

SIMULADOR INTERACTIVO PARA LA DOCENCIA DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE CONTROL

R.P. ÑECO, R. PUERTO, M^a. ASUNCIÓN VICENTE, C. FERNÁNDEZ

*Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales. Universidad Miguel Hernández de Elche,
Av. de la Universidad s/n, 03202-Elche (Alicante)
[ramon.neco, r.puerto, suni, c.fernandez]@umh.es*

En el presente artículo se describe una herramienta interactiva para el diseño de reguladores en un curso de sistemas electrónicos de control. Con el uso de esta herramienta es posible presentar la teoría al alumno de forma intuitiva, permitiendo variar los parámetros del controlador interactivamente. El lenguaje de programación usado es lo suficientemente sencillo como para permitirle al profesor realizar modificaciones al programa para adaptarse a las necesidades de sus estudiantes.

1. Introducción

En el presente artículo se describe una herramienta interactiva cuyo objetivo es el aprendizaje de forma intuitiva de conceptos de análisis y diseño en un curso básico sobre sistemas electrónicos de control. Esta herramienta ha sido usada en la práctica en una asignatura dirigida a estudiantes de Ingeniería que no son especialistas en control (Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad de Sistemas Electrónicos, en la Universidad Miguel Hernández de Elche). Con ella se pretende que los estudiantes comprendan de forma intuitiva y sencilla los conceptos que se explican en las clases de teoría, como complemento a las prácticas que se realizan con otras herramientas de simulación o con equipos físicos.

La herramienta se ha programado usando Sysquake [1, 2], un lenguaje de programación similar a Matlab con el que resulta relativamente sencilla la programación de gráficos interactivos personalizados. Como es bien sabido, Matlab es el programa más usado en las universidades para la enseñanza del análisis y diseño de sistemas de control. La herramienta descrita en este trabajo se presenta como un complemento a las prácticas realizadas usando Matlab, en las que el profesor puede personalizar de forma sencilla la presentación gráfica de los conceptos teóricos.

2. Características generales de la herramienta

La parte de la asignatura que puede practicarse con la herramienta implementada se corresponde con los temas siguientes, cada uno de los cuales corresponde a un módulo de programación: (1) Diseño de reguladores PID por el método del lugar de las raíces. (2) Diseño de reguladores por asignación de polos. (3) Diseño de reguladores de tiempo mínimo. (4) Diseño de reguladores de tiempo finito.

Para cada uno de estos temas, los alumnos pueden comprobar en simulación el comportamiento de los sistemas a controlar así como los efectos sobre los mismos de los distintos controladores diseñados. La herramienta puede usarse tanto en las sesiones teóricas, para aclarar los conceptos, como en las sesiones prácticas como complemento a otros programas de simulación y control (como Matlab). Sin embargo, según la experiencia de los autores la principal ventaja radica en su uso durante las sesiones teóricas, debido a la flexibilidad de adaptación de los gráficos interactivos a cada caso concreto.

2.1. Características de Sysquake

Sysquake es una herramienta orientada a la simulación y a la visualización de datos científicos. A través del uso de gráficos interactivos, Sysquake proporciona las herramientas necesarias para la resolución de problemas matemáticos complejos. El propósito de Sysquake es apoyar el diseño en ámbitos tales como el control automático y el procesamiento de señales. Es posible mostrar varios gráficos simultáneamente y manipular con el ratón algunos elementos de ellos, actualizándose todos estos gráficos para reflejar el cambio.

Las características principales de Sysquake las podemos resumir en los siguientes puntos:

- Potente: Incluye más de 310 funciones nativas, operadores y comandos que son fácilmente extensibles por el usuario y pueden ser utilizadas en una amplia relación de aplicaciones. Sus funcionalidades gráficas incluyen varias específicas para sistemas dinámicos (como respuesta al escalón o respuesta frecuencial) así como otras funcionalidades generales para visualización de todo tipo de datos.
- Rápido: Todo aquello que sería lento en un lenguaje matemático interpretado se ha implementado muy eficientemente en código máquina nativo. Esto es especialmente útil en el diseño de aplicaciones para sistemas avanzados de control (multivariables, no lineales, etc.).
- Fácil de extender: Sysquake está basado en LME, un intérprete especializado en cálculo numérico. La gestión de gráficos, almacenamiento y carga de datos, etc. es proporcionado por el propio Sysquake.
- Fácil de integrar: Sysquake utiliza ficheros de texto para sus programas y datos. El usuario puede crear los programas a mano con cualquier editor de texto.

La simulación de sistemas dinámicos se puede beneficiar enormemente de la interactividad proporcionada por Sysquake. Los parámetros indicados tienen a menudo efectos a largo plazo que son difíciles de deducir intuitivamente desde el modelo creado o desde unos pocos gráficos estáticos obtenidos gracias al proceso de simulación. Con Sysquake su manipulación permitirá deducir rápidamente sus reglas y cuál puede ser su comportamiento futuro. Algunas ventajas de la herramienta diseñada usando Sysquake respecto de otras programas de amplio uso como Matlab pueden ser las siguientes:

- Manipulación interactiva de gráficos: Los gráficos de Matlab son computacionalmente costosos con una jerarquía de objetos complicada. Aunque es posible diseñar programas interactivos, este diseño es más lento e incómodo de usar.
- Facilidad de desarrollo: Se puede desarrollar una interfaz de usuario razonable, con menús y botones, mucho más fácilmente.
- Precio: Sysquake es significativamente más barato, especialmente si se considera el hecho de que incluye muchas de las funciones que están disponibles únicamente en toolboxes adicionales en otras aplicaciones.

No obstante, como ya se ha indicado previamente los autores han usado complementariamente las dos herramientas en sus clases: Matlab para la simulación y control en tiempo real de prototipos en el laboratorio y Sysquake para la presentación de ejemplos prácticos y el apoyo en las sesiones de resolución de problemas.

Los cuatro módulos diseñados contienen menús para introducir las funciones de transferencia de los sistemas y las especificaciones de diseño. Se muestran gráficas con las salidas del sistema sin controlar, el sistema con el controlador y gráficas con el lugar de las raíces del sistema con y sin controlador sobre las

que los estudiantes pueden interactuar para comprobar simultáneamente el efecto sobre el resto de gráficas. En las secciones siguientes se describen las características principales de cada uno de los módulos diseñados.

3. Módulo de diseño de reguladores PID

Este módulo permite diseñar de forma gráfica reguladores PID continuos o discretos en el dominio del tiempo. Se considera siempre un sistema en bucle cerrado realimentado, donde el módulo “proceso” es la planta o sistema a controlar y la entrada es la referencia. Dado este esquema, el alumno deberá diseñar el regulador PID más sencillo posible de tal forma que el bucle cerrado se comporte según se indica en las especificaciones. Tras ejecutar el módulo de diseño, la ventana principal que aparece es la que se muestra en la Fig. 1, donde puede observarse el lugar de las raíces del sistema junto con la zona coloreada donde deberían situarse los polos en bucle cerrado para cumplir las especificaciones.

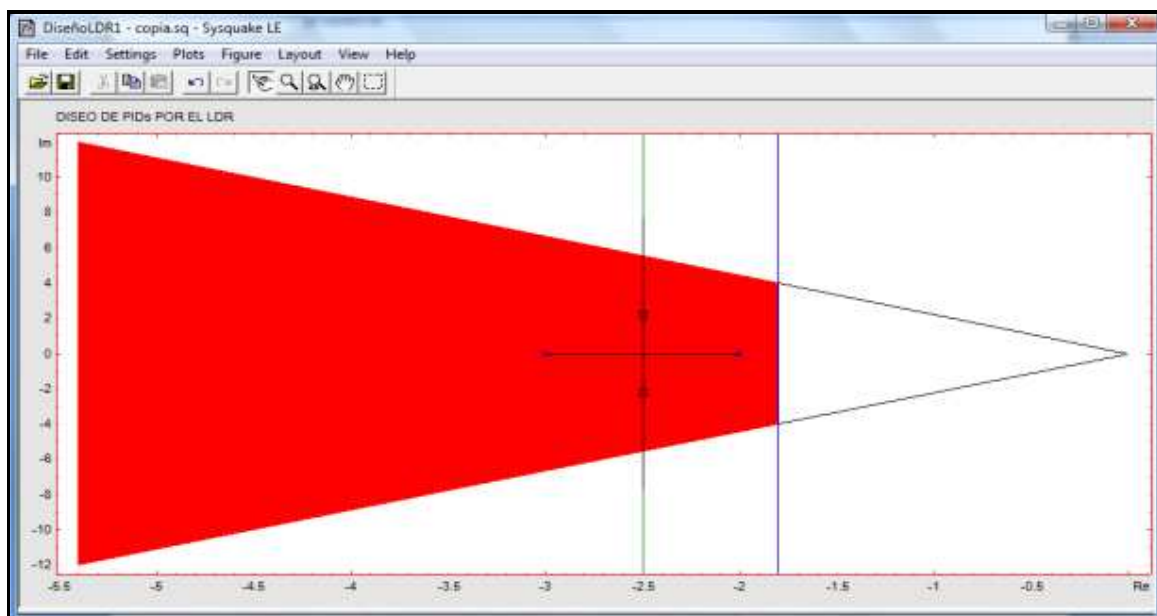


Figura 1: Ejemplo de zona válida para las especificaciones

En esta figura el estudiante puede interactuar usando el ratón directamente para añadir ceros y/o polos, o modificar la ganancia del regulador arrastrando los polos en bucle cerrado sobre el lugar de las raíces. Asimismo, puede cambiarse la función de transferencia del sistema mediante las opciones de menú, así como variar las especificaciones de diseño, bien gráficamente (desplazando los parámetros sobre el plano complejo usando el ratón) o bien a través del menú.

También es posible mostrar las respuestas del sistema a distintas referencias estándar, visualizando simultáneamente las variaciones que se producen en estas respuestas al variar cualquier parámetro del controlador. Pueden seleccionarse distintas señales a mostrar en esta gráfica (salida del sistema, señal de control, señal de error, referencia).

Resulta especialmente útil la interactividad que proporciona Sysquake en este punto. Los estudiantes pueden variar manualmente los polos y/o ceros del regulador y observar directamente la

variación en la respuesta del sistema (a partir de la cual se comprueba el cumplimiento de las especificaciones), así como la variación que se produce en la señal de control. Esto también es posible realizarlo usando otros paquetes de simulación, aunque el uso de Sysquake presenta la ventaja de poderse adaptar más fácilmente a las necesidades del curso en cuestión. Así por ejemplo, en la Fig. 2 se muestra el lugar de las raíces anterior incluyendo los polos y ceros del regulador PID. Sobre esta gráfica es posible variar la ganancia (polos en bucle cerrado del sistema controlado) así como los polos y ceros del propio regulador, observando simultáneamente sus efectos en la salida del sistema ante una señal de referencia (Fig. 3).

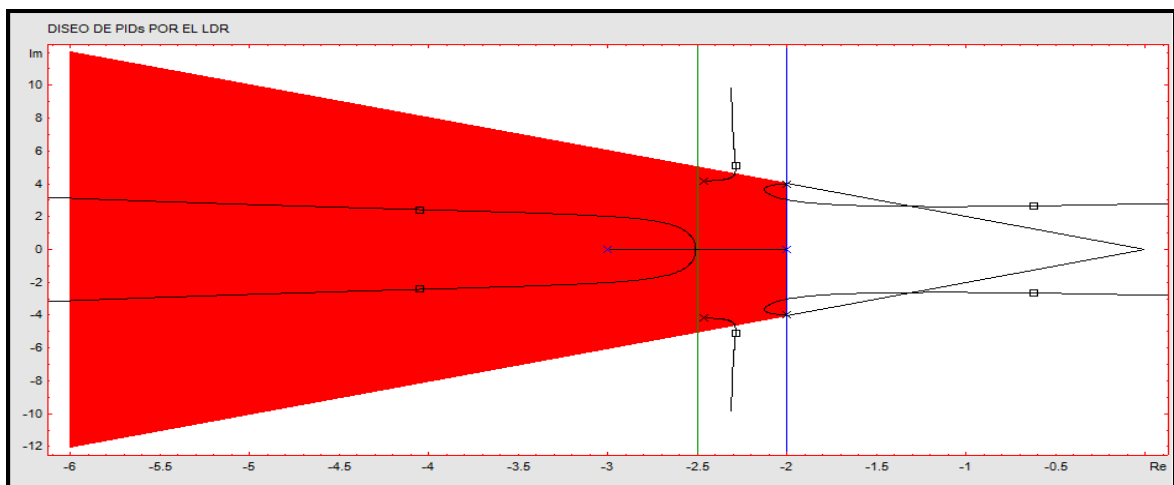


Figura 2: Lugar de las raíces deformado con los polos y ceros del regulador

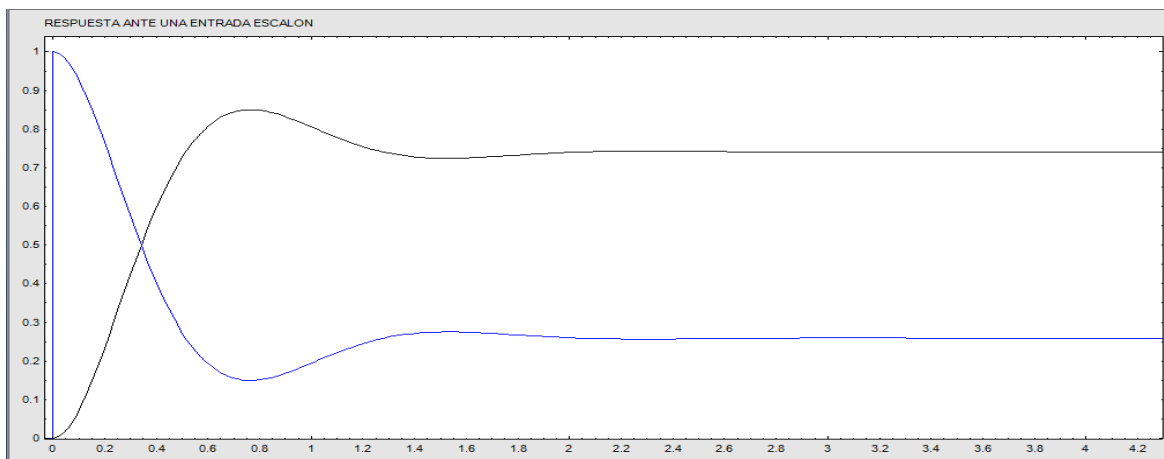


Figura 3: Respuesta y señal de control ante una señal de referencia.

4. Módulo de diseño de reguladores algebraicos

En esta sección se describe el módulo correspondiente al diseño de reguladores algebraicos [3]. A pesar de que en la mayoría de problemas de control de procesos los reguladores más empleados son los de tipo PID, resulta interesante en cursos introductorios presentar técnicas de diseño de reguladores discretos que están orientadas al cumplimiento de especificaciones más estrictas, así como un comportamiento no asintótico del bucle cerrado (especificaciones exactas).

Éste es uno de los objetivos del diseño algebraico de reguladores (asignación de polos, tiempo mínimo y tiempo finito). El diseño de estos reguladores es sencillo, obteniendo el cumplimiento exacto de las especificaciones. Sin embargo, estos reguladores no están exentos de problemas. Uno de los problemas principales es que la señal de control puede ser de excesiva amplitud para los sistemas reales con los que se trabaja. Por tanto, esa señal de control habrá que limitarla y deberá analizarse el efecto de esa limitación sobre el sistema real. Otro problema es la posible existencia de las denominadas *oscilaciones ocultas*, que son oscilaciones que presenta la salida continua del sistema entre los periodos de muestreo debido a que los métodos de diseño son puramente discretos y no tienen en cuenta el comportamiento entre muestras.

Por todos estos motivos, resulta interesante disponer de una herramienta docente con la que los estudiantes puedan analizar el comportamiento de los reguladores diseñados al realizar variaciones sobre el diseño teórico exacto que se estudia en las clases de teoría. El enfoque que se sigue es el siguiente:

1. Se diseña el regulador que da el cumplimiento exacto de las especificaciones, siguiendo el método clásico que se estudia en las clases de teoría.
2. Se analiza el comportamiento del sistema con el regulador (respuesta, magnitud de la señal de control, oscilaciones ocultas, etc.).
3. Se analiza el efecto sobre el cumplimiento de las especificaciones que puede tener la realización de pequeñas modificaciones al regulador diseñado inicialmente (variación de polos y/o ceros, variación de la ganancia, etc.).

En el tercer paso es donde la interactividad de la herramienta diseñada en Sysquake juega un papel importante, ya que se parte del diseño inicial y los estudiantes pueden variar de forma directa los parámetros del regulador y observar las variaciones que se producen en el comportamiento del sistema, pudiendo evaluar si dichas variaciones se alejan en exceso de las especificaciones de diseño. De esta forma se simula en clase el proceso que normalmente se sigue en el diseño *real* de un controlador digital: el controlador obtenido con los métodos directos es una primera aproximación a la solución final que deberá refinarse posteriormente con el sistema real a controlar.

En las secciones siguientes se describen los módulos correspondientes a los tres tipos de reguladores algebraicos (por asignación de polos, de tiempo mínimo y de tiempo finito).

4.1 Módulo de reguladores de asignación de polos

El diseño de estos reguladores consiste en calcular la función de transferencia discreta de tal forma que el sistema en bucle cerrado tenga polos situados en valores que hagan cumplir de forma exacta las especificaciones [3].

La herramienta diseñada tiene como entrada el sistema a controlar junto con las especificaciones de diseño y obtiene inicialmente el controlador de asignación de polos que hace cumplir las especificaciones. En la Fig. 4 se muestra la ventana principal del módulo de asignación de polos.

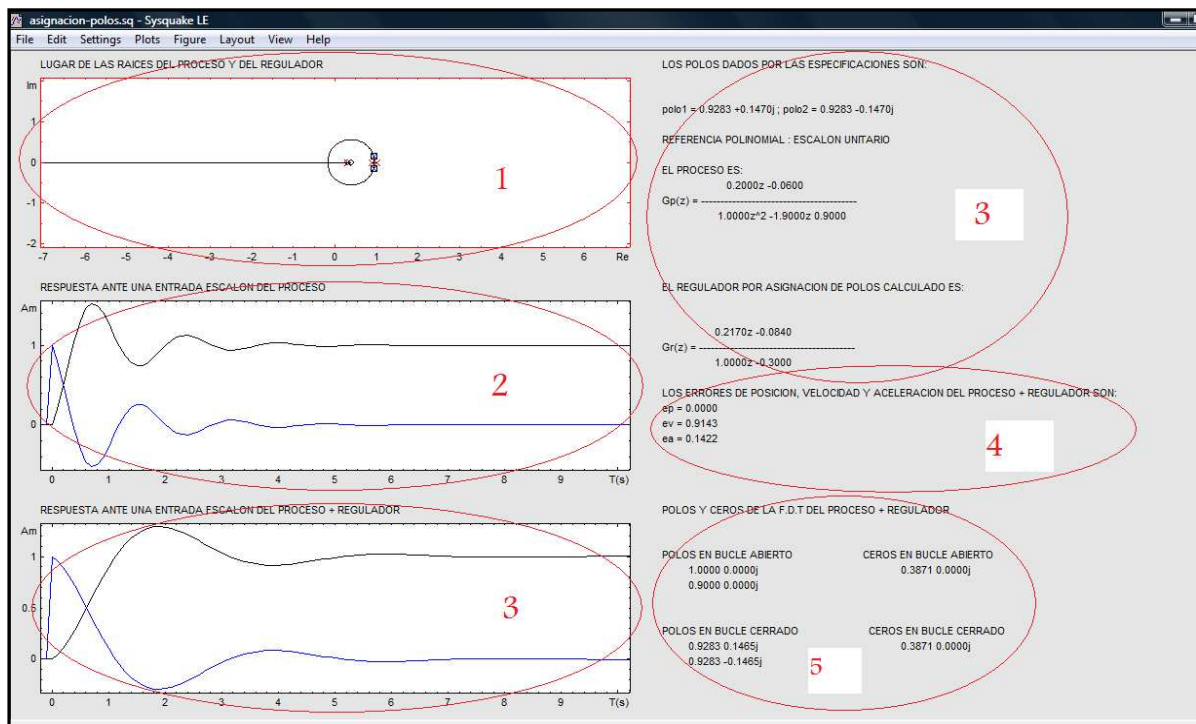


Figura 4. Módulo correspondiente a los reguladores de asignación de polos

A continuación se describen cada una de las partes del interfaz de la Fig. 4:

- El programa calcula el regulador de asignación de polos, obteniendo previamente los polos a asignar según las especificaciones y resolviendo el sistema dado en las ecuaciones (3). En el interfaz de la Fig. 4, el estudiante puede ver los polos asignados junto con el modelo discreto del proceso y la referencia polinomial considerada (parte (3) en la figura), el regulador calculado, junto con los errores en régimen permanente del sistema con el regulador (parte (4)), así como los polos en bucle abierto y bucle cerrado de $G_A(z) \cdot G_F(z)$ (parte (5)).
- En la parte izquierda del interfaz se muestra el lugar de las raíces del sistema con el regulador (parte (1)). Sobre este lugar de las raíces, el estudiante puede desplazar la posición de los polos y ceros del regulador diseñado, comprobando directamente el efecto de estos desplazamientos en la salida del sistema y la señal de control, que se muestran simultáneamente en la parte (3). Asimismo, en la parte (2) se muestra el comportamiento del sistema en bucle cerrado sin controlador, con el objetivo de que el estudiante compruebe el efecto de los reguladores diseñados.

Una vez realizado el diseño, es posible analizar la dinámica del sistema con el regulador usando el método del lugar de las raíces, de tal forma que es posible adaptar el diseño a las características y limitaciones de los equipos físicos disponibles.

4.2 Módulo de reguladores de tiempo mínimo y tiempo finito

Los reguladores discretos de tiempo mínimo se presentan en la asignatura como un caso particular de los reguladores de cancelación o de diseño directo en los cuales el objetivo es conseguir anular el error en régimen permanente en el mínimo número posible de periodos de muestreo [3]. El método de diseño de estos reguladores es directo: se plantea la función de transferencia en bucle cerrado $M(z)$ que debe seguir el sistema para que se comporte como uno de tiempo mínimo y a continuación se resuelve un sistema como el siguiente:

$$\begin{aligned} M(z^{-1}) &= z^{-d} \cdot B^{-1}(z^{-1}) \cdot M2(z^{-1}) \\ 1 - M(z^{-1}) &= (1 - z^{-1})^{m+1} \cdot A^{-1}(z^{-1}) \cdot M1(z^{-1}) \end{aligned}$$

donde $M1$ y $M2$ son polinomios incógnita. En el caso del diseño de reguladores de tiempo finito se modifica el planteamiento anterior incluyendo todos los ceros del sistema (de fase mínima y de fase no mínima, para intentar eliminar las oscilaciones ocultas en la medida de lo posible).

En la Fig. 5 se muestra la ventana principal correspondiente al módulo de reguladores de tiempo mínimo. A continuación se describen cada una de las partes del interfaz:

- En primer lugar se muestran las características del proceso a controlar (modelo discreto, retardo, polos y ceros fuera del círculo unidad, número de integradores y referencia a utilizar, parte (4)).
- A continuación se muestra el regulador de tiempo mínimo calculado a partir de la resolución del sistema (parte (5) del interfaz).
- En la parte (6) se muestran los polos y ceros del conjunto sistema-regulador calculado.
- En la parte izquierda se muestran las gráficas interactivas para el análisis del regulador. La parte (1) es el lugar de las raíces del conjunto sistema-regulador. Sobre esta gráfica el estudiante puede desplazar los polos y/o ceros del regulador, observando directamente el efecto sobre la salida del sistema y la señal de control (parte (3)). También es posible variar la ganancia del sistema (arrastrando los polos en bucle cerrado sobre las líneas del lugar de las raíces), comprobando igualmente el efecto sobre la salida y señal de control.
- También se muestra en la parte (2) la salida del sistema sin regulador.

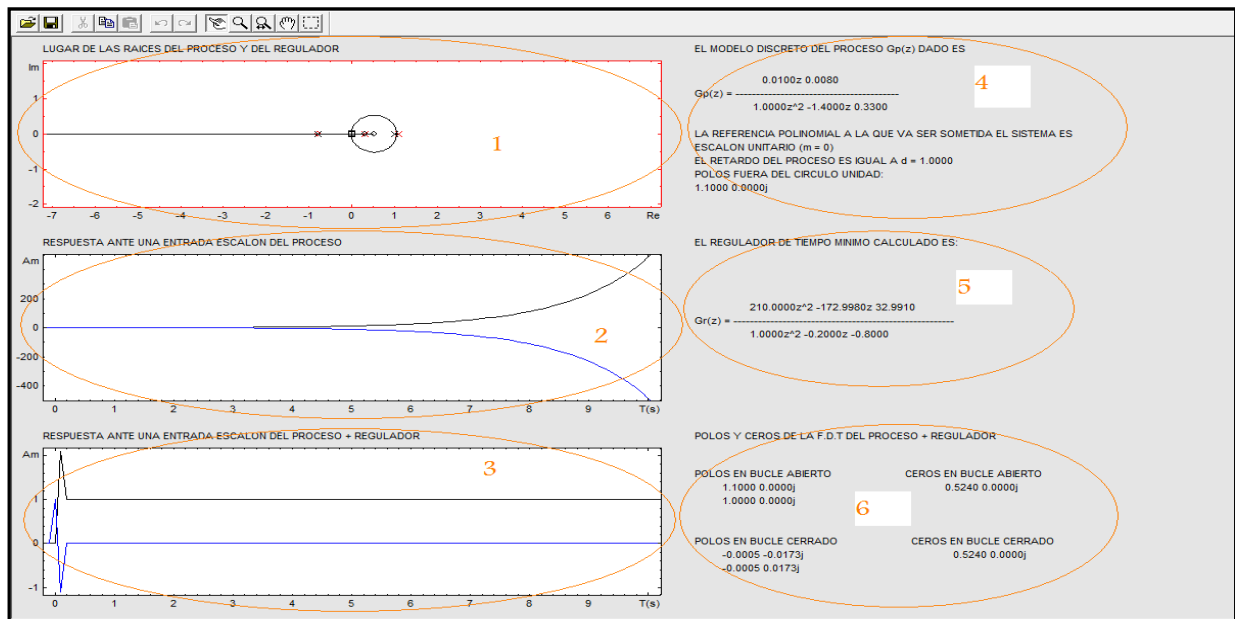


Figura 5. Módulo correspondiente al diseño de reguladores de tiempo mínimo

Con este interfaz resulta sencillo variar el diseño inicial del regulador de tiempo mínimo sobre el lugar de las raíces, de tal forma que puede verse el efecto que tiene sobre la salida del sistema una disminución, por ejemplo, de la ganancia que haría disminuir la magnitud de la señal de control y, en consecuencia, haría que el sistema ya no fuera estrictamente de tiempo mínimo. Sin embargo, observando la señal de salida puede comprobarse si el tiempo de establecimiento del sistema es lo suficientemente pequeño como para considerar aceptable el regulador de tiempo mínimo modificado. Los estudiantes pueden también observar el efecto sobre la salida del sistema al variar la posición de los polos y ceros del regulador de tiempo mínimo, que puede llevar a la eliminación de oscilaciones ocultas o a la disminución de la magnitud de la señal de control obteniendo un tiempo de establecimiento aceptable.

5. Experiencias de uso en el aula

La herramienta diseñada ha sido usada en la asignatura “Sistemas Electrónicos de Control” en la titulación de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sistemas Electrónicos de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Tradicionalmente, la docencia de esta asignatura se ha dividido en dos tipos de sesiones: sesiones teóricas junto con resolución de problemas (en aula de teoría) y sesiones de prácticas en laboratorio.

En las sesiones teóricas se exponen los métodos de análisis y diseño intercalando la resolución de problemas. Posteriormente, siguiendo la planificación anual del curso, se realizan prácticas de simulación y de control en tiempo real de maquetas de procesos reales. De esta forma se producía una separación en el tiempo desde que los alumnos estudiaban los métodos teóricos y la resolución de problemas hasta que veían una simulación de los conceptos estudiados.

Con la herramienta diseñada, esta separación temporal se acorta y ahora el profesor puede mostrar simulaciones en clase y adaptarlas al método concreto que se está explicando o al problema concreto que se está resolviendo. La experiencia con el uso de la herramienta en las sesiones teóricas ha demostrado las siguientes ventajas:

- Los estudiantes pueden entender con más facilidad los métodos de análisis, con lo que se consigue mayor motivación en las sesiones en las que se explican los métodos de diseño.
- Permite realizar “pausas” en las exposiciones teóricas durante las cuales los alumnos pueden interactuar con la herramienta, comprobar qué ocurre en casos extremos y casos particulares y comprobar los resultados de los problemas resueltos.
- Pueden preparar de una forma más efectiva las sesiones de laboratorio (en las que se usan, como ya se ha comentado, otras herramientas como Matlab). Debido a que los estudiantes ya han “visto” en las sesiones teóricas las simulaciones de muchos de los problemas resueltos, son capaces de leer los guiones de prácticas con una idea más clara de lo que se van a encontrar en el laboratorio.

6. Conclusiones

En el presente artículo se presenta una herramienta visual programada en Sysquake con el objetivo de presentar de forma intuitiva conceptos básicos de análisis y diseño en un curso introductorio de sistemas electrónicos de control. Con el uso de herramientas interactivas para el diseño de reguladores PID y algebraicos se pretende que los estudiantes puedan variar los parámetros de diseño de esos reguladores de una forma sencilla e interactiva.

Durante el uso de esta herramienta, se ha podido comprobar que es una opción muy válida para este tipo de cursos por las razones siguientes:

- Ocupa relativamente poco espacio en memoria en comparación con otros programas similares.
- La eficiencia del intérprete de información numérica permite que el tiempo de ejecución de los cálculos y el trazado de gráficos, sea satisfactorio.
- La versión libre de Sysquake LE (gratuita) no presenta limitaciones considerables con respecto a la comercial, lo cual permite que eventualmente los estudiantes puedan hacer uso de la herramienta fuera del laboratorio.
- Las aplicaciones escritas permiten una gran interactividad con el usuario y, lo más importante, es relativamente sencillo para el profesor introducir variaciones en el programa para adaptarse a las necesidades de sus alumnos.
- Al igual que en otras experiencias previas con herramientas interactivas [2, 4, 5], se ha comprobado que este tipo de programas contribuye a motivar a los alumnos y a incrementar su interés en los temas de control automático ya que hace mucho más intuitivo el aprendizaje de los conceptos teóricos.

Referencias

- [1] Calerga. *Sysquake 4 User Manual*, Lausanne, Switzerland: Calerga Sàrl [online], (2008)
<http://www.calerga.com>
- [2] Guzmán, J.L., Astrom, K.J., Dormido, S., Hägglund, T., Berenguel, M., Pignet, Y. *Interactive Learning Modules for PID Control*, *IEEE Control Systems Magazine*, October, pp. 118—134 (2008) [1] Astrom, K.J., Wittenmark, B. *Sistemas Controlados por Computador*. Paraninfo (1988)
- [3] Bernabeu, E.J., Martínez, M.A. *Diseño Algebraico de Controladores Discretos. Problemas Resueltos*. Universidad Politécnica de Valencia (1999)
- [4] Johansson, M., Gäfvert, M., Astrom, K.J. *Interactive tools for education in automatic control*, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 18, no.3, pp. 33—40 (1998)
- [5] Sánchez, J., Dormido, S., Esquembre, F. *The learning of control concepts using interactive tools*, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 13, no. 1, pp. 84—98 (2005)