

Metodologías para Loopshaping Automático en QFT

Pedro Doñate⁽¹⁾, Patricia Baldini^(1,2), Guillermo Calandrini⁽¹⁾, Hector Bambill⁽²⁾

⁽¹⁾Dpto. de Ing. Eléctrica y de Computadoras / Universidad Nacional del Sur

⁽²⁾Dpto. de Electrónica / Fac. Reg. B. Blanca / Universidad Tecnológica Nacional

Av. Alem 1253 – Bahía Blanca, 0291-4595101 ext. 3313

pdonate@uns.edu.ar – pnbaldi@frbb.utn.edu.ar

Resumen

Se presenta una línea de investigación para el desarrollo y utilización de algoritmos y software específico en aplicaciones de control automático de sistemas que aborda dos aspectos. Por un lado, la metodología conocida como *loop-shaping* automático para el diseño de controladores robustos mediante la teoría de realimentación cuantitativa (QFT). Este procedimiento involucra un proceso de optimización con restricciones, y requiere de un análisis de las técnicas actuales, un estudio comparativo y la evaluación y propuesta de enfoques alternativos. Se apunta al desarrollo de algoritmos y software para automatizar el proceso de síntesis de los controladores, considerando que no existen resultados o productos concluyentes en este sentido. Por otro lado, se desarrolla una propuesta pedagógica para introducir nociones avanzadas de incertidumbre y robustez en los cursos de control clásico para ingeniería. La implementación se hace a través de una experiencia de laboratorio y utilizando un software de CAD interactivo y de libre disponibilidad. Se pretende incorporar conceptos relativamente complejos de manera intuitiva articulando los fundamentos del control clásico y robusto, explotando las habilidades propias del sujeto educativo actual y fomentando la utilización de

software libre y el autoaprendizaje tutorado.

Palabras clave: Algoritmos para diseño QFT, Educación en Control, CAD de uso libre.

Contexto

Esta línea de investigación, para el desarrollo de algoritmos y aplicación pedagógica en la enseñanza de control automático, se inserta en el proyecto general e interinstitucional “Metodologías para Loopshaping Automático en QFT” (Cód. INN 1852) que se desarrolla en la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional (FRBB-UTN). El proyecto fue sometido a evaluación externa y resultó homologado por Disposición 111/2013 estando bajo la supervisión de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la mencionada FRBB-UTN que también financia el proyecto.

El mismo se desarrolla con la participación conjunta de investigadores del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur (DIEC-UNS) y de la FRBB-UTN.

Introducción

La línea de investigación, tanto en lo relacionado con el desarrollo de

algoritmos técnicos como en los aspectos pedagógicos está sustentada por la Teoría de Realimentación Cuantitativa o QFT a partir de sus siglas en inglés.

En aplicaciones de diseño de sistemas control clásico es común utilizar un modelo paramétrico de la planta, con una estructura fija, para la sintonización de los parámetros del controlador. En la práctica, el ruido de medición junto con las no linealidades de los componentes conducen a la determinación de rangos posibles para los parámetros y no valores fijos determinados, imponiendo limitaciones a los métodos de diseño basados en un modelo fijo. QFT es una técnica que supera estas limitaciones contemplando para el diseño las incertidumbres presentes en el modelo.

La teoría de realimentación cuantitativa fue concebida hace unos cincuenta años por Horowitz [1], [2] como una técnica de diseño en el dominio de la frecuencia y reinterpreta las ideas de Bode llevándolas a una forma cuantitativa. El objetivo es la síntesis de un controlador lo más simple posible con ancho de banda mínimo que satisfaga las especificaciones cualquiera sea la planta dentro del conjunto posible determinado por la incertidumbre.

La caracterización de la planta se realiza mediante un conjunto de respuestas en frecuencia posibles asociadas a las variaciones paramétricas y se denominan *templates*. Por otro lado las especificaciones cuantitativas de estabilidad, comportamiento temporal y rechazo o atenuación de perturbaciones se representan por un conjunto de curvas en el diagrama de Nichols. Estas curvas, denominadas contornos de Horowitz-Sidi o *bounds*, sirven de guía para la determinación de la función transferencia del controlador sobre un rango de frecuencias finito preespecificado [4].

En este contexto, distintos aspectos de esta técnica admiten el desarrollo de automatismos y algoritmos para facilitar el procedimiento de diseño del controlador y las líneas de investigación del proyecto abordan esta temática. Por un lado la determinación de los mencionados *templates* a partir de experiencias de identificación o curvas de comportamiento es un procedimiento no trivial que está siendo estudiado, y que constituye un paso imprescindible para lograr un diseño aceptable. Por otro lado, establecidos los *bounds* a partir de los *templates* y de las especificaciones de comportamiento, se debe determinar el controlador. Esta determinación no es única y nuevamente admite distintos grados de automatismo, optimización y la elaboración de diversos algoritmos que aborden este proceso. Esta etapa del diseño suele denominarse *loop-shaping* e involucra un proceso de optimización con restricciones no convexa. En una primera instancia se ha avanzado en una metodología que se enmarca dentro de la categoría de los algoritmos que buscan una solución óptima sobre un conjunto denso de controladores preestablecido [5, 6, 8, 13].

Dentro de esta misma línea de investigación se incluye una aplicación pedagógica que apunta a introducir conceptos sobre incertidumbre y robustez en los cursos clásicos e iniciales de control automático en las carreras de Ingeniería, en particular Electrónica y Electricista.

Como parte de la formación en las carreras de Ingeniería Electricista 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. 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. Como consecuencia, el tema queda relegado para su tratamiento en cursos muy específicos, frecuentemente de carácter optativo o 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.

Esta línea de trabajo aborda el diseño de experiencias didácticas 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 [3, 9, 12]. Este software conduce al diseño de un controlador robusto basado en la mencionada Teoría de Realimentación Cuantitativa. El enfoque resulta 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.

La experiencia apunta a explotar las habilidades que naturalmente tienen incorporadas los alumnos en el manejo de dispositivos portátiles, permitiendo que la interfaz gráfica del programa de diseño

sea asimilada en forma inmediata no requiriendo prácticamente tiempo de aprendizaje en este sentido.

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 y entre los objetivos se incluye fomentar el desarrollo y utilización de software libre y la extensión de esta metodología a distintas áreas en la educación de ingeniería.

Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación

Las líneas de investigación y desarrollo contempladas en el proyecto abordan dos aspectos relacionados con la temática “Metodologías para Loopshaping Automatico en QFT”:

Aspectos teóricos y prácticos del diseño QFT

- Estudio del estado del arte sobre automatización de loop-shaping para QFT.
- Estudio teórico de las restricciones de control obtenibles para sistemas SISO.
- Identificación de las principales características de un diseño experto mediante loop-shaping.
- Estudio de la influencia sobre el diseño de las representaciones de los *bounds* impuestas por la incertidumbre del modelo y de las especificaciones de estabilidad y comportamiento temporal.
- Comparación de distintas técnicas y algoritmos para realizar loopshaping.
- Aplicación a sistemas con diferentes niveles de requerimientos.

- Desarrollo y/o aplicación de algoritmos para búsqueda óptima del controlador.

Experiencias Didácticas Utilizando QFT

- Estrategias para la introducción temprana de conceptos de control robusto en cursos de grado.
- Desarrollo de experiencias prácticas y de laboratorio en control robusto.
- Aplicación de software libre, desarrollado a tal fin o disponible como herramienta facilitadora en la enseñanza de control robusto.

El proyecto en general apunta a generar la base de conocimiento necesaria para abordar el tema puntual propuesto, desarrollar algoritmos y software específico con aplicación en la industria y en el ámbito académico con fines educativos. En particular se profundizará en las distintas etapas asociadas al desarrollo de algoritmos evolutivos, como sobrecruzamiento, mutación y selección, así como su efectividad para la determinación de controladores óptimos.

Ambas líneas prevén la difusión y publicación de los resultados y la aplicación práctica a distintos sistemas de uso industrial y a equipos de laboratorio para fines didácticos.

Resultados y Objetivos

El proyecto ha evolucionado de manera satisfactoria obteniendo resultados en los dos aspectos de la línea de investigación ya descripta.

Se avanzó en el estudio y análisis de diferentes estructuras de controladores, comparando resultados publicados de otras metodologías con los de QFT. Esto con el objetivo de desarrollar propuestas de diseño combinadas y hacer estudios de aplicaciones a sistemas de interés industrial, [11, 14, 16]. Entre los objetivos futuros, se pretende seguir avanzando en esta línea de trabajo y

realizar experiencias en tiempo real. En particular, profundizar en las técnicas basadas en algoritmos de optimización, tales como convexos, no convexos y algoritmos evolutivos, y las basadas en el cálculo de un conjunto denso de controladores a partir del cual determinar la solución óptima. Actualmente se trabaja en sistemas SISO, previendo en el futuro incorporar sistemas MIMO.

Por otro lado, en temáticas que involucran la enseñanza de la disciplina control, se diseñó un proyecto de enseñanza y se realizó una experiencia práctica con buenos resultados. Se pretende ofrecer al alumno la posibilidad de un aprendizaje en temas avanzados de control, no incluidos en la curricula regular mediante la metodología del autoaprendizaje tutorado y la indagación y con el soporte de software libre específico en esta temática [7, 10, 15].

Como objetivos futuros se continuará con el desarrollo de esta experiencia y su perfeccionamiento, mejorando la evaluación estadística de los resultados, desarrollando y perfeccionando las herramientas informáticas específicas y evaluando la extensión de esta metodología a otras asignaturas.

Formación de Recursos Humanos

Se trata de un proyecto interinstitucional y consecuentemente el equipo de trabajo está conformado por docentes-investigadores de las dos instituciones intervinientes. Participan dos investigadores de la FRBB-UTN y dos del DIEC-UNS. El proyecto involucra también tres becarios alumnos. Dos de ellos con becas de Investigación para Alumnos de Grado, otorgadas por la Secretaría de Asuntos Estudiantiles (SAE) de la UTN. El tercero con beca de CyT de la Secretaría asociada también otorgada por la UTN. En todos los casos

becas están destinadas a incentivar la participación de los alumnos en proyectos de investigación y deben desempeñarse en proyectos de I+D homologados. Es intención que los becarios adquieran destreza en el uso de herramientas computacionales, software específico y se compenetren en la metodología de trabajo asociada a las tareas de investigación científica. Participan en particular en el desarrollo y aplicación de los algoritmos de *loop-shaping*. Los resultados pueden ser aplicados en sus respectivos proyectos finales de carrera (tesinas) que desarrollan en temáticas afines.

Referencias

- [1] Horowitz, I.M. “Fundamental theory of linear feedback control systems”. *Trans. IRE on Automatic Control*, **AC-4**, 5-19 .1959.
- [2] Horowitz, I.M. *Quantitative Feedback Design Theory-QFT*, QFT Publishers, Denver. 1993.
- [3] Dormido, S “The role of interactivity in control learning”, *Proc. IFAC Symposium ACE*, Finlandia. 2003.
- [4] García Sanz, M. “Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Applications”. *Educational Notes RTO-En-SCI-166*, 1-44. 2006.
- [5] Li Meng and Dingyu Xue. “Automatic loop shaping in fractional-order QFT controllers using particle swarm optimization”. *IEEE International Conference on Control and Automation*, ICCA 2009. 2182 – 2187. 2009
- [6] Aladaglı I., Hamer A., Steinbuch M., Angelis G. “Towards Automated Loop-Shaping in Controller Parameter Space”. *American Control Conference*, Baltimore, MD, USA, 1880-1885, 2010.
- [7] Baldini P., Bambill H., “Diseño de Controladores Cuantitativos Robustos Mediante Software Libre: Una Propuesta Didáctica”, *Los Métodos Numéricos en la Enseñanza, la Ingeniería y las Ciencias – EMNUS 2010*. UTN-FRHaedo. Bs. As. 2010.
- [8] Mukesh D. Patil, Kausar R. Kothawale “Design of Robust PID Controller for Flexible Transmission System Using Quantitative Feedback Theory (QFT)”. *Advances in Computing, Communication and Control Communications in Computer and Information Science*. **Vol. 125**, 479-485, 2011.
- [9] Guzman J. L., Costa-Castelló R., Dormido S., Berenguel M. “Study of fundamental control concepts through interactive learning objects” *18th IFAC World Congress*, Milano (Italy). 7286-7291. 2011.
- [10] Baldini P., Calandrini G., Doñate P. “Funciones de Variable Compleja: Un Enfoque Heurístico Orientado al Diseño Mediante QFT” *Educación Matemática en Carreras de Ingeniería - VIII EMCI Internacional y XVI EMCI Nacional*. ISBN: 978-950-658-252-4. UNICEN, Olavarría, Bs. As. Argentina. 2011.
- [11] Baldini P., Bambill H., Doñate P., “Diseño de Controladores PID usando QFT”. *XIV RPIC*. FI- UNER. (ISBN 978-950-698-280-5) – pp. 264-269. Oro Verde. Entre Ríos . 16-18 de Noviembre 2011.
- [12] Gunasekaran M. and Potluri R. “Low-Cost Undergraduate Control Systems Experiments Using Microcontroller-Based Control of a DC Motor” *IEEE Trans. on Educ.*, **55**, No 4, 508-516. 2012.
- [13] Vilas Jadhav, Chandrakant Kadu and Bhagsen Parvat. “Robust Controller Design using Quantitative Feedback Theory (QFT)”. *International Journal of Computer Applications* **47(7)**:9-13, Published by Foundation of Computer Science, New York, USA. 2012
- [14] Baldini, P. N., Alegre D., y Doñate, P. D., “Sintonización QFT Automática de los Parámetros de un Controlador PID en un Sistema de Posicionamiento”, *XVII EMCI Nacional y IX EMCI Internacional, Educación Matemática en Carreras de Ingeniería*, (6 páginas – ISBN: 978-987-27897-9-4) 24 al 26 de Octubre 2012, UTN FRBA, Buenos Aires, Argentina. 2012.
- [15] Baldini P., Calandrini G., Doñate P., Bambill H. “Uso de Software Interactivo como Facilitador para la Introducción Temprana de Conceptos de Control Robusto”. *XIX Congreso Argentino en Ciencias de la Computación, CACIC 2013* (ISBN 978-987-23963-1-2) – pp. 475-484. Mar del Plata, 21-25 de Octubre 2013.
- [16] Alegre Diego, Baldini Patricia. “Control QFT Robusto de un Sistema de Posicionamiento Modelado con Incertidumbre”. *XII JEI – Jornadas de Estudiantes Investigadores*. UTN-FRR, Rosario, Santa Fe, Argentina. 2012.