

Introducción Temprana de Conceptos de Control Robusto: Experiencia Práctica y CAD

Patricia N. Baldini, Guillermo L. Calandrini, Pedro D. Doñate, y Héctor R. Bambill

Title—Early Introduction of Robust Control Concepts: Hands-on Experience and CAD

Abstract— This paper presents an educational experience in an initial course in feedback control. The purpose is to introduce concepts of robust design not included in the regular curriculum. The problem of designing a controller for a simple mechanical system without knowing the true value of the parameters is proposed in a laboratory class. The task is performed on the real system with the aid of CAD freeware. The combination of practice and software tools, encourages the development of autonomous learning and favors the apprehension of the concepts of uncertainty and robustness. A perception survey shows promising results indicating that the strategy of learning by doing is very well accepted by the students.

Index Terms— Action Learning, Computer Aided Instruction, Control Engineering Education, Freeware Tools, QFT.

I. INTRODUCTION

LA mayoría de las técnicas de diseño de sistemas de control utilizan un modelo de la planta durante la fase de ajuste de los parámetros del controlador. Si bien se sabe que los modelos matemáticos son sólo una aproximación de los sistemas reales, en los primeros cursos de control sólo se consideran los de estructura fija y parámetros conocidos. No se tienen en cuenta los errores de modelado, bajo la suposición de que el modelo puede ser determinado en forma bastante exacta y que la realimentación reducirá la sensibilidad a la posible variación de parámetros.

En un curso inicial de grado se cubren contenidos clásicos de análisis y diseño de controladores tanto en tiempo como frecuencia para sistemas lineales de una entrada y una salida (SISO) modelados mediante función de transferencia. Algún concepto de robustez se presenta de manera indirecta al considerar márgenes de estabilidad y sensibilidad. El abordaje de la problemática asociada a la incertidumbre en los parámetros y a la estabilización y seguimiento robusto no se incluye por la complejidad del tratamiento matemático involucrado. Si se analiza la bibliografía moderna sobre

control clásico, sólo unos pocos autores introducen el diseño robusto propiamente dicho, y la mayoría lo hace de un modo más bien intuitivo [1]-[4]. Como conclusión, en el alumno se arraiga la idea de que la obtención de un modelo bien definido es posible y además suficiente a los efectos del control. Es claro que en la experiencia práctica este modelo único no es obtenible.

Este trabajo presenta una experiencia didáctica, incluida en una actividad habitual de laboratorio, que tiene como objetivo presentar e introducir el concepto de incertidumbre como forma de modelar dichas inexactitudes. Además, mostrar que existen algunas herramientas muy accesibles para, eventualmente, abordar el diseño del control correspondiente. Se destaca que si al realizar el diseño se tiene en cuenta la incertidumbre, el controlador resultante mantendrá las prestaciones del sistema dentro de los límites de las especificaciones, incluso en presencia de imperfecciones, errores de modelado y eventuales perturbaciones.

La experiencia está concebida para que la incertidumbre paramétrica se presente naturalmente cuando distintos grupos de alumnos realizan una actividad práctica integradora de laboratorio. Esta consiste en la identificación, análisis, diseño del control y análisis de prestaciones de un sistema simple. Concluida la etapa de identificación, se comparan resultados y la situación habilita un debate sobre las razones y consecuencias de la evidente dispersión en los resultados obtenidos, la forma de contemplar este hecho en el modelo, los efectos sobre el diseño de un controlador PID y las limitaciones de las metodologías clásicas para tratar el problema. Con el objetivo adicional de mostrar que existen alternativas accesibles al diseño clásico, se presenta al curso un programa para CAD de libre distribución, SISO-QFTIT [5], basado en el ambiente Sysquake [6] muy conocido y utilizado en la educación en control [7]. Este CAD implementa la teoría de realimentación cuantitativa (QFT) y permite diseñar un controlador “robusto” para luego comparar los resultados con un diseño clásico.

Sin profundizar específicamente en la teoría asociada al diseño robusto, se pretende que desde un punto de vista experimental y natural, los alumnos tomen conciencia de la problemática real involucrada en los procesos de modelado, identificación y control. Se concluye que el diseño clásico no es el único disponible, y que existen metodologías de diseño alternativas junto con herramientas accesibles para abordarlos.

La propuesta se implementa en la primera asignatura del área de control realimentado de la carrera Ingeniería Electrónica. Durante y al finalizar la experiencia, una encuesta simple permite verificar, según la propia percepción de los alumnos, el alcance de los objetivos planteados sobre la temática trabajada.

P. N. Baldini, Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, y Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina (e-mail: pnbaldi@frbb.utn.edu.ar).

G. L. Calandrini, Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina (e-mail: calandri@criba.edu.ar).

P. D. Doñate, Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, (e-mail: pdonate@uns.edu.ar).

H. R. Bambill, Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina (e-mail: hbambill@criba.edu.ar).

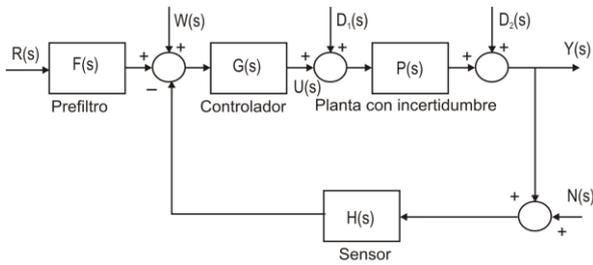


Fig. 1. Esquema de control con dos grados de libertad.

En la sección II se presenta primero el contexto curricular de la asignatura donde se realiza la experiencia. Luego se introducen conceptos básicos sobre QFT junto con una breve descripción de la herramienta CAD adoptada y los motivos de su elección. En la sección III se describe la experiencia incluyendo el sistema utilizado, el experimento de identificación, las especificaciones y un resultado típico de diseño. La sección IV detalla los resultados de la experiencia y finalmente en la sección V se vuelcan las conclusiones del trabajo.

II. CONTEXTO Y CONCEPTOS GENERALES

A. Contexto de Aplicación

La experiencia se realiza con el curso de Fundamentos de Control Realimentado (FCR). Es la primera asignatura que reciben de control y está ubicada en el primer cuatrimestre del cuarto año de un plan de estudios de cinco años de la carrera Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional del Sur. Esta carrera está acreditada por la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria dependiente del Ministerio de Educación de la República Argentina. Relacionado con la asignatura FCR, al cursar cuarto año, los alumnos ya cuentan con 640 horas de matemática incluida Teoría de Variable Compleja, 384 horas de Física, 128 horas de Métodos y Simulación Numérica en Ingeniería Eléctrica. Tienen además 128 horas de Análisis de Circuitos y Sistemas de tercer año, donde adquieren competencias en la caracterización y análisis temporal y frecuencial de sistemas lineales incluyendo los gráficos de Bode.

La asignatura FCR tiene una carga horaria total de 128 horas contemplando por semana 4 horas de teoría y 4 de práctica con ejercitación y laboratorios. El núcleo de la asignatura aborda tres grandes temas en la disciplina control automático: desarrollo de modelos dinámicos; evaluación y análisis de comportamiento dinámico de sistemas lineales a lazo abierto y retroalimentados, y evaluación y análisis de comportamiento de estos sistemas en el plano complejo y con métodos de respuesta en frecuencia. Cada uno de estos bloques temáticos tiene laboratorios particulares conformando un total de cinco experiencias de dos horas cada una.

La experiencia, descrita en la sección III, se ubica en el transcurso del tercer bloque temático mencionado, donde ya han sido cubiertos los contenidos sobre modelado y comportamiento temporal y es contemporánea con la presentación de los métodos frecuenciales. Los alumnos cuentan con la práctica de ejercitación correspondiente y realizan este laboratorio de tipo “integrador” ya que involucra actividades de modelado e identificación, análisis de comportamiento temporal y frecuencial, diseño del controlador y análisis de comportamiento del sistema

completo. El trabajo se realiza en dos etapas de 4 horas de duración cada una de ellas, 2 horas en laboratorio y 2 horas estimadas de diseño y procesamiento en el hogar.

Para presentar una alternativa al diseño clásico, se adopta QFT debido a su relativa sencillez y su relación directa con el bloque temático de diseño frecuencial. En efecto, esta metodología reinterpreta las ideas de Bode llevándolas a una forma cuantitativa, reforzando el concepto de que la realimentación es necesaria en función de la existencia de incertidumbre o perturbaciones no medibles en el modelo de la planta [8]-[10]. Si bien no se imparte una explicación teórica del tema, se dan lineamientos básicos para relacionar los gráficos de Bode y Nichols con el uso de la herramienta CAD durante la ejecución de los laboratorios.

Estos laboratorios y esta experiencia, entre otros aspectos, permiten también reforzar en los alumnos las relaciones entre respuesta en frecuencia y respuesta temporal, márgenes de fase y frecuencias de cruce con sobrepicos y tiempos de trepada en la respuesta al escalón.

B. Conceptos sobre QFT

La teoría de realimentación cuantitativa fue concebida por Horowitz [11] como una técnica de diseño para sistemas de control realimentados planteada en el dominio de la frecuencia. Propone una metodología de diseño transparente que ha sido y sigue siendo utilizada con muy buenos resultados en diversas aplicaciones [12]-[17].

La Figura 1 muestra una configuración típica de control donde $P(s)$ representa la planta con incertidumbre. El objetivo de diseño QFT es la síntesis de un controlador $G(s)$, lo más simple posible, con ancho de banda mínimo y que cumpla con las especificaciones para la familia de plantas establecidas por la incertidumbre. El diseño general puede eventualmente incluir el precompensador $F(s)$. Las perturbaciones están modeladas por los procesos W , D_1 y D_2 , el ruido es N , la señal de referencia es R y la salida Y . La dinámica del sensor está representada por $H(s)$ en el lazo de realimentación.

Debido a la incertidumbre, la planta queda caracterizada por una familia de respuestas en frecuencia. Es decir, la dinámica para cada frecuencia queda descrita por un conjunto de puntos que constituyen las denominadas plantillas o *templates* [18].

Las especificaciones referidas a las prestaciones deseadas en términos de estabilidad, comportamiento temporal, rechazo de perturbaciones y límites sobre la señal de control se traducen, conjuntamente con la incertidumbre, en regiones admisibles en el diagrama de Nichols, delimitadas por curvas denominadas contornos o *bounds*. Estas curvas son las que sirven de guía para determinar la función transferencia de lazo abierto nominal, $L_o(j\omega) = G(j\omega)P_o(j\omega)$ que es la base del diseño del controlador $G(j\omega)$. Si $L_o(j\omega)$ satisface las restricciones sobre la carta de Nichols se garantiza que también lo harán todas las funciones de lazo correspondientes a las plantas del *template*.

En particular, para la experiencia desarrollada, sólo se considera el diseño del controlador $G(j\omega)$ en base a estabilidad robusta y especificaciones temporales.

C. Elección y Características del Software de Diseño

Una de las características de los estudiantes actuales es la facilidad con que interactúan con dispositivos tecnológicos



Fig. 2. Sistema motor-volante-sensor de posición

manejando de manera natural interfaces tipo menú que permiten la elección de diferentes opciones y configuraciones para los mismos. Muchas de las herramientas de software accesibles a través de Internet resultan muy apropiadas para este fin ya que constituyen un gran estímulo para involucrar más activamente a los alumnos en su propio proceso de aprendizaje e introducir de manera rápida y efectiva conceptos relativamente complejos.

Desde el punto de vista pedagógico, al considerar la incorporación de software de diseño, se pueden distinguir dos estrategias [19]:

- Su empleo como herramienta auxiliar, contemplando dos etapas. La primera es la síntesis o determinación 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 tipo prueba y error.
- Su utilización como herramienta interactiva [20], que combina ambas etapas y muestra de manera inmediata los efectos del cambio de los parámetros. El diseño se torna realmente dinámico permitiendo al usuario percibir el modo en que las modificaciones influyen en el comportamiento del sistema. Esto permite orientar el diseño para obtener 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, Matlab® y sus librerías o *toolbox* junto con su interfaz gráfica de usuario (GUI), es el software más frecuentemente empleado en el campo del control automático, permitiendo implementar diversas técnicas usadas en control. En particular, en la metodología QFT existen diferentes herramientas de CAD implementadas en este ambiente [21]-[24]. Entre las más difundidas y completas se mencionan los *toolboxes* QFT Frequency Domain Control (FDCDT) de tipo comercial [22] y QFT Control (QFTCT) de libre acceso [23]. En ambos casos, se requiere el software de base para el cuál es necesario contar con una licencia costosa y no siempre accesible.

Por otra parte, en el campo del software de distribución gratuita se encuentra disponible SISO-QFTIT (Single Input Single Output Quantitative Feedback Theory Interactive Tool) caracterizado por su alta interactividad en cada etapa

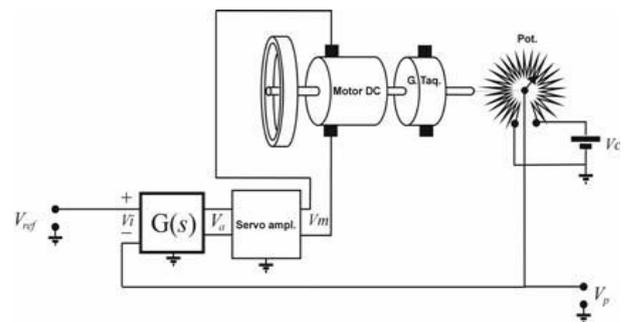


Fig. 3. Esquema del sistema de control

del proceso y su facilidad de uso. Desarrollado en ambiente Sysquake [6], se presenta en forma de archivo ejecutable bajo sistema operativo Windows y Mac proporcionando alta portabilidad. Presenta de manera secuencial una serie de ventanas que responden al concepto de “dynamics pictures” [25] que facilita la comprensión de los conceptos involucrados, el desarrollo de las habilidades fundamentales de diseño y el sustento para los aspectos teóricos básicos. Este software se ajusta perfectamente a los objetivos planteados, incorporando el valor agregado de ser de libre disponibilidad y accesible para el alumno que quiera experimentar fuera del ámbito de la universidad. Los detalles específicos se describen en [26].

Estos aspectos son los que condujeron a la decisión de adoptar el software SISO-QFTIT como herramienta CAD para el desarrollo de la experiencia.

D. Descripción del Sistema de Control

El sistema está conformado por un motor de corriente continua de imanes permanentes (Liotton C23, 24 volts nominales) con un volante de inercia que actúa como carga (Fig. 2). Integrado al motor se dispone de un tacómetro que genera una señal medible para la identificación de los parámetros asociados.

La acción de control se acondiciona por medio de un servo-amplificador, donde es convertida en una señal PWM (Advanced Motion Controls, modelo C25AB, de 22KHz).

El objetivo es posicionar el volante de inercia utilizando como sensor de posición un potenciómetro lineal de 10 K^Ω acoplado directamente al eje del motor (Fig. 3).

El compensador que genera la acción de control es del tipo PID (proporcional + integral + derivada), implementado con amplificadores operacionales [27], [28]. Todo el conjunto servo-amplificador motor se modela con la función de transferencia:

$$\frac{\theta}{V_a} = \frac{\kappa}{s^2 + a} \quad (1)$$

donde θ representa la posición angular y V_a es la señal de control sobre el servo-amplificador. Para el controlador, la función de transferencia es:

$$\frac{V_a}{V_i} = k_p \left(1 + k_i \frac{1}{s} + k_d \frac{s}{0.022s + 1} \right) \quad (2)$$

con variación posible de las ganancias en los rangos $0 < k_p < 7$; $0 < k_i < 10.64$ y $0 < k_d < 0.1$. Los dos polos del controlador están fijos, uno en el origen (el integrador), y el

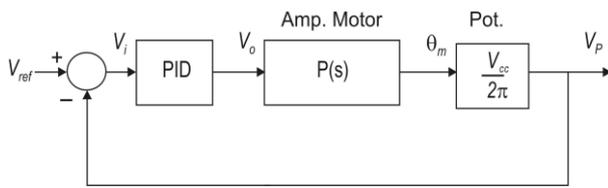


Fig. 4. Diagrama en bloques del sistema de control

de alta frecuencia en $s_0 = \frac{1}{0.022} = 45.454$. Los ceros se ajustan en la etapa de diseño.

El diagrama en bloques de este sistema de control realimentado puede apreciarse en la Figura 4.

III. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

A. Descripción de la Experiencia

La experiencia está planteada como un trabajo de laboratorio consistente en el diseño del control de posición descrito en la sección anterior, adecuado a los objetivos didácticos de la asignatura [27], [28]. Se realiza en dos etapas de cuatro horas cada una, asistidos con una guía de actividades. La primera utiliza conocimientos de los dos primeros bloques de la asignatura, donde ya disponen de los modelos del sistema obtenidos en prácticas y laboratorios previos. Se identifica el modelo, se pone de manifiesto la incertidumbre y se establece el debate. En la segunda etapa, contemporánea con el desarrollo del tercer bloque de la asignatura, se realiza el diseño del control, primero convencional y luego, al contemplar los efectos de la incertidumbre, el robusto.

La descripción detallada de estas etapas es la siguiente:

Etapa 1a (2 horas en laboratorio): La identificación consiste en determinar los dos parámetros asociados al modelo de la planta en la ec. (1), la ganancia K y el polo real a . Esto se realiza utilizando las respuestas a escalones de distintas amplitudes. Si bien los equipos sobre los que se trabaja son de características similares, la dispersión en los resultados se da naturalmente debido a pequeñas diferencias constructivas, errores en las mediciones, limitaciones del modelo y de los métodos de identificación utilizados (medición de la constante de tiempo, cuadrados mínimos). Comparando resultados entre grupos de trabajo para las distintas mediciones y métodos, se elabora el concepto de incertidumbre estructurada a partir de la dispersión dentro del espacio paramétrico. Se refuerza el hecho de que el modelo representa una aproximación del sistema físico real y que en la práctica no es posible determinar valores exactos de sus parámetros. Se deja en claro que eventualmente esta dispersión puede ser cuantificada y tenida en cuenta en el proceso de diseño.

Etapa 1b (2 horas pos laboratorio) A partir de los valores disponibles los grupos deben seleccionar lo que consideran el conjunto de parámetros que define la planta nominal, el cual sirve de base para realizar el diseño. Las estrategias posibles van desde adoptar valores promedio hasta simplemente retener los parámetros más representativos comparando simulaciones con los datos experimentales.

Etapa 2a (2 horas pre laboratorio): Con los parámetros nominales se debe diseñar un controlador PID. Las especificaciones del control se determinan en base a las

características deseadas para la respuesta al escalón. Estas son interpretadas como propiedades de la respuesta en frecuencia: tiempo de trepada y amortiguamiento traducidas como margen de fase y frecuencia de cruce por 0 dB. En esta etapa los alumnos deben opinar sobre la influencia que podría tener la incertidumbre del modelo en los resultados esperados y la posibilidad de considerarla en el proceso de diseño.

Etapa 2b (1 hora en laboratorio): Se implementa y analiza el comportamiento del sistema de control según el diseño nominal.

Etapa 2c (1 hora en laboratorio): Como alternativa se presenta conceptualmente la metodología basada en QFT, que permite el diseño de un controlador robusto. Se describe el programa CAD SISO-QFTIT, destacando que se trata de software de libre disponibilidad, con una interfaz gráfica muy fácil de utilizar y sus características de diseño interactivo. Este CAD requiere:

- introducir el modelo de la planta con incertidumbre paramétrica;
- determinar el rango de frecuencias de interés;
- incorporar las especificaciones;
- sintetizar y ajustar el controlador de manera interactiva;

Al finalizar el proceso, el software presenta la simulación de los resultados obtenidos teniendo en cuenta los peores casos.

Se diseña un controlador robusto con un sólo grado de libertad (sin prefiltro) para cumplir la especificación de tipo 1, “*Robust Stability Bounds*”, en la cual se establece el margen de fase deseado. Se modifican las tres ganancias del controlador en el sistema implementado y se compara su comportamiento con el diseño clásico ante diversas excitaciones. En este punto el alumno deberá comprobar que el controlador robusto aplicado a cualquiera de los equipos disponibles en el laboratorio cumple con las especificaciones a pesar de las diferencias detectadas en la etapa 1a (incertidumbre).

B. Ejemplo de Diseño

Se presentan un conjunto de resultados típicos para las etapas mencionadas.

Después de la identificación se adopta como planta nominal con el sensor de posición incluido, de acuerdo al esquema de la Figura 4,

$$P_o(s) = \frac{V_p}{V_a} = \frac{V_{cc}}{2\pi} \cdot \frac{\theta}{V_a} = \frac{10}{s(s+5.46)} \cdot \frac{117.46}{2\pi} = \frac{187.04}{s(s+5.46)} \quad (3)$$

donde se fijó la tensión de alimentación en el sensor $V_{cc}=10\text{volts}$. Se obtiene una buena velocidad de respuesta con poca amortiguación, correspondiendo un margen de fase de 22.6° . Se desea diseñar un controlador PID para llevar este margen a 50° . Un diseño clásico posible conduce a los parámetros $k_p = 0.735$; $k_i = 1.208$ y $k_d = 0.059$.

Por otro lado, manteniendo la planta nominal e incorporando la incertidumbre descrita como $K \in [79.36, 158.73]$ y $a \in [4, 7]$, por lo tanto

$$126.37 \leq K \frac{V_{cc}}{2\pi} \leq 252.75, \text{ se realiza el diseño robusto}$$

utilizando el software. A través de sucesivas ventanas gráficas, como las mostradas en fig. 5 y 6, se avanza en las

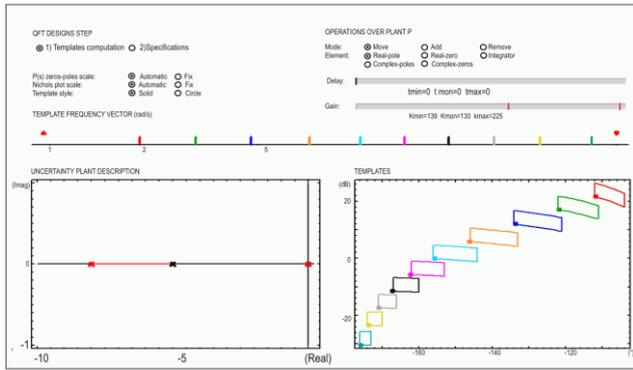


Fig. 5. Ventana para la etapa de ingreso de parámetros de planta, vector de frecuencias y cálculo de templates

distintas etapas propias de la metodología de QFT. Las frecuencias de trabajo utilizadas para este ejemplo son: 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 13.3, 50, 100 [rad/seg]. Se utilizó la especificación de tipo 1, $W_{s1}=1.18$, que corresponde a un margen de fase de 50.19°. Inmediatamente y en forma automática se generan los contornos o *bounds* asociados.

El paso siguiente consiste en sintetizar el controlador robusto, procedimiento también conocido como *loop shaping*. Se ingresan gráficamente los componentes (ganancia, polos y ceros) con la inmediata visualización de su efecto sobre la respuesta en frecuencia de lazo abierto nominal. Primero se incorporan los polos fijos: $p_1 = 0$ y $p_2 = 45.454$. Luego se seleccionan interactivamente los dos ceros reales y la ganancia de modo de cumplir lo más ajustadamente posible con los *bounds*, para evitar sobrediseño.

De este proceso resulta, por ejemplo, la siguiente función transferencia para el controlador:

$$G(s) = 2.8407 \frac{(s + 8.964)(s + 0.424)}{s(s + 45.454)} \quad (5)$$

La Figura 6 muestra esta pantalla de diseño donde se ha utilizado una estructura PID convencional. Para finalizar, en la etapa de validación el programa presenta la simulación del sistema resultante. El cumplimiento de las especificaciones puede verificarse con curvas de comportamiento en tiempo y frecuencia. Cada gráfico muestra las situaciones más restrictivas teniendo en cuenta tanto la incertidumbre como los límites fijados por las especificaciones. Una imagen del sistema empleado se muestra en la Figura 7.

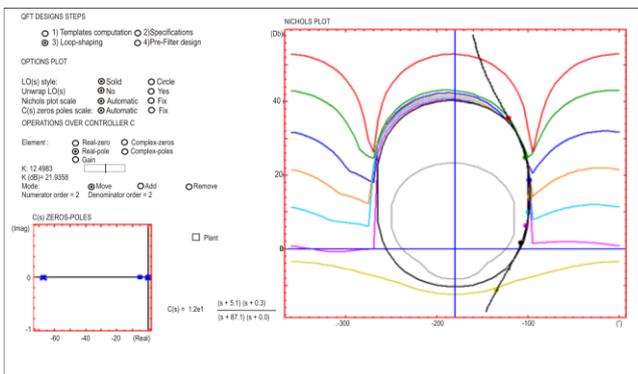


Fig. 6. Etapa de diseño interactivo del controlador o loopshaping en base a la Función Transferencia nominal y los bounds correspondientes a las especificaciones para estabilidad robusta y seguimiento.

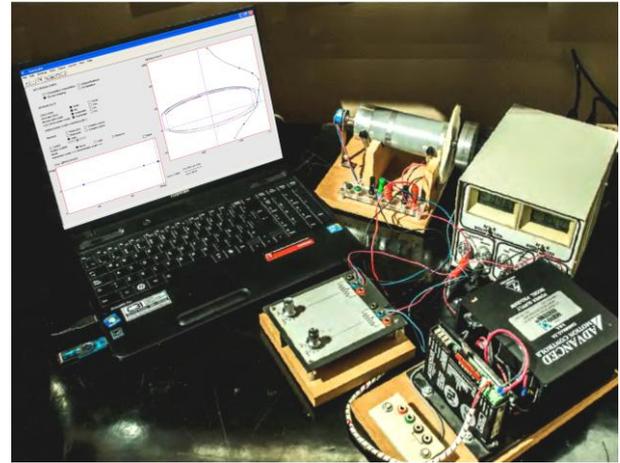


Fig. 7. Imagen del sistema mecánico con el controlador PID robusto implementado en el laboratorio.

Cada una de las comisiones implementa el mismo controlador sobre su sistema, verificando el adecuado funcionamiento del mismo. Luego, integrando y comparando resultados se comprueba la robustez del diseño: el mismo controlador funciona adecuadamente en todos los casos.

En la Figura 8 se compara una respuesta temporal del sistema real y la obtenida mediante simulación. Se detecta la presencia de no linealidades de tipo “zona muerta” debida a fricciones que no han sido modeladas, afectando el tiempo de establecimiento y el valor estacionario.

IV. RESULTADOS

La experiencia está concebida para que los alumnos la desarrollen de forma autónoma, con asistencia permanente por parte de los docentes. Se implementó en dos cursos regulares durante dos años consecutivos, con la participación de veinte alumnos en total. Si bien este número de alumnos es reducido, se considera aplicable a cursos más numerosos trabajando en turnos, con grupos de pocos integrantes, para garantizar una adecuada interacción docente-alumno.

Los resultados obtenidos se evaluaron desde la óptica de los propios alumnos mediante encuestas de percepción y opinión realizadas durante y al finalizar la experiencia, con los siguientes resultados:

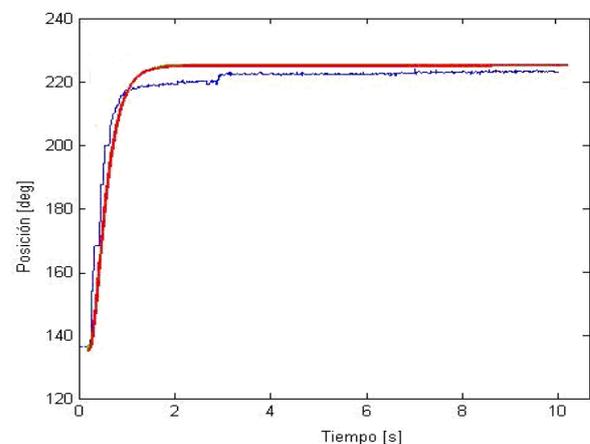


Fig. 8. Comparación de las respuestas temporales de la posición angular experimental y simulada.

- 1- 100% detecta la incertidumbre y reconoce que se presenta dispersión en los resultados como una realidad inherente a la determinación experimental de un modelo.
- 2-a 70% considera que el desajuste y dispersión de valores se debe a errores en el procedimiento de medición, modelado y efectos no lineales.
- 2-b 30% atribuye el desajuste entre el modelo y el sistema no necesariamente al proceso de medida, sino a errores de modelado y efectos no lineales.
- 3-a 45% considera que esta incertidumbre puede afectar al rendimiento del sistema y debe ser tenida en cuenta en el proceso de diseño.
- 3-b 55% considera irrelevantes los efectos de la incertidumbre en el rendimiento del sistema y que no debe ser tenida en cuenta en el diseño.
- 4-a Concluido el diseño, 35% no considera significativa la mejora obtenida.
- 4-b Concluido el diseño, 65% considera que resulta significativa la mejora obtenida al tener en cuenta la incertidumbre en el proceso de diseño.
- 5- 100% considera que el paquete de software QFT es intuitivo y fácil de usar a partir de los conocimientos disponibles.

Los resultados parecen indicar que la introducción del concepto de incertidumbre y robustez, de manera natural, desestructurada y mediante experiencias de laboratorio, es positivamente aceptada por los alumnos. Finalizada la práctica, la mayoría reconoce los posibles beneficios de este tipo de diseño y comprende los conceptos involucrados, aunque inicialmente no pueden valorar las ventajas de la metodología. Juega un rol muy importante lo amigable del software y la facilidad natural con que las actuales generaciones de estudiantes manejan este tipo de herramientas, aun desconociendo la teoría subyacente.

Desde el punto de vista formativo y según la opinión de los docentes, se reconocen los siguientes avances:

- Mediante el paradigma del aprendizaje por descubrimiento, la mayoría de 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 razonablemente sobre todos los sistemas disponibles. Por otro lado, las simulaciones permiten verificar que las prestaciones del diseño por métodos clásicos son satisfactorias en cercanía de los parámetros tomados como base y se degradan rápidamente cuando estos se modifican, incluso violando en algunos casos las restricciones impuestas. Se resaltan las diferencias de comportamientos obtenidos a partir de la aplicación de ambos enfoques.
- Esta metodología de enseñanza, aprendiendo a través de observaciones y experiencias, es apreciada y valorada por los estudiantes facilitando la

comprensión de las ideas y conceptos que las sustentan.

- Se fomenta la utilización de un software libre interactivo. Se crea conciencia en relación a la importancia de la incorporación de este tipo de software a la enseñanza.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió una metodología didáctica implementada para un primer curso de grado de control, en la que se conjugan una experiencia de laboratorio y una herramienta de CAD interactiva. Se muestra que esta combinación habilita la introducción de conceptos no contemplados comúnmente como lo son el modelado con incertidumbre y su inclusión en el diseño. Se presenta como una alternativa accesible para abordar alguna de las limitaciones del control clásico que se hacen evidentes en la práctica.

La estrategia adoptada permite una mayor independencia y compromiso del alumno con su propio proceso de aprendizaje, favoreciendo su autonomía, fortaleciendo la habilidad para utilizar herramientas de diseño y apreciar las limitaciones de un modelo único.

Si bien hay diversos autores que presentan herramientas interactivas orientadas a facilitar este aprendizaje ([7], [26]), en este trabajo se aplica una en particular integrada como parte de una experiencia didáctica concreta en un curso de grado.

La teoría del control clásico junto con la asistencia del CAD sirven de base suficiente para la introducción informal de QFT y además permiten reforzar los conceptos subyacentes de respuesta en frecuencia.

Se destaca que el nivel de interactividad de SISO-QFTIT favorece en gran medida un mayor y más rápido nivel de entendimiento de la temática. Como los estudiantes están acostumbrados y naturalmente entrenados a este tipo de interacción, la propuesta es incorporada sin dificultades.

Se realizó una encuesta de percepción cuyos resultados indican el reconocimiento por parte de los alumnos de los efectos de la incertidumbre y buena aceptación general de la experiencia. Puede además interpretarse que la simplicidad del sistema permite obtener resultados aceptables aun con el diseño clásico. De todas formas se evidencia la potencialidad del método presentado.

Para finalizar, se menciona la importancia de disponer de software de libre distribución, bien diseñado para el aprendizaje y el desarrollo de competencias específicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional de la República Argentina por la subvención aportada a través del proyecto interinstitucional "Diseño QFT de controladores robustos para sistemas multivariados".

REFERENCES

- [1] G. Franklin, J. Powell y A. Emami Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*. 7th ed. London: Pearson, 2014, pág.:389-393 y 525-528.
- [2] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Modern Control Systems*. 12th ed. New Jersey: Pearson Education, 2011, cap. 12.
- [3] K. Ogata, *Modern Control Systems*. 5th ed. New York: Prentice Hall, 2010, cap. 10.

- [4] F. Golnaraghi y B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*. 9th ed. New York: Wiley, 2009 ; pág. 590-600.
- [5] J.M Díaz, S. Dormido y J. Aranda, SISO-QFTIT (2014) UNED [Online] Disponible: <http://ctb.dia.uned.es/asiq/qftit/principal.html>. Último acceso: en Mayo de 2014.
- [6] Y. Piguet, SysQuake: User's manual. Calerga. Lausanne Federal Polytechnic School Automatics Institute. 1999. [Online]. Disponible: www.calerga.com/products/Sysquake/. Último acceso en Mayo de 2014.
- [7] J. L. Guzmán, K. J. Åström, S. Dormido, T. Häggglund y Y. Piguet: "Interactive Learning Modules for PID Control". In 7th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Madrid, Spain, June 2006.
- [8] I. M. Horowitz, *Quantitative Feedback Design Theory*- Denver: QFT Publishers , 1993.
- [9] H. Houppis, S. J. Rasmussen y M. García Sanz, *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications*., Florida.: CRC Press, 2006.
- [10] O. Yaniv, *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems*. Massachusetts: Kluwer Academic Publisher. 1999.
- [11] I. M Horowitz, "Fundamental theory of linear feedback control systems". *Trans. IRE on Auto. Control*, **AC-4**, pág: 5-19. 1959
- [12] P. Pahuja, S. Singh y H. Rai, "Design of robust position control of DC servo motor using QFT". *VSRD- Int. Jou. Electrical, Electronic ans Communication Eng.* Vol. 2. Nro. 3, 2012, pág.135-143.
- [13] P. Pahuja y H. Rai, "Design of robust control for perturbed systems using QFT". En 2nd *International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. Haryana. Enero 2012, pág. 219-224.
- [14] V. K. Jadhav, C. Kadu y B. J. Parvat , "Robust controller design using quantitative feedback theory (QFT)". *International Journal of Computer Applications*. Vol. 47, nro. 7, Junio de 2012, pág. 9-13.
- [15] M. D. Patil y K. R. Kothawale, "Design of Robust PID Controller for Flexible Transmission System Using Quantitative Feedback Theory (QFT)". En *Advances in Computing, Communication and Control Communications in Computer and Information Science*. Vol. 125, 2011, pág. 479-485.
- [16] H. Mansor, A. Zaeri, S. Noor, R.Ahmad y F. Ali, "Design of QFT Controller for a Bench-Top Helicopter System Model". *Int. Jour. of Simulations, Systems, Science and Technology*. vol. 11, No. 5. Septiembre 2010, pág. 8-16. [Online] Disponible: <http://ijssst.info/Vol-11/No-5/paper2.pdf>. Último acceso en Mayo de 2014.
- [17] L. Meng y F. Diao, "QFT Fractional Order Controller for Non-minimum phase hydro power plant". *Proceedings of the 31st Chinese control conference*. Julio 2012, pág. 2743-2748.
- [18] P. O. Gutman, C. Baril y L. Neumann, "An algorithm for computing value sets of uncertain transfer functions in factored real form". *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 29, no.6, pág.: 1268-1273. 1995
- [19] S. Dormido, "The role of interactivity in control learning", *Int. Jou. Eng. Educ.* vol. 21, no. 6, pág. 1122-1133. Noviembre 2005
- [20] J. L. Guzman., R. Costa Castelló, S. Dormido, y M. Berenguel, "Study of fundamental control concepts through interactive learning objects". 18th IFAC World Congress. Milán. Italia, pág. 7286-7291 .Agosto 2011
- [21] M. Barreras, P. Vital y M. García-Sanz, "Interactive tool for easy robust control design," in *Proc. of the IFAC Internet Based Control Education* , Madrid , 2001, pág. 83-88
- [22] C. Borghesani, Y. Chait y O. Yaniv, *Quantitative Feedback Theory Toolbox for use with MATLAB*. The MathWorks Inc, Natick, MA, 1995
- [23] M. Garcia-Sanz, A. Mauch, y Ch. Philippe, The QFT Control Toolbox (QFTCT) for Matlab, CWRU, UPNA and ESA-ESTEC, Versión 3.31, Noviembre 2012. [Online]. Disponible: <http://cesc.case.edu/OurQFTCT.htm>. Último acceso Mayo de 2014.
- [24] R. Nandakumar y G. D. Halikias, "A new educational software tool for robust control design using the QFT method", en *Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control* . Maui, Hawaii (USA), Diciembre 2003, pág. 803 -808.
- [25] B. Wittenmark, H. Häglund, H. y M. Johansson, "Dynamic pictures and interactive learning", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 18, no.3, pág. 26-32 .1998.
- [26] J. M. Díaz, S. Dormido y J. Aranda, "An interactive software tool to learn robust control design using the QFT methodology", *Int. Jou. Eng. Educ.*, vol. 23, -no. 5 pág: 1011-1023. Septiembre 2007.
- [27] P.N. Baldini, G.L. Calandrini, P.D. Doñate y H.R. Bambill, "Uso de Software Interactivo como Facilitador para la Introducción Temprana de Conceptos de Control Robusto". En XIX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. CACIC Octubre 2013. [Online] Disponible: <http://cacic2013.ucaecemdp.edu.ar/actas/actas.php> . Último acceso en Mayo de 2014.
- [28] P. N. Baldini, H. R.. Bambill, y P. D. Doñate, "Diseño de Controladores PID usando QFT: una propuesta Didáctica". XIV *Reunión de Procesamiento de la Información y Control*, UNER, Oro Verde, Entre Ríos, Noviembre 2011.

Patricia N. Baldini se graduó como Ingeniera Electricista en 1986 y como Ingeniera Electrónica en 1996 ambos en la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Especializada en sistemas de control realimentado, desarrolla actividades de docencia e investigación en el tema. Es profesora adjunta en el área de Señales y Sistemas en el Departamento de Electrónica de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional y docente del área de Sistemas de Control del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur. Participa en grupos de investigación en control robusto y de programas de innovación docente. Desarrolla diversas actividades de gestión académica .

Guillermo L. Calandrini se graduó como Ingeniero Electrónico en 1996 y Doctor en Control de Sistemas en 2011, ambos en la Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

Es profesor en el Departamento de Matemática de la UNS, en la asignatura "Funciones de Variable Compleja" y asistente de docencia en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la UNS, en la asignatura. "Fundamentos de Control Realimentado". Ha participado en diversos proyectos de investigación sobre sistemas dinámicos y teoría de bifurcaciones.

Pedro D. Doñate se graduó como Ingeniero Electricista en 1983 y como Doctor en Ingeniería en 2004, ambos de la Universidad Nacional del Sur (UNS), en Bahía Blanca, Argentina.

Es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la UNS trabajando en las temáticas de análisis circuital y procesamiento digital de señales. Dirige y ha participado de diversos proyectos de investigación, es autor de varios publicaciones y desarrolla diversas actividades de gestión académica y de extensión universitaria.

Héctor R. Bambill se graduó como Ingeniero Electricista en 1986 en la Universidad Nacional del Sur (UNS), en Bahía Blanca, Argentina. En esta Universidad ha sido docente y ha participado en proyectos de investigación en la temática de identificación y control de sistemas dinámicos, colaborando en la elaboración de varias publicaciones. Es profesor adjunto en el Departamento de Electrónica de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional en la asignatura "Física III". Participa en grupos de investigación en control robusto y de programas de innovación docente. y desarrolla diversas actividades de gestión académica.