

CONTROL PID 3x3 DE UN GRUPO CALDERA TURBINA

J. Garrido

Dept. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, p02gajuj@uco.es

F. Vázquez

Dept. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, fvazquez@uco.es

F. Morilla

Dept. de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, fmorilla@dia.uned.es

Resumen

En este trabajo se aborda el control de un proceso, un grupo caldera turbina, multivariable 3x3 no lineal con gran interacción y con fuertes restricciones en la magnitud y variación de las señales de control. Se propone utilizar un control centralizado PID 3x3, al que se llega mediante un diseño por desacoplo y la posterior reducción de la complejidad del controlador en base a su respuesta en frecuencia. En la implementación del controlador se ha podido incorporar una estrategia de anti-windup por acondicionamiento, cuya efectividad ha quedado claramente manifiesta en las simulaciones. En todas las pruebas realizadas se consigue un buen desacoplamiento y seguimiento de referencias, sin error en estado estacionario y respetando las restricciones impuestas a las señales de control. Los resultados se han contrastado con los obtenidos por otros autores, comprobándose un comportamiento similar e incluso mejor.

Palabras clave: grupo caldera turbina, control PID multivariable, control por desacoplo, control centralizado, técnicas anti-windup.

1 INTRODUCCIÓN

El grupo caldera turbina es un proceso 3x3 que presenta dinámicas no lineales bajo un amplio rango de condiciones de operación [1]. Para aprovechar toda su potencialidad, su control debe llevarse a cabo mediante estrategias de control multivariable. De hecho, la necesidad de controlar simultáneamente varias variables con un alto grado de interacción, justifica el empleo de cualquiera de las estrategias de control multivariable.

Cuando en un sistema multivariable las interacciones entre los distintos lazos son débiles el uso de un control descentralizado [12], [13], [14] puede ser adecuado. Pero cuando tales acoplamientos son

importantes es necesario acudir a controladores centralizados. Para su diseño, una de las técnicas más utilizada ha sido la que realiza el diseño en dos fases: primero se diseña una red de desacoplo para reducir las interacciones del sistema y tras ello, se ajusta un control descentralizado PI o PID [15] para el proceso en lazo abierto equivalente. Más difícil de encontrar son los trabajos que apuestan por emplear estrictamente controladores PID en el esquema de la figura 1, en donde se muestra un control centralizado 3x3 con nueve controladores. Así, el trabajo de Lieslehto [6] plantea el control centralizado $n \times n$ y su particularización al caso PID a partir de la teoría de control por modelo interno (IMC). Otro trabajo más experimental, el de Wang y col. [16], aborda el ajuste de los controladores como un problema de optimización en el que es preciso definir la matriz de funciones de transferencia del sistema en lazo cerrado deseada.

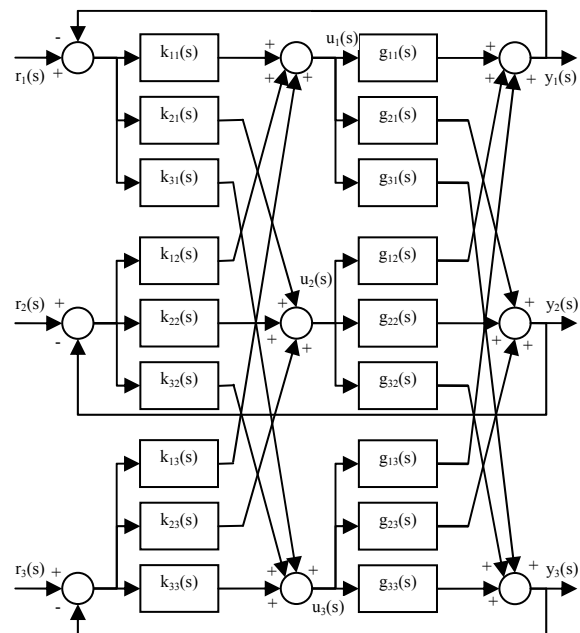


Figura 1: Control multivariable 3x3 centralizado

En los últimos años, el grupo caldera turbina ha sido

estudiado desde distintos enfoques, como control robusto, control basado en algoritmos genéticos (GA), control difuso, control de ganancia programada y control no lineal, entre otros.

Los controladores robustos basados en control H_∞ [10], [11] consiguen buena robustez y seguimiento de referencias ante cambios en el punto de operación; sin embargo, tienen dificultades para tratar las restricciones de las señales de control. Los métodos basados en algoritmos genéticos como GA/PI o GA/LQR [2], [3] pueden provocar que la respuesta del sistema tenga grandes sobrepicos o errores en estado estacionario. Los controladores no lineales [5] muestran un buen desacoplamiento, seguimiento de referencias y robustez en diferentes puntos de operación, ya que en su diseño contemplan la dinámica no lineal del sistema.

En este trabajo, se lleva a cabo el control de un grupo caldera turbina mediante un control centralizado PID por desacoplo [7], [8]. Además se utiliza un mecanismo de protección anti-windup para mejorar el comportamiento ante las restricciones de las señales de control. En la sección 2 se describe el modelo del proceso a controlar. En la sección 3 se aborda el control por desacoplo PI de dicho sistema. En la sección 4 se comparan los resultados con los de otros autores, y se finaliza en la sección 5 con las conclusiones.

2 MODELO DEL GRUPO CALDERA TURBINA

El modelo usado para el grupo caldera turbina en este trabajo fue desarrollado por Bell y Aström [1]. Es un sistema multivariable no lineal de tercer orden altamente acoplado, con duras restricciones y límites de cambio sobre los actuadores. La dinámica del sistema viene dada por

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 = (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ \dot{x}_3 = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \end{cases} \quad (1)$$

donde las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 representan la presión de la caldera (kg/cm^2), la potencia de salida (MW) y la densidad del fluido (kg/m^3), respectivamente. Las entradas u_1 , u_2 y u_3 son las posiciones de las válvulas para el flujo de combustible, el control de vapor y el flujo de agua, respectivamente. La salida y_3 es el nivel de agua del

colector de caldera (m) respecto al nivel de referencia para el punto de operación nominal y por tanto puede tomar valores positivos y negativos. Las variables a_{cs} y q_e son la calidad del vapor y la velocidad de evaporación (kg/s), y vienen dadas por

$$\begin{aligned} a_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned} \quad (2)$$

Debido a limitaciones en los actuadores, las señales de control están sujetas a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} 0 &\leq u_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3) \\ \dot{u}_1 &\leq |0.007| \\ -2 &\leq \dot{u}_2 \leq 0.02 \\ \dot{u}_3 &\leq |0.05| \end{aligned} \quad (3)$$

Para poder diseñar el control centralizado PID por desacoplo es necesario linealizar el sistema no lineal (1) en torno a un punto de operación. Los controles lineales para este proceso encontrados en la literatura toman como punto de operación nominal $x^0 = [108 \ 66.65 \ 428]^T$, $u^0 = [0.34 \ 0.69 \ 0.433]^T$ e $y^0 = [108 \ 66.65 \ 0]^T$. Las matrices del sistema lineal son

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.0025 & 0 & 0 \\ 0.0694 & -0.1 & 0 \\ -0.0067 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.349 & -0.15 \\ 0 & 14.155 & 0 \\ 0 & -1.398 & 1.659 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.0063 & 0 & 0.0047 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.253 & 0.512 & -0.014 \end{bmatrix}$$

A partir del modelo en espacio de estados (4) obtenemos la matriz $G(s)$ de funciones de transferencia del proceso (5). Hay un polo común a toda la dinámica del proceso en $s = -0.002509$, además de un polo común en $s = -0.1$ en la segunda fila (y_2), y un integrador en la tercera (y_3). Esta matriz 3x3 será la que utilicemos en el diseño del control centralizado por desacoplo.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.9}{s+0.002509} & \frac{-0.34904}{s+0.002509} & \frac{-0.15}{s+0.002509} \\ \frac{-1.3878 \cdot 10^{-17}(s-4.502 \cdot 10^{15})}{(s+0.002509)(s+0.1)} & \frac{14.1555(s+0.0007969)}{(s+0.002509)(s+0.1)} & \frac{-0.010414}{(s+0.002509)(s+0.1)} \\ \frac{0.25328(s-0.003871)(s+0.02892)}{(s+0.002509)s} & \frac{0.5124(s-0.01535)(s+0.0007)}{(s+0.002509)s} & \frac{-0.013967(s-0.4918)(s+0.003539)}{(s+0.002509)s} \end{pmatrix} \quad (5)$$

3 CONTROL POR DESACOPLO

En [7] se describe el control centralizado PID por desacoplo para procesos 2x2. En este apartado dicha metodología de diseño se aplica al proceso 3x3 descrito en (5). Se habla de control centralizado de un proceso lineal 3x3 descrito por la matriz de funciones de transferencia

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & g_{23}(s) \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & g_{33}(s) \end{pmatrix} \quad (6)$$

cuando está controlado por una ley de control en función de la señal de error, tal y como se presenta en la figura 1. Esto es,

$$U(s) = K(s)E(s) = \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11}(s) & k_{12}(s) & k_{13}(s) \\ k_{21}(s) & k_{22}(s) & k_{23}(s) \\ k_{31}(s) & k_{32}(s) & k_{33}(s) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1(s) - y_1(s) \\ r_2(s) - y_2(s) \\ r_3(s) - y_3(s) \end{pmatrix} \quad (7)$$

donde K(s) es la matriz de funciones de transferencia del controlador.

Existen diferentes metodologías para diseñar los nueve elementos de $k_{ij}(s)$ del controlador. Las más conocidas, como proponen Skogestad y Postlethwaite [9], primero diseñan un red de desacoplo D(s) y luego un controlador diagonal $K_d(s)$ para el proceso equivalente. El controlador centralizado resultante es $K(s)=D(s) \cdot K_d(s)$.

Otras metodologías [4], [6], [8], [16] bajo el paradigma de “control multivariable por desacoplo”, diseñan el controlador K(s) con el objetivo de que la matriz de funciones de transferencia en lazo cerrado $G(s) \cdot K(s) \cdot [I + G(s) \cdot K(s)]^{-1}$ sea una matriz diagonal. Como este objetivo está asegurado si la matriz de funciones de transferencia en lazo abierto $Q(s)=G(s) \cdot K(s)$ es una matriz diagonal, las técnicas que se emplean en control multivariable por desacoplo para calcular K(s) son muy similares a las que se emplean para diseñar las redes de desacoplo.

En definitiva, exigiendo que la matriz de funciones de transferencia $Q(s)=G(s) \cdot K(s)$ del sistema en lazo abierto sea diagonal

$$Q(s) = \begin{pmatrix} q_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & q_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & q_3(s) \end{pmatrix} \quad (8)$$

se llega a la siguiente expresión para el control por desacoplo:

$$K(s) = G(s)^{-1} \cdot Q(s) \quad (9)$$

Por tanto, bastaría con especificar las tres funciones de transferencia $q_i(s)$ para que los nueve elementos $k_{ij}(s)$ del controlador se puedan determinar a partir de la expresión (9).

3.1 ¿CÓMO ESPECIFICAR LAS $q_i(s)$?

El problema de diseño que aparece en (9) tendrá solución si las especificaciones de $q_i(s)$ están bien planteadas, es decir si tienen en cuenta: la naturaleza del proceso y que el controlador sea realizable. Además, del sistema en lazo cerrado se espera que sea estable y que no presente error en estado estacionario para cambios en las consignas. Para que el sistema en lazo cerrado no presente error en estado estacionario, las tres funciones de transferencia deben incorporar un integrador puro. En definitiva se especificarán funciones del tipo

$$q_i(s) = k_i \cdot \bar{q}_i(s) \frac{1}{s} e^{-s\tau_i} \quad \text{con } \tau_i \geq 0 \quad (10)$$

El parámetro k_i se convierte en un parámetro de sintonización para alcanzar especificaciones de diseño y $\bar{q}_i(s)$ debe ser una función de transferencia racional que tome en consideración la dinámica no cancelable del proceso equivalente.

En el caso del sistema 3x3 bajo estudio (6), $\tau_i = 0$, ya que no hay retardos. Además, para $q_1(s)$ y $q_2(s)$ se escoge $\bar{q}_i(s)=1$ al ser los procesos estables y de fase mínima [8]. Con ello la función de transferencia en lazo cerrado tiene la forma típica de un sistema de primer orden, como muestra la siguiente expresión

$$h_i(s) = \frac{\frac{k_i}{s}}{1 + \frac{k_i}{s}} = \frac{1}{T_i s + 1} \quad (11)$$

con constante de tiempo $T_i=1/k_i$. Por tanto, para determinar el valor de k_i basta especificar la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado. En este caso escogemos $T_1=T_2=25$, lo que nos lleva a que $k_1=k_2=0.04$.

Para $q_3(s)$ se establece $\bar{q}_3(s) = \frac{s+z_i}{s}$, ya que el proceso equivalente es estable de fase mínima con integrador [8]. Ahora la función de transferencia en lazo cerrado viene dada por la siguiente expresión, que es un sistema de segundo orden con un cero en $s=-z_i$.

$$h_i(s) = \frac{k_i \frac{s+z_i}{s^2}}{1 + \frac{s+z_i}{s^2}} = \frac{k_i (s+z_i)}{s^2 + k_i s + k_i z_i} \quad (12)$$

Sus polos están caracterizados por la frecuencia natural y factor de amortiguamiento siguientes:

$$\omega_n = \sqrt{k_i z_i} \quad ; \quad \delta = \sqrt{\frac{k_i}{4z_i}} \quad (13)$$

Como caso particular, al escoger $k_i=4z_i$ se consiguen polos con un amortiguamiento crítico ($\delta=1$) y $\omega_n=2z_i$. Para el diseño seleccionamos $z_3=0.01$ y $k_3=0.04$ obteniendo en $q_3(s)$ un sistema críticamente amortiguado con $\omega_n=0.02$.

Por lo tanto, tras haber establecido las tres funciones de transferencia $q_i(s)$, el proceso diagonal equivalente en lazo abierto $Q(s)$ que resulta es:

$$Q(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.04}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.04}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0.04(s+0.01)}{s^2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Conocidos $G(s)$ y $Q(s)$, sustituyendo (5) y (14) en (9) se obtienen los nueve elementos $k_{ij}(s)$ del controlador multivariable centralizado por desacoplo $K(s)$. Sin embargo, estos elementos no tienen estructura PID, sino que son bastante más complejos. Para obtener un controlador centralizado PID por desacoplo se utilizan técnicas de reducción de modelos en base a la respuesta en frecuencia, como se describe en el siguiente apartado.

3.2 ¿CÓMO REDUCIR LOS $k_{ij}(s)$ A ESTRUCTURA PID?

Para que los elementos del controlador tengan naturaleza PID, basta con forzar la siguiente estructura en todos los elementos del controlador

$$k_{ji}(s) = \frac{k_i}{s} (K_{Dji} s^2 + K_{Pji} s + K_{Iji}) \quad (15)$$

donde aparecen sus tres ganancias: proporcional (K_{Pji}), integral (K_{Iji}) y derivativa (K_{Dji}). Para el caso PI basta forzar a que la ganancia derivativa sea nula.

Por otra parte, en lugar de aplicar la reducción de modelos a las expresiones completas de los elementos del controlador, se propone aplicarla después de separar aquello que obligatoriamente tiene que incorporar cada controlador, como son el integrador y la respectiva ganancia k_i . Por cuestiones numéricas es mejor aplicar la reducción de modelos a la expresión reducida inversa, con el modelo genérico de la siguiente expresión, de forma tal que las ganancias del controlador que mejor aproximan la respuesta en frecuencia vendrán determinadas por: $K_P=a_1/b_0$, $K_I=a_0/b_0$ y $K_D=a_2/b_0$.

$$M(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (16)$$

Tras aplicar este tipo de reducción al controlador $K(s)$ para el grupo caldera turbina, se obtiene el controlador $K_{PI}(s)$ de nueve PI. La reducción se realiza en el rango de frecuencias 0.0001 y 0.5.

$$K_{PI}(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.041(s+8.5 \cdot 10^{-4})}{s} & \frac{-0.0031(s-0.0502)}{s} & \frac{0.822(s+0.0105)}{s} \\ \frac{-5.817 \cdot 10^{-7}(s+337)}{s} & \frac{0.0028(s+0.1001)}{s} & \frac{-1.57 \cdot 10^{-5}(s-0.498)}{s} \\ \frac{-0.021(s+1.8 \cdot 10^{-4})}{s} & \frac{-0.0212(s-0.0113)}{s} & \frac{4.9331(s+0.0104)}{s} \end{pmatrix} \quad (17)$$

3.3 ANTI-WINDUP MULTIVARIABLE POR ACONDICIONAMIENTO

El grupo caldera turbina tiene unas fuertes restricciones en las señales de control (3), por lo que es necesario dotar al controlador de algún mecanismo de protección contra el efecto wind-up. De lo contrario su comportamiento se verá deteriorado al sobrepasar estas restricciones.

En este trabajo se utiliza una de las técnicas anti-windup multivariables que se describen en [4] llamada "acondicionamiento". Para su uso se exige que el controlador sea bipropio, es decir, que sus

elementos tengan igual grado en el numerador y denominador. Esto se cumple en nuestro caso, ya que los nueve elementos del controlador tienen estructura PI. El esquema de este mecanismo se muestra en la figura 2, en la que C_∞ es la matriz de ganancias del sistema cuando s tiende a infinito y $\bar{C}(s)$ es la matriz de funciones de transferencia que cumple con la siguiente igualdad:

$$C(s) = C_\infty + \bar{C}(s) \quad (18)$$

Además, el bloque ‘‘Saturaciones’’ debe incorporar un modelo de las restricciones a las que están sometidas las señales de control.

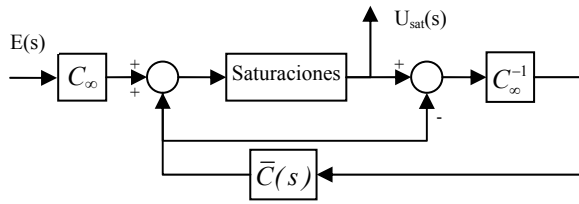


Figura 2: Esquema de control anti-windup por acondicionamiento

En (19) y (20) se muestran respectivamente, las matrices C_∞ y $\bar{C}(s)$ para el controlador desarrollado $K_{PI}(s)$. C_∞ es no singular, lo cual es necesario para que el control pueda llevarse a cabo.

$$C_\infty = \begin{pmatrix} 0.041 & -0.0031 & 0.8219 \\ -5.8 \cdot 10^{-7} & 0.0028 & -1.56 \cdot 10^{-5} \\ 0.0207 & -0.0212 & 4.9331 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\bar{C}(s) = \begin{pmatrix} \frac{3.49 \cdot 10^{-5}}{s} & \frac{0.0001538}{s} & \frac{0.008588}{s} \\ -0.000196 & 0.0002828 & 7.8 \cdot 10^{-6} \\ \frac{-3.75 \cdot 10^{-6}}{s} & \frac{0.0002404}{s} & \frac{0.05149}{s} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Por tanto para implementar el control de la figura 2 son necesarios la matriz de nueve ganancias (19) y su inversa, la matriz de nueve integradores (20) y el modelo de las restricciones sobre los actuadores (3).

4 RESULTADOS

En este apartado se comprueba el comportamiento del controlador diseñado en la sección anterior al aplicarlo al modelo no lineal del grupo caldera turbina descrito en el apartado 2, y se contrasta su respuesta con la de otros controladores de la

literatura. En concreto, la comparación se realiza con el controlador robusto de Tan en [11], y con el controlador multivariable no lineal descentralizado MNC en [5]. Aunque en [11] el controlador está formado únicamente por cuatro PI, dicha estrategia procede de la reducción de un control H_∞ , que es una técnica de diseño mucho más compleja. En [5] se propone un control no lineal descentralizado basado en la representación del sistema en espacio de estados. Tras definir las ecuaciones en lazo cerrado deseadas para cada una de las salidas, se obtienen los parámetros del controlador intentando compensar las interacciones como si fueran perturbaciones.

Se llevan a cabo dos pruebas: la primera, en la que desde el punto de operación nominal hacemos que el proceso se mueva a otro punto de trabajo cercano; y la segunda, en la que se produce un gran cambio entre dos puntos de operación muy lejanos. Para ello los tres controladores, así como el modelo no lineal del grupo caldera turbina son implementados en Simulink.

En la primera prueba se realiza un cambio a un punto de operación cercano a los 100 segundos. La presión de la caldera se incrementa desde 108 a 120 kg/cm², la potencia de salida de 66.65 a 120 MW y el nivel de agua se mantiene constante a 0 m. En las figuras 3 y 4 se muestra la respuesta del sistema (salidas y señales de control) para los tres controladores indicados anteriormente.

La figura 3 corresponde a las salidas del proceso. Los tiempos de asentamiento de las distintas salidas para los tres controladores son similares; sin embargo el control propuesto en este trabajo consigue una respuesta más suave y sin sobrepico en y_1 y una menor desviación en y_3 . Además, las señales de control (figura 4) son menos agresivas y de inferior magnitud que en los otros dos controladores.

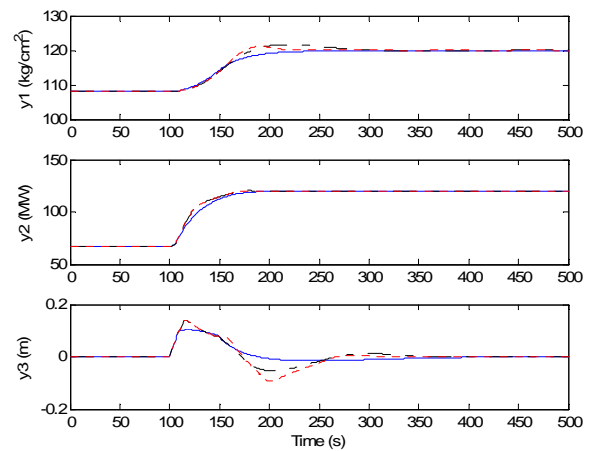


Figura 3: Salidas ante un cambio a un punto cercano

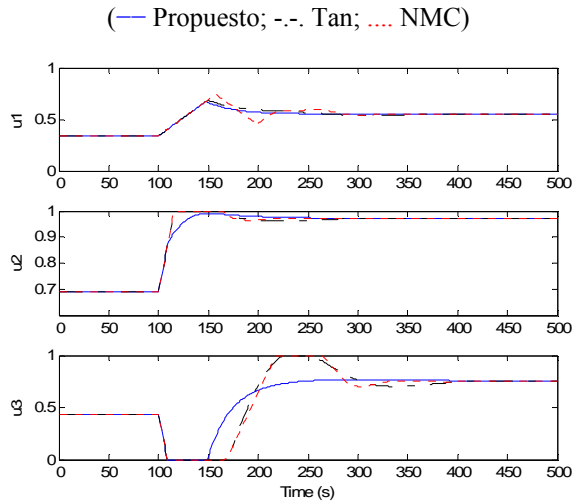


Figura 4: Señales de control ante un cambio a un punto cercano (— Propuesto; -.- Tan; NMC)

Aunque el controlador que se ha diseñado en el apartado 3 es un control lineal en torno a un punto de operación de una planta no lineal, su comportamiento es válido en un amplio rango de trabajo. Para demostrar esta robustez se realiza un gran cambio del punto de operación entre dos extremos alejados del punto de trabajo nominal. Este cambio se lleva a cabo a los 100 segundos. La presión de la caldera se incrementa desde 75.6 a 140 kg/cm², la potencia de 15.3 a 128 MW y el nivel de agua de -0.97 a 0.98 m. En las figuras 5 y 6 se muestra la respuesta de dicho controlador y su comparación con los otros dos controles. Las tres son muy similares, pero el control propuesto presenta una mejor evolución de y_1 con un asentamiento algo más rápido, y al igual que antes las acciones de control son más suaves.

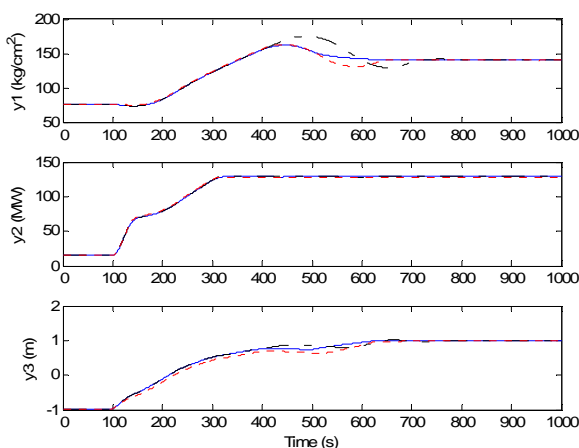


Figura 5: Salidas ante un gran cambio del punto de operación entre dos extremos de trabajo muy alejados (— Propuesto; -.- Tan; NMC)

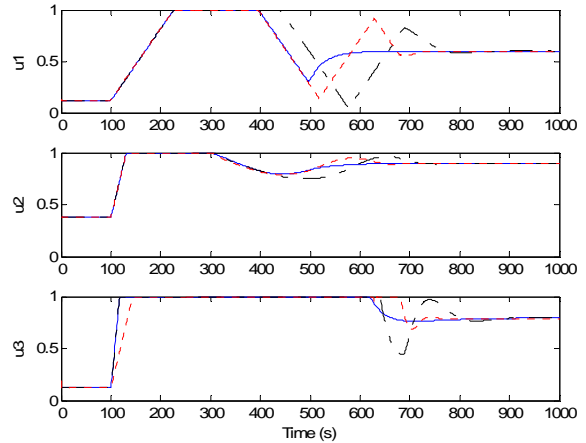


Figura 6: Señales de control ante un gran cambio del punto de operación entre dos extremos de trabajo muy alejados (— Propuesto; -.- Tan; NMC)

Los controladores LQR y GA/LQR de [3] también han sido simulados y contrastados con el controlador propuesto; pero no están ilustrados en este trabajo debido a que su respuesta es peor que la de los dos controles escogidos para comparar con el propuesto aquí.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha aplicado una nueva metodología de diseño de controladores PID multivariable a un grupo caldera turbina. Tras linealizar el sistema en torno a un punto de operación y obtener un modelo lineal de tercer orden, se realiza el diseño del controlador de manera directa en dos pasos: primero se diseña un control centralizado con acción integral que minimice los efectos de interacción y asegure error de posición nulo. En segundo lugar dicho control se aproxima por una red de nueve controladores PI en base a la respuesta en frecuencia. Debido a las restricciones de las entradas de la planta, el control se implementa con un mecanismo anti-windup por acondicionamiento.

Las pruebas realizadas demuestran que el controlador funciona de manera adecuada con el proceso no lineal bajo estudio. Se reducen las interacciones, hay un buen seguimiento de referencias, se consigue error de posición nulo y se trabaja correctamente en un amplio rango de condiciones de operación. Además, su respuesta es comparada con dos controladores de la bibliografía mostrando un comportamiento de similares características e incluso mejor en determinados aspectos.

Por último, decir que consideramos al grupo caldera turbina utilizado en este trabajo como un candidato

idóneo para proponerlo como benchmark de control multivariable en el grupo de Ingeniería de Control de CEA.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) a través del proyecto DPI 2004-05903. J. Garrido agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación su beca FPU (Ref. AP2006-01049).

Referencias

- [1] Bell, R. D.; Aström, K.J., (1987) "Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160 MW unit", Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Suecia.
- [2] Dimeo, R. M.; Lee, K. Y., (1994) "Genetics-based control of a boiler-turbine plant", Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control, pp 3512-3517.
- [3] Dimeo, R. M.; Lee, K. Y., (1995) "Boiler-Turbine control system design using a genetic algorithm", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, Num. 4, pp 752-759.
- [4] Goodwin, G. C.; Graebe, S. F.; Salgado, M. E., (2001) "Control System Design". Prentice Hall.
- [5] Li, D.; Zeng, H.; Xue, Y.; Jiang, X., (2006) "Multivariable nonlinear control design for boiler-turbine units", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp 7518-7522.
- [6] Lieslehto, J., (1996) "MIMO controller design using SISO controller design methods", Proceeding of the 13th IFAC World Congress, pp. 169-173.
- [7] Morilla, F.; Vázquez, F.; Garrido, J., (2007) "Control centralizado PID 2x2 por desacoplo", XXVIII Jornadas de Automática, Huelva.
- [8] Morilla, F.; Vázquez, F.; Garrido, J., (2008) "Centralized PID Control by Decoupling for TITO Processes", 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation.
- [9] Skogestad, S.; Postlethwaite, I., (1996) "Multivariable Feedback Control". John Wiley and Sons.
- [10] Tan, W.; Niu, Y. G.; Liu, J. Z., (1999) " H_∞ control for a boiler-turbine unit", IEEE Conference on Control Applications, pp. 807-810.
- [11] Tan, W.; Marquez, H. J.; Chen, T.; Liu J., (2005) "Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit", Journal of Process Control Vol. 15, Num. 8, pp. 883-891.
- [12] Vázquez, F.; Morilla, F.; Dormido, S., (1999) "An iterative method for tuning decentralized PID controllers", Proceeding of the 14th IFAC World Congress, pp. 491-496.
- [13] Vázquez, F., (2001) "Diseño de controladores PID para sistemas MIMO con control descentralizado". Tesis doctoral. UNED, 2001.
- [14] Vázquez, F.; Morilla, F., (2002) "Tuning decentralized PID controllers for MIMO systems with decoupling", Proceeding of the 15th IFAC World Congress, pp. 2172-2178.
- [15] Wang, Q. G., (2003) "Decoupling Control". Lecture Notes in Control and Information Sciences; 285. Springer-Verlag.
- [16] Wang, Q. G.; Hang C. C.; Zou, B., (1996) "A frequency response approach to autotuning of multivariable PID controllers", Proceeding of the 13th IFAC World Congress, pp. 295-300.