

TITO :

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

INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el entorno desarrollado durante el trabajo de tesis de Francisco J. Vázquez (Madrid, 2001) que sirvió además para ilustrar algunos de sus capítulos. En la dirección <http://www.uco.es/~in2vasef/> podrá conseguir la versión más actualizada. La utilidad del entorno se resume en los siguientes puntos:

- Permite la simulación de sistemas con control descentralizado con dos entradas y dos salidas, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado con controladores PID, con el fin de analizar la respuesta temporal del sistema multivariable 2×2 antes y después de incorporar la estrategia de control.
- Proporciona medidas de la interacción, estabilidad y robustez como RGA, número de condición, DNA, márgenes de fase y ganancia, etc que dan una medida de la bondad del diseño.
- Sirve de plataforma para la sintonía de los dos controladores PID, utilizando la metodología propuesta en el capítulo 5 de la tesis. Además permite las comparaciones de los diseños realizados mediante dicha metodología así como la comparación con otros ajustes.
- La versión descrita está en inglés debido a que se ha presentado en algún congreso internacional y ha sido enviada para su evaluación a varios investigadores internacionales.

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 proporcionan la versión 5, y por supuesto su potencia de cálculo. En la parte central de la pantalla se abren dos ventanas donde se presenta la respuesta temporal del proceso multivariable 2x2. La respuesta se obtiene mediante una simulación que puede realizarse en lazo abierto o en lazo cerrado utilizando como controladores dos PID cuyos parámetros se muestran en campos editables 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 opciones presentadas en los puntos del siguiente apartado.

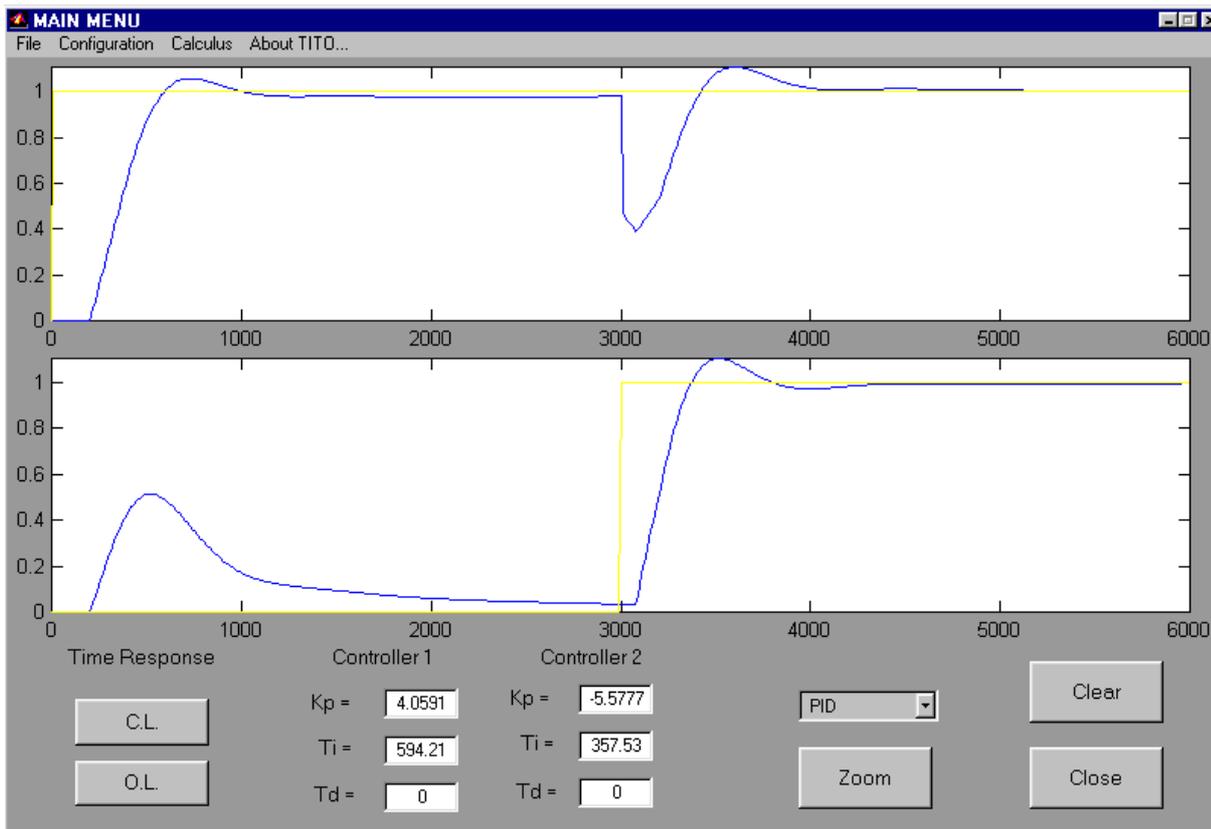


Fig. 1: Pantalla principal del entorno

2.1 Menú Archivo (*File*)

Permite dos opciones, guardar (*save*) o recuperar (*load*) la información asociada al sistema objeto de estudio. Todo los sistemas almacenados comienzan por el prefijo 'f_' para facilitar

su búsqueda. En la figura 2 se muestra la ventana de recuperación de datos almacenados previamente.

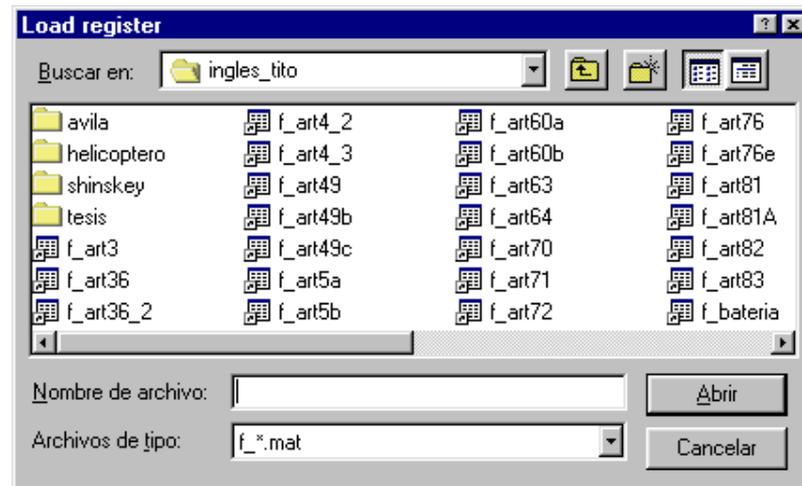


Fig. 2: Ventana de recuperación de datos almacenados.

2.2. Menú de Configuración (*Configuration*)

Se incluye en este menú la descripción dinámica del sistema multivariable a tratar, así como la configuración de las condiciones de las simulaciones. El tipo de procesos que se pueden simular en el entorno se configura como muestra la figura 3. Los cuatro componentes de la matriz de funciones de transferencia admiten un numerador, un denominador y un retardo, que puede ser nulo, admitiendo de esta forma la práctica totalidad de configuraciones 2x2 posibles. La entrada del numerador y del denominador se realiza utilizando el formato vectorial de MATLAB, es decir escribiendo entre corchetes los coeficientes de las potencias decrecientes de los polinomios respectivos.

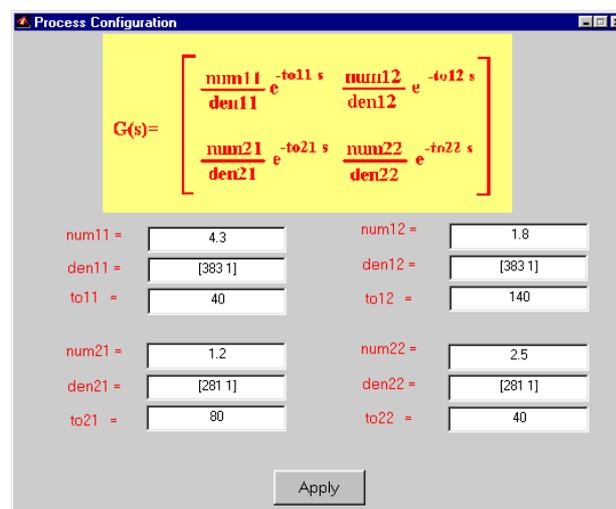


Fig. 3: Ventana de configuración del proceso.

Para analizar posibles estrategias de desacoplo, el entorno permite su inclusión, utilizando el submenú *decoupling* que abre la ventana mostrada en la figura 4.

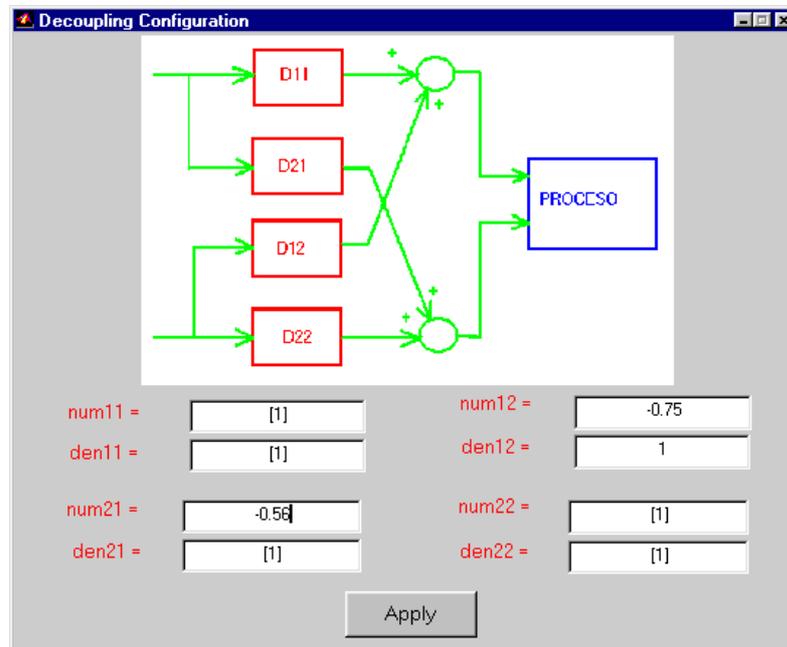


Fig. 4: Ventana de configuración de los desacoplos.

Las fuentes de excitación de la respuesta temporal tanto en lazo abierto como cerrado se pueden configurar utilizando para ello el menú correspondiente (*O.L. Graphic*, o *C.L. Graphic*). En la figura 5 se muestra el segundo de ellos. Como puede observarse, se puede elegir la amplitud e instante de los saltos escalón provocados a los dos lazos, así como la duración de la simulación y la longitud del intervalo de comunicación de ésta.

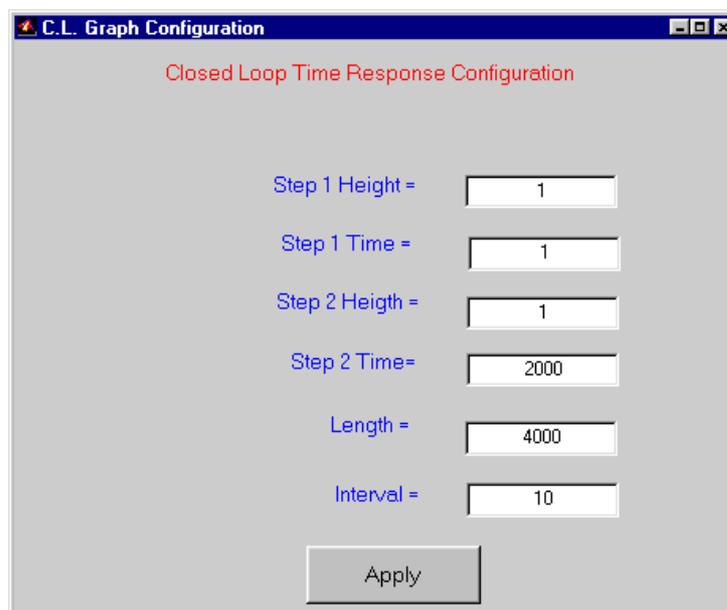


Fig. 5: Ventana de configuración de la simulación en lazo cerrado.

2.3 Menú de cálculo (Calculus)

Los submenús de esta opción están clasificados en dos categorías: los correspondientes al análisis del sistema y los correspondientes al diseño de los dos controladores.

Corresponden al diseño los siguientes, que se describen en el apartado 3:

- Sintonía SISO (*Single tuning*). Permite la sintonía utilizando técnicas SISO, del lazo 1 o del 2 (ver apartado 3.1.)
- Sintonía MIMO (*Multivariable Tuning*). Permite la sintonía multivariable con las posibilidades descritas en el apartado 3.2.

Corresponden al análisis los siguientes, descritos en el apartado 4:

- Análisis de la interacción (submenú *RGA and C.N.*) utilizando herramientas matemáticas como la matriz de ganancias relativas (RGA), o el número de condición.
- Técnicas de análisis de la estabilidad, como son los vectores dinámicos de Nyquist (DNA) y las bandas de Gershgorin (submenú *DNA*)
- Análisis de la robustez, utilizando indicativos como los márgenes de fase y de ganancia, y los máximos de las funciones de sensibilidad (submenú *Analysis*).

3 POSIBILIDADES DE SINTONÍA

La motivación principal de este entorno fue disponer de una plataforma que permitiera el ajuste de controladores PID para sistemas multivariables y que pudiera plasmar las técnicas descritas en el capítulo 5 de la tesis. Las técnicas y medidas de interacción descritas en el capítulo 2 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 ajuste de los controladores (dos en este caso). El rendimiento del diseño del bloque controlador-proceso puede analizarse posteriormente con alguna de las técnicas que permite el entorno (descritas en el apartado 4) y retocar los parámetros de los PID de forma manual en caso necesario. El entorno permite varias posibilidades de ajuste que se describen a continuación.

3.1 Sintonía individual

Como primera opción, el programa permite la aplicación de la metodología SISO descrita en Morilla y Dormido (2000) para sintonizar los dos controladores por margen de fase 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 utilizando el elemento (1,1) de la matriz de funciones de transferencia (y lo mismo con el controlador 2). Para cada uno de los lazos se accede a una ventana como la mostrada en el figura 6.

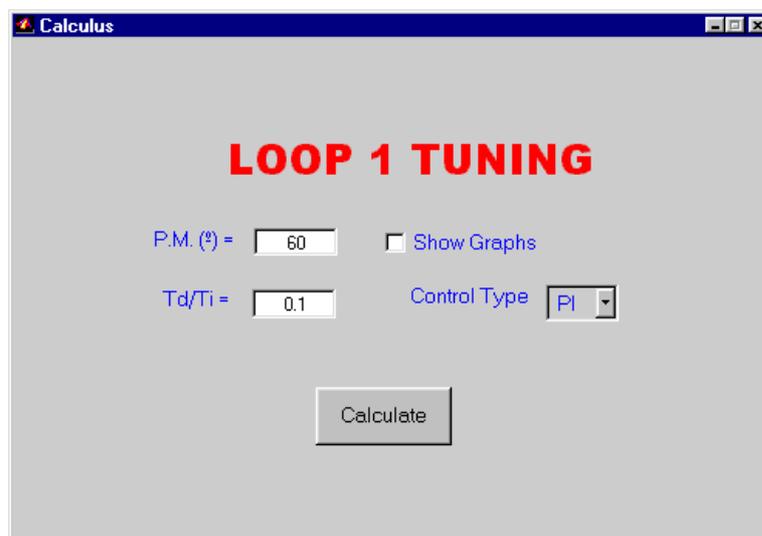


Fig. 6: Ventana de diseño SISO para el lazo 1.

Como puede apreciarse en ella, puede elegirse el tipo de controlador, la especificación por margen de fase y la relación entre las constantes derivativa e integral. Además se puede seleccionar la opción de mostrar gráficas (*Show Graphs*) que crea dos figuras: una con el diagrama de Bode del sistema donde se marcan los límites del rango de frecuencias que admiten solución para la elección del margen de fase y del tipo de controlador elegido; la otra figura representa las constantes integrales de todos los controladores obtenidos con cada una de las frecuencias de diseño del rango de la gráfica anterior, marcando el valor máximo de éstas. El botón '*Calculate*' inicia el ajuste, que es devuelto directamente a la ventana principal de la herramienta.

Hay que hacer notar que la sintonía individual puede realizarse también mediante la sintonía multivariable (descrita en el siguiente apartado) sin más que poner a cero los numeradores de los elementos de fuera de la diagonal principal en el menú de configuración del proceso. Si se

opta por este camino, no sólo se podrán realizar sintonías individuales por margen de fase sino también por margen de ganancia o por ambos márgenes.

3.2. Sintonía multivariable

Como método de sintonía multivariable se emplea una adaptación del anterior, descrita en Vázquez (1998) y en el capítulo 5 de su tesis. El método permite tres posibilidades, que se reflejan en los correspondientes submenús:

- Ajuste por margen de fase (submenú *By P.M.*)
- Ajuste por margen de ganancia (submenú *By G.M.*)
- Ajuste combinado por márgenes de fase y de ganancia (submenú *By P.M. and G.M.*)

Ajuste por margen de fase: Este tipo de ajuste es el más eficaz en la mayoría de las ocasiones, e intenta en cada iteración conseguir los márgenes de fase especificados para cada uno de los dos lazos. A través de la ventana de la figura 7 se puede especificar para cada lazo el tipo de controlador a diseñar (PI, PD o PID) y el rango de α (razón entre las constantes derivativa e integral). Es en esta misma ventana donde muestran los resultados obtenidos en cada iteración de forma que si el algoritmo diverge se pueda detener el cálculo. Una vez que se consiguen las especificaciones solicitadas, los parámetros se pueden aceptar y proceder a la simulación de la respuesta temporal, al análisis, al cálculo de los DNA, o cualquier otra posibilidad de la pantalla principal.

Hay que recordar que las iteraciones del algoritmo de ajuste se detienen por diferentes causas:

- Cuando el número máximo prefijado se alcanza, para evitar un número infinito de iteraciones. En la herramienta este número se fija en 15 iteraciones.
- Cuando se hayan alcanzado las especificaciones, es decir, cuando el índice de calidad dado por las expresiones (5.6) y (5.7) de la tesis entra en tolerancia. Esta tolerancia se ha fijado en el valor de 5%. Sin embargo, únicamente por motivos de estudio del comportamiento de la herramienta, la iteración no se detiene hasta que tres ajustes sucesivos estén dentro de tolerancia, pero esto se eliminará en la versión definitiva.

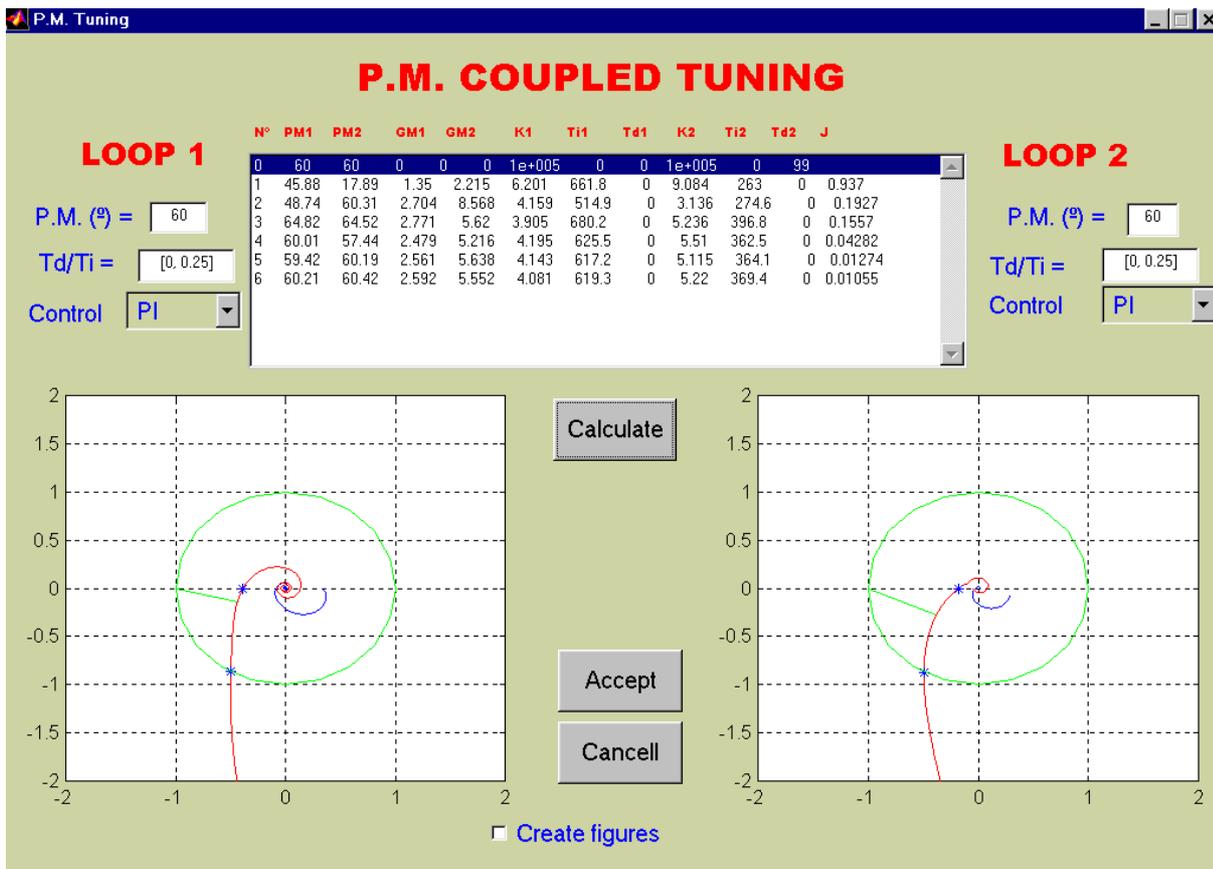


Fig. 7: Ventana de diseño MIMO por Margen de Fase.

En la parte central de la ventana aparece un cuadro donde se van mostrando para cada iteración los siguientes parámetros: Número de la iteración, margen de fase del lazo 1, margen de ganancia del lazo 1, margen de fase del lazo 2, margen de ganancia del lazo 2, los tres parámetros del PID del lazo 1 (K_{p1} , T_{i1} y T_{d1}), los parámetros del PID del lazo 2 (K_{p2} , T_{i2} y T_{d2}), y el índice de calidad (puede comprobarse, a partir de este índice, cuándo se detiene la iteración).

Las dos ventanas centrales laterales muestran los GDNA del sistema, es decir, los diagramas de Nyquist de $k_i \tilde{g}_i$ de casa lazo. También se muestran los diagramas de Nyquist de \tilde{g}_i .

En la parte inferior de la ventana aparece la opción de crear figuras (**Create Figures**). Ésta permite la creación de los GDNA en figuras independientes en vez de en las dos ventanas anteriores. Esta opción es útil para documentar los ajustes.

Ajuste por margen de ganancia: El segundo tipo de ajuste es muy similar al anterior, salvo que las especificaciones son ahora los márgenes de ganancia de cada uno de los lazos. La ventana de diseño es muy parecida a la 7.

Ajuste combinado por márgenes de fase y de ganancia: El ajuste combinado es el más complejo, pues en cada iteración son cuatro las especificaciones que se deben conseguir (márgenes de fase y ganancia para cada lazo). Por tanto, la ventana, mostrada en la figura 8, debe permitir incluir estas cuatro especificaciones (dos por lazo) así como el tipo de controlador y la razón α .

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 observándose que el algoritmo se detiene cuando se hace menor que la tolerancia (el 5%) por primera vez (y no tres veces sucesivas como en los dos métodos anteriores). Si el número de iteraciones supera la cantidad de 15, el algoritmo también se detiene.

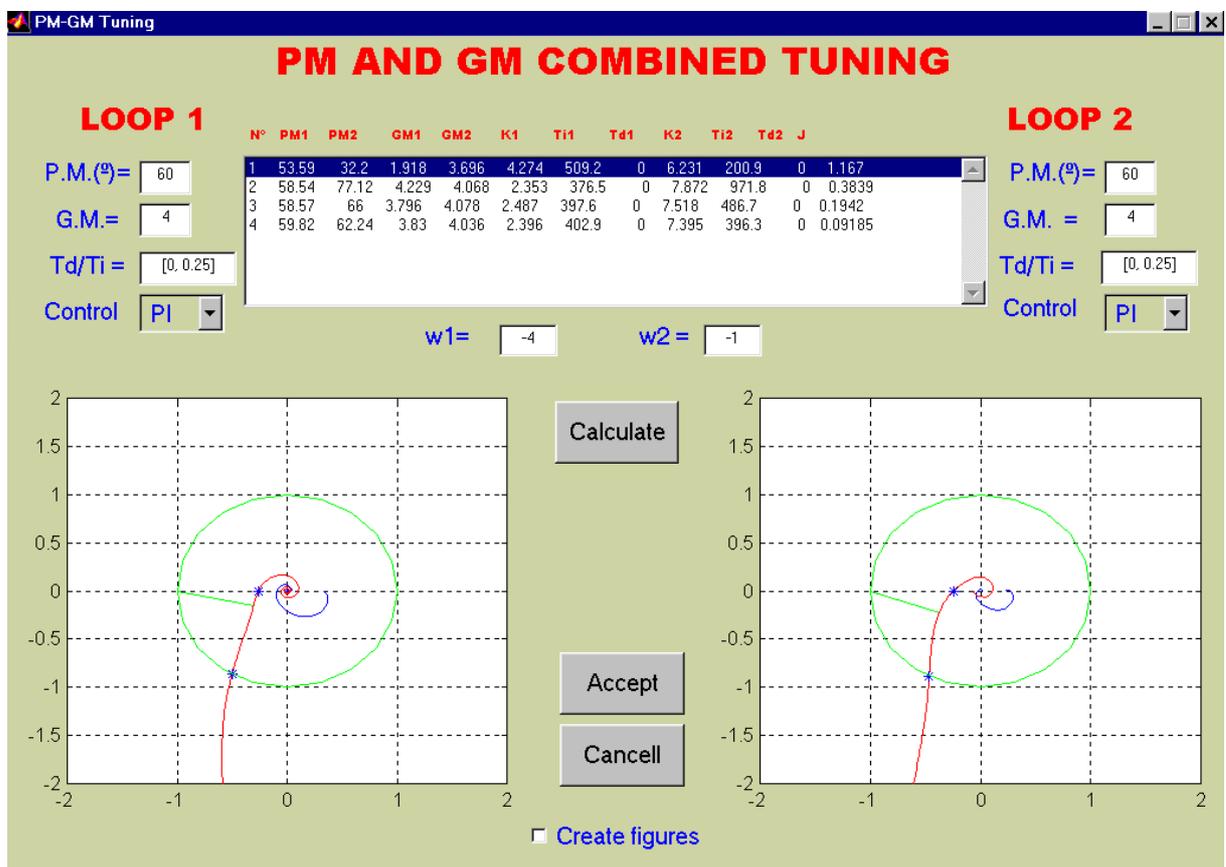


Fig. 8: Ventana de diseño por ajuste combinado por MF y MG

Aunque los parámetros de control converjan hacia unos valores es posible que no puedan conseguirse simultáneamente las cuatro especificaciones. La forma en la que las diferentes especificaciones se relajan se describe en el apartado 5.3.2 de la tesis.

Otra característica diferente a la ventana de ajuste por margen de fase es la de incluir dos ventanas de entrada de datos con los valores de los límites de dibujo de las frecuencias. Sin embargo, es el propio algoritmo el que selecciona las frecuencias de diseño, y los rangos de frecuencias con posible solución al problema de diseño.

4 POSIBILIDADES DE ANÁLISIS

Los sistemas multivariantes (MIMO) llevan asociados una serie de problemas que no presentan los de una entrada y una salida (SISO), que se describen a lo largo de la tesis de Francisco J. Vázquez (Madrid, 2001). Para cuantificar esta problemática se utilizan ciertas herramientas matemáticas, algunas de las cuales se han incorporado al entorno permitiendo el estudio de la interacción, de la estabilidad y de la robustez relativa del proceso.

4.1 Análisis de la interacción

Previamente a la elección del tipo de estrategia de control a utilizar es imprescindible en los sistemas multivariantes 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):** Se accede a este submenú en *RGA and C.N.* Es, sin duda, la herramienta de análisis de interacción más empleada. La ventana de la figura 9 muestra el resultado para un sistema determinado. A partir de los resultados de esta ventana, si los elementos más cercanos a la unidad están fuera de la diagonal principal de esta matriz, habrá que permutar las filas o las columnas de la matriz de funciones de transferencia del proceso para que sí lo estén. En la figura 9, los elementos más próximos a la unidad están en la diagonal (0.9), por lo que no hay que hacer esta operación. La matriz RGA también puede descartar, a priori, una estrategia de control descentralizado como la que ofrece esta herramienta.

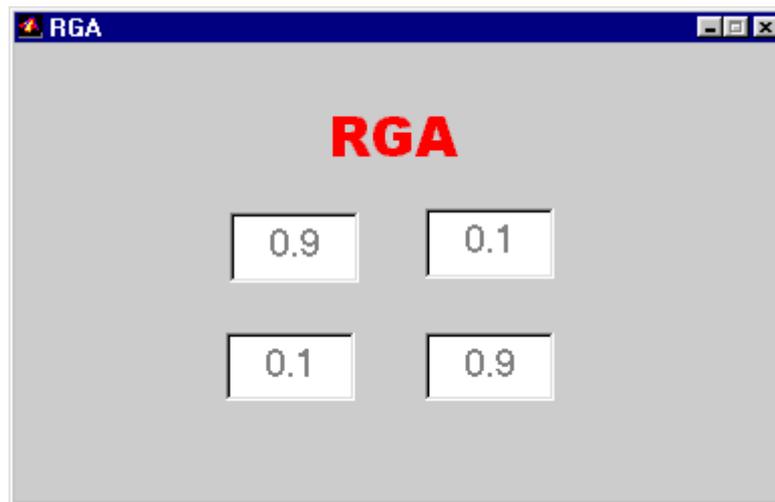


Fig. 9: Ventana de RGA

- **Número de condición:** Se accede en el mismo submenú que la RGA, de ahí que la herramienta presente ambos resultados simultáneamente. La gráfica de la figura 10 el número de condición dinámico, tal y como se ha definido en el capítulo 2 de la tesis.

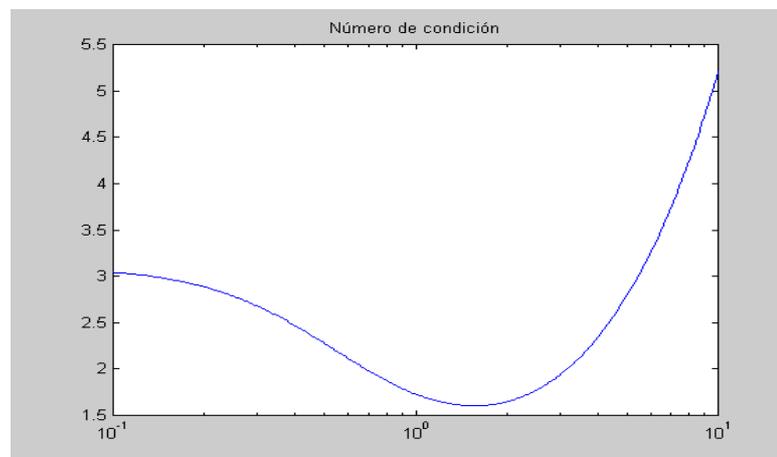


Fig. 10: Ventana del número de condición

- **Submenú del vector directo de Nyquist (DNA):** 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), descrito en el capítulo 3 de la tesis. Para representar este vector se utiliza el submenú *DNA* que abre una ventana como la mostrada en la figura 11 que permite la elección de las frecuencias inferior y superior de representación del DNA y del número de círculos de Gershgorin a dibujar. El DNA, junto a los círculos de Gershgorin, se muestra en la figura 12 para un

sistema con unos controladores concretos. La ventana permite realizar la representación de las bandas de Gershgorin por filas o por columnas, siendo ésta la opción por defecto, y la más habitual (Maciejowski, 1999)

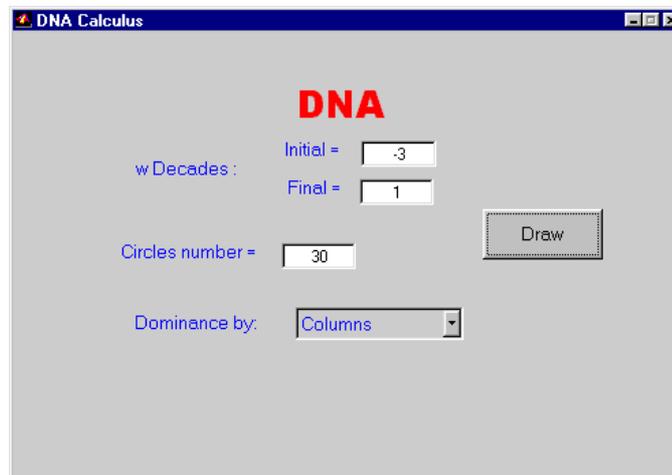


Fig. 11: Ventana de configuración del DNA

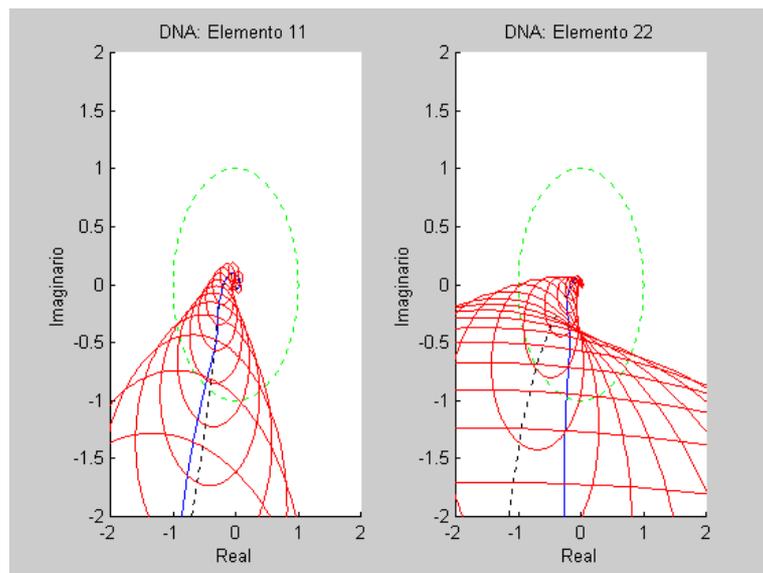


Fig. 12: DNA con círculos de Gershgorin

En las gráficas de la figura 12 aparecen las bandas de Gershgorin (trazado rojo, continuo), rodeando al trazado polar de los $k_i g_i$ (trazado central en negro y discontinuo). También se representan los SDNA (trazado azul y continuo).

Aparte de proporcionar una medida de la estabilidad, pueden servir de complemento a las técnicas de sintonía, concretamente como indicativo gráfico de la interacción cuando se incluyen en el proceso los distintos controladores.

4.2. Ventana de Análisis.

Otras medidas importantes, indicativas en cierta manera de la robustez de un sistema con unos controladores determinados son los márgenes de fase, los márgenes de ganancia y los máximos de las funciones de sensibilidad. Estas últimas miden lo “alejado” que está un sistema de la inestabilidad, representada en el diagrama de Nyquist como el punto crítico $(-1,0)$. La figura 13, muestra la ventana que ofrece la herramienta para realizar este tipo de análisis. Esta ventana permite el análisis de un diseño previamente realizado con la herramienta o la inclusión, a mano, de los parámetros de los controladores obtenidos por cualquier otro método, con objeto de analizar sus características.

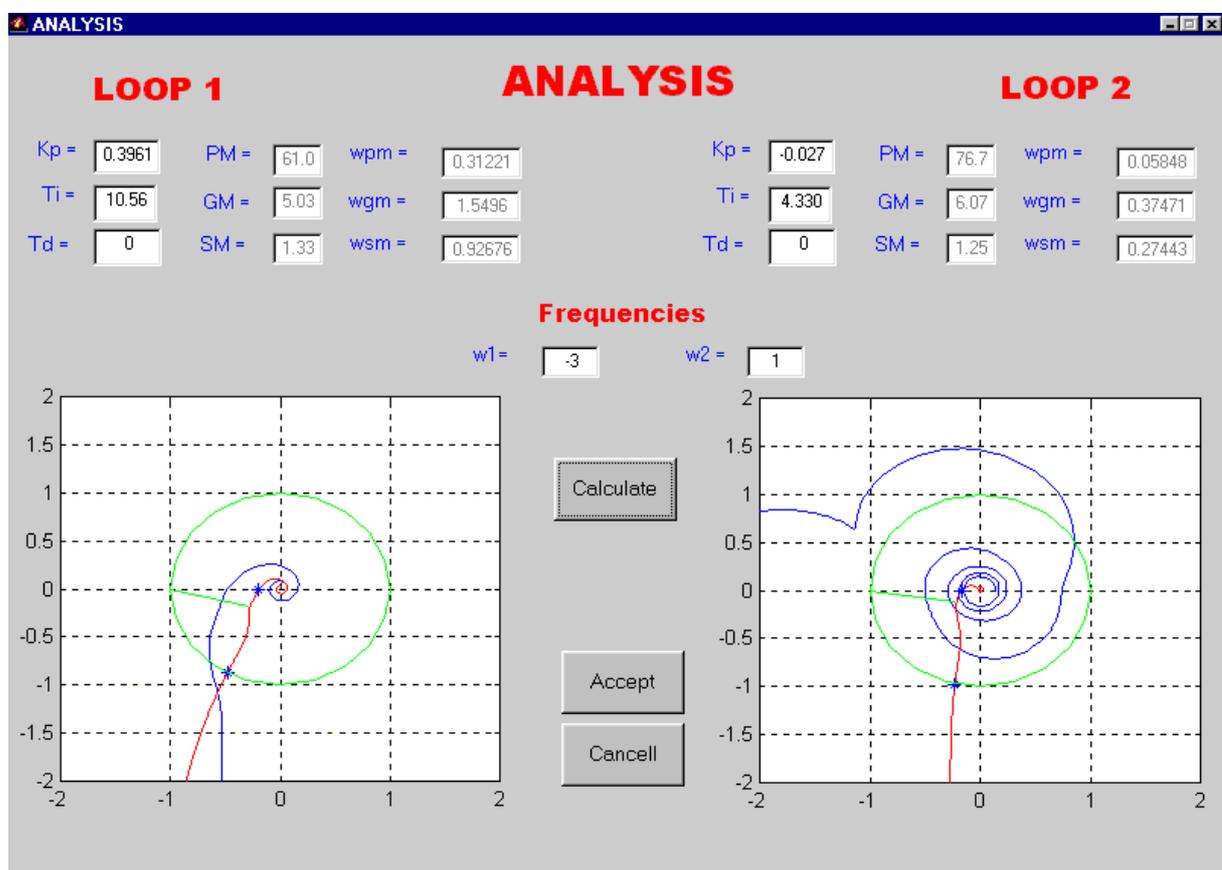


Fig. 13: Ventana de Análisis

Las ventanas laterales ofrecen la misma información que las ventanas de diseño. Los valores de los parámetros de los controladores son capturados desde la ventana principal de la herramienta. Si posteriormente se modifican y se pulsa en el botón ‘*Calculate*’, se analizan las características de sistema en lazo cerrado con los nuevos parámetros.