

Uso de Software Interactivo como Facilitador para la Introducción Temprana de Conceptos de Control Robusto

Patricia Baldini^{1,2}, Guillermo Calandrini¹, Pedro Doñate¹, Héctor Bambill²,

¹ Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, FRBB, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
{pnbaldi, calandri, pdonate, hbambill }@criba.edu.ar

Resumen. En este trabajo se presenta una propuesta pedagógica en la que el empleo de una herramienta de CAD interactiva de libre disponibilidad sumada a una experiencia de laboratorio, posibilita la introducción de nociones avanzadas de incertidumbre y robustez en un curso de control clásico para ingeniería. Estos conceptos, normalmente ajenos a una materia introductoria de sistemas de control por su complejidad matemática y limitaciones de tiempo, son incorporados intuitivamente mediante el software SISO-QFTIT que utiliza la Teoría de Realimentación Cuantitativa como marco de diseño en el dominio frecuencial. Se logra articular de modo natural los fundamentos del control clásico y robusto. Con una interfaz gráfica amigable e interactiva se adapta a las habilidades propias del sujeto educativo actual, constituyéndose en una eficaz herramienta didáctica. La evaluación realizada muestra que la herramienta informática facilita la construcción de los conceptos asociados a las distintas etapas del proceso de diseño robusto.

Keywords: CAD de control, simulación interactiva, educación en control, control robusto.

1 Introducción

Como parte de la formación en las carreras de Ingeniería Eléctrica y Electrónica se incluye, promediando la carrera, una asignatura básica en la temática de control de sistemas. Este curso cubre contenidos clásicos de análisis y diseño de controladores en los dominios del tiempo y de la frecuencia para sistemas lineales modelados mediante función de transferencia. Por lo general, dentro de los temas tratados se deja de lado un aspecto importante, tanto desde el punto de vista práctico como conceptual, como lo es el tratamiento de la incertidumbre que surge naturalmente en el proceso de modelado y su consecuente problemática asociada a la estabilización y el control robusto. Las razones que justifican esta omisión se encuentran en la complejidad matemática asociada al marco teórico formal y en la dificultad de hallar un balance entre el tiempo requerido para su presentación, la claridad conceptual y su aplicabilidad en el contexto y nivel de un curso inicial. De manera similar, si se analiza la bibliografía moderna de introducción a los sistemas de control, si se contempla esta temática, se hace de un modo más bien tangencial a través de los conceptos de márgenes de estabilidad y sensibilidad paramétrica [3, 16, 17]. Como

consecuencia, el tema queda relegado para su tratamiento en cursos muy específicos, frecuentemente de carácter optativo, y en muchos casos de posgrado. El resultado concreto es que, en la construcción cognitiva de los alumnos se afianza la idea de que la obtención de un modelo único y perfectamente definido no solo es posible sino también suficiente a los efectos de su control.

En este trabajo se presenta una experiencia didáctica diseñada para introducir tempranamente los conceptos de incertidumbre y robustez, sustentada por un software CAD de uso libre, interactivo y con una interfaz gráfica amigable e intuitiva. Este software, denominado SISO-QFTIT [4] conduce al diseño de un controlador robusto basado en la Teoría de Realimentación Cuantitativa o QFT a partir de sus siglas en inglés [12,13]. Esta teoría es particularmente accesible y permite articular de manera directa y sencilla los conceptos del control clásico con los de incertidumbre de modelo y robustez proporcionando además un procedimiento de diseño transparente, versátil y práctico. Dadas las habilidades que naturalmente tienen incorporadas los alumnos en el manejo de dispositivos portátiles, la interfaz gráfica del programa es asimilada en forma inmediata no requiriendo tiempo de aprendizaje en este sentido.

La propuesta se implementa en un primer curso de control realimentado para la carrera Ingeniería Electrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur. El tema se aborda de una manera completamente práctica a través de una experiencia en laboratorio donde se trabaja sobre un típico sistema de control de posición. La metodología didáctica adoptada se sustenta en el paradigma de aprendizaje basado en el descubrimiento y el trabajo colaborativo,

Los resultados de la experiencia se evaluaron mediante una encuesta realizada al final del curso, que evalúa la percepción propia de los alumnos en cuanto a los objetivos pedagógicos planteados, mostrando lo favorable de la iniciativa. Se resalta también la importancia que un software de uso libre puede tener como herramienta didáctica para facilitar la introducción temprana de conceptos relevantes en el área del control realimentado, sin necesidad en esta etapa de recurrir a complejos desarrollos teóricos. Se comprueba que este tipo de software constituye un aliado importante en la enseñanza que debería extenderse a otras áreas de la ingeniería.

En la sección 2 se resumen muy brevemente los conceptos básicos de control cuantitativo robusto. En la sección 3 se presenta el software de diseño utilizado, se detallan las características relevantes que justifican su elección comparando al mismo con otras opciones posibles tanto desde el punto de vista funcional como didáctico. En la sección 4 se describe la experiencia realizada junto con una breve descripción del sistema físico sobre el cual se realizaron las mediciones y validación de los resultados. En la sección 5 se detallan, a modo de ejemplo, un conjunto de resultados típicos obtenidos a partir del software y los resultados de la encuesta realizada y finalmente, en las secciones 6 y 7, se presentan resultados y conclusiones.

2 Fundamentos de la Teoría de Realimentación Cuantitativa

La Teoría de Realimentación Cuantitativa es una técnica práctica de diseño robusto de controladores en el dominio de la frecuencia basado en el modelo de función

transferencia. Reinterpreta las ideas de Bode del control clásico, llevándolas a una forma cuantitativa reforzando la idea de que la realimentación es necesaria en función de la existencia de incertidumbre en el modelo de la planta o por la presencia de perturbaciones no medibles actuando sobre la misma [8,9,12,13].

El objetivo de QFT es la síntesis de un controlador lo más simple posible y con ancho de banda mínimo, en base a una función transferencia nominal. Este controlador debe garantizar que se satisfagan las especificaciones del sistema cualquiera sea la planta dentro del conjunto posible determinado por la incertidumbre, aún en presencia de posibles perturbaciones.

El esquema de control realimentado contemplado en QFT incluye dos posibles grados de libertad según el esquema de la Fig. 1. Con el controlador, $G(s)$, en el lazo cerrado se logra cumplir con las especificaciones de robustez, mientras que el precompensador, $F(s)$, permite ajustar la respuesta en frecuencia deseada.

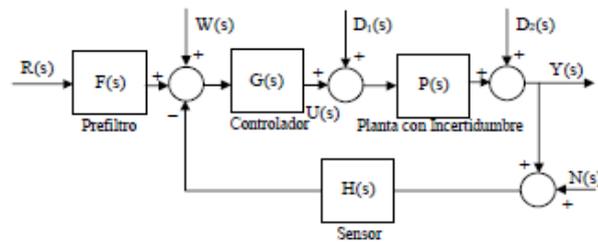


Fig 1: Esquema de control con dos grados de libertad .

Para la planta $P(j\omega)$, se define su *template* como el conjunto de respuestas en frecuencia posibles asociadas a la variación de los parámetros inciertos dentro de rangos definidos. Tanto los *templates* como las especificaciones cuantitativas de estabilidad, comportamiento temporal y rechazo de perturbaciones son trasladadas a un conjunto de curvas representadas en un diagrama polar denominado carta de Nichols. Estas curvas conocidas como contornos o *bounds*, permiten continuar con el proceso de diseño en base a la planta nominal y sirven de guía para la determinación de la función transferencia de lazo abierto nominal, $L_0(j\omega) = P_0(j\omega) G(j\omega)$, mediante la introducción sucesiva de ganancia, polos y ceros en el controlador $G(j\omega)$.

El controlador se sintetiza de modo de lograr que la curva de $L_0(j\omega)$ en la carta de Nichols se ajuste lo más posible a los *bounds* para cada frecuencia de interés, resultando en la minimización de la ganancia de alta frecuencia. Si $L_0(j\omega)$ satisface las restricciones, se garantiza que también lo harán todas las funciones de lazo correspondientes a las plantas del *template*.

Todas las etapas del diseño admiten su correlación gráfica de modo que su aprendizaje es ameno y con alto contenido formativo [6,7,11,14].

3 Criterio de Selección y Características del Software de Diseño

La construcción de las estructuras lógicas y formales propias de la teoría de control debe ser acompañada fuertemente por aspectos intuitivos y estrategias que forman

parte del conocimiento experto y resultan muy difíciles de poner en evidencia para que sean asimilados por los alumnos. Las herramientas de software accesibles a través de Internet resultan de gran estímulo para desmitificar conceptos matemáticos abstractos e involucrar más activamente a los alumnos en su propio proceso de aprendizaje. Actualmente, diversos paquetes de software específicos proporcionan una alternativa interesante.

Desde el punto de vista pedagógico, al considerar la incorporación de software de diseño robusto en el marco de QFT, se puede distinguir dos estrategias [6] :

-su empleo como herramienta auxiliar, donde se encara el diseño contemplando dos etapas. La primera es la síntesis o determinación de los valores del conjunto de parámetros de diseño, mientras que la segunda es el análisis o validación de resultados obtenidos en relación a las especificaciones. Esto comúnmente conduce a una nueva iteración en un procedimiento de prueba y error que puede resultar bastante tedioso.

-su utilización como herramienta interactiva, donde se combinan ambas etapas y los efectos del cambio de los parámetros del controlador son presentados en forma inmediata. En esta aproximación, el diseño se torna realmente dinámico permitiendo al usuario percibir el modo en que cada uno de los elementos que está modificando influye en el comportamiento del sistema. Esto permite orientar el diseño en la dirección de hallar un compromiso aceptable entre todos los requerimientos, generar un criterio intuitivo relacionado con el conocimiento experto, e identificar rápidamente si las especificaciones pueden o no ser satisfechas.

En general, en el campo del control automático MATLAB® representa la herramienta de software mas difundida ya que provee una gran variedad de funciones de librería o *toolbox* que implementan las diversas técnicas usadas en control, así como también, una interfaz gráficas de usuario (GUI). Existen en la actualidad diferentes herramientas de CAD orientadas a facilitar la resolución de las diferentes etapas de la metodología QFT implementadas en MATLAB [1,2,10,15]. Estas proveen un conjunto de funciones o *toolbox*, o incorporan gráficos interactivos basados en la interfaz gráfica de usuario (GUI). En el primer caso, el más versátil, los usuarios deben tener algún conocimiento básico del lenguaje de programación específico ya que es necesario reescribir líneas de código para resolver cada problema particular. En el segundo caso, mas estructurado, las funciones se ejecutan directamente, ingresando los datos requeridos en los campos disponibles para comenzar el cómputo. Dentro de las herramientas mas difundidas y completas se mencionan los *toolboxes QFT Frequency Domain Control* (FDCDT) de tipo comercial [2] y *QFT Control* (QFTCT) de libre acceso [10] . De todos modos, en la primera el grado de interactividad es algo limitado y, en ambos caso, se requiere de la instalación de MATLAB, lo que implica contar con una licencia muy costosa.

Por otra parte, en el campo del software de distribución gratuita se encuentra disponible SISO-QFTIT [4,5] (Single Input Single Output Quantitative Feedback Theory Interactive Tool) caracterizada por su alta interactividad en cada etapa del proceso y su facilidad de uso [5]. La operación directa con el puntero del mouse sobre los diferentes elementos presentes en la ventana de aplicación permite interconectar visualmente sus consecuencias.

Desarrollada en ambiente *Sysquake* [19], se presenta en forma de archivo ejecutable bajo sistema operativo Windows y Mac proporcionando alta portabilidad.

Su uso facilita tanto la comprensión de los conceptos básicos involucrados en la metodología tratada como el desarrollo de las habilidades fundamentales de diseño y el sustento para la base teórica necesaria. Los efectos de cada acción del usuario introducida por pantalla durante el proceso de diseño, se reflejan en cambios inmediatos de todas las figuras de la ventana gráfica, respondiendo al concepto de *dynamics pictures* [14,20].

Una limitación de este software es que está restringido a sistemas con una entrada y una salida y en el tipo de parámetros inciertos admisibles. También puede mencionarse que la calidad de los gráficos es menor que la de otros casos. De todos modos, se ajusta perfectamente a los objetivos planteados.

4 Metodología Implementada

Se plantea el problema de diseñar un sistema de control de posición a partir de un motor de corriente continua de imanes permanentes (Fig. 2)[8]. Con este objetivo cada grupo de estudiantes seleccionan los componentes disponibles; reconocen las leyes físicas implicadas para determinar la estructura del modelo y diseñan los experimentos necesarios para la identificación de sus parámetros. La dispersión natural en los resultados permite introducir el concepto de incertidumbre estructurada y la dispersión dentro del espacio paramétrico se establece en base al intercambio de resultados entre grupos de trabajo. Queda en claro el hecho práctico de que el modelo es solo una aproximación del sistema físico de modo que no es posible determinar valores exactos.

Las limitaciones del sistema adoptado como tensiones máximas admisibles en la alimentación del motor, torque máximo, etc., conducen a determinar el conjunto de especificaciones de funcionamiento. La estructura del controlador adoptada es la clásica del PID que permite la comparación con los resultados de técnicas convencionales de diseño. En este punto, se plantea el cuestionamiento sobre la influencia de la incertidumbre del modelo en los resultados esperados y la posibilidad de incluirla en el proceso de diseño. Como una alternativa válida en esa dirección, se presenta la metodología enmarcada en QFT que conduce a un controlador robusto.

El modelo adoptado es de segundo orden con una función transferencia dependiente de dos parámetros: la ganancia y un polo real ($K \approx [135, 224]$, $p \approx [4.5, 8]$). Como guía en la resolución del problema se plantean las siguientes tareas:

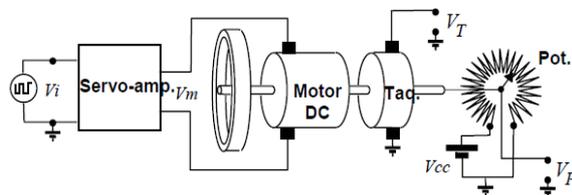


Fig.2: Esquema del sistema de control de posición a lazo abierto
- Definir el modelo de incertidumbre paramétrica.

- Determinar el rango de frecuencias de interés.
- Determinar la planta nominal y generar los *templates* con SISO-QFTIT
- Traducir las especificaciones del dominio tiempo al de la frecuencia.
- Analizar la necesidad de restricciones para tener en cuenta estabilidad, esfuerzo de control, rechazo de perturbación y considerar restricciones en la señal de control para evitar saturación del servoamplificador y la fricción estática en el motor.
- Generar los *bounds* y su intersección (usar herramienta de CAD SISO-QFTIT)
- Sintetizar el controlador PID del lazo (loop-shaping) con el software interactivo.
- Simular los resultados
- Considerar la opción de ajustar las restricciones.
- Validar el diseño en el laboratorio.

5 Ejemplo de Posibles Resultados Gráficos

La metodología QFT está implementada en distintas etapas:

Etapla 1: Ingreso del modelo y generación de los *templates*

En la primera ventana, el usuario define la planta nominal mediante la ubicación gráfica de polos y ceros, la incertidumbre de sus elementos y frecuencias de trabajo. Inmediatamente se muestran los *templates*. (Fig. 3)

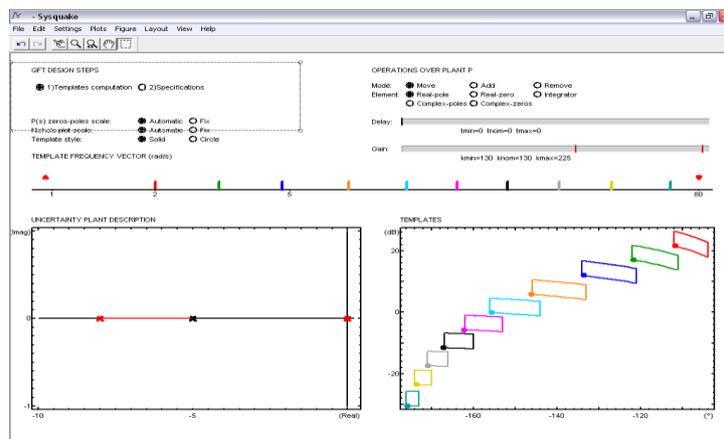


Fig. 3: Ventana de Inicio: definición del modelo y generación de *templates*

Etapla 2: Especificaciones en frecuencia.

Se selecciona y configura el tipo de especificaciones diseño entre seis opciones posibles junto al rango de frecuencias en que se debe cumplir cada una. En forma automática se generan los *bounds* asociados, pudiendo ser visualizados en forma individual, conjunta o intersectados, según se observa en la Fig. 4.

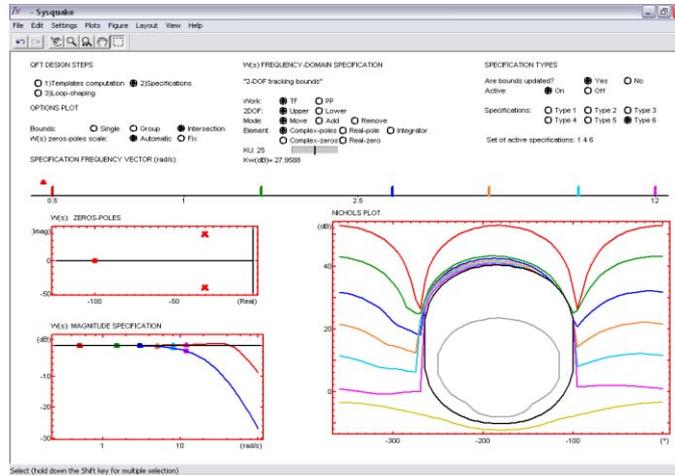


Fig. 4. Ventana: generación e intersección de *bounds*

Etapas 3: Síntesis del controlador o *Loop shaping*

En esta ventana (Fig. 5) se realiza la síntesis del controlador en base a su función transferencial y sobre la carta de Nichols. Se ingresan gráficamente los elementos componentes (ganancia, polos y ceros) con la inmediata visualización de su efecto sobre la respuesta en frecuencia de lazo abierto. En este caso se utilizó una estructura PID convencional. De ser necesario, el ajuste final puede lograrse con un prefiltro en una etapa opcional.

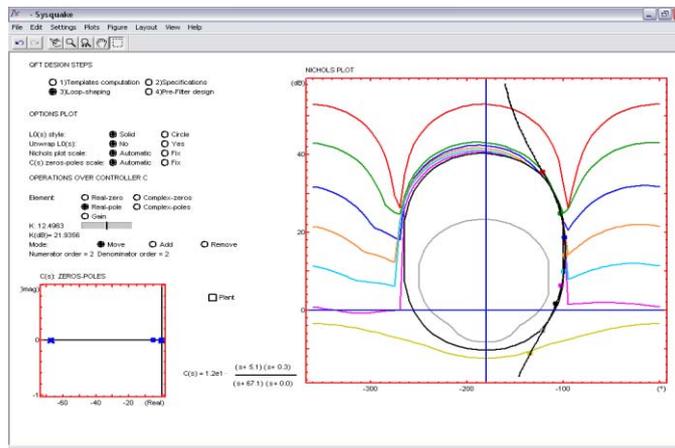


Fig. 5. Ventana: diseño del controlador sobre el gráfico de Nichols

Etapas 4: Validación del diseño

La ventana final muestra los gráficos logrados al incluir el controlador en el lazo y el posible prefiltro. Se pone en evidencia el grado de cumplimiento de las

especificaciones con las curvas representativas en tiempo y frecuencia. En cada gráfico se incluyen los peores casos resultantes teniendo en cuenta la incertidumbre paramétrica y los límites fijados por las especificaciones (Fig. 6).

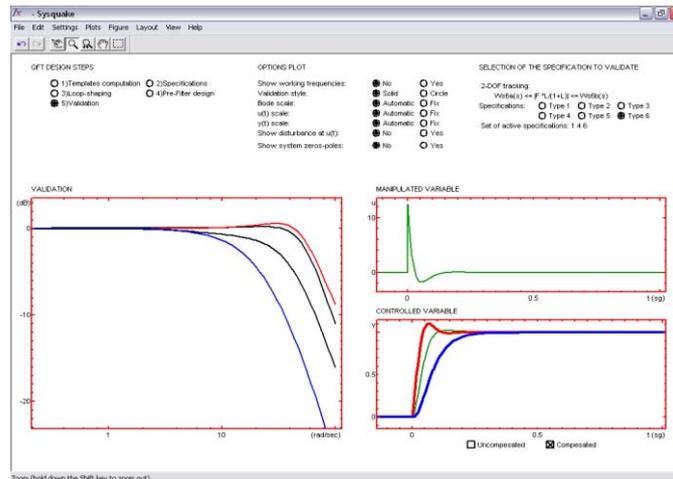


Fig. 6: Verificación de especificaciones con el controlador diseñado y el posible pre-filtro

6 .Resultados Obtenidos

La experiencia se desarrolló con diez alumnos que optaron por esta metodología integrando tres grupos de trabajo. Los resultados obtenidos se evaluaron desde la óptica de los alumnos mediante una encuesta de percepción realizada al finalizar la experiencia, con los siguientes resultados:

- 100% detecta la incertidumbre y la dispersión en los resultados de los valores experimentales.
- 50% considera que esta incertidumbre puede afectar al rendimiento del sistema y debe ser tenido en cuenta en el diseño.
- 30% considera que el desajuste entre el modelo y el sistema es una consecuencia de los efectos no lineales y otros errores de modelado y no necesariamente debido al ruido asociado a las medidas.
- 70% considera que resulta significativo tener en cuenta la incertidumbre en el proceso de diseño.
- 100% considera que el paquete de software QFT es intuitivo y fácil de usar.

Por otra parte, desde el punto de vista formativo y según la la opinión de los docentes, se reconocen los siguientes avances:

- Mediante el paradigma del aprendizaje por descubrimiento, los alumnos reconocen la incertidumbre propia de todo proceso de modelado y la asocian en este caso a una dispersión en la determinación de los parámetros del modelo.

- Se introduce naturalmente una metodología robusta, conceptualmente sencilla y básicamente gráfica, que amplía la visión de los alumnos en cuanto a las limitaciones propias del control clásico.

- Se orienta el aprendizaje hacia un conocimiento experto.

- Los alumnos observan que el diseño robusto, no necesariamente óptimo, se comporta bien cumpliendo las especificaciones de comportamiento requeridas sobre toda la gama de posibles variaciones, siempre que esas especificaciones sean razonables teniendo en cuenta los componentes del sistema.

- Motivados por una "necesidad de conocer" los estudiantes atribuyen valor y significado a su proceso de aprendizaje, se comprometen en las diferentes tareas así como en la comprensión de las ideas que las sustentan.

7 Conclusiones

En este trabajo se describió una experiencia didáctica en la que se conjugan una experiencia de laboratorio y una herramienta de CAD interactivo como facilitador para la introducción, en un curso de control clásico, de modelado con incertidumbre y el consecuente diseño robusto.

La metodología presentada permite una mayor independencia y compromiso del alumno con su propio proceso de aprendizaje y está centrada en las competencias que debe proveer la asignatura de control. Se favorece el desarrollo del aprendizaje autónomo, fortaleciendo la habilidad para evaluar herramientas de diseño, apreciar las limitaciones de un modelo, incorporar los conceptos de incertidumbre y *loop-shaping*.

La teoría del control clásico sirve de base suficiente para la comprensión de QFT, haciendo viable su incorporación en tiempos razonable.

En las diferentes etapas del proceso el nivel de interactividad de SISO-QFTIT garantiza un mayor y más rápido nivel de entendimiento de la temática de control robusto, combinando las fases de análisis y diseño. Se pone en evidencia mediante la percepción visual en qué dirección variar los parámetros para lograr los objetivos y la correspondencia entre los dominios de la frecuencia y el tiempo .

El uso de un sistema sencillo y la herramienta de CAD adoptada conforman una propuesta didáctica motivadora que mejora la rápida comprensión de las etapas del diseño y de los conceptos que lo sustentan. La experiencia obtenida sobre sistemas simples puede ser fácilmente generalizada a situaciones más complejas, y permite un conocimiento intuitivo de los formalismos matemáticos subyacentes.

Por otro lado, se crea conciencia en relación a la importancia de la existencia de software de libre distribución y su incorporación a la enseñanza, teniendo en cuenta el alto costo de los comerciales de uso frecuente en control, muchas veces inaccesible para la Universidad pública.

References

1. Barreras, M., Vital, P. y García-Sanz, M.: Interactive tool for easy robust control design. Proc. of the IFAC Internet Based Control Education , Madrid (España),pp: 83-88 (2001)

2. Borghesani,C., Chait,Y. and Yaniv,O. : Quantitative Feedback Theory Toolbox for use with MATLAB. The MathWorks Inc, Natick, MA, (1995).
3. Dorf, R.C., Bishop, R.H.: Modern Control Systems, Chapter 12, 12th Ed., Prentice Hall, New York. (2010)
4. Díaz, J.M., Dormido, S., Aranda, J. <http://ctb.dia.uned.es/asig/qftit/principal.html>, UNED (2004)
5. Díaz, J.M., Dormido, S. y Aranda, J.: An Interactive Software tool to learn robust control design using the QFT methodology. (2007)
6. Dormido, S. ; The role of interactivity in control learning, Int. Jou. Engin. Ed. 21(6) pp. 1122-1133 (2005)
7. Dormido, S., Gordillo, F., Dormido Canto, S. y Arancil, J.: An interactive tool for introductory nonlinear control systems education. 15th IFAC World Congress. Barcelona, España. (2002)
8. García Sanz, M.: Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Applications. Educational Notes RTO-En-SCI-166, pp.1-44 (2006)
9. García Sanz, M.: Control Robusto Cuantitativo QFT: historia de una idea. RIAI.2 -3. pp. 25- 38 (2005)
10. Garcia-Sanz, M., Mauch, A. and Philippe, Ch.: The QFT Control Toolbox (QFTCT) for Matlab, CWRU, UPNA and ESA-ESTEC, Version 3.31, November (2012) <http://cesc.case.edu/OurQFTCT.htm>
11. Guzman, J.L., Costa Castelló, R., Dormido, S. y Berenguel, M.: Study of fundamental control concepts through interactive learning objects. 18th IFAC World Congress. Milán. Italia pp. 7286-7291 (2011)
12. Horowitz, I.M.: Quantitative Feedback Design Theory-QFT, QFT Publishers, Denver (1993)
13. Houpis, H., Rasmussen, S.J. y García Sanz, M.: Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications, 2da. Ed, CRC Press, Florida (2006)
14. Johansson M., Gäfvert, M. y Åmtröm, K.J.: Interactive Tools for Education in Automatic Control. IEEE Control Systems Magazine. 18(3), pp. 33-40 (1998)
15. Nandakumar , R.and Halikias, G. D.: A new educational software tool for robust control design using the QFT method. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control . Maui, (Hawai USA),pp. 803 -808 (2003)
16. Ogata, K. : Ingeniería de Control Moderna, Cap. 10, 4ta. Ed. , Prentice Hall, Madrid.(2011)
17. Paraskevopoulos, P.N.: Modern Control Engineering, Ch 15, Marcel Dekker. New York.(2002)
18. Perrenet, J.C., Bouhuijs, P.A.J. & Smits, J.G.M.M.: The suitability of problem based learning for engineering education: theory and practice. Teaching in higher education, 5, 3, pp. 345-358. (2000)
19. Piguet, Y. : SysQuake: User's manual. Calerga. Lausanne Federal Polytechnic School Automatics Institute (1999) www.calerga.com/products/Sysquake
20. Wittenmark, B. Häglund, H. y Johansson M.: Dynamic pictures and interactive learning, IEEE Control Systems Magazine. 18(3), pp. 26-32 (1998)