $\lambda$  (*tip-speed-ratio*), el cual a su vez depende de la velocidad del viento, y del ángulo de paso de las palas  $\beta$  (*Pitch*). En la práctica, el coeficiente de potencia es difícil de obtener y varía de un aerogenerador a otro. Se usan modelos analíticos para describirlo [11]; sin embargo, estos modelos son sólo aproximados y en muchos casos no hay una justificación válida para su uso.

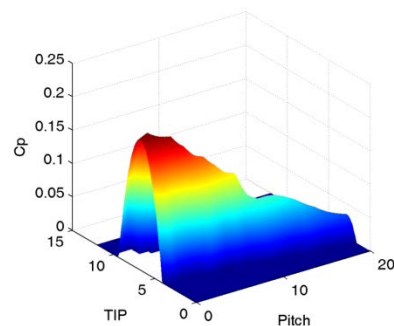


Figura 2: Coeficiente de potencia  $C_p(\lambda, \beta)$  experimental obtenido mediante extrapolación

En la Figura 2, se muestra la representación gráfica del coeficiente de potencia  $C_p$  frente al coeficiente de velocidad específica  $\lambda$  (*TIP*) y al ángulo de paso de pala  $\beta$  (*pitch*) que se ha obtenido experimentalmente para el aerogenerador de pequeña potencia bajo estudio. Para cada valor de  $\beta$ , pueden obtenerse curvas polinómicas que muestran el coeficiente de potencia frente a  $\lambda$ , las cuales pueden ajustarse mediante expresiones del tipo.

$$C_p(\lambda)|_{\beta=cte} = c_1\lambda^2 + c_2\lambda + c_3 \quad (2)$$

En la misma Figura 2 se muestra la existencia de un punto óptimo para  $\lambda$  y  $\beta$  donde el coeficiente de potencia es máximo. Este punto óptimo se corresponde con los valores 6.8 de coeficiente de velocidad específica y un 1° de ángulo de paso de pala.

## 2.2. MODELO LINEAL

El modelo lineal ha sido obtenido a partir de un proceso de identificación usando los datos arrojados por la planta trabajando sobre un punto de operación límite entre la zona subnominal y nominal. El punto de operación está definido por la velocidad nominal del equipo y por el valor del coeficiente de velocidad específico óptimo de la Figura 2. La ecuación (3) obtiene las condiciones de velocidad del viento que se deben dar para operar en dicho punto, donde  $R$  representa el radio del rotor.

$$v_{nom} = \frac{\omega_{r\_nom} \cdot R}{\lambda_{opt}} \approx 8 \text{ m/s} \quad (3)$$

En esta zona de operación de transición entre dos regiones de funcionamiento del aerogenerador es donde a priori pueden manifestarse mayores interacciones entre las variables. Esta zona define el límite máximo donde la velocidad angular debe seguir la referencia óptima establecida mediante las técnicas habituales de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT *Maximum Power Point Tracking*) antes de entrar en la zona nominal de velocidad. Para situar al aerogenerador en este punto, en lazo abierto el vector de entrada debe estar compuesto por los valores que optimizan la velocidad angular  $u = [1^\circ, 70\%]$ . El vector de salida en lazo abierto se compone del valor óptimo de la velocidad angular, y del valor de potencia eléctrica generada asociada a esa velocidad  $y = [1746 \text{ rpm}, 6.6 \text{ W}]$ . Estos datos definen el punto de operación en torno al cual se lleva a cabo la identificación.

El modelo resultante, obtenido de la herramienta de identificación de Matlab, se muestra en (4) donde los modelos de cada elemento tienen un ajuste en torno al 90%.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{-8.3951}{118.4s^2 + 21.77s + 1} & \frac{-491.4}{35.36s^2 + 11.89s + 1} \\ \frac{-0.06102}{16.93s + 1} & \frac{6.7614}{0.93526s + 1} \end{pmatrix}$$

$$G_D(s) = \begin{pmatrix} \frac{345}{104.6s^2 + 20.45s + 1} \\ \frac{2.341}{41.53s^2 + 14.85s + 1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

En la Figura 3 se muestra el ajuste entre los datos experimentales y el modelo identificado. El ensayo para la identificación se ha realizado en torno al punto de operación definido anteriormente. Para obtener  $g_{11}(s)$  y  $g_{21}(s)$  se aplica un escalón de  $+8^\circ$  y tras 600 segundos uno de  $-8^\circ$  para volver al punto inicial. Similarmente, para obtener  $g_{12}(s)$  y  $g_{22}(s)$  se aplica un salto de  $-10\%$  en el ciclo de trabajo y de  $+10\%$ . Para obtener las funciones de  $G_D(s)$  se aplica

una transición en la entrada de viento de  $-1 \text{ m/s}$  y luego de  $+1 \text{ m/s}$ .

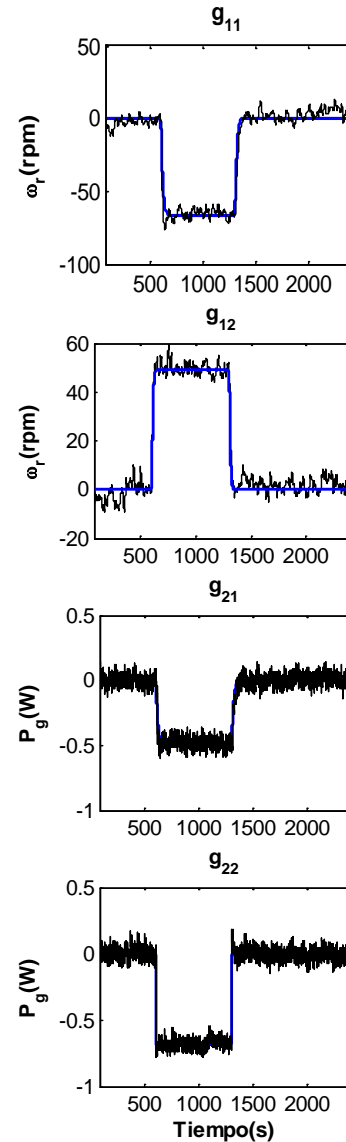


Figura 3: Ajuste de los datos experimentales y el modelo identificado

## 3. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

### 3.1. ANÁLISIS DE INTERACCIÓN

Como se ha discutido anteriormente, el nivel de interacción entre variables supone una dificultad para el control de un proceso multivariable, por lo que es muy importante conocer el grado de interacción para seleccionar la estrategia de control adecuada.

Mediante la clásica matriz de ganancias relativas o RGA (*Relative Gain Array*) es posible medir el grado de interacción que existe entre variables manipuladas

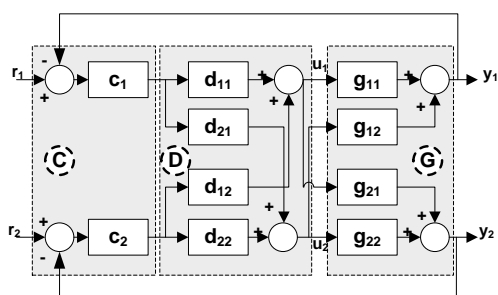
y controladas, así como poder seleccionar el emparejamiento entre las mismas que presente a priori mejor controlabilidad.

La RGA del modelo se muestra en (5). Se observa que el nivel de interacción adquiere un valor significativo en esta zona, y que el emparejamiento más adecuado debería ser el marcado por la diagonal principal de la matriz del proceso  $u_1 - y_1$  y  $u_2 - y_2$ . Este emparejamiento es el que se ha considerado en el esquema de control descentralizado de la Figura 1.

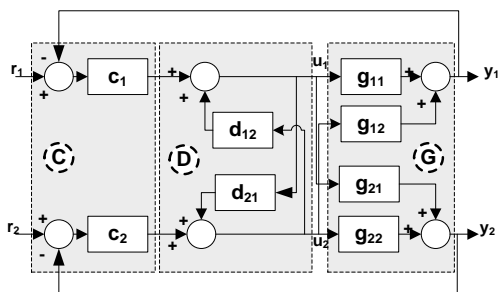
$$RGA = \begin{pmatrix} 0.6543 & 0.3457 \\ 0.3457 & 0.6543 \end{pmatrix} \quad (5)$$

### 3.2. CONTROL CENTRALIZADO CON DESACOPLO

Hay dos aproximaciones al control centralizado: una estrategia centralizada pura [6] o una red de desacoplo combinada con un control descentralizado diagonal [9]. Este último puede ser diseñado combinando un controlador diagonal  $C(s)$ , con un bloque compensador diagonal  $D(s)$ , de tal forma que el controlador vea el proceso aparente  $Q(s) = G(s) \cdot D(s)$ , como un conjunto de  $n$  procesos completamente independientes. El diseño de la red de desacoplo para un proceso  $n \times n$  es obtenido especificando  $n$  elementos del compensador  $D(s)$ , o las  $n$  funciones de transferencia deseadas del proceso aparente  $Q(s)$ .



(a)



(b)

Figura 4: Sistemas de control por desacoplo para un proceso 2x2: (a) desacoplo convencional; (b) desacoplo inverso

La mayoría de las aproximaciones a un control por desacoplo usan un esquema de desacoplo convencional en el cual las entradas del proceso son derivadas de una combinación de las salidas del controlador realimentadas, Figura 4a. Existen dos métodos para el diseño de la red de desacoplo convencional: dinámico, cuando  $D(s)$  es obtenida a partir del proceso  $G(s)$ , tal y como muestra (6), y estático, cuando sólo se utiliza la ganancia en estado estacionario  $G(0)$ .

$$D(s) = G^{-1}(s) \cdot Q(s) \quad (6)$$

Al mismo tiempo generalmente se suelen asumir dos simplificaciones a estos dos métodos, que constituyen el desacoplo simplificado, donde los elementos de la diagonal principal de la red de desacoplo son considerados la unidad.

Usando la estructura del desacoplo inverso de la Figura 4b, es posible mantener el mismo proceso aparente  $Q(s)$  del desacoplo ideal, mientras se siguen usando los elementos de la red desacoplo simplificado [5]. La matriz de desacoplo  $D(s)$  se divide en dos matrices: una matriz  $D_d(s)$  en el camino directo entre las salidas del controlador y las entradas del proceso, y una matriz  $D_o(s)$  en el camino inverso entre las salidas y las entradas del controlador. La expresión de la matriz de desacoplo completa  $D(s)$  es obtenida como sigue:

$$D(s) = D_d(s) \cdot (I - D_o(s) \cdot D_d(s))^{-1} \quad (7)$$

La Tabla 1 del apéndice A recoge las tres matrices compensadoras obtenidas tras aplicar las diversas técnicas de desacoplo, conjuntamente con los procesos aparentes que constituyen el elemento fundamental para la sintonía del controlador diagonal.

### 3.3. COMPENSACIÓN FEEDFORWARD

Como complemento a la estrategia de control multivariable centralizada con desacoplo se ha incorporado en algunas técnicas una compensación feedforward. El problema de control feedforward se muestra en la Figura 5. El objetivo del diseño del compensador feedforward  $g_{ff}$ , es que los efectos de la entrada de perturbación  $d$ , en este caso el viento, se minimicen a la salida del proceso  $y$ .

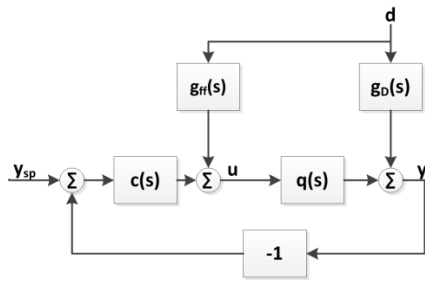


Figura 5: Diagrama de bloques que ilustra el esquema de compensación feedforward

En la ecuación (9) del apéndice A se muestran las funciones de transferencia de compensación feedforward para el punto de operación analizado en este trabajo aplicado al desacoplo simplificado dinámico, y al desacoplo inverso. Estas técnicas de desacoplo permiten diseñar la compensación feedforward perfecta puesto que generan procesos aparentes completamente diagonales.

### 3.4. SINTONÍA DE CONTROLADORES

Después de determinar las redes de desacoplo, los parámetros del controlador descentralizado  $C(s)$

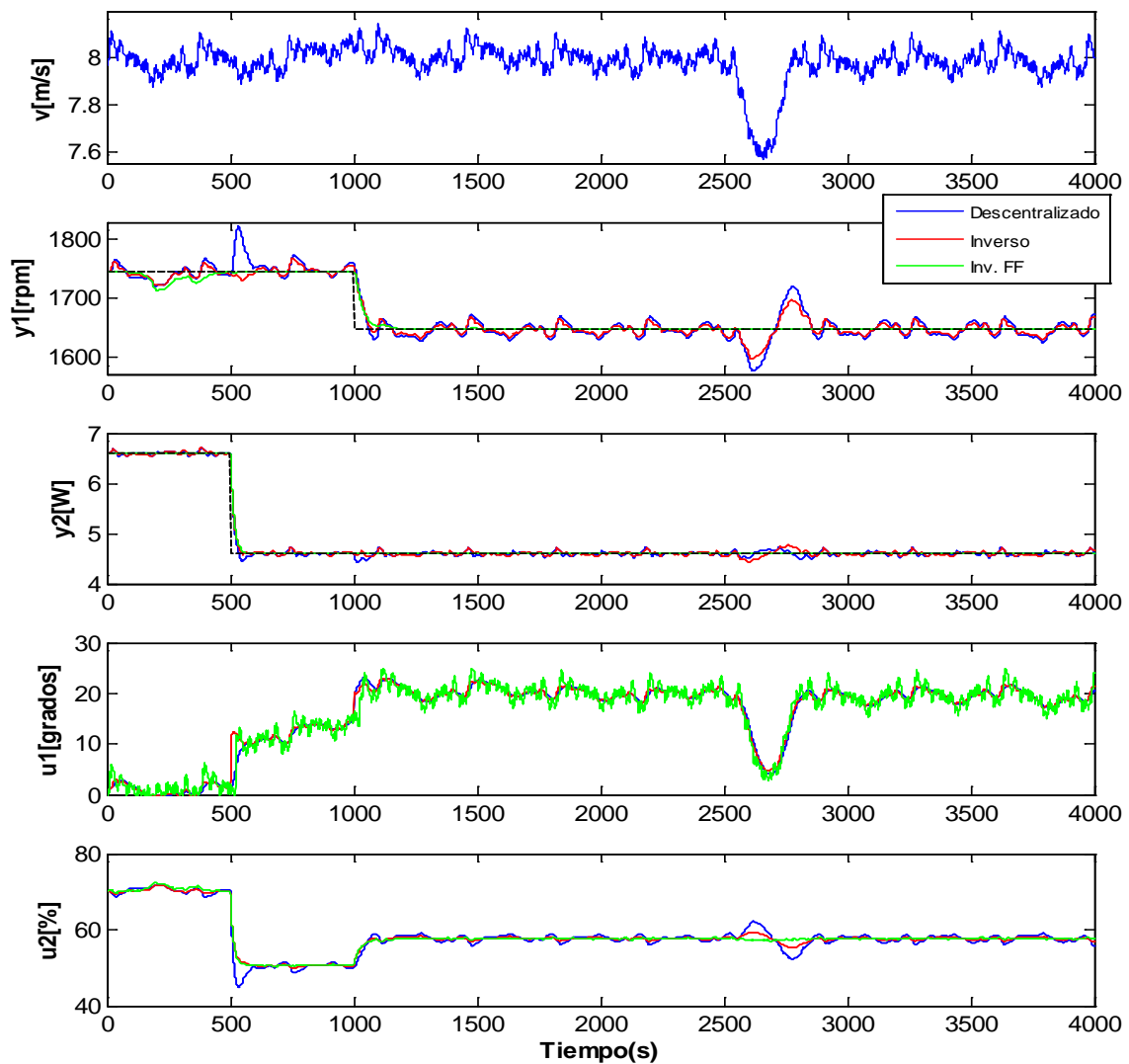


Figura 6: Registro de salida (viento, salidas, señales de control) de la simulación en lazo cerrado

La compensación feedforward perfecta se obtiene cuando,

$$g_{ff}(s) = \frac{-g_d(s)}{q(s)} \quad (8)$$

pueden ser sintonizados independientemente, mediante técnicas de sintonía de procesos monovariantes que garanticen la estabilidad y desempeño de cada lazo [8]. En este trabajo se ha recurrido a la sintonía por especificación de margen de fase. Se ha especificado un margen de fase de  $60^\circ$  para ambos lazos con un controlador PI. El resultado

de la sintonía para cada estrategia de control se recoge en la Tabla 2 del apéndice A.

## 4. RESULTADOS

Con la ayuda de un modelo de viento que permite reconstruir perfiles de velocidad del viento con diferentes componentes (turbulencia, ráfaga,...) [7] se ha simulado la respuesta del sistema en lazo cerrado para las diferentes estrategias de control propuestas.

La respuesta en lazo cerrado de algunas de las estrategias consideradas se muestra en la Figura 6, donde se representan las salidas, señales de control, así como, el perfil de la velocidad de viento generado. El resto de estrategias presentan unos resultados similares, así que con el objetivo de aclarar la figura, sólo se muestran a modo ilustrativo, la estrategia descentralizada puro, y las estrategias con desacoplo inverso con y sin compensación feedforward. El perfil de viento se constituye de una componente media de 8 m/s a la cual se le ha agregado una componente turbulenta de 0.1 m/s, y una componente de ráfaga de 0.5 m/s entre los 2500 y 2700 segundos de simulación.

Ambos lazos comienzan la simulación teniendo establecidas las consignas sobre el punto donde se ha obtenido el modelo. A los 500 segundos de simulación se produce una reducción de 2W en la consigna de potencia eléctrica generada, lo cual se puede corresponder con una modificación en las condiciones de carga del sistema. A los 1000 segundos de simulación, el lazo de control de velocidad angular cambia su valor de referencia de los 1746 rpm a las 1646 rpm, para comprobar cómo responde el sistema de control frente a este tipo de cambio.

La Tabla 3 del apéndice A muestra una comparación del resultado de simulación entre todas las estrategias de control a través de diversos índices de desempeño, como el IAE, el IADU y el valor de desviación estándar.

Con los índices de la Tabla 3 se observa que en este punto de operación analizado del aerogenerador, las estrategias de control con desacoplo mejoran en la mayoría de los casos el índice de desempeño IAE del lazo de control de velocidad en comparación con la estrategia descentralizada pura. Esto mismo no ocurre sin embargo en el lazo de control de potencia, donde la estrategia descentralizada tiene un valor de IAE menor que la mayoría de las estrategias con desacoplo. En cuanto al desempeño de las señales de control, las estrategias con desacoplo mejoran al control descentralizado puro en el tratamiento de la

segunda señal de control, siendo este último más eficiente en la manipulación de la primera señal de control. Cabe destacar la mejoría del resultado de las técnicas con compensación feedforward con respecto a sus homónimas sin compensación en lo referente a los índices IAE, y a la desviación estándar.

## 5. CONCLUSIONES

Un sistema de conversión de energía eólica se ha utilizado en este trabajo como ejemplo de proceso en el que el nivel de interacción entre variables es un factor a considerar a la hora de elegir y diseñar la estrategia de control. Mediante simulaciones, que emplean el modelo lineal identificado para un punto de operación de un aerogenerador real de laboratorio, se han comparado varios esquemas de control por desacoplo con el esquema descentralizado clásico, llegando a resultados interesantes en cuanto a índices de desempeño. Estos resultados muestran que las estrategias multivariable centralizadas mediante redes de desacoplo podrían ser una buena alternativa en el control de este tipo de sistema, sobre todo en aquellas zonas de operación donde el nivel de interacción adquiere un valor significativo.

### Agradecimientos

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

### Referencias

- [1] Dodson L., Busawon K., and Jovanovic M., "Estimation of the power coefficient in a wind conversion system," in *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, 2005, pp. 3450–3455.
- [2] Frago S., Vázquez F., and Morilla F., "Control Multivariable Descentralizado de un Aerogenerador Experimental de Pequeña Potencia," in *XXXIV Jornadas de Automática*, 2013.
- [3] Frago S., Vázquez F., and Morilla F., "Control de velocidad mediante paso de pala para un aerogenerador experimental de pequeña potencia," in *XXXIV Jornadas de Automática*, 2013.
- [4] Garrido J., Vázquez F., Morilla f., and Hagglund T., "Practical Advantages of

- Inverted Decoupling,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, Jul. 2011.
- [5] Garrido J, Vázquez F., and Morilla F., “An Extended Approach of Inverted Decoupling,” *J. Process Control*, vol. 21, no. 1, pp. 55–68, Jan. 2011.
- [6] Garrido J., Vázquez F., and Morilla F., “Multivariable PID Control by Decoupling,” *Int. J. Syst. Sci.*, 2014.
- [7] González M., Vázquez F., and Morilla F., “Control Multivariable Centralizado con Desacoplo para Aerogeneradores de Velocidad Variable,” *Rev. Iberoam. automática e informática Ind.*, vol. 7, no. 4, pp. 53–64, Oct. 2010.
- [8] Morilla F., Vázquez F., and Garrido J., “Centralized PID Control by Decoupling for TITO Processes,” in *13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2008, pp. 1318–1325.
- [9] Nordfeldt P., “PID Control of TITO Systems,” Lund University, 2005.
- [10] Pao L.Y. and Johnson K.E., “A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms,” in *2009 American Control Conference*, 2009, pp. 2076–2089.
- [11] Xia Y., Ahmed K.H., Member S., and Williams B.W., “Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1122–1132, 2013.

## APÉNDICE A

Tabla 1: Matrices de desacoplo y procesos aparentes obtenidas a partir del modelo (4)

Método de desacoplo	$D(s)$
Simplificado Dinámico	$\begin{pmatrix} 1 & \frac{-196s^2 - 36.04s - 1.655}{s^2 + 0.3363s + 0.02828} \\ \frac{0.0004986s + 0.0005331}{s + 0.05907} & 1 \end{pmatrix}$
Simplificado Estático	$\begin{pmatrix} 1 & -58.5341 \\ 0.00902 & 1 \end{pmatrix}$
Inverso	$D_d(s) = 1, D_o(s) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-196s^2 - 36.04s - 1.655}{s^2 + 0.3363s + 0.02828} \\ \frac{0.0004986s + 0.0005331}{s + 0.05907} & 1 \end{pmatrix}$
	$Q(s)$
Simplificado Dinámico	$\begin{pmatrix} \frac{-0.07s^3 - 0.03s^2 - 0.004s - 0.0001}{s^5 + 0.57s^4 + 0.12s^3 + 0.01s^2 + 0.0007s + 1.4 \cdot 10^{-5}} & 0 \\ 0 & \frac{7.93s^3 + 3.71s^2 + 0.49s + 0.018}{s^4 + 1.46s^3 + 0.47s^2 + 0.05s + 0.001} \end{pmatrix}$
Simplificado Estático	$\begin{pmatrix} \frac{0.21s^2 - 0.03s - 0.002}{s^3 + 0.24s^2 + 0.01s + 0.0004} & \frac{-423.2s^2 - 156.2s - 26.83}{s^3 + 1.4s^2 + 0.38s + 0.03} \\ \frac{-0.003s^2 - 0.001s - 6.81 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0.24s^2 + 0.01s + 0.0004} & \frac{7.22s^2 + 2.3s + 0.07}{s^3 + 1.4s^2 + 0.38s + 0.03} \end{pmatrix}$
Inverso	$\begin{pmatrix} \frac{-8.3951}{118.4s^2 + 21.77s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{6.7614}{0.93526s + 1} \end{pmatrix}$

$$G_{ff\_simp}(s) = \begin{pmatrix} \frac{42.38s^5 + 24.54s^4 + 5.477s^3 + 0.587s^2 + 0.03s + 0.00059}{s^5 + 0.66s^4 + 0.16s^3 + 0.018s^2 + 0.001s + 2.22 \cdot 10^{-5}} \\ \frac{-0.007s^4 - 0.01s^3 - 0.003s^2 - 0.0003s - 1.26 \cdot 10^{-5}}{s^5 + 0.829s^4 + 0.25s^3 + 0.03s^2 + 0.002s + 5.59 \cdot 10^{-5}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$G_{ff\_inv}(s) = \left( \frac{40848s^2 + 7511s + 345}{\frac{878.1s^2 + 171.7s + 8.395}{-2.189s - 2.341}} \right) \frac{1}{280.8s^2 + 100.4s + 6.761}$$

Tabla 2: Parámetros de los controladores PI

Método	PI Parámetros			
	$k_{p1} \left( \frac{\text{grados}}{\text{rpm}} \right)$	$k_{p2} \left( \frac{\%}{W} \right)$	$T_{i1} (s)$	$T_{i2} (s)$
Desacoplo Simplificado Dinámico	-0.054	0.0051	17.13	0.51
Desacoplo Simplificado Estático	-0.062	0.0096	13.71	0.75
Desacoplo Inverso	-0.054	0.0051	17.13	0.51
Descentralizado puro	-0.024	0.064	23.30	0.66

Tabla 3: Índices de desempeño y desviación estándar

Estrategia	IAE <sub>1</sub>	IAE <sub>2</sub>	IADU <sub>1</sub>	IADU <sub>2</sub>	std(y <sub>1</sub> )[rpm]	std(y <sub>2</sub> )[W]
Desacoplo Simplificado Dinámico	3.86·10 <sup>6</sup>	13196	205.03	1.06	45.43	0.3318
Desacoplo Simplificado Estático	3.16·10 <sup>6</sup>	17288	222.12	0.87	43.68	0.3348
Desacoplo Inverso	3.72·10 <sup>6</sup>	15229	182.12	0.78	44.10	0.3335
Desacoplo Simplificado Dinámico con Feedforward	1.21·10 <sup>6</sup>	3183.7	1389.6	1.47	43.98	0.3304
Desacoplo Inverso con Feedforward	1.46·10 <sup>6</sup>	1478.8	1482.1	1.44	42.11	0.3382
Descentralizado puro	5·10 <sup>6</sup>	14555	138.58	1.55	46.94	0.3347