

ENTORNO PARA SIMULACIÓN, ANÁLISIS Y SINTONÍA DE SISTEMAS CON CONTROL DESCENTRALIZADO 2X2

Francisco Vázquez Serrano
vazquez@dia.uned.es

Fernando Morilla García
fmorilla@dia.uned.es

Sebastián Dormido Bencomo
sdormido@dia.uned.es

Dpto. de Informática y Automática
Facultad de Ciencias. UNED
C/Senda del Rey s/n
28040 MADRID

1. INTRODUCCIÓN

Aunque hoy día crecen en importancia numerosas técnicas de control avanzado tales como el control robusto, el control predictivo, el adaptativo, etc., el control multivariable descentralizado sigue utilizándose en la industria como técnica de control aislada o combinada con alguna de las estrategias anteriores en los niveles más básicos de control. El perjuicio que supone el invariable deterioro de las prestaciones de una estructura de control descentralizado cuando se la compara con una que emplee un control multivariable completo se compensa con ciertas ventajas como pueden ser la simplicidad de diseño y en el hardware o la facilidad de uso.

Sin embargo, no siempre es posible la utilización de una estrategia de control descentralizado debido a los efectos de la interacción. Una interacción severa producirá una pérdida en el rendimiento y en la estabilidad del sistema en lazo cerrado, siendo necesario renunciar a su uso. Para estudiar la interacción y sus efectos, existen numerosos métodos de análisis, siendo la matriz de ganancias relativas (RGA, Bristol, 1966), con sus numerosas variantes una de las más utilizadas en aplicaciones industriales por su simplicidad de cálculo. El empleo de esta matriz no sólo se limita al estudio de la interacción existente en el proceso en estado estacionario, sino que también se utiliza para solucionar el problema de emparejamiento de variables típico en sistemas multivariable. Pero la información suministrada por la RGA en general es insuficiente, siendo necesario otro tipo de cálculos que proporcionan índices de estabilidad, de robustez o análisis dinámico de la interacción. Así se emplean métodos (Rosenbrock, 1979, Maciejowsky, 1989) como los vectores directos e inversos de Nyquist (DNA e INA), a los que se les superponen las

llamadas bandas de Gershgorin, los números de condición, los índices de Niederlinsky, RGA dinámicas, etc.

Una vez decidida la utilización de técnicas de control descentralizado y una vez seleccionado el tipo de emparejamientos de variables a emplear, el siguiente paso consiste en la elección del controlador y su sintonía. La mayoría de los trabajos realizados en esta línea emplean los controladores PID (con sus distintas variantes) casi de manera exclusiva por multitud de razones sobradamente conocidas: implantación industrial, robustez, facilidad de empleo,... Así se encuentran en la literatura métodos de sintonía basados en fórmulas heurísticas, como los de Shinskey (1995) o McAvoy (1983), basados en el método del relé, como los de Wang (1996), Menani (1996), Halevy (1997), o Shiu (1998), y otros métodos multivariables propiamente dichos, como Ho (1996) o Vázquez (1998). La mayoría de ellos utiliza como ejemplos de aplicación los sistemas multivariables de dos entradas y dos salidas, representativos de gran número de procesos industriales y generalizables a casos de mayor dimensión.

El presente trabajo presenta un entorno para sistemas multivariables con control descentralizado con dos entradas y dos salidas con una triple motivación:

- Permitir la simulación, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado con controladores PID.
- Proporcionar medidas de la interacción, estabilidad y robustez como RGA, números de condición, DNA, márgenes de fase y ganancia, etc.
- Servir de plataforma para la sintonía de controladores PID multivariables.

2. EL ENTORNO

En la figura 1 se puede observar la pantalla principal del entorno de simulación. Éste se ha realizado sobre MATLAB, aprovechando la capacidad de creación de interfaces gráficas (GUI's) que proporciona la versión 5 de este software, y por supuesto su potencia de cálculo. En la parte central de la pantalla se abren dos ventanas donde se representa la respuesta temporal del proceso multivariable 2x2 a analizar. Esta simulación puede realizarse en lazo abierto o en lazo cerrado utilizando como controladores dos PID cuyos parámetros se muestran en sendos campos de edición para que se puedan modificar. En la misma gráfica se pueden superponer distintas respuestas temporales para establecer comparaciones.

La pantalla contiene un menú que permite las siguientes opciones:

- **Archivo**, para poder guardar o recuperar toda la información asociada al sistema objeto de estudio.

- **Configuración**, para poder modificar las funciones de transferencia del proceso y definir las condiciones de simulación. El tipo de procesos que se pueden simular en el entorno se configura como muestra la Figura 2. Los cuatro componentes de la matriz de funciones de transferencia admiten un numerador, un deno-

minador y un retardo, que puede ser nulo, admitiendo de esta forma la práctica totalidad de configuraciones 2x2 posibles.

- **Cálculos**. Dentro de esta opción se incluyen dos bloques, correspondientes al análisis del sistema y a la síntesis de los dos controladores.

- **Análisis**: Las distintas posibilidades de análisis se describen en el apartado 3 y pueden resumirse en las siguientes:
 - Análisis de la interacción, utilizando herramientas matemáticas como la matriz de ganancias relativas (RGA), o los números de condición.
 - Técnicas de análisis de la estabilidad, como son los vectores dinámicos de Nyquist (DNA) y las bandas de Gershgorin.
 - Análisis de la robustez, utilizando indicadores como los márgenes de fase y de ganancia, y los máximos de las funciones de sensibilidad.
- **Síntesis**: La obtención de los controladores puede realizarse mediante distintas alternativas, descritas en el apartado 4, existiendo la posibilidad de realizar un ajuste de los lazos individuales, utilizando técnicas SISO, o el ajuste de los dos lazos simultáneamente utilizando técnicas MIMO.

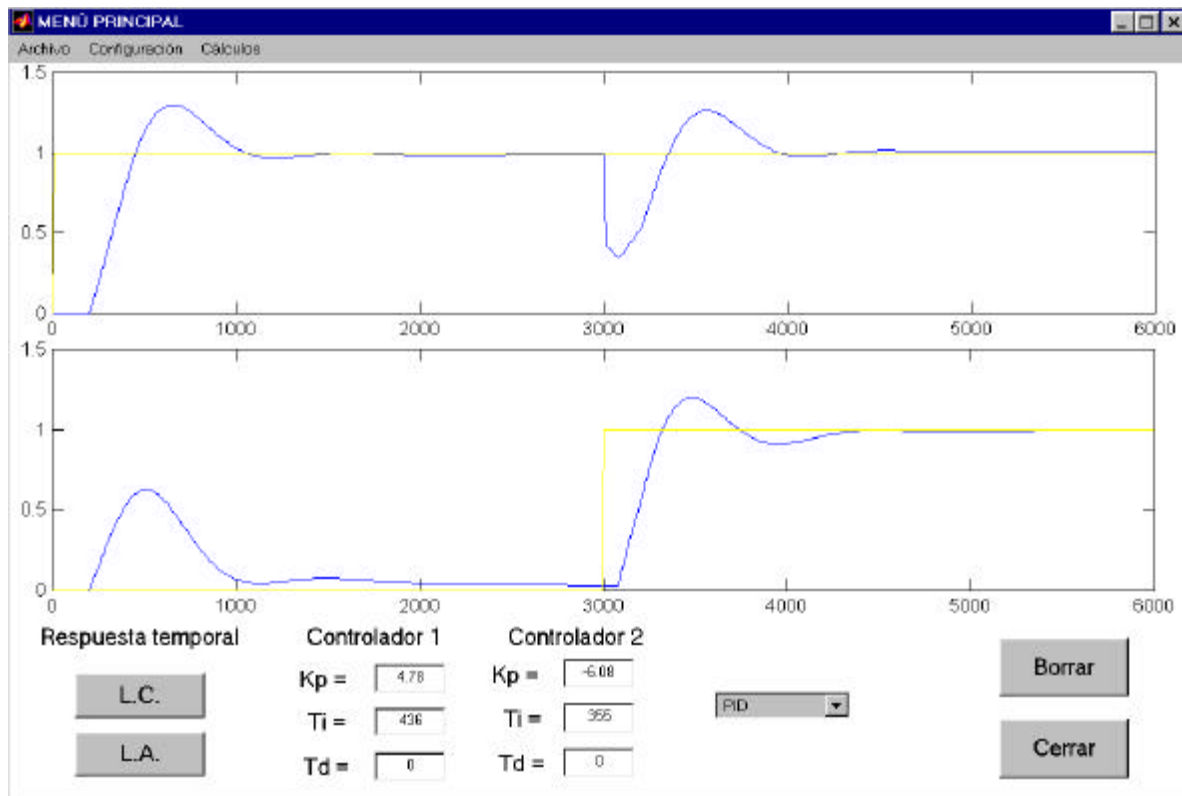


Figura 1: Pantalla principal del entorno

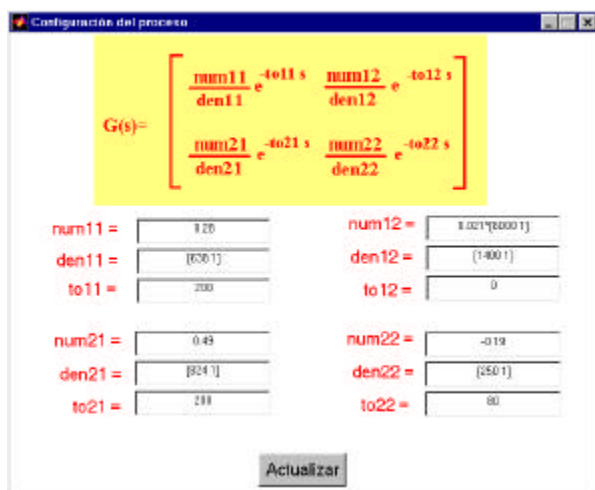


Figura 2: Configuración del proceso.

3. POSIBILIDADES DE ANÁLISIS

Los sistemas multivariables (MIMO) llevan asociados una serie de problemas que no presentan los de una entrada y una salida (SISO). Las herramientas matemáticas necesarias para estos últimos ciertamente no serán útiles para los primeros, de ahí que hayan surgido una serie de métodos de análisis para sistemas MIMO (Vázquez, 1997). Algunas de estas herramientas se han incorporado al entorno permitiendo el estudio de la interacción, de la estabilidad y de la robustez relativa del proceso.

- **Análisis de la interacción:** Previamente a la elección del tipo de estrategia de control a utilizar es imprescindible en los sistemas multivariable realizar un estudio de la interacción. Este estudio puede, entre otras acciones, rechazar el empleo de control descentralizado como estrategia a emplear o aconsejar el emparejamiento de variables a utilizar. El entorno presentado incluye dos de éstas técnicas:

- **Matriz de ganancias relativas (RGA):** Es, sin duda, la herramienta de análisis de interacción más empleada. Si se pretende utilizar una estrategia de control descentralizado será necesario analizar cuál de las entradas se ve más afectada por cada una de las entradas en el caso de cerrarse todos los lazos, para posteriormente realizar el emparejamiento de control entre las distintas variables manipuladas y las controladas. La matriz de ganancias relativas es una medida de la influencia que una de estas variables manipuladas tiene sobre una variable controlada concreta en relación con la que tendría el resto de las variables actuando sobre el proceso. Si no hay interacción cada variable manipulada sólo afectará a una variable controlada. Si

además este análisis se hace en todo el rango de frecuencias el resultado del análisis viene dado por una gráfica como la de la Figura 3, proporcionada por el entorno de simulación. La interpretación se puede encontrar en Shinsky (1996), entre otros.

- **Número de condición:** La misma gráfica de la Figura 3 muestra también el denominado número de condición, definido como el cociente entre los valores singulares máximo y mínimo. El número de condición (Skogestad, 1996) se puede usar como una medida de la controlabilidad entrada-salida del proceso, y en particular, un valor elevado indica problemas de sensibilidad a la incertidumbre. Al igual que la RGA este número se puede calcular en un rango de frecuencias, mostrándonos ambos los valores de frecuencia para los cuales la planta es más sensible a la incertidumbre de entrada y presenta una interacción elevada.

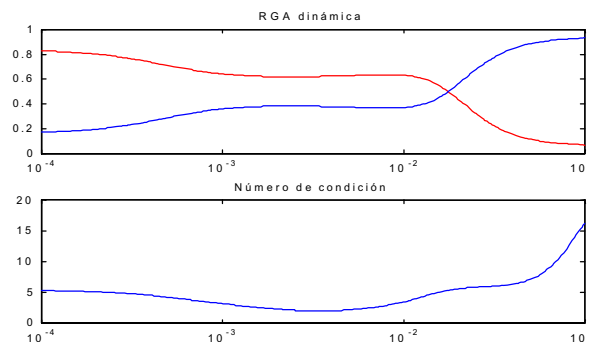


Figura 3: RGA dinámica y número de condición

- **Medidas de la estabilidad:** Una vez que se han diseñado los controladores por algún método, existen otras herramientas de análisis que incluyen a éstos en el proceso y permiten cuantificar de alguna manera la estabilidad del sistema. De entre ellas la más difundida es el vector directo de Nyquist (DNA). Este vector consiste en dibujar los diagramas de Nyquist de los elementos de la diagonal de la matriz de funciones de transferencia, dos en el caso presente. Sobre éstos se superponen los círculos de Gershgorin, que representan la contribución de los elementos de fuera de la diagonal principal sobre la estabilidad e interacción globales. En concreto, estos círculos aseguran que el diagrama de Nyquist del sistema en lazo cerrado se alojará dentro de sus límites, por lo que si estos círculos no cortan al punto crítico (-1, 0) se puede asegurar que el sistema global será estable. Cuanto más alejados estén los círculos del punto crítico, más estable puede ser el sistema. Estos círculos, junto al DNA, han sido usados por algunos autores (Ho, 1996) para retocar algunas fórmulas de sintonía de PID SISO y aplicarlas al caso MIMO, aunque los

diseños son en general bastante conservadores, como se muestra en Vázquez (1998). El DNA, junto a los círculos de Gershgorin, se muestra en la Figura 4 para un sistema con unos controladores concretos.

A parte de proporcionar una medida de la estabilidad, pueden servir de complemento a las técnicas del punto anterior como indicativo gráfico de la interacción cuando se incluyen en el proceso los distintos controladores.

- **Indicadores de robustez.** Otras medidas importantes, indicativas en cierta manera de la robustez de un sistema con unos controladores determinados son los márgenes de fase,

márgenes de ganancia y máximos de las funciones de sensibilidad. Éstas son medidas de lo “alejado” que está un sistema de la inestabilidad, representada en el diagrama de Nyquist como el punto crítico $(-1,0)$. Aunque obtener la expresión analítica de la función de transferencia de un sistema multivariable en lazo cerrado no es inmediato, sí se puede obtener una expresión numérica, en forma de un vector de frecuencias como se muestra en Vázquez (1998). De esta forma se pueden utilizar muchas técnicas de análisis SISO, adaptándolas al caso MIMO de forma inmediata. La figura 5, muestra la ventana que ofrece el entorno para realizar este tipo de análisis.

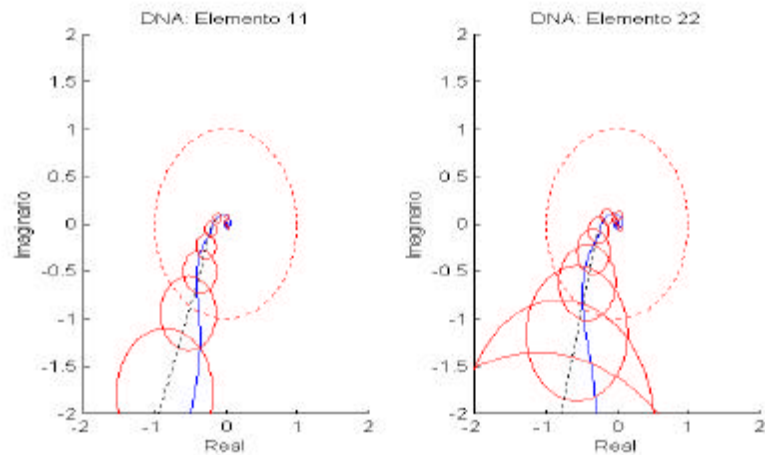


Figura 4: DNA con círculos de Gershgorin

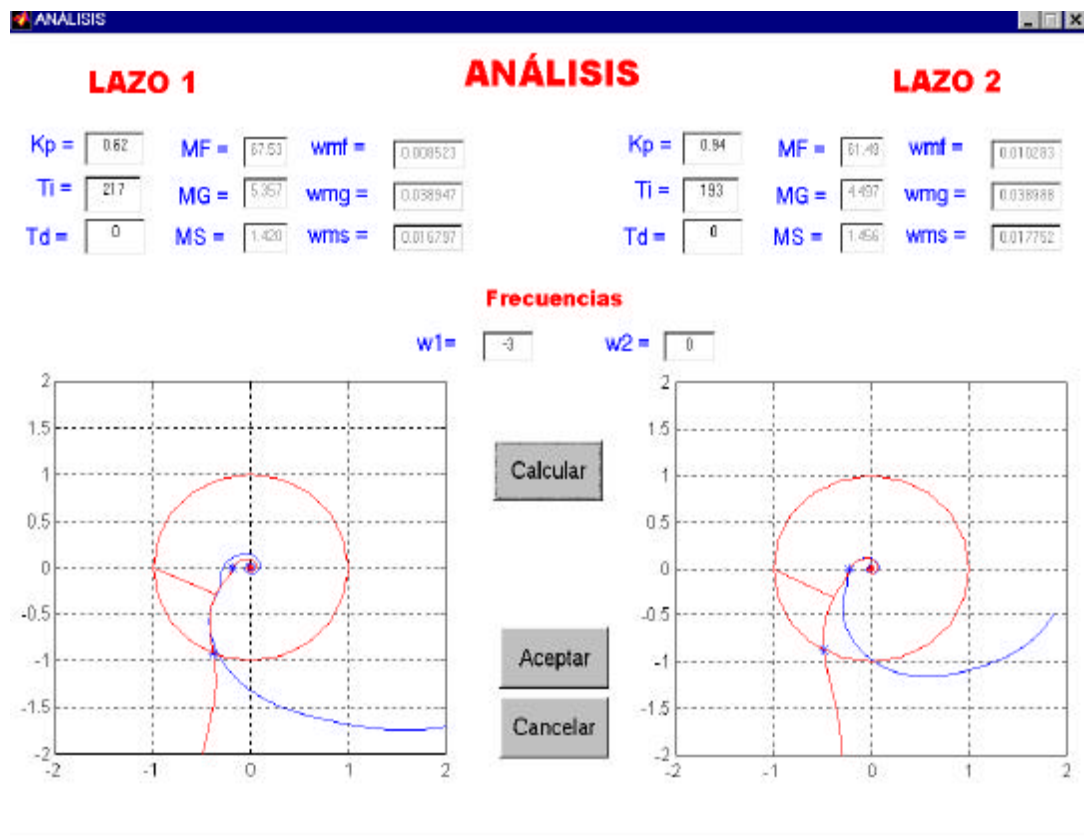


Figura 5: Pantalla de análisis de robustez

4. POSIBILIDADES DE SINTONÍA

La motivación principal de este entorno fue la de obtener una plataforma que permitiera el ajuste de controladores PID para sistemas multivariable. Las técnicas y medidas de interacción anteriores pueden dar una idea de lo idóneo que es el sistema para poder aplicarle o no una estrategia de control descentralizado. En caso de que estas medidas hayan dado un resultado positivo, el siguiente paso, y no el más inmediato, es el de la síntesis de los controladores (de dos en este caso). El rendimiento del diseño del bloque controlador-proceso puede analizarse posteriormente con alguna de las técnicas del apartado 3 y retocar los parámetros de los PID de forma manual en caso necesario. El entorno permite distintas posibilidades englobadas en dos grupos:

- **Sintonía individual de cada lazo:** Como primera opción, el programa permite la aplicación de la metodología SISO descrita en Morilla (1998) para sintonizar los dos controladores pero utilizando información únicamente de las funciones de transferencia de la diagonal principal. De esta forma se sintoniza el controlador 1 para el lazo 1 y utilizando el elemento (1,1) de la matriz de funciones de transferencia (y lo mismo con el controlador 2). Este método es una extensión del método de Aström y Hägglun (1984) consistente en una generalización de las conocidas fórmulas de Ziegler-Nichols. Permite el ajuste por márgenes de fase y ganancia para cada uno de los lazos de forma independiente. Sin embargo, está claro que los parámetros de control obtenidos proporcionarán buen rendimiento sólo en el caso de que la interacción sea muy débil. Si ésta es mayor habrá que retocar los parámetros siguiendo las recomendaciones de Shinskey (1995) o utilizando un método que sí tenga en cuenta la interacción y sus efectos.

- **Sintonía multivariable:** Como método de sintonía multivariable se emplea una adaptación del anterior, descrita en Vázquez (1998). Para cada uno de los dos lazos se crea un vector que contiene la respuesta en frecuencia del elemento de la diagonal principal correspondiente a ese lazo más una componente aditiva con la que contribuyen el resto de los elementos de fuera de la diagonal junto con el controlador del otro lazo. Con este vector se puede trabajar de la misma manera que si fuese la respuesta en frecuencia de una función de transferencia

monovariable y por tanto se pueden calcular los parámetros de algún controlador para que se cumplan ciertas especificaciones de control. Sin embargo, como los controladores contribuyen en la creación del vector anterior, el ajuste de un lazo modificará las características del otro. De esta forma es necesario ir realizando ajustes iterativos hasta conseguir que la variación en dichos parámetros sea mínima de una iteración a la siguiente, es decir hasta que el algoritmo converja.

Las posibilidades de este método de sintonía multivariable son tres:

- Ajuste por especificación de márgenes de fase.
- Ajuste por especificación de márgenes de ganancia.
- Ajuste combinado por márgenes de fase y ganancia

En el primero, el más eficaz en la mayoría de las ocasiones, en cada iteración se intenta conseguir los márgenes de fase especificados para cada uno de los dos lazos. El entorno de simulación muestra los resultados obtenidos en cada iteración de forma que si el algoritmo diverge pueda detenerse el cálculo. Una vez que se consiguen las especificaciones solicitadas, los parámetros pueden aceptarse de forma que se pueda proceder a la simulación de la respuesta temporal, el análisis, el cálculo de los DNA, o cualquier otra posibilidad de la pantalla principal.

El segundo tipo de ajuste procede de una forma similar al anterior, con la salvedad de que ahora las especificaciones son los márgenes de ganancia de cada uno de los lazos.

El más complejo es el ajuste combinado, pues en cada iteración son cuatro las especificaciones que se deben conseguir (márgenes de fase y ganancia para cada lazo). Dentro de cada una de las iteraciones, se procede a una nueva iteración para obtener el controlador que hace mínimo cierto índice de calidad, función de las cuatro especificaciones. Este índice también se muestra por pantalla. Aunque el algoritmo converja hacia unos valores de los parámetros de los controladores pueden no conseguirse simultáneamente las cuatro especificaciones. La pantalla de configuración de este ajuste combinado por márgenes de fase y ganancia se muestra en la Figura 6.

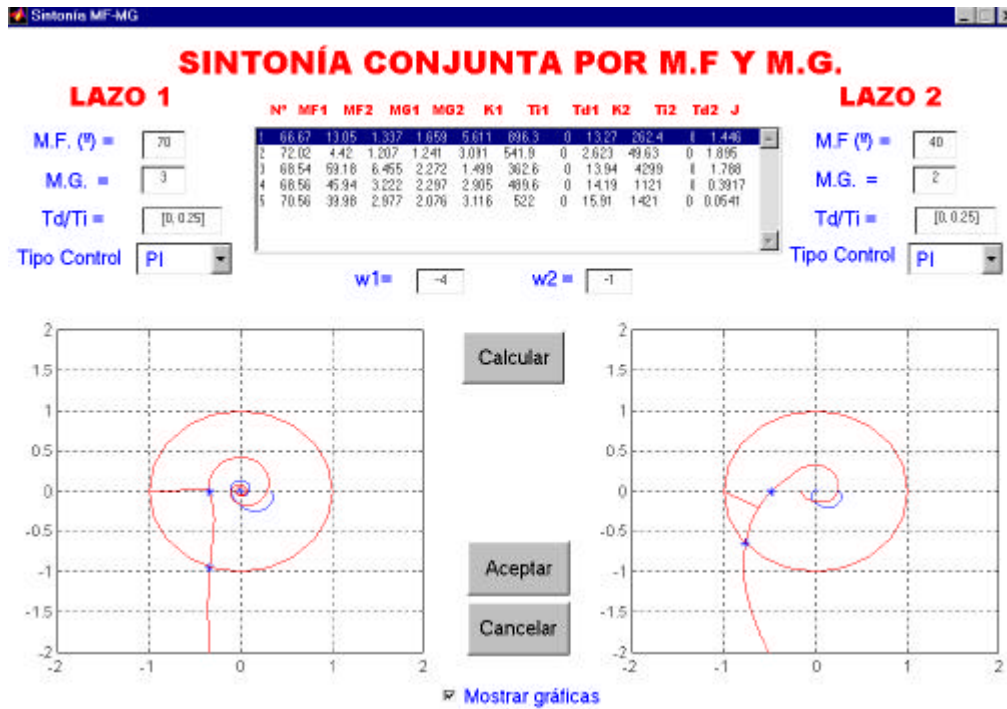


Figura 6: Pantalla de ajuste combinado por MF y MG

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un entorno que permite la simulación, análisis y sintonía de controladores de sistemas multivariables de dos entradas y dos salidas. Además de poder obtener la gráfica de la respuesta temporal del sistema, tanto en lazo cerrado como en lazo abierto, algo que sería relativamente fácil con herramientas de simulación como el mismo SIMULINK de MATLAB, el entorno aprovecha la capacidad de cálculo de este software para concentrar bajo un mismo interfaz las herramientas más utilizadas para analizar y estudiar la interacción que afecta a los sistemas multivariables. Además incluye un nuevo método de sintonía de controladores PID descentralizado, permitiendo varios tipos de ajustes diferentes.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la CICYT mediante el proyecto TAP 96-0404

7. BIBLIOGRAFIA

- Aström, K. J., T. Hägglund (1984). *Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins*. Automatica, 20, 645-651.
- Bristol, E.H. (1966): *On a new measure of interactions for multivariable process control*. IEEE Trans. Auto. Control, AC-11, pp 133-134
- Halevy, Y, Palmor, Z., Efrati, T. (1997): *Automatic tuning of decentralized PID controllers for MIMO processes*, J. Proc. Cont. Vol. 7 N° 2, pp 119-128 Elsevier Science, Ltd.
- Ho, W.K., T.H. Lee, O.P. Gan (1996) : *Tuning of multiloop*

PID controllers based on gain and phase margins specifications. 13th IFAC World Congress, pp 211-216.

Maciejowski, J.M. (1989): *Multivariable feedback design*. Addison-Wesley

McAvoy, T. (1983): *Interaction analysis: principles and applications*. Instrument Society of America

Menani, S., Koivo, H. (1996): *Relay tuning of multi-variable PI controllers*, IFAC World Congress, pp 139-144

Morilla, F., Dormido, S. (1998): *Sintonía de controladores PID mediante especificaciones de respuesta en frecuencia*. Informe interno. Dpto. de Informática y Automática. UNED

Shinskey F. G. (1995): *Process Control Systems*. N.Y.: McGraw-Hill.

Shiu, S.J., Hwang, S. (1998): *Sequential design method for multivariable decoupling and multiloop PID controllers*, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 37, N° 1, pp 107-119

Skogestad, S. (1996): *Multivariable Feedback Control*. John Wiley and Sons

Rosenbrock, H.H. (1979): *Computer-aided control system design*. N.Y. Academic Press

Vázquez, F., y Morilla, F.,: (1997): *La interacción en los sistemas multivariable con control descentralizado*. Informe interno. Dpto. de Informática y Automática. UNED

Vázquez, F., Morilla, F., and S. Dormido (1998): *An iterative method for tuning decentralized PID controllers*. Informe Interno. Dpto. Informática y Automática. UNED. Enviado al 14th IFAC World Congress, 1999.

Wang, Q., Hang, C. and Zou, B. (1996): *A frequency response approach to auto-tuning of multivariable PID controllers*, 13th IFAC World Congress, pp 295-300.