

CONTROL CENTRALIZADO CON CUATRO PIDS

F. Morilla

Dept. de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, 28040 Madrid, fmorilla@dia.uned.es

F. Vázquez

Dept. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba, fvazquez@uco.es

A. García-Reyes

Dept. de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, 28040 Madrid

Resumen

El control centralizado de un proceso 2x2 con cuatro controladores PID es una tarea relativamente difícil de poner en práctica. En primer lugar porque no es fácil encontrar un juego de 12 parámetros de control que garantice la estabilidad del sistema en lazo cerrado y buenas prestaciones de respuesta temporal o de respuesta en frecuencia. En segundo lugar porque no existen procedimientos claros para conseguirlo. En este trabajo se propone una metodología para el control centralizado con cuatro controladores PID que será de gran ayuda en esa tarea.

Palabras Clave: Ajuste por margen de fase, ajuste por margen de ganancia, control centralizado, control PID, desacoplo.

1 INTRODUCCIÓN

En control de procesos industriales es habitual encontrarse con estrategias de control centralizado como la representada en la figura 1. Pero no es habitual que los cuatro elementos de esta estrategia de control sean controladores del tipo PID. Sin embargo sí es habitual encontrarla en las prácticas propuestas para determinados equipos didácticos, por ejemplo en la documentación del equipo Twin Rotor MIMO System de Feedback [8]. Otro proceso que se presta a experiencias prácticas de ese tipo es la planta de 4 tanques acoplados [4], sobre la que se han publicado resultados de control descentralizado [1] pero ninguno con cuatro controladores PID.

El trabajo de Lieslehto [5] plantea el control centralizado $n \times n$ y su particularización al caso PID a partir de la teoría de control por modelo interno (IMC). Otros trabajo más experimental, el de Wang [13], 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. En ambos casos se trata de métodos aproximados que no pueden garantizar la consecución de las especificaciones.

En este trabajo se presenta una metodología simple, pero que abre muchos caminos para el ajuste de cuatro controladores PID para un proceso 2x2. La metodología se basa en la equivalencia que existe entre el sistema de control centralizado y el sistema de control descentralizado más desacoplo. Esto ha permitido aprovechar casi toda la experiencia de los autores en el ajuste de controladores PID para sistemas monovariantes (SISO) [2], [3] y [6] y para sistemas multivariantes (MIMO) con control descentralizado [9]-[11].

En la sección 2 se describe el sistema de control centralizado para un proceso 2x2, se analiza desde varios puntos de vista (estabilidad, interacciones entre los lazos de control) y se analiza su equivalencia con el sistema de control descentralizado más desacoplo. Todos estos aspectos son decisivos para justificar la metodología que se propone en la sección 3. En la sección 4 se describen varios ejemplos que muestran las posibilidades del método de diseño y también se muestran resultados comparativos con otras metodologías.

2 CONTROL CENTRALIZADO DE UN PROCESO 2x2

Si un proceso lineal con dos entradas y dos salidas (2x2), descrito por la matriz de funciones de transferencia

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{pmatrix} \quad (1)$$

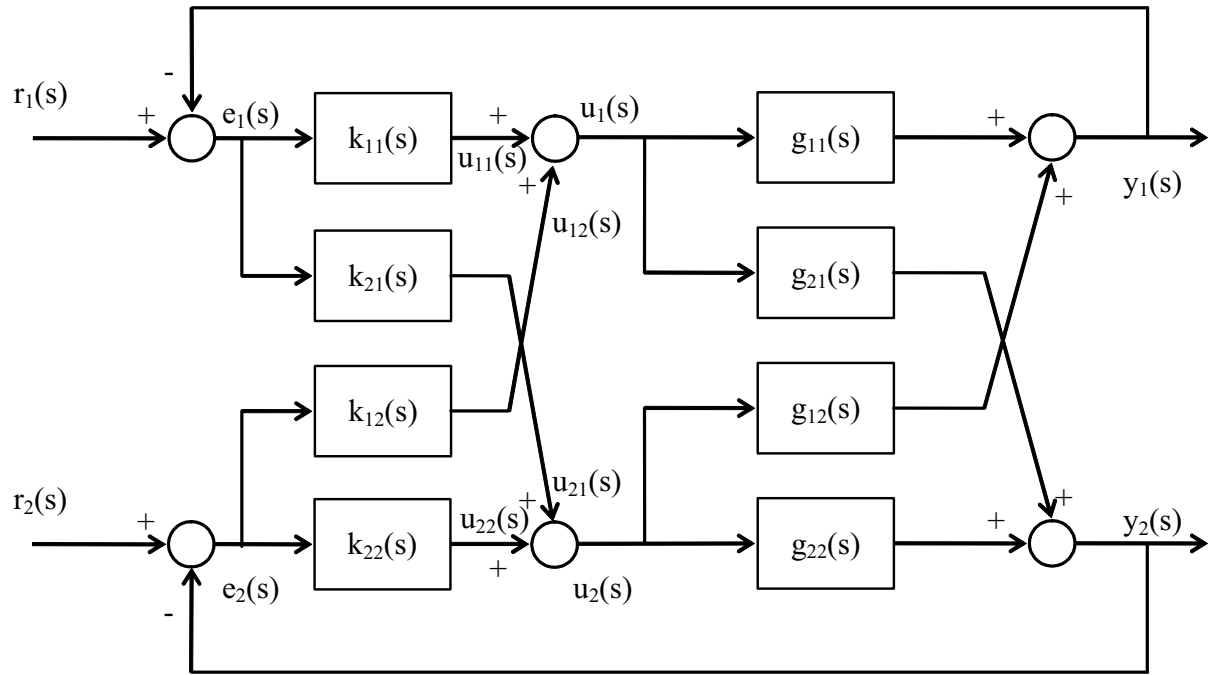


Figura 1 : Control centralizado de un proceso 2x2

está controlado por una ley de control en función de la señal de error, tal como se presenta en la figura 1. Donde $K(s)$ es la matriz de funciones de transferencia del controlador. Esto es,

$$U(s) = K(s) E(s) = \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11}(s) & k_{12}(s) \\ k_{21}(s) & k_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1(s) - y_1(s) \\ r_2(s) - y_2(s) \end{pmatrix} \quad (2)$$

La matriz de funciones de transferencia $Q(s) = G(s)K(s)$ del sistema en lazo abierto vendrá dada por

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} k_{11} + g_{12} k_{21} & g_{11} k_{12} + g_{12} k_{22} \\ g_{21} k_{11} + g_{22} k_{21} & g_{21} k_{12} + g_{22} k_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde se ha eliminado el operador de Laplace para facilitar la notación. Y operando matricialmente se llega a la siguiente ecuación característica para el sistema en lazo cerrado:

$$| I + G(s) K(s) | = 0$$

$$\begin{aligned} & 1 + g_{11} k_{11} + g_{12} k_{21} + g_{21} k_{12} + g_{22} k_{22} + \\ & + g_{11} k_{11} g_{22} k_{22} + g_{12} k_{21} g_{21} k_{12} - \\ & - g_{22} k_{21} g_{11} k_{12} - g_{12} k_{11} g_{21} k_{22} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

A este mismo resultado se puede llegar también aplicando un concepto similar a la descomposición

estructural propuesta por Zhu y Chiu [14] para el análisis de estabilidad de sistemas de control descentralizado. Si consideramos que la señal de referencia r_2 para la salida y_2 permanece al valor nulo, se llega a la estructura de control representada en la figura 2 que relaciona la salida y_1 con su señal de referencia r_1 . En ella aparecen de forma explícita los dos controladores k_{11} y k_{21} que utilizan la señal de error e_1 para actuar sobre el proceso, mientras que los otros dos controladores y las funciones de transferencia del proceso están implícitos en las funciones de transferencia \tilde{g}_{11} y \tilde{g}_{21} , dadas por:

$$\tilde{g}_{11} = g_{11} - \frac{g_{21}(g_{11} k_{12} + g_{12} k_{22})}{1 + g_{21} k_{12} + g_{22} k_{22}} \quad (5)$$

$$\tilde{g}_{21} = g_{12} - \frac{g_{22}(g_{11} k_{12} + g_{12} k_{22})}{1 + g_{21} k_{12} + g_{22} k_{22}} \quad (6)$$

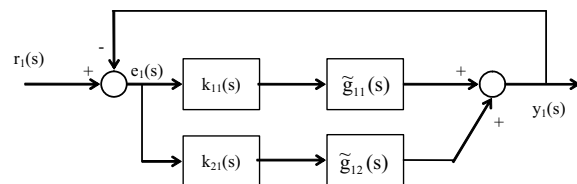


Figura 2 : Representación del sistema de control centralizado 2x2 cuando $r_2(s)=0$.

Se puede comprobar que el desarrollo de la ecuación característica del sistema de control representado en la figura 2, dada por

$$1 + \tilde{g}_{11} k_{11} + \tilde{g}_{12} k_{21} = 0 \quad (7)$$

nos lleva a la misma expresión (4).

En definitiva si tenemos en cuenta que g_{11} es la función de transferencia a través de la cual la señal de control u_{11} generada por el controlador k_{11} actúa sobre la salida y_1 en ausencia de los controladores k_{12} y k_{22} , \tilde{g}_{11} representa como actúa el controlador k_{11} sobre la salida y_1 en presencia de los controladores k_{12} y k_{22} . El término

$$\frac{-g_{21}(g_{11}k_{12} + g_{12}k_{22})}{1 + g_{21}k_{12} + g_{22}k_{22}} \quad (8)$$

recoge la influencia del resto de componentes del sistema sobre la función de transferencia directa entre el controlador k_{11} y la salida y_1 . De la misma forma, si g_{12} es la función de transferencia a través de la cual la señal de control u_{21} generada por el controlador k_{21} actúa sobre la salida y_1 en ausencia de los controladores k_{12} y k_{22} , \tilde{g}_{12} representa como actúa el controlador k_{21} sobre la salida y_1 en presencia de los controladores k_{12} y k_{22} .

De forma similar se demuestra que en la estructura de realimentación que relaciona a la salida y_2 con su señal de referencia r_2 aparecen de forma explícita los dos controladores k_{12} y k_{22} que utilizan la señal de error e_2 para actuar sobre el proceso, mientras que los otros dos controladores y las funciones de transferencia del proceso están implícitos en las funciones de transferencia \tilde{g}_{21} y \tilde{g}_{22} , dadas por:

$$\tilde{g}_{21} = g_{21} - \frac{g_{11}(g_{22}k_{21} + g_{21}k_{11})}{1 + g_{12}k_{21} + g_{11}k_{11}} \quad (9)$$

$$\tilde{g}_{22} = g_{22} - \frac{g_{12}(g_{22}k_{21} + g_{21}k_{11})}{1 + g_{12}k_{21} + g_{11}k_{11}} \quad (10)$$

Si comparamos la estrategia de control centralizado de la figura 1 con la estrategia de control descentralizado más desacoplo de la figura 3. Se observa que ambas estrategias son equivalentes si se cumplen las siguientes relaciones entre los cuatro controladores k_{ij} , los dos controladores k_i y los cuatro elementos d_{ij} de la red de desacoplo:

$$k_{11}(s) = k_1(s) \quad d_{11}(s) \quad (11)$$

$$k_{21}(s) = k_1(s) \quad d_{21}(s) \quad (12)$$

$$k_{12}(s) = k_2(s) \quad d_{12}(s) \quad (13)$$

$$k_{22}(s) = k_2(s) \quad d_{22}(s) \quad (14)$$

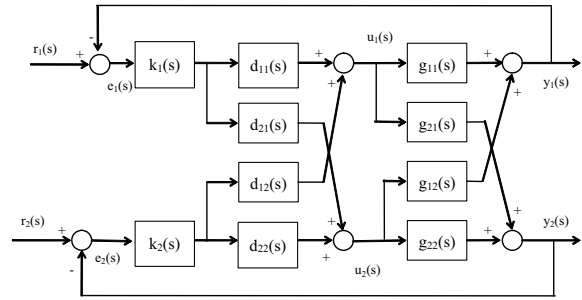


Figura 3 : Sistema de control descentralizado 2x2 con red de desacoplo.

3 ¿CÓMO CONSEGUIR QUE LOS CUATRO CONTROLADORES SEAN DEL TIPO PID?

En la sección anterior se ha descrito el sistema de control centralizado con cuatro controladores pero no se ha impuesto ninguna restricción sobre la naturaleza de los cuatro controladores. También se ha visto que este sistema de control es equivalente al control descentralizado más desacoplo. Esta equivalencia nos va a servir para establecer una metodología de diseño tal que los cuatro controladores sean del mismo tipo, PI o PID, al menos dos a dos.

Basta recordar que entre los métodos de desacoplo propuestos por distintos autores [10] con el objetivo de “conseguir una ausencia total de interacción o una presencia parcial de la interacción” se encuentra el desacoplo en estado estacionario. Donde la red de desacoplo viene dada por la siguiente matriz de ganancias

$$D(s) = \begin{pmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)} \\ -\frac{g_{21}(0)}{g_{22}(0)} & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Siendo $g_{ij}(0)$ las respectivas ganancias en estado estacionario de la matriz de funciones de transferencia del proceso. Por lo que sustituyendo en (11), (12), (13) y (14) se tiene que

$$k_{11}(s) = k_1(s) \quad (16)$$

$$k_{21}(s) = -\frac{g_{21}(0)}{g_{22}(0)} k_1(s) \quad (17)$$

$$k_{12}(s) = -\frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)} k_2(s) \quad (18)$$

$$k_{22}(s) = k_2(s) \quad (19)$$

Llevando (16) y (17) a la expresión (7) nos queda que la ecuación característica del sistema de control centralizado con cuatro controladores se puede expresar como

$$1 + \hat{g}_{11} k_{11} = 0 \quad (20)$$

siendo

$$\hat{g}_{11} = \tilde{g}_{11} - \frac{g_{21}(0)}{g_{22}(0)} \tilde{g}_{12} \quad (21)$$

Siempre y cuando los controladores k_{ji} de fuera de la diagonal se mantienen en proporción para desacoplo en estado estacionario con los controladores k_{ii} de la diagonal principal.

La estructura de realimentación de la figura 2 se puede representar en este caso particular como un típico lazo de control monovariable con realimentación unitaria, véase la figura 4. Donde el controlador k_{11} puede diseñarse siguiendo cualquiera de las metodologías SISO para la función de transferencia en lazo abierto equivalente \hat{g}_{11} . En esta función de transferencia están implícitas las funciones de transferencia del proceso, sus ganancias en estado estacionario y la función de transferencia del otro controlador de la diagonal principal k_{22} . Algo similar puede afirmarse respecto al sistema de control monovariable sobre la salida y_2 , el controlador k_{22} aparecerá en serie con la función de transferencia \hat{g}_{22} dada por:

$$\hat{g}_{22} = \tilde{g}_{22} - \frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)} \tilde{g}_{21} \quad (22)$$

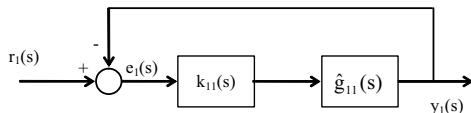


Figura 4 : Representación del sistema de control centralizado 2x2 cuando $r_2(s)=0$ y los controladores de fuera de la diagonal se mantienen en proporción para desacoplo en estado estacionario con los controladores de la diagonal principal.

La metodología de diseño para que los cuatro controladores del sistema centralizado sean PI o PID o al menos del mismo tipo dos a dos se puede formular en los siguientes términos:

1. Elegir el tipo algoritmo de control PI o PID, no necesariamente el mismo, para los dos controladores de la diagonal principal y asignarle los parámetros por defecto.
2. Asignar los parámetros de control a los controladores de fuera de la diagonal siguiendo las relaciones (17) y (18) del desacoplo en estado estacionario. Aunque también se puede asignar

cualquier otra proporcionalidad, eligiendo valores escalares para d_{12} y d_{21} .

3. Componer las funciones de transferencia \hat{g}_{11} y \hat{g}_{22} utilizando las expresiones (9), (10), (21) y (22). Si no se ha elegido la proporcionalidad entre controladores del desacoplo en estado estacionario, las expresiones (21) y (22) tendrán esta otra forma

$$\hat{g}_{11} = \tilde{g}_{11} + d_{21} \tilde{g}_{12}$$

$$\hat{g}_{22} = \tilde{g}_{22} + d_{12} \tilde{g}_{21}$$

4. Comprobar estabilidad y especificaciones de los lazos $k_{11} \hat{g}_{11}$ y $k_{22} \hat{g}_{22}$. Si se cumplen o están dentro de un rango satisfactorio, se aceptan los controladores como definitivos. Si no, comprobar que no se ha superado el número máximo de iteraciones para seguir iterando.
5. Ajustar k_{11} siguiendo una metodología SISO en función de \hat{g}_{11} y ajustar k_{22} en función de \hat{g}_{22} . Volver al paso 2.

Se trata por tanto de un procedimiento de ajuste iterativo, puesto que en cada ajuste de k_{11} influye el anterior k_{22} y viceversa, muy similar a los propuestos por Vázquez [9]-[11] e incorporados en la herramienta TITO (<http://www.uco.es/~in2vasef/>). Además, como esta herramienta incorpora desde su última versión el diseño de controladores con red de desacoplo, fijando $d_{11}=1$, $d_{22}=1$ y los escalares d_{12} y d_{21} , la metodología propuesta se puede poner en práctica con la herramienta TITO sin necesidad de cambio. Eso sí, la prueba final de los controladores debería hacerse con la estructura de cuatro controladores representada en la figura 1 y no con la estructura de control descentralizado más desacoplo utilizada por la herramienta.

4 EJEMPLOS

Los siguientes ajustes servirán para mostrar las posibilidades del método de diseño y para efectuar un análisis comparativo con otros métodos. Para el ajuste de los controladores PID de la diagonal principal se ha empleado la metodología en el dominio de la frecuencia que tenemos muy contrastada en anteriores trabajos [2], [3], [6], [9]-[11], con sus distintas variantes ajuste por margen de fase, por margen de ganancia o ajuste combinado por margen de fase y margen de ganancia.

Como primer proceso se ha elegido el propuesto por Niederlinski [7], que es el proceso 2x2 más citado en la bibliografía sobre control descentralizado y

centralizado. Se trata de un proceso con gran interacción entre sus variables, pues su matriz de ganancias relativa (RGA) está próxima a 0.5, descrito por la siguiente matriz de funciones de transferencia:

$$\begin{pmatrix} \frac{0.5}{(0.1s+1)^2(0.2s+1)^2} & \frac{-1}{(0.1s+1)(0.2s+1)^2} \\ \frac{1}{(0.1s+1)(0.2s+1)^2} & \frac{2.4}{(0.1s+1)(0.2s+1)^2(0.5s+1)} \end{pmatrix}$$

Sus ganancias en estado estacionario aconsejan las siguientes relaciones entre las ganancias proporcionales de los controladores:

$$K_{p21} = -\frac{1}{2.4} K_{p11} \quad ; \quad K_{p12} = \frac{1}{0.5} K_{p22}$$

que mantendremos en todos los ajustes realizados para este proceso. La tabla 1 muestra el resultado de cuatro ajustes utilizando el mismo margen de fase en ambos lazos principales, con valor igual a 60°. Todos los parámetros de control de un ajuste están en la misma columna, así en la primera columna los cuatro controladores son de tipo PI. En la segunda columna y en la tercera columna hay una pareja de controladores PI y otra de controladores PID. Mientras que en la cuarta columna los cuatro controladores son de tipo PID. En todos los controladores PID se ha fijado una razón $T_D/T_I = 0.1$.

	$MF_{11} = MF_{22} = 60^\circ$			
K_{P11}	1.11	1.40	1.23	1.62
T_{I11} T_{I21}	0.40	0.43	0.42	0.45
T_{D11} T_{D21}	0	0.043	0	0.045
K_{P22}	0.34	0.34	0.52	0.59
T_{I22} T_{I12}	0.58	0.58	0.62	0.062
T_{D22} T_{D12}	0	0	0.062	0.065
K_{P21}	-0.463	-0.583	-0.513	-0.675
K_{P12}	0.680	0.680	1.040	1.180

Tabla 1: Ajustes para el proceso de Niederlinski.

En la figura 5 se han recogido las dos respuestas más representativas de los cuatro ajustes de la tabla 1, concretamente las correspondientes a la primera y a la cuarta columna, que están indicadas en la figura 5 con el texto 4PI y 4PID para realzar que corresponden al control centralizado con cuatro controladores del mismo tipo, PI y PID respectivamente. Ambas respuestas son aceptables pero las salidas del sistema de control con los cuatro controladores PID responden más rápidamente y con menor interacción entre ellas.

En la figura 5 se han incluido también la respuesta del proceso de Niederlinski cuando se controla de forma descentralizada con dos controladores PI. La lentitud de la respuesta y la gran interacción entre las salidas pone de manifiesto que el control centralizado con cuatro controladores puede aportar grandes ventajas en este proceso. Sobre él se han probado también ajustes en los que los controladores de fuera de la diagonal no siguen la proporcionalidad aconsejada por el desacoplo en estado estacionario. Los resultados obtenidos son comparables a los representados en la figura 5 con el texto 4PI y 4PID, por tanto las proporcionalidades d_{12} y d_{21} constituyen dos grados de libertad en la metodología propuesta, que habrá que seguir explorando.

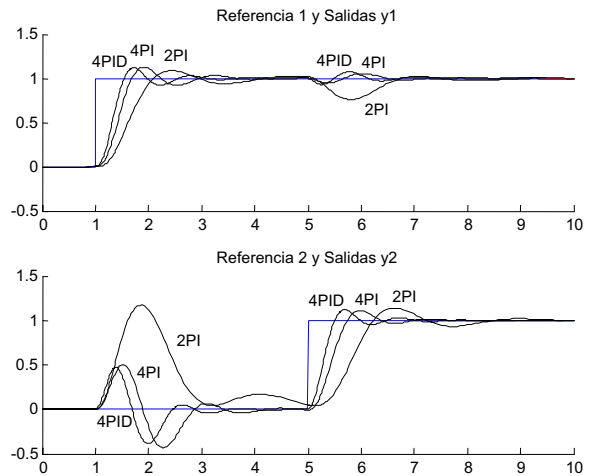


Figura 5 : Respuestas del proceso de Niederlinski controlado con dos controladores PI (2PI), con cuatro controladores PI (4PI) y con cuatro controladores PID (4PID), todos ellos ajustados para conseguir $MF_{11}=MF_{22}=60^\circ$.

Como segundo proceso se ha elegido un modelo de lineal que describe el comportamiento dinámico de las temperaturas en los platos 4 y 17 de una columna de destilación frente a cambios en los caudales de reflujo y de vapor. Se trata de un proceso con $RGA \approx 1.6$, por tanto con menos interacción en estado estacionario que el proceso anterior, pero que también es difícil de controlar con una estrategia descentralizada porque presenta retardos puros en todas las funciones de transferencia.

$$\begin{pmatrix} \frac{-2.2}{7s+1} e^{-s} & \frac{1.3}{7s+1} e^{-0.3s} \\ \frac{-2.8}{9.5s+1} e^{-1.8s} & \frac{4.3}{9.2s+1} e^{-0.35s} \end{pmatrix}$$

Sus ganancias en estado estacionario aconsejan las siguientes relaciones entre las ganancias proporcionales de los controladores: $K_{p21}=0.65 K_{p11}$,

$K_{p12}=0.59$ K_{p22} . Con dicha elección se llega al siguiente ajuste de controladores PI para especificación combinada de $MF=60^\circ$ y $MG=4$:

$$k_{11}(s) = -0.65 \left(1 + \frac{1}{3.45 s} \right)$$

$$k_{22}(s) = 1.68 \left(1 + \frac{1}{2.48 s} \right)$$

Mientras que si se decide emplear un sistema de control descentralizado con dos controladores PI, el ajuste con esas mismas especificaciones nos lleva a:

$$k_{11}(s) = -0.95 \left(1 + \frac{1}{2.32 s} \right)$$

$$k_{22}(s) = 2.32 \left(1 + \frac{1}{6.87 s} \right)$$

En la figura 6 se muestran las respuestas que tendrá la columna de destilación cuando se controle de forma descentralizada con esos dos controladores PI y de forma centralizada con los cuatro controladores PI. En este caso se observa que no existe una clara ventaja en utilizar una estructura u otra, pues mientras con los cuatro controladores PI se gana velocidad de respuesta en la salida 2, se pierde velocidad de respuesta en la salida 1. No obstante este ejemplo nos sirve para comprobar que la metodología también se puede aplicar en procesos que incluyan retardos puros, siempre y cuando el cálculo analítico de las funciones \hat{g}_{11} y \hat{g}_{22} se pueda sustituir por un cálculo fasorial con las respuestas en frecuencia, tal como se hace en la herramienta TITO.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología iterativa para el ajuste de los cuatro controladores que conforman una estructura de control centralizado para procesos 2x2. Con dicha metodología se garantiza la estabilidad del sistema en lazo cerrado y que los controladores serán del tipo PID. La metodología abre muchos caminos para el diseño de sistemas de control centralizado pues deja bastantes grados de libertad al usuario: el tipo de configuración (4PI, 2PI2PID o 4PID), el tipo de ajuste para los controladores de la diagonal principal (los contemplados en la herramienta TITO o los de cualquier otra metodología monovariable), las proporciones entre los controladores de fuera de la diagonal y los controladores de la diagonal principal que no necesariamente deben garantizar el desacoplo en estado estacionario.

La metodología también plantea nuevos problemas, sobre todo relacionados con la aplicación práctica, que serán abordados en un futuro próximo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) a través del proyecto DPI 2004-05903.

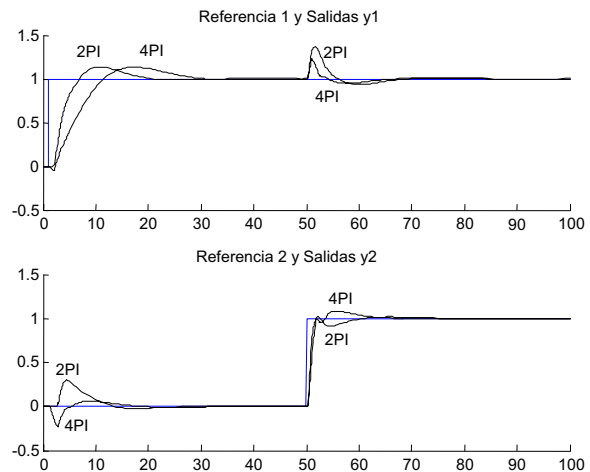


Figura 5 : Respuestas de la columna de destilación controlado con dos controladores PI (2PI) y con cuatro controladores PI (4PI), ajustados para conseguir $MF_{11}=MF_{22}=60^\circ$ y $MG_{11}=MG_{22}=4$.

Referencias

- [1] Aström, K. J.; Johansson, K. H.; Wang, Q. (2001) "Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems".
- [2] Dormido, S.; Morilla, F. (2004) "Tuning of PID Controllers Based on Sensitivity Margin Specification", 5th Asian Control Conference, Melbourne (Australia), July 2004.
- [3] González-Martín, R.; López, I.; Morilla, F., Pastor, R. (2003) "Sintolab: The REPSOL-YPF PID tuning tool", Control Engineering Practice, 11, 469-480, December 2003
- [4] Johansson, K. H.; Horch A.; Wijk Olle; Hansson A. (1999) "Teaching multivariable control using the quadruple-tank process". IEEE Conference on Decision and Control, Phoenix, AZ.
- [5] Lieslehto, J. (1996) "MIMO controller design using SISO controller design methods". Proceeding of the 13th IFAC World Congress, pp. 169-173.

- [6] Morilla, F.; Dormido, S. (2000) "Methodologies for the tuning of PID controllers in the frequency domain". Proceedings of PID'00. Tarrasa, pp.155-160.
- [7] Niederlinski, A. (1971) "A heuristic Approach to the design of linear interacting control systems". Automatica, Vol. 7. pp 691-701.
- [8] Twin Rotor MIMO System. Feedback Instruments Ltd.
- [9] 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.
- [10] Vázquez, F. (2001) "Diseño de controladores PID para sistemas MIMO con control descentralizado". Tesis doctoral. UNED, 2001
- [11] Vázquez, F.; Morilla, F. (2002) "Tuning decentralized PID controllers for MIMO systems with decoupling". Proceeding of the 15th IFAC World Congress, pp. 2172-2178
- [12] Vinante and Luyben. (1972) "Experimental studies of distillation decoupling", Kem. Teollisuus, 29, 499.
- [13] Wang, Q.; 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.
- [14] Zhu, Z.X. and Chiu, M. (1998). "Dynamic analysis of decentralized 2x2 control systems in relation to loop interaction and local stability". Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 37, N° 2, pp. 464-473.