

# ENTORNO MATLAB PARA DISEÑO DE CONTROLADORES PID

Francisco Vázquez Serrano  
Universidad de Córdoba, fvazquez@uco.es

Fernando Morilla García  
UNED, fmorilla@dia.uned.es

Enrique Sanmiguel Rojas  
Universidad de Córdoba, inlsaroe@uco.es

## Resumen

*Este trabajo describe una herramienta de diseño de controladores PID para sistemas representados mediante funciones de transferencia. La sintonía de los parámetros de los controladores se realiza en el dominio de la frecuencia, mediante un conjunto de funciones realizadas en el entorno MATLAB-SIMULINK y agrupadas en un interfaz gráfico de usuario (GUI). Como indicadores de la estabilidad se utilizan los márgenes de fase y ganancia. Se muestran algunos diseños obtenidos tanto en plantas experimentales como en modelos más académicos.*

**Palabras Clave:** Sintonía de controladores, controladores PID, entorno gráficos de usuario.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los entornos de Diseño de Sistemas de Control Asistido por Ordenador (CACSD) están experimentando notables cambios durante los últimos años. Estos avances afectan a las distintas fases de diseño de los sistemas de control como pueden ser el modelado, la identificación y la validación de estos modelos, así como a la posterior fase de diseño del controlador propiamente dicho. Este trabajo describe una herramienta cuyo principal objetivo consiste en la integración en un único entorno de un conjunto de funciones que permiten la sintonía de controladores PID para sistemas SISO. Es decir, cubren la última fase de las comentadas anteriormente, y supone que el modelo del sistema ya ha sido obtenido por algún método.

Existen numerosas y bien conocidas razones para utilizar este tipo de controladores (los PID), como pueden ser su implantación industrial, robustez, facilidad de empleo, etc. [2]. Aunque existen métodos contrastados para su sintonía, como pueden ser los clásicos como en [6], la búsqueda de alternativas para la elección de los parámetros de los PID sigue siendo un tema abierto, como se pudo apreciar en el número de trabajos del pasado congreso de IFAC en España, el PID'00 y como

puede verse en [4]. En este trabajo se utiliza una de las metodologías para la sintonía de PID no interactivas propuestas en [5], trabajo presentado en la citada reunión. Consiste en un método de diseño muy general que incluye como casos particulares a los conocidos métodos de Astrom [3] o de Ziegler-Nichols [6] y que describe cómo se consigue modificar la característica en frecuencia de un proceso incluyendo un controlador de este tipo en la trayectoria directa. Esta modificación se representa mediante el diagrama de Nyquist, y los indicadores de estabilidad utilizados son los márgenes de fase y ganancia que se convierten en las especificaciones de diseño.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO

El entorno se ha realizado utilizando el GUI de MATLAB, utilizando los principios de simplicidad, consistencia y familiaridad, ya que un entorno simple da una visión de un trabajo limpio, con una idea clara y sensación de unidad.

La ventana principal, figura 1, consta de tres gráficas donde se representan las respuestas temporales del sistema en lazo abierto o en lazo cerrado y donde se muestra la evolución de la salida, de la señal de control y de la señal de error.

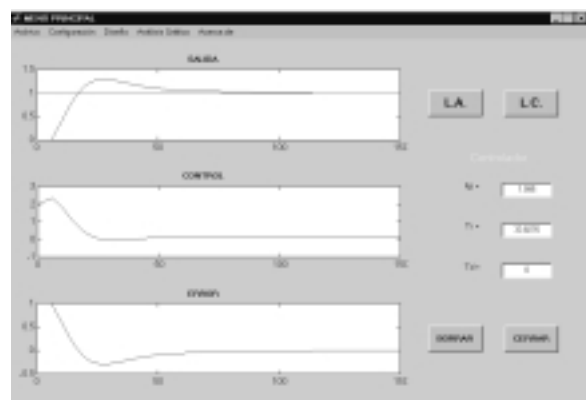


Figura 1: Ventana principal del entorno

En la derecha existen dos botones para mostrar la simulación en lazo abierto o cerrado. Debajo de éstos se muestran los parámetros del controlador utilizado,

un PID no interactivo, descrito mediante la siguiente función de transferencia:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

En la parte superior existe un menú con diferentes posibilidades. La primera de ellas, *Archivo*, permite grabar los modelos y diseños existentes en la herramienta o cargar otros previamente grabados. El menú de *Configuración* permite definir el tipo de modelo y las condiciones de simulación de la respuesta temporal. La ventana de captura de modelos se muestra en la figura 2. Para dar la mayor generalidad posible el modelo a introducir es de la forma

$$G(s) = \frac{\text{num}}{\text{den}} e^{-t_0 s}$$

que admite la entrada de los polinomios en  $s$  del numerador y denominador en forma de vectores, cuyas componentes son los coeficientes de las potencias decrecientes de dichos polinomios (es decir, en formato MATLAB). También se puede introducir el tiempo de retardo.



Figura 2: Ventana de captura del modelo

La configuración de las gráficas de respuesta temporal permite definir el instante y la amplitud del salto escalón así como la duración e intervalo de la simulación.

### 3 POSIBILIDADES DE SINTONÍA

Bajo el menú de *Diseño*, el entorno de simulación permite tres tipos de sintonía:

- Por Margen de Fase (MF)
- Por Margen de Ganancia (MG)
- Por ajuste combinado de ambos márgenes.

La primera opción, el *Ajuste por margen de fase* se realiza en la ventana de la figura 3. En ella existen determinados campos de edición en los que se solicita al usuario el valor del margen de fase deseado, en grados, la relación  $\alpha$  entre la constante derivativa y la integral (necesaria sólo en el caso de

un PID) y el tipo de controlador (PI, PD, PID). El valor de  $\alpha$  se introduce mediante un vector de dos componentes, que indican el valor mínimo y máximo de este parámetro. Si los dos valores son iguales,  $\alpha$  se considerará con un valor fijo. En caso de que sean distintos, se utilizará como un parámetro de diseño adicional.

En el centro de la ventana aparece el diagrama de Nyquist del sistema, donde se puede observar si se cumplen las especificaciones de diseño establecidas. En la misma figura 3 se ha realizado un ajuste por margen de fase con una especificación de  $MF = 45^\circ$ , eligiendo un PID como controlador un valor de  $\alpha$  comprendido entre 0 y 0.05. Como puede observarse en el diagrama de Nyquist, se ha conseguido.

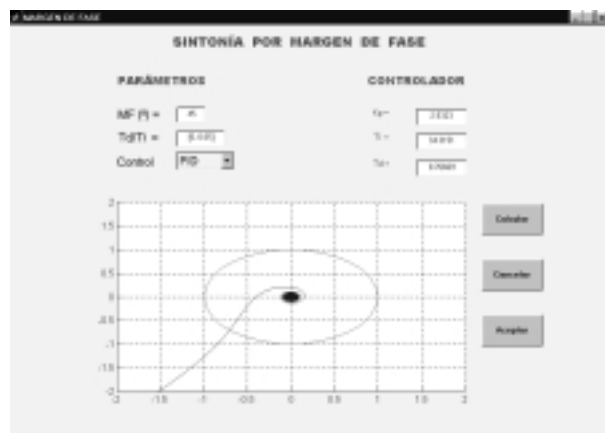


Figura 3: Ventana de Sintonía por MF

La opción de *Ajuste por margen de ganancia* es similar a la anterior, salvo que el parámetro de entrada es el MG.

En ocasiones, el diseño por sólo margen de fase o margen de ganancia puede no ser suficiente para conseguir una respuesta adecuada. En este caso, la herramienta dispone de otra opción de diseño: el *Ajuste combinado por márgenes de fase y ganancia*. Como la solución analítica del problema de conseguir ambas especificaciones al mismo tiempo es difícil dada la complejidad de las ecuaciones planteadas en [5], se puede proceder con algún método numérico de búsqueda. Para un margen de fase fijo existirá un intervalo de márgenes de ganancia alcanzables que dependerán de la frecuencia de diseño utilizada. En caso de que para una especificación de MF el MG especificado esté dentro de ese intervalo el problema tiene solución. Pero en el caso general habrá que relajar alguna de las dos especificaciones (o las dos) de forma que se llegue a un compromiso entre ambas. En este caso concreto, el algoritmo programado trata de minimizar un índice de calidad  $J$  que puede estar definido mediante la expresión:

$$J = \frac{|MF_{\text{especificado}} - MF_{\text{obtenido}}|}{MF_{\text{especificado}}} + \frac{|MG_{\text{especificado}} - MG_{\text{obtenido}}|}{MG_{\text{especificado}}}$$

donde  $MF_{\text{especificado}}$  y  $MG_{\text{especificado}}$  son las dos especificaciones en el dominio de la frecuencia y  $MF_{\text{obtenido}}$  y  $MG_{\text{obtenido}}$  son los márgenes resultantes en cada paso de iteración del algoritmo de búsqueda de la solución.

La ventana para este tipo de diseño es similar a la anterior, como se puede ver en la figura 4.

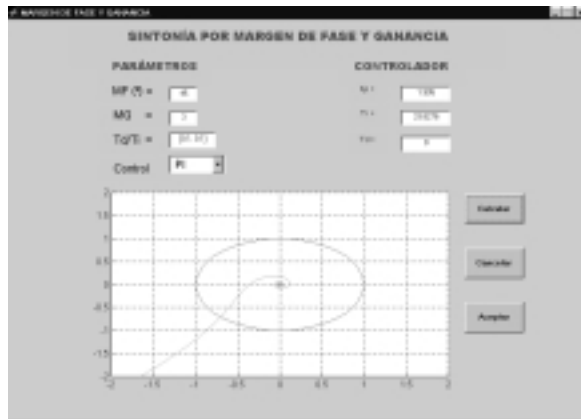


Figura 4: Ventana de Sintonía por MF y MG

En este caso, lógicamente, habrá que incluir un campo para cada especificación: MF, MG,  $\alpha$  y tipo de controlador.

#### 4 ANÁLISIS DEL DISEÑO

En ocasiones puede resultar útil un ajuste manual o un ajuste fino sobre un diseño previo. En este caso, la herramienta dispone de una opción de menú, *análisis*, donde se pueden ajustar a mano los tres parámetros del controlador PID. Cada vez que se modifica uno de estos tres parámetros se recalculan los márgenes de fase y ganancia, mostrándose en un campo de edición. También se actualiza la gráfica seleccionada, que puede ser el diagrama de Bode o el de Nyquist.

La ventana correspondiente puede verse en la figura 5, donde se aprecia la gráfica mostrada para el análisis, en este caso un diagrama de Bode, y los campos de edición,  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ , MF y MG.

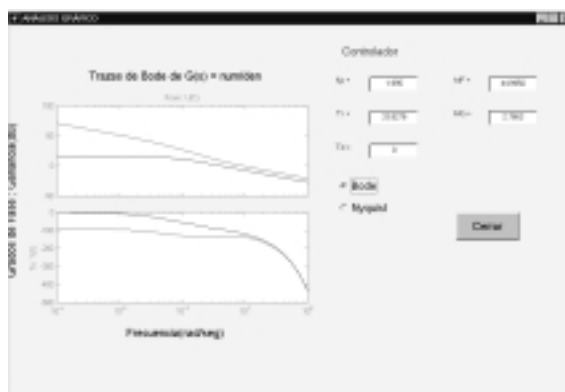


Figura 5: Ventana de Análisis Gráfico

#### 5. APLICACIONES PRÁCTICAS

En este apartado se van a mostrar algunas experiencias de diseño que utilizan la herramienta descrita en este trabajo. En primer lugar se muestra una experiencia real y posteriormente se analizan algunos ejemplos más académicos.

En la figura 6 se muestra una planta experimental con la que se ha utilizado la herramienta de diseño de controladores PID. Se trata de un sistema en el que un fluido recirculante pasa de un depósito (situado en la parte inferior) a otro (en la parte superior) para lo que se utiliza una bomba centrífuga. El caudal se controla mediante una válvula de entrada accionada por un motor paso a paso. Las variables controladas pueden ser el caudal del circuito (medido mediante un caudalímetro) o el nivel del depósito (medido mediante una boya conectada a un potenciómetro). Se dispone de un controlador PID de la casa ABB que ejerce la acción de control sobre el motor de la válvula de entrada. Para las experiencias descritas a continuación se ha supuesto que se desea mantener constante el nivel del depósito.

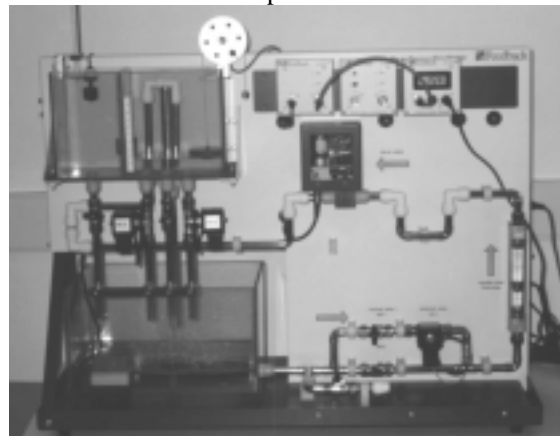


Figura 6: Foto de la planta experimental

Para efectuar el diseño se procedió inicialmente a un proceso de identificación del sistema. Tras diseñar las experiencias de identificación y validación, en las que se utilizaron diversas PRBS para excitar al sistema en torno a un punto de trabajo (un nivel del depósito) prefijado, se obtuvo que la relación entre la apertura de la válvula de control de entrada de caudal y el nivel de líquido en el depósito viene dada por la expresión

$$G(s) = \frac{6}{135s + 1} e^{-6s}$$

En primer lugar se realizó un diseño agresivo con una especificación del  $MF = 20^\circ$  y eligiendo como controlador un tipo PI. El resultado se muestra en la siguiente función de transferencia del controlador:

$$C(s) = 2.92 \left( 1 + \frac{1}{15.69s} \right)$$

La respuesta temporal real ante un cambio de consigna se muestra en la figura 7 donde puede apreciarse las oscilaciones producidas antes de llegar al estacionario.

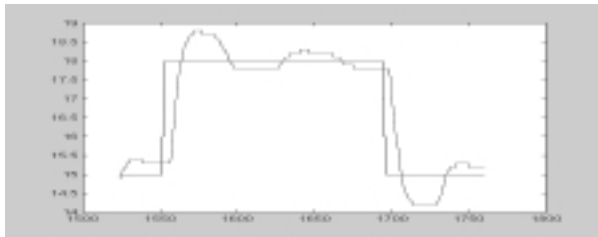


Figura 7: Respuesta temporal MF=20°

Para un diseño más suave, con una especificación de MF=45° se diseñó un PI con parámetros dados por:

$$C(s) = 1.99 \left( 1 + \frac{1}{33.82s} \right)$$

para el que se consiguió la respuesta temporal ante un cambio de consigna mostrada en la figura 8.

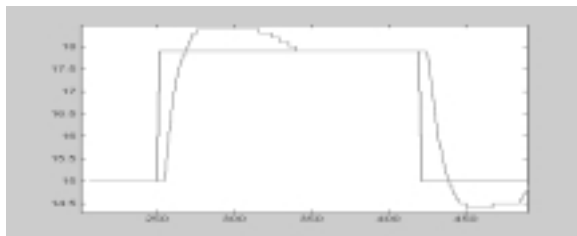


Figura 8: Respuesta temporal MF=45°

En ella se observa la respuesta menos oscilatoria que con el diseño anterior. La salida puede hacerse más suave para diseños con márgenes de fase mayores.

Además de probarse con la anterior planta experimental, el entorno ha sido evaluado con los sistemas del benchmark [1]. Entre otros se ha probado con éxito con funciones de transferencia con polos iguales múltiples, para sistemas de cuarto orden, con ceros en el plano derecho con tiempo de retardo no nulo, etc., todos propuestos en la citada fuente bibliográfica. A continuación se muestran algunos de estos diseños.

Como primer ejemplo se utiliza el modelo con polos múltiples e iguales cuya función de transferencia genérica se muestra a continuación:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^n} \quad n = 1, 2, 3, 4 \text{ y } 8 \quad (1)$$

Se elige n=3 y se hace un diseño por margen de fase con una especificación de MF=45° y utilizando un controlador PI. La ventana de diseño, donde se aprecia el diagrama de Nyquist se muestra en la figura 9.

En segundo lugar se procede a efectuar un diseño por ajuste combinado de margen de fase y ganancia, especificando MF=65° y MG=5, para realizar un

control conservador. Se eligió un PID con relación entre la cte. derivativa y la integral de  $\alpha=0.1$ . La ventana de diseño se muestra en la figura 10.

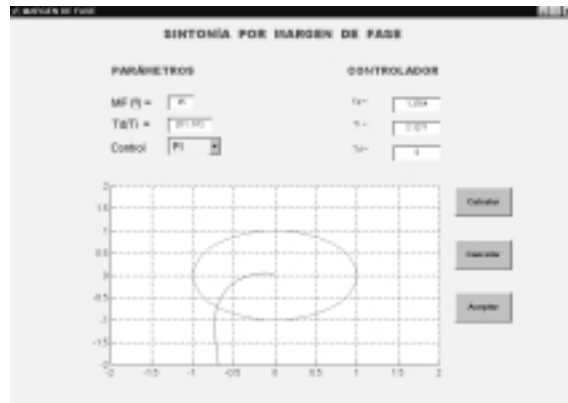


Figura 9: Diseño para el proceso (1) con MF=45°

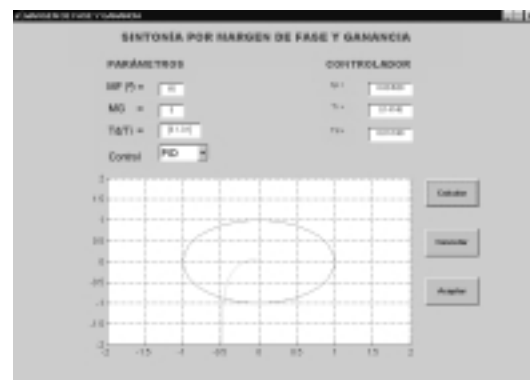


Figura 10: Diseño para (1) con MF=65° y MG=5

En la figura 11 se muestran las respuestas temporales de ambos diseños superpuestas en una misma pantalla. La herramienta permite esta opción de superposición de respuestas hasta que se pulse el botón de borrar.

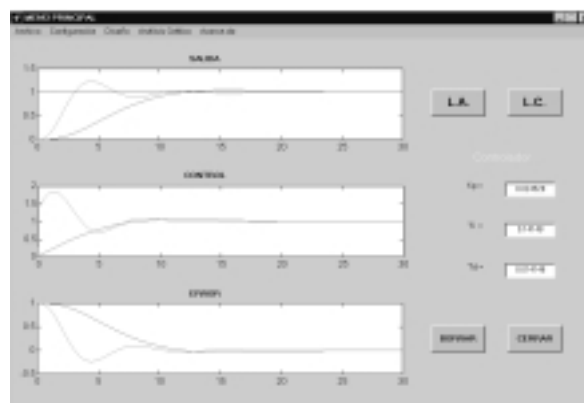


Figura 11: Respuesta temporal del proceso (1)

Como segundo ejemplo se utiliza el modelo de cuarto orden

$$G(s) = \frac{1}{(1+s)(1+\alpha s)(1+\alpha^2 s)(1+\alpha^3 s)} \quad (2)$$

con  $\alpha = 0.1, 0.2, 0.5$  y  $1$

El modelo permite realizar diseños con cualquiera de las especificaciones mostradas anteriormente. De todos ellos se muestra un caso de ajuste combinado en el que no se consiguen las especificaciones. Se realiza un diseño por ajuste combinado con MF=60° y MG=5 y eligiendo un PI. si se analiza en resultado se obtiene la ventana de la figura 12, donde se aprecia que se consiguió un MF=51° y MG=5.2.

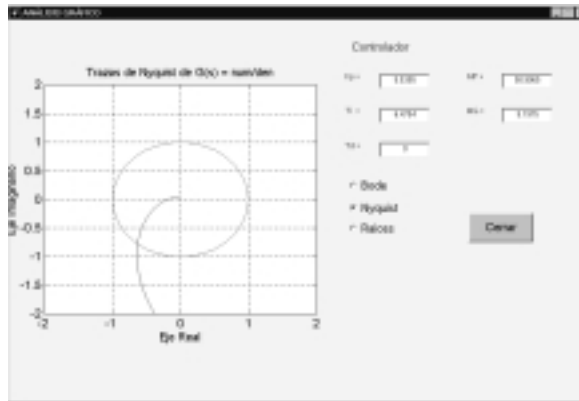


Figura 12: Análisis del diseño del proceso (2)

Como tercer ejemplo se utiliza en siguiente modelo, también del benchmark [1] con un cero en el semiplano derecho:

$$G(s) = \frac{1 - \alpha s}{(1 + s)^3} \quad \text{con } \alpha = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 \text{ y } 5 \quad (3)$$

Si se realiza un diseño por sólo margen de fase con, por ejemplo MF=45°, se aprecia (figura 13) que puede no ser suficiente para conseguir una respuesta adecuada, ya que el margen de ganancia es pequeño. Para mejorar el diseño puede optarse por un ajuste combinado como el de la figura 14.

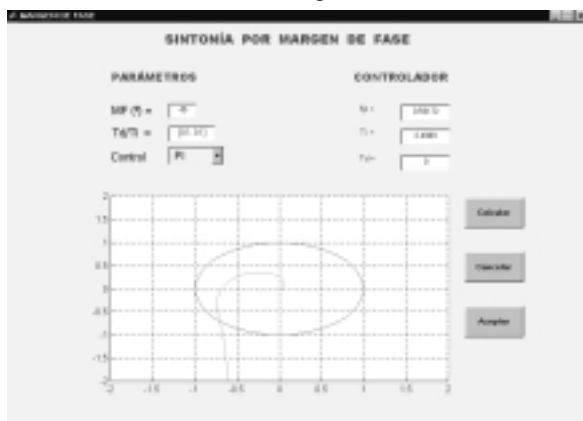


Figura 13: Diseño para (3) con MF=45°

En el citado benchmark se incluyen también sistemas con un polo y retardo. El diseño con este tipo de modelos se ha mostrado en el caso de la planta experimental anterior.



Figura 14: Diseño para (3) con MF=45° y MG =3

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un entorno de sintonía y análisis de sistemas con control PID, realizado utilizando la metodología propuesta en el Dpto. de Informática y Automática de la UNED y presentada en [5].

El entorno se utiliza como herramienta de sintonía en las prácticas de Regulación Automática y de Ingeniería de Control de la titulación de Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Córdoba.

## Referencias

- [1] Aström, K. J.; Hägglund, T.(2000).Benchmark systems for PID control. IFAC PID'00, pp.181-182.
- [2] Aström, K. J.; Hägglund, T. (1995).*PID controllers: Theory, design, and tuning*" (2<sup>nd</sup> Edition). Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America.
- [3] Aström, K. J., T. Hägglund (1984). Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins. *Automatica*, 20, 645-651.
- [4] Lelic, M; Gajic, Z. (2000). A Reference Guide to PID Controllers in then Nineties. IFAC PID'00, pp.73-82.
- [5] Morilla, F; Dormido, S. (2000). Methodologies for the tuning of PID controllers in the frequency domain. . IFAC PID'00, pp.155-160.
- [6] Ziegler, J. G.; Nichols, N. B. (1942). *Optimum setting for automatic controllers*. ASME Trans., 64, pp.759-768.