



# **UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**

**Departamento de Física y Arquitectura de Computadores**

## **HERRAMIENTAS PRESENCIALES, REMOTAS Y COOPERATIVAS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO**

### **TESIS DOCTORAL**

por

**Rafael Puerto Manchón**

Licenciado en Informática

Elche 2011





# **UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**

**Departamento de Física y Arquitectura de Computadores**

## **HERRAMIENTAS PRESENCIALES, REMOTAS Y COOPERATIVAS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO**

**Rafael Puerto Manchón**

**Director: Dr. Ramón P. Ñeco García**

Elche 2011



# TRIBUNAL

**Presidente:**

**Vocal:**

**Vocal:**

**Vocal:**

**Vocal secretario:**

Calificación de la tesis: .....



# **AUTORIZACIÓN DE PRESENTACIÓN DE TESIS DOCTORAL**

**Director:** Dr. Ramón P. Ñeco García

**Título de la tesis:**

Herramientas Presenciales, Remotas y Cooperativas para Docencia e Investigación en control Automático

**Autor:** Rafael Puerto Manchón

**Departamento:** Física y Arquitectura de Computadores

**Universidad Miguel Hernández**

El director de la tesis reseñada autoriza su presentación de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 80 del R.D. 778/1998 de 30 de abril por el que se regula el tercer ciclo de estudios universitarios.

Elche, a .....

Firmado: Ramón P. Ñeco García





## DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y ARQUITECTURA DE COMPUTADORES

D. Gabriel Ruiz Ruiz, Profesor Titular de Universidad y Director del Departamento de Física y Arquitectura de Computadores de la Universidad Miguel Hernández

### **Certifica**

Que el trabajo realizado por D. Rafael Puerto Manchón titulado **“Herramientas Presenciales, Remotas y Cooperativas para Docencia e Investigación en Control Automático”**, ha sido dirigido por el Dr. Ramón P. Neco García y realizado en el Departamento de Física y Arquitectura de Computadores, se encuentra en condiciones de ser leído y defendido como Tesis Doctoral ante el correspondiente tribunal en la Universidad Miguel Hernández.

Lo que firmo para los efectos oportunos en Elche a .....

Firmado: D. Gabriel Ruiz Ruiz

Director del Depto. de Física y Arquitectura de Computadores



## Agradecimientos

Quiero primero, nombrar a mis padres, Rafael y María Teresa, ya que soy lo que soy gracias a ellos y a ellos les debo todo.

A mis hermanos, Sergio y Alfonso, les quiero agradecer el haber pasado mi vida con ellos; si no existiesen los hubiese inventado tal y como son. Mi más enorme gratitud para ellos por aguantarme. A mi familia por estar ahí. Gracias Gloria, M<sup>a</sup> Paz<sup>2</sup>, Mario, Macu, Antonio, Ana, Tere, Carlos, Miriam, Goya, Vera, Javi, Miguel Ángel, Antonio Gym, y un largo etcétera.

No puedo ni mucho menos olvidar mi época en la UPV. Allí me embarqué en estas cosas bajo la atenta tutela de gente que nunca me ha soltado de la mano. Me refiero a mis mentores y amigos Julián Salt y Ángel Valera a los cuales les debo en gran parte mi vida y proyección profesional y personal. Gracias por vuestra dedicación para conmigo y por vuestros certeros consejos. No sería justo ignorar a otras personas de la UPV de las cuales también he aprendido mucho y nos une, aparte de lo meramente profesional, una buena amistad: Marina, Enrique J., Carlos Camiña y Enrique A. (con ellos aprendí que no todo estaba en los despachos; hay vida fuera de la universidad). También, de mi vida en Valencia, no puedo dejar pasar la oportunidad de mencionar a mis amigos de Linterna 13 y a mi querido Sergio (el rata), partícipes tanto en aquellos momentos como ahora de todo lo que me rodea.

En cuanto a la UMH, mis más sincero agradecimiento a Carlos, Asun y César, verdaderos impulsores de esta aventura. Y cómo no agradecer su cariño y compañía a David Úbeda, M.J. Velacoracho, Carlos Pousa, Emilio, M.A., y una interminable lista de gente que siempre ha estado dispuesta a satisfacer mis caprichos (disculpas a la gente que haya omitido. No cabéis todos).

A Miguel y Emilio por sus interminables charlas filosóficas y científicas.

Por último, a mi amigo, compañero y director, Ramón Ñeco, con el que he pasado gran parte de mi vida (muy gratamente) y con el que deseo seguir haciendo las cosas que siempre hemos hecho. Gracias Ramón.

¡Ah!, se me olvidaba. A Aitana, Jorge, César y al que viene por darnos momentos de optimismo cuando ninguno éramos capaces de verlos. Bendita inocencia.



A Manchón y Teresica

A Teodoro y Nieves

A Sergio y Alfonso

A Aitana



## **Resumen**

En la presente tesis se han diseñado herramientas presenciales y remotas para experimentación en control automático. Dichas herramientas se han aplicado tanto en tareas docentes en asignaturas de control usando una metodología cooperativa/competitiva, así como en tareas de investigación en control automático.

El trabajo realizado se divide en tres partes. En la primera parte se han desarrollado herramientas sobre software libre con el objetivo de reducir el coste de la experimentación. Este objetivo es particularmente relevante en la docencia, para que los programas sean más asequibles, pero también es muy importante en el ámbito de la investigación, en el que los investigadores realizan parte de las experimentaciones en sus ordenadores personales o en laboratorios de diversos centros, no todos equipados con el mismo software. Para ello se han diseñado herramientas tanto para la experimentación con controladores básicos, como para el diseño y análisis de un tipo de controladores avanzados (controladores con muestreo no convencional), usando los programas Scilab/Scicos y Sysquake.

En la segunda parte se han desarrollado herramientas que permiten la utilización remota de equipos de laboratorio a través de Internet. Con ello se posibilita la prueba de algoritmos de control sobre equipos reales sin necesidad de desplazarse al laboratorio donde se encuentran esos equipos. Se ha diseñado e implementado una arquitectura hardware/software para la realización de experimentos de control sobre diferentes sistemas físicos en tiempo real a través de internet.

En la tercera parte se ha propuesto una metodología mixta de tipo competitivo y cooperativo que, conjuntamente con las herramientas anteriores, se ha aplicado en la docencia de asignaturas de control automático. Estas metodologías se han basado en el uso conjunto de técnicas de trabajo cooperativas y competitivas con el objetivo de fomentar la colaboración y el trabajo en equipo, por un lado y, por otro, incrementar la motivación de los alumnos mediante la competitividad entre los grupos.



## **Abstract**

In the present thesis some remote and on-site tools for research in automatic control have been designed. These tools have been applied in educational tasks in control courses using a cooperative/competitive methodology, and in research tasks in automatic control.

The thesis is divided in three parts. The first part deals with the development of tools using free software with the objective of reducing the experimentation cost. This objective is particularly relevant for teaching applications, in order to provide more affordable programs, but it is also very important for research tasks, because control researchers usually perform their experiments using personal computers or in very diverse laboratories, which not always are equipped with the same software. For this purpose this work shows the design of software tools for experimentation with basic controllers and for the analysis and design of a special type of advanced controllers (multirate controllers), using the simulation software Scilab/Scicos and Sysquake.

The second part shows the development of some tools that allow the use of remote laboratory equipment through the Internet. These tools make it possible the experimentation with control algorithms using laboratory equipment which are not directly accessible locally. The system includes the design and implementation of a hardware/software architecture for performing control experiments using different physical systems in real time through the Internet.

In the third part, a teaching methodology using the designed tools is proposed. This methodology is based on a combination of competitive and cooperative teaching techniques, applied to Automatic Control courses. These methodologies have the objective of encouraging the collaboration and team work, and, at the same time, improve the motivation of the students using the competitiveness between groups of students.



# Índice

---

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

|   |   |
|---|---|
| 1.1. Motivación del estudio .....                 | 1 |
| 1.2. Objetivos.....                               | 1 |
| 1.3. Resumen de las aportaciones realizadas ..... | 2 |
| 1.4. Estructura de la tesis .....                 | 3 |

## **CAPÍTULO 2: EL CONTROL AUTOMÁTICO**

|   |    |
|---|----|
| 2.1. ¿Qué es el control automático?.....                                    | 8  |
| 2.2. Principales técnicas de control .....                                  | 16 |
| 2.3. Necesidad de equipos experimentales para docencia e investigación..... | 22 |

## **CAPÍTULO 3: TRABAJOS PREVIOS EN LABORATORIOS PARA CONTROL AUTOMÁTICO**

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Situación actual en laboratorios remotos para educación en control automático .....                 | 27 |
| 3.2. Uso de herramientas libres e interactivas para docencia e investigación en control automático ..... | 34 |
| 3.3. Experiencias previas en control coop. y colaborativo para docencia en ingeniería .....              | 36 |

## **CAPÍTULO 4: HERRAMIENTAS PRESENCIALES DESARROLLADAS**

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Herramientas desarrolladas sobre software libre .....                               | 39 |
| 4.1.1. El software Scilab/Scicos .....   | 40 |
| 4.1.2. Posibilidades para la experimentación en control automático.....                  | 43 |
| 4.1.3. Ejemplos de análisis .....  | 43 |
| 4.1.4. Ejemplos de diseño .....  | 49 |
| 4.2. Herramientas desarrolladas sobre software de evaluación .....                       | 59 |
| 4.2.1. Control multifrecuencia: fundamentos teóricos .....                               | 59 |
| 4.2.1.1. Aplicaciones prácticas del control multifrecuencia .....                        | 60 |
| 4.2.1.2. Muestreadores y bloqueadores .....  | 63 |
| 4.2.1.3. Operadores expand y skip .....  | 64 |
| 4.2.1.4. Sistemas bifrecuencia .....   | 67 |
| 4.2.1.5. Operadores de Kranc.....  | 68 |
| 4.2.1.6. Diseño y análisis de sistemas multifrecuencia.....                              | 76 |
| 4.2.2. Herramienta desarrollada: MADT ( <i>multirate analysis and Design Tool</i> )..... | 85 |
| 4.2.2.1. Introducción: Sysquake .....  | 85 |
| 4.2.2.2. Ejemplos .....  | 86 |
| 4.3. Conclusiones y trabajos futuros .....   | 99 |

## **CAPÍTULO 5: HERRAMIENTAS REMOTAS DESARROLLADAS**

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. El Sistema RECOLAB.....  | 104 |
| 5.2. Agentes principales de RECOLAB.....                                    | 106 |
| 5.2.1. La página web de RECOLAB.....  | 106 |
| 5.2.2. Sistema de adquisición de datos.....                                 | 108 |
| 5.2.3. Sistemas físicos disponibles en RECOLAB.....                         | 109 |
| 5.2.3.1. Servomotor de corriente continua.....                              | 109 |
| 5.2.3.2. Cilindro deslizante por flujo de aire.....                         | 115 |
| 5.3. Estructura interna y funcionamiento de RECOLAB.....                    | 118 |
| 5.3.1. Estructura de RECOLAB.....   | 119 |
| 5.3.2. Funcionamiento interno de RECOLAB.....                               | 120 |
| 5.3.2.1. Interfaz de usuario de RECOLAB.....                                | 122 |
| 5.3.2.2. Sistema de control de acceso.....                                  | 124 |
| 5.3.2.3. Aplicación CGI.....  | 125 |
| 5.3.2.4. Aplicación de control en tiempo real.....                          | 125 |
| 5.3.2.5. Comunicación entre tareas de tiempo real einterfaz de usuario..... | 126 |
| 5.4. Estrategias de control disponibles en RECOLAB.....                     | 128 |
| 5.4.1 Breve reseña sobre Teoría de Control.....                             | 128 |
| 5.4.2 Reguladores diseñados en RECOLAB.....                                 | 131 |
| 5.4.2.1. Parámetros y limitaciones de los parámetros de control.....        | 135 |
| 5.4.2.2. Identificación de los sistemas.....                                | 136 |
| 5.4.2.3 Reguladores tipo PID.....   | 137 |
| 5.4.2.4. Reguladores de Asignación de Polos.....                            | 140 |
| 5.4.2.5. Reguladores de Tiempo Mínimo.....                                  | 143 |
| 5.4.2.6. Control por Realimentación del Estado.....                         | 144 |
| 5.4.2.7. Control de Mínima Varianza.....                                    | 148 |
| 5.5. La aplicación web de RECOLAB.....                                      | 151 |
| 5.5.1. Estructura de la página web.....                                     | 151 |
| 5.5.2. Ejemplos.....  | 153 |
| 5.5.2.1. Ejemplos con el cilindro deslizante.....                           | 153 |
| 5.5.2.2. Ejemplos con servomotor de CC.....                                 | 155 |
| 5.5. Conclusiones y trabajos futuros.....                                   | 158 |

## **CAPÍTULO 6: TÉCNICAS COOPERATIVAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO**

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Itroducción a las metodologías docentes..... | 163 |
| 6.1.1. introducción.....                          | 164 |
| 6.1.2. Actividades dirigidas.....                 | 165 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.1.3. Actividades autónomas .....                                    | 167 |
| 6.1.4. Actividades compartidas .....                                  | 168 |
| 6.2. Aprendizaje cooperativo.....                                     | 171 |
| 6.2.2 Recursos Web 2.0 para la docencia.....                          | 176 |
| 6.2.3. Acciones de Innovación docente UMH .....                       | 181 |
| 6.3. Aplicación a la docencia en asignaturas de control y afines..... | 182 |
| 6.3.1. Asignatura: Sistemas Electrónicos y Automáticos .....          | 182 |
| 6.3.2. Asignatura: Teoría de Circuitos y Sistemas .....               | 197 |
| 6.3.3. Asignatura: Control Avanzado de sistemas.....                  | 200 |
| 6.4. Conclusiones y trabajos futuros .....                            | 209 |
| <b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>                    |     |
| 7.1. Consecución de objetivos .....                                   | 211 |
| 7.2. Aportaciones realizadas.....                                     | 213 |
| 7.3. Trabajos futuros.....  | 215 |
| <b>APÉNDICE A.</b> Descripción general de MADT.....                   | 211 |
| <b>APÉNDICE B.</b> Proyectos de Innovación docente .....              | 241 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | 249 |



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

La motivación del estudio presentado en esta tesis surge del trabajo realizado por el autor en el campo del control automático, como docente e investigador, durante los últimos años. Este trabajo ha permitido detectar importantes carencias en las herramientas hardware y software utilizadas para la experimentación y ensayo de algoritmos de control. En este contexto, el autor ha desarrollado una serie de herramientas y metodologías novedosas que intentan suplir tales carencias.

El trabajo del autor en el campo del control automático se ha llevado a cabo tanto en la Universidad Politécnica de Valencia (Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática) durante los años 1996 y 1997 como en la Universidad Miguel Hernández de Elche, desde el año 1998 hasta la actualidad (inicialmente en el Departamento de Ingeniería y actualmente en el Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales). Así mismo, el autor también ha realizado diversas estancias investigadoras relacionadas con el control automático: en el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) de l'Université de Compiègne (Francia) [TAOU97], trabajando principalmente en Sistemas de Control No – Lineal (1996) y en el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan (San Juan, Argentina, 1999) investigando en Control de Sistemas Teleoperados con Control Bilateral [REI01-1]

Más específicamente, las áreas de investigación en las que ha trabajado el autor están relacionadas con el control multifrecuencia y los sistemas de control basados en red. No obstante, se ha pretendido desarrollar herramientas genéricas, válidas tanto para estas áreas de investigación como para cualquier otra área relacionada con el control automático y, por supuesto, también adecuadas a la docencia. De hecho, algunas de las herramientas y metodologías propuestas son de uso exclusivamente docente.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo global es suplir las carencias detectadas en las herramientas utilizadas tradicionalmente en el campo del control automático. Los objetivos particulares se centran en cada una de estas carencias:

## 1. INTRODUCCIÓN

---

### Primer objetivo:

Desarrollar herramientas sobre software libre para reducir el coste de la experimentación y para evitar la utilización de copias ilegales de software comercial. Este objetivo es particularmente relevante en la docencia, donde los alumnos intentan disponer en sus ordenadores personales del mismo software que se utiliza en las aulas; pero también es muy importante en el ámbito de la investigación, en el que los investigadores realizan parte de las experimentaciones en sus ordenadores personales o en laboratorios de diversos centros, no todos equipados con el mismo software.

### Segundo objetivo:

Desarrollar herramientas que permitan la utilización remota de equipos de laboratorio a través de Internet. Con ello se posibilita la prueba de algoritmos de control sobre equipos reales (siempre más fiable que las pruebas en simulación) pero sin necesidad de desplazarse al laboratorio donde se encuentran esos equipos. Desde el punto de vista docente, estas herramientas facilitan a los alumnos realizar prácticas desde sus casas. Desde el punto de vista de la investigación, estas herramientas evitan que los experimentos realizados por un grupo de investigación se limiten a los equipos disponibles en su propio laboratorio, porque permiten la prueba de algoritmos de control sobre equipos reales diversos, disponibles en laboratorios repartidos alrededor del mundo.

### Tercer objetivo:

Desarrollar metodologías que, conjuntamente con las herramientas anteriores, sirvan para aumentar la motivación de los alumnos que cursan asignaturas de control automático. En este sentido, se busca por una parte estimular el trabajo mediante la competitividad entre grupos de estudiantes y, por otra parte, fomentar la colaboración y el trabajo en equipo. Competitividad y colaboración son actitudes aparentemente antagónicas, pero el objetivo es combinar ambas estrategias para un mejor aprendizaje de las asignaturas de control automático.

Para cumplir estos objetivos, se propone desarrollar herramientas hardware, herramientas software y metodologías específicas e innovadoras.

## 1.3. RESUMEN DE LAS APORTACIONES REALIZADAS

De modo esquemático, las aportaciones realizadas son las siguientes:

- Estudio comparativo de diversos paquetes software comerciales válidos para la experimentación en control automático frente a sus alternativas de libre distribución o gratuitas.

- Propuesta de una herramienta interactiva de diseño de reguladores PID y algebraicos, sobre el software Sysquake.
- Plataforma específica para el análisis y diseño de controladores multifrecuencia, así como para la comparación de prestaciones entre controladores mono y bifrecuencia, sobre el software Sysquake.
- Desarrollo de una batería de experimentos de control para su realización sobre la plataforma Scilab/Scicos, y desarrollo de un tutorial específico que posibilita la realización de experimentos adicionales.
- Arquitectura hardware/software para la realización de experimentos de control sobre diferentes sistemas físicos en tiempo real a través de internet.
- Diseño de una batería de experimentos de control para ser realizados a través de Internet utilizando la plataforma anterior.
- Diseño y desarrollo de un levitador por flujo de aire de bajo coste para la prueba de algoritmos de control, de forma local o remota.
- Propuesta de una metodología mixta competitiva y cooperativa para la docencia en asignaturas de control automático.
- Estudio de la efectividad de las herramientas desarrolladas en el ámbito docente mediante un análisis de satisfacción y resultados obtenidos por alumnos de la Escuela Politécnica Superior de Elche de la Universidad Miguel Hernández (UMH).

### 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis doctoral se estructura de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se realiza una introducción al tema principal de la tesis: El Control Automático. Se describen y se muestran diferentes ejemplos de sistemas de control. Se enumeran también las técnicas de control más usuales para dar una visión general de la gran diversidad de teorías y métodos existentes, así como la complejidad y amplitud de este campo de conocimiento. Por último, se muestra la necesidad de disponer de equipos experimentales para el diseño y ajuste de sistemas de control y su necesidad tanto en docencia como en investigación.
- En el capítulo 3 se realiza un repaso de los trabajos previos y la situación actual acerca de los laboratorios para control automático. Dicho estudio se estructura en tres partes: laboratorios remotos, herramientas libres o gratuitas para

laboratorios docentes y de investigación, y técnicas de aprendizaje cooperativo/competitivo.

- En el capítulo 4 se presentan las herramientas presenciales desarrolladas. Se estructura este capítulo en dos partes: herramientas desarrolladas con software libre (Scilab/Scicos) y herramientas desarrolladas con software de evaluación (Sysquake). La primera se ha utilizado principalmente en tareas de docencia mientras que la segunda se ha utilizado tanto en tareas de docencia como en tareas de investigación. La herramienta desarrollada con Sysquake se ha destinado fundamentalmente al diseño y análisis de sistemas de control multifrecuencia, por lo que se realiza una exposición exhaustiva del control multifrecuencia y en concreto de la respuesta en frecuencia y el funcionamiento de determinados reguladores (PID bifrecuencia) de este tipo de control.
- En el capítulo 5 se presenta la herramienta remota desarrollada. Inicialmente se justifica el desarrollo y empleo de este tipo de herramientas (laboratorios remotos y virtuales) tanto para el ámbito docente como de investigación. A continuación se describe en profundidad el sistema RECOLAB: su funcionamiento interno, su estructura física, los sistemas físicos manipulables, su interfaz web, etc. Se añade también una breve descripción de las arquitecturas de control implementadas así como las herramientas (bloques Simulink) que permiten tanto su simulación como la ejecución en tiempo real de forma remota a través de Internet. Se exponen algunos ejemplos ilustrativos que muestran el funcionamiento y la validez del sistema RECOLAB. Por último se presentan los resultados y conclusiones más significativas, incluyendo un análisis de su utilización como herramienta de trabajo en el entorno docente a lo largo de varios años en asignaturas de control y automática de la Escuela Politécnica Superior de Elche de la UMH.
- En el capítulo 6 se presenta la aplicación práctica de algunas de las herramientas anteriores en asignaturas relacionadas con el control automático, usando una metodología docente combinada de tipo cooperativo/competitivo, es decir, una metodología en la que los alumnos trabajan en grupos y los grupos compiten entre ellos. En el capítulo se introducen primero las metodologías docentes usadas y posteriormente se describe su aplicación en los últimos años en las sesiones teóricas y, especialmente, en las de laboratorio, en las siguientes asignaturas de la Escuela Politécnica Superior de Elche: Sistemas Electrónicos y Automáticos, Teoría de Circuitos y Sistemas, y Control Avanzado de Sistemas.

- En el capítulo 7 se presentan las conclusiones principales de esta tesis doctoral. Se exponen las aportaciones realizadas, la consecución de los objetivos propuestos en el capítulo 1, así como los trabajos futuros a realizar tanto en el ámbito docente como en el de investigación.



## 2. EL CONTROL AUTOMÁTICO

En la primera parte de este capítulo, y con el objeto de introducir el tema de la presente tesis, se describe el control automático y se muestran diferentes ejemplos de sistemas de control. Estos ejemplos incluyen tanto las aplicaciones más clásicas, que dieron origen al desarrollo del control como área de investigación, como las aplicaciones más innovadoras y actuales.

A continuación, se enumeran las técnicas de control más usuales, de modo que queda patente la gran diversidad de teorías y métodos existentes, así como la complejidad y amplitud de este campo de conocimiento. Entre otros, se describen resumidamente los controladores PID, controladores algebraicos, controladores no lineales, etc.

La parte final del capítulo muestra la necesidad de disponer de equipos experimentales para el diseño y ajuste de sistemas de control. El estudio del bucle de diseño de un controlador deja patente que las pruebas de funcionamiento (tanto en simulación como sobre equipos reales) son imprescindibles para comprobar el cumplimiento de las especificaciones requeridas para el controlador.

### 2.1. ¿QUÉ ES EL CONTROL AUTOMÁTICO?

#### Definición de control automático.

Se entiende por control automático al conjunto de técnicas que permiten gobernar el comportamiento de sistemas dinámicos. En otras palabras, dado un cierto sistema dinámico, se desea que una o más de sus variables de salida se ajusten a valores específicos o *referencias*. Mediante un controlador, se calculan las acciones que es necesario ejercer sobre las variables de entrada del sistema dinámico para conseguir el comportamiento deseado.

El control automático se encuentra presente en la mayor parte de las industrias y bienes de consumo actuales. Puede decirse que sin sistemas de control no existirían ni fábricas, ni vehículos ni dispositivos electrónicos como los que conocemos hoy en día. Un sistema de control es lo que hace que una máquina (en el sentido más amplio de la palabra) funcione de acuerdo a su comportamiento deseado [DOY90].

El diseño de controladores (también denominados *sistemas de control*) es un problema interdisciplinar, en el que se debe considerar tanto su base ingenieril como su base matemática [WCON].

#### Control en bucle abierto frente a control en bucle cerrado.

De acuerdo con la definición anterior de control automático, un controlador es cualquier dispositivo que calcule las acciones a ejercer sobre un equipo para conseguir que su comportamiento siga una cierta referencia. En este sentido, se consideran controladores tanto aquellos que funcionan en bucle abierto como aquellos que funcionan en bucle cerrado:

- Un controlador en bucle abierto es un dispositivo que maneja un equipo físico pero que no comprueba si su funcionamiento es correcto (no comprueba si las variables o señales de salida siguen la referencia deseada).
- Un controlador en bucle cerrado, a diferencia del anterior, comprueba continuamente el valor de las señales de salida para actuar en consecuencia.

La diferencia entre ambos tipos de controladores se puede apreciar más claramente a la vista de los diagramas de bloques de ambos (figura 2.1). Se denomina *realimentación* al proceso de medir las variables de salida del equipo a controlar y enviarlas al controlador para que actúe en consecuencia.

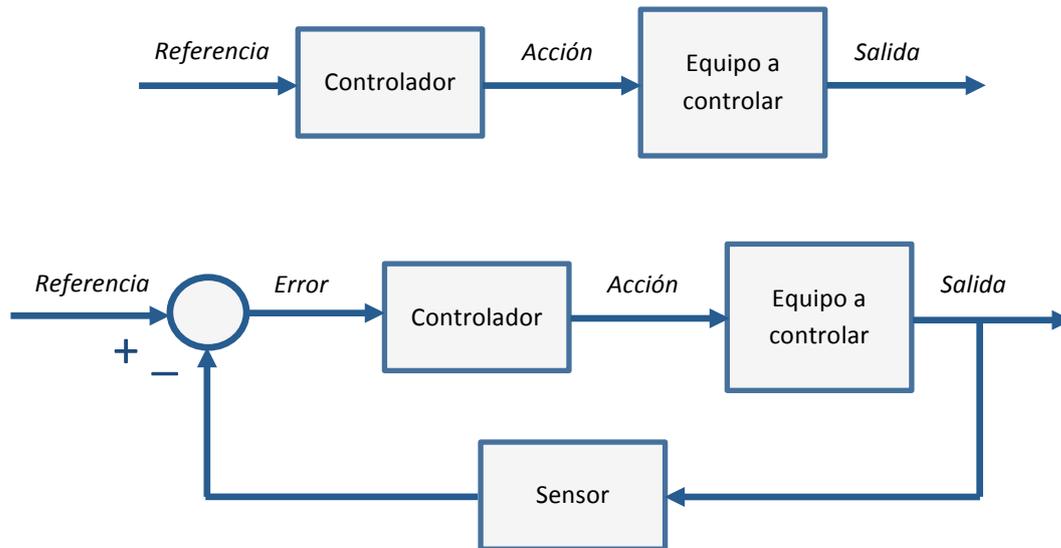


Figura 2.1. Esquemas básicos de control en bucle abierto (arriba) y en bucle cerrado (abajo).

Las técnicas de control en bucle abierto y control en bucle cerrado, aunque aparentemente muy distintas, son en cierto modo complementarias. El control en bucle abierto supone que se dispone de un modelo muy detallado y fiable del sistema o equipo a controlar. Supongamos, por ejemplo, el control de una nave espacial cuyo objetivo fuese minimizar la duración del viaje o el consumo de combustible. Para resolver el problema sería necesario conocer con precisión todos los detalles constructivos de la nave, así como los principios físicos de aplicación durante su viaje, para obtener un modelo completo y fiable del sistema: el resultado sería un plan de vuelo preprogramado. El control en bucle cerrado, sin embargo, considera que cualquier modelo puede ser incompleto o poseer una cierta incertidumbre, con lo que se hace necesario recurrir a la realimentación para corregir desviaciones respecto del modelo deseado. En realidad, el control de vuelo de una nave parte de una trayectoria preprogramada para optimizar tiempo y consumo (control en bucle abierto) que es continuamente vigilada mediante la realimentación de diferentes medidas que permiten ejercer las acciones correctoras necesarias para que la trayectoria real no se desvíe de la trayectoria deseada (control en bucle cerrado). En resumen, ambos tipos de control son complementarios y, aunque se utilice control en bucle cerrado, es fundamental disponer de modelos adecuados de los equipos o sistemas a controlar [SON98].

### Ejemplos de control automático.

A continuación se detallan algunos ejemplos de aplicaciones del control automático, con el objetivo de enfatizar la relevancia de los mismos y su necesidad en la práctica totalidad de las industrias, equipos de investigación y bienes de consumo de nuestros días.

- Control de centrales térmicas. En una central térmica se genera electricidad a partir de diferentes combustibles. El objetivo fundamental es conseguir la máxima eficiencia, pero deben ser tenidos en cuenta otros aspectos como no exceder ciertas temperaturas, presiones, controlar la calidad de la combustión, etc. La figura 2.2 [DORF05] muestra un posible esquema de control en bucle cerrado, en el que se puede apreciar cómo existen múltiples referencias, así como múltiples señales de entrada y salida.

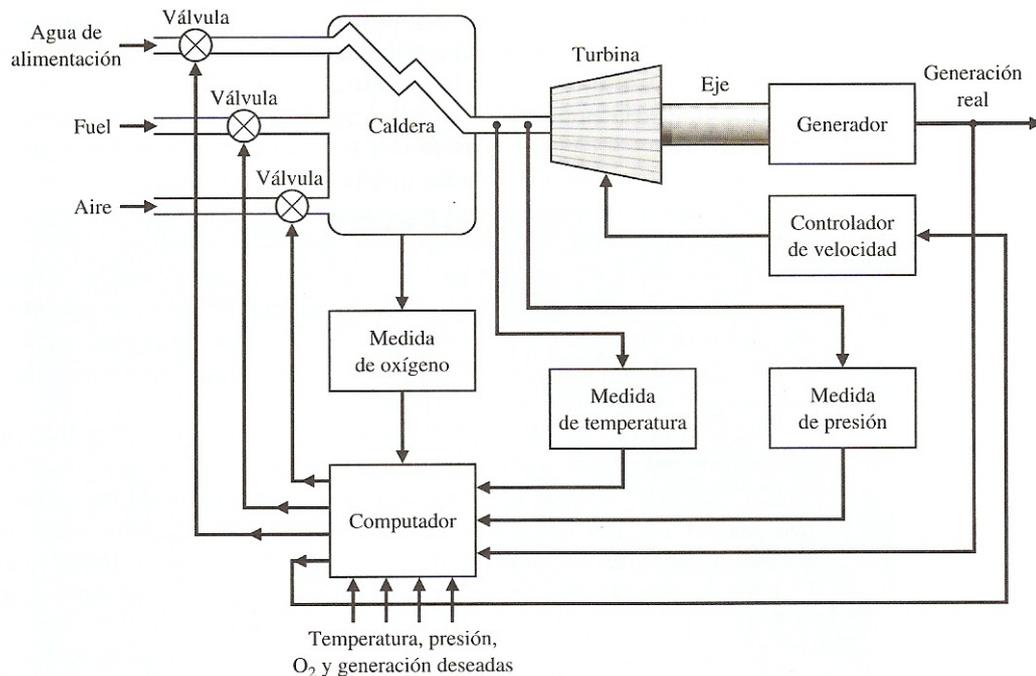


Figura 2.2. Control de una central térmica.

- Control de temperatura del interior de un automóvil. Los sistemas de climatización de ciertos automóviles pretenden regular la temperatura del habitáculo con independencia de la temperatura externa, la radiación solar, etc. La figura 2.3 [OGA03] muestra un esquema simplificado en el cual sólo hay una referencia (temperatura deseada) y una señal de control (acción sobre el aire acondicionado o la calefacción). Otros sistemas más complejos dirigen el aire frío o caliente hacia unos u otros aireadores con el objetivo de mantener la temperatura uniforme en todo el habitáculo o prevenir, por ejemplo, el empañado del parabrisas.

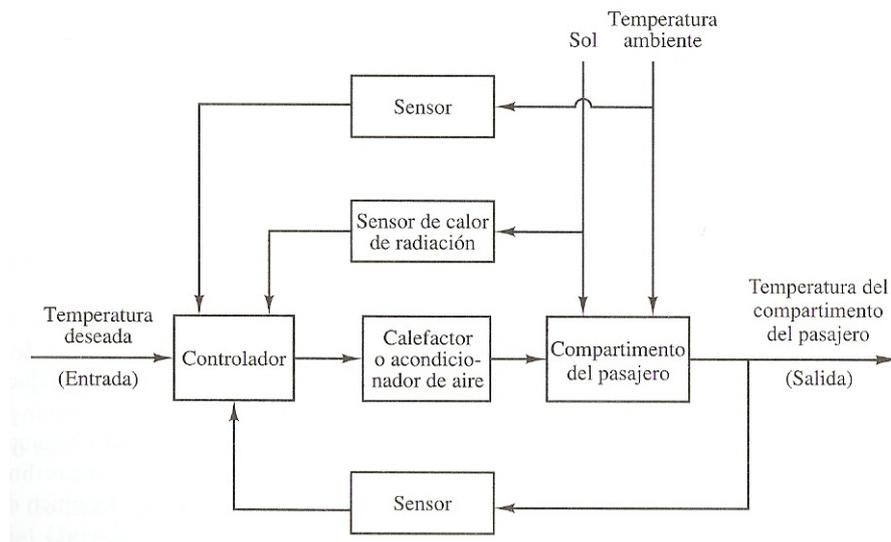


Figura 2.3. Control del sistema de climatización de un automóvil.

- Control de grandes telescopios. Los grandes telescopios, como el telescopio Keck (observatorio de Mauna Kea, Hawaii) necesitan disponer de espejos de gran diámetro, imposibles de construir en una sola pieza. En su lugar, se utiliza una matriz de pequeños espejos hexagonales (en el caso del telescopio Keck, un total de 36 para conseguir un diámetro de 10 metros). Estos espejos deben estar alineados con gran precisión para conseguir la curvatura deseada. Cada uno de ellos dispone de tres actuadores lineales para modificar su orientación; y entre cada par de segmentos se emplean sensores capacitivos que permiten medir la falta de alineación entre los mismos. El sistema de control debe compensar las perturbaciones causadas por: ráfagas de viento, variaciones de temperatura ambiente, cambios de orientación del telescopio, etc. Se utiliza un sistema de control multivariable donde la señal de control es la fuerza a ejercer por cada uno de los actuadores lineales y la salida es el vector de medidas obtenido por los sensores capacitivos. La figura 2.4 muestra esquemáticamente el telescopio mencionado [DOY90].

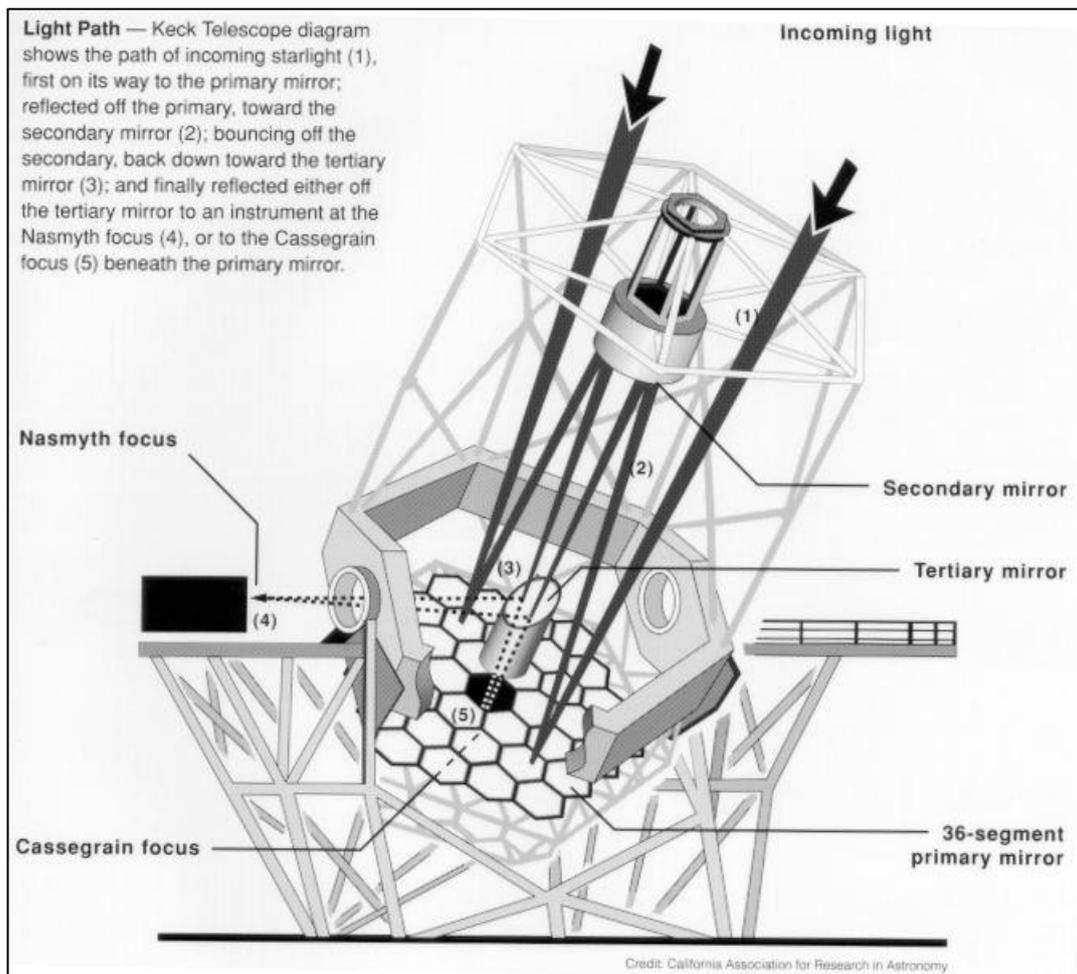


Figura 2.4. Telescopio Keck.

Por supuesto, existen otros muchos ejemplos de sistemas de control. Algunos de ellos serán mencionados a continuación, sin entrar en detalles, para mostrar el amplio abanico de aplicaciones del control automático:

- Control de velocidad de automóviles (control de cruce), que permite mantener la velocidad constante con independencia de la pendiente de la carretera u otras perturbaciones.
- Control del ralentí de un motor, que compensa los efectos de las diferentes cargas que puede soportar el motor al ralentí (aire acondicionado, etc.) y mantiene el régimen de giro constante.
- Control de la velocidad de giro de un disco duro.
- Control de colectores solares para conseguir un seguimiento óptimo del sol.
- Control del laminado de metales en la industria metalúrgica, para conseguir un espesor uniforme.

Además de estas aplicaciones comunes, también es interesante mencionar aplicaciones innovadoras del control automático, como las siguientes:

- Control de materiales inteligentes, como las aleaciones con memoria de forma. El fenómeno de histéresis en estos materiales hace necesaria la utilización de sistemas de control específicos [GOR09].
- Ingeniería inversa de sistemas de control biológicos, a partir de la construcción de modelos matemáticos de los mismos [ANG10].
- Mantenimiento automático de formaciones en vuelo. Un ejemplo de controlador para esta aplicación puede encontrarse en [MENG09].
- Vuelo no tripulado; existen controladores específicos para aviones o para helicópteros, como el presentado en [YUN10].
- Reducción activa del sonido (*active noise reduction* o ANR). El objetivo es eliminar sonidos indeseados mediante la emisión de ondas sonoras en contrafase. Actualmente existen sistemas que funcionan adecuadamente situando los altavoces canceladores próximos a las fuentes de sonido (por ejemplo, motores). La investigación actual pretende ampliar el campo de aplicación de estos sistemas mediante el uso de técnicas de control automático [ZIM03].
- Control de la polución ambiental [ARA10].
- Sistemas de levitación magnética. Se trata de sistemas inherentemente inestables, con lo que es crítico el buen funcionamiento del controlador. Un trabajo relativo a este tema puede encontrarse en [GLU11].
- Control de manipuladores flexibles [BAR10].
- Control de las articulaciones de robots bípedos caminantes. Como ejemplo, un trabajo sobre el robot *Acrobot* [AND10].
- Control coordinado de diversos robots. En [ZHE10] se estudian los problemas que conlleva la limitación de las comunicaciones entre los robots.
- Control bilateral. Cuando en los sistemas de teleoperación se incorpora realimentación de esfuerzos, se habla de control bilateral: los movimientos del dispositivo maestro o joystick se transmiten al dispositivo esclavo (normalmente un brazo robot); al mismo tiempo que los esfuerzos medidos en el brazo robot se reflejan en el joystick para que el usuario pueda manejar el robot más intuitivamente. El control bilateral plantea problemas considerables desde el punto de vista teórico y práctico. Algunos de los trabajos realizados por el autor de la presente tesis en este campo pueden consultarse en [PUER03], [MOB08].

### Orígenes históricos.

Estrictamente hablando, los orígenes del control automático se sitúan en la antigua Grecia. Por ejemplo, una lámpara de aceite inventada por Philon alrededor del año 250 a.C. ya utilizaba un sistema de regulación mediante flotador para mantener constante el nivel de aceite; y en el libro *Pneumatica* de Heron de Alejandría (siglo I d.C.) se describen diferentes mecanismos con flotador para controlar el nivel de agua [MAY75].

Sin embargo, dada su relevancia en la industria, se considera como primer ejemplo de controlador automático el regulador centrífugo de James Watt. Este regulador permitía controlar la velocidad de una máquina de vapor de un modo completamente mecánico. La figura 2.5 [DORF05] muestra un esquema de este dispositivo: mediante una transmisión, el movimiento del eje de salida del motor se transmite a un dispositivo medidor, compuesto por dos esferas de metal que giran alrededor de un eje, alejándose más del mismo cuanto mayor es la velocidad de giro. Esta separación del eje, mediante reenvíos mecánicos, actúa sobre una válvula que regula la cantidad de vapor que entra en la máquina. De este modo, cuando la velocidad es superior a la deseada, el excesivo alejamiento de las bolas de metal respecto del eje provoca un cierre de la válvula, reduciéndose el caudal de vapor y por tanto la velocidad del motor. Del mismo modo, cuando la velocidad es inferior a la deseada, se produce el efecto inverso.

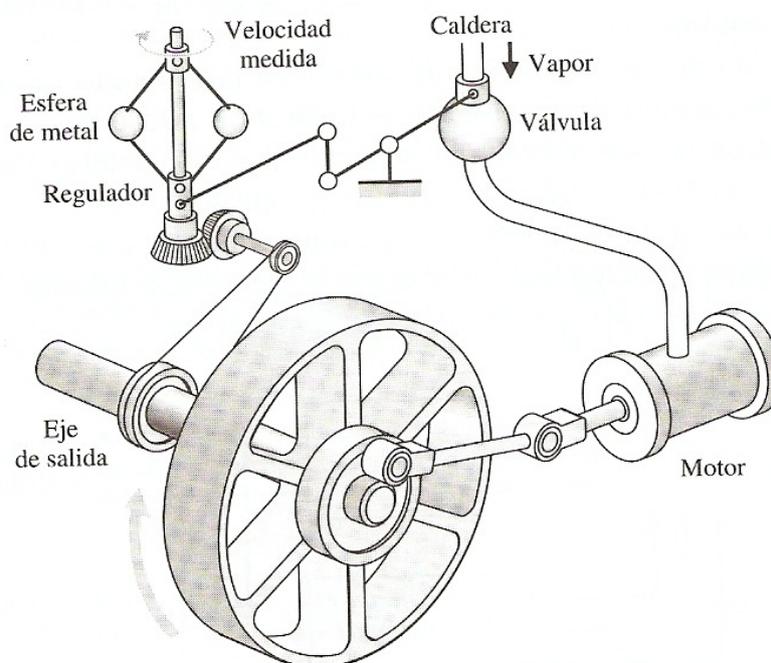


Figura 2.5. Regulador de velocidad de Watt.

Estos primeros reguladores hicieron necesario el desarrollo de una teoría sobre el control automático, dado que presentaban graves problemas: cuando intentaba

umentarse la exactitud en el seguimiento de las referencias de velocidad, aparecían oscilaciones e incluso inestabilidades.

El estudio más formal de este campo comienza con un análisis dinámico del controlador centrífugo realizado por James Clerk Maxwell en 1867 [MAX67]. En esta obra ya se analizan los problemas de sobreoscilación e inestabilidad asociados a ciertos sistemas. Los trabajos de John Routh, generalizando los resultados de Maxwell para sistemas lineales [ROU77]; y los trabajos de Adolf Hurwitz, analizando el problema de la estabilidad desde el enfoque de las ecuaciones diferenciales [HUR64], dieron lugar al conocido teorema de Routh-Hurwitz, utilizado todavía en la actualidad.

El estudio de los reguladores en el dominio de la frecuencia se desarrolló con los trabajos de Bode y Nyquist, aplicados a amplificadores electrónicos con realimentación, de uso en el sistema telefónico de Estados Unidos [BELL64]. Por otra parte, el estudio de los reguladores en el dominio del tiempo, mediante ecuaciones diferenciales se desarrolló de forma prácticamente paralela en Rusia.

La Segunda Guerra Mundial supuso un nuevo desarrollo de la teoría y las aplicaciones del control automático: electrónica, sistemas de guiado para armas, pilotos automáticos para los aviones, etc. Por otra parte, los procedimientos tradicionales de prueba y error para el ajuste de controladores dejaron paso progresivamente a métodos matemáticos.

La carrera espacial también hizo necesarios nuevos avances en el control automático. Alrededor de 1950, la investigación en control automático se centró en el uso de la transformada de Laplace y el lugar de las raíces. Posteriormente, en 1970 se desarrollan los modelos de variables de estado. También en la década de los 70 aparecen los sistemas de control óptimo; y una década después el llamado control robusto. Progresivamente, los controladores digitales van reemplazando a los analógicos, gracias al uso de los microprocesadores.

Actualmente, la utilización de sistemas de control está completamente generalizada, y los controladores están presentes en prácticamente todas las industrias y toda la tecnología de nuestros días.

### 2.2. PRINCIPALES TÉCNICAS DE CONTROL

#### Primera clasificación: control analógico frente a control digital.

Existen dos posibles formas de implementar un controlador: mediante electrónica analógica o mediante computador. El primer caso corresponde al control analógico o continuo; mientras que el segundo caso corresponde al control digital o discreto.

En ambos casos, el controlador realiza operaciones sobre sus datos de entrada para calcular la acción que es necesario ejercer sobre el sistema a controlar. La diferencia estriba en la complejidad de operaciones que es posible alcanzar: mientras que un controlador analógico se tiene que limitar a las operaciones que permiten los dispositivos electrónicos continuos (sumas de señales, multiplicaciones, derivadas, integrales, filtrados analógicos), un controlador digital puede realizar cualquier operación de la que sea capaz un programa de ordenador. Por tanto, las estrategias de control más complejas sólo podrán realizarse mediante controladores digitales. En general, el control analógico se limita a los controladores denominados PID (proporcional, integral, diferencial) que se describen en el siguiente apartado.

Por otra parte, es importante destacar las grandes diferencias entre controladores analógicos y digitales en cuanto a las herramientas matemáticas a utilizar para su modelado y diseño. Mientras que las principales herramientas matemáticas necesarias para los controladores analógicos son las ecuaciones diferenciales y la transformada de Laplace, en el caso de los controladores digitales se utilizan las ecuaciones en diferencias y la transformada Z.

#### Controladores PID.

El controlador más comúnmente utilizado en la mayor parte de las aplicaciones es el llamado controlador PID, cuyas iniciales corresponden a:

- P: efecto proporcional
- I: efecto integral
- D: efecto diferencial

Efecto proporcional:

Genera una acción de control proporcional al error. Es el efecto más corriente y más intuitivo: si el error es positivo (la señal de salida tiene un valor inferior a la referencia pedida), es necesario aumentar el valor de la acción sobre el sistema; si es negativo

(señal de salida con valor excesivo) será necesario reducir la acción. La constante de proporcionalidad  $K_p$  relaciona el error con la acción de control. Si llamamos  $e(t)$  a la señal de error y  $a(t)$  a la acción sobre el sistema, el efecto proporcional se puede expresar como:

$$a(t) = K_p \cdot e(t)$$

Efecto integral:

En algunos casos, la aplicación de un efecto proporcional no consigue que el sistema alcance el valor de referencia indicado, aún después de un prolongado periodo de tiempo. Se dice que el sistema presenta error en régimen permanente. En estos casos la mejor opción es recurrir a un efecto integral, que no actúa en función del error sino en función de la integral del error. De este modo, mientras la referencia no sea alcanzada la integral del error no parará de crecer, y con ella la acción de control sobre el sistema, hasta que la acción sea suficiente para llevar al sistema al punto deseado. La constante propia del efecto integral se denominará  $K_i$ , con lo que la relación entre error y acción de control será:

$$a(t) = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau$$

Efecto diferencial:

Este efecto busca conseguir un comportamiento más suave del sistema de control. Utilizando exclusivamente los efectos anteriores, la forma de alcanzar el valor de referencia puede ser excesivamente brusca, presentando picos de sobreoscilación excesivos. Para evitar este problema, se introduce un efecto extra que es el efecto diferencial: la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error. Esto evita que el sistema pase de largo la referencia: si la derivada del error es negativa (nos acercamos a la referencia) el efecto derivativo 'frena' ligeramente la acción de control. La constante propia de un efecto derivativo se denomina  $K_D$ ; y la expresión resultante queda:

$$a(t) = K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Un controlador PID presenta los tres efectos simultáneamente:

$$a(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

El ajuste o la sintonización de un regulador consiste en elegir los valores para  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_D$  que consiguen un funcionamiento adecuado del sistema (en términos de tiempo de

respuesta aceptable, pico de sobreoscilación aceptable, etc.). Existen tanto procedimientos analíticos (lugar de las raíces, compensación en frecuencia, etc.) como métodos experimentales (El ampliamente conocido método de Ziegler-Nichols [ZIE42] o procedimientos más simples de prueba y error, basados en la experiencia del usuario) que permiten el ajuste correcto de estos parámetros.

La explicación realizada sobre el regulador PID se ha ceñido al caso analógico o continuo. En este tipo de controladores, tanto la señal de error como la acción, o señal de entrada a la planta a controlar son continuas y por lo tanto diferenciables. En el caso de controladores discretos, que trabajan con secuencias en lugar de señales continuas, existen también controladores PID. Estos controladores tienen un comportamiento similar para los parámetros proporcional, integral y derivativo, pero unas bases matemáticas diferentes dado que las señales sobre las que trabajan no son diferenciables.

### Controladores algebraicos.

Los controladores algebraicos parten de un modelo preciso de la planta a controlar. Su función de transferencia se diseña específicamente para conseguir el funcionamiento deseado del sistema: la idea fundamental es modificar la dinámica de la planta a controlar (mediante cancelación de polos o técnicas similares) e introducir una dinámica nueva, adecuada a nuestros propósitos. Estas nuevas dinámicas pueden buscar la eliminación del error en el menor número de ciclos posible (controladores de tiempo mínimo); la eliminación del error en el menor tiempo posible pero evitando oscilaciones ocultas (controladores de tiempo finito); o cualquier otra característica deseada para la dinámica del sistema.

### Control adaptativo.

El control adaptativo modifica sus parámetros continuamente en función de las características del sistema a controlar. Para ello, realiza continuos procesos de identificación de la planta (sistema a controlar) durante el funcionamiento de la misma [AGU03]. Es posible utilizar técnicas adaptativas con prácticamente cualquier controlador (por ejemplo, hay versiones adaptativas del control PID); y existen múltiples métodos de identificación diferentes, lo que da lugar a un gran abanico de controladores. El control adaptativo se empleó por primera vez en la industria aeroespacial en los años 50.

### Control jerárquico.

Se entiende por control jerárquico a la estructura de control en la existen controladores a diferentes niveles, actuando los de nivel superior como supervisores de los controladores de nivel inferior. El ejemplo más claro correspondería a una industria en la que cada uno de los procesos intervinientes dispone de su propio bucle de control. A un nivel superior, pueden existir controladores que supervisan el funcionamiento de los anteriores, coordinando su actuación. De este modo, puede diseñarse un sistema con tantos niveles como se crea conveniente. Normalmente, los sistemas de control jerárquico utilizan una red de comunicaciones para la transmisión de información.

### Control inteligente.

Cuando se emplean técnicas de inteligencia artificial tanto para la implementación del bucle de control como para la identificación de la planta a controlar se habla de control inteligente. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran las redes neuronales, los métodos bayesianos, la lógica borrosa, los algoritmos genéticos, etc.

### Control óptimo.

Del mismo modo que los controladores PID trabajan teniendo en cuenta únicamente la señal de error (diferencia entre la salida del sistema y el valor deseado para la misma o referencia), los controladores óptimos definen una función de coste a optimizar. Continuando con el ejemplo del control de trayectoria de una nave utilizado al principio de este capítulo, posibles funciones de coste incluirían el consumo de combustible y el tiempo tardado en alcanzar el destino, que deberían minimizarse. Se trata de controladores bastante utilizados en aplicaciones industriales (los más utilizados después de los controladores PID).

### Control robusto.

El objetivo del control robusto es funcionar adecuadamente cuando el modelo que se dispone de la planta o equipo a controlar no es completamente fiable. Siempre que las desviaciones respecto del modelo nominal no sean excesivas, un controlador robusto funcionará adecuadamente. Aunque el control robusto es una técnica de control en sí misma, cabe también plantearse la robustez de otros métodos tradicionales; así, los controladores PID ajustados en el dominio de la frecuencia son razonablemente

robustos; mientras que controladores basados en el espacio de estados adolecen en algunos casos de falta de robustez. El ejemplo más conocido de controlador robusto es el controlador H-infinito. El objetivo del controlador H-infinito es minimizar el efecto de las perturbaciones; bien su efecto sobre la estabilidad o bien su efecto sobre las prestaciones del sistema.

### Control estocástico.

El control estocástico se basa en considerar tanto el modelo de la planta a controlar como el controlador en sí mismo variables probabilísticas, de modo que siempre se supone que existen ruido aleatorio y perturbaciones en ambos sistemas. El objetivo del controlador es optimizar las prestaciones medias esperables para el sistema, teniendo en cuenta que estas prestaciones se describen como una función de coste.

### Control no lineal

La mayor parte de los desarrollos matemáticos en teoría de control asumen que los sistemas son lineales e invariantes en el tiempo. Cuando las desviaciones respecto de esta suposición son pequeñas, los sistemas de control tradicionales ofrecen buenos resultados; pero cuando las desviaciones son importantes (sistemas fuertemente no lineales) se hacen necesarios métodos específicos. Entre las técnicas más conocidas para el estudio de sistemas de control no lineales se encuentran el análisis de estabilidad de Lyapunov o el criterio de Popov. Un trabajo del autor de la tesis referente a control no lineal puede encontrarse en [TAOU97], [PUE95]; otros estudios se pueden consultar en [SLO91] o [SIRA05].

### Controladores multifrecuencia.

La mayor parte de los sistemas de control digitales considera que todas las señales intervinientes (básicamente, medidas de los sensores y órdenes hacia los actuadores) se muestrean a la misma frecuencia. Sin embargo, la situación real en muchas aplicaciones es diferente: en ocasiones es posible actuar sobre el sistema con mayor frecuencia de la que permitirían las lecturas de los sensores; en otros casos los sensores presentes en el sistema tienen tiempos de respuesta muy diferentes; etc. Tradicionalmente, en estos casos se adoptaba para el conjunto de señales intervinientes en el control la frecuencia más lenta de todas. Esta estrategia limita fuertemente las prestaciones del sistema de control, por lo que actualmente existen controladores diseñados específicamente para trabajar con múltiples frecuencias. En el

apartado 4.2.1 de la presente tesis se describe en detalle el control multifrecuencia y se muestran los desarrollos realizados por el autor en este campo.

### Control en red.

La utilización de redes de comunicación ha supuesto una revolución tanto en la industria en general como en la automoción o la aviación [CASA05]. Gracias a las redes, el cableado necesario para conectar todos los sensores, controladores y actuadores presentes en una fábrica o en un vehículo se ha reducido drásticamente, permitiendo un ahorro sustancial en costos, así como un mejor aprovechamiento del espacio y una reducción del peso; estos dos últimos factores son especialmente relevantes tanto en los automóviles como en los aviones. Actualmente, a las redes industriales tradicionales como CAN (*Controller Area Network*) o PROFIBUS se han incorporado redes de propósito general como Ethernet, debido a su menor coste. La figura 2.6 muestra un esquema genérico de control en red.

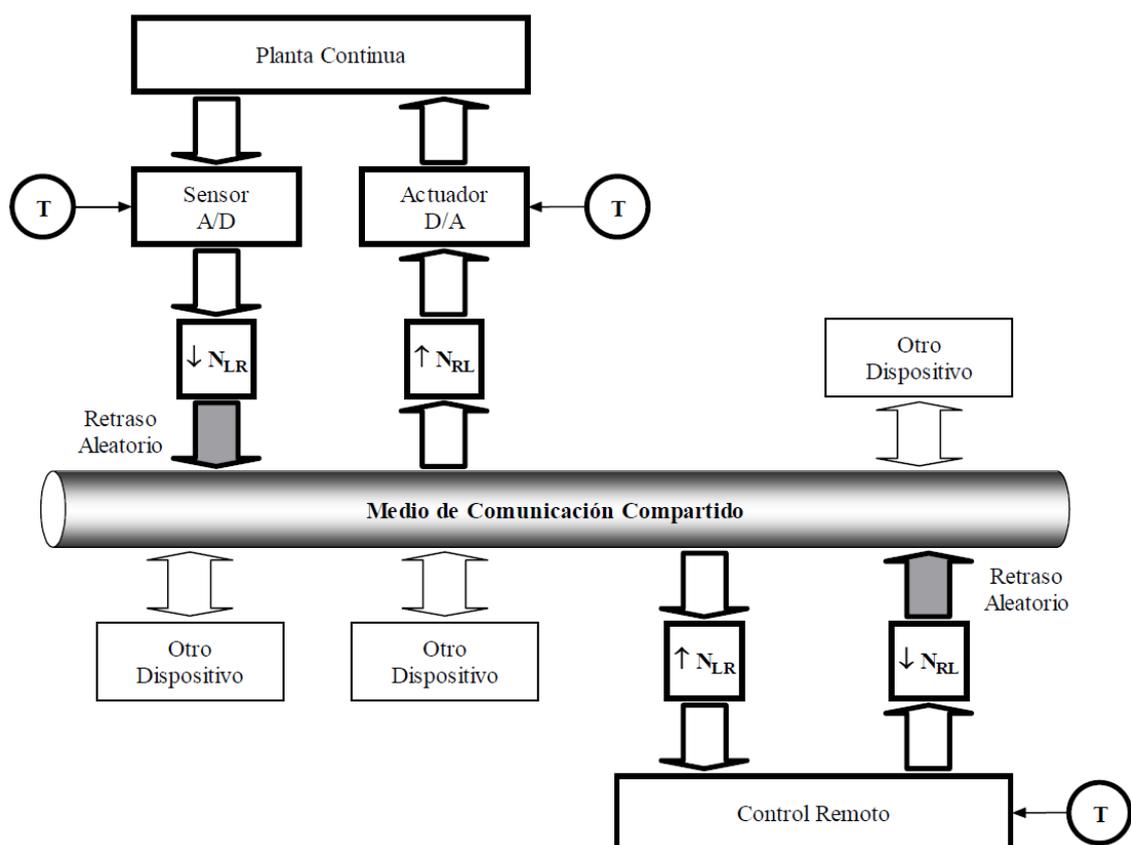


Figura 2.6. Esquema básico de control en red.

En la figura puede apreciarse cómo existe un único canal de comunicación por el que se transmiten las señales de todos los sensores, así como las órdenes para todos los actuadores.

Esta utilización de redes de comunicaciones como parte del bucle de control plantea problemas importantes desde el punto de vista del diseño de los controladores. En general, una de las principales causas de inestabilidad en un sistema realimentado son los retrasos; y los retrasos son inherentes a las redes de comunicaciones. Adicionalmente, también es necesario tener en cuenta las posibles pérdidas de información, lo que dificulta aún más el diseño del sistema de control.

Por todo ello, el control en red necesita técnicas específicas. Algunas de las estrategias más utilizadas incluyen el control multifrecuencia descrito en el apartado anterior, así como otras opciones: métodos robustos de control, controles basados en lógica borrosa, utilización de predictores, etc.

### 2.3. NECESIDAD DE EQUIPOS EXPERIMENTALES PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

El proceso general de diseño de un controlador engloba múltiples etapas, entre las cuales inevitablemente se encuentran las pruebas experimentales (tanto en simulación como sobre sistemas reales). Esto hace imprescindible disponer de equipos sobre los que realizar las pruebas.

El proceso completo de diseño puede seguir un ciclo como el que se muestra a continuación [DOY90]:

1. Estudio del sistema o equipo a controlar para determinar cuáles son los sensores, actuadores necesarios, y cuál es su emplazamiento ideal.
2. Modelado del sistema completo resultante, incluyendo los sensores y adaptadores.
3. En caso necesario, simplificación del modelo si el modelo original es excesivamente complejo y por tanto intratable matemáticamente.
4. Análisis del modelo definitivo para conocer su comportamiento en bucle abierto.
5. Decidir el comportamiento deseado para el sistema en bucle cerrado: estas serán las especificaciones para el desarrollo del controlador.
6. Decidir el tipo de controlador a utilizar.
7. Ajustar el controlador elegido para intentar cumplir las especificaciones; en caso de no ser posible, elegir otro controlador (volver al paso 6) o establecer otras especificaciones menos restrictivas (volver al paso 5).

8. Simular el sistema controlado resultante sobre un entorno virtual. Si es posible, simular también el sistema controlado sobre una planta piloto.
9. En caso de no lograr los objetivos deseados, volver al paso 1 (elección de sensores y actuadores).
10. Decidir el hardware y software adecuados para el controlador diseñado e implementar el controlador.
11. Ajustar definitivamente el controlador sobre el entorno de funcionamiento real.

A la vista del proceso anterior, queda claro que tanto las herramientas de simulación como los equipos experimentales son fundamentales para el correcto diseño de un controlador. Esta necesidad no sólo afecta a la investigación en control, sino también a la docencia en control, en la cual el componente práctico es fundamental.

La necesidad de realizar pruebas experimentales (bien en simulación, bien sobre plantas piloto) también queda patente si se tiene en cuenta que los modelos de los sistemas a controlar utilizados en las etapas de análisis y diseño pueden diferir sustancialmente respecto de los sistemas reales.

Se puede obtener un modelo por dos procedimientos diferentes:

- Procedimiento 1: Modelo a partir de leyes físicas.

Es el método más habitual. Se plantean las ecuaciones diferenciales correspondientes a cada elemento del sistema, aplicando las leyes físicas adecuadas en los ámbitos necesarios (cinemático, dinámico, eléctrico, electromagnético, etc.) realizando las aproximaciones e idealizaciones necesarias. Si bien este método de obtener el modelo es adecuado para sistemas electromecánicos en general (robots, vehículos, naves espaciales); su aplicación en sistemas más complejos no es factible por el desconocimiento de las leyes físicas que los rigen.

- Procedimiento 2: Modelo a partir de ensayos experimentales.

Es posible también obtener un modelo para el sistema o planta a controlar a partir de la realización de ensayos sobre el mismo; en este caso hablaríamos de *identificación* de sistemas. Suponiendo una planta extremadamente sencilla que sólo dispusiera de una señal de entrada y una señal de salida, el objetivo sería conocer la forma en la que las variaciones en la señal de entrada afectan a la señal de salida. Los experimentos consistirían en aplicar diferentes señales de entrada de prueba (por ejemplo, señales tipo escalón, señales senoidales) y registrar el comportamiento de la señal de salida en cada caso. Mediante procedimientos

matemáticos y numéricos es posible obtener un modelo del sistema coherente con las relaciones obtenidas entre la señal de entrada y la señal de salida.

Por lo general, puede aplicarse un enfoque mixto en el que las leyes físicas son utilizadas para obtener un modelo inicial, y ese modelo inicial es refinado a partir de ensayos experimentales. En cualquier caso, el modelo final puede no representar con fiabilidad el comportamiento real del sistema.

Consideremos en primer lugar las posibles fuentes de error en los modelos obtenidos a partir de leyes físicas. Si consideramos en más detalle el proceso de obtención de un modelo matemático, podemos hablar de cuatro niveles diferentes de simplificación:

**Nivel 1: Sistema físico real.** Es el equipo que deseamos controlar.

**Nivel 2: Sistema físico ideal.** Es el resultado de descomponer el sistema físico real en cada uno de sus bloques constitutivos (componentes eléctricos, componentes mecánicos, fluidos, etc.). Se introducen simplificaciones a todos los niveles: componentes eléctricos lineales; fluidos Newtonianos; medios isótropos; etc.

**Nivel 3: Modelo matemático ideal.** Se obtiene mediante las leyes físicas de aplicación a cada uno de los componentes del sistema físico ideal; por lo tanto se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales. Normalmente no se considera el efecto de la no invariancia en el tiempo de las ecuaciones de comportamiento reales.

**Nivel 4: Modelo matemático reducido.** Se obtiene a partir del modelo matemático ideal añadiendo simplificaciones adicionales, siendo la linealización la más importante de ellas. El resultado final suele expresarse en forma de función de transferencia.

Consideremos a continuación los modelos obtenidos a partir de la realización de experimentos. En este caso, podemos hablar de tres problemas que impiden el correcto modelado del sistema:

**Problema 1:** Si se repite el mismo experimento (aplicación de una señal de entrada de prueba y registro de la señal de salida obtenida) un cierto número de veces, los resultados no serán uniformes. Habrá una variabilidad que no se podrá expresar matemáticamente como relación entre la entrada y la salida, sino como un nivel de aleatoriedad o de no-determinismo.

**Problema 2:** Si el experimento realizado consiste en no aplicar ninguna entrada al sistema (asumiendo que se parte de una situación de equilibrio), el resultado deseable sería un mantenimiento de la situación de equilibrio. Sin embargo, los

resultados reales mostrarán una mayor o menor fluctuación de la señal de salida, aún en ausencia de variaciones de la señal de entrada. De nuevo se trata de un comportamiento no determinista.

**Problema 3:** Idealmente, se busca un modelo consistente con cualquier par de señales de entrada y salida que puedan presentarse en el sistema real. Sin embargo, el número de experimentos que es posible realizar es, obviamente, finito; y por tanto es necesario seleccionar un subconjunto de señales más o menos representativo del conjunto de señales posibles.

Tanto en el caso de los modelos obtenidos a partir de las leyes físicas como en el caso de los modelos obtenidos experimentalmente, queda claro que las diferencias respecto de los sistemas reales pueden ser considerables. Ningún modelo matemático puede modelar con total fiabilidad un sistema real: siempre existirá un mayor o menor grado de incertidumbre.

Podría plantearse considerar dentro del propio modelo la falta de determinismo, como un término adicional que indicase las máximas desviaciones posibles respecto del comportamiento nominal. Con esta información, un control robusto podría asegurar el correcto funcionamiento del sistema en cualquier condición. No obstante, este tipo de modelado no es factible en la mayor parte de los casos, dado que no es posible determinar con precisión los márgenes de error a utilizar.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, siempre hay que considerar que los modelos de los sistemas a controlar no son completamente fiables: aportan una gran información para el diseño del controlador y sirven como base para las simulaciones, pero no pueden sustituir a los equipos experimentales reales. Por tanto, en el campo del control automático es de gran importancia el desarrollo de equipos experimentales y metodologías de experimentación. Éste es uno de los aspectos en los que se centra la presente tesis.

Antes de describir las propuestas realizadas, en el siguiente capítulo se realiza un estudio exhaustivo del estado del arte actual en cuanto a herramientas y equipos experimentales para el ensayo de algoritmos de control.



# 3. TRABAJOS PREVIOS EN LABORATORIOS PARA CONTROL AUTOMÁTICO

En este capítulo se presentan algunos trabajos previos relacionados con la temática de la tesis. Se ha dividido en tres apartados: laboratorios remotos, herramientas libres o gratuitas para laboratorios docentes y de investigación, y técnicas de aprendizaje cooperativo/competitivo. Los trabajos previos presentados aquí se han centrado en la docencia en Ingeniería en general y, dentro de ella, se han destacado los trabajos en Control Automático, que es el área de aplicación del trabajo de la tesis.

## 3.1. SITUACIÓN ACTUAL EN LABORATORIOS REMOTOS PARA EDUCACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO

Los laboratorios remotos y virtuales son herramientas útiles para la enseñanza del control automático de procesos. Como se ha demostrado en numerosos trabajos, pueden emplearse para explicar los conceptos básicos del control, para mostrar los problemas desde nuevas perspectivas, y para ilustrar cuestiones relativas al análisis y diseño y todo ello sin las limitaciones que supone estar situado físicamente junto a los equipos de laboratorio [JOH98], [WIT98], [DOR04].

El desarrollo de los laboratorios remotos de monitorización y control a distancia comenzó en la última década del siglo XX gracias a la llegada de las tecnologías de la información, tales como la familia de protocolos de Internet. Estos desarrollos hicieron posible el diseño de laboratorios remotos para educación en automática, como se ha demostrado en numerosos trabajos [HAH00], [CEF03], [CAS04], [VAL05], [EIK06], [COS09], [BRI09], [COS10].

En 1991 surgió una de las primeras aplicaciones de control y monitorización remota: la primera cámara web, con el proyecto Trojan [STA01]. Con la llegada del protocolo HTTP en 1993, fue posible una mayor difusión de las aplicaciones en Internet, entre

ellas la posibilidad de realización de tareas físicas interactivas a través de Internet conocidas ya en aquella época como *laboratorios remotos*. El sistema descrito en [GOLD99] es considerado como el primer laboratorio *online* que usó el protocolo HTTP y su correspondiente interfaz. La aplicación consistía en el manejo de un robot Sankyo modelo IBM SR5427 con una cámara acoplada y fue diseñada para funcionar 24 horas al día por usuarios no especializados.

Uno de los problemas que surgieron en las primeras aplicaciones de laboratorios remotos fue la interactividad de múltiples usuarios que están trabajando simultáneamente y el acceso limitado a los dispositivos que se están operando. El problema del acceso concurrente de los usuarios fue abordado por primera vez de forma general en el proyecto *Telegarden*, descrito en [MAS95]. Este laboratorio remoto usaba un robot Adept-1 con una estructura de control multitarea con la que varios operadores podían colaborar simultáneamente en el cuidado de un jardín. Ese mismo año se desarrolló en la Universidad Carnegie Mellon el proyecto Xavier [SIM00], en el que se controlaba un robot autónomo desde Internet, cuyo principal logro fue la implementación de las interacciones remotas sobre un vehículo móvil y autónomo.

Tras estas primeras experiencias a nivel investigador y debido a las limitaciones de los laboratorios presenciales tradicionales y la evolución progresiva de las tecnologías de enseñanza y aprendizaje, se produjeron los primeros desarrollos de una nueva generación de laboratorios remotos para complementar las prácticas docentes reales. Con este nuevo tipo de laboratorios un experimento puede ser observado desde un lugar distante a través de Internet, pueden enviarse mensajes o datos a un proceso servidor (*control remoto*) y pueden realizarse tareas y actividades junto con otros usuarios (*aprendizaje colaborativo y cooperativo*).

Con estas motivaciones en 1995 la Universidad de Tennessee demostró el uso de la herramienta Labview de National Instruments para el control de procesos a distancia en el proyecto *Web-Lab* [HEN96]. Relacionado con este trabajo, en [TRA00] se describen diferentes formas de usar las tecnologías de Internet para crear sistemas de adquisición de datos controlables o accesibles remotamente como el desarrollado en el laboratorio de la Universidad de Stanford para medir las propiedades físicas de un diodo láser. Este laboratorio, descrito en [HES00] disponía de herramientas de análisis, planificación de tareas del laboratorio docente y contenido bibliográfico para los alumnos, siendo uno de los primeros laboratorios virtuales completos de uso educativo.

Más recientemente, la aparición de numerosas herramientas de desarrollo virtual han motivado a universidades y grupos de investigación a diseñar nuevos entornos de enseñanza-aprendizaje interactivos [GUZ07]. En los laboratorios MerLab [PIP09] y Telelabs [RAE04] se presentan varios entornos virtuales desarrollados con Labview que

permiten la experimentación con brazos robóticos y sistemas mecánicos. Estas herramientas de programación también son usadas en [PEE05], donde se describen los requerimientos necesarios para el diseño de un laboratorio virtual docente que sea efectivo y flexible vía web, incluso a pesar de tratar problemas avanzados de Ingeniería de Control. En esta misma línea, en [LUT06] se describe la plataforma *Connexions* para el procesamiento de señales mediante simulaciones interactivas.

En proyectos más recientes, la integración de Matlab y Simulink es habitual para el desarrollo de aplicaciones interactivas remotas, como por ejemplo en el laboratorio de control de la Universidad de Siena [CAS04]. Aunque Matlab y Simulink son las herramientas más habituales, también se han utilizado otros paquetes software para la implementación de laboratorios remotos/virtuales. Dos de ellas son Sysquake y Easy Java Simulations. Sysquake [SYS04], [PIG06] es un entorno parecido a Matlab para el desarrollo de laboratorios virtuales con interactividad. Easy Java Simulations [ESQ04] es una herramienta software para el desarrollo de laboratorios virtuales con interactividad en tiempo de ejecución. Estas herramientas permiten el desarrollo de forma rápida de interfaces de usuario gráficos. Las herramientas desarrolladas en la presente tesis se han desarrollado usando Matlab, Sysquake y el entorno de libre distribución Scilab/Scicos.

En España se han desarrollado numerosas herramientas para laboratorios docentes remotos dentro del área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Existe una lista proporcionada por el Grupo de Educación en Automática del CEA (disponible en [WCEA]) con numerosos enlaces a laboratorios docentes virtuales y remotos.

Un referente nacional en el campo del Control y la Automática es *AutomatL@bs* [WAUTO], una experiencia docente interuniversitaria cuyo objetivo fundamental es la creación de una red de laboratorios virtuales y remotos para la realización de prácticas a través de Internet. La iniciativa de este proyecto ha sido promovida con la participación de varios grupos de investigación de universidades españolas. Los orígenes se remontan al año 2000, cuando en la Universidad Politécnica de Valencia se organizaron las I Jornadas de Trabajo sobre Enseñanza vía Internet-Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática. Como continuación natural de los proyectos *DocenWeb* en el 2004 y *Educ@* en el 2005-2006, se creó el proyecto *e-Automatica* coordinado por el grupo Aurova de la Universidad de Alicante (figura 3.1). Desde entonces, el Grupo Temático de Educación en Automática del Comité Español de Automática (CEA) ha sido el catalizador de varias acciones financiadas que ha dado, como uno de sus resultados tangibles, la creación de *AutomatL@bs*. Uno de los aspectos notables a destacar, es la coordinación de los esquemas de trabajo y contenido, lo que es percibido por los usuarios como un laboratorio de estructura uniforme independiente de la localización física de los sistemas. Una de las mejoras

realizadas respecto de otros proyectos similares ha sido la integración de aplicaciones realizadas con EJS (*Easy Java Simulation*) [WEJS] y *eMersion*, como un nuevo servicio para completar las sesiones de experimentación de los alumnos a través de una consola de experimentación en línea [VAR09].

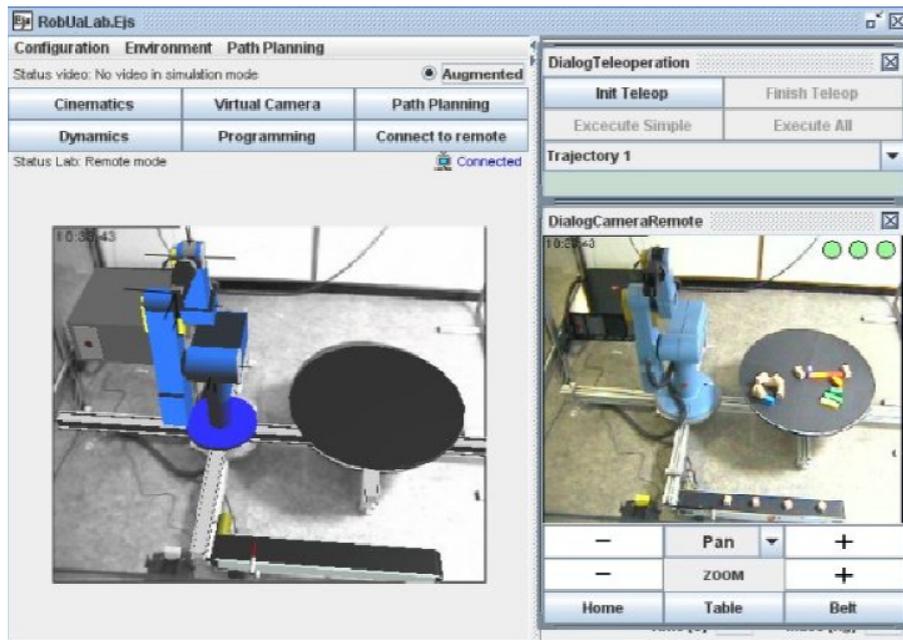


Figura 3.1. Sistema del grupo Aurova, Universidad de Alicante.

Algunos de los proyectos que componen el grupo de laboratorios remotos y virtuales de *AutomatL@bs* son los siguientes:

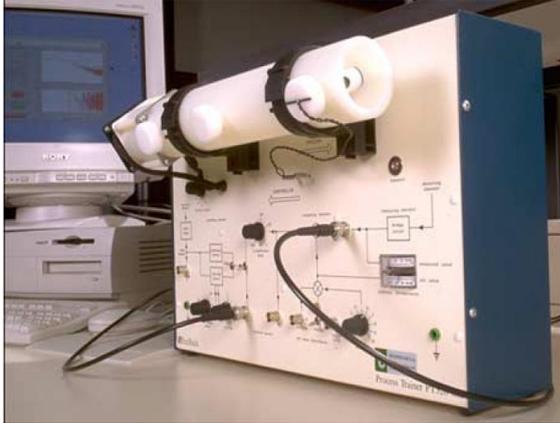
- El control de servomotores (Universidad Miguel Hernández).
- Prácticas sobre procesos multivariables mediante el sistema de tres tanques, el control de velocidad y posición de motores de continua, la estimación de parámetros del sistema de control del flujo de temperatura (Universidad Nacional de Educación a Distancia).
- Control de nivel del sistema de un tanque (Universidad de Almería).
- Control de nivel y temperatura en un sistema de cuatro variables (Universidad de León).

- Control de posición de bola sobre una viga horizontal (Universidad Politécnica de Valencia).
- Control sobre un sistema manejado por campos magnéticos (Universidad Politécnica de Cataluña).
- Control de un brazo robot (Universidad de Alicante).

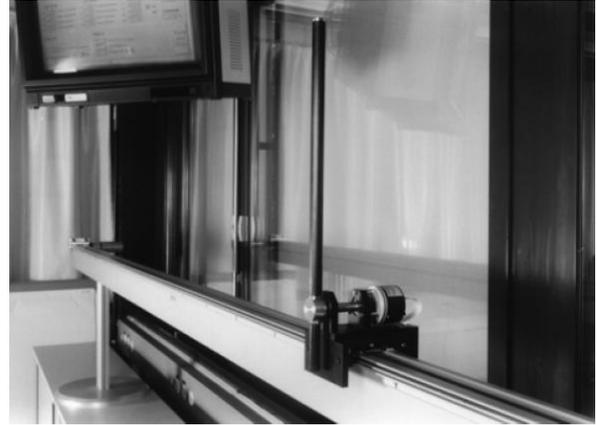
A nivel europeo, el proyecto *ProLEARN* es un consorcio de universidades y centros de investigación pertenecientes a varios países, entre ellos España, cuya participación está representada por la Universidad Politécnica de Madrid. La finalidad de *ProLEARN* es proveer un catálogo web para experimentos online basado en un esquema especial de *metadatos*. Su función es proporcionar un listado que facilite el acceso a los experimentos existentes e integrarlos con la ayuda de un entorno técnico y una base de conocimientos accesibles desde la web. Esto permite a los desarrolladores de experimentos, docentes e investigadores, localizar experiencias online de interés, adquirir formación técnica para construir sus propios laboratorios y obtener sus propias conclusiones didácticas. En este proyecto, el esquema de metadatos para laboratorios *online* es la forma de describir experimentos basados en web. El concepto de metadatos es análogo al uso de índices para localizar libros en una biblioteca por medio de autores, títulos, fechas, etc. Su aplicación a los experimentos, como objetos de aprendizaje de los laboratorios, se ha basado en el esquema de *EducaNEXT*, una plataforma europea para el intercambio de contenido educacional y la creación de conocimiento.

Uno de los ejemplos a seguir por su repercusión, a la hora de hablar de entornos web docentes aplicados a los laboratorios remotos y virtuales en el ámbito de las Ingenierías en general, ha sido *eMersion*. Este laboratorio dispone de varios sistemas, como el control de un péndulo invertido, el control de servos eléctricos o el entrenador de procesos térmicos (figuras 3.2 y 3.3), al igual que otros laboratorios nombrados con anterioridad, su principal mérito fue haber sabido integrar idóneamente los instrumentos virtuales y/o remotos junto con elaborados servicios docentes. Éstos incluyen consolas de experimentación remota, guiones de trabajo, tareas programadas, sistema de reservas y una herramienta de análisis (*SysQuake Remote*). Uno de los servicios más notables de los que dispone es el espacio virtual denominado *eJournal*, en el que los estudiantes pueden depositar y compartir los fragmentos de datos que van obteniendo durante sus sesiones de trabajo [GUZ07]. Actualmente, el entorno *eMersion* está siendo mejorado y expandido en el marco de trabajo de *ProLEARN*.

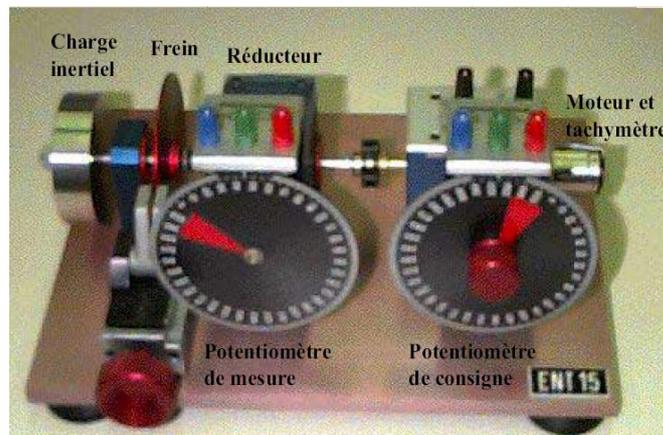
### 3. SITUACIÓN ACTUAL EN LABORATORIOS PARA CONTROL AUTOMÁTICO



Sistema Aerotérmico



Péndulo Invertido



Servomotor eléctrico

Figura 3.2: Equipos presentes en el Sistema Emersion.



Figura 3.3: El Sistema Emersion.

En la figura 3.4 se muestra un resumen esquemático de los desarrollos de los laboratorios virtuales en control automático, desde los primeros laboratorios remotos y de instrumentación virtual a principios de los 90 hasta los últimos desarrollos que incluyen mejora de la calidad del interfaz, adaptación y realidad aumentada.

Superada la primera fase de implantación de laboratorios remotos, en el futuro se esperan nuevos enfoques para el diseño de laboratorios docentes integrados. En la actualidad existen dos líneas de investigación muy activas. La primera línea trata sobre el desarrollo formal de las herramientas usando técnicas de Ingeniería del Software. Así, por ejemplo, en [VAR09] se propone un marco de trabajo estructurado para el desarrollo de entornos de experimentación remota basados en Web con propósitos pedagógicos. La segunda línea consiste en la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial y, especialmente, de Aprendizaje Automático para la adaptación automática de interfaces web a las necesidades del usuario. Sobre esta línea recientemente se han realizado trabajos aplicados a webs docentes y a laboratorios virtuales, como en [BALD08], donde se realiza la integración de especificaciones para el diseño de interfaces educativos adaptativos.

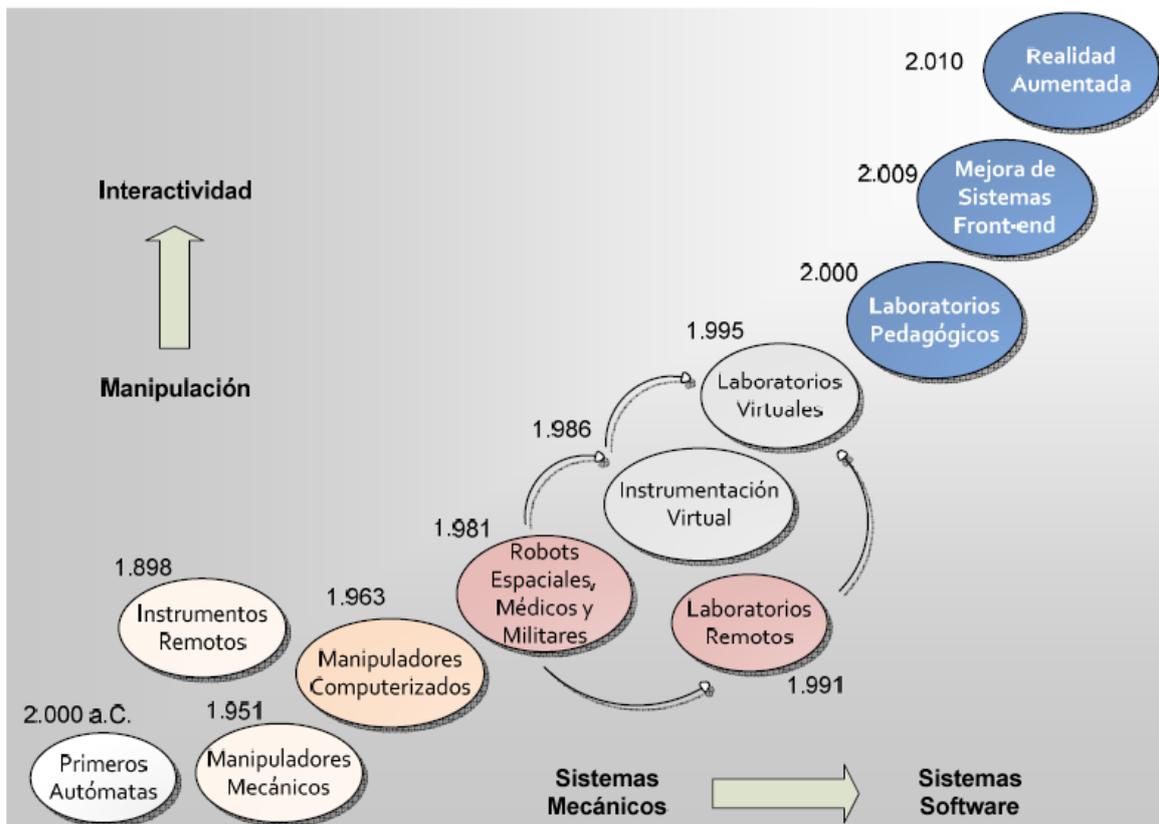


Figura 3.4. Evolución de los laboratorios remotos y virtuales para control automático [MAT10]

#### 3.2. USO DE HERRAMIENTAS LIBRES E INTERACTIVAS PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO

Como es bien conocido, los computadores juegan un papel crucial en la docencia e investigación en el campo del control automático. Uno de los motivos del desarrollo de este papel en las últimas dos décadas se ha debido al bajo coste de los equipos. Los grandes avances en el desarrollo de computadores cada vez más potentes y baratos ha venido acompañado por el desarrollo de paquetes software de gran calidad y que, además, son fáciles de usar para cubrir casi cualquier necesidad docente. Sin embargo, al mismo tiempo que el hardware se ha ido haciendo cada vez más barato, los programas van haciéndose más sofisticados y tiende a incrementarse su coste. En muchos casos esto puede ser un inconveniente para las universidades y centros de investigación, que disponen de equipos potentes pero tienen dificultades para adquirir los programas actualizados que necesitan.

En el caso de la docencia en control automático es bien conocido que la mayoría de cursos están basados en el programa comercial Matlab/Simulink para satisfacer las necesidades de simulación y control en tiempo real. Matlab/Simulink es una solución estándar y que funciona muy bien, pero su coste puede ser un problema para algunas instituciones y en muchas ocasiones los docentes e investigadores se encuentran con recursos limitados para adquirir los módulos adicionales (*Toolboxes* en la terminología de Matlab) que necesitan en sus laboratorios. Esto ha motivado el diseño de herramientas alternativas gratuitas o, al menos, con una versión gratuita con prestaciones limitadas. Así, por ejemplo, en [TON06] se muestra cómo realizando algunos ajustes y con un pequeño esfuerzo adicional, el material docente elaborado en Matlab/Simulink puede ser sustituido con éxito por material equivalente desarrollado usando Scilab/Scicos [WSC1], en un trabajo similar al realizado en esta tesis, aunque con una temática distinta.

En [PEN05] se describe la herramienta "*rltool*" para Scilab, equivalente a la herramienta del mismo nombre para Matlab pero de libre distribución que, según los autores, ha sido usado en cursos de control automático junto con el sistema operativo Linux para obtener un puesto de trabajo con software *totalmente libre* (salvo, por supuesto, el coste del equipo). Siguiendo la misma línea que el anterior trabajo, en [LIA09] se describe un curso completo de control automático básico en el que se ha usado Scilab/Scicos no sólo en las clases de laboratorio, sino también como apoyo en las clases teóricas, lo cual demuestra la total integración de este tipo de herramientas tanto para las sesiones teóricas como las prácticas. También se ha utilizado en cursos más avanzados de control o de control para robótica, como en [JIE09] donde se describe la simulación de un manipulador flexible en Scilab/Scicos.

La teoría de análisis y diseño en control clásico está basada en diferentes tipos de gráficos, tales como simulaciones en el dominio del tiempo, respuestas en frecuencia, diagramas de Nyquist, lugares de las raíces, entre otros. Con la introducción de los computadores personales y software como Matlab, fue posible el cambio de parámetros y la generación de las correspondientes gráficas de forma relativamente fácil y rápida. El paso siguiente, gracias al constante incremento en la potencia de los computadores, fue la introducción de *gráficos interactivos*, donde el usuario puede cambiar los parámetros con el ratón manipulando los elementos gráficos tales como *sliders* o la situación de los polos en el plano complejo. Esta idea fue implementada a principios de los años 90 en diferentes universidades, aunque estas implementaciones estaban limitadas por las herramientas software disponibles en la época. Así, por ejemplo, en 1994 se desarrolló una aplicación en lenguaje C, inicialmente concebida para investigación y que fue rápidamente adaptada para su uso en cursos básicos de control en la Escuela Politécnica de Lausanne [PIG99-1].

Durante estos años se desarrollaron numerosas herramientas interactivas innovadoras aplicadas a la educación en control. Inicialmente, muchas ideas y conceptos interesantes fueron implementados por el grupo del Profesor Åström en Lund. En este contexto merecen destacarse los conceptos de *cuadros dinámicos* y *sistemas interactivos virtuales* introducidos en [WIT98]. El objetivo principal de estas herramientas era tratar de obtener una participación mucho más activa de los estudiantes en cursos de control automático. En esencia, un cuadro dinámico es una colección de ventanas gráficas que se manipulan simplemente utilizando el ratón. Los estudiantes no tienen que escribir ninguna sentencia de código o aprender nada extra al objetivo central de su aprendizaje. Si los estudiantes cambian cualquier elemento activo en las ventanas gráficas se inicia de forma automática un nuevo procesamiento y presentación de los resultados. De esta manera se percibe cómo sus modificaciones afectan a los resultados obtenidos.

Estas herramientas interactivas, intentan “desmitificar” conceptos matemáticos abstractos por medio de la visualización de ejemplos seleccionados. A finales de la década de los 90 surgió una generación de paquetes de software, creando una alternativa interesante para el aprendizaje interactivo del control automático [GAR99]. Su principio de funcionamiento se basa en objetos que permiten una manipulación gráfica directa. Durante estas manipulaciones, los objetos se actualizan inmediatamente, de forma que la relación entre los objetos se mantienen en todo momento. Con esta filosofía se desarrollaron las primeras herramientas interactivas, como *Ictools* y *CCSdemo* [JOH98], [WIT98], desarrolladas en el Departamento de Control Automático de la Universidad de Lund y *SysQuake* en el Instituto de Automática de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, [PIG99-2], [DIMM00], [DOR03]. Estas herramientas han demostrado ser muy útiles en el campo de la

educación en control debido a la idea ya comentada de proporcionar una conexión en tiempo real entre las decisiones tomadas durante la fase de diseño y los resultados obtenidos por las decisiones de diseño [DOR04], [DOR05], [GUZ06].

Los controladores avanzados tales como los controladores multifrecuencia tratados en el capítulo 4 de la tesis han recibido también una especial atención en el campo del diseño de herramientas interactivas. A pesar del funcionamiento satisfactorio y las excelentes prestaciones de los controladores multifrecuencia, su análisis y diseño no resulta muy intuitivo. Los modelos de estos controladores son dados normalmente como una función de transferencia obtenida a través del proceso de diseño. Así, la estructura interna multifrecuencia se “pierde” en dicha función de transferencia. Por ejemplo, al implementar un PID multifrecuencia el significado físico de las constantes  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  se pierde. En consecuencia, los métodos clásicos de sintonizado no podrían aplicarse. Esto ha motivado la aparición en los últimos años de algunas herramientas interactivas de diseño de controladores multifrecuencia. Así, en [CU06] se implementa una adaptación al caso multifrecuencia del método de Ziegler-Nichols usando Matlab y Sysquake. En [ALB03] se implementa una herramienta para el análisis y diseño de PIDs multifrecuencia y en [VEL00] se presenta la primera versión de una toolbox en Matlab en la que se implementan métodos de diseño de controladores multifrecuencia con muestreo irregular. Una de las principales novedades de la herramienta que se presenta en la presente tesis respecto a estos trabajos previos es la introducción de técnicas en el dominio de la frecuencia para el análisis y diseño de controladores multifrecuencia, con el objetivo de mejorar las prestaciones del controlador de una forma interactiva.

#### 3.3. EXPERIENCIAS PREVIAS EN CONTROL COOPERATIVO Y COLABORATIVO PARA DOCENCIA EN INGENIERÍA

El Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) pretende, entre otros objetivos, que el estudiante adquiera a lo largo de su formación unas determinadas competencias que lo preparen para la vida personal y profesional. Esta pretensión exige un diseño curricular por competencias, una intervención metodológica específica del profesorado y un material adecuado a la consecución de dichos objetivos. Este escenario, que enfatiza el aprendizaje autónomo tanto a nivel personal como grupal del estudiante sobre la labor docente del profesor, demanda la articulación de modalidades y métodos de enseñanza y aprendizaje que realmente propicien la adquisición, el desarrollo y la maduración de competencias.

En este contexto, la mayoría de trabajos reales de ingeniería hoy día están basados en el trabajo interdependiente de equipos que resuelven problemas complejos en los

cuales los miembros deben usar sus habilidades para contribuir al trabajo de equipo [JOH02]. Sin embargo, en la mayoría de cursos de ingeniería en las universidades españolas no se da la suficiente atención a la formación de los alumnos para desarrollar sus capacidades de trabajo en equipo. Esto ha motivado el desarrollo en los últimos años de distintas experiencias y metodologías para incluir en el aula trabajos coordinados en grupo.

En el pasado, los profesores normalmente pedían a sus estudiantes la realización de trabajos en grupos sin preocuparse sobre cualquier característica de los grupos formados – entrenamiento y mantenimiento de grupos, evaluación de la efectividad y progreso de los equipos, evaluación de la contribución de cada miembro del equipo -. Estos trabajos en grupo tenían muy poco parecido con los proyectos en grupo en puestos de trabajo reales los cuales, por definición, incluyen esfuerzos para entrenar, supervisar y evaluar los equipos.

La mayoría de trabajos de investigación sobre trabajo en grupo están orientados hacia el objetivo de conseguir que el trabajo en equipo sea más efectivo para ayudar en el aprendizaje de los estudiantes, como las experiencias descritas en [JOH08], [BIR02], [SPR97], [TER01].

Sin embargo, existen muy pocos trabajos en los que se haga un estudio general de las características que deben tener las metodologías de trabajo en equipo para que sean lo más efectivas posible. En [OBA99], [BAC99], [OAK02], [RIO97] se realizan estudios preliminares para identificar qué aspectos del trabajo en equipo son los más importantes o útiles, usando la técnica de encuestas de opinión a los propios estudiantes y, en la mayoría de los casos, necesitando la presencia de un segundo profesor usado como “observador”, “crítico” o “supervisor” que detecta las carencias o los beneficios de las técnicas grupales usadas. En un trabajo más reciente [OAK07], se identifican de forma sistemática las condiciones óptimas que deben cumplirse para que el trabajo en equipo sea efectivo en un entorno académico.

En asignaturas de ingeniería, especialmente en los últimos cursos, los profesores incluyen frecuentemente uno o más trabajos para realizar en grupo, especialmente con el objetivo de proporcionar a los estudiantes experiencia para tratar con problemas complejos que no tienen una única solución posible [JOH08], [HEW08], [JON05]. En estos trabajos se demuestra, además, que la realización de un proyecto en grupo obliga a los estudiantes a estar más activamente implicados en el proceso de aprendizaje al buscar y adquirir los conocimientos que necesitan para la realización del proyecto [KOL96], [CHEN06].

También se ha demostrado en varios estudios que los estudiantes que han trabajado en una asignatura usando técnicas cooperativas tienden a obtener mejores

calificaciones que aquellos estudiantes que trabajaron de forma totalmente individual. Además, se ha comprobado que son más persistentes para finalizar sus estudios, tienen mejores habilidades analíticas, creativas y de pensamiento crítico, así como una comprensión más profunda de la materia y, en general, una mayor motivación, como se ha demostrado en los trabajos presentados en [FEL99], [FEL98] y, más recientemente, en [CHA11].

En los entornos actuales de educación superior, el énfasis que se hace sobre la información compartida y las relaciones sociales también han hecho que la incorporación de técnicas de aprendizaje cooperativo sea cada vez más deseable. En este sentido, algunos trabajos de investigación han identificado una tendencia hacia la incorporación en las aulas de técnicas de trabajo en equipo para facilitar el flujo de información y mejorar las relaciones entre los estudiantes [COL00]. Un buen número de trabajos han mostrado que el aprendizaje en grupo puede mejorar la motivación y productividad en el aula [BOW00], [SPR99]. Además, el aprendizaje cooperativo online por medio de sistemas e-learning ayuda a los estudiantes a compartir los distintos puntos de vista de los miembros del grupo, como las experiencias descritas en [CHEN06], [GLAS89] y los estudios presentados en [HEW08], [JON05], [CHA11].

En España existe una red de grupos de investigación que comparten experiencias en aprendizaje cooperativo. Dentro de esta red cabe destacar especialmente dos grupos: el grupo GIAC (Grupo de Interés en Aprendizaje Cooperativo, [WGIAC]) de la Universidad Politécnica de Cataluña y el grupo COMPING (COMPetencias en INGeniería, [WCOMP]) de la Universidad de Almería.

Esta red organiza anualmente unas jornadas en las que se ponen en común las experiencias de los participantes con el uso de las metodologías cooperativas en docencia. Aunque la investigación estaba inicialmente dedicada al desarrollo de estrategias para el trabajo de distintas competencias en Ingeniería, finalmente se han centrado en las técnicas cooperativas tras comprobar que estas técnicas proporcionan formación en distintas competencias transversales que se exigen en el marco del EEES [MON07], [GIL07], [MON08], [GIL08].

Actualmente algunos miembros del grupo COMPING imparten talleres de formación del profesorado en diferentes Universidades sobre sus experiencias en el uso del aprendizaje cooperativo, y fue la asistencia a uno de estos talleres y la posterior presentación de trabajos a las Jornadas de Aprendizaje Cooperativo lo que motivó el inicio del estudio presentado en la tesis en este campo.

## 4. HERRAMIENTAS PRESENCIALES DESARROLLADAS

En este capítulo se presentan dos herramientas presenciales desarrolladas para la experimentación en control automático. Ambas se han utilizado tanto en ámbitos docentes como de investigación. La primera de ellas se basa en el software Scilab/Scicos [WSCIL], [WSCIC] y se ha utilizado mayoritariamente en docencia. La segunda utiliza el software de evaluación (versión 'Lite') de Sysquake de la empresa Calerga y se ha utilizado tanto en docencia como en investigación. La naturaleza de ambas herramientas describen perfectamente la utilización y los objetivos de las mismas: mientras Scilab/Scicos es un software de simulación estilo "Matlab/Simulink" [WMATL], Sysquake es una herramienta pensada básicamente para ofrecer un alto grado de interactividad con el usuario.

La utilización de Scilab/Scicos se ha desarrollado principalmente para la realización de las prácticas de asignaturas afines al área de Control Automático. En cuanto a Sysquake, la utilización ha sido tanto en el ámbito docente, como en el de investigación (que es el aspecto que se presenta en este documento) para lo cual se ha desarrollado una aplicación sobre Sysquake para el análisis frecuencial de sistemas de control con muestreo no convencional.

Cabe mencionar que ambas disponen de versión gratuita; Scilab/Scicos porque es software abierto y Sysquake porque dispone de una versión "Lite" para su uso. Además todas son multiplataforma por lo que se pueden utilizar en entornos Windows, Mac OSX y Linux/Unix. Esta última posibilidad es especialmente atractiva ya que permitiría la creación de puestos docentes de "coste cero".

### 4.1. HERRAMIENTAS DESARROLLADAS SOBRE SOFTWARE LIBRE

En esta sección se analiza el proceso de enseñanza-aprendizaje, de la herramienta Scilab/Scicos. Para ello, primero se describen las características principales de dicha herramienta y posteriormente se resuelven problemas característicos de control automático utilizando las facilidades que ésta suministra. Estos problemas son prácticas reales de asignaturas impartidas en la UMH realizadas originalmente sobre la plataforma Matlab/Simulink. La principal tarea realizada ha sido la realización de las

mismas sobre Scilab/Scicos comprobando la validez de los resultados obtenidos y analizando la curva de aprendizaje de dicho software por parte del alumno.

##### 4.1.1. EL SOFTWARE SCILAB/SCICOS

Scilab es un lenguaje de programación de alto nivel para cálculo científico-interactivo de libre uso desarrollado en INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) y la ENPC (École Nationale des Ponts et Chaussées) desde 1990. Es responsabilidad de *Scilab Consortium* fundado en 2003, el cual está compuesto actualmente por 18 miembros, INRIA, DIGITEO, ECOLE CENTRALE DE PARIS, ECOLE POLYTECHNIQUE, ENGINSOFT France, PSA, PEUGEOT, CITROËN y RENAULT entre otros.

Scilab fue creado para ser un sistema abierto donde el usuario puede definir nuevos tipos de datos y operaciones entre los mismos. Resumiendo, se puede decir que Scilab es un paquete de software científico para el cálculo numérico con un entorno muy amigable para el usuario.

Por otra parte, Scicos (Connected Object Simulator) es la herramienta de software para modelado y simulación de Sistemas Dinámicos incluida en Scilab bajo licencia GPL desarrollado por Ramine Nikoukhah en el *Meatalu Project* de INRIA en el centro Paris-Rocquencourt. Scicos provee una interfaz gráfica de usuario para editar modelos e interconectar los bloques que representan las funciones fundamentales predefinidas por Scilab (generador de ondas, ganancia, osciloscopio, etc....).

Así pues, Scilab es un entorno de programación altamente flexible, cuyas principales características y prestaciones son:

- Potencia: Incluye cientos de funciones matemáticas, operadores y comandos que ofrecen al usuario la posibilidad de ser utilizados en gran cantidad de aplicaciones, además de permitir crear y definir funciones propias.
- Capacidad de generación de gráficos 2D y gráficos 3D.
- Permite operaciones matriciales, polinomiales y con funciones de transferencia.
- Permite la resolución de sistemas de ecuaciones lineales y ecuaciones diferenciales.
- Permite la creación y utilización de conjuntos de funciones destinadas a aplicaciones específicas denominadas *toolboxes*, por ejemplo Control, Optimización, Procesado de Señal, etc....
- Funcionalidad: Debido a que SCILAB es un programa de código abierto presenta cierta ventaja frente a otros programas que aún adquiriéndolos bajo licencia poseen versiones gratuitas (LE Lite Edition) pero que limitan la capacidad del

software como por ejemplo restringiendo funciones de adquisición de datos o funciones de comunicación que permitan obtener datos de otros programas.

- Gran difusión en la web: se dispone de mucha documentación sobre el funcionamiento y desarrollo de Scilab (Tutoriales, ejemplos, etc.)
- Precio: Scilab es significativamente más barato, especialmente si se considera el hecho de que este software es de código abierto e incluye la misma cantidad de funciones que se encuentran disponibles únicamente en las toolboxes adicionales de otros paquetes comerciales (control, bases de datos, estadística, etc....) ya que todas estas son realizadas por desarrolladores externos a la compañía y se distribuyen de manera gratuita.

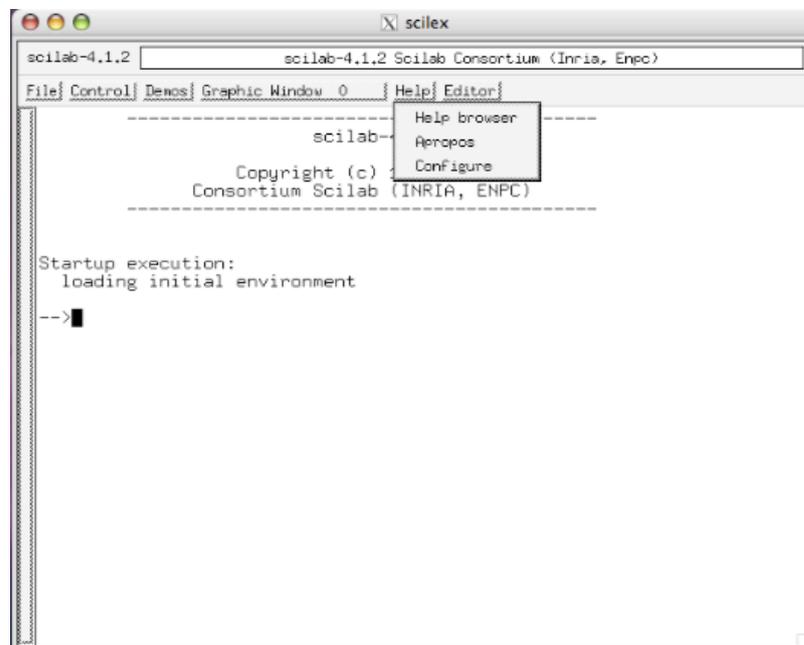


Figura 4.1. Ventana principal de Scilab ejecutándose en Mac OSX

Por otra parte Scicos permite:

- Modelar gráficamente, compilar y simular sistemas dinámicos.
- Combinar comportamiento continuo y discreto en el mismo modelo.
- Seleccionar elementos modelados desde la paleta de bloques estándar.
- Programar nuevos bloques en lenguaje C, Fortran o lenguaje Scilab.
- Ejecutar simulaciones desde el entorno Scilab.
- Generar código C de un modelo Scicos con un *generador de código*.
- Generar ejecutables de control en tiempo real complicados por medio de las librerías de tarjetas de adquisición de datos Scicos-HIL (para sistema operativo Linux y Windows) o Scicos-RTAI [WRTAI], [WCOM] (para sistema operativo Linux) combinados con la librería Scicos-FLEX.

- Utilizar bloques implícitos desarrollados en lenguaje Modelica, utilizando la librería correspondiente Scicos/Modelica (Coselica toolbox).

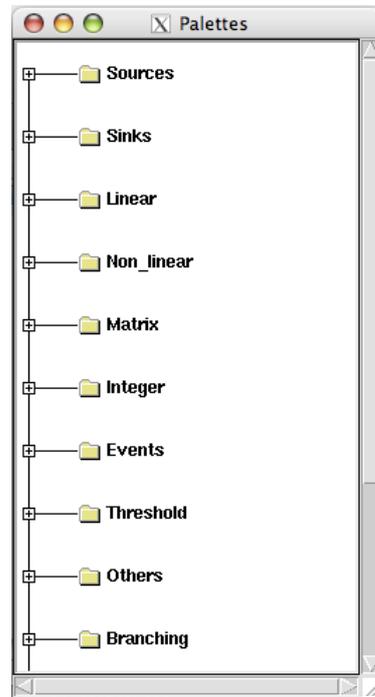


Figura 4.2. Ventana principal de librerías de Scicos

Cabe mencionar que todo el software utilizado es multiplataforma (Windows, Mac, Linux), lo cual permite una difusión mayor que otros programas ceñidos a plataformas específicas.

Evidentemente existen varios paquetes de las características de Scilab/Scicos que ofrecen funcionalidades similares. El más importante de ellos (y el estándar de facto tanto en el ámbito académico como industrial) es sin duda Matlab/Simulink [WMATW]. Este software es muy potente y con un entorno gráfico muy cuidado. Posee asimismo multitud de *toolboxes* para aplicaciones muy diversas (comunicaciones, control, aeroespacial, etc...) y es además también un sistema multiplataforma (Windows, Un\*x, Mac OSX). Hasta la fecha las prácticas de las asignaturas asociadas al área de Ingeniería de control se han venido realizando con dicho software. El único inconveniente de Matlab es su elevado coste, permisible para un Departamento/Universidad pero completamente inasequible para el alumno (ni siquiera, a veces, en su versión "Estudiante"). Este factor obligaba a los alumnos a realizar la mayoría de prácticas de forma presencial en el laboratorio a la par que impedía su utilización (al menos de forma legal) fuera del entorno universitario. Con Scilab/Scicos se ha querido dar una solución a este problema. Por una parte, como se ha comentado anteriormente, se puede dotar a los laboratorios de puestos de trabajo de un coste mucho menor que los puestos de trabajo "convencionales" al introducir

software libre, y por otra, se ha facilitado al alumno una herramienta de acceso libre mediante la cual puede realizar sus prácticas y desarrollos fuera del entorno universitario.

Tampoco sería justo comentar sólo estas dos alternativas de software ya que existen muchas más, algunas en desarrollo y otras en versiones ya muy estables como Octave [WOCT] y R [RPROY].

Dentro de las limitaciones que presenta Scilab/Scicos cabe señalar que en comparación con otros programas del mismo ámbito posee un interfaz gráfico algo inferior (al menos en algunas plataformas) pudiendo mejorar la calidad de éste e incrementar las opciones de representaciones gráficas que incluye. Otro inconveniente importante es el hecho de que el lenguaje de programación de funciones en Scilab (archivos .sci) es algo primitivo, limitando así la capacidad de programación por parte del usuario. Es previsible que este último punto se resuelva en versiones posteriores.

### 4.1.2. POSIBILIDADES PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO

---

Las posibilidades de Scilab/Scicos para experimentación en control es similar a las presentadas por el software comercial Matlab/Simulink. Por una parte, Scilab presenta un conjunto de funciones que permiten tanto representar diversos tipos de datos así como herramientas y funciones de análisis numérico. Por otra, permite trabajar directamente con funciones de transferencia tanto en la transformada de Laplace como en la transformada Z, además de poder representar los sistemas en el espacio de estados. Se suministra, de esta forma, una herramienta válida de modelado de sistemas dinámicos. Además, se incluyen funciones y librerías para el análisis y tratamiento de los mismos, por ejemplo cálculo de polos, trazado del lugar geométrico de las raíces, métodos de discretización de sistemas continuos, etc.

Por otro lado, Scicos provee de una herramienta gráfica, similar a Simulink, que permite la representación y el modelado de sistemas dinámicos de control para su simulación. La integración entre Scilab y Scicos permite analizar de forma precisa los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

### 4.1.3. EJEMPLOS DE ANÁLISIS

---

Se plantean a continuación dos ejemplos de análisis de sistemas dinámicos. Ambos son ejemplos clásicos en asignaturas introductorias de control y automática. Los ejemplos incluidos son el análisis de sistemas dinámicos de segundo orden, en el cual se abordan cuestiones como estabilidad, oscilaciones, etc. y el análisis y cálculo del error en régimen permanente para un sistema determinado.

*Comportamiento dinámico de sistemas de segundo orden*

En este ejemplo se estudia el comportamiento dinámico de sistemas discretos de segundo orden mediante el análisis de la ubicación de sus polos [OGA06], [KUO01], [TOR90].

Se proponen pues las siguientes funciones de transferencia discretas obtenidas mediante la discretización de sistemas continuos a un periodo de muestreo de 0.5 seg.

$$G_1(z) = \frac{z^2}{z^2 - z + 0.29}$$

$$G_2(z) = \frac{z^2}{z^2 - 1.6z + 0.89}$$

$$G_3(z) = \frac{z^2}{z^2 - 1.2z + 1}$$

$$G_4(z) = \frac{z^2}{z^2 + z + 0.29}$$

$$G_5(z) = \frac{z^2}{z^2 + z + 0.89}$$

El primer paso para el análisis es determinar los polos de cada una de las funciones de transferencia así como el módulo de los mismos en el caso de ser polos complejos. Esto va a permitir saber, por una parte, determinar si se encuentran dentro o fuera del círculo unidad del plano Z, y por tanto su estabilidad, y por otra parte conocer la zona del plano Z donde se ubican y por tanto determinar el tipo de respuesta que proporcionará el sistema (rapidez, comportamiento oscilatorio, etc.)

Así, los valores que se obtienen para los polos de las distintas funciones de transferencia son:

|                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| $z_1=0.5\pm 0.2j$  | $\omega_{n1}=0.539 \text{ rad/seg.}$ |
| $z_2=0.8\pm 0.5j$  | $\omega_{n2}=0.943 \text{ rad/seg.}$ |
| $z_3=0.6\pm 0.8j$  | $\omega_{n3}=1 \text{ rad/seg.}$     |
| $z_4=-0.5\pm 0.2j$ | $\omega_{n4}=0.539 \text{ rad/seg.}$ |
| $z_5=-0.5\pm 0.8j$ | $\omega_{n5}=0.943 \text{ rad/seg.}$ |

A la vista de los resultados obtenidos, se puede deducir que todos los sistemas son estables y presentan un comportamiento oscilatorio cuya frecuencia natural es  $\omega_n$ . Caso especial es el de  $G_3(z)$  que tiene sus polos sobre el círculo unidad, por lo que es críticamente estable (su estabilidad depende en parte de la señal de entrada) y con respuesta también oscilatoria.

El siguiente paso sería crear un escenario (esquema) Scicos y simular el comportamiento de las diferentes funciones de transferencia ante una entrada escalón unitario. El escenario se muestra en la figura 4.3:

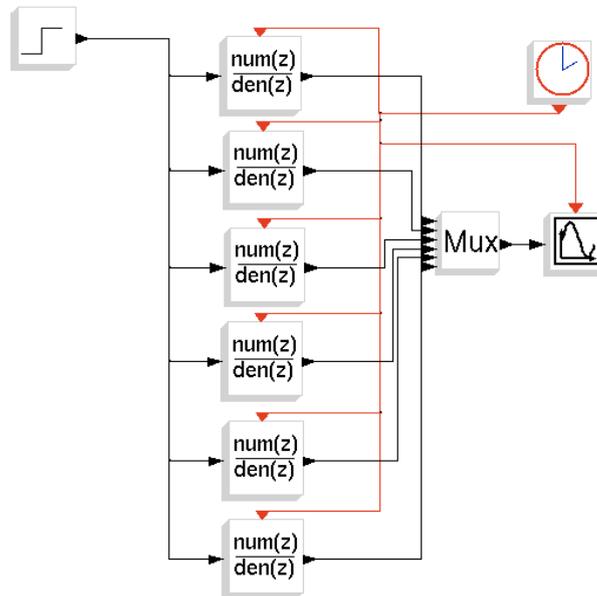


Figura 4.3. Escenario Scicos para la simulación de las funciones de transferencia de segundo orden

La representación gráfica de las señales de salida permite la comprobación acerca de la rapidez y tipo de oscilación de las señales de salida de los sistemas, que como es de esperar coinciden con los determinados de forma teórica.

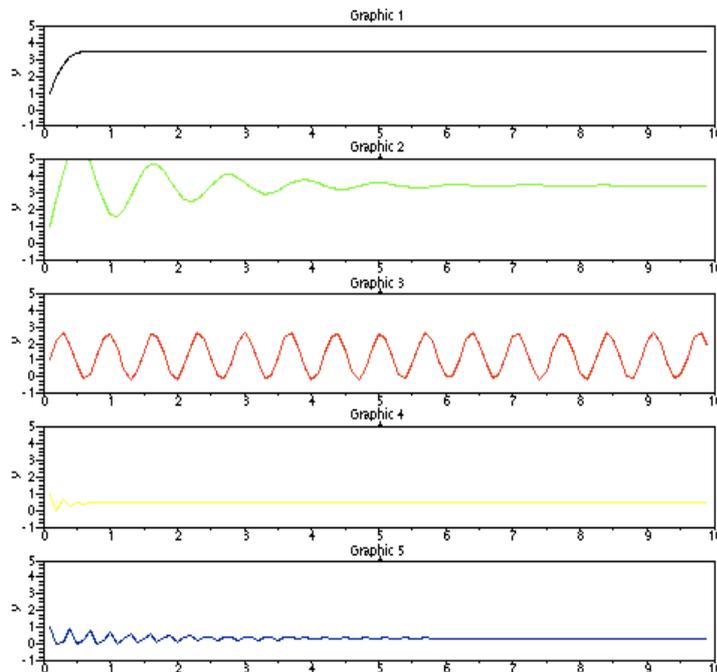


Figura 4.4. Señales de salida de sistemas de segundo orden ante entrada escalón unitario

Es conveniente también, a fin de comparar de forma más precisa las distintas respuestas, representarlas gráficamente en una misma ventana, tal y como se muestra en la figura 4.5.

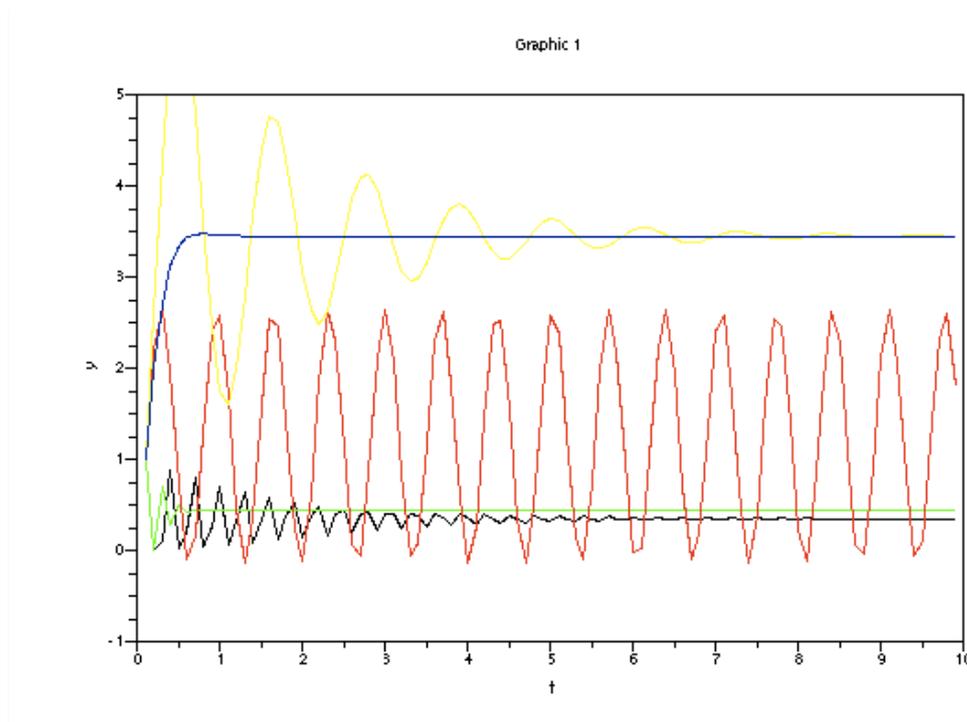


Figura 4.5. Comparación de las respuestas de las funciones de transferencia de segundo orden ante entrada escalón

Como se ha podido comprobar, la herramienta es completamente válida para la tarea propuesta, permitiendo el análisis, simulación y la representación de los resultados.

#### **Comportamiento en régimen permanente de sistemas discretos**

En este ejemplo se analiza el comportamiento en régimen permanente de sistemas discretos [OGA96], [KUU01], [TOR90]. Se ponen de manifiesto así, los conceptos de *tipo del sistema, coeficientes estáticos de posición, velocidad y aceleración y errores de posición, velocidad y aceleración*.

Para ello se propone la resolución del siguiente problema:

Un determinado sistema discreto presenta en cadena abierta la siguiente ecuación en diferencias a un periodo de 0.5 seg.:

$$y(k) = 1.1y(k - 1) - 0.1y(k - 2) + 0.08u(k - 1) + 0.096u(k - 2)$$

Se pide:

- Obtener la función de transferencia discreta de dicho sistema.
- Calcular los coeficientes estáticos de error y los errores de posición, velocidad y aceleración para una realimentación unitaria.
- Comprobar gráficamente con Scicos que los errores obtenidos son correctos.

El primer paso sería obtener la función de transferencia discreta a partir de la ecuación en diferencias propuesta mediante las propiedades de la transformada Z. Así, la función de transferencia que se obtiene es:

$$G_p(z) = \frac{0.08(z+1.2)}{(z-1)(z-0.1)}$$

A partir de aquí ya se puede pasar al segundo apartado del ejercicio calculando los coeficientes de error y sus respectivos errores. Para ello es necesario disponer de un escenario con el que simular el comportamiento de  $G(z)$  ante las diferentes entradas. Seleccionándolas y observando su señal de error, como se muestra en la figura 4.6.

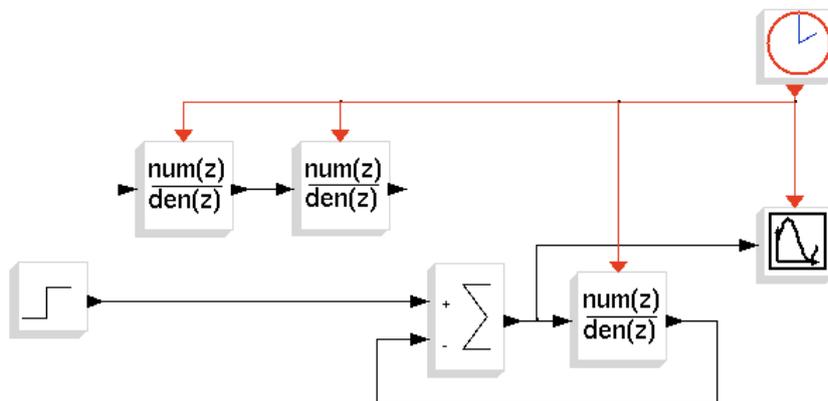


Figura 4.6. Escenario Scicos para la obtención del error en régimen permanente

Todos los bloques discretos de este escenario están ubicados en la paleta *Linear*, así como el escalón y el *clock\_c* se pueden encontrar en la paleta *Sources* y por último el bloque *scope* que está situado en la paleta *Sinks*.

Como se puede observar, el tipo del sistema (número de polos en  $z=1$ ) es 1 por lo que se obtendrá un error de posición nulo, un error de velocidad constante y un error de aceleración infinito. Así pues, una vez simulado el sistema para las distintas entradas se obtienen los siguientes resultados:

Error de posición:

$$K_p = \infty$$

$$e_p = \frac{1}{1 + K_p} = \frac{1}{\infty} = 0$$

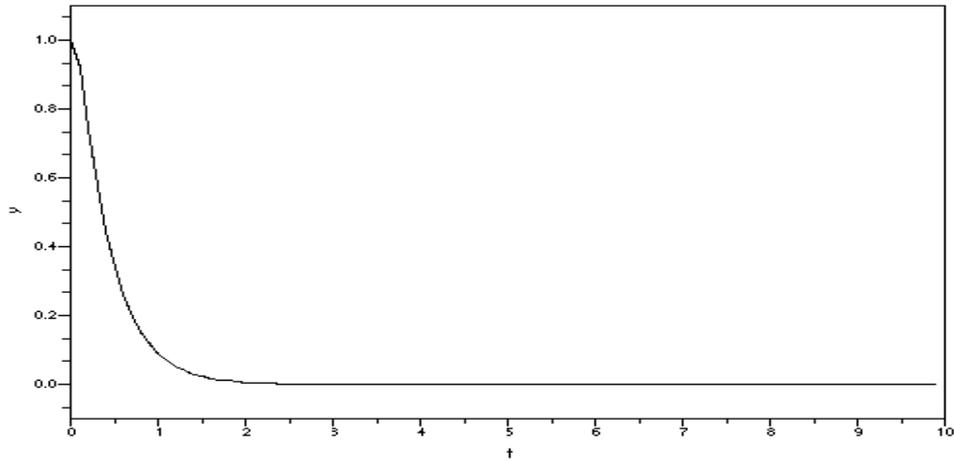


Figura 4.7. Error de posición

Error de velocidad:

$$K_v = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)G_p(z)H(z) = 1.95$$

$$e_v = \frac{1}{K_v} = \frac{1}{1.95} = 0.513$$

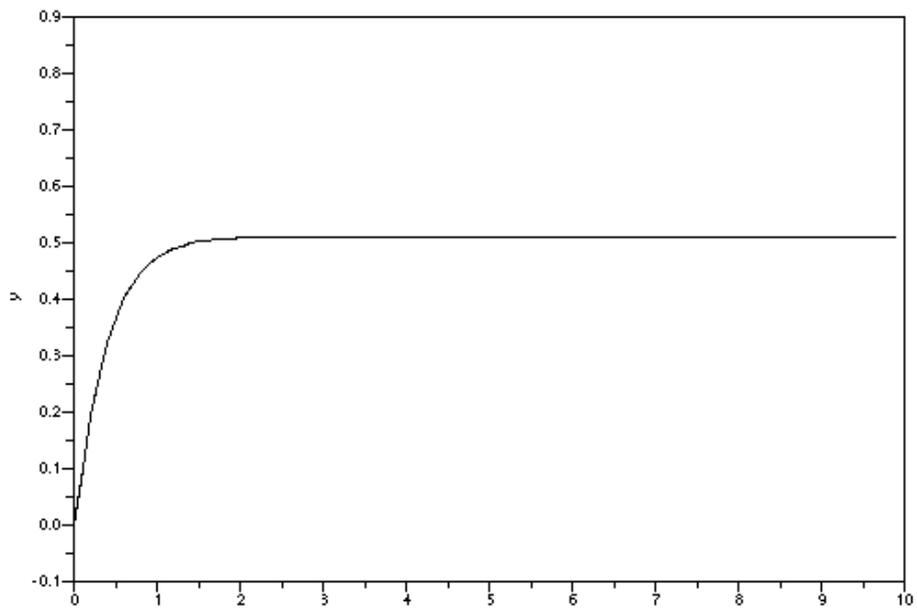


Figura 4.8. Error de velocidad

Error de aceleración:

$$K_a = 0$$

$$e_a = T^2 \frac{2}{K_a} = \infty$$

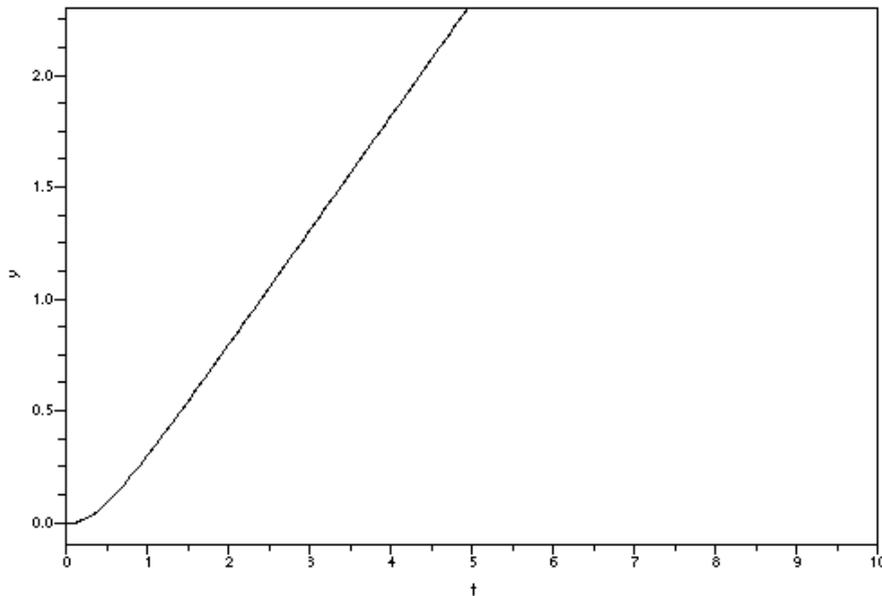


Figura 4.9. Error de aceleración

Observando las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se comprueba que los errores calculados teóricamente son correctos. El error de posición es nulo, el error de velocidad es constante debido a que este es un sistema de tipo uno y por esta misma razón el error de aceleración es infinito.

#### 4.1.4. EJEMPLOS DE DISEÑO

Se plantean en este apartado dos ejemplos de diseño de reguladores utilizando Scilab/Scicos. Para ello se proponen los ejemplos de un diseño directo de un regulador tipo PID discreto y el diseño de un regulador algebraico de tiempo mínimo.

##### *Diseño de un regulador PID discreto*

El método de diseño de controladores tipo PID discretos se basa en el lugar geométrico de las raíces de la función de transferencia discreta [OGA96], [TOR90], modificado éste convenientemente. Este tipo de diseño se denomina 'Diseño directo' en contraposición con el método indirecto basado en la discretización del regulador PID continuo. Así pues, para diseñar un regulador de forma directa en el plano Z se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Dado un proceso (continuo), se obtiene el equivalente discreto (discretizado con un periodo de muestreo válido y anteponiendo un retenedor de orden cero -ZOH- ) y la ecuación característica del mismo.
- b) Se trasladan las especificaciones de diseño (tiempo de establecimiento, tiempo de pico, sobreoscilación máxima, etc.) a polos en el plano s (polos deseados continuos) y a continuación se trasladan éstos al plano Z.
- c) Se diseña un regulador que verifique las expresiones dadas. Para ello se representa el lugar geométrico de las raíces dado por la ecuación característica en el plano Z y también los polos deseados, reformando, si es necesario, el lugar de las raíces original en caso de no existir ningún punto de dicho lugar de las raíces que verifique las especificaciones.

Así, podemos tener los siguientes tipos de reguladores según la casuística:

- Regulador proporcional (P): Si algún punto del lugar de las raíces original cumple las especificaciones dinámicas y se verifican las especificaciones estáticas (errores) se calcula la ganancia  $K_p$  mediante el criterio del módulo [OGA10], para que los polos del sistema se sitúen sobre los polos deseados. La función de transferencia es por tanto:

$$G_R(z) = K_p$$

- Regulador Proporcional – Integrador (PI): Se utiliza cuando como en el caso anterior, los polos deseados pertenecen al lugar geométrico de las raíces original pero no se cumplen las especificaciones estáticas. Lo que hay que hacer en tal caso es aumentar el tipo del sistema añadiendo un polo en  $z = 1$  y un cero próximo a él para no modificar en exceso el lugar de las raíces original. Así pues, la función de transferencia es

$$G_R(z) = K_p \frac{(z - a)}{(z - 1)}$$

Normalmente  $a$  se calcula como  $a = e^{\left[\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{10}\right] \sigma T}$  donde  $\sigma$  es la parte real del polo deseado continuo y T el periodo de muestreo.

- Regulador Proporcional – Derivativo (PD): Se utiliza cuando ningún punto del lugar geométrico de las raíces original cumple las especificaciones dinámicas. Entonces se introduce un cero más un polo en el origen (esto último asegura la realizabilidad y no incorpora

dinámica adicional). El cero se ajusta mediante el criterio de argumento y la ganancia  $K_p$  por el criterio del módulo, haciendo pasar el nuevo lugar geométrico por los puntos de las especificaciones. Su función de transferencia es

$$G_R(z) = K_p \frac{(z - b)}{z}$$

- Regulador Proporcional – Integrador – Derivativo (PID): Se utiliza cuando no se cumplen las especificaciones dinámicas ni estáticas. De esta forma, la función de transferencia necesaria es:

$$G_R(z) = K_p \frac{(z - a)(z - b)}{z(z - 1)}$$

En este caso se ajustan a y b como se ha comentado anteriormente.

Así pues, un problema tipo a resolver por el alumno podría ser el siguiente:

Sea  $G(z) = \frac{0.007(z+0.94)}{(z-0.95)(z-0.86)}$  una f.d.t. obtenida mediante la discretización de un proceso continuo a un periodo de muestreo  $T = 0.1$  seg.

Se pide:

- Simular el sistema sin regulador ante entrada en escalón unitario y obtener la respuesta del sistema.
- Diseñar el regulador  $G_R(z)$  para que el sistema satisfaga las siguientes especificaciones:
  - Error de posición nulo.
  - Tiempo de establecimiento:  $t_e < 1.57$  seg.
  - Sobreoscilación máxima del 10%

Apartado i)

Antes de nada es necesario comprobar si la respuesta del sistema a controlar satisface las especificaciones de diseño. En el caso de que no las cumpla se planteará el diseño del regulador. Para realizar dicha comprobación se puede construir el siguiente esquema en Scicos:

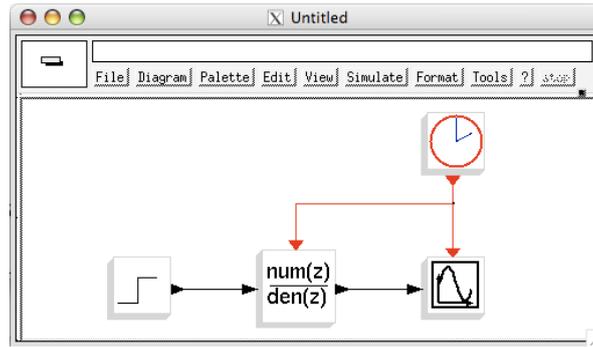


Figura 4.10. Esquema de simulación en bucle abierto

La salida obtenida se muestra en la figura 4.11.

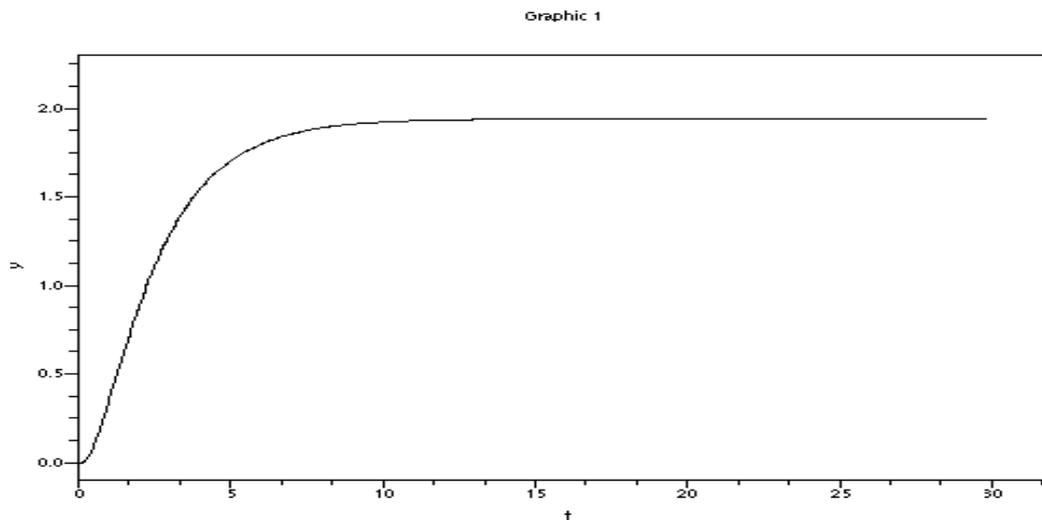


Figura 4.11. Salida en bucle abierto ante entrada escalón

Como se puede apreciar no se cumplen ni las especificaciones dinámicas (el tiempo de establecimiento es superior al requerido) ni las especificaciones estáticas ya que existe un error de posición constante (como era de esperar ya que el sistema es de tipo cero).

Apartado ii)

De las especificaciones de diseño se calculan los polos continuos deseados de forma que se obtiene el polo  $s = -2 \pm 2.6j$ . A continuación es necesario trasladar dicho polo al plano  $z$  mediante la transformación  $z = e^{sT}$ , de forma que se obtiene el punto  $z = 0.79 \pm 0.215j$ .

Es fácil comprobar trazando el lugar geométrico de las raíces (utilizando el comando *evans(g)* [CHAN07]) que no hay ningún punto del lugar de las raíces original que se sitúe sobre el polo deseado, tal y como se puede apreciar en la figura 4.12.

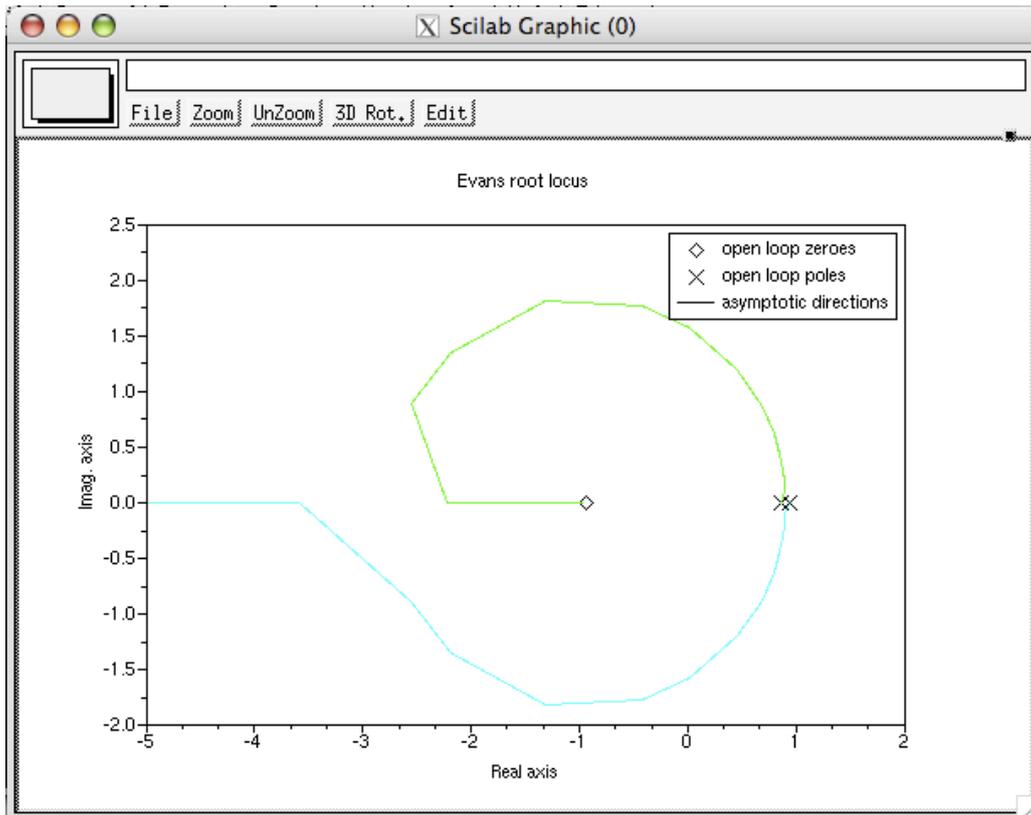


Figura 4.12. Lugar de las raíces original

Es por tanto necesario, para cumplir las especificaciones, el diseño de un regulador PID cuya forma es:

$$G_R(z) = K_p \frac{(z - a)(z - b)}{z(z - 1)}$$

Ajustando los parámetros  $a$  y  $b$  mediante el criterio del argumento y  $K_p$  mediante el criterio del módulo, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$G_R(z) = 18.86 \frac{(z - 0.967)(z - 0.7)}{z(z - 1)}$$

Por último y para comprobar el correcto funcionamiento del regulador diseñado, se crea a continuación un nuevo esquema en Scicos para simular el comportamiento del proceso y el regulador en bucle cerrado ante entrada escalón tal y como se muestra en la figura 4.13.

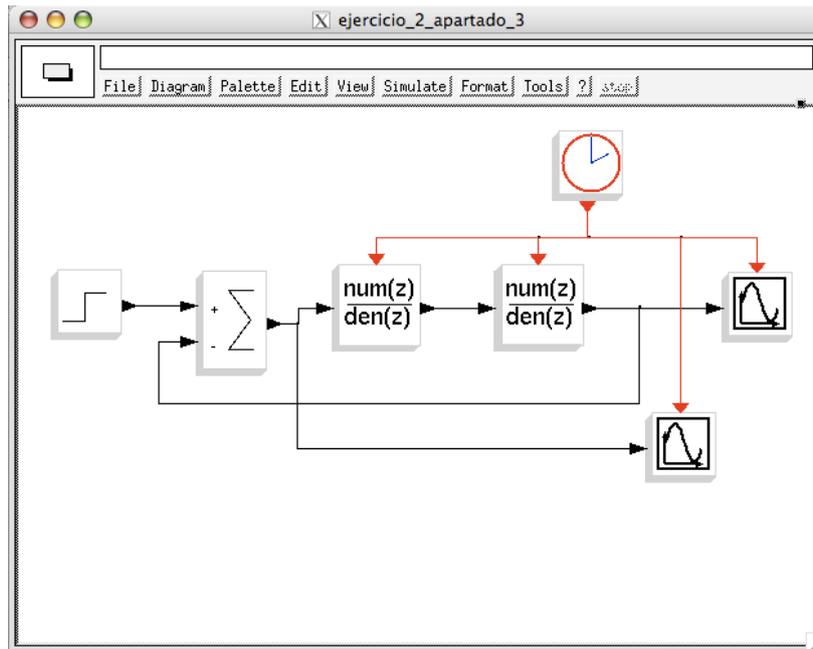


Figura 4.13. Esquema Scicos de proceso y regulador en bucle cerrado

La respuesta obtenida se muestra en la figura 4.14, donde como se puede apreciar, se cumplen las especificaciones tanto dinámicas como estáticas.

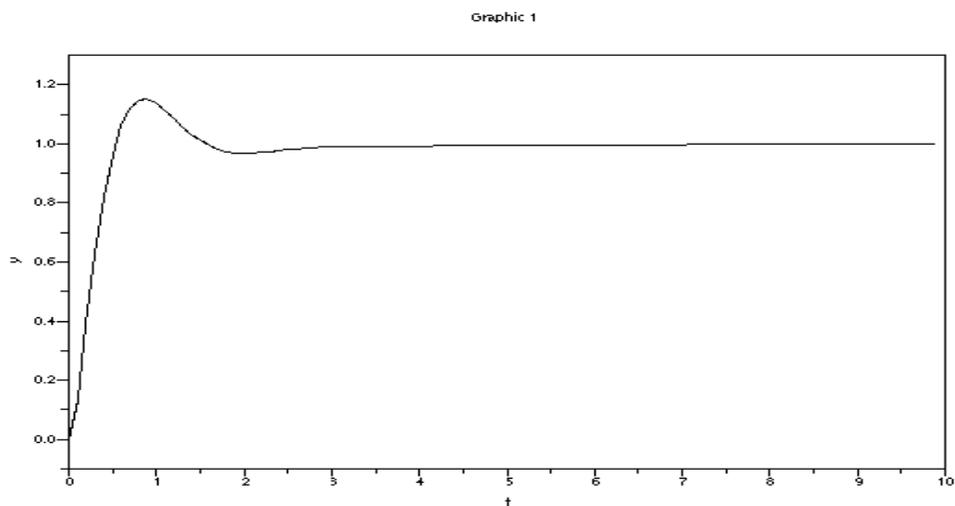


Figura 4.14. Respuesta de proceso con regulador en bucle cerrado

### *Diseño de un regulador de tiempo mínimo*

Los reguladores de tiempo mínimo son un tipo particular de regulador algebraico de cancelación donde la función de transferencia en bucle cerrado se elige de forma que el error en régimen permanente se anule lo más rápido posible [BER99], [OGA96].

Estos controladores (en general todos los de cancelación) responden a la siguiente función de transferencia:

$$G_R(z^{-1}) = \frac{1}{G_p(z^{-1})} \frac{M(z^{-1})}{1 - M(z^{-1})}$$

Donde  $G_p(z^{-1})$  denota a la función de transferencia discreta expresada en potencias negativas de  $z$  y en la que  $M(z^{-1})$  viene definida por las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} M(z^{-1}) &= z^{-d} B^-(z^{-1}) M_2(z^{-1}) \\ 1 - M(z^{-1}) &= (1 - z^{-1})^{\max(m+1, m')} A^-(z^{-1}) M_1(z^{-1}) \end{aligned}$$

con  $\text{Orden}(M(z^{-1})) = d + p + q + \max(m+1, m') - 1$

Donde:

$d$ : es el retardo de la función de transferencia del proceso.

$B^-(z^{-1})$ : son todos los ceros de  $G_p(z^{-1})$  fuera del círculo unidad .

$m$ : es el orden de la referencia (escalón = 0, rampa=1,...).

$m'$ : es el número de polos en  $z = 1$ .

$A^-(z^{-1})$ : son todos los polos de  $G_p(z^{-1})$  fuera del círculo unidad.

$q$ : número de ceros del proceso fuera del círculo unidad.

$p$ : número de polos del proceso fuera del círculo unidad .

$M_1(z^{-1})$  y  $M_2(z^{-1})$  : son dos polinomios incógnita.

Un ejemplo de diseño del mismo podría ser el siguiente:

Dado el modelo de proceso continuo siguiente:

$$G(s) = \frac{1}{s(s-1)}$$

se obtiene su equivalente discreto con un periodo  $T=0.5$  seg :

$$G_p(z) = \frac{0.149(z + 1.181)}{(z - 1)(z - 1.649)}$$

Se pide diseñar un controlador de tiempo mínimo ante una referencia escalón.

Aplicando las fórmulas anteriores a este caso particular se obtiene:

$$\begin{aligned} M(z^{-1}) &= z^{-1}(1 + 1.181z^{-1})M_2(z^{-1}) \\ 1 - M(z^{-1}) &= (1 - z^{-1})(1 - 1.649z^{-1})M_1(z^{-1}) \end{aligned}$$

Además,  $\text{Orden}(M(z^{-1})) = 3$ , por lo que necesariamente, los órdenes y los valores de  $M_1(z^{-1})$  y  $M_2(z^{-1})$  son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Orden}(M_2(z^{-1})) = 1 &\Rightarrow M_2(z^{-1}) = a + bz^{-1} \\ \text{Orden}(M_1(z^{-1})) = 1 &\Rightarrow M_{21}(z^{-1}) = 1 + cz^{-1} \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de  $M_1(z^{-1})$  y  $M_2(z^{-1})$  en las dos primeras ecuaciones e igualando coeficientes se obtiene que:

$$\begin{aligned} a &= 1.73 \\ b &= -1.27 \\ c &= 0.91 \end{aligned}$$

de forma que calculando la expresión del regulador mediante la ecuación de un regulador de cancelación:

$$G_R(z^{-1}) = \frac{1}{G_p(z^{-1})} \frac{M(z^{-1})}{1 - M(z^{-1})}$$

se obtiene la siguiente función de transferencia en potencias positivas de  $z$  :

$$G_R(z) = \frac{11.6(z - 0.734)}{(z + 0.91)}$$

El esquema Scicos que se muestra en la figura 4.15 permite simular el funcionamiento del sistema y obtener la señal de salida.

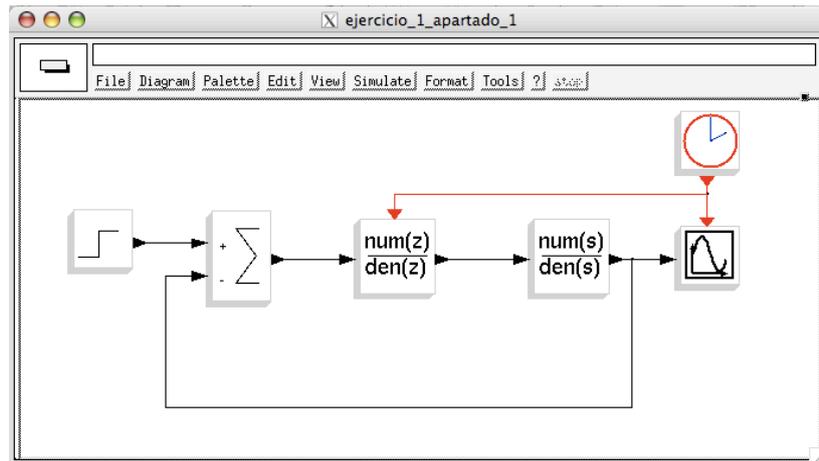


Figura 4.15. Esquema Scicos para la simulación de un regulador de tiempo mínimo

Nótese que no es necesario utilizar un retenedor de orden cero (ZOH) entre la salida del regulador y la entrada del proceso, ya que Scicos es capaz de diferenciar la naturaleza de las señales involucradas y adaptar así las mismas para su correcto funcionamiento.

Por último, una vez simulado el esquema se obtiene la señal de salida que se muestra en la figura 4.16.

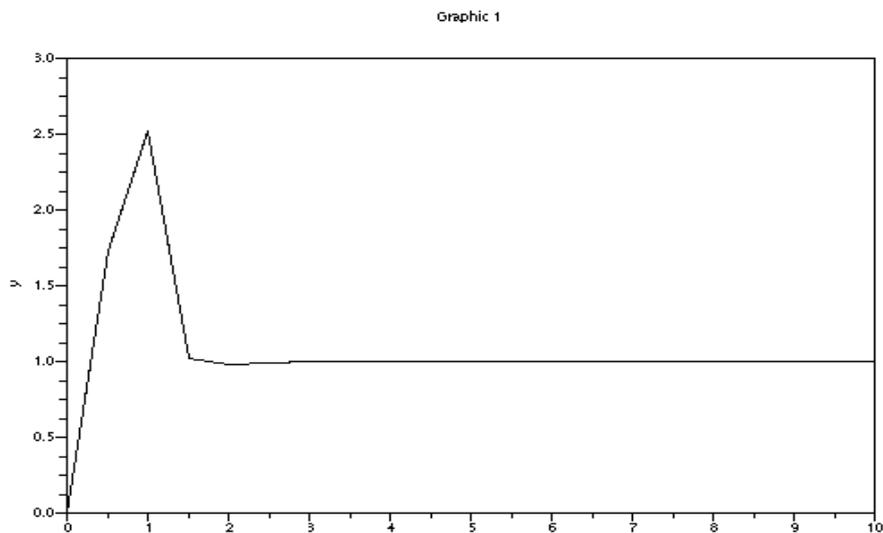


Figura 4.16. Respuesta de proceso con regulador de tiempo mínimo

Si aumentamos la escala para interpretar mejor la señal en su régimen transitorio, se puede apreciar que el error en régimen permanente desaparece a los 1.5 seg., es decir, en 3 periodos de muestreo ( $T = 0.5$ ) tal como era de esperar ya que el orden de  $M(z^{-1})$  es precisamente 3 [BER99].

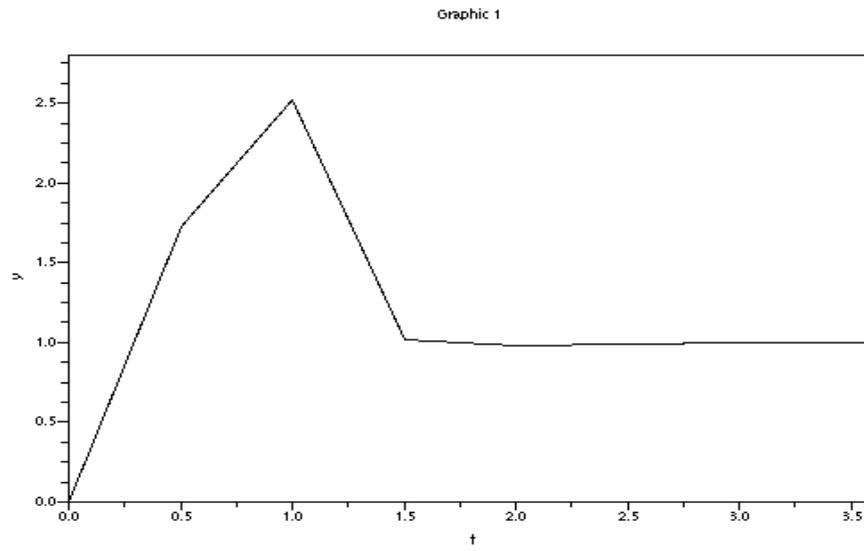


Figura 4.17. Detalle de la señal de salida del proceso con regulador de tiempo mínimo

### 4.2 HERRAMIENTAS DESARROLLADAS SOBRE SOFTWARE DE EVALUACIÓN

En esta sección se describe el desarrollo de una herramienta informática programada en Sysquake destinada fundamentalmente al diseño y análisis de sistemas de control multifrecuencia. Además, se han introducido en la herramienta algunos controladores continuos y discretos clásicos (PIDs y reguladores algebraicos).

Sysquake es un software creado especialmente para el diseño de sistemas aprovechando la visualización gráfica. Se diferencia de los programas tradicionales en que utiliza gráficos interactivos, permitiendo su manipulación directa por parte del usuario. En base a esto, el uso de Sysquake es altamente recomendable a la hora de analizar sistemas de control de cualquier tipo y, muy especialmente, sistemas avanzados de control.

Por otra parte, un sistema multifrecuencia es aquel sistema discreto en el que dos o más variables son actualizadas a frecuencias distintas. Este tipo de control presenta muchas ventajas respecto a los sistemas de control clásicos, siendo por tanto un campo en el que aparecen innovaciones continuamente. En la actualidad no existen herramientas adecuadas para el análisis y diseño de este tipo de sistemas, con lo que el desarrollo de la herramienta propuesta puede ser de gran utilidad en este campo.

#### 4.2.1. CONTROL MULTIFRECUENCIA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En los sistemas en los que dos o más variables del bucle de control operan a distintas frecuencias las teorías clásicas de control *obligan* a que todos sus elementos trabajen a la misma frecuencia lenta (periodo de muestreo grande). El control multifrecuencia, por el contrario, intenta alcanzar resultados similares a los que obtendríamos si todos los elementos del sistema pudiesen trabajar a la misma frecuencia rápida (periodo de muestreo pequeño), pero usando los datos disponibles, esto es, datos muestreados con diferentes periodos.

El control multifrecuencia no sólo se limita a sistemas en los que secuencia  $\{y_k\}$  trabaja con una frecuencia más lenta que  $\{u_k\}$ , sino que también incluye los siguientes casos:

- En sistemas con múltiples procesadores, la suposición de que todos los instantes de muestreo están sincronizados y operando a la misma frecuencia es falsa. Y esta suposición puede conducir a errores importantes en el modelado de los mismos.
- Los sistemas en los que las variables a controlar tienen naturalezas distintas (y, por tanto, dinámicas distintas) requieren frecuencias de muestreo acordes a cada una de ellas.

La definición de **un sistema multifrecuencia**, por tanto, *es la de un sistema discreto en el que dos o más variables son actualizadas a frecuencias distintas*. El esquema de muestreo puede ser de varias formas siendo el más común y simple de modelar el correspondiente al muestreo periódico, es decir, aquel en donde el esquema de muestreo se repite cada cierto periodo global de tiempo  $T$ ; este periodo global es igual al mínimo común múltiplo de los periodos de muestreo hallados en todas las señales del sistema.

Actualmente el control multifrecuencia es un área de estudio muy activa y de gran interés para los grupos de investigación de control automático. El gran desarrollo de la electrónica digital altamente integrada y de los recursos de cálculo para el modelado, análisis y diseño de sistemas digitales ha permitido un crecimiento acelerado del número de aplicaciones para la solución de problemas de ingeniería de control. El abanico de utilización de estos sistemas es muy amplio: desde los posicionadores del cabezal de los discos duros hasta el control de sistemas robóticos equipados con mecanismos de visión.

Además, el diseño de reguladores multifrecuencia sigue siendo hoy día un área de muchas oportunidades de mejora y de constantes aportaciones. Los primeros métodos de diseño de sistemas muestreados multifrecuencia se basaron en técnicas clásicas de diseño del dominio temporal propias de los sistemas muestreados monofrecuencia que fueron adaptadas a estos sistemas. Métodos más avanzados orientados hacia la optimización y la robustez se derivaron posteriormente.

El objeto de estudio principal de esta sección son los *sistemas bifrecuencia*, esto es, aquellos sistemas en los que se opera con dos periodos de muestreo distintos.

### 4.2.1.1. APLICACIONES PRÁCTICAS DEL CONTROL MULTIFRECUENCIA

---

Los esquemas de control multifrecuencia permiten obtener lazos de control con características y atributos que son difíciles o imposibles de obtener con otros métodos como los continuos puros o discretos monofrecuencia. Por este motivo, el control multifrecuencia ha sido utilizado con éxito en diversas áreas y sistemas como: robótica, control de discos duros, aeronáutica, columnas de destilación, reactores, procesadores, detección de fallos, industria de plásticos, submarinos, sistemas eléctricos, gas, sistemas neumáticos y motores. En este apartado se van a presentar algunos ejemplos concretos de estas aplicaciones.

#### *Aeronáutica*

En el esquema de control multifrecuencia desarrollado en [WHIT80] se muestrea la señal de salida de la planta a una alta frecuencia, y mediante un algoritmo se

recomponen estas muestras en un vector de pseudomedidas (*pseudomeasurements vector*). El potencial de este esquema es muy grande ya que, entre otras ventajas, asegura el correcto funcionamiento del sistema aunque falle alguno de los sensores. En dicho artículo se pone como ejemplo de aplicación el diseño de un regulador para un YF-16 (figura 4.18). Al compararlo con un regulador convencional analógico se demuestra que el controlador multifrecuencia es más eficiente y efectivo.



Figura 4.18. Avión FY-16

#### *Reactores Químicos*

En [NIEM00] se presenta la implementación de un controlador multifrecuencia no lineal para regular la temperatura y el peso molecular medio en un reactor polimérico continuo de radicales libres de metilmetacrilato. La temperatura se mide en un esquema con un período de muestreo muchísimo más pequeño que el peso molecular medio. Ambas medidas se incorporan al algoritmo cuando están disponibles para poder hacer predicciones de las salidas futuras.

El funcionamiento de este controlador se ha examinado variando los parámetros de sintonía del controlador para comprobar su capacidad para seguir cambios en referencias tipo escalón. Como resultado de esto, se concluyó que este controlador es eficiente y efectivo para esquemas de control con medidas multifrecuencia de la salida (*MROC, Multirate Output Control*).

Resultados semejantes se obtienen en un reactor de etileno cuando se emplea un esquema similar; estos son presentados en [EMB06].

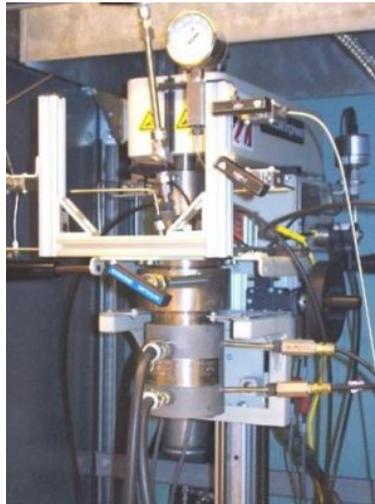


Figura 4.19. Reactor para preparar materiales poliméricos

#### *Discos duros*

Cuando un sistema de control tiene múltiples actuadores con diferentes anchos de banda puede considerarse que hay varios bucles de realimentación operando con diferentes períodos de muestreo. Una frecuencia de muestreo alta es necesaria para el bucle con ancho de banda más grande y una frecuencia baja para el bucle con el ancho de banda menor. La implementación de un esquema multifrecuencia con un solo lazo de control es posible descomponiendo el algoritmo de control en bloques de operación rápida y lenta. Esta implementación reduce considerablemente la carga computacional del procesador encargado de realizar esta tarea.

Una aplicación de esta propuesta se encuentra en [DING06], en la cual se implementa un regulador multifrecuencia para el control de un actuador doble (*Dual-actuator*) de un posicionador del cabezal de un disco duro. Dicho sistema de posicionamiento utiliza un VCM (*voice coil motor*) para los movimientos “gruesos”, y un PZT (*piezo electric transducer*) para los desplazamientos “finos” del cabezal. El VCM (dispositivo electromagnético) tiene un ancho de banda más estrecho que el PZT (dispositivo piezoeléctrico)



Figura 4.20. Disco duro

#### 4.2.1.2. MUESTREADORES Y BLOQUEADORES

Un *muestreador*  $S$  es un dispositivo que transforma una señal continua  $v(t)$  en una señal discreta  $w(k)$ . Esto se representa como  $w = Sv$ .

Un *bloqueador de orden cero* ZOH es un dispositivo que transforma una señal discreta en una señal continua. La transformación se consigue mediante una reconstrucción dada por:

$$y(t) = y(t_k) \quad t_k \leq t \leq t_{k+1}$$

Es decir, la señal reconstruida es una señal continua escalonada cuyo valor se actualiza con cada instante de muestreo de la señal discreta original.

#### *Discretización de señales*

De una señal continua  $y(t)$  se puede obtener una secuencia de datos tomada a una frecuencia  $1/T_0$ ,  $\{y(kT_0)\}, k \in Z^+$ . A esta secuencia la denotaremos con  $Y^{T_0}$ .

Por otra parte, si tenemos un bloqueador  $H_{T_i}$  operando a un periodo de muestreo  $T_i$  y al que le llega una señal de entrada  $u(t)$ , la salida tendrá una forma escalonada y quedará denotada por  $\bar{U}^{T_i}(t)$ .

Si  $T_0 = T_i = T$ , las transformadas Z de las expresiones anteriores se pueden denotar con:

$$Y^T(z) \triangleq Z_T[y(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)z^{-k}$$

$$U^T(z) \triangleq Z_T[u(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} u(kT)z^{-k}$$

Donde la variable  $z^{-1}$  representa el operador retardo. De igual forma, si los periodos de muestreo son ampliados de tal forma que  $T_0 = T_i = NT$ ,  $N \in Z^+$  las secuencias de entrada y salida tendrán las siguientes transformadas Z:

$$Y^{NT}(z_N) \triangleq Z_{NT}[y(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(kNT)z_N^{-k}$$

$$U^{NT}(z_N) \triangleq Z_{NT}[u(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(kNT)z_N^{-k}$$

Donde las series en las partes derechas de la fórmulas sólo presentan potencias de  $z_N = z^N$ .

Para futuros desarrollos se usará la notación  $(A(z) \triangleq A^T)$  para denotar polinomios en  $z$  o secuencias T-espaciadas; y la notación  $(A(z^N) \triangleq A^{NT})$  para denotar polinomios en  $z^N$  o secuencias NT-espaciadas.

#### 4.2.1.3. OPERADORES EXPAND Y SKIP

A partir de las secuencias desarrolladas en el apartado anterior, se puede definir una serie de operaciones:

El operador de **expansión (expand)** es aquel que expande la escala de tiempo para una secuencia digital actuando de la siguiente forma:

$$E: [Y^{NT}(z_N)]^T \triangleq \hat{Y}^T(z^N) \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} \hat{y}(kT)z^{-kN} \begin{cases} \hat{y}(kT) = y(kT); \forall k = \lambda N \\ \hat{y}(kT) = 0; \forall k \neq \lambda N \end{cases} \lambda \in Z^+$$

Es decir, crea una T-secuencia a partir de una NT-secuencia, donde la secuencia de salida es igual a la secuencia de entrada cada  $N$  muestreos, fijando en 0 los  $N-1$  muestreos intermedios.

En la siguiente figura se expone un ejemplo para N = 3:

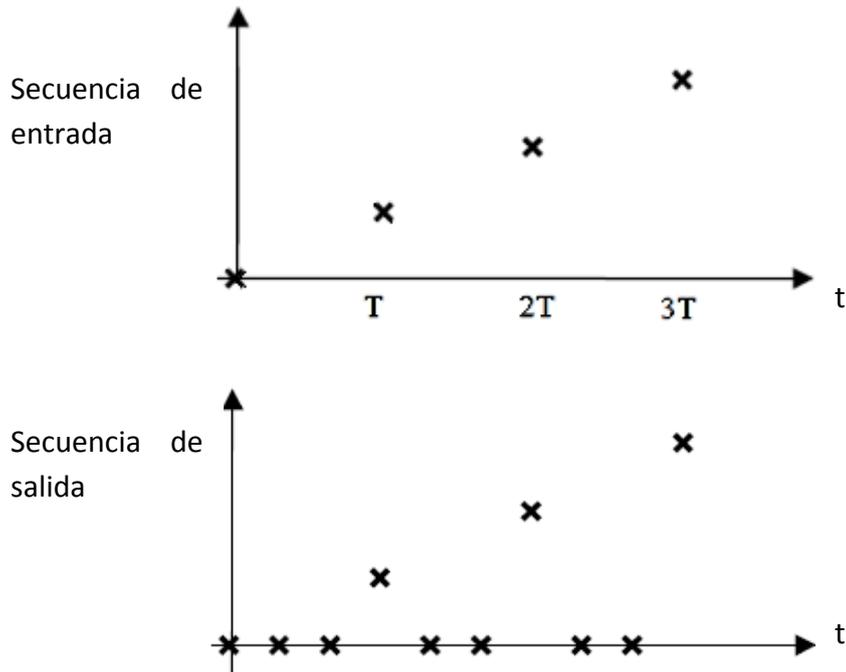


Figura 4.21. Resultado de aplicar el operador expand

El operador de **salto (skip)** crea una T-secuencia a partir de una NT-secuencia, de forma que la secuencia de salida está formada por las N-ésimas muestras de la secuencia de entrada.

$$S: [Y^T(z)]^{NT} \triangleq \check{Y}^{NT}(z^N) \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} y(kNT)z^{-kN} = Y^{NT}(z_N)$$

En la figura 4.22 se muestra un ejemplo para N = 3:

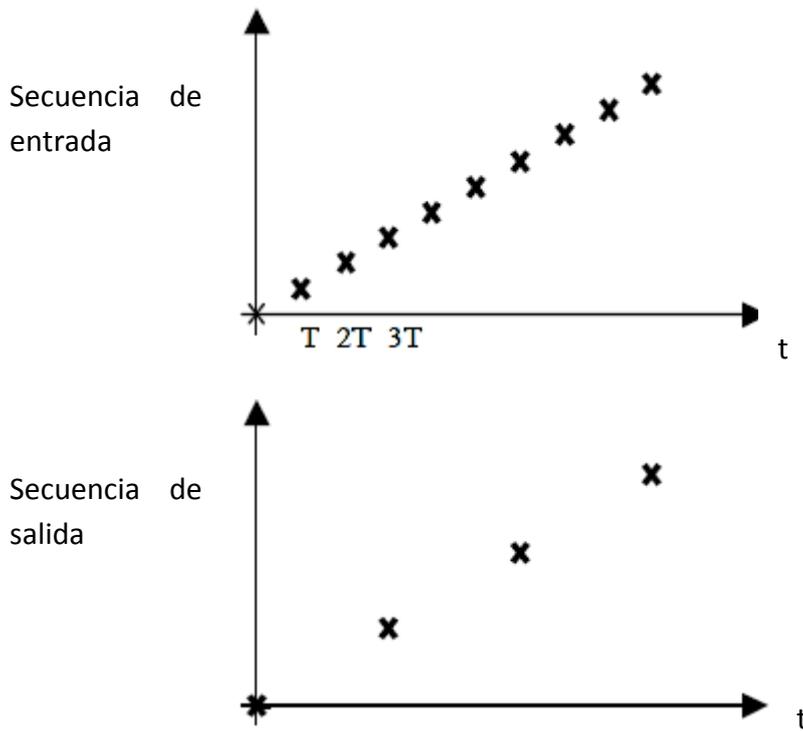


Figura 4.22. Resultado de aplicar el operador skip

El operador *skip* aplicado a la transformada Z de una señal puede obtenerse mediante la siguiente expresión, debido a [SKLA55]:

$$[F^T(z)]^{NT} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(e^{j\frac{2\pi k}{N}} z) \Big|_{z^N=z_N} = \check{F}^{NT}(z_N)$$

Las siguientes propiedades de los operadores *skip* y *expand* se usarán más adelante [COFF66]:

El operador *skip* no es conmutativo:

$$[X^T(z)Y^T(z)]^{NT} \neq [X^T]^{NT}[Y^T]^{NT}(z_N)$$

El operador *expand* sí es conmutativo:

$$[X^{NT}(z_N)Y^{NT}(z_N)]^T = [X^{NT}]^T [Y^{NT}]^T (z^N)$$

Se verifica la siguiente desigualdad:

$$[X^T(z)[Y^{NT}]^T(z)]^{NT} \neq [X^T]^{NT} Y^{NT}(z_N)$$

#### 4.2.1.4. SISTEMAS BIFRECUENCIA

Un sistema LTI bifrecuencia es aquel en el que la secuencia de entrada tiene un periodo de muestreo  $T_u$ ; y la secuencia de salida, un periodo de muestreo  $T_y$ , siendo  $T_u \neq T_y$ . Si:

$$\frac{T_u}{T_y} = \frac{M}{N}$$

Siendo M y N enteros – lo que es lo mismo que decir que  $T_y/T_u$  es un número racional-, entonces el comportamiento del sistema puede caracterizarse por una matriz de funciones de transferencia:

$$y_l(z) = G_{lifted}(z)u_l(z)$$

Donde  $y_l$  es un vector de longitud  $M$ ,  $u_l$  es un vector de longitud  $N$ , y  $G_{lifted}$  es una matriz de funciones de transferencia  $M \times N$  [SALT11].

La secuencia original  $y(k)$  y su versión *lifted*  $y_l(k)$  se construyen de tal forma que el  $i$ -ésimo elemento de  $y_l(k)$ ,  $y_{l,i}(k)$ , es  $y(k * M + i)$ ,  $i = 0, \dots, N - 1$ .

Para recuperar la secuencia original desde la salida múltiple del sistema *estirado* (*lifted*) se usa un operador *expand*, que en el dominio de la transformada Z puede escribirse:

$$z \rightarrow z^N$$

Este operador inserta  $N - 1$  ceros entre las muestras estiradas, con lo que la secuencia original  $y(z)$  se obtiene de  $y_l(z)$  con:

$$y(z) = (1 \ z^{-1} \ z^{-2} \ \dots \ z^{-(N-1)})y_l(z^N)$$

## 4.2.1.5. OPERADORES DE KRANC

El método de Kranc permite modelar un muestreador rápido como una combinación de muestreadores lentos de idéntico periodo colocados en paralelo.

En general, la descomposición de muestreadores de periodo  $T/N$  ( $N$  entero) supone:

- Sucesivos avances hasta  $(N-1)$  de la señal a muestrear.
- Muestrear las señales resultantes con un periodo  $T$ .
- Sucesivos retardos de las muestras obtenidas y adición de las mismas.

La representación de estos tres pasos en un diagrama de bloques se presenta en la figura 4.23.

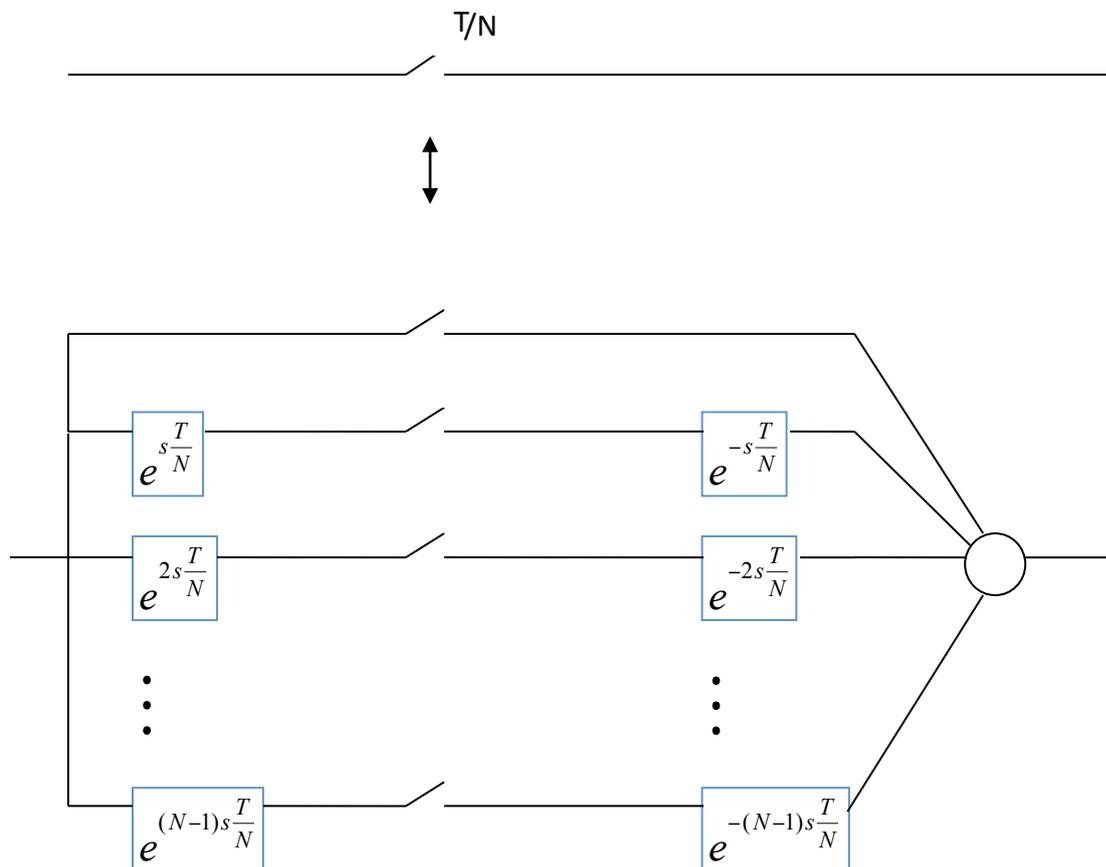


Figura 4.23. Descomposición de muestreadores

En sistemas muestreados multifrecuencia con muestreadores que operan con periodos  $T_n$  conmensurables siempre se puede encontrar un número  $T$  y un conjunto de enteros  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$  tal que:

$$T_1 = \frac{T}{N_1}; T_2 = \frac{T}{N_2}; \dots; T_n = \frac{T}{N_n};$$

En otras palabras, el periodo de muestreo  $T$  a utilizar en la descomposición de conexiones es el mínimo común múltiplo de los periodos de muestreo  $T_1, T_2, \dots$  presentes en el sistema.

Así por ejemplo, para un sistema bifrecuencia en lazo abierto como el de la figura 4.24:

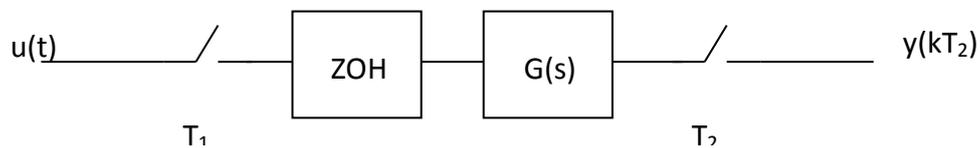


Figura 4.24. Sistema bifrecuencia en lazo abierto

La descomposición vectorial nos conduce al sistema de la figura 4.25:

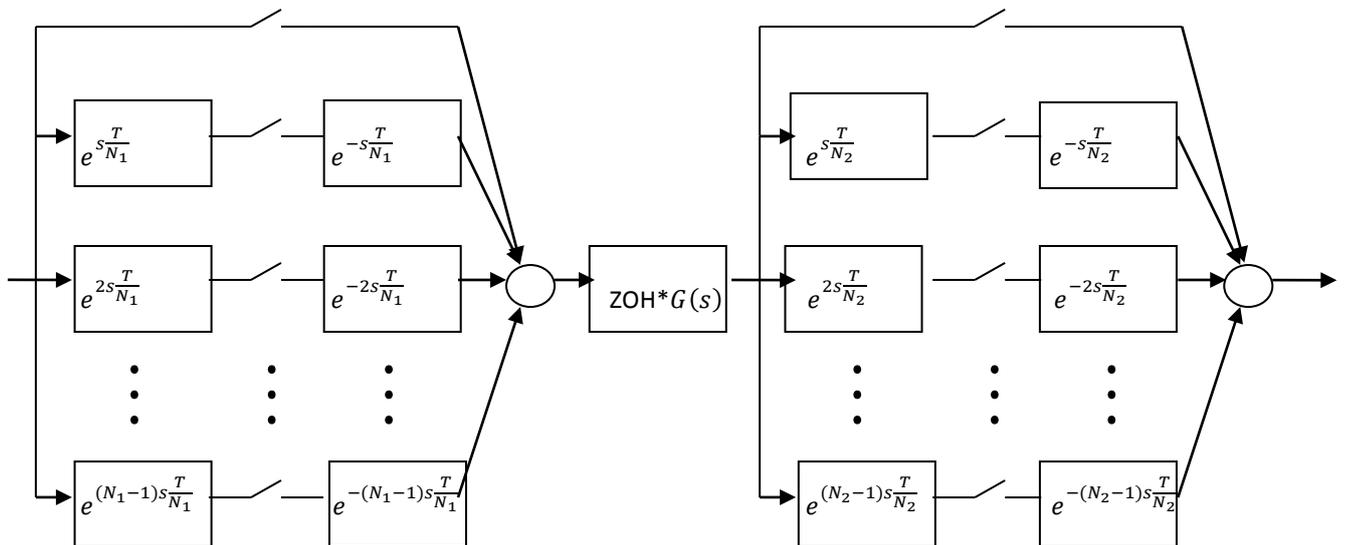


Figura 4.25. Sistema equivalente usando descomposición vectorial de conexiones

Es decir, la técnica de Kranc permite transformar un sistema multifrecuencia en un sistema monofrecuencia equivalente, con el costo de un incremento en las

dimensiones del sistema, que pasa de monovariable (SISO) a multivariable (MIMO) por la expansión de señales que supone la descomposición vectorial.

### *Modelado de Thompson*

El modelado de Thompson [THOM86] es un hibridaje entre la descomposición vectorial de conexiones de Kranc, descrita en el apartado anterior y la expansión de estados seguida de la reducción de los modos inobservables de Godbout [GODB90]. Es un modelado concebido para sistemas SISO, sin ningún tipo de restricción en cuanto a la naturaleza de los reguladores a utilizar.

Vamos a partir del mismo sistema bifrecuencia en lazo abierto de la figura 4.23. Llamamos *periodo base* al máximo común divisor de los periodos involucrados:

$$T_0 = \text{mcd}(T_1, T_2)$$

Llamamos *periodo global*, *periodo modelo* o *metaperiodo* al mínimo común múltiplo de los periodos involucrados:

$$T = \text{mcm}(T_1, T_2)$$

$$T_1 = \frac{T}{N_1}; T_2 = \frac{T}{N_2}$$

Si tomamos:

$$N = \text{mcm}(N_1, N_2)$$

Entonces:

$$T = NT_0$$

Se parte de la expansión de los muestreadores de entrada y salida mediante la descomposición vectorial de conexiones de Kranc (figura 4.23), que se compacta mediante la introducción de los vectores de retardo  $E^{N_1-}$ ,  $E^{N_2-}$ ; y adelanto  $E^{N_1+}$ ,  $E^{N_2+}$ :

$$E^{N_1+} = \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{sT}{N_1}} & e^{2\frac{sT}{N_1}} & \dots & e^{(N_1-1)\frac{sT}{N_1}} \end{bmatrix}$$

$$E^{N_2+} = \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{sT}{N_2}} & e^{2\frac{sT}{N_2}} & \dots & e^{(N_2-1)\frac{sT}{N_2}} \end{bmatrix}$$

$$E^{N_1-} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\frac{sT}{N_1}} & e^{-2\frac{sT}{N_1}} & \dots & e^{-(N_1-1)\frac{sT}{N_1}} \end{bmatrix}$$

$$E^{N_2-} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\frac{sT}{N_2}} & e^{-2\frac{sT}{N_2}} & \dots & e^{-(N_2-1)\frac{sT}{N_2}} \end{bmatrix}$$

El uso de estos vectores nos conduce al sistema de la figura 4.26:

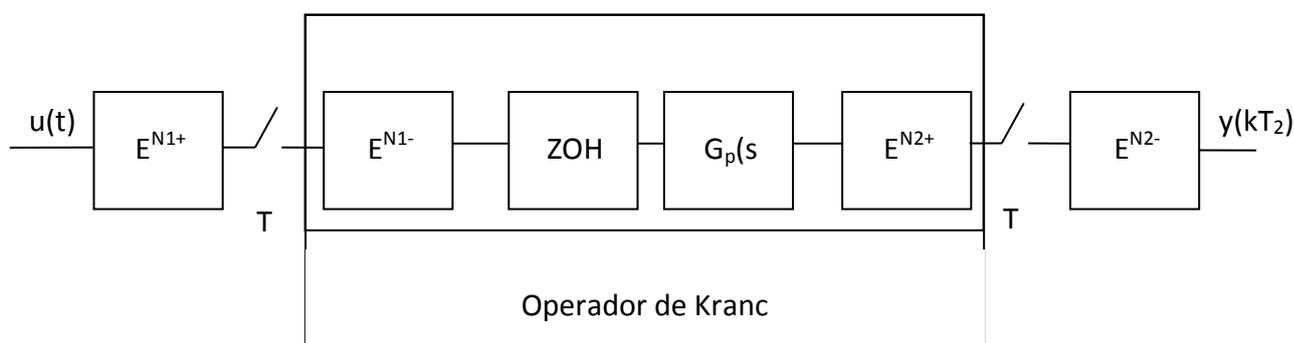


Figura 4.26. Uso de los vectores de adelanto y retardo

Al conjunto formado por  $E^{N_1-}$ ,  $G(s)=ZOH*G_p(s)$  y  $E^{N_2+}$  Thompson lo denomina, por motivos de homenaje obvios, **operador de Kranc**. Este algoritmo (sistema digital) transforma las  $N_1$  secuencias producidas por la expansión de la entrada en las  $N_2$  secuencias generadas por la expansión de la salida. El sistema monofrecuencia equivalente es el mostrado en la figura 4.27:

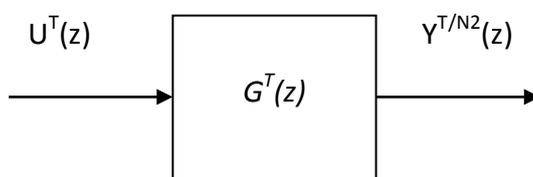


Figura 4.27: Sistema monofrecuencia equivalente al de la figura 4.25

Donde:

$$U^T(z) = [E^{N_1+}U(s)]^T$$

$$G^T(z) = [E^{N_1-}G(s)E^{N_2+}]^T$$

$$Y^{T/N_2}(z) = E^{N_2-}Y^T(z)$$

El número de entradas y salidas se ha incrementado, pero el número de estados no:

| Operador | Nº Estados | Nº Entradas    | Nº Salidas     |
|----------|------------|----------------|----------------|
| $G(s)$   | $n$        | $p$            | $M$            |
| $G^T(z)$ | $n$        | $N_1 \times p$ | $N_2 \times m$ |

Para generar el operador de Kranc se parte del modelo en espacio de estados del sistema continuo:

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Si se hace una discretización a *periodo base*  $T_0$ :

$$G^{T_0}(z) = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{bmatrix}$$

$$x((k+1)T_0) = \tilde{A}x(kT_0) + \tilde{B}u(kT_0)$$

$$y(kT_0) = \tilde{C}x(kT_0) + \tilde{D}u(kT_0)$$

Aplicando sustituciones sucesivas a las ecuaciones discretas, se llega a la **expresión general** del operador de Kranc a *periodo modelo*  $T$ :

$$\bar{x}((k+1)T) = \bar{A}\bar{x}(kT) + \bar{B}\bar{u}(kT)$$

$$\bar{y}(kT) = \bar{C}\bar{x}(kT) + \bar{D}\bar{u}(kT)$$

Donde:

$$\bar{A} = \tilde{A}^N \quad \bar{B} = [\tilde{A}^{\frac{N(N_1-1)}{N_1}} X \tilde{B} \quad \tilde{A}^{\frac{N(N_1-2)}{N_1}} X \tilde{B} \quad \dots \quad X \tilde{B}]$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C} \\ \tilde{C} \tilde{A}^{\frac{N}{N_1}} \\ \vdots \\ \tilde{C} \tilde{A}^{\frac{N(N_2-1)}{N_2}} \end{bmatrix} \quad \bar{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1j} \\ D_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ D_{i1} & \dots & \dots & D_{ij} \end{bmatrix}$$

$$X = \sum_{l=0}^{\frac{N}{N_1}-1} \tilde{A}^l \quad D_{ij} = \tilde{C} \left[ \sum_{r=0}^{\frac{N}{N_1}-1} \Psi_{ij}(r) \right] \tilde{B} + \Omega_{ij}$$

$$\Psi_{ij}(r) = \begin{cases} \tilde{A}^l, & \text{si } l = r + \frac{i-1}{N_2} - \frac{j-1}{N_1} - \frac{N}{N_1} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\Omega_{ij} = \begin{cases} \tilde{D} & \text{si } 0 \leq \frac{(i-1)N}{N_2} - \frac{(j-1)N}{N_1} < \frac{N}{N_1} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Es importante destacar que el operador de Kranc trabaja con la ecuación de estado del sistema discretizada al *periodo base*  $T_0$ , aunque se define para el *periodo modelo*  $T$ .

En el caso de un sistema multifrecuencia en bucle cerrado (figura 4.28):

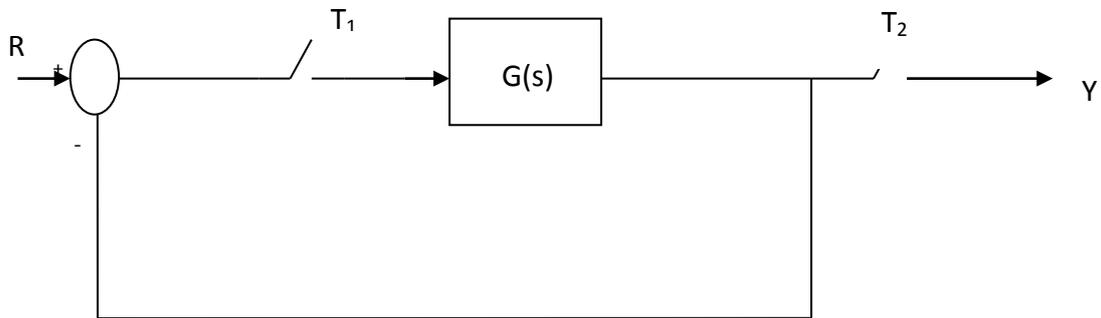


Figura 4.28. Sistema multifrecuencia en bucle cerrado

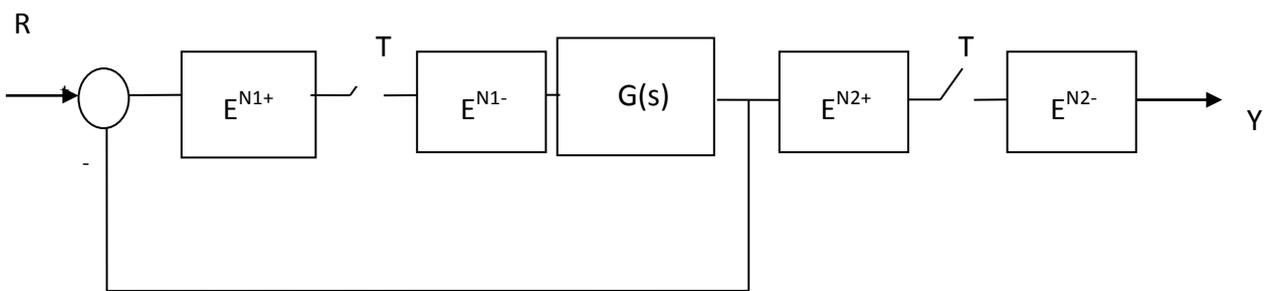


Figura 4.29. Sistema multifrecuencia equivalente al de la figura 4.28

Usando la notación compacta introducida al principio del apartado, la descomposición vectorial de conexiones transforma al sistema según se muestra en la figura 4.29, que es equivalente al de la figura 4.30.

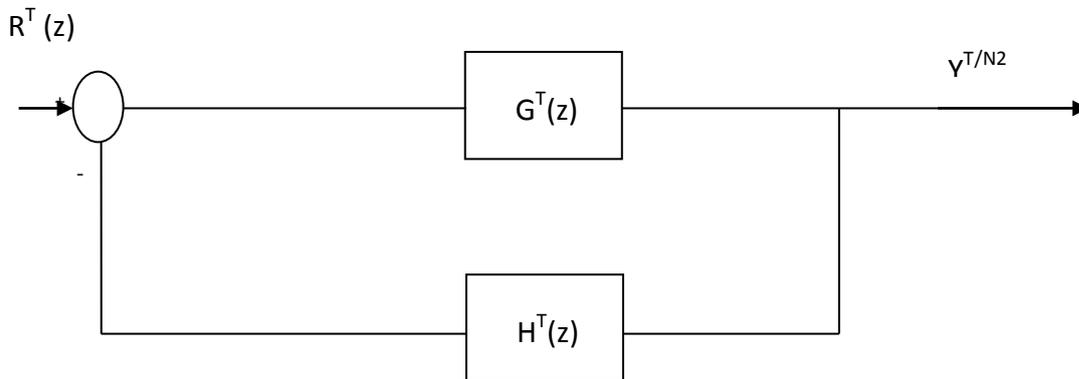


Figura 4.30. Sistema multifrecuencia equivalente al de la figura 4.28 (aplicando transformaciones a bajo nivel)

Donde:

$$R^T(z) = [E^{N_1+}R(s)]^T$$

$$G^T(z) = [E^{N_1-}G(s)E^{N_2+}]^T$$

$$H^T(z) = [E^{N_1+}E^{N_2-}]^T$$

$$Y^{T/N_2}(z) = E^{N_2-}Y^T(z)$$

En definitiva, vemos que a partir de un sistema multifrecuencia dado, la introducción de la descomposición vectorial de conexiones y sus correspondientes operadores de Kranc conduce a un sistema monofrecuencia equivalente sobre el que se puede analizar el comportamiento, estabilidad y robustez del sistema multifrecuencia original. La principal aportación del modelo de Thompson radica en que los operadores de Kranc permiten manejar el sistema equivalente monofrecuencia, lineal e invariante con el tiempo como una representación externa, con las ventajas que de ello se derivan en la generación de funciones de transferencia, análisis y diseño del sistema. Consecuencia directa de esto es que en el modelado mediante operadores de Kranc,

podemos establecer una metodología sistemática en la que los pasos a seguir son los siguientes:

- 1º) Determinar el mínimo común múltiplo  $T$  de los períodos de muestreo presentes en el sistema multifrecuencia (*periodo global, periodo modelo o metaperiodo*).
- 2º) Descomponer cada muestreador inicial como un conjunto de muestreadores operando con el período  $T$  según la descomposición vectorial de conexiones.
- 3º) Agrupar los vectores de adelanto y retardo resultantes de la descomposición  $E^{N^+}$  y  $E^{N^-}$  con los bloques analógicos o digitales presentes en el sistema, formando operadores de Kranc:

$$G^T(z) = [E^{N_1^-} G(s) E^{N_2^+}]^T$$

- 4º) Operar sobre el sistema monofrecuencia resultante, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, mediante la combinación de los operadores de Kranc generados.

El Operador de Kranc se puede entender como el sistema digital empotrado operando a un período que es el mínimo común múltiplo de todos los períodos encontrados en el sistema multifrecuencia. Mediante este tipo de modelado convertimos un sistema SISO multifrecuencia variante en el tiempo, en otro MIMO monofrecuencia invariante en el tiempo. Así, el número de entradas y salidas se ve incrementado, no así el de estados.

Se ha mostrado la simplicidad de manejo y la notable operatividad que los Operadores de Kranc ofrecen para el estudio de los sistemas muestreados multifrecuencia. Al implementar estos en el entorno Matlab/Simulink o Sysquake, se derivan ventajas en cuanto a potencia de cálculo, simulación y desarrollo de funciones complementarias. Gracias a esto, en el presente capítulo se podrá abordar el problema del análisis y diseño de sistemas muestreados multifrecuencia.

#### 4.2.1.6. DISEÑO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS MULTIFRECUENCIA

---

##### ***Control multifrecuencia y modelos muestreados***

El esquema básico de control multifrecuencia considerado en esta tesis se muestra en la figura 4.31:

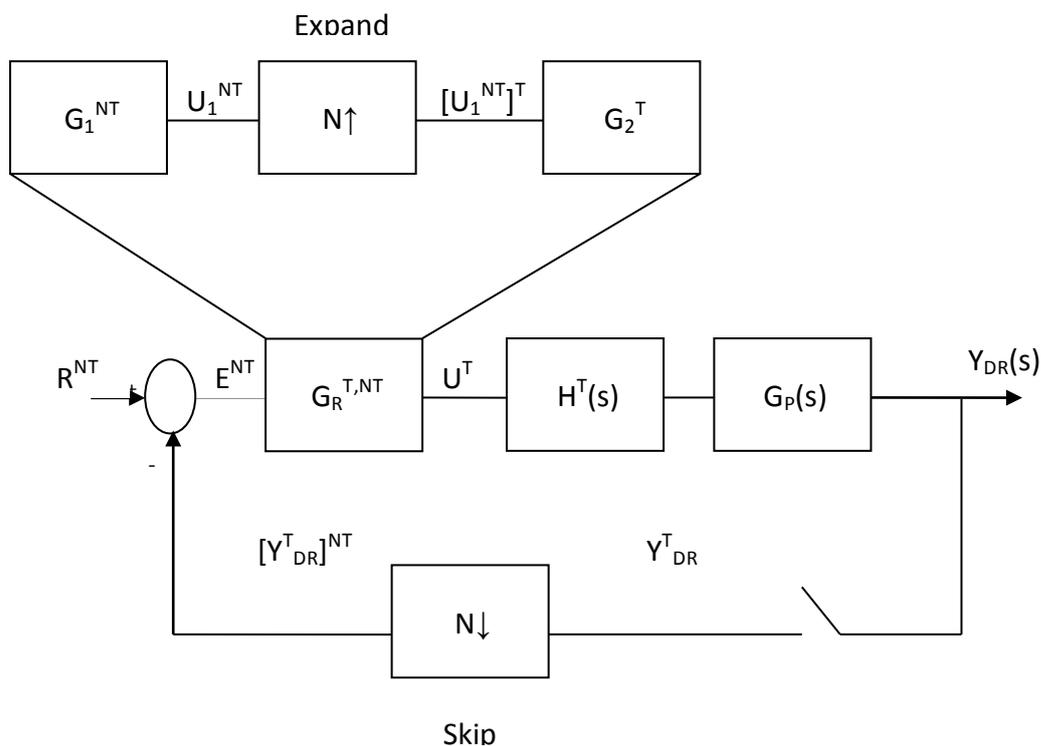


Figura 4.31. Sistema bifrecuencia en bucle cerrado

En este esquema, la planta se representa por un sistema continuo LTI SISO de orden  $n$ , con función de transferencia  $G_p(s)$ . La salida del regulador bifrecuencia  $G_{R,N}^T$  es actualizada a período  $T$  a través del dispositivo de retención rápida  $H$ . La salida continua  $Y(s)$  se discretiza a período  $NT$  y se compara con la referencia  $R(t)$ , que está siempre disponible, obteniéndose el error para el regulador. Para simplificar el cómputo, y sin pérdida de generalidad, se asume que  $N$  es un número entero.

Nótese que al no tener que usar los operadores de Kranc en este apartado -y, por tanto, no tener que hacer referencia ni al periodo de muestreo base ni al metaperiodo- por simplicidad de notación se usan los siguientes periodos de muestreo: Periodo de muestreo lento:  $NT$ . Periodo de muestreo rápido:  $T$ .

El regulador bifrecuencia estará compuesto por tres partes:

1. El error calculado  $(R^{NT} - Y^{NT})$  es procesado por la parte lenta del regulador  $G_1^{NT}$ .

2. La salida de la parte anterior pasa a través de un bloque Expand para convertir la secuencia a periodo de muestreo  $T$ .

3. Finalmente, la parte rápida del regulador  $-G_2^T$  junto con un bloque que asegura que la conversión de frecuencias es correcta  $-H_N^T$  proporciona la entrada de control al proceso.

### *Diseño de reguladores multifrecuencia*

A partir del modelo descrito en el apartado anterior se va a plantear la cuestión de cómo diseñar un regulador bifrecuencia. Dado un proceso continuo,  $G_p(s)$ , el objetivo principal es diseñar un controlador bifrecuencia para obtener un comportamiento en bucle cerrado lo más parecido posible al conseguido con una función de transferencia en bucle cerrado  $M(s)$ .

Si denotamos como  $G_R^T$  y  $G_R^{NT}$  a los equivalentes discretos de un regulador continuo  $G_R(s)$  para periodos de muestreo  $T$  o  $NT$ , respectivamente. Las funciones de transferencia en bucle cerrado de la planta más el regulador serán las siguientes:

$$M_R^T(z) = \frac{Y_R^T(z)}{R^T(z)} = \frac{G^T(z)G_R^T(z)}{1 + G^T(z)G_R^T(z)}$$

$$M_R^{NT}(z) = \frac{Y_R^{NT}(z_N)}{R^{NT}(z_N)} = \frac{G^{NT}(z_N)G_R^T(z_N)}{1 + G^{NT}(z_N)G_R^T(z_N)}$$

Ninguna de estas dos funciones se ajustará a los correspondientes equivalentes discretos de  $M(s)$ . Por lo tanto, ninguna de las correspondientes salidas tiene por qué ajustarse a la salida continua equivalente. Si se diseña un controlador de cancelación, los controladores monofrecuencia correspondientes son:

$$\bar{G}_R^T(z) = \frac{1}{G^T(z)} \cdot \frac{M^T(z)}{1 - M^T(z)}$$

$$\bar{G}_R^{NT}(z_N) = \frac{1}{G^{NT}(z_N)} \cdot \frac{M^{NT}(z_N)}{1 - M^{NT}(z_N)}$$

Ambas funciones de transferencia tienen dos términos claramente diferenciados. El primer término es la inversa de la función de transferencia de la planta; y el segundo es función únicamente de la función de transferencia deseada para el sistema. Es evidente, por tanto, que estamos ante controladores de cancelación, con todas las restricciones que esto conlleva (condiciones para la estabilidad, oscilaciones ocultas,...)

En este segundo caso las respuestas de los sistemas obtenidos ante las referencias  $R^T(z)$  y  $R^{NT}(z_N)$  (respectivamente) coincidirán con las correspondientes secuencias discretas tomadas del sistema continuo inicial. Es decir:

$$M^T(z) = \frac{Y_c^T(z)}{R^T(z)} = \frac{\bar{Y}^T(z)}{R^T(z)}$$

$$M^{NT}(z_N) = \frac{Y_c^{NT}(z_N)}{R^{NT}(z_N)} = \frac{\bar{Y}^{NT}(z_N)}{R^{NT}(z_N)}$$

El objetivo es diseñar un regulador multifrecuencia para alcanzar el rendimiento del sistema controlado a frecuencia rápida ( $M^T(z)$ ) a partir de una secuencia de medidas de la salida a frecuencia lenta. Utilizaremos el resultado siguiente:

**Teorema 1** [SALT11]. Dado un proceso continuo  $G_p(s) = B(s)/A(s)$ , y un modelo de referencia  $M(s)$  para el sistema controlado, asumiendo una frecuencia de actualización de control  $1/T$ , y la salida muestreada a frecuencia  $1/NT$  (figura 4.31):

a) La salida del sistema bifrecuencia cuando en la entrada hay una referencia  $r(t)$  discretizada a frecuencia rápida  $R^T(z)$  coincidirá con la salida del sistema monofrecuencia rápido si el controlador bifrecuencia está compuesto de una parte lenta dada por  $1/(R^{NT}(z_N) - [M^T R^T]^{NT}(z_N))$  y una parte rápida dada por  $M^T(z)R^T(z)/G^T(z)$ . Esto es:

$$G_R^{T,NT}(z) = \frac{M^T(z)R^T(z)}{G^T(z)} \cdot \left[ \frac{1}{R^{NT}(z_N) - [M^T R^T]^{NT}(z_N)} \right]^T (z)$$

b) Más aún, si la salida rápida una vez que ha pasado por el bloque *skip*,  $[Y_{DR}^T]^{NT}$ , fuese la misma que la salida del esquema en bucle cerrado monofrecuencia lento,  $\bar{Y}^{NT}(z_N) = Y_c^{NT}(z_N)$ , entonces las partes del controlador serán las siguientes:

- Una parte rápida dada por:

$$G_2^T(z) = \frac{M^T(z)}{G^T(z)}$$

- Una parte lenta dada por:

$$G_1^{NT}(z_N) = \frac{1}{1 - M^{NT}(z_N)}$$

- Un convertidor de frecuencia dado por:

$$H^{T,NT}(z) = \frac{R^T(z)}{[R^{NT}]^T(z)}$$

Puesto después del bloque *expand*.

### Comentarios

- 1) Para cambios en escalón en la referencia, el regulador bifrecuencia alcanzará el mismo rendimiento discreto que el regulador rápido, pero utilizando una frecuencia de muestreo lenta para la salida.
- 2) Se puede evitar el rizado intermuestreo si en la parte rápida del controlador,  $G_2^T(z)$ , se sustituye  $M^T(z)$  por  $M_R^T(z)$  pero la respuesta no tiene por qué coincidir con la respuesta continua.
- 3) Resultados similares se pueden derivar para otras referencias de entrada con un convertidor de frecuencia generalizado,  $H_{\lambda,N}^T$

### Algoritmo de diseño

Como conclusión, el siguiente algoritmo resume el proceso de diseño:

Dado el modelo de la planta  $G_p(s)$ , la función de transferencia en bucle cerrado cuyo comportamiento se pretende imitar,  $M(s)$ , la entrada al sistema, y los periodos de muestreo rápido ( $T$ ) y lento ( $NT$ ); se diseña un controlador multifrecuencia con tres partes:

- Un controlador rápido
- Un controlador lento

- Un convertidor de frecuencia

Para lo cual se usan las discretización rápida de la planta, las discretizaciones lenta y rápida de  $M(s)$  y la entrada al sistema.

Si la planta es inestable en bucle abierto, de fase no mínima o aparece algún rizado intermuestreo debido a las cancelaciones planta-regulador, se puede hacer lo siguiente:

- Calcular el controlador de cancelación continuo:

$$G_R(s) = \frac{1}{G_p(s)} \frac{M(s)}{1 - M(s)}$$

Y discretizarlo para obtener  $G_R^T(z)$ .  $M(s)$  deberá ser escogido de tal forma que no haya cancelación de polos inestables en este controlador

- Sustituir en el controlador multifrecuencia el controlador rápido por

$$G_2^T(z) = \frac{M_R^T(z)}{G^T(z)}$$

#### *Particularización de la estructura del controlador bifrecuencia para un PID*

Una vez que la estructura del controlador bifrecuencia ha quedado explicada, se va a presentar su particularización para trabajar con reguladores tipo PID. En estos casos, la descomposición del controlador es la siguiente [SALT06]:

- Una parte lenta (periodo de muestreo =  $NT$ ) dada por un controlador PI el cual, basándonos en métodos clásicos de discretización, viene dado por:

$$G_{PI}(z_N) = K_{PI} \frac{z_N - \left(1 - \frac{NT}{T_i}\right)}{z_N - 1}$$

- Una parte rápida (periodo de muestreo =  $T$ ) dada por un controlador PD el cual, basándonos en métodos clásicos de discretización, viene dado por:

$$G_{PD}(z) = K_{PD} \frac{z \left(1 + \frac{T_d}{T}\right) - \frac{T_d}{T}}{z}$$

- Un convertidor de frecuencias situado entre las dos partes del controlador dado por

$$H^{T,NT}(z) = \frac{R^T(z)}{[R^{NT}]^T(z)}.$$

### Técnicas de análisis

Las técnicas de análisis consideradas en este capítulo son: en el dominio del tiempo (lugar de las raíces) y en el dominio de la frecuencia. En esta sección se resumen las técnicas de obtención de la respuesta en frecuencia consideradas en la herramienta diseñada.

Como es bien sabido, la respuesta en frecuencia para un sistema discreto dado se obtiene haciendo la siguiente sustitución:

$$z = e^{j\omega T}$$

Por tanto, para obtener la respuesta en frecuencia de un sistema bifrecuencia hay que evaluar la expresión  $G_{lifted}(e^{j\omega T})$ , siendo  $T$  el metaperiodo, o dicho de otra forma, el mínimo común múltiplo de los periodos de muestreo de entrada ( $T_u$ ) y salida ( $T_y$ ). Usaremos el siguiente resultado.

**Teorema 2** [SALT11]: La salida  $y(k)$ , cuando la entrada es  $u(k) = e^{j\omega T_u k}$ , de un sistema SISO bifrecuencia ( $N_u T_u = N_y T_y$ ) estirado  $y_l(z) = G_{lifted}(z)u_l(z)$  es una colección de componentes  $y_r(k) = \bar{y}_r e^{j\omega_r T_y k}$ , de frecuencias  $\omega_r = \omega + 2\omega_y^s r / N_y$ , para  $r = 0, \dots, (N_y - 1)$ , con  $\omega_y^s = \pi / T_y$ ; y  $\bar{y}_r$  está dado por:

$$\bar{y}_r = \frac{1}{N_y} \sum_{p=0}^{N_y-1} \sum_{q=0}^{N_u-1} G_{pq}(e^{j\omega_r T_y N_y}) e^{-j\omega_r T_y p} e^{j\omega T_u q}$$

El cálculo discreto de la respuesta en frecuencia se obtiene mediante la sustitución  $z = e^{j\omega T}$  para algún valor específico de  $T$ . Los componentes de frecuencia estarán dados por el producto de la respuesta en frecuencia de un factor izquierdo (vector fila) de la forma:

$$[1 \ z^{-1} \ z^{-2} \ \dots \ z^{-(N_y-1)}] G_{lifted}(z^{N_y})$$

en el que se hace la sustitución  $z = e^{jw_r T_y}$ ; y un factor derecho (vector columna) de la forma:

$$[1 \ z \ z^2 \ \dots \ z^{N_u-1}]^T$$

en el que se hace la sustitución  $z = e^{jw T_u}$ . En un caso MIMO, el factor izquierdo sería:

$$[I_y \ z^{-1}I_y \ z^{-2}I_y \ \dots \ z^{-(N_y-1)}I_y]G_{lifted}(z^{N_y})$$

y el derecho:

$$[I_u \ zI_u \ z^2I_u \ \dots \ z^{N_u-1}I_u]^T$$

Donde  $I_y$  es una matriz identidad de  $N_y \times N_y$ , e  $I_u$  es una matriz identidad de  $N_u \times N_u$ . Esto no es, en general, un cálculo de respuesta en frecuencia ordinaria ya que son necesarias dos diferentes sustituciones para  $z$ . En el caso particular de  $N_u = 1$ , el factor derecho se hace igual a 1. Por tanto, sólo hay que calcular el factor izquierdo para hallar la respuesta en frecuencia, usando un periodo  $T_y$ . En el caso particular de  $N_y = 1$ , el factor izquierdo se hace igual a  $G_{lifted}(z^{N_u})$ . Por tanto, la respuesta en frecuencia se calcula usando un periodo  $T_u$  con  $G_{lifted}(z^{N_u})[1 \ z \ z^2 \ \dots \ z^{N_u-1}]^T$ . En ambos casos se está obteniendo la respuesta en frecuencia de forma similar al cálculo clásico de ésta.

### Caso coprimo

Si  $N_y$  y  $N_u$  son coprimos, se puede calcular toda la respuesta en frecuencia a partir de una sola gráfica de Bode. Es decir, en vez de tener que hacer dos sustituciones distintas para la variable  $z$ , sólo se hace una, con lo que el procedimiento para calcular la respuesta en frecuencia es muy parecido al usado en control clásico. Ésta es la implementación que se ha realizado en la presente tesis. La modificación del cálculo de la respuesta en frecuencia para este caso puede resumirse en el siguiente teorema.

**Teorema 3** [SALT11]: La salida  $y(k)$ , cuando  $u(k) = e^{jw T_u k}$ , de un sistema SISO bifrecuencia ( $N_u T_u = N_y T_y$ ) estirado  $y_l(z) = G_{lifted}(z)u_l(z)$  es una colección de componentes  $y_r(k) = \bar{y}_r e^{jT_y w_r k}$  de frecuencias  $w_r = w + r w_s$ , para  $r = 0 \dots (N_y - 1)$ . Denotando por  $T_{min} = T_u / N_y = T_y / N_u$ ,  $\bar{y}_r$  viene dado por el resultado de evaluar en  $z = e^{jw^* T_{min}}$  la siguiente expresión matricial:

$$(1 \ z^{-N_u} \ \dots \ z^{-(N_y-1)N_u}) \frac{G_{lifted}(z^{N_y N_u})}{N_y} \begin{pmatrix} 1 \\ z^{N_y} \\ \vdots \\ z^{(N_u-1)N_y} \end{pmatrix}$$

Donde  $w^*$  es calculada siguiendo la ecuación Diofantina

$$1 = k_u N_u - k_y N_y$$

Nótese que el resultado anterior no es válido si  $N_u$  y  $N_y$  no son coprimos, que es el caso práctico considerado en la herramienta desarrollada en la tesis.

### 4.2.2. HERRAMIENTA DESARROLLADA: MADT (*MULTIRATE ANALISYS AND DESIGN TOOL*)

---

En esta sección se va a presentar el funcionamiento de la herramienta desarrollada por medio de tres ejemplos de aplicación para ilustrar su uso en investigación o en cursos avanzados de control automático. En el apéndice A se da una descripción detallada de la herramienta diseñada. Se ha decidido llamarla MADT (*Multirate Analysis and Design Tool*) ya que, aunque contiene elementos de diseño y análisis de controladores monofrecuencia clásicos, su novedad principal radica en el análisis y diseño de controladores multifrecuencia.

#### 4.2.2.1. INTRODUCCIÓN: SYSQUAKE

---

Sysquake es un software creado especialmente para el diseño de sistemas aprovechando la visualización gráfica [SYS04]. Se diferencia de los programas tradicionales en que utiliza gráficos interactivos, permitiendo su manipulación directa por parte del usuario. En esta sección se describen las características generales de Sysquake. Puede consultarse [SYS04], [WSYS] para más detalles.

El uso de Sysquake es altamente recomendable cuando se busca conseguir uno de los siguientes dos objetivos:

- **Comprender conceptos básicos:** En Ingeniería muchas veces nos encontramos con que la teoría no es muy intuitiva al principio al relacionar variables de diferentes dominios: Energías y posiciones, tiempo y frecuencia, temperaturas y entropías, ... Los mecanismos básicos que relacionan estas variables pueden ser ilustrados de forma muy efectiva con el uso de Sysquake.
- **Diseño de sistemas:** En la gran mayoría de aplicaciones ingenieriles hay que buscar un compromiso de funcionamiento, debido a que los objetivos que hay que alcanzar (por ejemplo, velocidad, precisión y coste) tienen requerimientos contradictorios. Si nos centramos en los sistemas de control, es bien conocido que su diseño no es un proceso secuencial, sino más bien una integración entre cálculo numérico, análisis de resultados, y ajuste de los parámetros. Las características de Sysquake se adaptan muy bien a este tipo de procesos, ya que permiten no sólo observar la actualización de los gráficos en tiempo real mientras se varían los parámetros, sino también manipular los gráficos directamente y ver cómo los parámetros cambian en consecuencia.

### *Características generales*

En el trabajo presentado en la tesis se ha usado con la versión Sysquake LE 4.1; o, lo que es lo mismo, la versión gratuita de este programa que puede obtenerse de la página de su distribuidor Calerga [WSYS]. Ésta posee la mayoría de las características de la versión comercial y se puede utilizar sin ningún tipo de restricción. En nuestro entorno -donde los recursos destinados por las universidades y los estudiantes para adquirir software son limitados- es evidente la importancia de una versión gratuita.

El archivo ejecutable para la instalación es de 1.89 MB para la versión de Windows. Una vez instalado Sysquake ocupa 6.18 MB del disco duro, incluyendo los archivos de documentación con el manual del usuario y 26 ejemplos de programas que se copian en la carpeta SQ\_files. A modo de comparación, la versión 7 de MATLAB requiere aproximadamente 300 veces más espacio para ser instalado (1.84 GB).

El lenguaje de programación es muy similar a otros lenguajes de alto nivel, sobre todo al usado en MATLAB. Ahora bien, a diferencia de éste, incorpora comandos y funciones particulares para lograr la interactividad de los gráficos. El intérprete de información numérica usado por Sysquake se llama “motor de matriz de poco peso” (LME, Lightweight MATH Engine). Éste incorpora más de 700 funciones, operadores y comandos nativos. En la versión LE, las funciones utilizadas para leer datos externos al programa creados por el usuario no están disponibles. Como resultado de esto, no se pueden hacer llamadas a funciones externas, por lo que si se crean nuevas funciones éstas deben incorporarse directamente al código.

Como ya se ha comentado, en el apéndice A se describe con más detalle el entorno de programación y el lenguaje de Sysquake.

#### 4.2.2.2. EJEMPLOS

---

##### *Primer ejemplo*

En este primer ejemplo se va a reproducir, usando la herramienta diseñada, el experimento realizado en [SALT06]. El objetivo es controlar un motor de corriente continua mediante un PID. La función de transferencia del motor (entrada: voltaje suministrado en voltios, salida: posición del motor) es la siguiente:

$$G_p(s) = \frac{125}{s(s + 50)}$$

Aunque la función de transferencia continua incluye un integrador y la referencia a seguir es una señal escalón, el controlador va a tener una parte integral para superar una zona muerta significativa presente en el comportamiento real del motor y no considerada en este modelo ideal.

El controlador PID continuo tiene los siguientes parámetros:

$$K_p = 0.7756 \quad T_d = 0.2934 \quad T_i = 0.038273$$

En este sistema, el periodo de muestreo mínimo al que puede trabajar el bucle de realimentación es 40 ms, mientras que no hay restricciones en la actualización de la señal de control. Si hacemos que todo el sistema trabaje a 40 ms el control resultante *deja bastante que desear*. Por tanto, se planteó *implementar un controlador bifrecuencia* con  $T = 0.01$  s,  $N = 4$ .

Usando la herramienta diseñada, las funciones de transferencia resultantes son las siguientes:

- Lazo abierto para el controlador monofrecuencia lento

$$\begin{aligned} G_P^{NT} G_{PD}^{NT} G_{PI}^{NT} &= \frac{0.0568(z_N + 0.5228)}{(z_N - 1)(z_N - 0.1353)} \cdot \frac{6.4646(z_N - 0.8801)}{z_N} \cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 1)} \\ &= \frac{0.3672(z_N + 0.5228)(z_N - 0.8801)}{(z_N - 1)(z_N - 0.1353)z_N} \cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 1)} \end{aligned}$$

- Lazo abierto para el controlador bifrecuencia

$$\begin{aligned} [G_P^T H^T G_{PD}^T]^{NT} G_{PI}^{NT} &= \left[ \frac{0.0053(z + 0.849)}{(z - 1)(z - 0.6065)} \cdot \frac{(z^5 - z)}{(z^5 - z^4)} \cdot \frac{23.5317(z - 0.967)}{z} \right]^{NT} \cdot \\ &\cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 1)} = \frac{0.513(z_N + 0.051)(z_N - 0.8743)}{(z_N - 1)(z_N - 0.1353)z_N} \cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 1)} \end{aligned}$$

- Bucle cerrado para el controlador monofrecuencia lento

$$\frac{G_P^{NT} G_{PD}^{NT} G_{PI}^{NT}}{1 + G_P^{NT} G_{PD}^{NT} G_{PI}^{NT}} = \frac{0.3672(z_N + 0.5228)(z_N - 0.8801)}{(z_N + 0.0226)[(z_N - 0.4707)^2 + 0.4188^2]} \cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 0.8355)}$$

- Bucle cerrado para el controlador bifrecuencia

$$\frac{[G_P^T H^T G_{PD}^T]^{NT} G_{PI}^{NT}}{1 + [G_P^T H^T G_{PD}^T]^{NT} G_{PI}^{NT}} = \frac{0.513(z_N + 0.051)(z_N - 0.8743)}{(z_N + 0.0057)[(z_N - 0.3958)^2 + 0.2478^2]} \cdot \frac{(z_N + 0.045)}{(z_N - 0.8355)}$$

Comparando las expresiones obtenidas para el bucle abierto, es fácil observar que:

- Los polos en lazo abierto coinciden, como era de esperar.
- Dos de los tres ceros en lazo abierto difieren; uno de ellos corresponde al proceso y el otro a la parte derivativa del controlador. El tercer cero corresponde a la parte integral del controlador, y coincide en ambos casos. Por tanto, ajustando estos ceros el diseño bifrecuencia puede ser llevado a cabo.

Comparando las expresiones obtenidas para el bucle cerrado, se tiene que:

- Los polos en bucle cerrado coinciden, como era de esperar.
- Tres de los cuatro ceros en bucle cerrado difieren. Además, los polos del controlador bifrecuencia tienen menor módulo que los del monofrecuencia lento (figuras 4.32 y 4.33). Esto hace que la respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia sea mejor, como se puede ver en la figura 4.34.

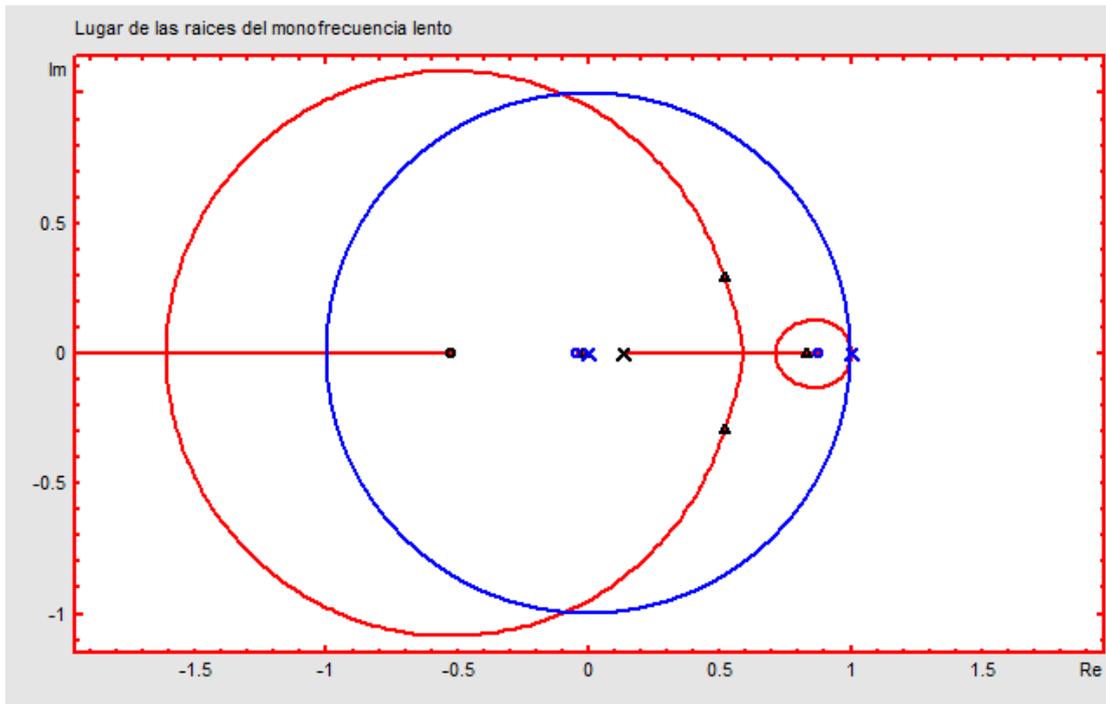


Figura 4.32. Ejemplo 1: Lugar de las raíces del sistema con controlador monofrecuencia lento (periodo de muestreo =  $NT$ )

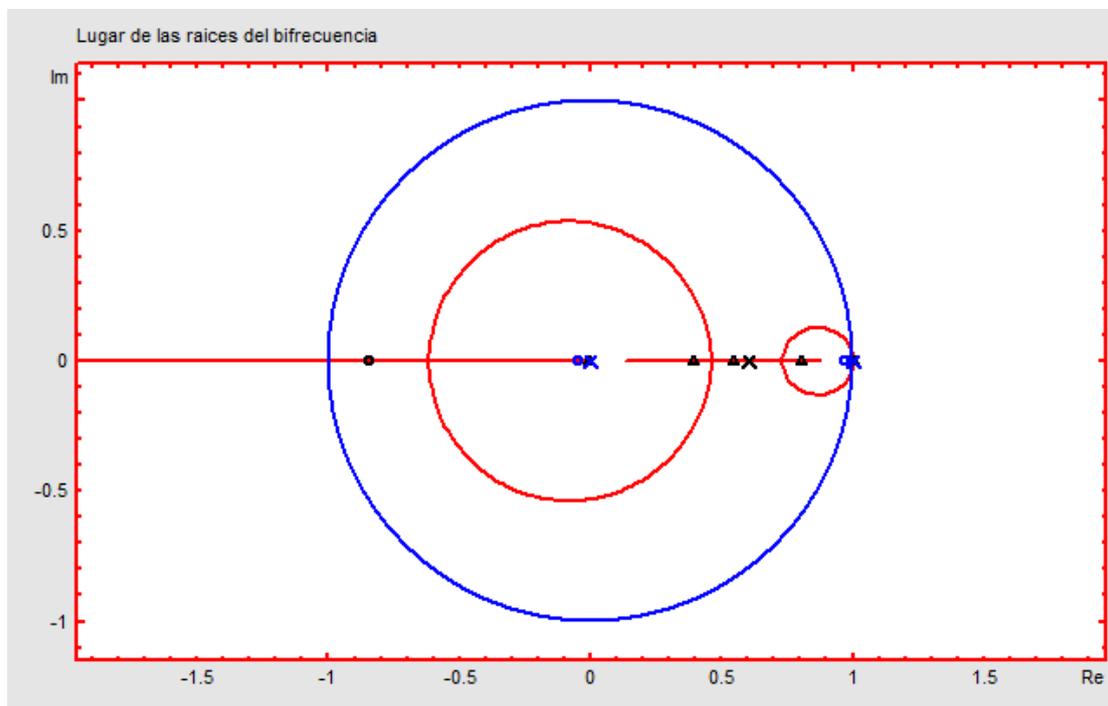


Figura 4.33. Ejemplo 1: Lugar de las raíces del sistema con controlador bifrecuencia

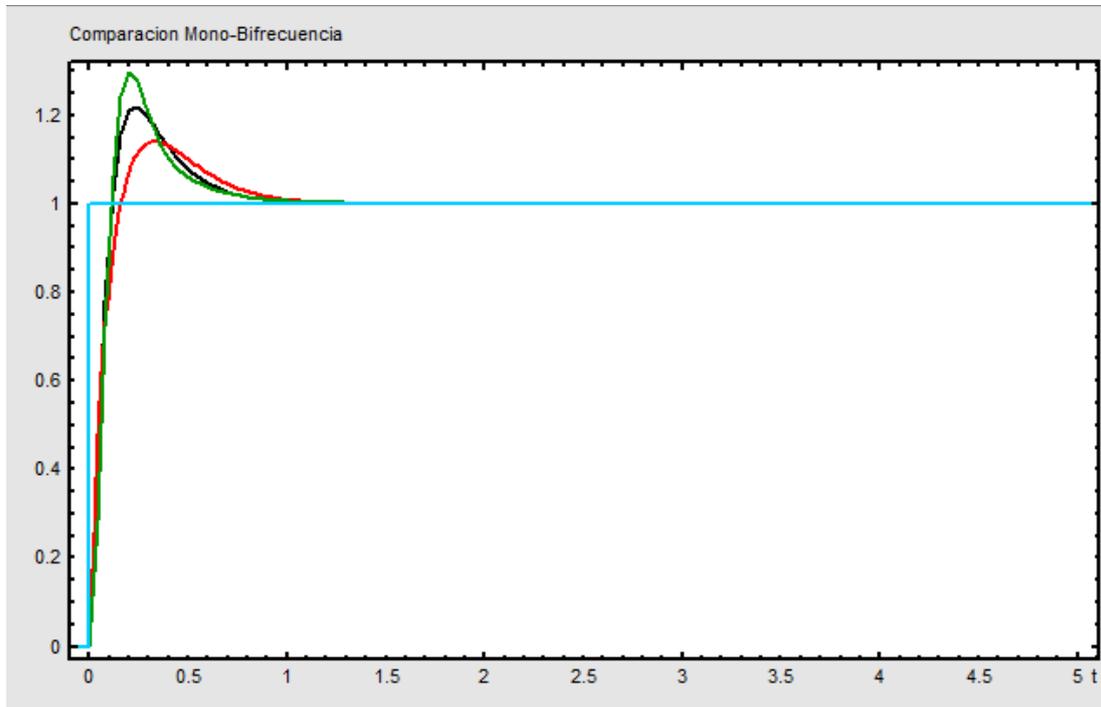


Figura 4.34. Ejemplo 1: Comparación de las respuestas temporales. Negro: Sistema con controlador bifrecuencia. Rojo: Sistema con controlador monofrecuencia rápido (periodo de muestreo = T). Verde: Sistema con controlador monofrecuencia lento (periodo de muestreo = NT).

### Segundo ejemplo

Como segundo ejemplo, se va a reproducir el experimento realizado en [SALT05]. Dado el siguiente proceso:

$$G(s) = \frac{1.5}{(s + 0.5)(s + 1.5)}$$

Un controlador PID continuo aceptable viene dado por:

$$K_p = 8 \quad T_d = 0.2 \quad T_i = 3.2$$

Se diseña e implementa un controlador bifrecuencia con  $T=0.1$  y  $N=3$  usando las expresiones de diseño estudiadas. Tanto desde el punto de vista temporal (figuras 4.35 y 4.36) como desde el punto de vista del lugar de las raíces (figuras 4.37 y 4.38) se observa que dicho controlador funciona muchísimo mejor que si usásemos la alternativa *clásica* (un controlador monofrecuencia con el periodo de muestreo lento).

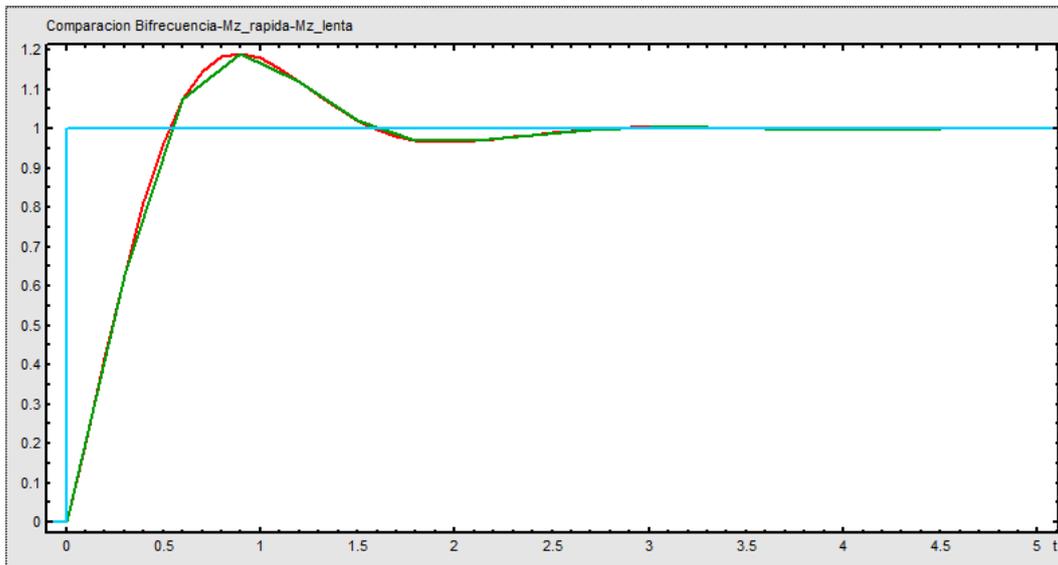


Figura 4.35. Ejemplo 2: Comparación de las respuestas temporales. Verde: Sistema con controlador bifrecuencia. Rojo: Comportamiento deseado del sistema en lazo cerrado. Es decir, la salida  $y(t)$  sigue perfectamente el comportamiento deseado en  $M(s)$

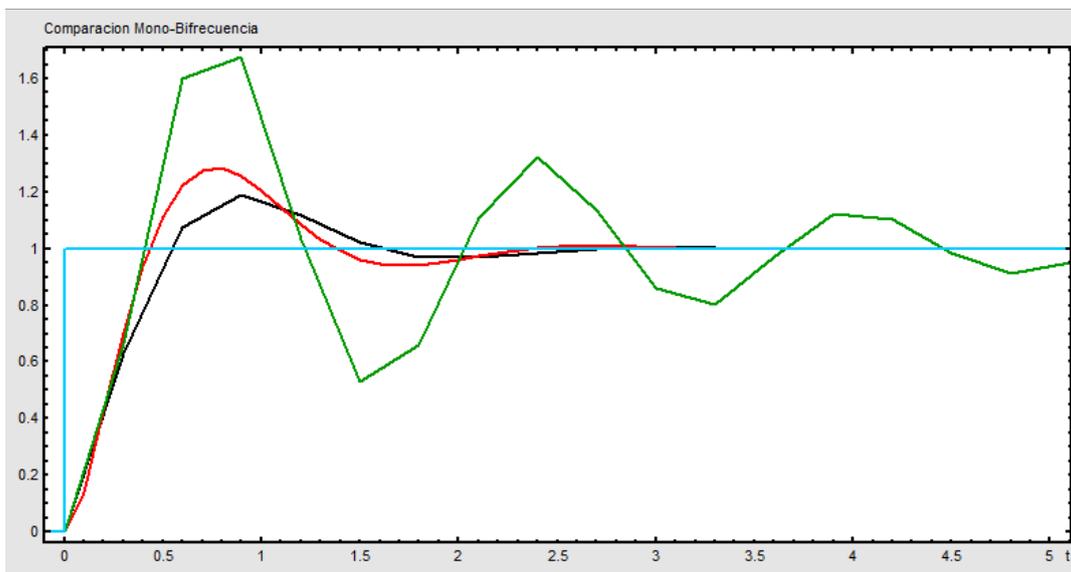


Figura 4.36: Ejemplo 2: Comparación de las respuestas temporales. Negro: Sistema con controlador bifrecuencia. Rojo: Sistema con controlador monofrecuencia rápido (periodo de muestreo =  $T$ ). Verde: Sistema con controlador monofrecuencia lento (periodo de muestreo =  $NT$ ).

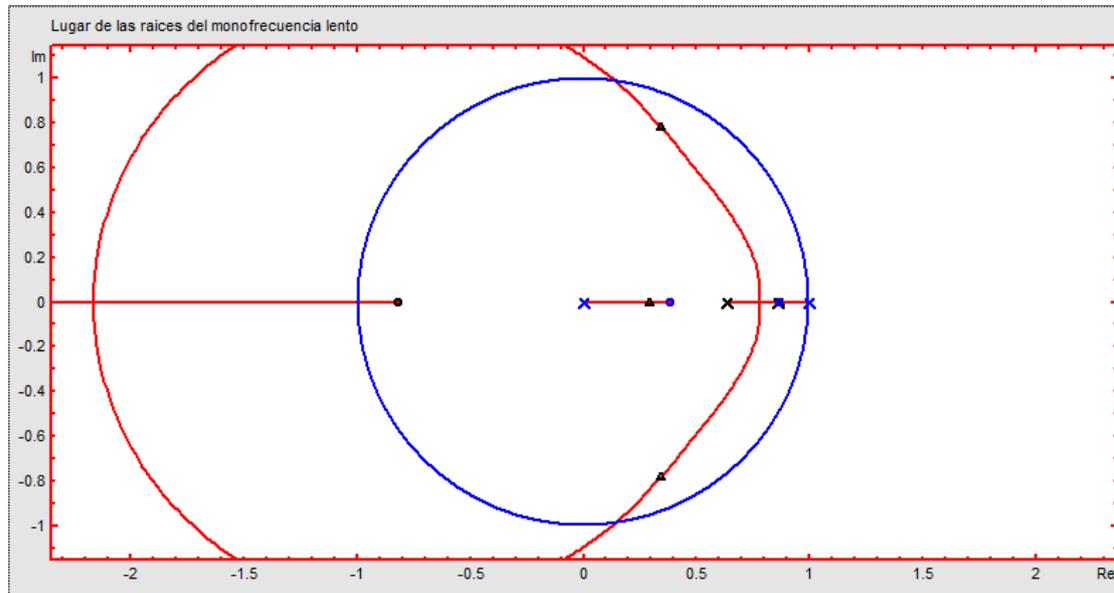


Figura 4.37. Ejemplo 2: Lugar de las raíces del sistema con controlador monofrecuencia lento (periodo de muestreo = NT)

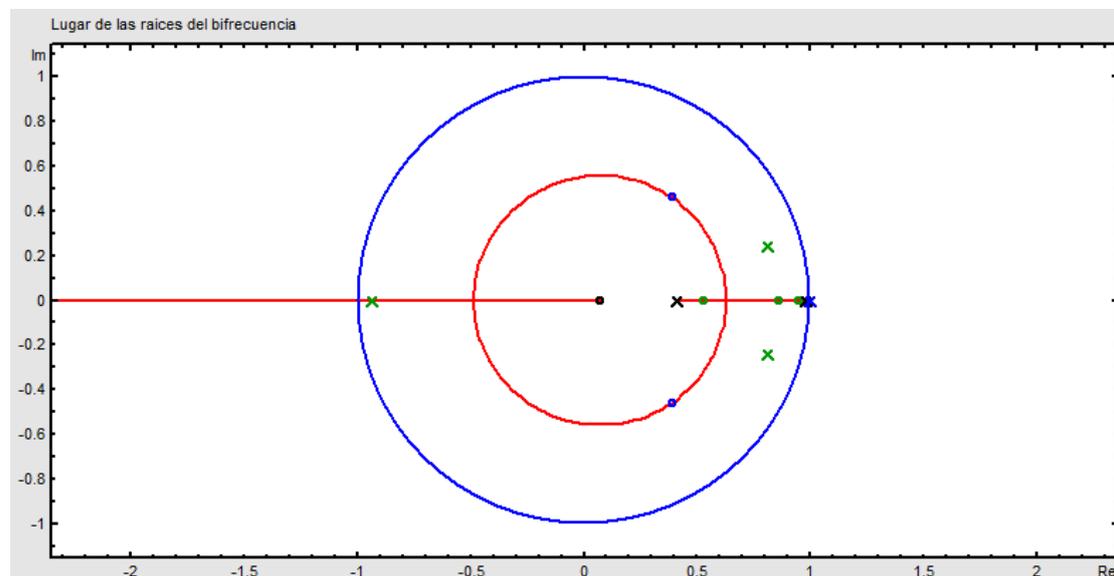


Figura 4.38. Ejemplo 2: Lugar de las raíces del sistema con controlador bifrecuencia. Al compararlo con la figura 4.36, es evidente que el sistema con controlador bifrecuencia es mucho más estable que el sistema con controlador monofrecuencia lento (el lugar de las raíces del primero está más alejado de las fronteras del círculo unidad que el del segundo; o, lo que es lo mismo, los polos del sistema con controlador bifrecuencia tienen un módulo menor)

Ahora bien, el análisis hecho por Sysquake sólo permite ver el sistema como un bloque. Es decir, lo que estamos observando es la salida  $[Y_{DR}^T]^{NT}$  (la salida de la planta una vez que ha pasado por el bloque *skip*). Si implementamos este sistema en Simulink, y observamos la salida de la planta ( $Y_{DR}(s)$ ), se obtiene el resultado de la figura 4.39.

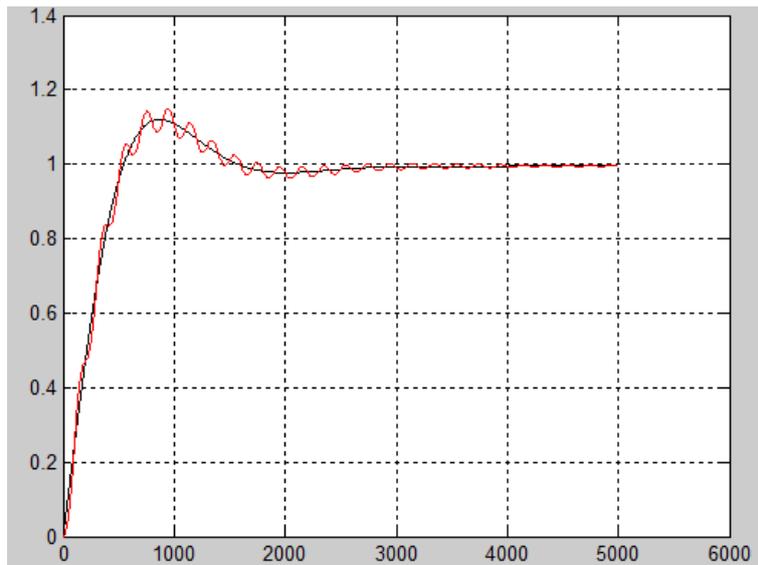


Figura 4.39. Ejemplo 2: Salida de la planta usando Simulink. Negro:  $M(s)$ , Rojo: Sistema bifrecuencia original

Se puede observar que hay oscilación intermuestreo. Midiendo en la gráfica, la frecuencia de dichas oscilaciones es de:

$$\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T_{osc}} = \frac{2\pi}{0.2} = 31.4159 \frac{rad}{s}$$

Volviendo a Sysquake, si calculamos la respuesta en frecuencia se obtiene la figura 4.40.

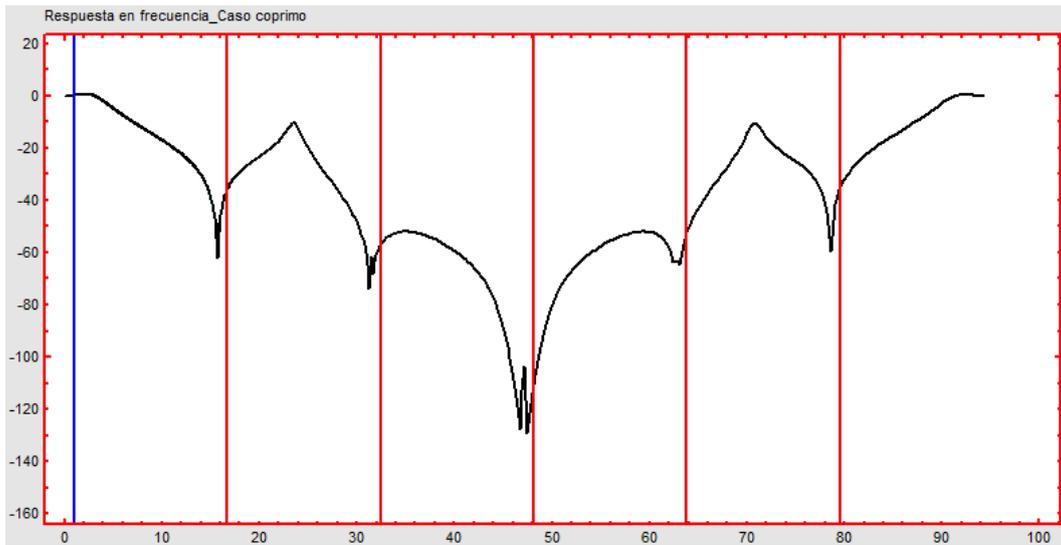


Figura 4.40. Ejemplo 2: Respuesta en frecuencia del sistema

Haciendo zoom (figura 4.41), se observa que uno de los “picos” de la gráfica coincide con la frecuencia de estas oscilaciones.

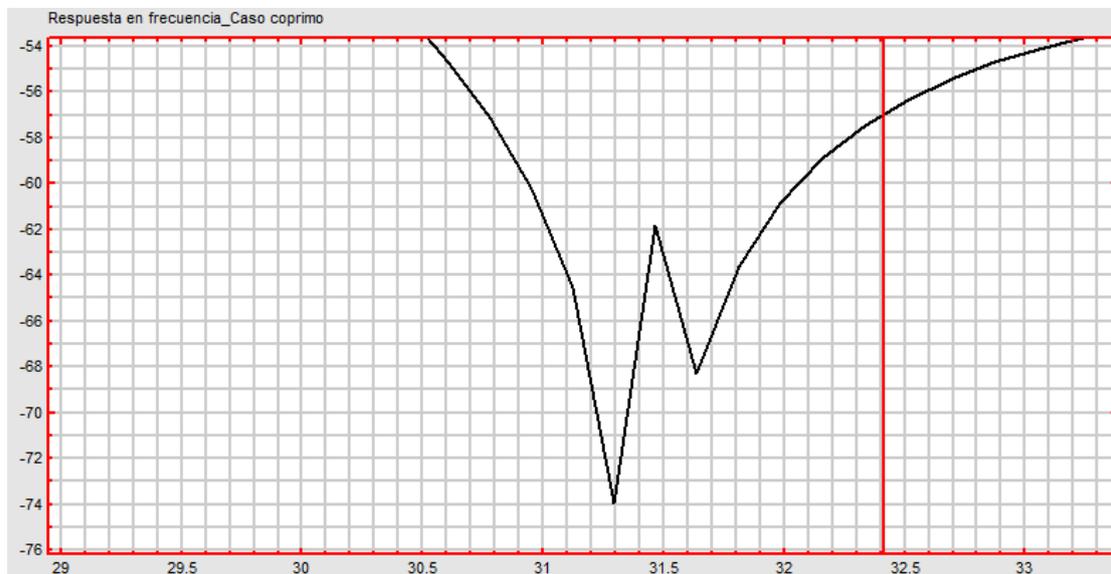


Figura 4.41. Ejemplo 2: Obtención de la frecuencia de las oscilaciones ocultas

Finalmente, para eliminar las oscilaciones ocultas se plantean dos posibilidades:

a) Sustituir la parte rápida del controlador por  $M_R^T(z)/G^T(z)$ , como se ha visto previamente; siendo el resultado el de la figura 4.42.

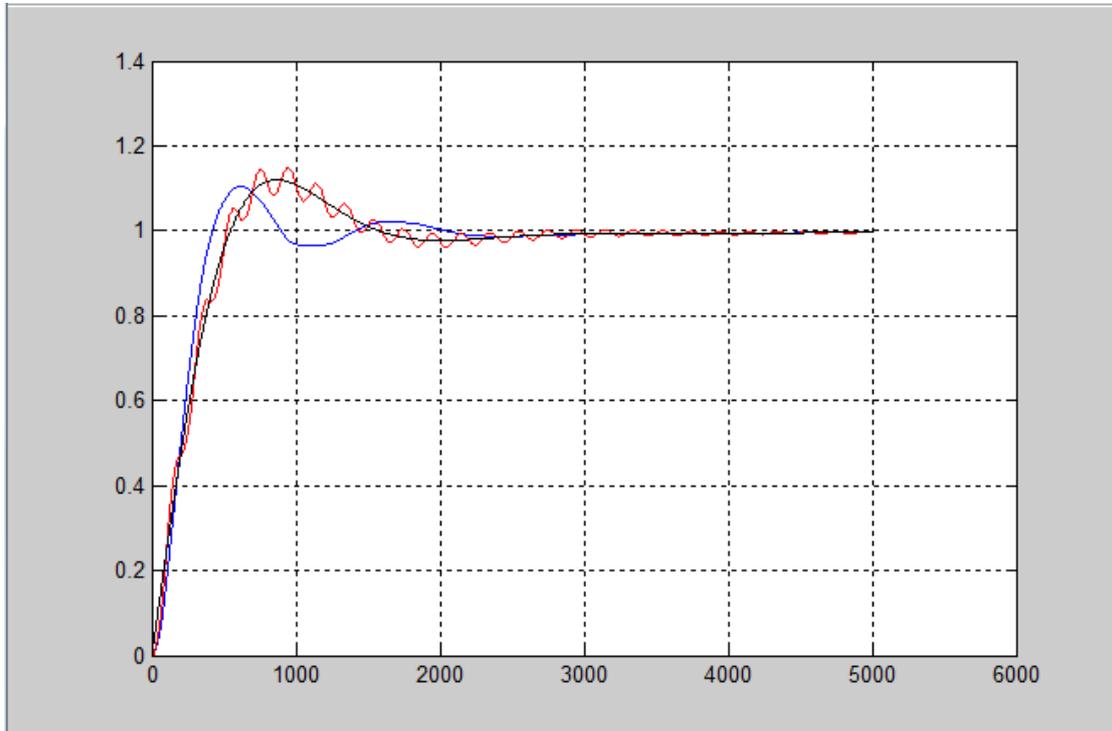


Figura 4.42. Ejemplo 2: Eliminación de las oscilaciones ocultas mediante la sustitución de la parte rápida del controlador. Negro:  $M(s)$ , Rojo: Sistema bifrecuencia original, Azul: Sistema bifrecuencia para eliminar oscilaciones ocultas

b) Intentar atenuar la magnitud de respuesta del pico de la respuesta en frecuencia causante del comportamiento oscilatorio. Para ello, se aplica un filtro de la forma:

$$F(z) = 0.720 \frac{z + 0.995}{z + 0.4}$$

Trabajando a periodo de muestreo rápido. El factor 0.720 se añade para que no haya sobreoscilación en la respuesta temporal.

Los resultados se observan en las figuras 4.43, 4.44 y 4.45.

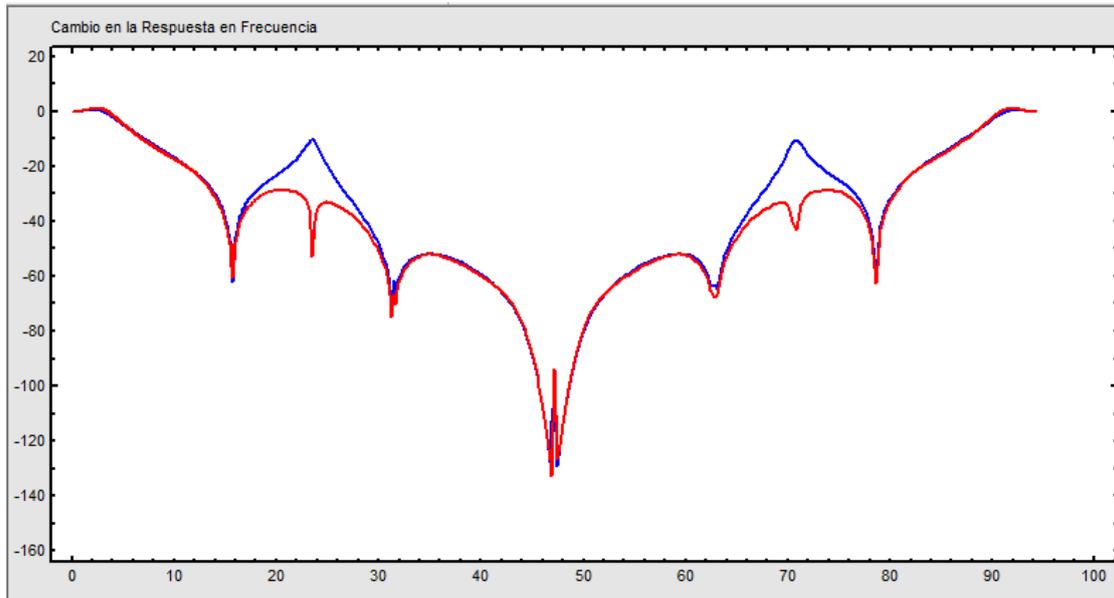


Figura 4.43. Ejemplo 2: Eliminación de las oscilaciones ocultas mediante la atenuación de los picos de la respuesta en frecuencia. Azul: Sistema original. Rojo: Sistema con filtro

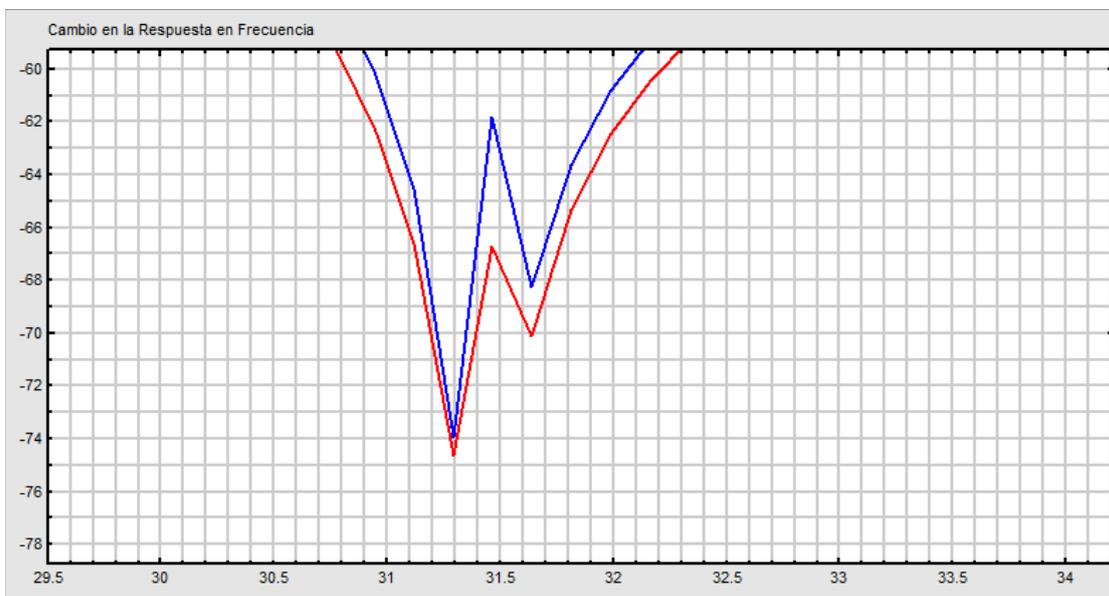


Figura 4.44. Ejemplo 2: Eliminación de las oscilaciones ocultas mediante la atenuación de los picos de la respuesta en frecuencia. Zoom en la frecuencia de las oscilaciones. Azul: Sistema original. Rojo: Sistema con filtro

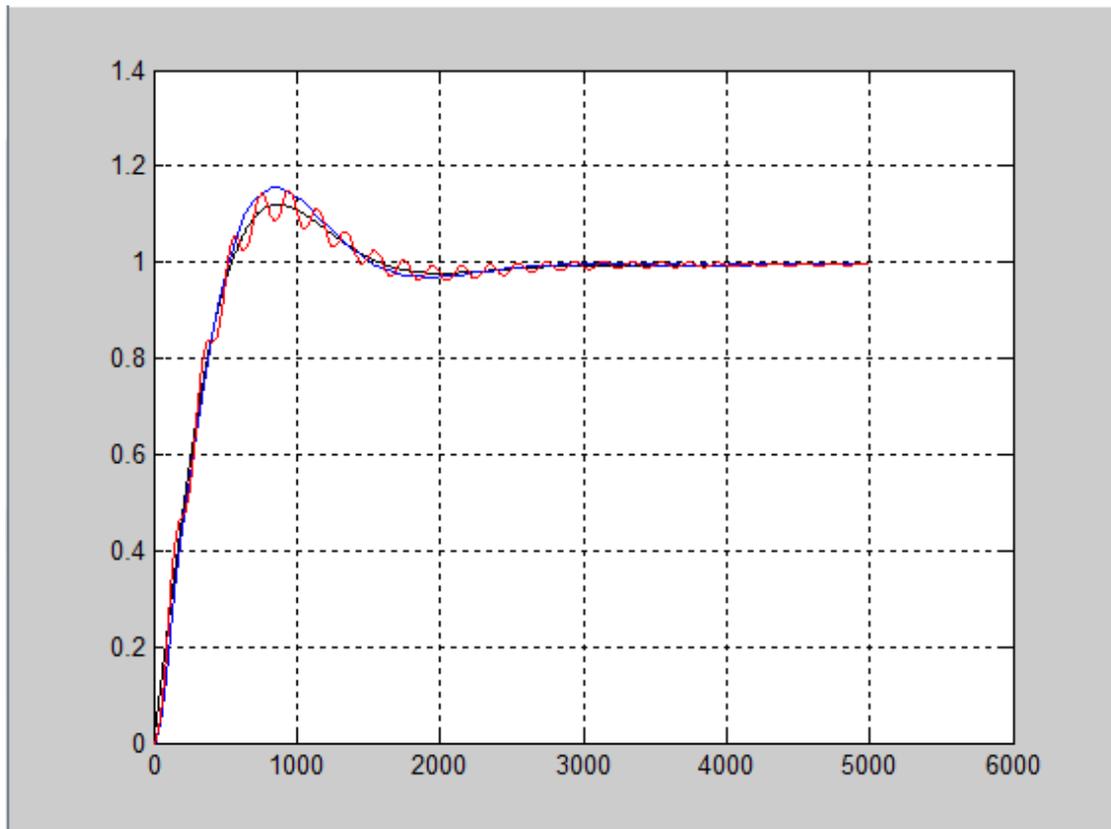


Figura 4.45. Ejemplo 2: Eliminación de las oscilaciones ocultas mediante la atenuación de los picos de la respuesta en frecuencia. Cambios en la respuesta temporal. Negro:  $M(s)$ , Rojo: Sistema bifrecuencia original, Azul: Sistema bifrecuencia con filtro

### Tercer ejemplo

Se desea controlar un sistema descrito en [MASC05] con una dinámica dada por:

$$G(s) = \frac{1}{0.001s^3 + 0.05s^2 + 0.6s + 1}$$

Mediante un regulador PID discreto que opera a un periodo  $T=10$  ms. Dicho regulador tiene la siguiente función de transferencia:

$$PID_{rapido} = \frac{94.19z^2 - 173.9z + 80}{z^2 - z}$$

Dado que en [MASC05] se impone la restricción de que la planta será controlada por medio de un sistema de bus compartido, no es posible en la práctica cumplir con el requerimiento del intervalo de muestreo igual a 10 ms, debiéndose incrementar éste

hasta, por ejemplo,  $T = 40$  ms. La función de transferencia del regulador discreto bajo esta condición de muestreo es:

$$PID_{lento} = \frac{34.56z_N^2 - 53.57z_N + 20}{z_N^2 - z_N}$$

Usando la herramienta diseñada se desarrolla un regulador bifrecuencia que toma lecturas a periodo lento de la salida de la planta, las procesa y envía a través del bus de campo, y posteriormente, se convierten a periodo más rápido para que con un procesamiento adecuado posterior se envíen al actuador de la planta.

En definitiva, tomando los siguientes datos:

$$T = 10 \text{ ms} \quad N = 4 \quad K_p = 14.56 \quad T_d = 0.05494 \quad T_i = 0.58997$$

Se obtienen los resultados de la figura 4.46.

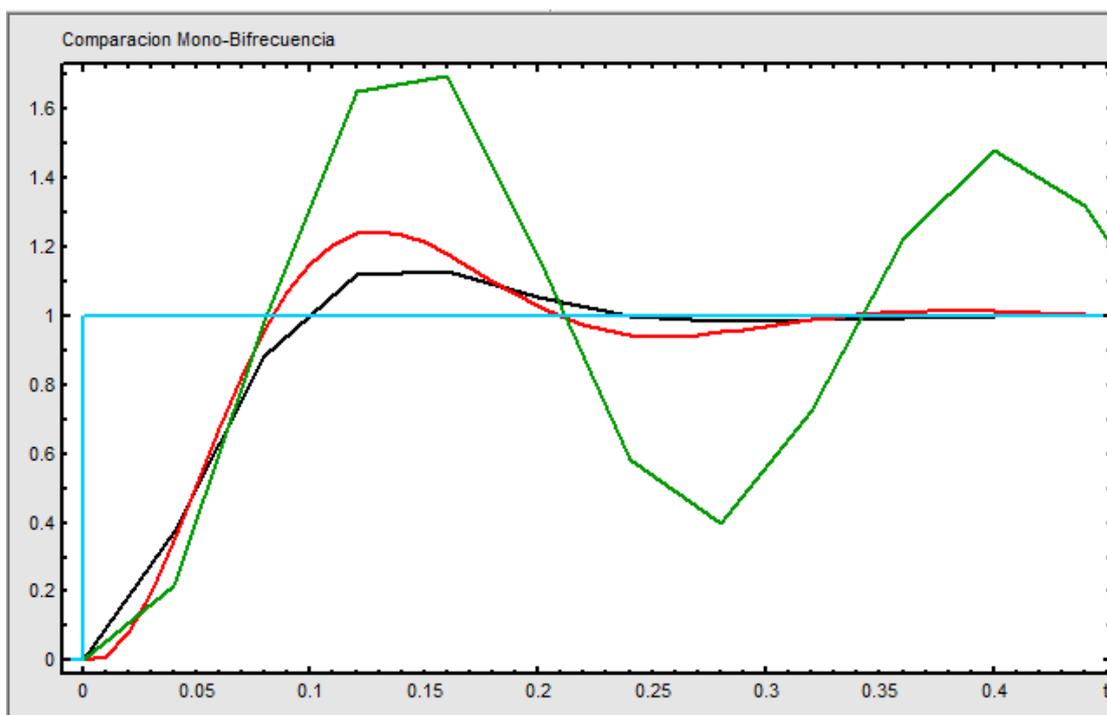


Figura 4.46. Ejemplo 3: Comparación de las respuestas temporales. Negro: Sistema con controlador bifrecuencia. Rojo: Sistema con controlador monofrecuencia rápido (periodo de muestreo =  $T$ ). Verde: Sistema con controlador monofrecuencia lento (periodo de muestreo =  $NT$ ).

Es decir, nuevamente estamos ante un caso en el que el regulador  $PID_{lento}$  no consigue las prestaciones deseadas y el bifrecuencia sí lo hace.

#### 4.3. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las principales conclusiones acerca de la utilización del software Scilab/Scicos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Es un tipo de software de acceso libre, evitando así cualquier desembolso de tipo económico por su utilización, ya sea para uso personal, laboral o docente. Debido a que este es un programa de código abierto, es decir, no se ha de pagar ninguna licencia para su utilización, es la herramienta perfecta para que grandes y pequeñas centros académicos como universidades y centros de investigación lo implanten como uno de sus paquetes de software básicos para el aprendizaje.
- Es capaz de realizar bloques y/o funciones utilizando los lenguajes de programación más extendidos en el mundo informático como son el lenguaje de programación C o Fortran.
- Hay una actualización continua por parte de los creadores incluyendo nuevas funciones, librerías y mejoras constantes, e incluso aportes adicionales de desarrolladores externos que utilizan este software.
- Tiene la ventaja de ser un software multiplataforma, se puede usar en sistemas operativos Windows, Mac OSX y Linux. Ventaja que puede ser aprovechada para crear puntos de investigación y desarrollo completamente gratuitos utilizando la combinación del sistema operativo Linux junto a Scilab/Scicos.
- Como se ha puesto de manifiesto en el ejemplo de la sección anterior, la combinación de uso de Scilab/Scicos permite la resolución correcta de problemas de ingeniería de control de la misma forma que se realizaría con otro tipo de software comercial.
- Dentro de las limitaciones que presenta cabe señalar, como ya se ha comentado, que en comparación con otros programas comerciales posee un interfaz gráfico algo inferior pudiendo mejorar la calidad de éste e incrementar las opciones de representaciones gráficas que incluye.

Como comentario final cabe destacar que se ha experimentado en el curso académico 2008 – 2009 con la implantación de este software en los laboratorios de control y automática obteniendo resultados igual de satisfactorios que los obtenidos con otros paquetes de software comercial. De hecho, se ha utilizado esta plataforma en la asignatura “*Sistemas Electrónicos de Control*” de 3º de Ingeniería Técnica Industrial

(Especialidad de Sistemas Electrónicos), de la Escuela Politécnica Superior de Elche, donde tradicionalmente las prácticas han venido desarrollándose bajo el sistema operativo Windows y utilizando Matlab/Simulink (y algunos *toolboxes*: control y signal processing normalmente). Se propuso que cada alumno eligiese el software con el que quería hacer las prácticas (evidentemente los resultados y las conclusiones obtenidas con ambos paquetes de software son idénticas). Se motivó al alumnado a utilizar el nuevo software aludiendo que éste es de uso libre, que no se infringe ninguna licencia al utilizarlo en cualquier tipo de máquina y que para lo que nos ocupa resulta tan potente como el usado normalmente. La distribución de alumnos que eligieron realizar la práctica con uno u otro software durante el año lectivo 2008 – 2009 se muestra en la tabla 4.1.

|                 | % Alumnos |
|-----------------|-----------|
| SCILAB/SCICOS   | 72%       |
| MATLAB/SIMULINK | 23%       |
| AMBOS           | 5%        |

Tabla 4.1. Distribución de alumnos por software

Como se puede observar, un pequeño porcentaje de alumnos optó por realizar las prácticas en ambos entornos con el fin de comparar los resultados obtenidos. Para aquellos que optaron por la plataforma Scilab/Scicos se comprobó que la curva de aprendizaje del nuevo entorno no era excesivamente elevada (ayudó mucho a ello los tutoriales y los ejemplos suministrados -bastante afines a las prácticas a realizar-) y que dado un pequeño periodo de aprendizaje básico fueron capaces de resolver los mismos problemas y con igual diligencia que con el software comercial.

En cuanto a la herramienta desarrollada con Sysquake presentada en la tesis se ha demostrado:

- El entorno Sysquake es una excelente opción para modelar sistemas. Las razones que respaldan esta afirmación son las siguientes:
- Ocupa relativamente poco espacio en memoria en comparación con otros programas similares.
- La eficiencia del intérprete de información numérica permite que tanto el tiempo de ejecución de cálculos como el trazado de gráficos sea satisfactorio.
- La versión libre Sysquake LE no presenta limitaciones sustanciales respecto a la versión comercial.
- Hay actualizaciones periódicas del programa por parte de los creadores.

- Las aplicaciones escritas permiten una gran interactividad con el usuario.

Dentro de las limitaciones de Sysquake cabe resaltar que la cantidad de funciones nativas es mucho menor que las que posee MATLAB, por lo que la programación puede llevar más tiempo.

Además, en el presente capítulo se ha demostrado que Sysquake es una herramienta totalmente apta para diseñar y analizar sistemas multifrecuencia. Una vez acostumbrados a su forma de programación, es relativamente sencillo programar cualquier tipo de gráfica necesaria. Además, la interactividad hace mucho más intuitivo el diseño de estos controladores, al poder ver en tiempo real los resultados de los cambios en los parámetros. Los dos únicos inconvenientes que se le pueden poner a Sysquake en este sentido son los siguientes:

a) Sysquake no permite actuar directamente sobre los parámetros de simulación (como por ejemplo, en Matlab).

b) Comparado con Simulink, es más complejo obtener la respuesta concreta de un bloque del sistema bifrecuencia, ya que no hay ninguna forma de programar de forma gráfica en base a bloques.

En cuanto a los trabajos futuros planteados se citan los siguientes:

Para redondear la utilización de Scilab/Scicos, sería interesante desarrollar un entorno para el control en tiempo real de sistemas físicos a través de una tarjeta o sistema de adquisición de datos. Para ello se dispone de las librerías Comedi y RTAI [WCOM], [WRTAI]. Además, cabe mencionar que a la hora de redactar este documento, está disponible la versión 5.3.0 de Scilab. Dicha versión representa un salto cuantitativo respecto a las versiones 5.2.x ya que incorpora dentro de la misma el software Xcos [WXCOS]. Xcos es un software de representación gráfica y simulación de sistemas basado en Scicos pero al parecer más potente, más intuitivo, mejorado visualmente y completamente integrado con Scilab. Sería por tanto una tarea interesante(aunque los cambios a nivel de manejo son mínimos) actualizar tutoriales y realización de prácticas con Xcos.

En cuanto a la herramienta Sysquake, los esfuerzos de investigación se han centrado en determinadas cuestiones específicas, habiéndose reservado para trabajos futuros la siguiente serie de tareas:

- Estudiar si con algoritmos propios o (si es posible) mediante la modificación de la propia estructura de Sysquake se pueden modificar los parámetros de simulación.

- Mejorar el grado de interactividad obteniendo, por ejemplo, relaciones numéricas “directas” entre la respuesta en frecuencia y los parámetros del controlador.
- Habilitar el uso de otro tipo de controladores multifrecuencia (controladores adaptativos, predictivos, inteligentes, etc.).

## 5. HERRAMIENTAS REMOTAS DESARROLLADAS

Durante los últimos años el uso de las capacidades que proporciona Internet ha posibilitado la realización de diversas herramientas que pueden mejorar significativamente la calidad de los procesos de enseñanza y aprendizaje. En enseñanzas técnicas además de los contenidos teóricos es fundamental la realización de prácticas con equipos reales de forma que el alumno asimile de forma adecuada los conceptos teóricos. Por este motivo desde principios de los 90 educadores en ingeniería han demostrado la capacidad de realizar experimentos en laboratorios docentes mediante el uso de Internet y tecnologías web. Así, la educación a distancia mediante el uso de laboratorios remotos a través de Internet es un tema de total actualidad como consecuencia del enorme potencial que supone para mejorar la calidad del proceso enseñanza-aprendizaje [AUS99], [COS10], [PUER01].

El trabajo presentado en este capítulo proporciona una arquitectura general para la ejecución remota en tiempo real de esquemas de control sobre sistemas físicos. La motivación de este trabajo ha sido, por un lado, la carencia de suficientes maquetas o sistemas reales en las prácticas de teoría de control; y por otro, la limitada disponibilidad temporal de laboratorios donde los estudiantes que cursan materias de automática y control de procesos, puedan desarrollar los conceptos vistos en teoría dentro de un marco práctico adecuado. Por tanto, la presente aplicación se centra en el control en tiempo real de sistemas físicos de forma remota a través de Internet, utilizando para ello Matlab/Simulink como plataforma de desarrollo. Esta aplicación permite al estudiante tanto simular como ejecutar en tiempo real, un esquema de control sobre un determinado sistema físico. De esta forma, el estudiante puede desarrollar estas actividades sin estar presente en el laboratorio donde esté ubicado el sistema real. La aplicación devuelve al usuario toda la información asociada a la simulación o ejecución solicitada, junto a los gráficos, datos y variables más relevantes.

### 5.1. EL SISTEMA RECOLAB

La idea de un Laboratorio por Control Remoto (RECOLAB: REMote COntrol LABoratory) surge para ofrecer al alumno la posibilidad de continuar con sus prácticas en casa no limitando el uso de los diferentes sistemas físicos al horario establecido para ello y permitir, del mismo modo, hacer un uso autónomo impensable en el laboratorio [PUER02-1], [PUER02-2]. Se permite, por tanto, que en titulaciones técnicas como las Ingenierías se pueda realizar un número elevado de prácticas, consiguiendo así que el alumno adquiriera unos conocimientos prácticos lo suficientemente extensos acorde con los conocimientos teóricos suministrados, pudiendo comprobar éstos sobre sistemas físicos reales. Así, RECOLAB compensaría en gran medida la falta de recursos suficientes que pueden presentar las universidades en relación a equipos y sistemas físicos reales sobre los que desarrollar las prácticas de forma eficiente.

RECOLAB presenta alternativas muy fiables como pueden ser la simulación del comportamiento de los sistemas físicos reales, o bien, el establecimiento de una conexión de éstos a través de Internet de forma que los alumnos los puedan manejar desde cualquier ordenador conectado a la red disponiendo de una sensación más realista del comportamiento de diversos sistemas físicos. Con este planteamiento, se podría diseñar y construir un conjunto de laboratorios remotos creando una red de laboratorios de forma que el estudiante pueda realizar una gran cantidad de prácticas sobre sistemas físicos reales y distintos a los que pueda tener una única universidad. Ya en 1994, multitud de educadores, científicos, ingenieros, etc., demostraron la viabilidad de este tipo de laboratorios así como el realizar prácticas experimentales utilizando Internet. Las características y funciones que debe tener una aplicación de control de procesos se describirán con posterioridad [CASI03], [DIX01], [DIX02]. En estos últimos años, se ha multiplicado el número de universidades que intentan realizar desarrollos paralelos para la realización de prácticas en laboratorios remotos. Sin embargo, a diferencia de estas propuestas, en el sistema propuesto se utilizan herramientas software (Matlab/Simulink) o sistemas que los estudiantes conocen ampliamente.

Los principales motivos por los que se ha optado por la plataforma Matlab/Simulink (con algunos toolboxes adicionales) para el desarrollo de esta aplicación son varios:

- Matlab y Simulink constituyen una plataforma fiable, conocida y con amplio soporte técnico.
- El tiempo de prototipado y desarrollo es bastante inferior al que presentan otras herramientas y plataformas (programación directa en un lenguaje de programación, etc.).

- Dicha plataforma suministra tanto herramientas para la ejecución remota de programas, como para la ejecución en tiempo real sobre un sistema físico, a través de un sistema de adquisición de datos, de un algoritmo de control determinado.

En este encuadre, la Universidad Miguel Hernández presentó un sistema implantado desde 2002 que posibilitaba la realización de prácticas sobre un sistema físico constituido por un servomotor de corriente continua (control en posición y velocidad con reguladores P, PI, PD, PID) [PUER02-2]. Este Laboratorio por Control Remoto, RECOLAB, ha visto aumentado su servicio tanto en esquemas de control para el servomotor de CC (Reguladores de Mínima Varianza, Espacio de Estado, Reguladores Algebraicos, etc.) como con un nuevo sistema físico, el cilindro deslizante por flujo de aire, ofreciendo su control en posición sirviéndose para ello de los mismos reguladores que en el caso anterior [PUER11].



Figura 5.1. Sistema RECOLAB

RECOLAB es un laboratorio por control remoto (vía Web) que permite al usuario realizar el control (simulado o real) de un servomotor de CC o bien de un cilindro deslizante introduciendo los diferentes reguladores vistos en teoría (reguladores PID, de control óptimo, predictivos, algebraicos...).

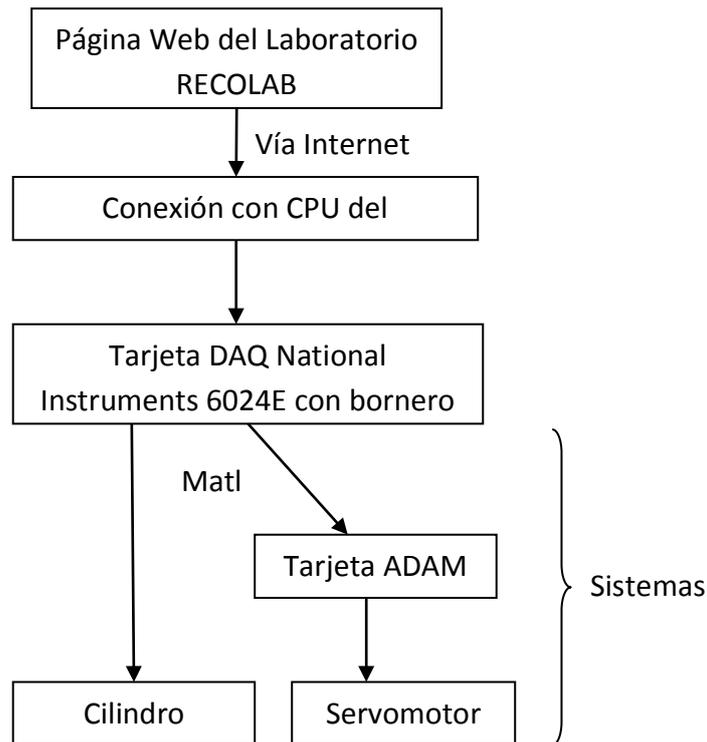


Figura 5.2. Agentes principales del laboratorio de control remoto RECOLAB

Los componentes fundamentales de RECOLAB son los siguientes:

- Computador con tarjeta E/S National Instruments 6024E.
- Servomotor de corriente continua Feedback o Cilindro Deslizante (sistemas físicos a controlar).
- Servidor Web Apache con intérprete PHP.
- Matlab con Simulink, Real -Time Windows Target Toolbox y Real -Time Workshop Toolbox.

### 5.2. AGENTES PRINCIPALES DE RECOLAB

En este apartado se va a describir los distintos elementos que conforman e integran RECOLAB. Dichos elementos son las principales entidades que aparecen en el esquema de la figura 5.2.

#### 5.2.1. LA PÁGINA WEB DE RECOLAB

Este Laboratorio necesita en primer lugar de un interfaz gráfico, es decir, de un espacio Web requiriendo una programación experta (en RECOLAB se ha utilizado el lenguaje php) que evite la intrusión en el Sistema de cualquier hacker informático. Del mismo modo, se han creado diversos niveles de validación en los que destaca:

- El nivel invitado: nivel de cualquier usuario conectado y en el que sólo se permite la simulación del servomotor de CC y del cilindro deslizante.
- El nivel usuario: Necesita de un *login* y de su respectiva contraseña para acceder a la ejecución en tiempo real de los Sistemas Físicos propuestos. Con esto, se consigue que únicamente los alumnos matriculados en alguna de las diversas asignaturas de control tengan acceso.
- El nivel profesor/administrador: También requiere identificación siendo el nivel más elevado para permitir al *Webmaster* solucionar posibles problemas reseteando el sistema.

Este interfaz gráfico es el encargado de comunicarse vía Internet con el ordenador del laboratorio de la Universidad Miguel Hernández de Elche. La apariencia de esta web se muestra en la figura 5.3. Posteriormente se analizará con más detalle el funcionamiento de la misma.

RECOLAB: Laboratorio de Prácticas de Control - Microsoft Internet Explorer

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

Atrás Búsqueda Favoritos Multimedia Ir

Dirección http://recolab.umh.es/ Ir

**RECOLAB** Laboratorio de Prácticas de Control

INICIO DESCRIPCIÓN PRÁCTICAS TUTORIAL

**EJECUCIÓN/SIMULACIÓN DE UN ESQUEMA SIMULINK**

Modelo a ejecutar:  
Control de un Motor de Corriente Continua en Velocidad (T.R)

Modelo: Control Motor en Velocidad (RT) Regulador: PI

Valor de Kp: 0.045  
Valor de a: 1.0  
Valor de Referencia: 1.0

$$R(z) = \frac{K_p (z - a)}{z - 1}$$

Ejecutar Volver

©2002 by R. Puerto, Luis M. Jiménez

Ingeniería de Sistemas y Automática

de Control. (ISA) Ingeniería de Sistemas y Automática. Internet

Figura 5.3. Apariencia de la web de RECOLAB

5.2.2. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos (DAQ) es el dispositivo que permite efectuar la comunicación entre el computador y el sistema físico a controlar. En este caso, se trata de una tarjeta National Instruments PCI-6024E [WNAT], que consta de 16 canales de entrada analógicas, dos canales de salida analógicas, una resolución de 12 bits, una frecuencia de muestreo máxima de 200kS/s, un conector de 68 pines y ocho líneas de E/S digitales.



Figura 5.4. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI- 6024E

El rango de operación de la tarjeta DAQ para las salidas y entradas analógicas es  $\pm 10V$ . Se dispone, además, de una tarjeta bornero de conexión National Instruments CB-68LP, mostrada en la figura 5.4, en la cual se efectúan las conexiones oportunas entre los dos sistemas físicos y la tarjeta de adquisición de datos, puesto que ésta se encuentra instalada en el interior del ordenador. La conexión entre la tarjeta DAQ y la tarjeta bornero ubicada en el exterior del ordenador se realiza mediante un cable apantallado de 1m de longitud con conectores de 68 pines, cuyo modelo es National Instruments SH-68-68-EP.

Para el control de ambos sistemas físicos se han utilizado tres pines de conexión de la tarjeta para el cilindro deslizante y cinco para el servomotor de CC. En el caso del cilindro deslizante, se ha dado uso a una entrada analógica (entrada 2, pin 65), que corresponde a la medida efectuada por el sensor de posición; una salida analógica (salida 1, pin 21), que es la tensión de alimentación del ventilador, y la toma de tierra (pin 24), común para entradas y salidas. Este pin, también se utiliza en el caso del servomotor de CC que, a su vez, se conecta a la señal PA- INPUT (pin 14 de la tarjeta ADAM 3937). Las conexiones entre ambas tarjetas para el caso del servomotor de CC quedan reflejadas en la figura 5.5.

| Pin National Instruments PCI-6024E | Servomotor (tarjeta ADAM-3937)                 |
|------------------------------------|--|
| 68 (canal 0 de entrada analógica)  | Señal TACHO + (pin 35)                         |
| 67 (GND de entrada analógica)      | Señal de tierra del propio servomotor (pin 11) |
| 22 (canal 0 de salida analógica)   | Señal PA+ INPUT (pin 33)                       |
| GND (GND de salida analógica)      | Señal PA- INPUT (pin 14)                       |
| 33 (canal 1 de entrada analógica)  | Eje del Motor (pin 12)                         |

Figura 5.5. Conexiones entre DAQ y servomotor

### 5.2.3. SISTEMAS FÍSICOS DISPONIBLES EN RECOLAB

A continuación se describen los dos sistemas físicos, servomotor de corriente continua y cilindro deslizante, conectados a RECOLAB así como sus características, estructura y funcionamiento.

#### 5.2.3.1. SERVOMOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El servomotor es un motor eléctrico modelo Feedback 33-002 [WFEE] con capacidad de ser controlado, en velocidad y/o posición.



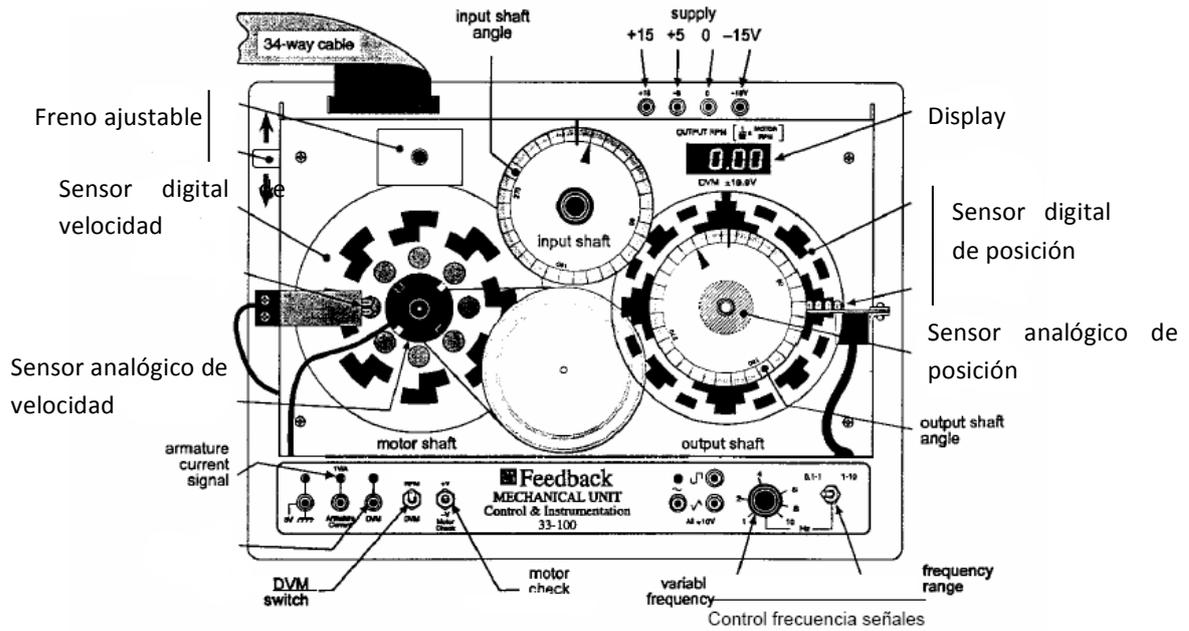
Figura 5.6. Servomotor Feedback 33-002

Las dos formas de controlar el motor son:

- Control en velocidad: posibilidad de hacer girar al motor a una velocidad determinada independientemente de la carga o fuerza que deba vencer.
- Control en posición: posibilidad de realizar desplazamientos entre dos posiciones determinadas con precisión.

La forma más adecuada de realizar cualquiera de estas operaciones es mediante un control en bucle cerrado, en el cual se están midiendo continuamente velocidad y posición para, en función de estos valores, aportar mayor o menor tensión de entrada al motor [AYAS07].

La figura 5.7 muestra esquemáticamente el aspecto del servomotor empleado, así como sus principales componentes.



- ELEMENTOS PRINCIPALES**
- motor de cc
  - reductor de velocidad
  - freno magnético ajustable

- SENSORES DISPONIBLES**
- sensor analógico de posición (potenciometro)
  - sensor digital de posición (encoder)
  - sensor analógico de velocidad (tacogenerador)
  - sensor digital de velocidad (tren de pulsos)

- SEÑALES DE PRUEBA UTILIZABLES**
- senoidal
  - cuadrada
  - triangular

Figura 5.7. Principales elementos del Servomotor Feedback 33-002

**Descripción eléctrica**

El comportamiento de un servomotor de CC equivaldría al del sistema motor eléctrico – freno como el representado en la figura 5.8. Se observa como el motor y el freno se encuentran acoplados, de modo que el par producido por el primero se empleará principalmente en vencer la resistencia opuesta por el segundo.

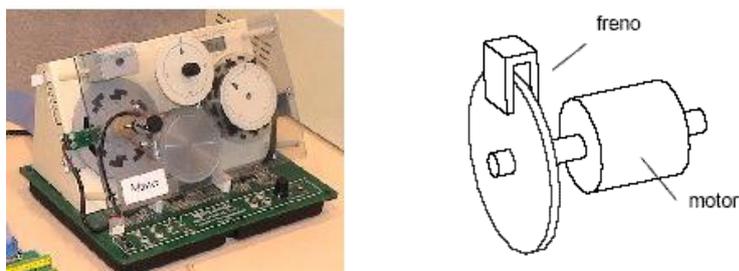
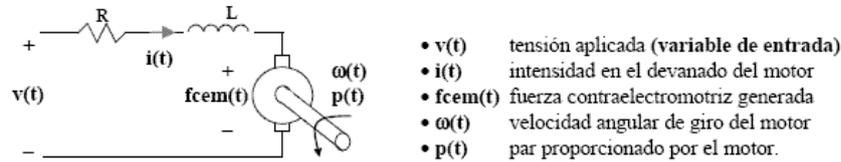


Figura 5.8. Sistema motor - freno

Se planteará, en primer lugar, las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor.

Se trata de un motor de corriente continua controlado mediante la tensión aplicada a sus terminales. El esquema eléctrico correspondiente junto con las variables que en él intervienen se muestra en la figura 5.9.



R y L representan la resistencia e inductancia de los devanados del motor.

Figura 5.9. Esquema eléctrico del servomotor de CC

Aplicando las leyes de Kirchoff para las ecuaciones de comportamiento, sabiendo que la fuerza contraelectromotriz ( $fcem$ ) es proporcional a la velocidad de giro, que el par ofrecido es proporcional a la intensidad, que el par producido por el motor para vencer la carga tiene relación con el rozamiento viscoso B y conociendo el momento de inercia J, el conjunto de ecuaciones del sistema es el siguiente:

$$v(t) = R \cdot i(t) + fcem(t)$$

$$fcem(t) = K_v \cdot \varpi(t)$$

$$p(t) = K_p \cdot i(t)$$

$$p(t) = J \cdot \frac{\partial \varpi(t)}{\partial t} + B \cdot \varpi(t)$$

Restricciones:

- La inductancia L tiene un valor despreciable.
- No se mueve el freno durante el experimento ( $B=cte$ ), todas las ecuaciones son lineales .

Determinando, en un segundo lugar, el punto de equilibrio correspondiente a una velocidad angular nula, se logran unos valores iniciales iguales a cero; realizando el paso a variables incrementales y aplicando directamente la transformada de Laplace, se obtiene:

$$V(s) = R \cdot I(s) + FCEM(s)$$

$$FCEM(s) = K_v \cdot W(s)$$

$$P(s) = K_p \cdot I(s)$$

$$P(s) = J \cdot s \cdot W(s) + B \cdot W(s)$$

Por el efecto de la tensión aplicada al motor sobre la velocidad de giro del mismo y a partir de las ecuaciones del sistema se puede generar el diagrama de bloques mostrado en la figura 5.10.

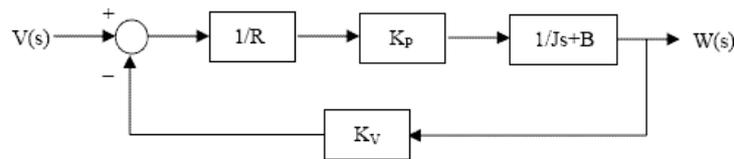


Diagrama que es fácilmente reducible para obtener una función de transferencia global como la siguiente:

$$V(s) \longrightarrow \frac{K_p}{K_p K_v + RB + RJs} \longrightarrow W(s)$$

Que, expresada en un formato estándar, quedaría:

$$V(s) \longrightarrow \frac{K_p / (K_p K_v + RB)}{1 + sRJ / (K_p K_v + RB)} \longrightarrow W(s) \quad V(s) \longrightarrow \frac{K}{1 + Ts} \longrightarrow W(s)$$

Figura 5.10. Diagrama de bloques del servomotor de CC.

### Tarjeta de conexiones ADAM – 3937

La tarjeta ADAM-3937 permite acceder cómodamente a las conexiones eléctricas de los distintos elementos del motor. Se conecta en la parte posterior del servomotor de CC un bus de datos de 38 entradas/salidas de las cuales las utilizadas para el sistema RECOLAB son los que se muestran en la figura 5.11.

| Señal                           | Nº de Conector |
|---------------------------------|----------------|
| Fuente de alimentación - 0V     | pin 11         |
| Potenciómetros - Eje Motor      | pin 12         |
| Amplificador - Entrada Negativa | pin 14         |
| Amplificador - Entrada Positiva | pin 33         |
| Tacogenerador - Señal Positiva  | pin 35         |

Figura 5.11. Conexiones ADAM – 3937 - servomotor de CC

Su aspecto se muestra en la figura 5.12.



Figura 5.12. Tarjeta de conexiones ADAM – 3937

### Principales sensores del servomotor de CC

En la presentación del equipo se han mencionado los sensores disponibles:

- sensor analógico de posición (potenciómetro)
- sensor digital de posición (encoder)
- sensor analógico de velocidad (tacogenerador)
- sensor digital de velocidad (tren de pulsos)

La curva de comportamiento de cada uno de estos sensores es la curva que relaciona los valores eléctricos (tensiones en algunos casos, frecuencias en otros) con los valores que se desean medir: ángulos o velocidades de giro.

#### Sensor analógico de posición

El sensor analógico de posición está basado en un potenciómetro (resistencia variable). El circuito representativo es el mostrado en la figura 5.13.

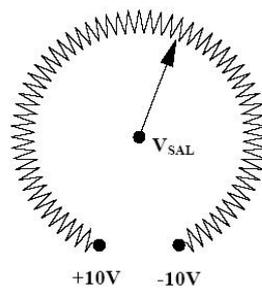


Figura 5.13. Esquema del sensor analógico de posición

La figura 5.13 representa una resistencia conectada a +10V por uno de sus extremos y a -10V por el otro. El cursor o aguja gira solidario con el eje del cual se desea conocer la posición. La tensión de salida  $V_{SAL}$  tomará valores entre -10V y +10V en función del ángulo girado por el eje. Por tanto, existirá una relación entre el ángulo  $\theta$  girado por el eje y la tensión de salida  $V_{SAL}$  que se podrá expresar mediante la siguiente relación:

$$\theta = K_{POS} \cdot V_{SAL}$$

donde se ha denominado  $K_{POS}$  a la constante de proporcionalidad para el sensor de posición.

El sistema físico dispone de dos potenciómetros, cada uno acoplado a un eje distinto. El eje correspondiente al círculo graduado de la izquierda se utiliza como referencia y se puede girar manualmente. El eje correspondiente al círculo graduado de la derecha gira solidario al motor.

Las tensiones de salida  $V_{SAL}$  correspondientes a cada potenciómetro se encuentran accesibles a través de los siguientes contactos de la regleta de conexiones:

- Potenciómetros: eje motor.
- Potenciómetros: eje referencia.

### Sensor analógico de velocidad

El sensor analógico de velocidad está basado en un tacogenerador. Al igual que en el caso del potenciómetro, el sensor nos ofrece una tensión proporcional a la magnitud que queremos medir.

En este caso, la magnitud a medir es la velocidad angular  $\omega$ , y la tensión de salida  $V_{SAL}$  ofrecida por el tacogenerador es proporcional a esa velocidad de acuerdo con una ley como la que se especifica a continuación:

$$\omega = K_{VEL} \cdot V_{SAL}$$

donde se ha representado como  $K_{VEL}$  la constante de proporcionalidad para el sensor de velocidad.

La tensión proporcionada por el tacogenerador es accesible a través del conector “Tacogenerador: señal positiva” de la regleta de conexiones.

### Sensor digital de velocidad

El sensor digital de velocidad está basado en fototransistores que provocan pulsos de tensión al enfrentarse a partes oscuras o claras de un disco que gira solidario con el motor. La señal de salida será un tren de pulsos, más próximos entre sí cuanto mayor sea la velocidad de giro del motor (figura 5.14).

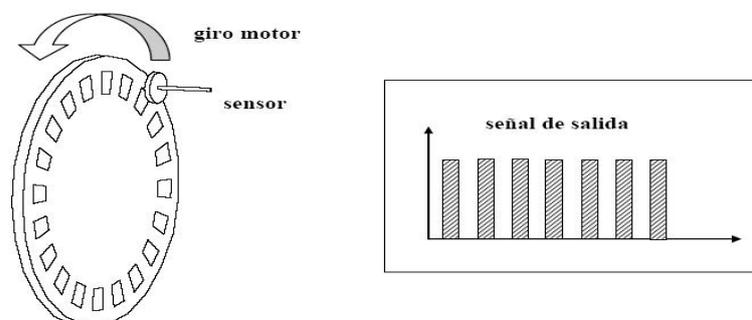


Figura 5.14. Sensor digital de velocidad.

En este caso, la curva de comportamiento a obtener será la que relacione la frecuencia de estos pulsos  $FREC$  con la velocidad de giro del motor, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\varpi = K_{FREC} \cdot FREC$$

Esta señal de pulsos es accesible a través del conector 'Encoder incremental: señal sin desfase' de la regleta de conexiones.

#### 5.2.3.2. CILINDRO DESLIZANTE POR FLUJO DE AIRE

El cilindro deslizante [PUER06] se compone de un tubo de metacrilato por el cual se desliza una pieza impulsada por el flujo de aire producido por un ventilador de corriente continua (CC), del estilo de los que se emplean para refrigerar los ordenadores. En la pared exterior del tubo se ha ubicado una cinta métrica adhesiva, que sirve para conocer la altura de la pieza en todo momento (figura 5.15).



Figura 5.15. Cilindro deslizante

El cilindro hueco se asienta sobre una base de metacrilato rectangular que sirve para dar estabilidad y verticalidad al conjunto. Esta misma base se apoya sobre una superficie de madera de mayor tamaño que da robustez al conjunto y que sirve de soporte para la placa de circuito impreso (PCB), en la cual se encuentran los circuitos de alimentación, amplificación, acondicionamiento de la señal y accionamiento del sistema. En la parte superior del conjunto, se encuentra situado el sensor fotoeléctrico de posición, que está fijado a otra pieza rectangular de metacrilato unida al tubo.

Mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), instalada en el computador, se captan los valores de tensión que proporciona el sensor y se envían al ordenador, que mediante una serie de algoritmos de control diseñados debe ser capaz de calcular y

generar las acciones de control adecuadas para mantener la posición de la pieza en una altura determinada.

### *Principales sensores y elementos del cilindro deslizante*

En la presentación del equipo se han mencionado los sensores disponibles:

- sensor fotoeléctrico
- ventilador de corriente continua
- pieza deslizante

#### **Sensor fotoeléctrico**

El sensor utilizado para medir la posición de la pieza deslizante en el interior del cilindro hueco es un sensor fotoeléctrico de la marca y modelo Telemecanique XUJ-K803538, cuya alimentación es de +24V. y consta de una salida analógica de tensión de 0...10V y otra salida analógica de corriente de 4...20mA. El rango de detección especificado por el fabricante, asegurando la linealidad, oscila entre 20 y 80cm (figura 5.16).



Figura 5.16. Sensor fotoeléctrico Telemecanique XUJ-K803538

Este dispositivo efectúa una medida de distancia por triangulación, lo que le vuelve prácticamente insensible al color del objeto. Sin embargo, como cualquier sistema óptico, éste se puede ver afectado por el humo, la neblina, polvos o depósitos sobre las superficies a detectar. Por lo tanto la cara frontal del aparato debe mantenerse limpia.

El principio de operación de la triangulación consiste en que el emisor emite un pulso de luz infrarroja (IR). Esta luz viaja fuera del alcance de la vista y puede chocar contra algún objeto o simplemente seguir su camino. Si no hay objeto, la luz nunca es reflejada y las medidas no reflejan objeto alguno. Si la luz refleja en algún objeto, vuelve hacia el detector y crea un triángulo entre el punto de reflexión, el emisor y el detector.

Los ángulos en este triángulo varían según la distancia al objeto. La porción receptora de estos detectores es realmente una lente de precisión que transmite la luz reflejada hacia varias porciones de una matriz de CCD's lineal encapsulado según el ángulo del triángulo descrito anteriormente. La matriz de CCD's puede determinar entonces con qué ángulo volvió la luz a él y, de este modo, calcular la distancia al objeto (figura 5.17).

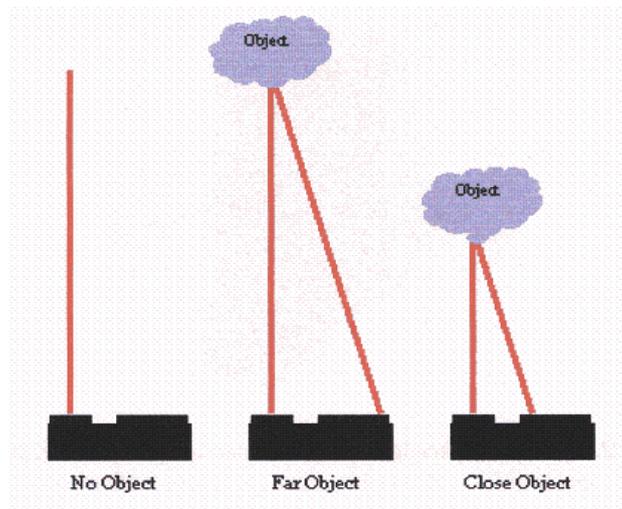


Figura 5.17. Principio de triangulación con distintos ángulos y diferentes distancias

En la respuesta generada por el sensor fotoeléctrico en las mediciones de carácter estacionario, se constató una señal superpuesta de rizado. Se optó por eliminar dicha perturbación vía *software*, mediante Matlab, calculando un filtro de Butterwoth de orden dos y frecuencia de corte  $\omega_c = 10 \text{ rad/seg.}$  que proporciona unos resultados bastante aceptables.

Todos los esquemas en Simulink implementados llevarán incluidos un bloque de filtrado representado por una función de transferencia discreta que tiene la siguiente expresión [DIEZ98]:

$$G_{but} = \frac{0.0201 + 0.0402z^{-1} + 0.0201z^{-2}}{1 - 1.5610z^{-1} + 0.6414z^{-2}}$$

### Ventilador de corriente continua

El ventilador empleado en mantener la pieza "levitando" en el interior del cilindro hueco es un ventilador de 12V de corriente continua sin escobillas (*brushless* según la literatura inglesa) y de dimensiones acordes con la del diámetro interior del tubo. Según estos criterios, se ha optado por el modelo NMB 4175KL-04W-B40-P00. Hay que destacar que aunque la tensión nominal del ventilador es de 12V. puede funcionar por debajo de esta tensión hasta un valor de 2.5V. aproximadamente (figura 5.18).



Figura 5.18. Ventilador NMB 4175KL-04W-B40-P00

### **Pieza deslizando**

La pieza utilizada está formada por dos discos de madera unidos mediante tornillos por una pieza cilíndrica, también de madera, tal y como se muestra en la figura 5.19. Este tipo de pieza proporciona una mayor estabilidad en el interior del tubo de metacrilato, un rozamiento mínimo con las paredes del cilindro y unas medidas más fiables por parte del sensor fotoeléctrico.

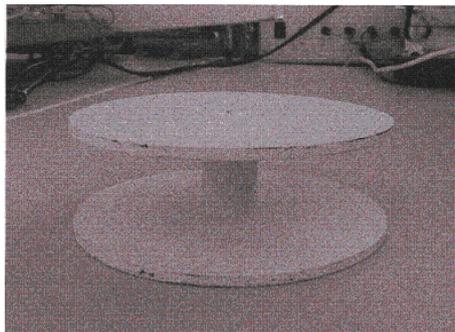


Figura 5.19. Pieza deslizando

### 5.3. ESTRUCTURA INTERNA Y FUNCIONAMIENTO DE RECOLAB

El principal propósito de RECOLAB es la ejecución en tiempo real de determinados reguladores a través de Internet sobre los sistemas físicos descritos [PUER02-3], [PUER04]. Dicha ejecución se debe realizar de forma transparente para el usuario por medio de esquemas Simulink convenientemente parametrizados. Para ello se necesita integrar arquitecturas específicas de hardware y software. Evidentemente también se permite la simulación de dichos sistemas de control, pero este caso es sensiblemente más sencillo que la ejecución en tiempo real.

## 5.3.1. ESTRUCTURA DE RECOLAB

El esquema general de la arquitectura de la aplicación desarrollada se muestra en la figura 5.20.

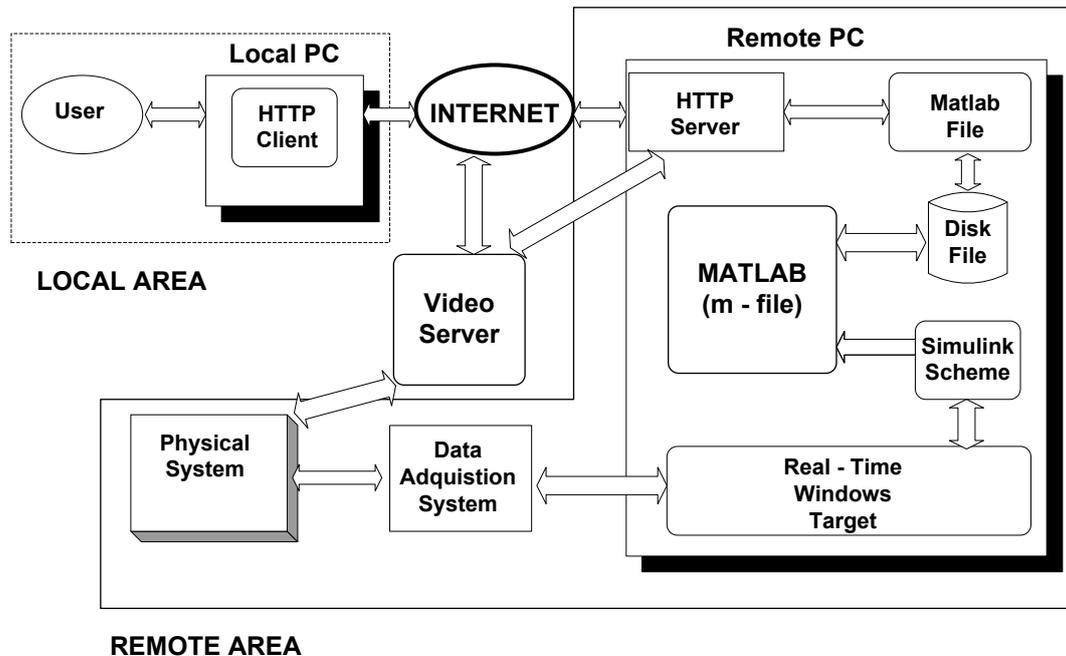


Figura 5.20. Arquitectura general de RECOLAB

En este diagrama, los elementos hardware y software están divididos en dos bloques principales: una zona local donde trabajan los usuarios y una zona remota donde se sitúan el sistema físico a controlar y todos los elementos de control (tarjeta de adquisición de datos, sensores, actuadores, etc.).

Los elementos que conforman la zona local y remota son:

1. Zona local:
  - Computador con conexión a Internet y un cliente http 4.0. La aplicación está optimizada para los navegadores Internet Explorer 7 y posteriores y Firefox 2.0 y posteriores con una resolución mínima de 800 x 600.
2. Zona Remota:
  - Conexión a Internet de alta velocidad.
  - Computador Servidor: el sistema actual consiste en un PC Pentium IV con 1 Gb. de memoria RAM con sistema operativo Microsoft Windows XP SP3.

- Sistema de adquisición de datos: tarjeta NI 6024E con entradas y salidas analógicas.
- Sistemas físicos a controlar: en este momento dos sistemas, servomotor de CC Feedback 33-002 y cilindro deslizante por flujo de aire, descritos en las secciones anteriores.
- Sistema de captura de imagen y servidor de vídeo: sistema “Axis 2400 network camera” con compresión de vídeo MPEG-4 que envía vídeo o imágenes estáticas al usuario.
- Servidor HTTP Apache v.2.0.54 con módulos PHP 5.0 y SSL (Secure Layer Socket). Este servidor permite la comunicación entre computadores utilizando el protocolo http.
- Matlab R12 con Simulink v.4.1: ejecuta los programas que hacen posible la simulación y la ejecución en tiempo real de los sistemas físicos controlados así como la generación de los ficheros de resultados.
- Real – Time Windows Target v.2.1: Este *toolbox* de Matlab permite ejecutar esquemas Simulink en tiempo real. Para ello, proporciona el interfaz (bloques Simulink) necesarios para la comunicación con la tarjeta de adquisición de datos.

### 5.3.2. FUNCIONAMIENTO INTERNO DE RECOLAB

---

La aplicación RECOLAB tiene dos partes claramente diferenciadas:

1. Aplicación Web: incluye la comunicación cliente – servidor utilizando los protocolos http/HTML, el interfaz de usuario, control de acceso de usuarios y la aplicación CGI (Common Gateway Interface). CGI es un interfaz estándar que permite la comunicación con aplicaciones externas al servidor tales como servidores http o web. Esta aplicación se encarga del acceso a los recursos y la comunicación entre Apache y Matlab.
2. Aplicaciones de simulación y ejecución en tiempo real: se compone de un conjunto de esquemas de control en Simulink y código Matlab, basado en el *toolbox* “Real – time Windows Target” , que permite la simulación o la ejecución en tiempo real de esquemas Simulink sobre un sistema físico determinado.

Se han utilizado diferentes lenguajes de programación y herramientas de desarrollo para cada una de las partes comentadas. Las tareas no críticas tales como el interfaz de usuario, seguridad de acceso y compartición de recursos han sido codificadas en PHP (v.5.0) [WPHP] ejecutándose sobre un servidor http Apache [WAPA]. PHP es un lenguaje interpretado muy popular que ha sido escogido debido a su carácter de lenguaje abierto ampliamente soportado por la mayoría de servidores Web y sistemas

operativos en múltiples plataformas. Además posee una amplia librería que soporta multitud de protocolos de red y acceso a bases de datos entre otras funciones. La aplicación PHP se ejecuta en un servidor web por lo que presenta un entorno controlado para el programador y permite la comunicación con cualquier otro proceso que se ejecute en el servidor (la aplicación Matlab en nuestro caso).

Por supuesto, PHP es un lenguaje interpretado no indicado para el desarrollo de aplicaciones en tiempo real. El núcleo de tiempo real de RECOLAB (el control realimentado del sistema físico) ha sido desarrollado en Simulink con la herramienta “Real – Time Windows Target” [WMATW]. La figura 5.21 muestra gráficamente el flujo de ejecución de la aplicación.

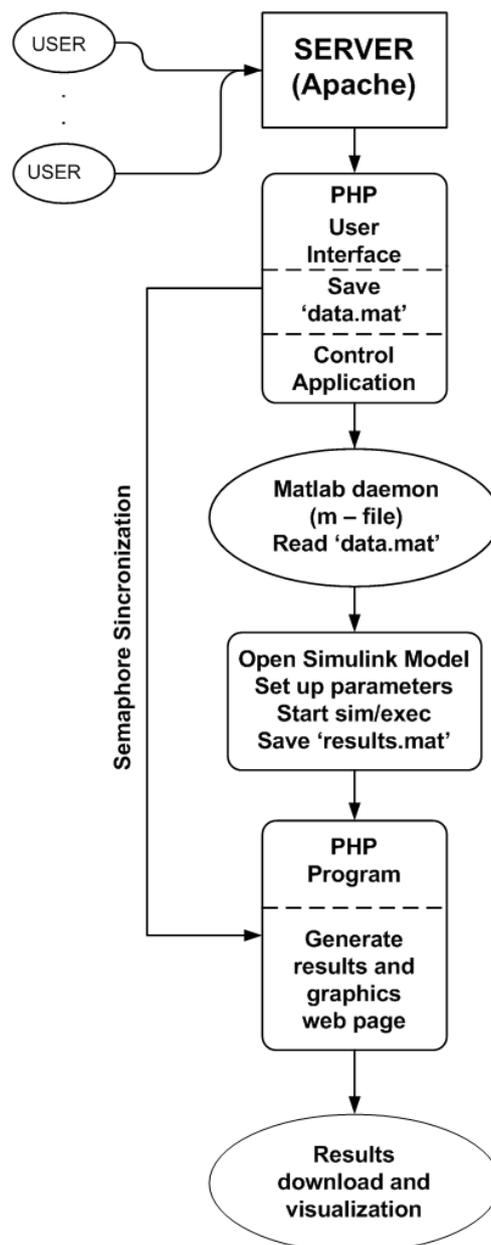


Figura 5.21. Descripción funcional de la aplicación RECOLAB.

Pasaremos ahora a describir los principales componentes software de la aplicación.

5.3.2.1. INTERFAZ DE USUARIO DE RECOLAB

El interfaz de usuario de RECOLAB está basado en el lenguaje estándar HTML 4.0. El código HTML se genera dinámicamente mediante PHP. El diseño de la página HTML está separado de los contenidos para permitir una configuración flexible de RECOLAB. Todo el formato de datos está basado en hojas de estilo CSS (*Cascade Style Sheets*) y funciones predefinidas de PHP para la creación de formularios. El contenido de las páginas se almacena en ficheros de configuración (ficheros de texto) haciendo fácil y flexible añadir nuevos sistemas físicos y sistemas de control sin tener que modificar el código PHP de la aplicación.

El interfaz de usuario se muestra en la figura 5.22 y como se ha comentado está basado en formularios HTML generados dinámicamente en PHP a partir de los ficheros de configuración. La actualización interactiva de estos formularios se realiza a través de llamadas CGI al servidor y no a través del código en el navegador del cliente. De esta forma, la seguridad en el acceso al sistema se puede manejar de forma más eficiente.

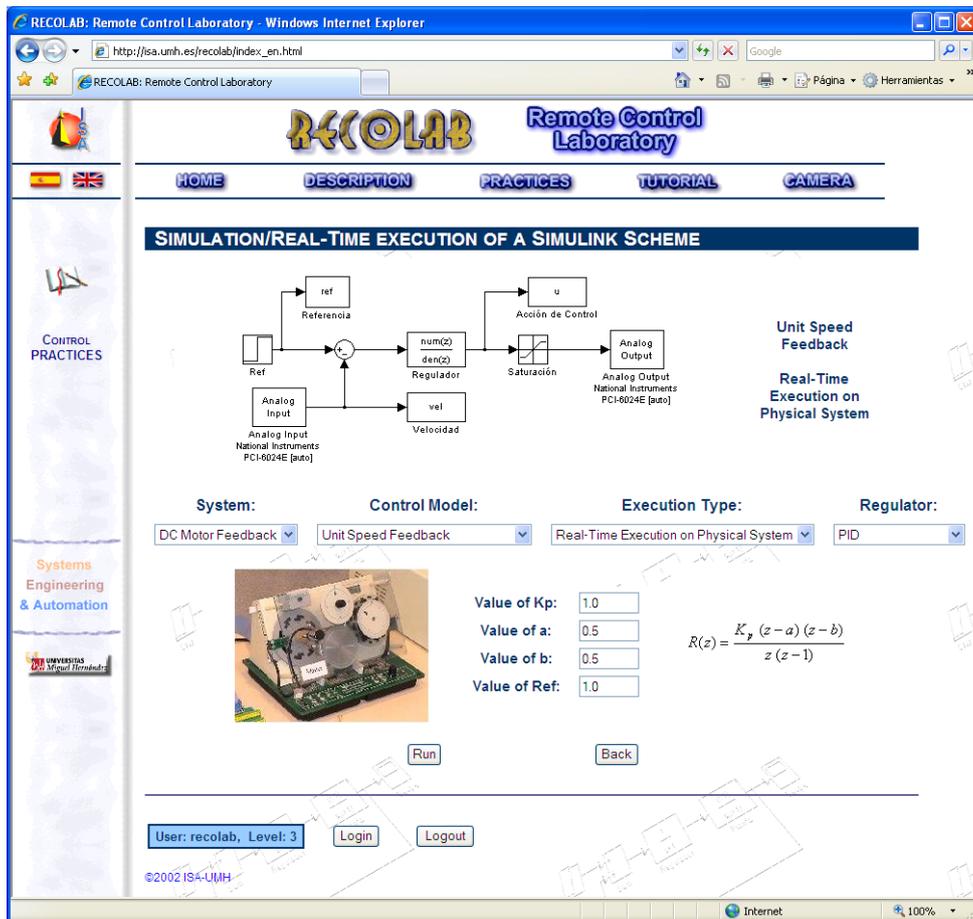


Figura 5.22. Interfaz de usuario de RECOLAB.

Los diferentes esquemas Simulink de control disponibles se pueden ejecutar tanto en simulación como sobre el sistema físico real a través del sistema de adquisición de datos. El usuario puede elegir diferentes estrategias de control y tipos de regulador, seleccionando los parámetros de acuerdo al experimento a realizar.

Cuando termina la simulación o ejecución solicitada, el usuario puede descargar el conjunto completo de variables involucradas en el proceso. La página de resultados muestra de forma gráfica un extracto de esta información (la salida del sistema) tal y como se muestra en la figura 5.23.

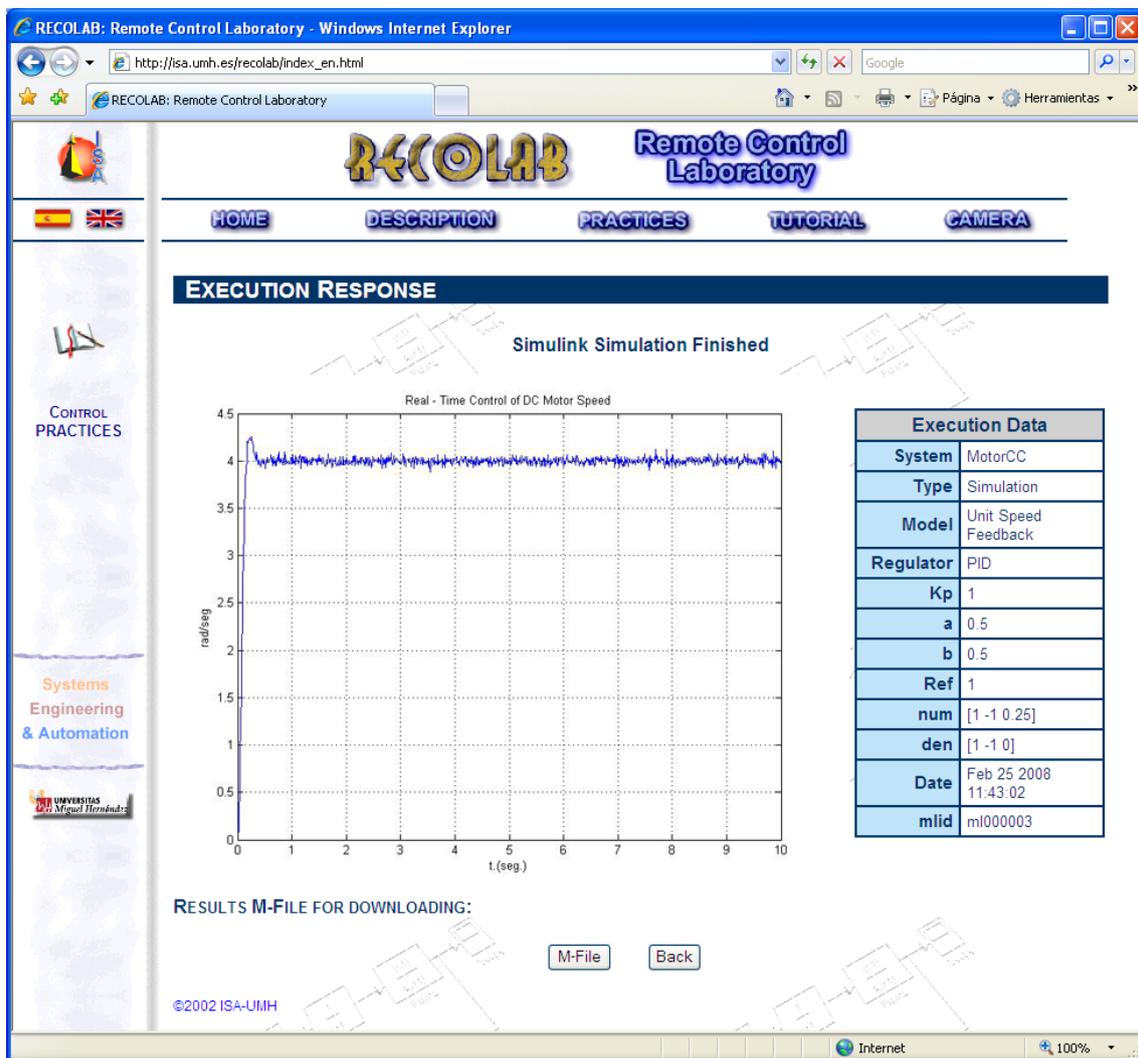


Figura 5.23. Página web de resultados.

### 5.3.2.2. SISTEMA DE CONTROL DE ACCESO

Una tarea adicional de este módulo es el control de acceso. Gran parte de RECOALB puede ser accedido desde Internet sin ninguna restricción, en la medida de que se trata de una herramienta educativa abierta y por tanto puede ser utilizada por cualquier estudiante interesado en el control de procesos. Así se posibilita un acceso sin ningún tipo de restricción para realizar las simulaciones mediante esquemas Simulink de diferentes controladores y modelos. Mediante estas simulaciones cualquier usuario puede seleccionar el tipo de regulador más adecuado así como los parámetros del mismo y realizar la simulación en bucle cerrado. Tras la simulación el sistema devuelve al usuario la respuesta del proceso ante la señal de entrada seleccionada y con el regulador empleado. Existe además, como ya se ha comentado, la posibilidad de que el usuario descargue un fichero con formato Matlab (.mat) con los datos más significativos de la simulación. Así, el usuario, tras enviar una petición al servidor remoto y recibir los resultados, puede realizar un análisis más exhaustivo en su máquina local.

Por otra parte, existen opciones dentro del sistema que sólo pueden ser accedidas por usuarios validados. Estas opciones guardan relación con la utilización de sistemas físicos. El punto más crítico de RECOLAB es la ejecución en tiempo real de esquemas Simulink sobre sistemas físicos. Para tener un uso más eficiente de los recursos del laboratorio, este proceso precisa de una validación por parte del usuario. Así, tanto para tener acceso a la ejecución de un sistema en tiempo real sobre el sistema físico seleccionado como para acceder al servidor de vídeo es preciso una validación del usuario ya que estos elementos son de acceso restringido.

El sistema de validación utilizado por RECOLAB no está basado en un sistema estándar proporcionado por el servidor web, ya que éstos están orientados al control de recursos web y no al control de recursos de la aplicación. En su lugar el sistema de validación utilizado está codificado en PHP permitiendo su integración con la aplicación principal. Las opciones mostradas por la aplicación web dependen de la validación realizada por el usuario. De esta forma, no es preciso mantener diferentes páginas para usuarios validados o no. Si un usuario solicita una opción que precisa validación (por ejemplo una ejecución en tiempo real), el código PHP solicita dicha validación.

El proceso de validación se basa en nombre de usuario y contraseña. El control de acceso a los recursos, en cambio, se basa en el nombre de usuario y un nivel de prioridad. La mayoría de los recursos de RECOLAB utilizan un control de acceso mediante niveles. El sistema utiliza actualmente cuatro niveles: *administración*, *profesor*, *usuario* e *invitado*. Este último nivel permite la ejecución de simulaciones sobre RECOLAB. Los estudiantes registrados disponen de una cuenta de nivel *usuario*

que permite utilizar todas las funciones de ejecución en tiempo real y visualización de la imagen del sistema físico. Los niveles de *administración* y *profesor* permiten modificar parámetros adicionales del sistema.

#### 5.3.2.3. APLICACIÓN CGI

Esta aplicación enlaza los datos introducidos por el usuario con el programa de control de Matlab, sincroniza los diferentes módulos y devuelve los datos al usuario. La gestión de tareas que no requieren ser ejecutadas en tiempo real han sido desarrolladas en PHP utilizando ficheros como mecanismo básico de comunicación con los módulos de tiempo real. En la siguiente sección se mostrará como se realiza dicha comunicación.

#### 5.3.2.4. APLICACIÓN DE CONTROL EN TIEMPO REAL

Esta aplicación ejecuta el control realimentado en tiempo real utilizando el esquema de control especificado por el usuario sobre el sistema físico elegido. La aplicación ha sido desarrollada utilizando las siguientes herramientas: Matlab, Simulink y el *toolbox* Real – Time Windows Target. Esta última herramienta permite generar el código en tiempo real para ejecutar esquemas Simulink utilizando un sistema de adquisición de datos (y por tanto sobre el sistema físico conectado a él). El hecho de ejecutar un esquema Simulink directamente sobre el sistema físico proporciona la ventaja añadida de simplificar la complejidad de la tarea de desarrollo y prototipado ya que suele ser bastante rápido, además de permitir fácilmente la modificación del esquema de control diseñado.

Como se ha comentado, la tarea de la ejecución en tiempo real de un determinado esquema Simulink es llevada a cabo por el *Real – Time Windows Target*. Esta herramienta genera un código fuente a partir del esquema Simulink. Este código fuente se compila mediante el compilador *Watcom C* [WWAT] para generar el código ejecutable en tiempo real. Cada esquema Simulink depende del tipo de regulador, del método de control elegido y del sistema físico a controlar, pero todos poseen elementos comunes:

- Un regulador (específico en cada caso: P, PD, PI, PID, realimentación del estado, etc.).
- Bloques de interacción con el sistema de adquisición de datos que proporcionan el interfaz de entradas/salidas analógicas y digitales con el sistema físico. En nuestro caso este hardware es la tarjeta de adquisición de datos National Instruments 6024E, para la cual existe una librería específica.
- Bloques auxiliares para inicialización y configuración de actuadores y sensores.

Una vez diseñado y compilado el esquema Simulink, el código generado se puede ejecutar utilizando una instrucción `set_param` [WMATW]. Este es el mecanismo que utiliza RECOLAB para conectar la ejecución en tiempo real con el interfaz de usuario. Un programa escrito en Matlab donde se utiliza esta instrucción se usa para elegir la estructura de control, el modelo de controlador y lo más importante, permite actualizar de forma dinámica los parámetros de un regulador sin necesidad de recompilar, lo cual ocasiona que no sea necesario cambiar la estructura del regulador. Por ejemplo, un regulador PID tiene varios parámetros ajustables: ganancia, polos y ceros (vectores de dos elementos). A estas cinco variables se puede acceder desde la línea de comando de Matlab utilizando la instrucción `set_param`, la cual permite modificar las mismas en tiempo real sin la necesidad de recompilar el esquema Simulink. Finalmente, esta misma instrucción se utiliza para inicializar, conectar y parar la ejecución en tiempo real. En la figura 5.24 se muestra un ejemplo de código Matlab que permite, en este caso, realizar la ejecución de tiempo real del servomotor controlado mediante un regulador PID.

```
% Matlab code for Simulink file emmotorvelpid.mdl
open_system('emmotorvelpid');
set_param('emmotorvelpid','stopfcn','generares');
set_param('emmotorvelpid/Ref','after',instruct.Ref);
set_param('emmotorvelpid/Kp','Gain',instruct.Kp);
set_param('emmotorvelpid/PID','denominator',instruct.den);
set_param('emmotorvelpid/PID','numerator',instruct.num);
save_system('emmotorvelpid');
set_param('emmotorvelpid','simulationcommand','connect'); % Connect
Real - Time Kernel System
set_param('emmotorvelpid','simulationcommand','start');
```

Figura 5.24. Ejemplo de código para la ejecución en tiempo real.

### 5.3.2.5. COMUNICACIÓN ENTRE TAREAS DE TIEMPO REAL E INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz con la ejecución en tiempo real se maneja con una aplicación CGI desarrollada en PHP. Esta aplicación lanza la tarea de control en tiempo real en Matlab con los parámetros especificados por el usuario y sincroniza su ejecución utilizando mecanismos de sincronización mediante semáforos basado en ficheros [JIM00] [TANEN91]. El procedimiento detallado que realiza la simulación o ejecución en tiempo real de un esquema Simulink es el siguiente:

1. El usuario (cliente) se conecta a RECOLAB y elige a través del interfaz de usuario (página web) la simulación o ejecución en tiempo real de un esquema Simulink determinado. Por ejemplo, el usuario puede seleccionar el tipo y los parámetros del controlador, dando valores a los coeficientes de

los polinomios que conforman el numerador y denominador de su función de transferencia o a la matriz de ganancia de realimentación de estado.

2. El módulo PHP ejecuta el CGI asociado a la página web del interfaz de usuario y guarda los datos en un fichero. En este punto se lanza una ejecución de Matlab en segundo plano al tiempo que comprueba los privilegios de acceso y los recursos compartidos entre las conexiones concurrentes (se comprueba qué puede hacer el usuario y si la tarea que desea realizar está disponible -por ejemplo puede requerir la ejecución en tiempo real del servomotor mientras este está ocupado por otro usuario, con lo cual se pospondría su petición-). En este momento se ejecuta un fichero Matlab (.m) que realiza las siguientes tareas:
  - Lee el fichero de configuración escrito por el CGI.
  - Carga el esquema Simulink adecuado (en función de la información leída en el fichero de configuración).
  - Actualiza los parámetros (especificados por el usuario) de dicho esquema Simulink.
  - Finalmente lanza la simulación o ejecución en tiempo real del esquema Simulink solicitado.
3. Una vez finalizada la simulación o la ejecución en tiempo real, se guardan todos los resultados (incluidas las gráficas con la respuesta temporal de varias señales – generalmente salida y acción de control-) y se comunica a la tarea PHP, por medio de un mecanismo de semáforos basado en ficheros, que la ejecución ha finalizado. Esta tarea PHP (CGI), lee los datos generados y genera la página HTML con los gráficos generados. En esta misma página se permite al usuario descargar un fichero .m con todos los datos del experimento (referencias, señales, etc.) para su posterior análisis si así lo desea.

Este procedimiento se ha mostrado esquemáticamente en la figura 5.21.

Hay que remarcar que sólo se puede llevar a cabo una ejecución en tiempo real en un determinado instante de tiempo, ya que se ocupan tanto el sistema físico como los recursos de tiempo real. Para ello se ha implementado el mecanismo de control mediante semáforos basado en ficheros. Cuando el servidor web Apache acepta una petición estando los recursos de tiempo real ocupados, ésta queda en una cola a la espera de que la ejecución anterior termine o expire un determinado *timeout*.

Obviamente esto permite que sólo se pueda realizar una ejecución en tiempo real en un determinado momento.

El sistema también permite, como se ha comentado, realizar la Simulación de esquemas Simulink (éstas sí se pueden realizar de forma concurrente), paso previo muy recomendado antes de realizar la ejecución en tiempo real.

### 5.4. ESTRATEGIAS DE CONTROL DISPONIBLES EN RECOLAB

En este apartado se presentarán los reguladores disponibles en RECOLAB para el control (tanto en tiempo real como en simulación) de los sistemas servomotor de CC y el cilindro deslizante. Se presentarán y comentarán todos y cada uno de los reguladores propuestos en aplicación web, los parámetros necesarios que el usuario debe introducir, los esquemas implementados en Simulink para cada regulador, etc. Atendiendo a la figura 5.25 donde se establecen los distintos niveles de la plataforma RECOLAB, se realizará un profundo estudio del Nivel 2: el estudio de los Sistemas Físicos.

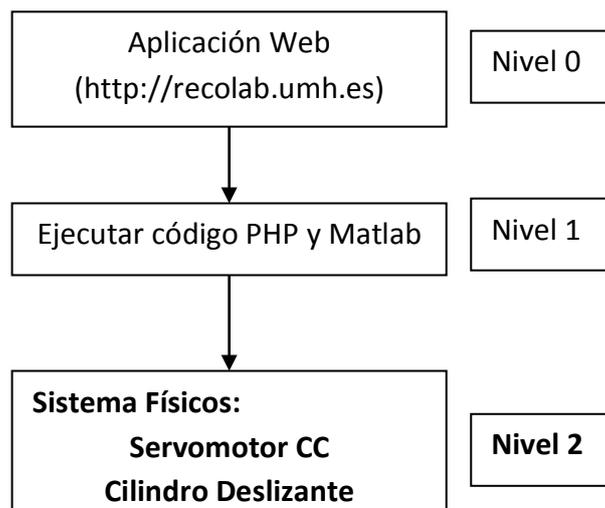


Figura 5.25. Diagrama de niveles de la plataforma RECOLAB

#### 5.4.1 BREVE RESEÑA SOBRE TEORÍA DE CONTROL

Los sistemas de control tienen como objetivo que las señales de salida sean capaces de ser gobernadas por las directrices marcadas por las señales de entrada con independencia de las perturbaciones (figura 5.26).

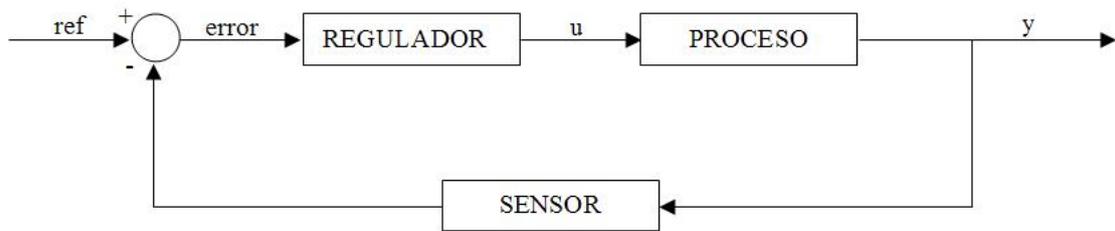


Figura 5.26. Esquema de bloques básico de un sistema de control realimentado

La teoría de control se divide tradicionalmente en las llamadas Teoría Clásica de Control y Teoría Moderna de Control. A continuación se describen brevemente las características más importantes de cada una de ellas.

### *Teoría Clásica de Control*

Durante la década de los cuarenta, los métodos de la respuesta en frecuencia hicieron posible que los ingenieros diseñaran sistemas de control lineales en lazo cerrado que cumplieran con los requerimientos de diseño. A finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se desarrolló por completo el método del lugar geométrico de las raíces propuesto por Evans.

La Teoría de Control Clásica o Control Convencional [KUU01], [OGA10], se aplica a sistemas lineales con una entrada y una salida e invariantes en el tiempo. Se habla de *representación externa* cuando se emplea la relación entrada-salida para representar el comportamiento dinámico de un sistema.

Así pues se define el concepto de función de transferencia del sistema como:

*El cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada bajo la suposición de que las condiciones iniciales son nulas.*

Esta teoría se basa en un enfoque complejo en el dominio de la frecuencia. Los métodos de respuesta en frecuencia, tales como los diagramas de Bode, el criterio de Nyquist, y el lugar geométrico de las raíces que forman el núcleo de la Teoría de Control Clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requerimientos de diseño.

### *Teoría Moderna de Control*

La Teoría Moderna de Control [OGA10], [DOM02], se basa en el conocimiento del comportamiento interno de los sistemas, que está reflejado en las variables que

influyen en su dinámica. Estas variables constituyen el concepto de “estado” del sistema.

Se define el estado de un sistema [VAL02] como:

*la mínima cantidad de información necesaria en un instante para que, conociendo la entrada en un intervalo que contenga a ese instante, se pueda determinar el valor de todas las variables del sistema en cualquier instante contenido en dicho intervalo.*

La Teoría Moderna surge, aproximadamente en 1960, para solucionar los problemas que se le planteaban a las herramientas clásicas. Así, se pueden citar las siguientes ventajas de la Teoría Moderna con respecto a la Teoría Clásica de Control:

- Se puede aplicar a sistemas multivariables en los cuales existe un elevado grado de interacción entre las variables del sistema (control multivariable).
- También es aplicable a sistemas no lineales, cuya dinámica no puede ser aproximada a un modelo lineal (control no lineal).
- Se utiliza en sistemas cuyos parámetros varían con el tiempo y, por tanto, no se puede obtener un modelo de parámetros constantes necesario en el Control Clásico.
- Por último, se emplea en sistemas complejos de control, en los que hay gran cantidad de variables internas que condicionan el comportamiento futuro de la salida.

Todas las técnicas de la Teoría Moderna de Control necesitan un modelo del comportamiento de los sistemas dinámicos que incluya el comportamiento interno de sus variables. Este modelo del sistema se denomina Modelo de Estado del sistema o también se habla de *representación interna* cuando se utiliza el estado para representar un sistema. La representación viene dada por las siguientes ecuaciones denominadas *ecuación de estado* y *ecuación de salida* respectivamente:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Gx(k) + Hu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k)\end{aligned}$$

En la figura 5.27 se muestra el diagrama de bloques de un sistema discreto modelado en representación interna.

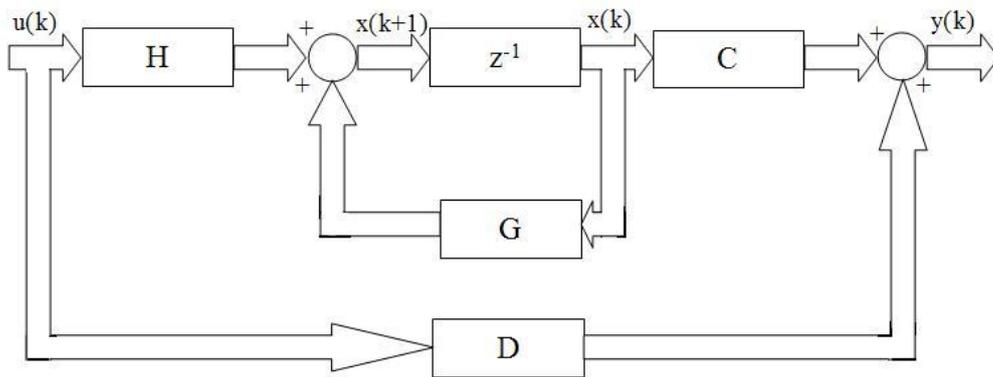


Figura 5.27. diagrama de bloques de un sistema modelado en el espacio de estados.

#### 5.4.2 REGULADORES DISEÑADOS EN RECOLAB

En este punto se van a describir los distintos reguladores diseñados para el control de los sistemas físicos mencionados.

Previamente es necesario tener un modelo matemático de ambos sistemas.

##### *Servomotor de CC*

El servomotor de CC, como se ha comentado en el capítulo anterior, permite leer las señales de su velocidad y su posición, por lo que en él se puede realizar control tanto en posición como en velocidad [PUER04].

Para este sistema, RECOLAB permite, en simulación, un control tanto en posición como en velocidad con reguladores tipo PID (P, PI, PD y PID) [JIM05] y reguladores algebraicos por asignación de polos para el control en posición. Para este grupo de reguladores, se ha asumido que el servomotor de CC se puede modelar en posición mediante la siguiente función de transferencia:

$$G_P(s) = \frac{2.306}{s^2 + 2.22s}$$

Se recuerda que en el caso de la simulación del servomotor de CC en velocidad la expresión es la integral de la posición, debiéndola multiplicar por el factor  $1/s$  en el dominio de Laplace.

Se ha introducido, del mismo modo, un control en el espacio de estado con y sin seguimiento de la salida sirviéndose de un modelo teórico del servomotor de CC y cuyas matrices características son:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0.0426 \\ 0 & 0.9498 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0]$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.001 \\ 0.0444 \end{bmatrix} \quad D = 0$$

En cuanto a la ejecución en tiempo real, se dispone además de la posibilidad de identificar el sistema mediante el método de mínimos cuadrados. Los reguladores aplicables en este modo son los mismos que en simulación pero en este caso ejecutándose en tiempo real sobre el sistema físico del servomotor de CC (figura 5.28).



Figura 5.28. Ejemplo de simulación del servomotor de CC controlado mediante regulador PID.

### Cilindro deslizante

El cilindro deslizante, por su parte, se controla únicamente en posición (altura de la pieza móvil en el tubo de metacrilato) y, al igual que en el caso del servomotor de CC, se han implementado la mayoría de los reguladores propuestos en la Teoría Clásica, la Teoría del Espacio de Estado, así como diferentes técnicas de control avanzado.

Para este sistema, RECOLAB permite, en simulación, un control en posición/altura con un regulador de tipo PID, reguladores algebraicos por asignación de polos, regulador de tiempo mínimo y reguladores de mínima varianza.

El modelo en representación externa para el cilindro deslizante viene dado por la siguiente función de transferencia [PUER06]:

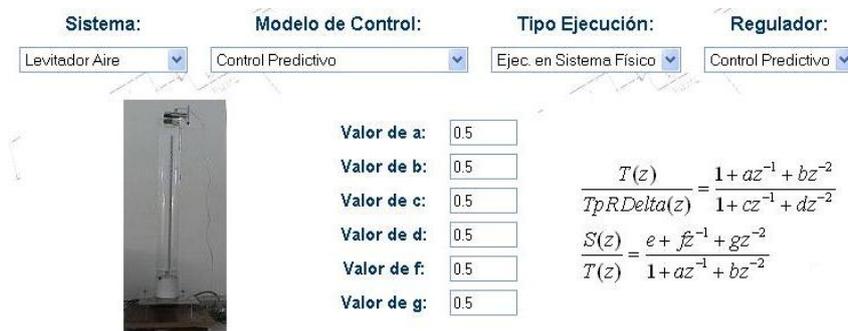
$$G_p(z) = \frac{0.3163 \cdot 10^{-3} z^{-1} + 0.3124 \cdot 10^{-3} z^{-2}}{1 - 1.9637 z^{-1} + 0.963 z^{-2}}$$

Se ha introducido, del mismo modo, un control en el espacio de estado con y sin seguimiento de la salida sirviéndose de un modelo teórico del cilindro deslizante y cuyo modelo en el espacio de estado viene dado por matrices siguientes:

$$G = \begin{bmatrix} 1.9637 & -0.9637 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.3163 \quad 0.3124] \cdot 10^{-3} \quad D = 0$$

Para la ejecución en tiempo real de este sistema físico se han implementado los mismos reguladores que en simulación aunque los resultados ofrecidos diferirán debido a las perturbaciones propias de la ejecución en tiempo real en este tipo de sistema (figura 5.29)



**Sistema:** Levitador Aire  
**Modelo de Control:** Control Predictivo  
**Tipo Ejecución:** Ejec. en Sistema Físico  
**Regulador:** Control Predictivo

Valor de a: 0.5  
 Valor de b: 0.5  
 Valor de c: 0.5  
 Valor de d: 0.5  
 Valor de f: 0.5  
 Valor de g: 0.5

$$\frac{T(z)}{Tp.R.Delta(z)} = \frac{1 + az^{-1} + bz^{-2}}{1 + cz^{-1} + dz^{-2}}$$

$$\frac{S(z)}{T(z)} = \frac{e + fz^{-1} + gz^{-2}}{1 + az^{-1} + bz^{-2}}$$

Figura 5.29. Ejemplo de simulación del cilindro deslizante controlado mediante regulador PID.

En la figura 5.30 se muestran resumidos todos los reguladores para cada sistema desarrollados en RECOLAB tanto en simulación como en tiempo real.

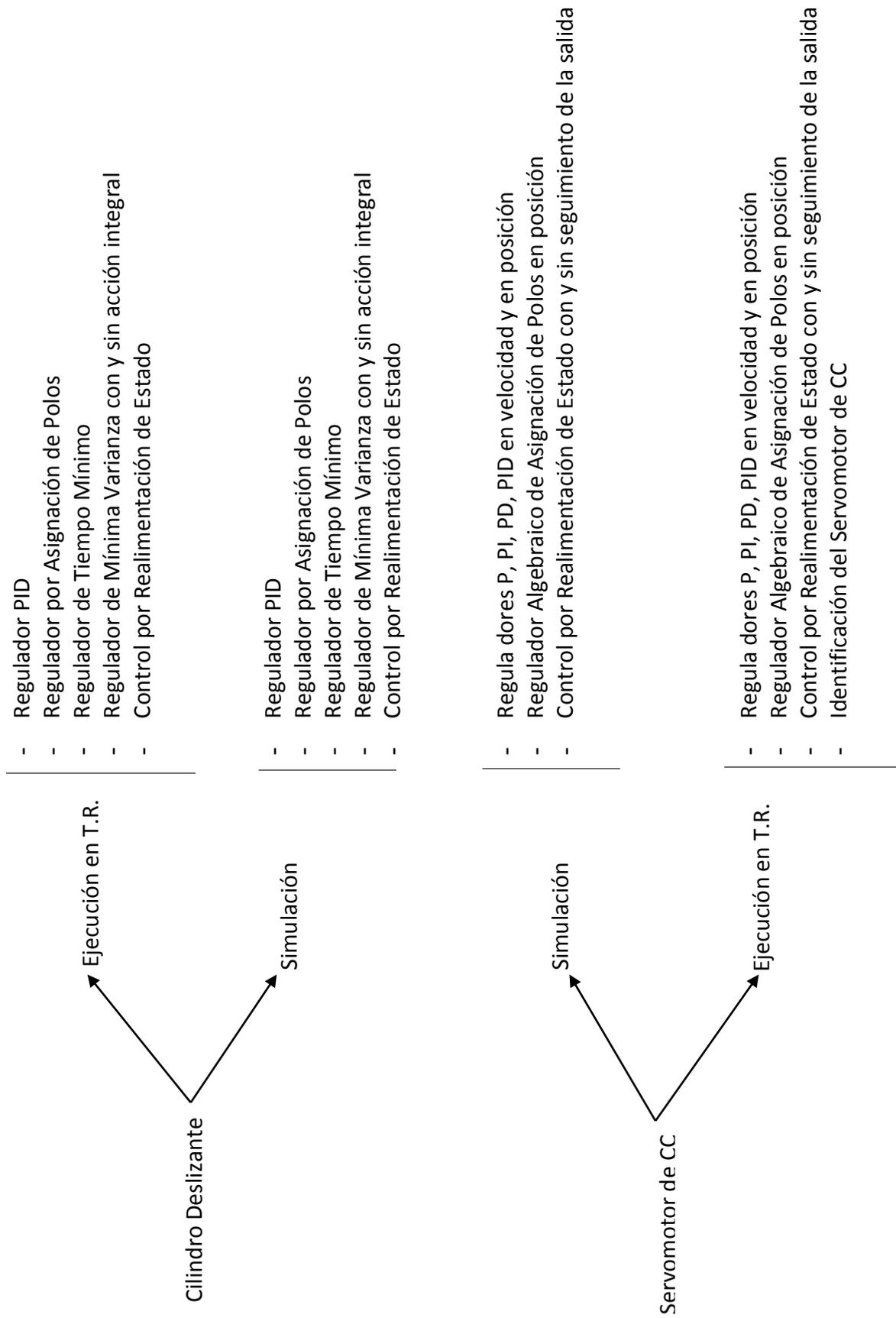


Figura 5.30. Reguladores implementados en RECOLAB

#### 5.4.2.1. PARÁMETROS Y LIMITACIONES DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL

Cada uno de los esquemas de control descritos tiene sus propios parámetros asociados (realmente son parámetros asociados al esquema Simulink que lo simula o lo ejecuta).

En primer lugar, un parámetro importante de diseño es el período de muestreo  $T$  que suele seleccionarse en función de un compromiso entre el deterioro de la calidad del control que puede producir un valor alto de  $T$  y la potencia de cálculo necesaria para ejecutar el algoritmo de control con valores pequeños. En control digital no es necesario imponer unas exigencias tan severas sobre el período de muestreo como las usuales en el campo del tratamiento de la señal, aunque siempre se debe de cumplir el Teorema de Shannon [TOR90]. Además, la elección del período de muestreo para estos sistemas físicos viene condicionada por las limitaciones físicas del *hardware* de la tarjeta de adquisición de datos, cuyo mínimo período de muestreo es  $T = 5\mu\text{s}$ , y las restricciones del *kernel* de Matlab (*software*), cuyo mínimo período de muestreo soportado es de  $T = 1\text{ms}$ . [MATW].

Con todo esto, y considerando que la dinámica de los procesos no es excesivamente rápida, se ha optado por un período de muestreo no muy exigente de  $T = 0.01$  seg. tanto para el servomotor de CC como para el cilindro deslizante.

En otro orden de cosas, el retardo del sistema es un parámetro a tener muy en cuenta en el control de ambos sistemas físicos pero se ha considerado únicamente el retardo estructural en los modelos de proceso a la hora de calcular los reguladores.

En el caso del sistema servomotor, es posible en cada esquema cambiar el escalón de referencia, mientras que en el caso del cilindro deslizante es fija y no puede ser elegida por el usuario.

Cabe reseñar que en el caso del cilindro deslizante se ha incluido en todos los esquemas Simulink implementados un nivel de tensión mínimo de referencia (la tensión nominal de ventilador DC es 12V y son necesarios niveles de tensión inferiores para los que el motor del ventilador permanece inamovible), representado por una constante que se suma a la acción de control proporcionada por el regulador calculado. Se ha empleado una tensión de referencia de 6V ya que es el valor aproximado que empieza a provocar un ligero levantamiento de la pieza. Del mismo modo, con este valor de tensión de referencia de partida se pueden admitir acciones de control negativas por parte del regulador, ya que si se alimenta el ventilador con tensiones negativas, éste no responde.

Por último, en el caso del cilindro deslizante, la entrada al proceso que se ha utilizado para comprobar la validez de los controles es una secuencia de escalones de posición. Se han elegido unos valores de 35, 50 y 30 cm. Sucesivamente (figura 5.31), que hacen trabajar al sensor en la zona más lineal de su rango de medición. El tiempo que está actuando cada escalón depende de la rapidez del controlador, por lo que se ha hecho lo suficientemente grande para ver claramente el funcionamiento del sistema ante dicha entrada.

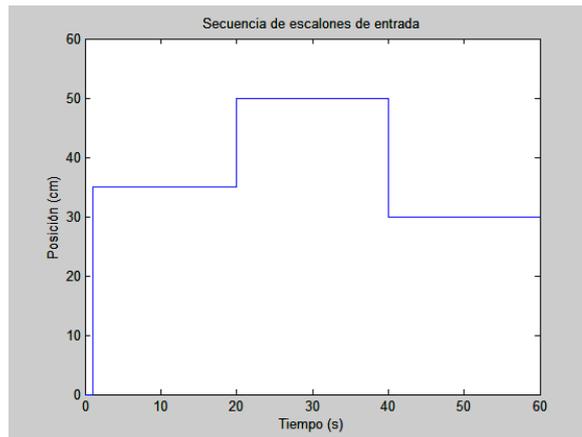


Figura 5.31. Señal de referencia para el cilindro deslizante.

En el caso del servomotor de CC, la entrada al proceso que se ha utilizado para comprobar la validez de los controles tanto en velocidad como en posición es un escalón unitario por defecto (modificable en amplitud por el usuario). Del mismo modo, en el caso de la ejecución en tiempo real en posición, se ha introducido un segundo escalón de 5 seg. con valor nulo para, en este tiempo, centrar el potenciómetro para que comience correctamente una nueva medición en posición (en las gráficas no aparece reflejado ya que realmente no forma parte de la ejecución).

### 5.4.2.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS

Como se ha visto en el epígrafe 5.4.2., es necesario disponer de los modelos matemáticos de los sistemas a controlar, y por eso se proporcionan los modelos establecidos para ambos sistemas. En el caso del cilindro deslizante, la identificación de su función de transferencia es algo compleja debido a la presencia de ruidos y otros efectos no deseados [BOSC94]. Sin embargo, la identificación del sistema es bastante sencilla asumiendo que su respuesta en velocidad es la respuesta típica de un sistema de primer orden, es decir, que el modelo en función de transferencia Velocidad/V de entrada, tiene la forma:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

donde la ganancia  $K$  se puede obtener como el valor final dividido entre la amplitud del escalón de entrada y la constante de tiempos  $\tau$  se calcula como el tiempo transcurrido hasta que el sistema alcanza el 63% del valor final [OGA10].

Para realizar esta identificación se provee de una ejecución en tiempo real que ofrece la posibilidad de obtener los datos antes citados, de forma que el alumno puede, si lo desea, identificar el proceso real con el cual está trabajando (modelo que debe coincidir con el calculado por los profesores, evidentemente).

El esquema Simulink que permite identificar el servomotor es el que aparece en la figura 5.32, donde el único parámetro modificable por el usuario es la amplitud de la señal de entrada.

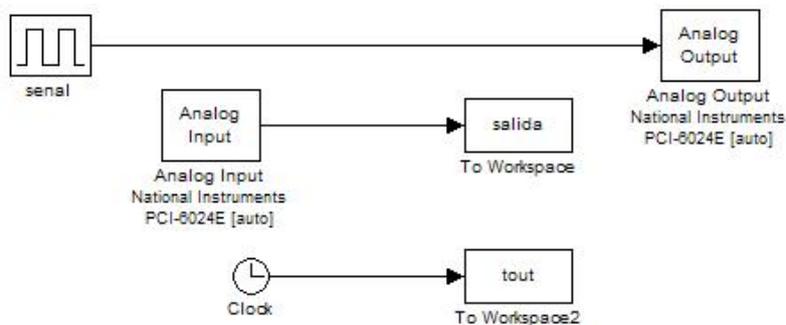


Figura 5.32. Diagrama Simulink para la identificación del servomotor de CC.

#### 5.4.2.3. REGULADORES TIPO PID

Los reguladores tipo PID discretos utilizados en este caso son los mismos ya comentados en el punto 4.1.4, es decir, un regulador P, PI, PD o PID ajustado mediante la modificación del lugar geométrico de las raíces.

Así pues, la expresión más completa que puede adoptar su función de transferencia (PID) es:

$$G_R(z) = K_p \frac{(z - a)(z - b)}{z(z - 1)}$$

Como se puede apreciar en esta función hay tres parámetros modificables:  $K_p$ ,  $a$  y  $b$ . Así pues, el proceso de realización de una práctica por parte del alumno consistiría en resumidas cuentas en resolver el problema teórico propuesto en la misma y después comprobar la validez del regulador obtenido tanto en simulación como en ejecución en tiempo real. Como se verá en la sección siguiente, el alumno accederá por medio de un

formulario web a la aplicación donde seleccionará el tipo de controlador, el sistema y la modalidad (simulación o ejecución) que desea realizar.

A continuación se exponen los detalles más relevantes de este tipo de control para los dos sistemas físicos conectados.

**Servomotor de CC**

El esquema Simulink que simula el comportamiento del sistema controlado mediante un regulador P, PI, PD o PID se muestra en la figura 5.33:

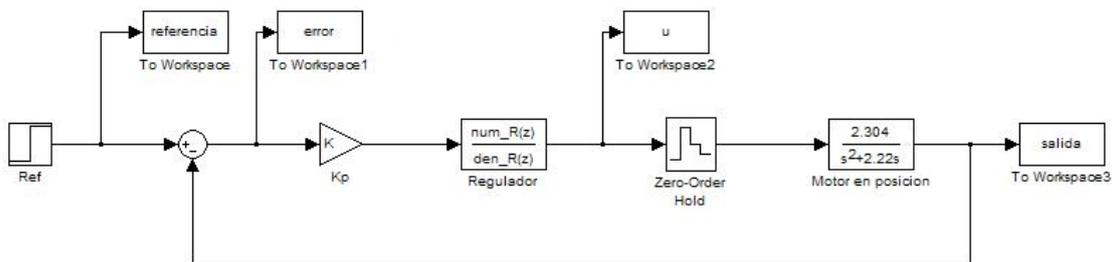


Figura 5.33 Diagrama de bloques de la simulación del control del servomotor de CC en posición mediante regulador tipo PID.

El esquema para el caso de la simulación del control en velocidad es idéntico al anterior cambiando simplemente la función de transferencia “Motor en posición” por la función de transferencia del motor en velocidad.

En el caso de ejecución en tiempo real el esquema Simulink para control en velocidad se muestra en la figura 5.34.

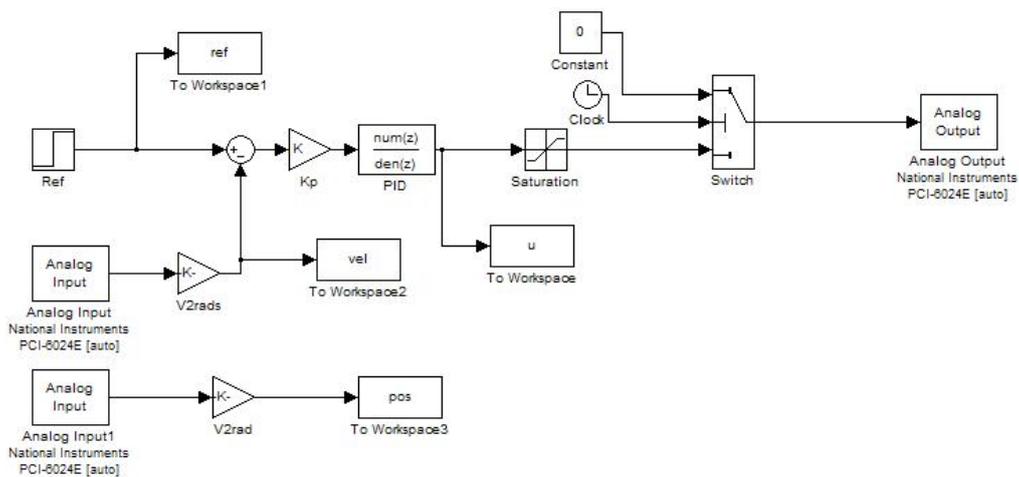


Figura 5.34: Esquema para la ejecución en tiempo real del servomotor controlado mediante regulador PID en velocidad.

Como se puede observar aparecen los bloques propios de comunicación con el proceso (entradas y salidas analógicas) que leen la posición y velocidad del servomotor y permiten aplicar la acción de control generada. El esquema de ejecución en tiempo real del servomotor controlado en posición es algo más complejo ya que una vez terminada la ejecución propiamente dicha hay que volver a situar al motor en su posición original. Dicho esquema se muestra en la figura 5.35.

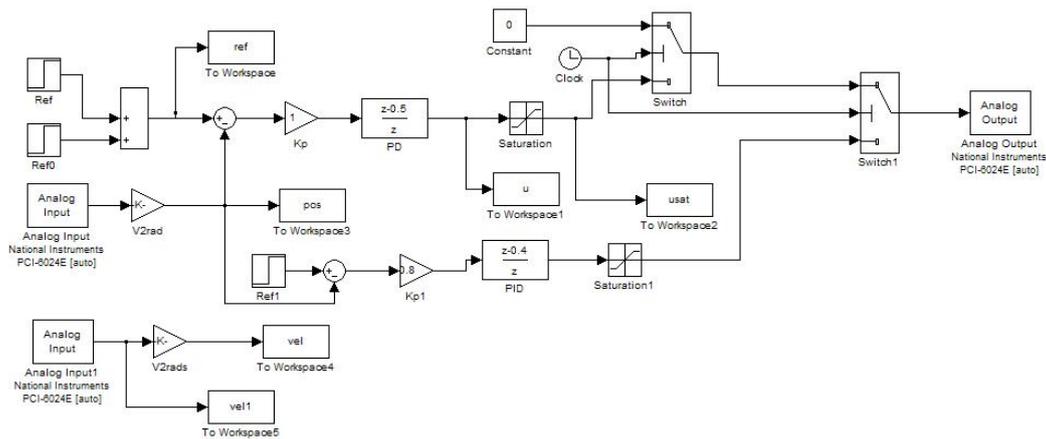


Figura 5.35. Esquema para la ejecución en tiempo real del servomotor controlado mediante regulador PID en posición.

### Cilindro deslizante

El esquema Simulink que simula el comportamiento del sistema controlado mediante un regulador P, PI, PD o PID se muestra en la figura 5.36.

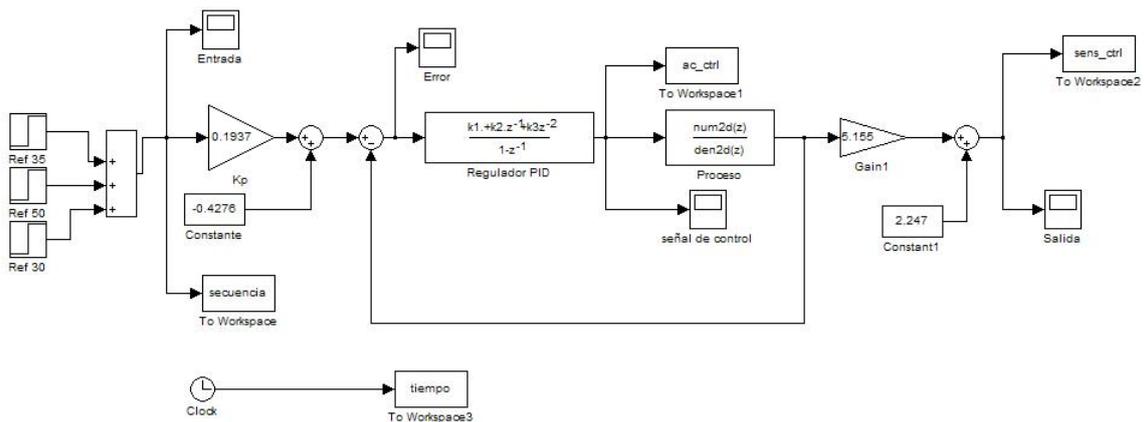


Figura 5.36. Esquema para la ejecución en simulación del cilindro deslizante controlado mediante regulador PID en posición.

Como se puede apreciar, hay varias partes diferenciadas: la generación de la trayectoria de referencia tal y como se ha visto en el epígrafe anterior, el bucle cerrado

con regulador y proceso propiamente dicho y una serie de transformaciones (offsets y ganancias) que convierten unidades, etc.

El esquema homólogo para la ejecución en tiempo real se muestra en la figura 5.37.

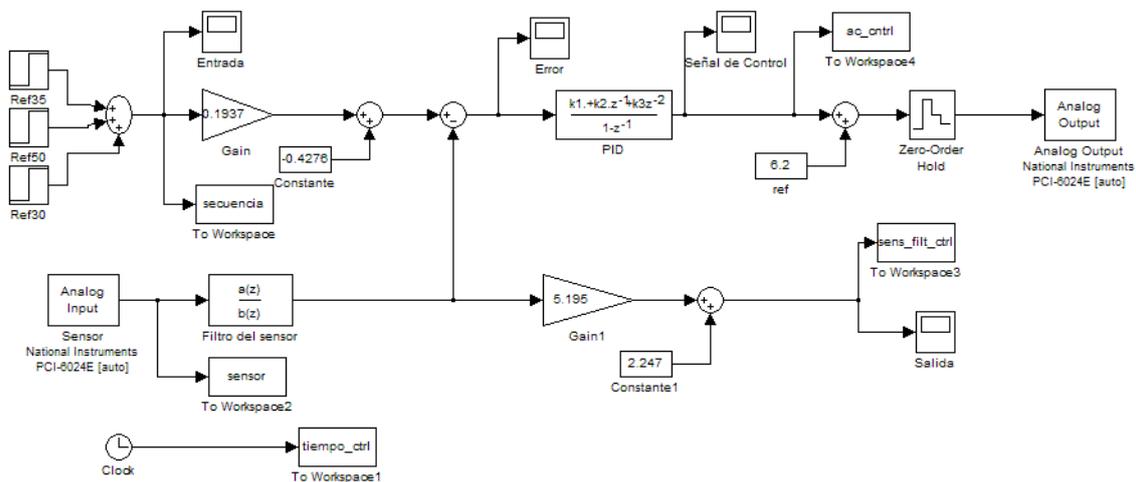


Figura 5.37. Esquema para la ejecución en tiempo real del cilindro deslizable controlado mediante regulador PID en posición.

#### 5.4.2.4. REGULADORES DE ASIGNACIÓN DE POLOS

En el control de procesos industriales el regulador más empleado tanto en su modalidad continua como discreta es el PID debido a su buen comportamiento general, siempre y cuando, sus especificaciones de control no sean demasiado exigentes y además sólo tiene tres parámetros ajustables.

En cambio, si se desean especificaciones más exactas y restrictivas, los controladores PID dejan de ser apropiados. En este sentido, los reguladores algebraicos permiten, en gran medida, salvar los problemas que aquéllos no pueden solventar y son una alternativa bastante fiable. No obstante, el diseño del Control Algebraico es bastante más complejo y presenta algunos inconvenientes (indeseables oscilaciones ocultas entre otras).

Para calcular un regulador algebraico hay que conocer el modelo del proceso y tratar de ubicar los polos en bucle cerrado en un lugar determinado para que el sistema global se comporte de acuerdo a unas características concretas [BER99].

Así pues, la función de transferencia en bucle cerrado viene dada por la siguiente expresión:

$$M(z) = \frac{G_R(z) + G_P(z)}{1 + G_R(z)G_P(z)}$$

donde

$$G_P(z) = \frac{B(z)}{A(z)}$$

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{P(z)}$$

siendo  $G_R(z)$  la función de transferencia del regulador a calcular,  $G_P(z)$  la función de transferencia de la planta a controlar,  $A(z)$  y  $B(z)$  los polinomios que definen la función de transferencia del proceso (conocidos) y  $P(z)$  y  $Q(z)$  los polinomios incógnita (en principio) que definen la función de transferencia del regulador.

La ecuación diofántica que hay que resolver para calcular el controlador de asignación de polos es la siguiente:

$$A(z)P(z) + B(z)Q(z) = \prod_{i=1}^{2n-1} (z - p_i)$$

donde  $n$  es el número de polos en bucle cerrado a asignar que en definitiva son los que definen el comportamiento del sistema.

Los parámetros modificables en este caso son los coeficientes de los polinomios  $P(z)$  y  $Q(z)$  y la amplitud del escalón de referencia.

### *Servomotor de CC*

El control del servomotor en posición con regulador algebraico por asignación de polos se ha realizado con éxito tanto para la simulación como para la ejecución en tiempo real. No se pudo realizar con tanta solvencia dicho control en velocidad puesto que, en este caso, se trata de un sistema de primer orden y pierde sentido el empleo de este tipo de regulador.

El diagrama de bloques que representa el regulador algebraico de asignación de polos diseñado para el control en posición del servomotor en simulación se muestra en el la figura 5.38.

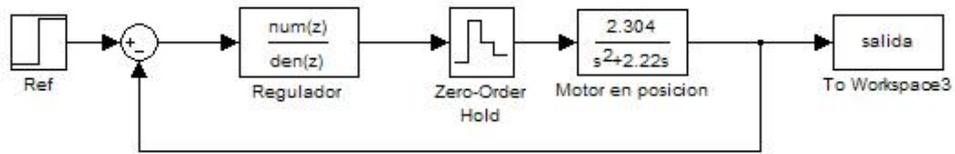


Figura 5.38. Esquema para la ejecución en simulación del servomotor controlado mediante regulador de asignación de polos.

En cuanto a la ejecución en tiempo real, se incluyen los bloques de comunicación (entradas y salidas analógicas) así como la puesta a cero de la posición del motor (figura 5.39).

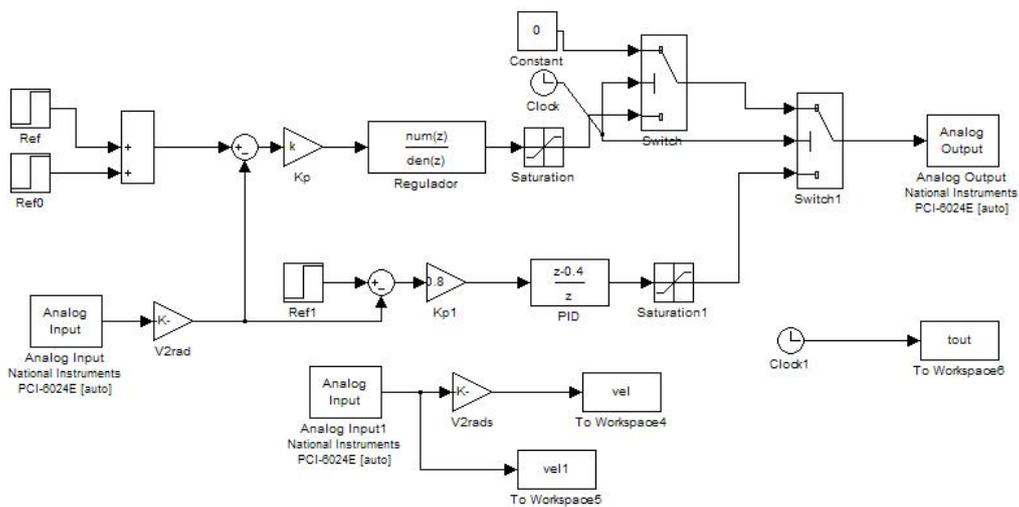


Figura 5.39. Esquema para la ejecución en tiempo real del servomotor controlado mediante regulador de asignación de polos.

### Cilindro deslizante

En la figura 5.40 se muestra el esquema Simulink para la simulación del cilindro deslizante controlado mediante un regulador de asignación de polos. Como se puede observar, a excepción de la generación de la referencia y los ajustes de magnitudes, el esquema es básicamente el mismo que para el servomotor ya que la estructura del regulador es la misma.

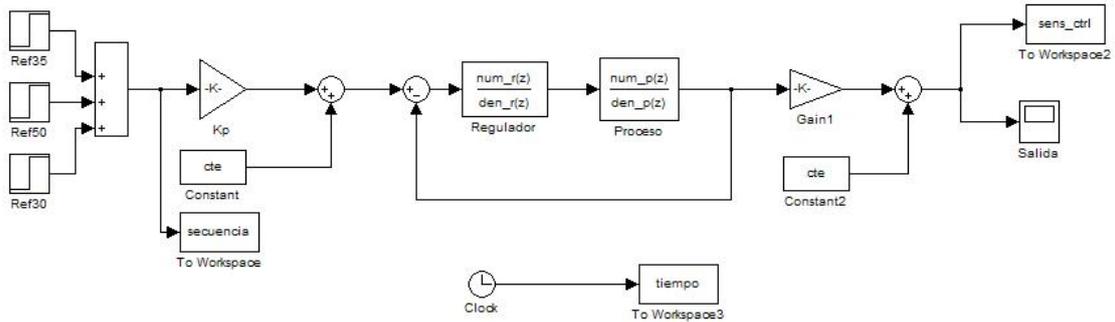


Figura 5.40. Esquema para la simulación del cilindro deslizando controlado mediante regulador de asignación de polos.

En cuanto al esquema para la ejecución en tiempo real (figura 5.41), cabe resaltar que se ha introducido un nuevo offset en la referencia para permitir a la pieza móvil *despegar* en los primeros instantes.

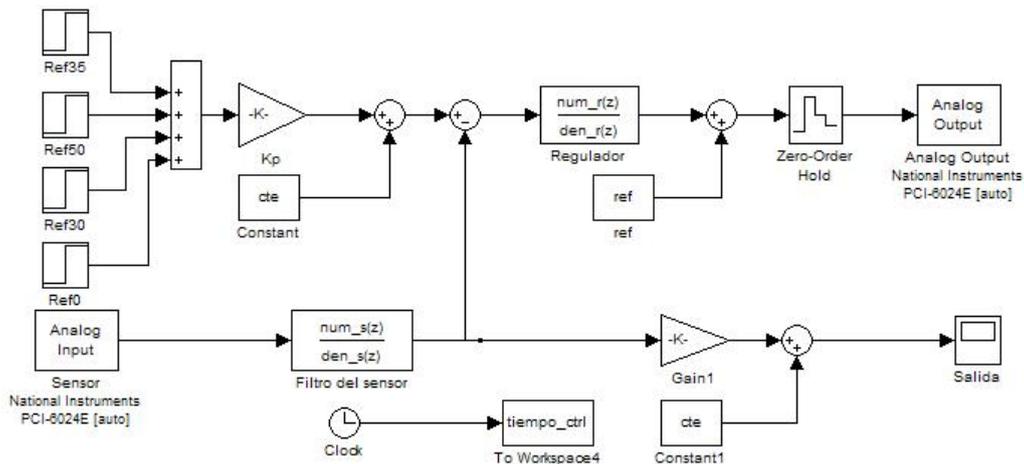


Figura 5.41 Esquema Simulink para la ejecución en tiempo real del cilindro deslizando controlado mediante regulador de asignación de polos.

#### 5.4.2.5. REGULADORES DE TIEMPO MÍNIMO

Los reguladores de tiempo mínimo son reguladores algebraicos de cancelación cuyo cometido es que la función de transferencia en bucle cerrado sitúe sus polos de forma que se elimine el error en régimen permanente lo más rápido posible (en el menor número de periodos de muestreo) [BER99]

La estructura y el método de cálculo de este tipo de regulador se presentó en el ejemplo de diseño del epígrafe 4.1.4.

Se ha propuesto este regulador sólo para el cilindro deslizante ya que para el servomotor no se conseguía ninguna mejora apreciable respecto a otros que proporcionaban mejor rendimiento.

Los esquemas y funcionamiento son idénticos a los de los reguladores de asignación de polos anteriormente vistos ya que su estructura es idéntica.

#### 5.4.2.6. CONTROL POR REALIMENTACIÓN DEL ESTADO

Se trata del control del sistema mediante la realimentación de sus variables de estado. Es un control robusto frente a errores en el modelo del sistema o perturbaciones que puedan afectar a la dinámica del mismo.

Para el cálculo de este regulador hay que diseñar la matriz de realimentación del estado con objeto de fijar el comportamiento dinámico del sistema, de forma que se asignen directamente todos los polos de la parte controlable del proceso. Se pretende diseñar un sistema de seguimiento de la entrada, con lo cual la matriz de realimentación del estado no puede calcularse de manera independiente al factor integral que se pretende introducir para eliminar el error permanente.

Al tratarse de un control digital por realimentación del estado se va a utilizar un computador y para implementar el control es necesario obtener el sistema discreto equivalente al sistema continuo. Es decir, considerando el sistema continuo modelado en representación interna como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}$$

En un esquema de control digital la señal de entrada al sistema deberá convertirse a continua, para lo que se utilizará un bloqueador de orden cero (ZOH), mientras que la salida del sistema deberá muestrearse. El diagrama de bloques del sistema continuo considerando que forma parte de un sistema de control digital se muestra en la figura 5.42.

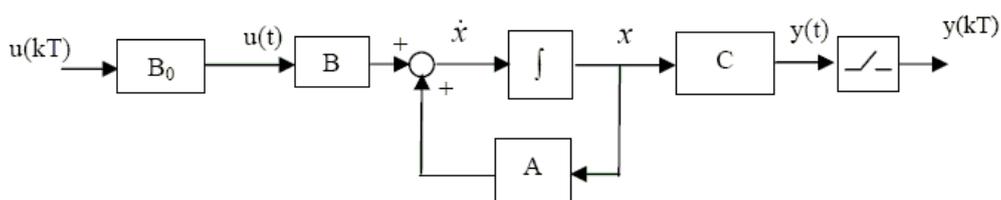


Figura 5.42: Diagrama de bloques de un sistema continuo modelado en el espacio de estados.

Para realizar el diseño del sistema de control, es decir, para diseñar la matriz de realimentación del estado es necesario discretizar el sistema continuo, obteniendo el sistema discreto que sustituye al conjunto bloqueador de orden cero, sistema continuo y muestreador. El sistema discreto equivalente al sistema continuo vendrá dado por:

$$\begin{aligned}x[(k + 1)(T)] &= Gx(kT) + Hu(kT) \\y[kT] &= Cx(kT) + Du(kT)\end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned}G &= e^{At} \\H &= \left( \int_0^T e^{A\lambda} d\lambda \right) B\end{aligned}$$

El diagrama de bloques del sistema discreto equivalente al sistema continuo se muestra en la figura 5.43.

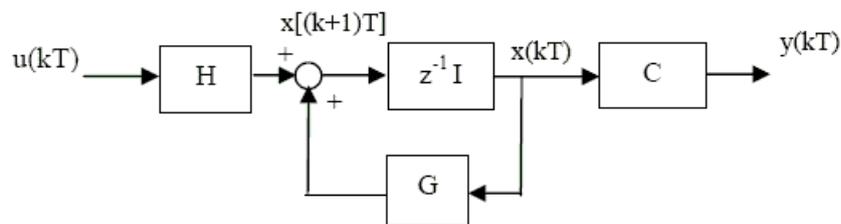


Figura 5.43: Diagrama de bloques de un sistema discreto modelado en el espacio de estados.

Para realizar el control por realimentación del estado las variables de estado deben ser medibles (es nuestro caso). En el caso del servomotor por ejemplo, las variables de estado corresponden a la posición y a la velocidad motor, de forma que pueden ser medidas mediante el sensor analógico de posición (potenciómetro) y el sensor analógico de velocidad (tacogenerador). En el caso de que las variables de estado no fueran medibles sería necesario diseñar un observador para estimar su valor. Por otra parte, para poder implantar un control por realimentación del estado, el sistema debe ser controlable. Si el sistema no fuera controlable, su comportamiento sería independiente de la entrada, por lo que no sería modificable a pesar de realizar una realimentación del estado sobre ella. Para saber si un sistema lineal e invariante en el tiempo es controlable, únicamente hay que comprobar que el rango de la matriz de controlabilidad  $Q$  coincida con el orden del sistema y comprobar que la misma está bien condicionada [DOM02], [VAL02].

Se procederá, en primer lugar, a un control por realimentación de estado sin seguimiento de la salida, es decir, sólo se trata el problema de la regulación (no se exige el seguimiento de ninguna referencia), cuyo esquema de control se muestra en la figura 5.44.

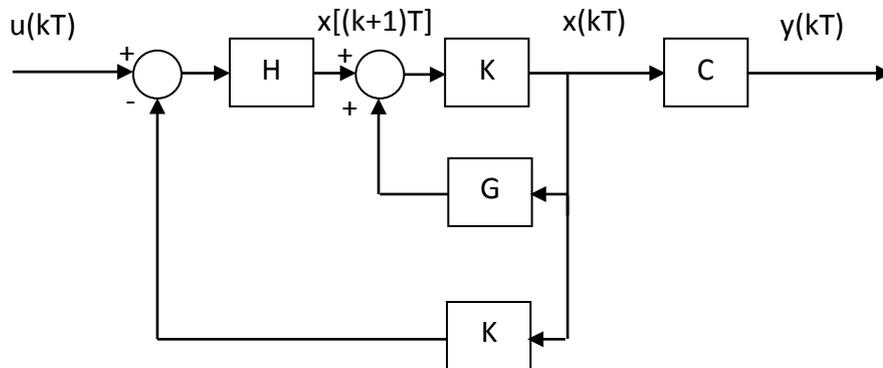


Figura 5.44: Control por realimentación del estado sin seguimiento de la salida.

donde la matriz de realimentación del estado  $K$  permite fijar la dinámica del sistema:

$$K = [k_1 \quad k_2]$$

generando una acción de control dada por

$$u(k) = -Kx(k)$$

La resolución del diseño por asignación de polos pasa por resolver la siguiente ecuación [VAL02]:

$$|zI - (G - HK)| = (z - p_1)(z - p_2) \dots (z - p_n)$$

donde  $I$  es la matriz identidad de dimensiones  $n \times n$  y  $p_i$  son los  $n$  polos a asignar.

Del mismo modo, se ha efectuado un control por realimentación del estado con seguimiento de la salida con control integral aplicando el método que aparece en [VAL02].

Así pues los parámetros modificables en este tipo de esquema de control es la matriz de realimentación  $K$  que en este caso es de dimensiones  $1 \times 2$  ya que tenemos dos estados y una entrada.

Este tipo de control se ha implementado para los dos sistemas disponibles.

### Servomotor de CC

Se ha diseñado un control de velocidad por realimentación del estado tanto sin seguimiento de la señal de salida como con seguimiento de la misma. Ambos controles se pueden probar tanto en simulación como en ejecución en tiempo real. Puesto que los esquemas en tiempo real son una extensión de los de simulación, veremos en este epígrafe únicamente los primeros.

El esquema Simulink para la ejecución del control del servomotor mediante realimentación del estado sin seguimiento de la salida se muestra en la figura 5.45, mientras que el que presenta seguimiento de la salida se muestra en la 5.46.

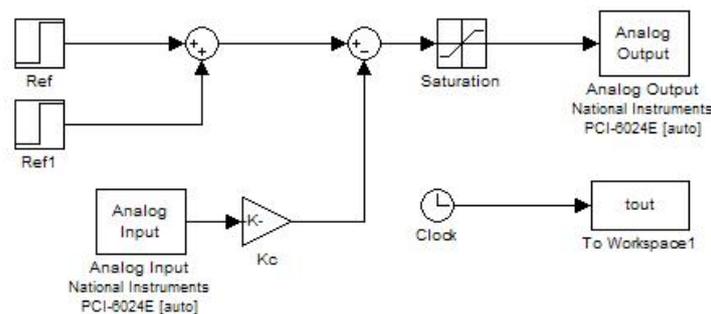


Figura 5.45: Esquema Simulink para la ejecución en tiempo real del servomotor controlado mediante realimentación del estado sin seguimiento de la salida.

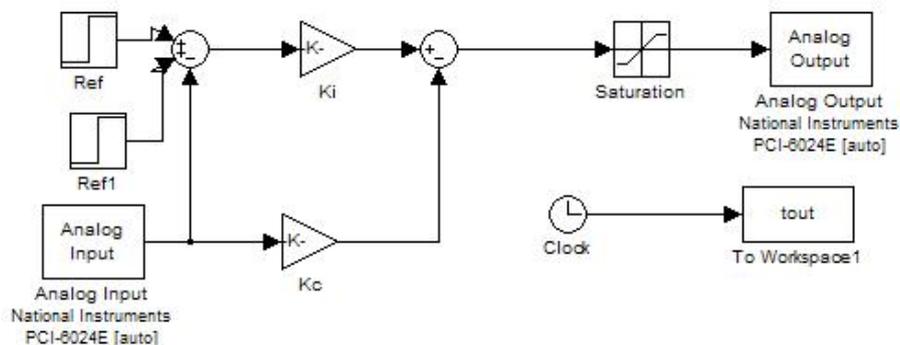


Figura 5.46: Esquema Simulink para la ejecución en tiempo real del servomotor controlado mediante realimentación del estado con seguimiento de la salida.

**Cilindro deslizante**

El esquema Simulink para la simulación del control del cilindro deslizante mediante realimentación del estado se muestra en la figura 5.47.

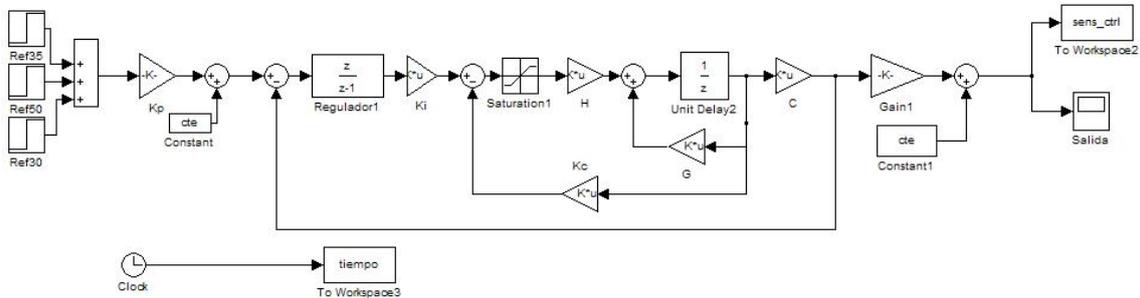


Figura 5.47. Esquema Simulink para la simulación del cilindro deslizante controlado mediante realimentación del estado.

Como se observa, aparte de los elementos ya comentados en otros tipos de control, se ve claramente la estructura del regulador por realimentación del estado.

El esquema Simulink para la ejecución en tiempo real se muestra en la figura 5.48.

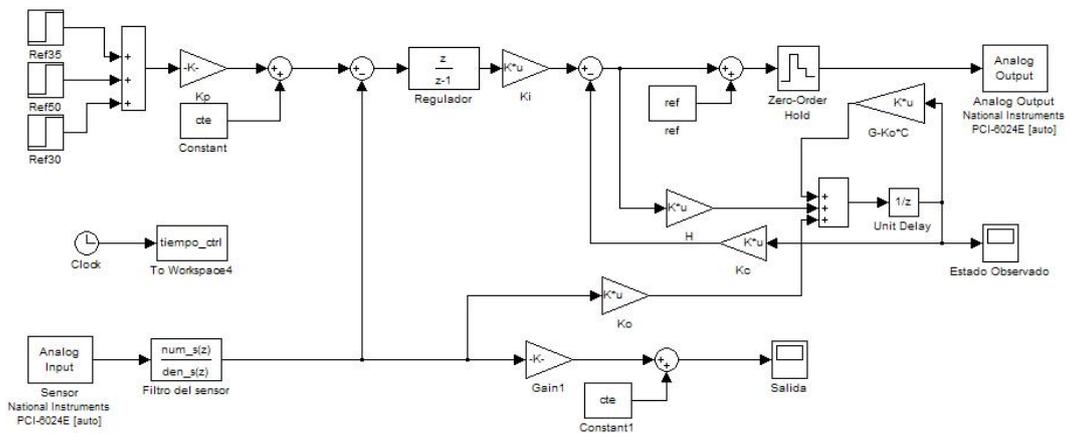


Figura 5.48. Esquema Simulink para la ejecución en tiempo real del cilindro deslizante controlado mediante realimentación del estado.

**5.4.2.7. CONTROL DE MÍNIMA VARIANZA**

Los Reguladores de Mínima Varianza (MV) fueron introducidos a principios de los años setenta y desde entonces han tenido una notable difusión, especialmente en el marco del Control Adaptativo. Son reguladores ampliamente utilizados en el entorno industrial (por ejemplo en plantas químicas donde se requiere un cierto margen de pureza de los compuestos).

El Control de Mínima Varianza puede englobarse dentro de los de síntesis óptima, ya que se utiliza la minimización de un índice de coste como criterio de diseño. Sin embargo, también puede interpretarse como un problema de asignación de polos, puesto que el método de síntesis está basado en manipulaciones algebraicas con los polinomios que se utilizan en la descripción externa.

El interés de este tipo de controladores se ve acentuado sobre todo en multitud de procesos industriales en los cuales es de vital importancia la minimización de la varianza de la salida. Esta técnica de control se utiliza cuando la salida del sistema está contaminada por una perturbación estocástica. Estas perturbaciones no se pueden eliminar por completo, pero se puede reducir su varianza [OLL91].

En términos generales, la estructura de un modelo de un sistema controlado con un regulador de mínima varianza se muestra en la figura 5.49.

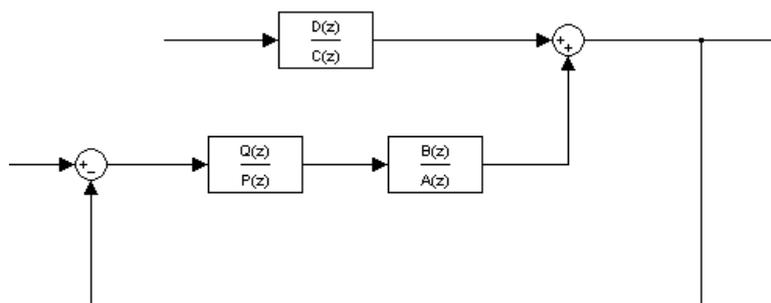


Figura 5.49. Diagrama de bloques de un proceso con perturbación estocástica controlado con regulador MV.

El diseño de los reguladores de mínima varianza [LEV96] se basa en la minimización de un índice de coste, de forma que la varianza de la salida sea mínima,

$$J(k+1) = E\{y^2(k+1) + ru^2(k)\}$$

donde  $r$  es un factor de ponderación de la acción de control  $u(k)$ .

Los modelos estocásticos son una aproximación matemática para representar las perturbaciones aleatorias. Existen diferentes tipos que dependen de los valores que tomen los polinomios  $D(z^{-1})$  y  $C(z^{-1})$  que actúan a modo de filtro del ruido, el cual está alimentado por un ruido blanco.

Minimizando el índice de coste propuesto se obtiene una ley de control con una función de transferencia del regulador de mínima varianza :

$$G_{RMV}(z) = \frac{A(D - C)z}{zBC + \frac{r}{b_1}AD}$$

donde A y B son polinomios finitos en  $z^{-1}$  correspondientes al denominador y numerador respectivamente de la función de transferencia del proceso, C y D, ídem para el filtro del ruido, r el factor de ponderación del esfuerzo de control y  $b_1$  el primer término del polinomio B.

En principio estos reguladores presentan error en régimen permanente, ya que no se ha incluido ningún término en el índice de coste formulado que se ocupe de ello. Para solucionar esto, una de las posibles opciones es la adición de un término integral de la forma,

$$G_{PI}(z^{-1}) = \frac{1 - (1 - \alpha)z^{-1}}{(1 - z^{-1})}$$

quedando entonces una estructura del regulador como el que aparece en la figura 5.50.

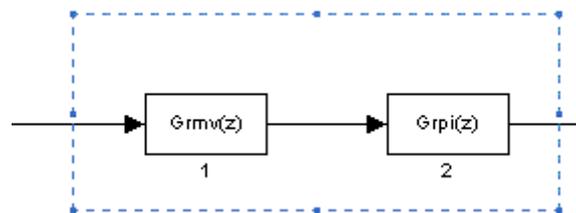


Figura 5.50: Diagrama de bloques de un regulador de MV con adición de un término integral.

Al introducir términos integradores, se aumenta la varianza de la señal de salida sobre todo cuando la frecuencia de la perturbación es elevada. Para paliar este efecto en lugar de aplicar solamente acciones integrales, se añade también un término proporcional. Para valores pequeños de  $\alpha$ , la acción proporcional tiene más peso, mientras que para valores altos, existe un efecto mayor de la acción integral. Particularmente, en el caso que  $\alpha = 0$  se tiene una acción proporcional pura y si  $\alpha = 1$  se dispone de acción integral pura. Se trata de buscar el compromiso entre ambas acciones, para que el sistema se comporte de la manera más adecuada.

Este regulador de mínima varianza y su versión integral se han implementado en el sistema RECOLAB únicamente en el caso del cilindro deslizante tanto en simulación como en ejecución en tiempo real.

En las figuras 5.51 y 5.52 se muestran los esquemas Simulink para la simulación y la ejecución en tiempo real respectivamente del esquema de control del sistema deslizante controlado con regulador de mínima varianza.

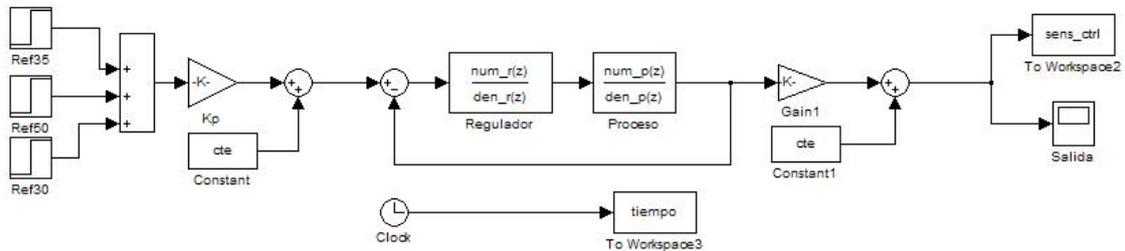


Figura 5.51: Esquema Simulink para la simulación del cilindro deslizante con regulador de MV.

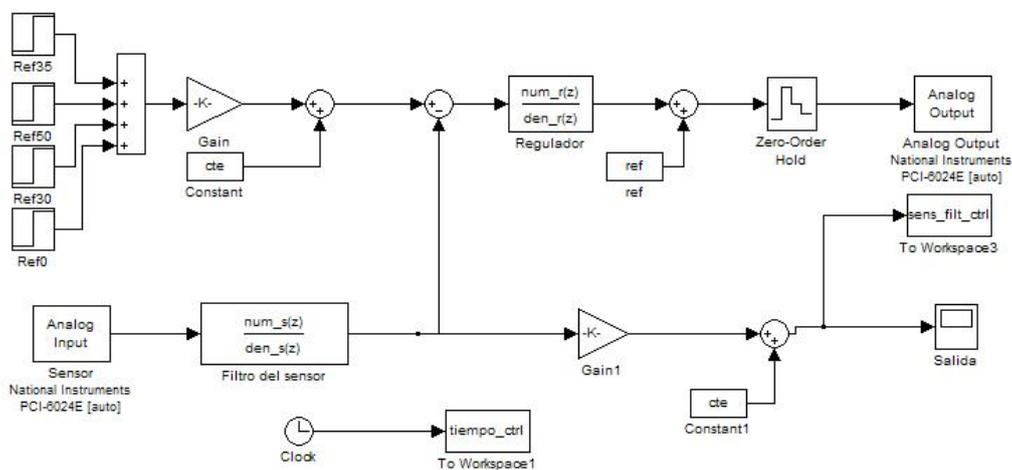


Figura 5.52: Esquema Simulink para la ejecución en tiempo real del cilindro deslizante con regulador de MV.

## 5.5. LA APLICACIÓN WEB DE RECOLAB

En este punto se ofrece una visión general de la aplicación web de RECOLAB y se mostrarán algunos ejemplos.

### 5.5.1. ESTRUCTURA DE LA PÁGINA WEB

La página Web implementada para el sistema RECOLAB se compone esencialmente de cuatro partes :

1. Menú principal donde aparecen todos los recursos disponibles en la web: *Inicio* que es la página principal, *Descripción* donde se da una descripción del sistema RECOLAB, *Prácticas* donde se pueden encontrar prácticas a

realizar con RECOLAB, *Tutorial* que muestra el funcionamiento de RECOLAB y por último *Cámara* que permite acceder al servidor de vídeo.

2. Ventana de contenidos: En ella podemos elegir la tarea que deseamos (simulación, ejecución en tiempo real y acceso al vídeo). Además, como se verá, es la zona donde se configurarían los reguladores y donde posteriormente se presentarían los resultados.
3. Botones de estado y validación: nos indica el nivel de privilegio que tenemos en el sistema y permite validarse en él o cerrar la sesión.
4. Enlaces a prácticas disponibles: En general enlaces a cualquier página de interés, en concreto a páginas de asignaturas de Ingeniería de Control y Automática cuyo contenido está relacionado con RECOLAB (problemas, prácticas, etc.)

En la figura 5.53 se muestra la página principal de RECOLAB así como sus 4 partes diferenciadas.

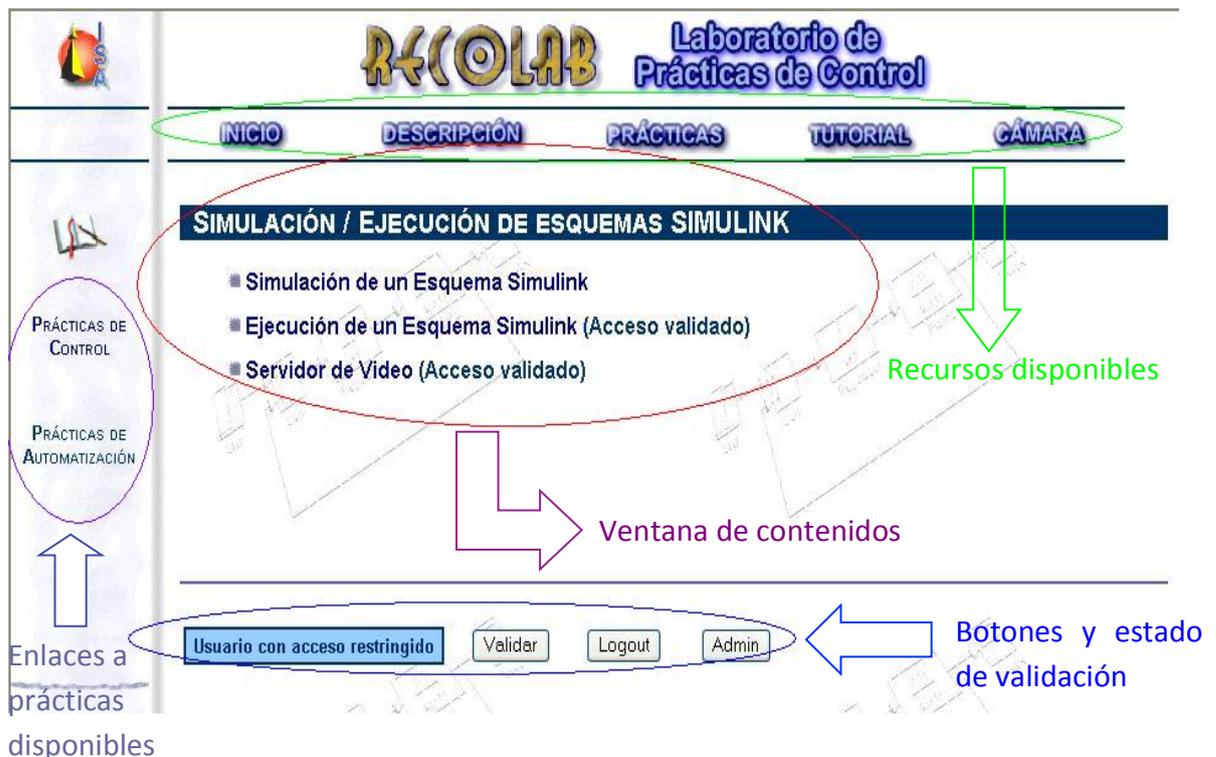


Figura 5.53: Página web principal de RECOLAB y sus partes.

## 5.5.2. EJEMPLOS

En los ejemplos siguientes se pretende mostrar el funcionamiento de RECOLAB tanto en simulación como en tiempo real.

## 5.5.2.1. EJEMPLOS CON EL CILINDRO DESLIZANTE

Dado un determinado problema en el que se pide diseñar un regulador de mínima varianza para controlar la posición de la pieza móvil del cilindro deslizante, el regulador que se obtiene es el siguiente:

$$R(z^{-1}) = \frac{0.57(1 - 0.16z^{-1})}{2.13 + 2.13z^{-1} + 1.07z^{-2}}$$

The diagram shows the transfer function  $R(z^{-1}) = \frac{0.57(1 - 0.16z^{-1})}{2.13 + 2.13z^{-1} + 1.07z^{-2}}$ . The coefficients 0.57, 0.16, 2.13, and 1.07 are circled in green. A blue arrow labeled  $K_p$  points to 0.57. A green arrow labeled  $a$  points to 0.16. A green arrow labeled  $b,c,d$  points to the denominator coefficients 2.13, 2.13, and 1.07.

Como se puede apreciar este regulador tiene 5 parámetros: la ganancia  $K_p$ , los coeficientes del polinomio del numerador y los coeficientes del polinomio del denominador. Hay que señalar que dado el orden del proceso a controlar y el tipo de regulador elegido, esta estructura será siempre la misma, variando únicamente los parámetros dependiendo de las restricciones o especificaciones del problema.

Para simular el sistema con este controlador accedemos a la opción pertinente en la página principal y seleccionamos el tipo de sistema, el modelo de control, el tipo de ejecución y el regulador elegido. Asimismo especificamos los parámetros del regulador. Una vez hecho esto se puede ejecutar la simulación del sistema. Este procedimiento se muestra en la figura 5.54.


Laboratorio de Prácticas de Control

---

INICIO
DESCRIPCIÓN
PRÁCTICAS
TUTORIAL
CÁMARA

**Sistema:**

Cilindro Deslizante

**Modelo de Control:**

Realimentación Unitaria Posición

**Tipo Ejecución:**

Ejec. en Simulación

**Regulador:**

R. Mínima Varianza



Valores a introducir

Valor de Kp: 0.57

Valor de a: -0.16

Valor de b: 2.13

Valor de c: 2.13

Valor de d: 1.07

$$R(z) = \frac{K_p(1-az^{-1})}{b+cz^{-1}+dz^{-2}}$$

Ecuación del Regulador

Ejecutar
Volver

Figura 5.54. Datos del regulador de mínima varianza en simulación para el cilindro deslizante.

Una vez ejecutado el sistema se muestra la gráfica de resultados de la figura 5.55.

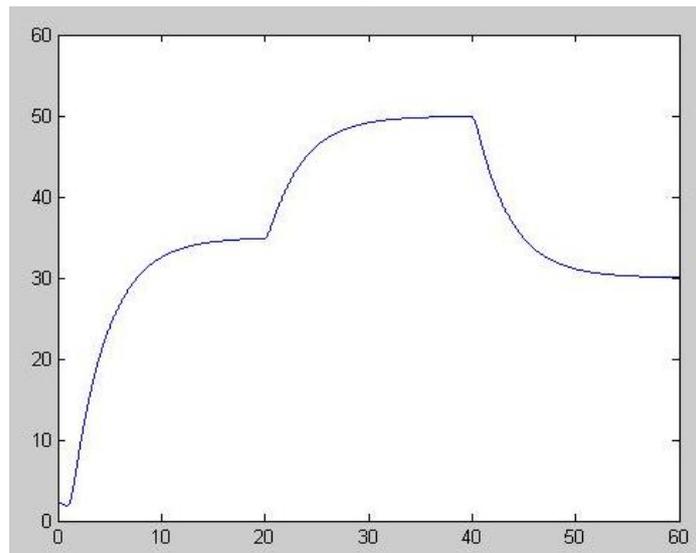


Figura 5.55. Gráfica de la señal de salida en simulación del cilindro deslizante regulado mediante regulador de mínima varianza.

Como ejemplo de ejecución en tiempo real se ha elegido un regulador PID cuya función de transferencia es la siguiente:

$$G_R(z) = \frac{0.1937(z-0.99)(z-1.01)}{(z-1)}$$

Introduciendo los datos del regulador como en el caso anterior pero para un regulador PID y eligiendo la opción de 'Ejecución en tiempo real' se obtiene la señal de salida mostrada en la figura 5.56.

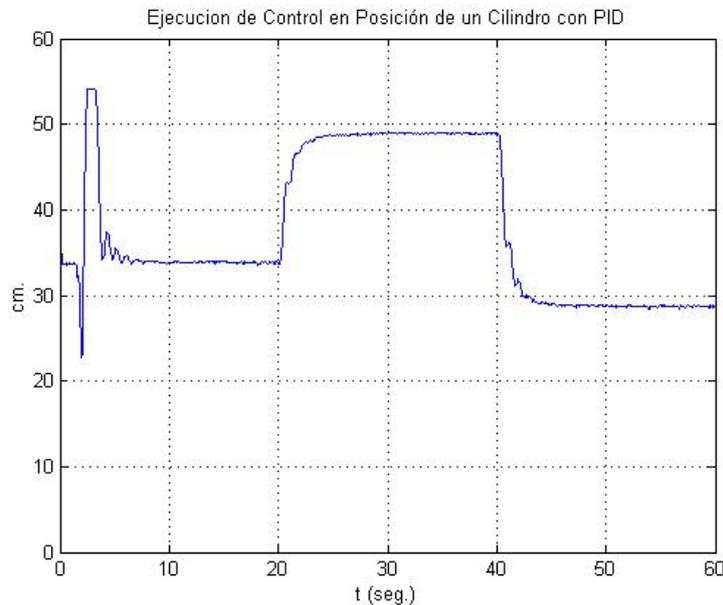


Figura 5.56. Gráfica de la señal de salida en tiempo real del cilindro deslizante regulado mediante regulador PID.

Se observa al principio de la ejecución un pico que corresponde al impulso necesario para que la pieza *despegue*. Posteriormente se adecúa correctamente a la referencia de entrada.

#### 5.5.2.2. EJEMPLOS CON SERVOMOTOR DE CC

Para este sistema se ha seleccionado en simulación un control en posición por realimentación de estado con seguimiento de la salida cuya constante integral  $K_i$  y matriz de realimentación son  $K_c$ :

$$K_c = \begin{bmatrix} 0 & 5.18 \end{bmatrix}$$

$$K_i = 11.34$$

La página web asociada con los datos del regulador, el tipo de sistema, tipo de ejecución, etc., se muestra en la figura 5.57.



Figura 5.57. Datos del regulador del control en el espacio de estados con seguimiento de la salida en simulación del servomotor de CC

La gráfica de la señal de salida es la que se muestra en la figura 5.58.

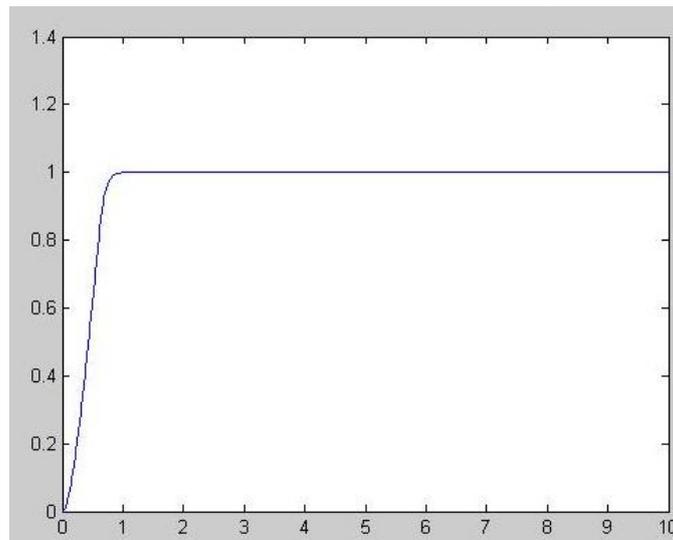


Figura 5.58. Gráfica de la posición del motor de CC controlado mediante regulador en el espacio de estados con seguimiento de la salida

Como ejemplo de ejecución en tiempo real para este sistema se ha elegido la identificación del sistema (en velocidad). Se ha elegido una amplitud de escalón de una unidad y un periodo para la señal cuadrada de entrada de 4 periodos de muestreo ( $T = 0.5$  seg.).

**SIMULACIÓN DE UN ESQUEMA SIMULINK**

**Identificación del Servomotor de CC**

**Simulación**

**Sistema:** Motor CC Feedback

**Modelo de Control:** Identificación del Servomotor de CC

**Tipo de Ejecución:** Ejecución en Sistema Físico

**Regulador:** Identificación

**Valor de Amplitud:** 1.0

**Valor de Periodo:** 4

$$F(z) = \frac{K_y z}{(z - a)(z - b)}$$

**Ejecutar** **Volver**

Figura 5.59: Gráfica de la posición del motor de CC controlado mediante regulador en el espacio de estados con seguimiento de la salida

La gráfica de salida se representa en la figura 5.60.

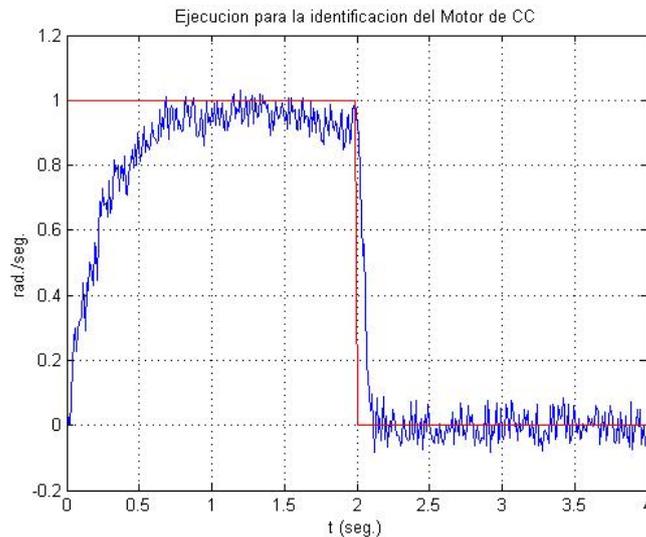


Figura 5.60. Gráfica para la identificación de la f.d.t. de primer orden del motor de CC.

En esta última gráfica se tienen todos los datos necesarios para calcular los parámetros de la función de transferencia Velocidad/V entrada. Además el usuario puede descargar los datos de forma que puede hacer un análisis minucioso de los mismos para obtener la función de transferencia de primer orden tal y como se vio en el epígrafe 5.4.2.2.

### 5.5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como conclusiones directas más importantes se pueden citar las siguientes:

- RECOLAB es una plataforma válida para realizar tareas de simulación y control en tiempo real a través de Internet.
- El empleo de la plataforma Matlab/Simulink permite la evolución de RECOLAB ya que permite de una forma sencilla añadir nuevos esquemas de control y funcionalidades (aparte de ser una plataforma ampliamente utilizada el entorno científico y académico).
- RECOLAB permite al alumno realizar las prácticas en teoría de control sobre sistemas remotos. Esto conlleva, por una parte, la posibilidad de experimentar sobre una plataforma real aplicando los métodos desarrollados en teoría, y por otra, la descongestión de los laboratorios ya que permite aprovechar mejor estos recursos (el alumno puede acceder a los sistemas en cualquier momento y desde cualquier lugar con conexión a Internet).

Por otra parte, es necesario estudiar el uso del sistema por parte de los alumnos a fin de establecer conclusiones prácticas y plantear nuevos enfoques.

#### *Utilización del sistema*

RECOLAB se utiliza como plataforma en pruebas desde el año 2003, pero fue en el curso académico 2005 – 2006 cuando la aplicación se comenzó a utilizar de forma continuada para la realización de prácticas de asignaturas de ingeniería de control, en concreto fueron 4 las asignaturas cuyos alumnos podían acceder a RECOLAB. En este año, RECOLAB registró un alto número de accesos en la modalidad de simulación, pero lo más importante es que también se registró un alto número de accesos en la modalidad de ejecución en tiempo real. Fue esta posibilidad junto con la transmisión del vídeo en tiempo real del experimento a realizar lo que motivó principalmente a los alumnos para utilizar el sistema.

Durante el año 2005 – 2006, RECOLAB tenía 172 estudiantes que potencialmente podían utilizar el sistema. El 59% de ellos accedieron y utilizaron el sistema para repetir de forma remota las sesiones de prácticas que ya habían realizado. Durante el año académico 2006 – 2007, fueron 183 los estudiantes que podían utilizar el sistema y el 74% accedieron al mismo para repetir alguna sesión práctica, por lo que hubo un incremento considerable de utilización respecto al curso académico anterior. Durante el curso 2007 – 2008 la cantidad de alumnos de las cuatro asignaturas que utilizaron el sistema para realizar prácticas aumentó a 195, obteniendo un porcentaje de participación del 91%. Finalmente, en el curso 2008 – 2009, de los 173 alumnos

matriculados, 170 realizaron experimentos de forma remota a través de Internet. En la figura 5.61 se muestra gráficamente la cantidad de alumnos que utilizaron esta herramienta para la realización de sus prácticas.

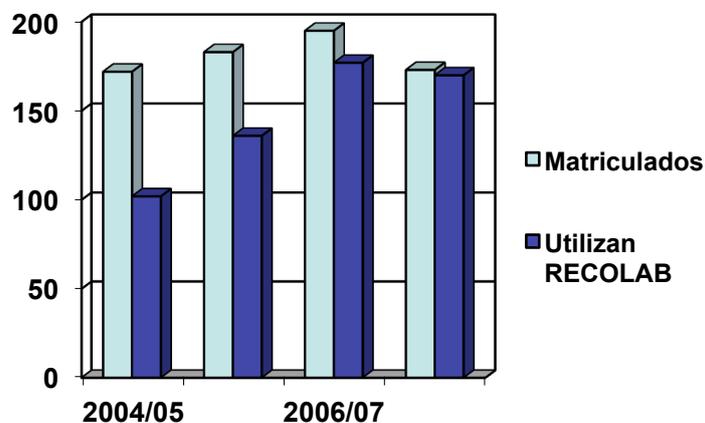


Figura 5.61. Alumnos matriculados y alumnos que utilizan RECOLAB.

La media de número de accesos por estudiante fue de 5.3, lo cual significa que los alumnos prefieren realizar su trabajo dividido en varias sesiones. La media del tiempo de conexión por sesión fue de 35 minutos. Este comportamiento es similar a años académicos anteriores. En la figura 5.62 se muestra el número de accesos por estudiante así como el tiempo de duración de la sesión durante el año académico 2008 – 2009.

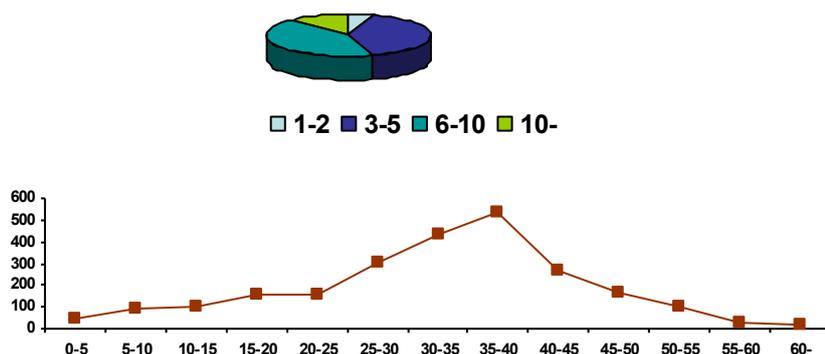


Figura 5.62. Numero de accesos por estudiante y tiempo de conexión por sesión durante el año 2008 – 2009.

## 5. HERRAMIENTAS REMOTAS

Estos datos revelan que los alumnos emplean RECOLAB ya que entre otras cosas les aporta flexibilidad a la hora de realizar las prácticas pertinentes (ubicación, horario, etc.)

Por último, se han realizado varias encuestas para valorar la herramienta desarrollada. En estas encuesta han participado un total de 694 estudiantes del Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales de la UMH. Los resultados de estas encuesta se muestran en la tabla 5.1.

| Pregunta   | Muy desacuerdo | En desacuerdo | Parcialmente de acuerdo | De acuerdo | Completamente de acuerdo |
|--|----------------|---------------|-------------------------|------------|--------------------------|
| a. ¿Fueron los procedimientos de aprendizaje claramente definidos?                             | 0%             | 0%            | 10%                     | 23%        | 67%                      |
| b. ¿Es sencillo el uso del sistema?  | 0%             | 0%            | 5%                      | 18%        | 77%                      |
| c. ¿Es suficiente la ayuda del sistema?  | 0%             | 0%            | 0%                      | 12%        | 88%                      |
| d. ¿Permite el uso del sistema comprender mejor la teoría mediante la experimentación?         | 0%             | 0%            | 0%                      | 10%        | 90%                      |
| e. En tu opinion, ¿mejora esta herramienta el nivel de conocimientos de ingeniería de control? | 0%             | 0%            | 2%                      | 15%        | 83%                      |
| f. Globalmente ¿valores positivamente esta herramienta?  | 0%             | 0%            | 1%                      | 14%        | 85%                      |

Tabla 5.1: Resultados de las encuestas a los alumnos

A la vista de los resultados, queda patente que la herramienta ha sido acogida de forma muy positiva. Sin embargo, hay algunos aspectos que deberían ser mejorados:

- Los estudiantes solicitan más sistemas físicos donde poder realizar más experimentos y probar otras estrategias de control.
- Algunas veces, el tiempo de espera debido a que el sistema físico está ocupado puede ser bastante elevado.

### *Trabajos futuros*

RECOLAB es un sistema en continua evolución, debido en parte a la facilidad que presta su diseño a añadir nuevos sistemas y nuevas estrategias de control. Así, los trabajos y modificaciones futuras pueden ser numerosos. Se enumeran a continuación los más importantes:

- Añadir nuevos sistemas físicos.
- Añadir nuevas estrategias de control tales como Control Óptimo, Control Predictivo y Control Multifrecuencia entre otros.

- Replicar alguno de los sistemas existentes para evitar o reducir la espera para las ejecuciones en tiempo real.
- Mejorar la compresión de vídeo para una realimentación más fluida.
- Incrementar el número de prácticas que pueden hacer uso de RECOLAB y ampliar los tutoriales y material sobre ingeniería de control.
- Habilitar un foro o medio de comunicación para que los alumnos puedan interactuar entre ellos y resolver las posibles dudas acerca de RECOLAB.

### *Estado actual de RECOLAB*

El sistema RECOLAB [WREC] sigue estando disponible en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales. Si bien, su utilización ha disminuido ya que actualmente se utiliza la red AutomatL@bs [WAUTO]. Parte del desarrollo de RECOLAB se ha utilizado en la red AutomatL@bs para el control del servomotor de corriente continua.

### **¿Qué es AutomatL@bs?**

Como ya se comentó en el capítulo 3, AutomatL@bs es una red de laboratorios virtuales/remotos para la enseñanza de la automática que se constituye mediante la integración de los recursos que aportan los grupos que participan en el proyecto. Proporciona un sistema de reserva de tiempos para la realización de los experimentos y un entorno de trabajo común que facilita su aprendizaje por parte del alumno. La red de laboratorios remotos en automática Automat@Labs es algo más que la suma de las partes que la constituyen ya que debe ser percibida por sus usuarios como un laboratorio con una estructura uniforme independientemente de donde se encuentre la localización física de las plantas. Todo lo que necesitará el alumno para conectarse a Automat@Labs es un navegador y estar dado de alta para la realización de las prácticas. Automat@Labs no es pues la simple yuxtaposición de los laboratorios remotos que cada institución participante pone a disposición de los integrantes de la red. Todos los laboratorios comparten un mismo esquema de trabajo y los materiales que se proporcionan a los alumnos se han cuidado de forma tal que el desarrollo de las prácticas se pueda hacer de manera autónoma. El proyecto Automat@Labs está coordinado por el Prof. Sebastián Dormido Bencomo del Departamento de Informática y Automática de la UNED.

En el grupo AutomatL@bs participan grupos del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de las siguientes universidades españolas: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Universidad de Almería, Universidad de Alicante, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Politécnica de Cataluña, **Universidad Miguel Hernández** y Universidad de León. La iniciativa de este proyecto se remonta al año 2000 cuando en la Universidad Politécnica de Valencia se organizaron las I Jornadas de

Trabajo sobre "Enseñanza vía Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática" (EIWISA00) y donde todos estos grupos de trabajo participaron y se plantearon el objetivo a largo plazo de diseñar y construir un laboratorio remoto de Automática mediante compartición de recursos provenientes de cada Universidad. Estas Jornadas tuvieron su continuación en EIWISA01 (UNED, Madrid), EIWISA02 (Alicante), EIWISA05 (Granada) y EIWISA07 (Zaragoza) estas dos últimas dentro del marco del Congreso Español de Informática (CEDI). AutomatL@bs es también una iniciativa del Grupo de Educación en Automática [WCEAE] del Comité Español de Automática-CEA.

La participación de la UMH la realizan miembros del Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales, y su aportación es el control del servomotor dentro de la red AutomatL@bs.

# 6. TÉCNICAS COOPERATIVAS PARA LA EXPERIMENTACIÓN EN CONTROL AUTOMÁTICO

En este capítulo se describen técnicas cooperativas aplicadas a la docencia de asignaturas de control automático. En la aplicación de estas técnicas se han usado, en parte, las herramientas expuestas en los capítulos anteriores. La estructura del capítulo es la siguiente. En la sección 6.1 se describen las metodologías docentes que el autor de la tesis utiliza habitualmente en su trabajo, con el objetivo de contextualizar las nuevas metodologías cooperativas/competitivas con las que se ha experimentado. En la sección 6.2 se expone detalladamente en qué consisten estas metodologías novedosas utilizadas. Por último, en la sección 6.3 se describe la aplicación en las sesiones teóricas y, especialmente, en las de laboratorio, de las técnicas propuestas en asignaturas relacionadas con el control automático: Sistemas electrónicos y automáticos; teoría de circuitos y sistemas; y control avanzado de sistemas.

## 6.1. INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DOCENTES

Esta sección está dedicada a la descripción de las metodologías docentes que suelen usarse en las asignaturas de ingeniería en general y, en particular, en las del área de Control Automático para justificar, en la sección siguiente, las técnicas cooperativas/competitivas con las que se ha experimentado en el trabajo de la tesis. Las metodologías explicadas aquí son las que ha utilizado el autor en su actividad docente en los últimos años, que han sido complementadas con las técnicas cooperativas/competitivas expuestas en la sección 6.2. Además, también se presentan las nuevas herramientas docentes Web 2.0, que la Universidad Miguel Hernández está poniendo en marcha desde el curso académico 2008-2009. Una parte importante del

trabajo de investigación que aquí se describe se ha desarrollado bajo el marco de las propuestas de innovación docente promovidas por la Universidad Miguel Hernández. En el anexo B de esta tesis se detallan los tres proyectos de innovación docente bajo cuyo contexto se han realizado parte de las experiencias metodológicas aquí descritas.

### 6.1.1. INTRODUCCIÓN

---

La *metodología docente* comprende las distintas posibilidades o métodos docentes que tradicionalmente se utilizan para realizar la tarea educativa. Los principales métodos docentes que suelen utilizarse en las aulas universitarias son los siguientes [GDUMH07]:

#### **Actividades dirigidas:**

- **Lección magistral:** exposición por parte del profesor de un tema o parte de un tema en un aula, ayudado de pizarra y de medios audiovisuales.
- **Clases de resolución de problemas:** explicación y análisis en común en el aula de problemas propuestos por el profesor.
- **Prácticas de laboratorio:** trabajo personal o en grupo en el laboratorio, dirigido por el profesor.

#### **Actividades autónomas:**

- Realización personal de tareas por parte del alumno, que incluyen la preparación y estudios del resto de actividades y la realización de exámenes.

#### **Actividades compartidas**

- **Seminarios y talleres:** exposición de un tema concreto a un grupo de alumnos, normalmente referente a temas específicos, técnicos o tangenciales del temario. También se incluyen en la categoría de seminarios los dedicados a la supervisión de problemas propuestos.
- **Tutoría:** entrevista personal con un alumno para resolver las dudas que le ha planteado el estudio y para evaluar su marcha en clase.
- **Realización de proyectos:** trabajo personal de un alumno sobre un tema o actividad propuesto y supervisado por el profesor.
- **Enseñanza de laboratorio:** también llamadas clases de laboratorio, se entienden como la enseñanza de los distintos procedimientos y habilidades necesarias en el laboratorio de una determinada materia. Se pueden incluir en la programación como seminarios de laboratorio.

- **Actividades cooperativas:** también denominadas actividades de trabajo en grupo y que consiste en organizar a los alumnos en grupos de trabajo para la realización de trabajos y la resolución de problemas.

No existe una elección única de la metodología para un determinado curso, sino que se suelen combinar diversos tipos de actividades. Más allá de la habitual distinción entre teoría, problemas y prácticas, dentro de cada uno de estos ámbitos se pueden emplear varios métodos de enseñanza, dependiendo de las necesidades del grupo, de los objetivos a cubrir y de la evolución del temario. A continuación, se describirán cada una de las actividades, comentando los aspectos más significativos de cada una de ellas.

### 6.1.2. ACTIVIDADES DIRIGIDAS

---

#### *Lección magistral*

Si nuestro deseo es hacer hincapié en la transmisión de contenidos, el método usual es la *lección magistral*. A pesar de las críticas que se hacen a una clase magistral tradicional (unidireccional, aburrida, poco estructurada,...), existen características propias que hacen de ella un buen vehículo de formación del alumnado: es uniforme, en el sentido que todo el grupo sigue las mismas directrices; se puede hacer participativa, al menos como recurso para captar la atención del grupo; y se puede interrumpir en cualquier momento del discurso.

Aunque la lección magistral suele ser la forma de presentación de la materia más usada a lo largo del curso, hay que tener en cuenta que todos los temas no pueden plantearse de la misma manera. Además, en las clases de teoría no se empleará una mera técnica expositiva por parte del profesor. La monotonía que aparece en ciertos momentos se puede evitar haciendo uso de recursos tales como debates o interrogatorios, en función del número de alumnos, dificultad del tema o interés del mismo. Es habitual alternar las distintas técnicas didácticas y la utilización, si es necesario, de distintos medios didácticos (pizarra, transparencias u otros medios audiovisuales, etc.), en pos de una mejor presentación de los contenidos.

Sobre los recursos visuales que suelen emplearse en las clases, el uso de los proyectores de transparencias merece algunos comentarios. La disponibilidad de estos proyectores o de otros dispositivos de proyección audiovisual permite hacer la clase más amena y ordenada. Su uso ha supuesto una gran ayuda en dos aspectos muy concretos: por una parte, para esquematizar el tema, de modo que el alumno sepa en cada momento en qué punto se encuentra, y por otra, para poner fotografías y dibujos que serían difícilmente reproducibles en la pizarra. La experiencia nos dice, sin embargo, que el abuso de las transparencias y otro material gráfico puede resultar

perjudicial en algunos casos, ya que la cantidad de información que se es capaz de transmitir es muy superior a la de una clase tradicional sobre la pizarra. En este sentido, es recomendable complementar el uso que hacemos de estas herramientas con cálculos y explicaciones sobre la pizarra.

Otro aspecto especialmente importante es el de la relación profesor-alumno. Cada clase es un proceso de comunicación en el que el profesor y el alumno deben compartir un código común. Es obvio que el sistema de pensamiento del profesor es distinto al del alumno, pero justo por su condición de profesor deberá ser el que se adapte a las condiciones del grupo de alumnos. Además, el alumno debe participar activamente en el planteamiento y desarrollo del tema. Por participación activa se entiende no sólo la actividad que hace uso de la palabra y pregunta, sino también de aquél que escucha atentamente y asimila. Para evitar actitudes pasivas entre los alumnos, se permitirá y fomentará que éstos interrumpan, en cualquier momento, la explicación del tema para aclarar cualquier duda que haya podido suscitarse. Debe quedar bien claro, desde el comienzo del curso, que es absurda la actitud, a veces generalizada entre los estudiantes, de inhibición ante la posibilidad de suspender momentáneamente la exposición, para hacer las aclaraciones que sean precisas. En muchos casos la pregunta del alumno no es únicamente una interrogación personal, sino el reflejo de un estado generalizado de falta de comprensión. Es más, cuando no se provocan preguntas por parte de los alumnos, sobre todo ante temas particularmente difíciles, es conveniente tomar el pulso de la clase efectuando preguntas, a fin de contrastar hasta qué punto han sido asimilados los conceptos expuestos. Es una parte de ese lazo de realimentación correctora que todo método de enseñanza debe introducir.

### *Clases de problemas*

El objetivo de la *clase de problemas* consiste en ayudar al alumno a fijar y asimilar las materias expuestas en las clases teóricas. A través de la realización de problemas los alumnos adquieren la fluidez necesaria en el uso de conocimientos, las relaciones y los métodos que se han expuesto en las clases de teoría. Su eficacia, por tanto, dependerá de la relación que guarden con las clases teóricas. Los problemas, por tanto, representan un complemento ideal de las clases expositivas, ya que permiten al estudiante comprobar el grado de asimilación de la teoría y le proporcionan a la vez un estímulo para su estudio.

La capacidad de resolver problemas supone seguridad en el conocimiento adquirido, destreza en el cálculo, flexibilidad en el pensamiento, capacidad de abstracción y, con alguna frecuencia, originalidad; cualidades que presentan desigual nivel en los

estudiantes y no se adquieren fácilmente. Es por ello evidente que las clases de problemas no solamente se deben reducir a la solución de un compendio de problemas tipo. La resolución de problemas parecidos a los que aparecen en el mundo real posee un gran valor didáctico, y facilita la consecución de los objetivos marcados en la asignatura.

### *Clases y prácticas de laboratorio*

Las *clases de laboratorio* y la *realización de prácticas* discurren siempre parejas pero son de naturaleza distinta. Una clase de laboratorio está dedicada a la explicación práctica de conceptos y procedimientos experimentales. La realización de prácticas consiste en el desarrollo de tareas prediseñadas basándose en un guión previamente distribuido. En las prácticas del laboratorio de señal empleamos habitualmente un procedimiento mixto: iniciamos las sesiones con una descripción conjunta de la práctica y de los procedimientos e instrumentos empleados, para luego dejar a los alumnos que realicen los montajes y medidas correspondientes. Las prácticas de aula de informática siguen este mismo esquema, pero están más dirigidas. Se trabaja en grupo en un conjunto de actividades ilustrativas, para en la parte final de la clase realizar individualmente algunos ejercicios.

Las clases prácticas son un buen ejemplo de adquisición de valores. Existen procedimientos que no pueden ser realizados individualmente, de modo que las actitudes de división del trabajo, discusión participativa y unión para un objetivo común, son las que se ponen en juego en un grupo de trabajo de prácticas. Estas actitudes se ven favorecidas con preguntas al final de las prácticas, que obliguen a una discusión detallada de la actividad realizada o una elaboración posterior de los resultados. Finalmente, el laboratorio es el lugar ideal donde se puede obligar a los alumnos a manejar documentación técnica. Dicha información puede estar presente en los laboratorios como manuales de consulta, o distribuida en tabloneros, pósteres, o en el propio guión.

### 6.1.3. ACTIVIDADES AUTÓNOMAS

---

El *aprendizaje autónomo* de los alumnos debe servir de base a su crecimiento tanto en conocimientos como en el ámbito de maduración personal. A este respecto debemos recalcar que creemos que la formación de buenos profesionales debe pasar por una época de estudio personal. Estas actividades se deben complementar con reuniones entre alumnos para preparar, por ejemplo, problemas de examen, informes de

prácticas o incluso tutorías conjuntas a grupos reducidos. En cualquier caso parece obvio que es difícil encontrar métodos directos para fomentar que un alumno realice trabajo por sí mismo. Sin embargo, esta vertiente de trabajo personal, especialmente su medida y adecuación, tomará importancia en un futuro próximo, toda vez que las directrices emanadas del espacio europeo de enseñanza superior requieren que esta componente del aprendizaje sea tenida en cuenta en el cómputo de créditos.

### 6.1.4. ACTIVIDADES COMPARTIDAS

---

#### *Seminarios y talleres*

Por seminarios entendemos, de modo genérico, la realización de actividades dirigidas donde el alumno pone en práctica los conocimientos adquiridos. Si estas actividades están orientadas a la adquisición de una cierta habilidad práctica concreta, se denominan talleres. Por su definición, existe diversidad de formas de seminarios. En primer lugar, los talleres y otras clases demostrativas permiten mostrar a los alumnos el funcionamiento y manejo de ciertos aparatos, sistemas reales no disponibles en los laboratorios docentes, o programas informáticos, relacionados con la asignatura que se imparte. Los seminarios de introducción a un determinado tipo de laboratorio, donde se enseña y practica la instrumentación y procedimientos básicos, pertenecen a esta categoría.

#### *Tutorías*

Con respecto a las *tutorías*, éstas constituyen una pieza clave en la educación del alumno, pues es donde se puede concretar más fácilmente la individualización del aprendizaje. Representan la continuación natural de las clases de teoría y de problemas, y de las prácticas y clases de laboratorio. En concreto, las tutorías deben servir para las siguientes funciones:

- Resolver dudas y dificultades encontradas por los alumnos. Aunque la mayoría de dudas y consultas de procedimiento se intentan resolver en la misma clase, en aquellos casos en los que la explicación requiere un tiempo importante se invita a los estudiantes a acudir a la tutoría.
- Profundizar y ampliar conocimientos.
- Motivar hacia la asignatura.
- Orientar profesionalmente y en la asignatura.

- La atención personalizada a los problemas que surjan a los estudiantes relacionados con la asignatura: estrategias de aprendizaje, realización de trabajos, problemas de asistencia, ...
- Supervisar los proyectos personales, esto es, la revisión de guiones que deben orientar la realización de trabajos: exposiciones orales, debates, diseño de materiales, ... Esta actividad, en la que el profesor enriquece y reorienta los guiones que presentan los estudiantes, sugiere fuentes documentales, propone nuevas perspectivas, etc., resulta especialmente productiva cuando no ha sido impuesta y se realiza a petición de los alumnos.
- La revisión de los trabajos que hayan realizado los estudiantes.

Las tutorías sirven también, como parte de la realimentación, para que el profesor conozca el perfil del alumnado al que debe enseñar, información fundamental a la hora de ajustar el contenido del curso a las características particulares de los alumnos.

La utilización de las tutorías debe servir básicamente para resolver dudas de concepto, cuestiones sobre algún desarrollo o razonamiento que no le haya quedado claro al alumno en alguna clase de teoría, y también dudas concretas sobre la resolución de algún problema. En este último caso, el profesor debe esforzarse por situarse al mismo nivel que el alumno; para descubrir hasta dónde ha conseguido llegar éste en la solución del problema, averiguar por qué no ha sido capaz de continuar y ayudarle a entender cómo solucionar el problema por completo. En ningún caso deben convertirse las tutorías en una clase particular; de la que obtengan provecho además los alumnos que no asisten regularmente a clase.

Actualmente, aprovechando que todos los estudiantes disponen de una dirección de correo electrónico (que reciben al matricularse), las tutorías presenciales pueden complementarse con tutorías por correo electrónico, ampliando las oportunidades de asesoramiento, sobre todo en temas puntuales y urgentes. El uso de la tutoría electrónica en los cursos presenciales se reserva al tratamiento de situaciones que no puedan esperar a la siguiente reunión presencial en los horarios habituales de clase o tutoría.

Un valor añadido que generan las tutorías es que ayudan a comprobar la eficacia de las estrategias de enseñanza que están siendo utilizadas, ya que proporcionan información para decidir posibles ajustes en la metodología empleada y en la futura actuación. Por ejemplo, si una determinada duda va repitiéndose en distintos alumnos, a los que por otra parte se les aprecia un buen nivel general, ello es indicio de que el tratamiento de este punto en concreto no ha sido del todo adecuado. De acuerdo con la experiencia, esta fuente de realimentación es una de las más importantes a lo largo del curso.

### *Realización de proyectos o trabajos tutorizados*

Los trabajos tutorizados son trabajos guiados y supervisados por el profesor, dentro del ámbito de las asignaturas o de la titulación. También son trabajos de esta índole los Proyectos Fin de Carrera. Estos trabajos tutorizados, tanto si son individuales o en pequeños grupos, proporcionan una asimilación de los temas trabajados. De un modo general desarrollan destrezas como el autoaprendizaje, maduración personal, y en el caso de grupos, se fomenta la cooperación y cohesión de sus miembros y el trabajo en grupo.

Para la realización de estos trabajos se puede dividir al grupo total de alumnos en pequeños grupos de dos o tres alumnos, a los que se asigna un tema propuesto por el profesor, o propuesto por los propios alumnos, con el visto bueno del profesor. Estos trabajos son tutorizados por el profesor, que proporciona a los alumnos información inicial sobre dónde documentarse. Este tipo de trabajos son fundamentalmente trabajos de documentación, de búsqueda, selección y estructuración de la información. Al final de los mismos cada grupo realiza una pequeña exposición oral de los mismos, ejercitándose en presentaciones en público y desarrollando sus dotes expresivas y comunicativas, y compartiendo la experiencia y conocimientos adquiridos con el resto de compañeros. El profesor, presente en las exposiciones, podrá realizar alguna valoración en el momento y reflejarla en la calificación final.

En la Universidad Miguel Hernández se practica otra modalidad de trabajos tutorizados, denominados prácticas internas. Éstos no están asociados a asignaturas concretas, sino a temas relacionados con la titulación, que pueden coincidir con temas específicos de las asignaturas. Mediante estos trabajos, que son previamente acordados con el Observatorio Ocupacional de la Universidad, los alumnos realizan prácticas en empresas o trabajos tutorizados por el profesor, que son reconocidos como créditos de libre elección. En el caso de empresas, el papel del profesor es supervisar los trabajos más que dirigirlos. Cuando estas prácticas se realizan dentro de la propia Universidad, pueden consistir, por ejemplo, en preparación de prácticas o material docente, monitorización de prácticas de laboratorio para alumnos de cursos inferiores, participación en algún tema de investigación del Departamento, etc. En este caso, la dirección del proyecto la realiza el profesor.

La otra modalidad de trabajo tutorizado es el Proyecto Fin de Carrera (PFC). Estos trabajos suponen la relación muy útil entre profesor y alumno a lo largo de la carrera. En la Universidad los PFC se realizan durante los últimos meses de la carrera, o los meses que siguen al aprobado de la última asignatura. El beneficio principal radica en tener que enfrentarse a un proyecto autocontenido, del que el alumno es responsable.

El director orienta al alumno durante su realización, pero procurando tome iniciativas, extraiga conclusiones, aporte ideas, etc.

La finalidad de un PFC es la formación del alumno, no el proyecto en sí. Se pueden desarrollar tres tipos de proyecto o trabajos fin de carrera:

- *Proyectos de ingeniería.* Son proyectos idénticos en estructura a un proyecto que típicamente podría ser firmado por un ingeniero y visado por el Colegio Profesional, conteniendo memoria, planos, pliego de condiciones y presupuesto. Por ejemplo, un proyecto de ICT (Infraestructura Común para Telecomunicaciones).
- *Trabajos fin de carrera.* Son trabajos de recopilación de bibliografía y resúmenes o tutoriales sobre algún tema particular relacionado con la titulación, o análisis profundo de algún sistema real.
- *Proyectos de desarrollo o investigación.* Son proyectos en los que se lleva a cabo una pequeña investigación sobre un tema concreto, el desarrollo de algún sistema o instrumento o un análisis o estudio de viabilidad.

### 6.2. APRENDIZAJE COOPERATIVO

El *aprendizaje cooperativo* es un enfoque de enseñanza en el cual se procura utilizar al máximo actividades en las cuales es necesaria la ayuda entre estudiantes, ya sea en pares o grupos pequeños, dentro de un contexto enseñanza-aprendizaje. El aprendizaje cooperativo se basa en que cada estudiante intenta mejorar su aprendizaje y resultados, pero también los de sus compañeros.

El aprendizaje en este enfoque depende del intercambio de información entre los estudiantes, los cuales están motivados tanto para lograr su propio aprendizaje como para acrecentar el nivel de logro de los demás. Uno de los precursores de este nuevo modelo educativo es el pedagogo norteamericano John Dewey [DEW95], [DEW08], quien promovía la importancia de construir conocimientos dentro del aula a partir de la interacción y la ayuda entre pares en forma sistemática.

Los métodos tradicionales de enseñanza presentan dos problemas graves: en primer lugar, no consiguen la motivación de los alumnos de hoy en día; y en segundo lugar, no permiten que los alumnos desarrollen algunas de las competencias que son necesarias en la actualidad. En cuanto al primer problema, la falta de motivación, se trata de una situación que ha alcanzado ya a la enseñanza superior, y a todo tipo de titulaciones

(titulaciones técnicas incluidas), por lo que urge cambiar las metodologías que utilizamos en las universidades. Si continuamos utilizando enseñanza tradicional, el porcentaje de alumnos que no presta atención y que no muestra interés por la asignatura aumentará año tras año. En cuanto al segundo problema, la necesidad de nuevas competencias, cabe destacar la capacidad de trabajo en grupo como una de las más requeridas por los empleadores de hoy en día. Por lo tanto, será necesario introducir técnicas que potencien esta capacidad.

Una de las estrategias que mejores resultados ofrece para resolver ambos problemas es el aprendizaje cooperativo. Este aprendizaje es particularmente adecuado para los alumnos que hoy en día se encuentran realizando sus estudios universitarios, y que pertenecen a lo que se ha dado en denominar “generación Y” o “generación del milenio” (*millennials*). Entre las características de estos alumnos destaca su gran fidelidad a los compañeros y por tanto un incremento de la motivación por trabajar si de su trabajo dependen los compañeros [WIL08]. Esto hace particularmente apropiado para ellos el aprendizaje cooperativo.

De manera sencilla, se puede definir el aprendizaje cooperativo como el empleo didáctico de grupos reducidos en los que los alumnos trabajan juntos para maximizar su propio aprendizaje y el de los demás. Todo esto es mediante una estrategia que promueve la colaboración entre ellos, para así lograr un ambiente más armónico y cómodo a la hora de elaborar el objetivo o meta deseado. Fundamentalmente, se basa en la interacción entre alumnos diversos, que en grupos de 4 a 6, cooperan en el aprendizaje de una asignatura. Este aprendizaje cuenta con la ayuda del profesor, que dirige este proceso supervisándolo [GIL08], [JOH06].

Se trata, pues, de un concepto del aprendizaje no competitivo ni individualista como lo es el método tradicional, sino un mecanismo colaborador que pretende desarrollar hábitos de trabajo o competencias en equipo, la solidaridad entre compañeros, y que los alumnos intervengan autónomamente en su proceso de aprendizaje.

En contraposición, en el *aprendizaje competitivo* cada alumno trabaja “en contra” de los demás para alcanzar objetivos escolares determinados. En el trabajo presentado en esta tesis hemos pretendido combinar ambas técnicas (aparentemente opuestas) en el aula para mejorar la calidad de la docencia, motivar al alumnado y desarrollar más competencias en él, además de, evidentemente, desarrollar los contenidos de las asignaturas.

Con el uso de la metodología cooperativa queremos fomentar entre los alumnos el hábito del *trabajo en equipo*, mientras que con la competitividad entre estos grupos

cooperativos de trabajo pretendemos incrementar el nivel de los trabajos y las tareas que realizan los estudiantes.

El principio del trabajo en equipo es desempeñar un trabajo individual bajo un fin común. Es una actitud de servicio con el espíritu del grupo para un fin común exterior al equipo. Todos los miembros del equipo aceptan otorgar parte de su libertad e intereses individuales hacia un objetivo común, sabiendo que es la mejor forma de conseguir lo propuesto, respetando al máximo la dignidad de las personas. La riqueza y el valor añadido de esta forma de trabajo, nos viene dada por la diversidad de lo que uno es y aporta. Todas las personas en principio tienen el mismo valor. El jefe no es el único importante del equipo sino el líder, el organizador.

El trabajo en equipo sólo funciona si todos los miembros del equipo tienen unos objetivos comunes. Los alumnos universitarios comparten el mismo objetivo: *aprender los contenidos de la asignatura y superar, por tanto, su evaluación*. Es por ello, que el trabajo en equipo es idóneo para la motivación y consecución de tareas en la docencia universitaria.

A continuación, se enumeran los aspectos esenciales del trabajo en equipo, que configuran la base del método docente basado en el aprendizaje cooperativo [GIL08],[JOH06]:

- *Objetivos*
- *Brainstorming o tormenta de ideas*
- *Comunicación entre los miembros del equipo*
- *Expectativas de grupo*
- *Resolución de conflictos*
- *Resolución de problemas*

### **Objetivos**

Los objetivos del grupo son muy importantes porque hacen que el grupo concentre sus esfuerzos y son una buena fuente de motivación. Hacen que cada miembro tenga un sitio en el grupo, y ayudan a que el grupo satisfaga las necesidades de sus miembros. También ayudan a verificar que el grupo está funcionando de forma eficaz.

Los buenos objetivos son:

- *Específicos:*

Los objetivos específicos describen necesidades y deseos concretos y concisos, y no son vagas generalizaciones sobre el proyecto.

- *Percibidos como retos:*

Los objetivos que se perciben como retos inspiran a los miembros del grupo para trabajar más duro, porque son más complejos y requieren un mayor nivel de compromiso.

- *Alcanzables:*

Los objetivos realistas y alcanzables imprimen un sentimiento de logro y confianza en los miembros del grupo, porque los miembros pueden ver los resultados positivos de su trabajo.

Para establecer los objetivos del grupo, es recomendable realizar las siguientes acciones:

- Realizar una sesión de *brainstorming* para generar una lista de objetivos que el grupo considera importantes, como por ejemplo:
  - Obtener la máxima nota.
  - Establecer buenos lazos de amistad.
  - Pasarlos bien.
  - Aprender cómo trabajar en equipo.
  - Prepararse bien para el examen.
  - Impresionar al profesor.
- Pedir a cada miembro que ordene esos objetivos en función de la importancia personal que le otorga a cada uno de ellos.
- Agregar los resultados y discutir el orden resultante.
- Tomar la decisión y escribir cuáles son finalmente los objetivos del grupo.

### ***Brainstorming o tormenta de ideas***

*Brainstorming* (tormenta de ideas) es un método rápido y eficaz para generar ideas que pueden ser usadas para resolver los problemas más difíciles con los que se enfrenta un grupo. El *brainstorming* elimina el silencio, que muchas veces impera cuando un grupo está atascado, porque permite que cada miembro del grupo pueda exponer sus ideas y opiniones en un ambiente confortable y sin sentirse juzgado por los demás.

### *Comunicación entre los miembros del equipo*

La comunicación es una parte integral de la interacción humana. Desafortunadamente, puede ser un serio problema para el funcionamiento del grupo. Los malos entendidos entre los miembros pueden ser devastadores para la dinámica del grupo. Por ello, es importante ser consciente de cómo y qué es lo que comunicamos.

### *Expectativas de grupo*

En un grupo, cada miembro tiene sus propias expectativas. Si se dedica un tiempo a discutir esas expectativas y a establecer unas reglas de funcionamiento entonces todos los miembros tendrán claro qué actitudes y acciones son aceptables y cuáles no en el seno del grupo.

### *Conflictos*

Los conflictos son inevitables, y con frecuencia, penosos, pero son a la vez una parte esencial de la dinámica del grupo. Hay muchas situaciones que pueden causar un conflicto en el grupo. Esos conflictos pueden ser dañinos o útiles para el grupo, dependiendo de cómo se aborden.

Cuando surge un conflicto, muchos grupos tienden a ignorarlo. Pero si se ignora el conflicto lo único que se consigue es ir reduciendo lentamente la capacidad del grupo para comunicarse y trabajar de forma eficaz. Si el grupo opta por afrontar el conflicto entonces puede superar el problema y abrir nuevas vías de comunicación, en vez de cerrarlas.

### *Resolución de problemas*

Con frecuencia, los grupos encuentran un problema que, o bien ignoran, o bien resuelven de la primera forma que se les ocurre. Sin embargo, es importante que los grupos consideren en profundidad los problemas que encuentran, porque ignorarlos o resolverlos mal puede traer consecuencias graves. Hay varios métodos de resolución de problemas. Lo más importante es que el grupo se tome su tiempo para analizar el problema en el momento apropiado, y en profundidad.

Algunos métodos de resolución de problemas populares son [GIL08]:

- El método de los 7 pasos
- El método PMI
- El método SWOT

Resulta muy útil, que el profesor dé a conocer a los alumnos de su asignatura alguno de los métodos anteriores para que aprendan a enfrentarse a la resolución de problemas complejos.

Aquí describiremos, a modo de ejemplo, el método de los 7 pasos, por tratarse del más sencillo de implementar:

### **El método de los siete pasos.**

- 1** Definir el problema para que todos los implicados comprendan bien qué es lo que hay que resolver.
  
- 2** Desarrollar, o revisar, una lista de características que debe tener la solución ¿qué debería cumplir una solución satisfactoria? La respuesta a esta cuestión facilitará después la evaluación de las posibles soluciones.
  
- 3** Generar posibles ideas mediante la técnica del *brainstorming*. Este puede ser uno de los pasos más largos y difíciles. Los miembros del grupo deben ser tan creativos como sea posible en este paso.
  
- 4** Revisar las posibles soluciones y eliminar aquellas que no sean viables, o no reúnen las características que se establecieron en el paso 2. Si se eliminan todas las posibles soluciones, volver al paso 3.
  
- 5** Seleccionar una solución, o combinación de soluciones, y establecer un plan (que incluya un calendario) para llevar a cabo el plan. Si el plan es viable, adelante. Si no lo es, intentar otra solución.
  
- 6** Desarrollar la solución.
  
- 7** Evaluar el progreso de la solución, y realizar las alteraciones necesarias en el plan.

### 6.2.2 RECURSOS WEB 2.0 PARA LA DOCENCIA

---

En esta sección se van a describir las herramientas web disponibles en la universidad para el desarrollo del trabajo realizado en esta tesis en el campo del aprendizaje cooperativo y colaborativo. Desde sus inicios, la Universidad Miguel Hernández ha

publicado en su web oficial los planes de estudio de las titulaciones, los horarios de los cursos académicos, los programas detallados de la asignatura e información diversa relativa a los títulos oficiales. Sin embargo, desde hace aproximadamente unos tres cursos académicos, la Universidad Miguel Hernández ha dispuesto una serie de nuevos recursos web para cada una de la asignaturas que pueden utilizarse para mejorar el método docente. Las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 muestran un detalle del acceso a estas herramientas docentes desde la web de una asignatura.

Estos recursos proporcionados por la UMH consisten en páginas web donde el alumno, además de poder consultar el temario, los horarios y la bibliografía con acceso directo a la biblioteca (*Guía docente*), el profesor puede colocar anuncios y contactar con los alumnos mediante su cuenta de correo electrónico personal distribuido por la universidad (*herramientas Anuncios y Email, en Actividad Docente*). También es posible que el profesor suba material en formato electrónico para que los alumnos lo descarguen en su PC y sea utilizado posteriormente (*herramienta Material, en Actividad docente*). Este material suele ser un compendio de transparencias de las clases teóricas, boletines de problemas, guiones de prácticas de laboratorio, manuales de los equipos de laboratorio, exámenes de cursos pasados, software gratuito para la simulación y cualquier otro material digital útil para el desarrollo de la asignatura.

También están disponibles recursos que permiten la interacción directa entre el profesor y el alumno, como la herramienta de *Tareas*, que permite que los alumnos entreguen digitalmente trabajos o problemas y así el profesor los valúe desde la misma aplicación. De manera similar, la herramienta *Exámenes Online*, permite utilizar un repositorio de preguntas para elaborar exámenes test que los alumnos pueden realizar on-line.

Una novedad durante el curso académico 2009-2010 fue la introducción del recurso *Sitio colaborativo* (figura 6.4), que persigue potenciar los recursos web de forma dinámica, puesto que permite la compartición de documentos entre profesor y alumno, facilita la comunicación a través de una línea de debate o foro interno y permite la inclusión de documentación en formato *wiki*.

El recurso docente *Sitio colaborativo* se trata por tanto de una aplicación tipo Web 2.0, puesto que se fundamenta en la interacción que se logra a partir de diferentes aplicaciones web, que facilitan el compartir información, la interoperatividad, y la colaboración.



Figura 6.1. Recursos disponibles en la web de la asignatura: guía docente.



Figura 6.2. Recursos disponibles en la web de la asignatura: actividad docente.



Figura 6.3. Recursos disponibles en la web de la asignatura: gestión.

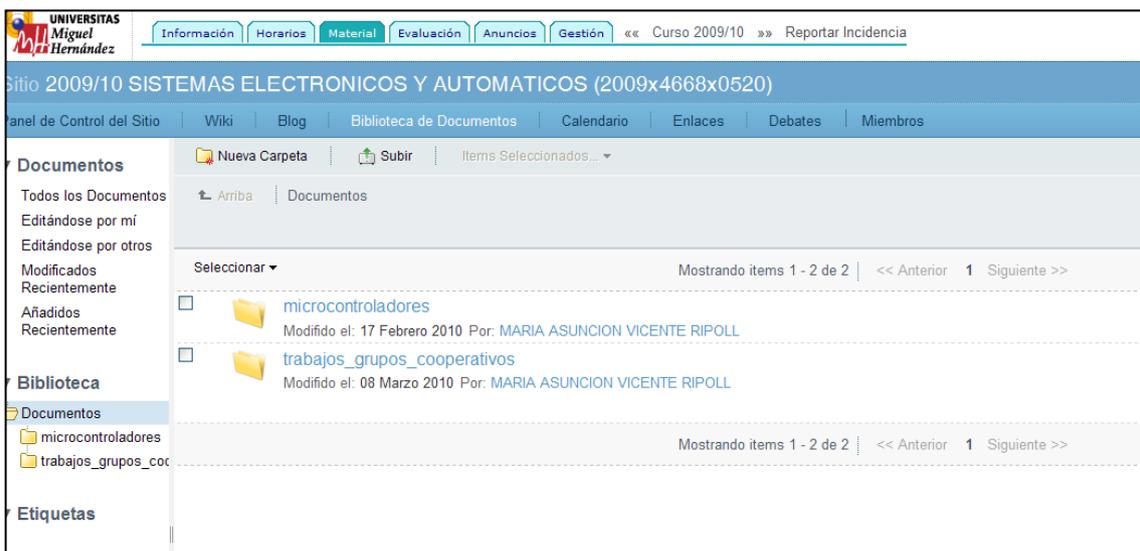


Figura 6.4. Sitio colaborativo de la asignatura *Sistemas Electrónicos y Automáticos*.

El concepto de Web 2.0 fue definido en 2005 por Tim O'Reilly [ORE105]. En general, cuando mencionamos el término Web 2.0 nos referimos a una serie de aplicaciones y páginas de Internet que utilizan la inteligencia colectiva para proporcionar servicios interactivos en red dando al usuario el control de sus datos.

Así, podemos entender por Web 2.0, como propuso Xavier Ribes en 2007 [RIB07], *"todas aquellas utilidades y servicios de Internet que se sustentan en una base de datos, la cual puede ser modificada por los usuarios del servicio, ya sea en su contenido (añadiendo, cambiando o borrando información o asociando datos a la información existente), bien en la forma de presentarlos o en contenido y forma simultáneamente"*.

La Web 2.0 es la representación de la evolución de las aplicaciones tradicionales hacia aplicaciones web enfocadas al usuario final. El Web 2.0 es una actitud y no precisamente una tecnología. Es la transición que se ha dado de aplicaciones tradicionales hacia aplicaciones que funcionan a través de la web y enfocadas al usuario final. Se trata de aplicaciones que generan colaboración y de servicios que reemplazan las aplicaciones de escritorio.

Actualmente la Universidad Miguel Hernández pretende potenciar el uso de la Web 2.0 para innovar la docencia en los títulos ofertados [WSID10]. Tiene en su plan estratégico como objetivo 1.9 el de desarrollar un proyecto de campus virtual, entre cuyas acciones asociadas se integran la elaboración de materiales docentes en red y la incentivación del profesorado para la elaboración de dichos materiales.

Es por ello que se incorporaron como líneas prioritarias en la Convocatoria de Ayudas a Acciones de Innovación Docente 2010, las relativas a la elaboración de materiales docentes en red, especialmente los destinados a los primeros cursos de las nuevas titulaciones del EEES a implantarse en el curso 2010-2011, y la utilización de recursos Web 2.0 como apoyo en la docencia presencial y para la docencia en red (figuras 6.5, 6.6).

En concreto, se pretende fomentar el uso de las herramientas web de Google: *Google Sites*, *Google Docs*, *Google Groups* y *Google Calendar* [WHG10] para la elaboración de materiales docentes en red.

UNIVERSITAS Miguel Hernández

# Innovación Docente UMH-2010

Mostrando 7 elementos

| Software        | Utilidad   | Disponibilidad                        |
|-----------------|--|---------------------------------------|
| Ordenar ▼       | Ordenar ▼  | Ordenar ▼                             |
| Adobe Captivate | Elaboración de materiales docentes multimedia                  | UAI                                   |
| Wink            | Simulación de software. Grabación                              | Freeware                              |
| Google Docs     | Almacenamiento y gestión de documentos                         | Gratuito hasta 1 Mb almacenamiento    |
| Google Calendar | Creación, compartición y publicación de calendarios de eventos | Gratuito                              |
| GMail           | Gestor de correo   | Gratuito hasta 7 MB de almacenamiento |
| Google Sites    | Sitios web personalizados                                      | Gratuito con dominio Google           |
| Google Grupos   | Comunicación e interacción web                                 | Gratuito con dominio Google           |

Mostrando 7 elementos

Figura 6.5. Site de Innovación Docente de la UMH [WSID10].

UNIVERSITAS Miguel Hernández **Innovación docente**

Enlaces Web2.0 Innovación en la UMH: Contacta

Buscar...

**Manuales sobre recursos Google**

En el siguiente documento os hemos recopilado varios enlaces a manuales interesantes sobre diferentes recursos de Google susceptibles de ser utilizados en docencia. Esperamos que los aproveches.

Inicio

Jueves, 15 de Abril de 2010 asun.mayoral Sin comentarios

**Resolución Convocatoria de Ayudas a Acciones de Innovación Docente UMH 2010**

La Comisión encargada de resolver la solicitudes de proyectos presentados en la Convocatoria de Ayudas a Acciones de Innovación Docente en la UMH 2010, constituida por:

- Vicerrector de Asuntos Económicos, Empleo y Relación con la Empresa
- Vicerrector de Estudiantes y Extensión Universitaria
- Vicerrector de Ordenación Académica y Estudios
- Vicerrectora Adjta de Ordenación Académica y Estudios para la Formación e Innovación
- Responsable de la Oficina de Gestión y Control de la Calidad
- Delegado General de Estudiantes,

ha resuelto apoyar una serie de acciones, detalladas en el Anexo 1, en los términos descritos en el Acta de Resolución.

Convocatorias innovación-docente, resolución

Miércoles, 17 de Marzo de 2010 asun.mayoral Sin comentarios

**Recursos Web2.0 en docencia: acceso a Google**

Este año el curso sobre "Recursos webs docentes de la UMH como apoyo a la enseñanza semipresencial y a distancia" lo vamos a centrar en recursos basados en la Web2.0, y en concreto en herramientas de Google. Para poder acceder a estos recursos de forma óptima durante la sesión del curso, es aconsejable que tengáis una cuenta de Gmail. Para aquellos que no la tengáis, os envío un enlace a un videotutorial que hemos preparado para que sepáis cómo hacérsola.

RSS

Buscar: [input] [Buscar]

**TEMAS**

- Inicio
- Jornadas y Congresos
- Convocatorias
- Recursos Docentes
  - Recursos UMH
  - Interacción Docente-Estudiante
  - Elaboración de Contenidos
  - Revistas de Innovación
- Formación
- Enlaces
  - Blogs
  - Universidades, Redes y Administración
  - Presentaciones multimedia
  - FAQ Preguntas Frecuentes

**Abril 2010**

| L  | M  | X  | J  | V  | S  | D  |
|----|----|----|----|----|----|----|
|    |    |    | 1  | 2  | 3  | 4  |
| 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |    |    |

Figura 6.6. Blog de Innovación Docente de la UMH [WBID10].

### 6.2.3. ACCIONES DE INNOVACION DOCENTE UMH

---

Con el objetivo de mejorar la calidad de la docencia, la Universidad Miguel Hernández convoca, desde hace 4 años, ayudas para realizar proyectos de Innovación Docente. La información sobre la última convocatoria se puede consultar en un blog específico de la UMH para innovación docente [WBID10].

El autor de esta tesis doctoral ha trabajado directamente en varias de estas acciones de innovación, en concreto, en las desarrolladas durante los cursos académicos 2008-2009, 2009-2010 y 2010-2011 y, por tanto, parte del trabajo de la tesis se ha desarrollado en el marco de estas acciones. Tanto los dos primeros proyectos de innovación docente ya finalizados, como la propuesta correspondiente al curso 2010-2011, en realización, incluyen experiencias a realizar sobre diversas asignaturas cuyo contenido es el Control Automático. En el anexo B de este documento se comentan los detalles de los proyectos de innovación desarrollados en cada uno de los cursos académicos.

Las asignaturas involucradas en estas acciones han sido las siguientes:

- Control avanzado de sistemas (CAS)
- Ingeniería de Control (IC)
- Modelado e Identificación de sistemas (MIS)
- Sistemas electrónicos y automáticos (SEA)
- Teoría de circuitos y sistemas (TCS)

Las asignaturas Control avanzado de sistemas (CAS), Modelado e Identificación de sistemas (MIS), Sistemas electrónicos y automáticos (SEA) y Teoría de circuitos y sistemas (TCS) se imparten actualmente en la titulación de Ingeniería Industrial (Plan 1997), mientras que la asignatura Ingeniería de Control (IC) forma parte del Master en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación.

La acción de innovación docente realizada durante el curso 2008-2009 se centró en aplicar técnicas de aprendizaje cooperativo-competitivo en las clases de teoría de las asignaturas. Se obtuvieron resultados muy positivos en cuanto a aumento de motivación de los alumnos, desarrollo de competencias de trabajo en grupo y mejora de los resultados obtenidos por los alumnos en los exámenes.

En el curso siguiente, curso 2009-2010, el proyecto docente realizado continuó trabajando sobre las técnicas de aprendizaje cooperativo y competitivo, y en esta ocasión se centró en aprovechar al máximo el potencial de las herramientas recientemente desarrolladas para el sitio web colaborativo de la UMH. Básicamente, se propusieron mecanismos que facilitasen la comunicación entre los alumnos que forman los grupos de trabajo y también la comunicación entre alumnos y profesor.

Adicionalmente, se utilizaron, de manera experimental, otras aplicaciones web 2.0 (las herramientas de Google [WHG10]) que previsiblemente empleará la UMH en cursos posteriores.

Actualmente, en el curso académico 2010-2011, se está llevando a cabo otra acción de innovación docente enmarcada en el mismo ámbito que las dos anteriores. En concreto, el uso de la metodología del aprendizaje cooperativo y las aplicaciones web 2.0, para mejorar los resultados de los estudiantes en algunas asignaturas de control automático.

En la sección 6.3 se detallan los resultados obtenidos en cada una de las asignaturas involucradas en las acciones de innovación docente ya finalizadas.

### 6.3. APLICACIÓN A LA DOCENCIA EN ASIGNATURAS DE CONTROL Y AFINES

#### 6.3.1. ASIGNATURA: SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y AUTOMÁTICOS

En este apartado se describe la propuesta de utilización de la metodología de aprendizaje cooperativo y los resultados obtenidos, desde el curso académico 2007-2008 hasta la actualidad, en las clases prácticas y teóricas de la asignatura *Sistemas Electrónicos y Automáticos*.

La asignatura *Sistemas electrónicos y automáticos (SEA)* es una asignatura troncal de 4º curso de Ingeniería Industrial. En la tabla 6.1. se muestra su distribución de créditos.

| SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y AUTOMÁTICOS |       |       |          |          |           |       |
|-------------------------------------|-------|-------|----------|----------|-----------|-------|
| Tipo                                | Ciclo | Curso | Duración | Créditos |           |       |
|                                     |       |       |          | Teóricos | Prácticos | Total |
| troncal                             | 2º    | 4º    | anual    | 6        | 4.5       | 10.5  |

Tabla 6.1. Distribución de créditos de S.E.A.

Se trata de una asignatura anual y posee tres partes conceptuales claramente diferenciadas, por lo que es posible realizar una separación de sus contenidos en tres bloques temáticos:

*Bloque 1: Instrumentación*

*Bloque 2: Sistemas de control en el espacio de estados*

*Bloque 3: Microcontroladores*

Los contenidos generales de cada uno de los bloques temáticos pueden estructurarse según una serie de temas que a continuación se señalan en las tablas 6.2, 6.3 y 6.4.

| Bloque 1: Instrumentación                              |
|--|
| Tema 1. Introducción a la instrumentación electrónica. |
| Tema 2. Sensores.                                      |
| Tema 3. Electrónica básica para instrumentación.       |
| Tema 4. Acondicionamiento de señal.                    |

Tabla 6.2. Temas del bloque temático *Instrumentación*.

| Bloque 2: Sistemas de Control en el Espacio de Estado   |
|---|
| Tema 1. Introducción a la teoría de sistemas  |
| Tema 2. Modelo de estado para sistemas continuos.   |
| Tema 3. Solución de la ecuación de estado para sistemas continuos.                            |
| Tema 4. Modelo de estado para sistemas discretos.   |
| Tema 5. Solución de la ecuación de estado para sistemas discretos.                            |
| Tema 6. Controlabilidad.  |
| Tema 7. Observabilidad.   |
| Tema 8. Diseño de sistemas de control mediante realimentación del estado. Ubicación de polos. |
| Tema 9. Diseño de observadores de estado.   |

Tabla 6.3. Temas del bloque temático *Sistemas de Control en el Espacio de Estado*.

| Bloque 3: Microcontroladores                                |
|---|
| Tema 1. Sistemas de numeración, operaciones y códigos.      |
| Tema 2. Introducción a los Microcontroladores.              |
| Tema 3. Microcontroladores Harvard: familia PIC. PIC16F84A. |
| Tema 4. Organización de la memoria.                         |
| Tema 5. Arquitectura interna.                               |
| Tema 6. Ensamblador.  |
| Tema 7. Programación elemental.                             |
| Tema 8. Saltos.   |
| Tema 9. Subrutinas.   |
| Tema 10. Otros conceptos de programación.                   |
| Tema 11. Temporizadores.                                    |
| Tema 12. Recursos especiales.                               |
| Tema 13. Interrupciones.                                    |

Tabla 6.4. Temas del bloque temático *Microcontroladores*.

Como ya se ha descrito en el apartado 6.2.1, de forma general, el aprendizaje cooperativo es el empleo didáctico de grupos reducidos en los que los alumnos trabajan juntos para maximizar su propio aprendizaje y el de los demás. Todo esto, mediante una estrategia que promueve la colaboración entre ellos, para así lograr un ambiente más armónico y cómodo a la hora de elaborar el objetivo o meta deseado. Básicamente, se basa en la interacción entre alumnos diversos, que en grupos de 4 a 6, cooperan en el aprendizaje de una asignatura. Este aprendizaje cuenta con la ayuda del profesor, que dirige este proceso supervisándolo.

Se trata, pues, de un concepto del aprendizaje no competitivo ni individualista como lo es el método tradicional, sino un mecanismo colaborador que pretende desarrollar hábitos de trabajo o competencias en equipo, la solidaridad entre compañeros, y que los alumnos intervengan autónomamente en su proceso de aprendizaje.

En contraposición, en el aprendizaje competitivo cada alumno trabaja en contra de los demás para alcanzar objetivos escolares determinados.

En la asignatura SEA, se ha pretendido combinar ambas técnicas (aparentemente opuestas) en el aula para mejorar la calidad de la docencia, motivar al alumnado y desarrollar más competencias en él, además de, evidentemente, desarrollar los contenidos de las asignaturas.

Con el uso de la metodología cooperativa se pretende fomentar entre los alumnos el hábito del trabajo en equipo, mientras que con la competitividad entre estos grupos cooperativos de trabajo se desea incrementar el nivel de los trabajos y las tareas que realizan los estudiantes.

### *Experiencias durante el curso 2007-2008*

Durante el curso 2007-08, se utilizaron metodologías de “aprendizaje competitivo individualistas” dentro de las clases teóricas de SEA, obteniendo como resultado un ligero aumento del interés de una parte del alumnado por profundizar sus conocimientos en la asignatura.

La metodología competitiva puesta en práctica consistía, básicamente, en proponer a los alumnos un problema de programación en clase y valorar positivamente sólo las 5 mejores soluciones al problema dando un breve plazo de entrega (sólo 7 días). Estos problemas consistían en la realización de un código de programación y la mejor solución se consideraba aquella que resolvía la tarea propuesta y tenía el mínimo número de líneas de código. De este modo, el sistema de evaluación era totalmente imparcial. A los 5 alumnos que entregaban el código más compacto se les sumaba 0.25

puntos a su nota final en la asignatura. En general, este método estimuló el interés de un conjunto de alumnos que siempre participaban en dichas pruebas (se realizaron un total de 6). Finalmente, este grupo de alumnos obtuvieron **todos** en el examen final una nota de *Notable* o *Sobresaliente*. Por estos motivos, se decidió introducir metodologías didácticas de “aprendizaje cooperativo” en el siguiente curso académico (2008-09) bajo el contexto de las acciones de innovación docente ya mencionadas.

### *Experiencias durante el curso 2008-2009*

En el primer cuatrimestre del curso académico 2008-2009 se implantó progresivamente la metodología de aprendizaje cooperativo en SEA. La experiencia se realizó en los bloques temáticos de *Instrumentación y Microcontroladores*.

En el bloque de Instrumentación, para los alumnos que siguieron la metodología de grupos cooperativos, la nota final se obtuvo como el promedio de la nota obtenida en cada una de las siguientes 3 pruebas:

- trabajo del grupo formal
- presentación oral en clase de un apartado del trabajo
- nota del examen test (realizado en noviembre de 2008 y calculada como promedio de la nota individual y la nota obtenida por los miembros del grupo formal)

Para los alumnos que prefirieron seguir la metodología tradicional (evaluación individual) la nota final fue simplemente la del examen test.

Los grupos de alumnos fueron establecidos por el profesor de la siguiente manera: ellos se agrupaban en parejas o tríos de compañeros (por tanto, en la mayoría de los casos eran parejas de amigos o compañeros que ya se conocían) y posteriormente, el profesor unía dos de estos grupos, para formar un grupo de 4 o 6 personas, donde no todos los alumnos se conocían de antemano. De esta forma, los grupos establecidos se denominaron *grupos heterogéneos*.

Los resultados obtenidos en esta experiencia docente fueron muy satisfactorios, tal como se demuestra al comparar las notas del test de los alumnos que trabajaron en grupos con los alumnos que prefirieron trabajar individualmente. La nota media en el primer caso fue de 6.23, frente a un 5.78 en el segundo.

En la figura 6.7 se muestra la distribución de las notas obtenidas por los alumnos en ambas metodologías. En el gráfico puede apreciarse que la distribución de notas de los alumnos que trabajaron en grupos cooperativos está desplazada hacia la derecha y el

porcentaje de aprobados es muy superior (79% de aprobados frente a 69%). Todo ello indica que la experiencia fue claramente positiva.

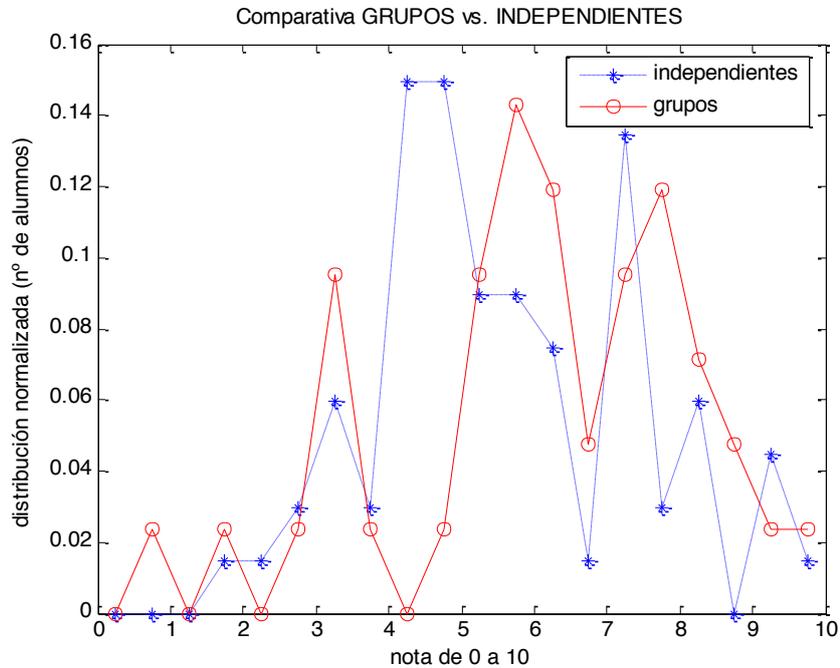


Figura 6.7. Distribución de las notas de los alumnos obtenidas en Instrumentación (nov. 2008).

Durante el segundo cuatrimestre se continuó con esta experiencia en la asignatura de SEA, en concreto, con el bloque temático de Microcontroladores. Se fomentó que los alumnos trabajasen en grupos pero además realizasen trabajos en los que compitiesen entre ellos para obtener puntos extra.

En resumen, se planteó una evaluación continua y al mismo tiempo se organizó el trabajo cooperativo entre los alumnos.

Para ello, en el bloque de Microcontroladores, se planificaron tres exámenes teóricos y dos exámenes prácticos. Y los alumnos se agruparon ellos mismos en grupos de 4 a 6 personas, formando por tanto *grupos homogéneos* (ya se conocían de antemano los miembros de cada grupo). En total, se formaron 13 grupos, con un total de 63 alumnos.

De los tres exámenes teóricos, dos de ellos eran parciales (el primer parcial se realizó tras volver de las vacaciones de Semana Santa y, el segundo parcial se realizó a principios de junio) y el otro fue un examen final que recopilaba todo el contenido de la asignatura.

Cada uno de los exámenes parciales cubre una pequeña parte de la asignatura, con lo que se consigue el objetivo de evaluación continua. Además son tipo test para que su duración sea corta y se pueda realizar durante el horario habitual de la asignatura. De este modo, no se interrumpe el currículum del resto de asignaturas y, además, facilita la corrección por parte del profesor.

En la figura 6.8 se muestran las calificaciones obtenidas por los alumnos en estos dos exámenes parciales teóricos y, en la figura 6.9 se muestran las notas para los exámenes de prácticas.

El segundo examen de prácticas fue también realizado por los alumnos independientes (que no participaron en la evaluación continua) y constituía su nota final de prácticas. Y en este caso, cabe decir, que todos los alumnos en grupos cooperativos superaron el examen perfectamente, mientras que los suspensos se correspondieron siempre con alumnos independientes.

Por último, la última prueba que tuvieron que realizar los alumnos, fue el examen final del bloque temático de Microcontroladores (el 10 de junio de 2009). Este examen final constituía la única nota de aquellos alumnos que no participaban en la experiencia cooperativa. Las calificaciones obtenidas en este examen se muestran en la figura 6.10, donde se representa la distribución de las notas de los alumnos en grupos cooperativos y los libres. La nota media de todos los alumnos que participaron como grupos cooperativos fue de 7.59, mientras que la nota media de los alumnos que sólo se presentaron al examen final fue de 6.84. En este mismo gráfico, también se aprecia que las notas más bajas las obtuvieron alumnos independientes. Por lo tanto, podemos concluir que la experiencia resultó satisfactoria.

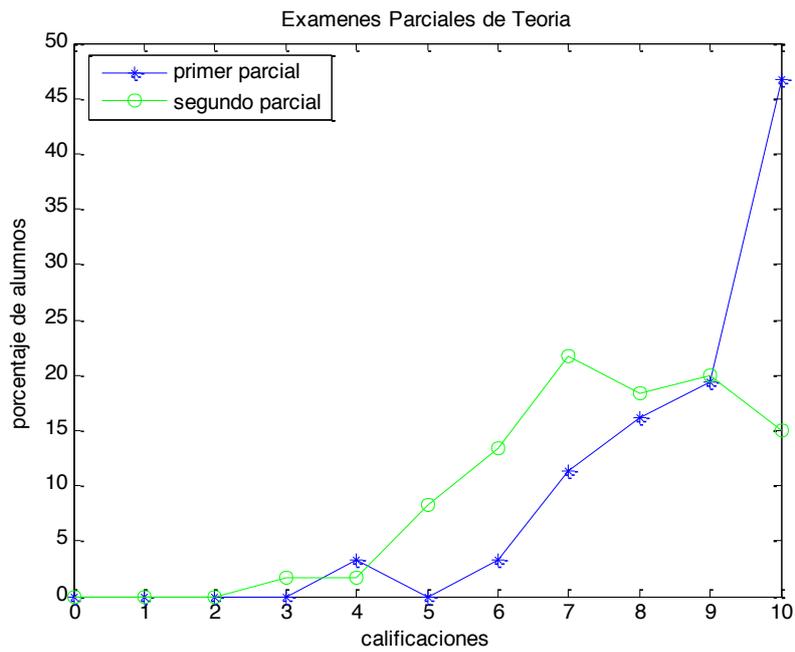


Figura 6.8. Distribución de las notas de los alumnos obtenidas en los exámenes parciales de teoría de Microcontroladores (curso 2008/2009).

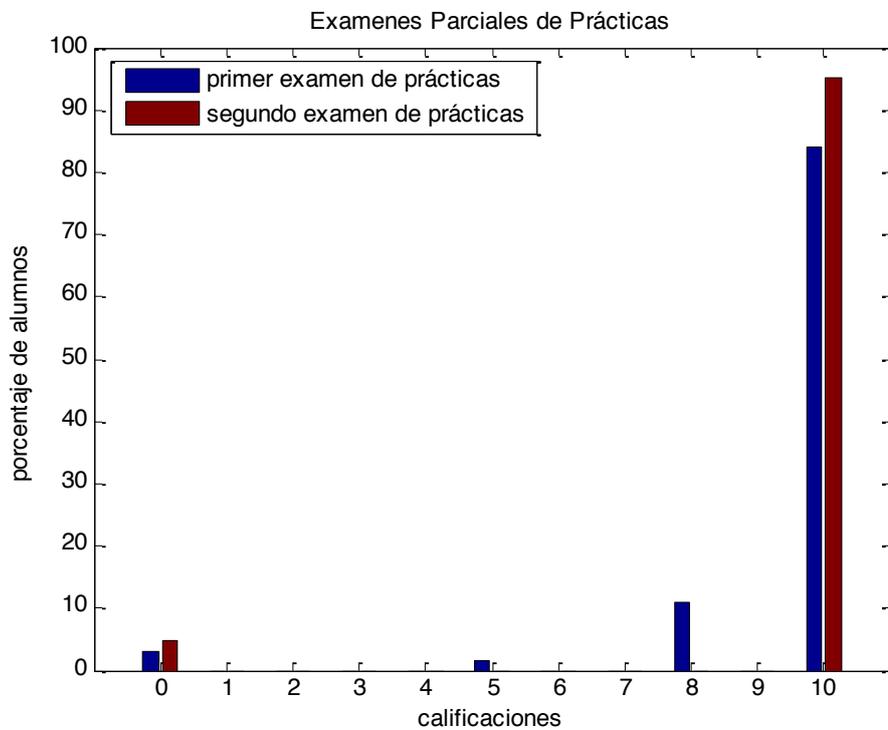


Figura 6.9. Distribución de las notas de los alumnos obtenidas en los exámenes parciales de prácticas de Microcontroladores (curso 2008/2009).

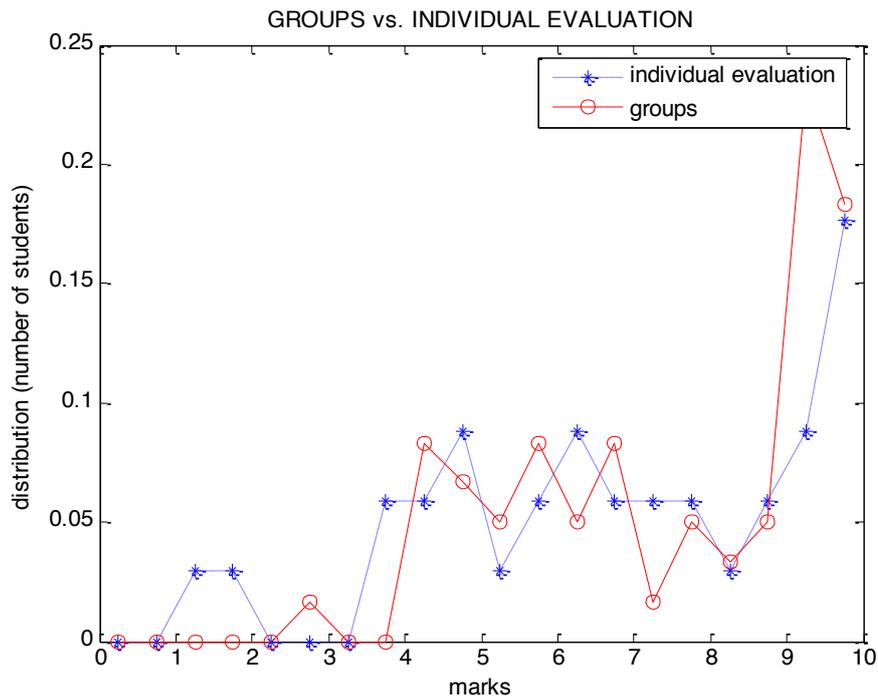


Figura 6.10. Distribución de las notas de los alumnos obtenidas en el examen final de teoría de Microcontroladores.

En cuanto al trabajo cooperativo, se implantó una evaluación en la que la nota final de cada alumno dependía no sólo de él mismo, sino también del resultado que obtenían sus compañeros de grupo. De este modo, los grupos de alumnos deben preparar la asignatura en colaboración, dado que la nota de cada uno de ellos depende en parte de todos los demás. En la figura 6.11 se muestra el método usado para obtener las calificaciones para un grupo de ejemplo.

Cada alumno tiene una nota individual de teoría obtenida según la siguiente fórmula:

$$\text{Nota Teoría} = 0.25 \cdot e_1 + 0.25 \cdot e_2 + 0.50 \cdot e_3$$

donde  $e_1$  y  $e_2$  son las calificaciones de los exámenes parciales, y  $e_3$ , la nota del examen final.

Y además, cada alumno también dispone una nota de prácticas:

$$\text{Nota Prácticas} = 0.50 \cdot ep_1 + 0.50 \cdot ep_2$$

donde  $ep_1$  y  $ep_2$  son las calificaciones de los exámenes prácticos.

## EVALUACIÓN CONTINUA

Ejemplo de la evaluación de un grupo de alumnos cooperativo:

|      | Teoría |        |        |                        |             | Prácticas |        |                   |                | FINAL          |                   |       |
|------|--------|--------|--------|------------------------|-------------|-----------|--------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|-------|
|      | 22-abr | 03-jun | 10-jun | nota media             | nota teoría | 23-abr    | 04-jun | nota media        | nota prácticas | teoría + prac. |                   |       |
|      | e1     | e2     | e3     | $0.25e1+0.25e2+0.50e3$ | t           | ep1       | ep2    | $0.50ep1+0.50ep2$ | p              | $0.8t+0.2p$    | ejerc. opcionales | FINAL |
|      |        |        |        |                        |             |           |        |                   |                |                |                   |       |
| Pepe | 8      | 10     | 5      | 7                      | 6,66        | 5         | 10     | 7,5               | 7,44           | 6,81           | 0,75              | 7,56  |
| Paco | 8      | 6      | 7      | 7                      | 6,66        | 10        | 5      | 7,5               | 7,44           | 6,81           | 0,75              | 7,56  |
| Juan | 3      | 4      | 5      | 4,25                   | 5,28        | 5         | 8      | 6,5               | 6,94           | 5,61           | 0,75              | 6,36  |
| Lola | 8      | 6      | 7      | 7                      | 6,66        | 8         | 8      | 8                 | 7,69           | 6,86           | 0,75              | 7,61  |

mediagrupo  
6,3125

mediagrupo  
7,375

80%
20%

Figura 6.11. Obtención de la calificación final para los miembros de un grupo cooperativo.

Estas notas individuales de teoría y prácticas se promedian con la nota media del grupo obtenida en cada una de las partes (teoría y prácticas) y, posteriormente, se combinan entre sí para conseguir la nota final del alumno en el bloque de Microcontroladores (la nota final es un 20% la nota obtenida en prácticas, más un 80% la nota obtenida en teoría).

Es evidente que esta metodología favorecerá a los alumnos con peores calificaciones, pues al promediar la nota de cada alumno con la de su grupo, los alumnos con notas individuales más altas obtendrán una nota final algo inferior, y ocurrirá el efecto contrario con los alumnos con las calificaciones menores.

Sin embargo, esta metodología pretende inculcar el trabajo en equipo y aumentar la motivación de los alumnos por la asignatura, puesto que ellos pueden afectar a todo el grupo. Este hecho consigue que se sientan más integrados en la asignatura y tiendan a no abandonarla antes de finalizar el curso.

### Desarrollo de trabajos cooperativos-competitivos

En combinación con la metodología descrita en la sección anterior, se propuso a los alumnos la realización de ejercicios opcionales para mejorar su nota final.

Las calificaciones de estos ejercicios opcionales se reflejan en la penúltima columna de la tabla de la figura 6.11. Básicamente, se propuso a los alumnos la realización de ejercicios o trabajos en grupos (cuatro trabajos a lo largo del cuatrimestre) de modo que los grupos compitan entre sí. En cada uno de los casos, la tarea consistía en la elaboración de un programa para el microcontrolador de prácticas en lenguaje ensamblador.

Cada ejercicio opcional puntuaba 0.25 puntos. Y, únicamente, se puntúan los cuatro grupos que presenten los programas más eficientes (menos líneas de código). De este modo, los grupos se deben esforzar por desarrollar un programa que no sólo realice la tarea pedida, sino que lo haga del modo más eficiente posible.

Esta competencia entre grupos ayuda a que los alumnos se esfuercen para mejorar su trabajo y evitar las “copias”, puesto que el valorar sólo los mejores trabajos consigue que los alumnos no se dejen llevar por la fácil tarea de copiar el trabajo de otro grupo de alumnos más aventajados, puesto que esto no les reportará ningún beneficio.

En resumen, esta experiencia docente para la asignatura de SEA ha sido gratamente satisfactoria. Se ha percibido un considerable aumento en la motivación y en el esfuerzo realizado por los alumnos que, además, se ha visto reflejado en sus calificaciones.

### ***Experiencias durante el curso académico 2009-2010***

Durante el primer cuatrimestre del curso académico 2009-2010 se utilizaron nuevamente estas metodologías en SEA. La experiencia se realizó en el bloque temático de *Instrumentación* que se imparte durante octubre y noviembre de 2009.

En el bloque de *Instrumentación* los alumnos pueden elegir entre dos modalidades de evaluación: evaluación continua (con grupos cooperativos) y evaluación tradicional o individual.

En el caso de optar por la Evaluación Continua, la nota final se calcula como el promedio de la nota obtenida en un examen final tipo test (realizado el 19 de Noviembre de 2009) (70% de la nota) y los trabajos propuestos en clase (30% de la nota). La tabla 6.5 muestra un ejemplo de aplicación de esta ponderación.

|             | 70%                | 30%             |              |
|-------------|--------------------|-----------------|--------------|
|             | <b>Nota examen</b> | <b>Trabajos</b> | <b>FINAL</b> |
| <b>Pepe</b> | 6,5                | 8,5             | 7,1          |
| <b>Juan</b> | 4                  | 8,5             | 5,35         |
| <b>Rosa</b> | 7                  | 8,5             | 7,45         |
| <b>Lola</b> | 9                  | 8,5             | 8,85         |

Tabla 6.5. Ejemplo de los resultados de la evaluación de un grupo en el bloque de Instrumentación (curso 2009-2010).

Los trabajos se presentaron al profesor en grupos cooperativos homogéneos (de 4 a 6 personas). La lista de estos trabajos, su fecha de entrega programada y su ponderación se muestra en la tabla 6.6.

Los primeros cuatro bloques de ejercicios fueron corregidos por el profesor, sin embargo, la evaluación del quinto trabajo (*Descripción de un sensor y su aplicación*) fue realizada por los propios alumnos siguiendo un sistema de votación.

|          | <b>Trabajo</b>                           | <b>Fecha de entrega</b> | <b>% de la nota de trabajos</b> |
|----------|--|-------------------------|---------------------------------|
| <b>1</b> | Ejercicios y problemas Tema 1            | 15 / oct / 2009         | 10%                             |
| <b>2</b> | Ejercicios y problemas Tema 2            | 22 / oct / 2009         | 10%                             |
| <b>3</b> | Ejercicios y problemas Tema 3            | 29 / oct / 2009         | 10%                             |
| <b>4</b> | Ejercicios y problemas Tema 4            | 05 / nov / 2009         | 10%                             |
| <b>5</b> | Descripción de un sensor y su aplicación | 12 / nov / 2009         | 60%                             |

Tabla 6.6. Listado de trabajos realizados por los grupos cooperativos.

Los trabajos realizados se pueden consultar en la web oficial de SEA dentro del apartado de material de la asignatura S.E.A. Y también desde el link externo:

[http://coolab.umh.es/sea/instrumentacion\\_trabajos\\_grupos.htm](http://coolab.umh.es/sea/instrumentacion_trabajos_grupos.htm)

La figura 6.12 muestra un detalle de la web con los trabajos de los alumnos.

Para los alumnos que prefirieron seguir la metodología tradicional (evaluación individual) la nota final fue simplemente la del examen test final del 19 de noviembre de 2009.

Los resultados obtenidos en esta experiencia docente han sido satisfactorios, tal como se demuestra al comparar las notas del test de los alumnos que trabajaron en grupos con los alumnos que prefirieron trabajar individualmente. La nota media en el primer caso fue de 7.3, frente a un 5.7 en el segundo, tal como se aprecia en las estadísticas del examen mostradas en la figura 6.13.

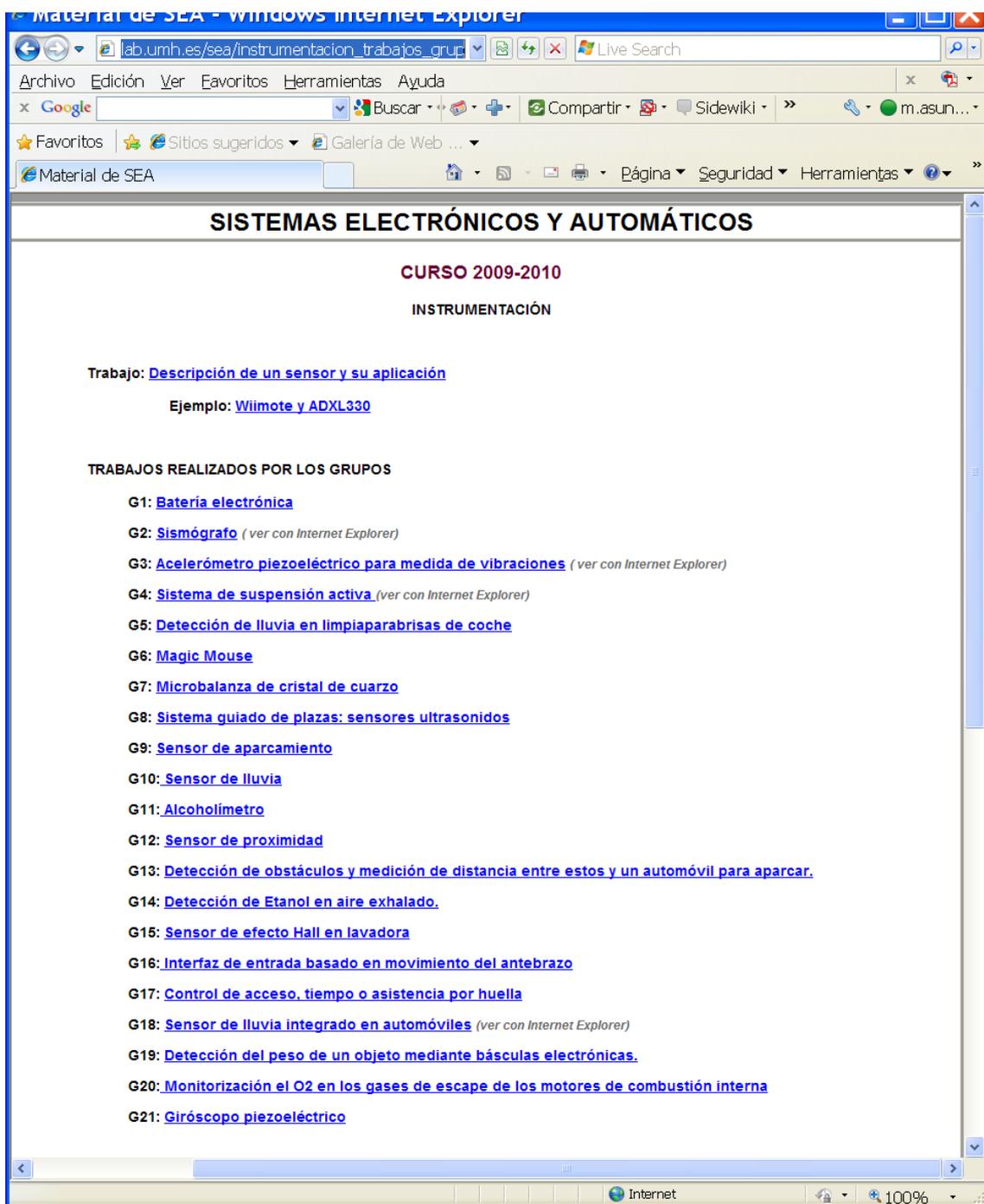


Figura 6.12. Web con los trabajos de los alumnos (*Descripción de un sensor y su aplicación*).

```
*****  
ESTADISTICAS:  
  
Total alumnos: 195  
Porcentaje de alumnos presentados al examen: 57.4%  
Porcentaje de alumnos en GRUPO presentados al examen: 92.1%  
Porcentaje de alumnos LIBRES presentados al examen: 20.2%  
  
Nota media de los alumnos en GRUPO: 7.3  
Nota media de los alumnos LIBRES: 5.7  
  
Porcentaje de alumnos aprobados en GRUPO: 92.5%  
Porcentaje de alumnos aprobados LIBRES: 68.4%  
*****
```

Figura 6.13. Estadísticas del examen test de Instrumentación realizado el 19 de nov. de 2009.

En la figura 6.14 se muestra la distribución de las notas obtenidas por los alumnos en ambas metodologías.

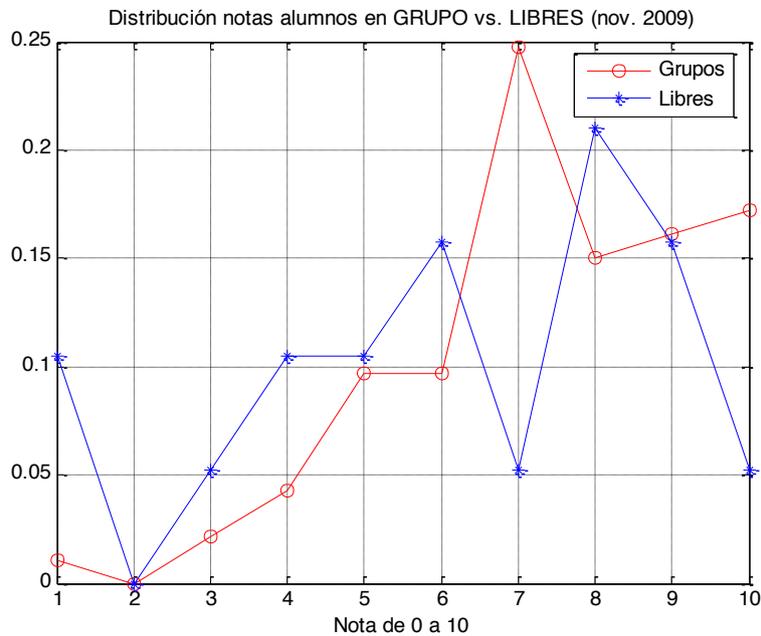


Figura 6.14. Distribución de las notas de los alumnos obtenidas en Instrumentación (Nov. 2009).

En el gráfico puede apreciarse que la distribución de notas de los alumnos que trabajaron en grupos cooperativos está desplazada hacia la derecha y el porcentaje de aprobados es muy superior (92.5% de aprobados frente a 68.4%). Todo ello indica que la experiencia fue muy positiva para la mejora de los resultados de evaluación de los alumnos.

6.3.2. ASIGNATURA: TEORÍA DE CIRCUITOS Y SISTEMAS

En este apartado se describe la propuesta de utilización de la metodología de aprendizaje cooperativo y los resultados obtenidos en el curso académico 2008-2009 para la asignatura *Teoría de Circuitos y Sistemas*

La asignatura Teoría de Circuitos y Sistemas (TCS) es una asignatura troncal de 2º curso de Ingeniería Industrial. En la tabla 6.7. se muestra su distribución de créditos.

| TEORÍA DE CIRCUITOS Y SISTEMAS |       |       |          |          |           |       |
|--------------------------------|-------|-------|----------|----------|-----------|-------|
| Tipo                           | Ciclo | Curso | Duración | Créditos |           |       |
|                                |       |       |          | Teóricos | Prácticos | Total |
| troncal                        | 1º    | 1º    | anual    | 6        | 4.5       | 10.5  |

Tabla 6.7. Distribución de créditos de TCS.

Se trata de una asignatura anual y posee dos partes conceptuales claramente diferenciadas, por lo que es posible realizar una separación de sus contenidos en dos bloques temáticos, que se imparten en cada uno de los cuatrimestres del año académico:

*Bloque 1: Teoría de circuitos*

*Bloque 2: Teoría de sistemas*

Los contenidos generales de cada uno de los bloques temáticos pueden estructurarse según una serie de temas que a continuación se muestran en las tablas 6.8 y 6.9.

| Bloque 1: Teoría de Circuitos   |
|---|
| Tema 1. Conceptos básicos de teoría de circuitos. Unidades. Elementos ideales y reales. |
| Tema 2. Análisis de circuitos por nodos y mallas.                                       |
| Tema 3. Otras técnicas de análisis. Asociaciones de elementos. Superposición.           |
| Tema 4. Potencia y energía. Teoremas de Thévenin y Norton.                              |
| Tema 5. Régimen transitorio en continua. Circuitos RLC.                                 |
| Tema 6. Régimen estacionario senoidal.  |
| Tema 7. Resonancia serie y paralelo.  |
| Tema 8. Acoplamiento magnético y transformadores.                                       |

Tabla 6.8. Temas del bloque temático *Teoría de circuitos*.

| Bloque 3: Teoría de sistemas   |
|--|
| Tema 1. Aplicaciones de la teoría de sistemas.                                       |
| Tema 2. Conceptos básicos de señales y sistemas continuos y discretos.               |
| Tema 3. Transformada de Fourier.   |
| Tema 4. Transformada de Laplace. Función de transferencia.                           |
| Tema 5. Modelado de sistemas continuos.  |
| Tema 6. Transformada Z. Función de transferencia en Z.                               |
| Tema 7. Modelado de sistemas discretos.  |
| Tema 8. Muestreo y reconstrucción de señales.  |
| Tema 9. Modelado de sistemas muestreados.  |
| Tema 10. Retrasos en sistemas muestreados. Función de transferencia en Z modificada. |
| Tema 11. Análisis de estabilidad de sistemas continuos.                              |
| Tema 12. Comportamiento dinámico de sistemas continuos.                              |
| Tema 13. Análisis de estabilidad de sistemas discretos.                              |

Tabla 6.9. Temas del bloque temático *Teoría de sistemas*.

### *Experiencias durante el curso académico 2008-2009*

Durante el curso académico 2008-2009 se comenzaron a implantar actividades de trabajo en equipo cooperativo en el bloque de Teoría de Sistemas. En este caso se optó por una actividad cooperativa/competitiva voluntaria. La actividad permitía que los alumnos incrementasen la nota del bloque de Sistemas hasta en un punto como máximo.

La actividad consistió en la resolución por parte de cada grupo de trabajo de problemas de exámenes anteriores seleccionados por el profesor. Además de resolver el problema, los alumnos tuvieron que comprobar los resultados mediante una simulación con Matlab/Simulink [WMATLAB] y también tuvieron que exponer tanto la resolución teórica como la simulación. La exposición la realizó uno de los miembros del grupo que se eligió al azar en el mismo momento de la presentación.

La actividad cumplió diferentes objetivos:

- Desarrollo de competencias de trabajo en grupo.
- Aprendizaje en profundidad de las herramientas Matlab y Simulink utilizadas durante las prácticas de la asignatura. Para resolver algunos problemas, eran necesarios elementos de Matlab y Simulink no vistos durante la asignatura, con lo cual los alumnos tuvieron que realizar un pequeño trabajo de investigación y documentación.

- Preparación para el examen, dado que el trabajo se realizó durante las últimas semanas de clase de la asignatura.

Se decidió trabajar con grupos grandes para poder realizar todas las presentaciones en una única sesión de teoría. La participación fue muy numerosa, dado que decidieron realizar el trabajo 7 grupos, con un total de 45 alumnos. En la figura 6.15 se muestra la distribución de las calificaciones obtenidas. Cabe destacar que las calificaciones fueron elevadas, en primer lugar porque todos los trabajos fueron brillantes; y en segundo lugar por tratarse de la primera vez que se realizaba esta experiencia, y se buscó fomentar la participación de los alumnos en cursos posteriores.

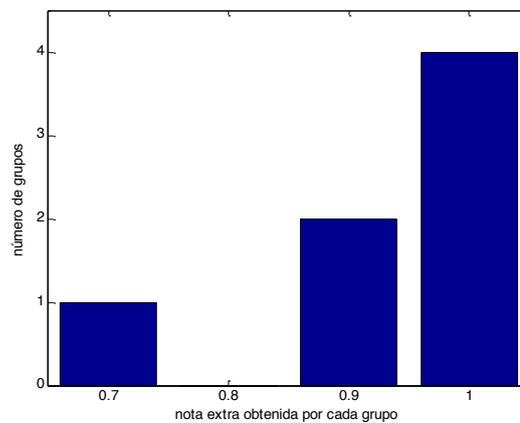


Figura 6.15: resultados obtenidos por los grupos participantes en la actividad voluntaria (TCS)

6.3.3. ASIGNATURA: CONTROL AVANZADO DE SISTEMAS

En este apartado se describe la propuesta de utilización de la metodología de aprendizaje cooperativo y los resultados obtenidos para la asignatura *Control Avanzado de Sistemas* (CAS), asignatura optativa de 4º curso de Ingeniería Industrial. En la tabla 6.10. se muestra su distribución de créditos.

| CONTROL AVANZADO DE SISTEMAS |       |       |          |          |           |       |
|------------------------------|-------|-------|----------|----------|-----------|-------|
| Tipo                         | Ciclo | Curso | Duración | Créditos |           |       |
|                              |       |       |          | Teóricos | Prácticos | Total |
| troncal                      | 2º    | 4º    | Anual.   | 9        | 3         | 12    |

Tabla 6.10. Distribución de créditos de CAS.

La asignatura es de duración anual. Los contenidos generales pueden estructurarse según una serie de módulos que a continuación se señalan en la tabla 6.11.

| CONTROL AVANZADO DE SISTEMAS                       |
|--|
| Módulo 1. Control predictivo y de mínima varianza. |
| Módulo 2. Control inteligente.                     |
| Módulo 3. Control adaptativo.                      |
| Módulo 4. Controlador óptimo.                      |

Tabla 6.11. Temas de la asignatura *Control avanzado de sistemas*.

Esta asignatura suele ser elegida por los estudiantes que quieren especializarse en la automatización industrial. Cuenta con 9 créditos teóricos y 3 créditos de laboratorio. Como es optativa, por lo general hay un menor número de alumnos matriculados que en otras asignaturas troncales u obligatorias. El grupo de alumnos suele estar formado por 40 o 60 estudiantes y se espera que muchos de ellos estén considerablemente motivados por el contenido del curso. Sin embargo, el contenido de la asignatura tiene una carga teórica importante y esto puede producir que a muchos alumnos les resulte algo costosa de seguir. Por estas razones, se decidió aplicar las técnicas de aprendizaje cooperativo para mantener y aumentar la motivación del alumnado.

La gran mayoría de los alumnos matriculados en CAS ya han cursado previamente asignaturas de Control donde han aprendido los métodos clásicos de análisis y diseño de controladores utilizando la representación externa de los sistemas.

En la asignatura CAS se estudian algunas de las técnicas de control avanzado que se emplean actualmente en la industria. Como ya se ha indicado, los alumnos disponen de conocimientos previos sobre controladores clásicos (PID's continuos y discretos, técnicas de diseño en el dominio temporal y en el de la frecuencia, ...) y además están

simultáneamente cursando la asignatura Sistemas Electrónicos y Automáticos (también de 4º curso) y que les introduce en el control en el espacio de estado.

### *Experiencias durante el curso académico 2009-2010*

Durante el curso académico 2009-2010 empezamos a introducir técnicas de aprendizaje cooperativo en los módulos de Control Inteligente y Control Adaptativo de la asignatura. Se eligieron esos dos módulos en concreto para la experiencia al considerarlos más adecuados para el desarrollo de la metodología cooperativa.

En dicho curso, el número de estudiantes matriculados fue de 60 alumnos, por lo que se establecieron 10 grupos de trabajo con 6 estudiantes por grupo. Para la creación de los grupos se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- En cada grupo debía haber al menos un estudiante con un grado ya finalizado (es decir, un alumno procedente de una titulación de ingeniería técnica).
- Se procuró distribuir equitativamente entre los grupos a aquellos alumnos que ya dispongan de una experiencia laboral fuera de la universidad.
- Se procuró distribuir a los alumnos con mejores notas entre todos los grupos para equiparar el nivel de los equipos de trabajo.

Al emplear las consideraciones anteriores se pretendía obtener grupos de trabajo *heterogéneos*, pues este tipo de grupo facilita el proceso de aprendizaje para la mayoría de los estudiantes implicados en el proceso.

El profesor propuso dos tareas diferentes a cada uno de los grupos de trabajo. Una tarea estaba relacionada con el módulo de Control Inteligente y la otra con el módulo de Control Adaptativo. Ambas tareas consistían, básicamente, en el diseño de un controlador (un controlador borroso en el primer caso, y un controlador adaptativo en el segundo módulo). Se planificó que, al final del cuatrimestre, dos de las sesiones de laboratorio se utilizasen para que cada grupo de trabajo mostrase al resto de sus compañeros el funcionamiento de su controlador.

Cada controlador diseñado por los alumnos de cada grupo es evaluado por el profesor en función de su rendimiento global y el cumplimiento de los requisitos de diseño. Cada controlador se ordena de acuerdo a la evaluación obtenida y esta lista ordenada determinará el incremento en la nota final para los estudiantes en cada grupo. La evaluación de los controladores se realiza de manera automática, simulando el controlador con el modelo de un sistema desconocido a priori por los alumnos y midiendo su rendimiento en tiempo real. De esta manera, la evaluación cooperativa del trabajo es más objetiva.

### *Descripción de la experiencia en el bloque de Control Inteligente*

En este bloque se ha aplicado el aprendizaje cooperativo y competitivo para el diseño de controladores borrosos. Creemos que las características de estos controladores son ideales para la aplicación de este tipo de metodologías, ya que, en general, hay muchas soluciones posibles y muy diferentes al mismo problema. Esto lo convierte en un tema idóneo para fomentar el debate de las diferentes alternativas entre los miembros de los grupos.

La tarea propuesta consiste en el diseño y análisis de un controlador borroso para un péndulo invertido (Figura. 6.16). En las sesiones de laboratorio, el profesor explica el modelo y las características del sistema a controlar y algunas de las pautas de diseño básicas. Posteriormente, el profesor explica el diseño de un controlador borroso básico que funciona bien para algunas configuraciones básicas del sistema (por ejemplo, cuando el péndulo invertido está casi en su posición vertical deseada). Entonces, los grupos de alumnos deben estudiar y analizar este controlador básico y encontrar las configuraciones del sistema en las que el controlador no funciona correctamente (por lo general, cuando el péndulo está muy lejos de la posición vertical, o cuando se está moviendo muy rápidamente).

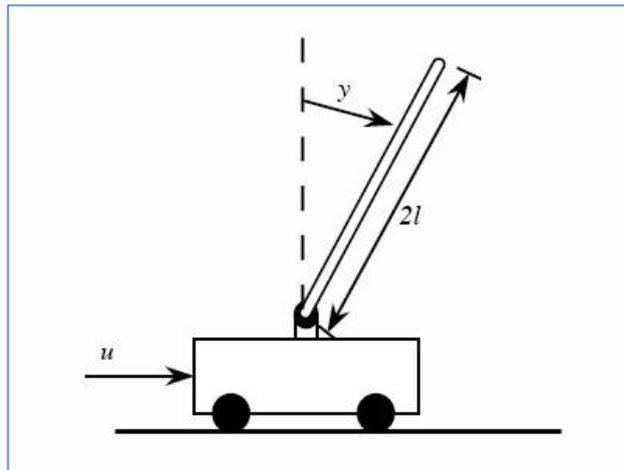


Figura 6.16. Péndulo invertido utilizado en el laboratorio.

Durante las sesiones de laboratorio los grupos discuten las posibles soluciones y mejoras al controlador propuesto y comparten sus conclusiones con el resto de la clase en turnos coordinados. Todo este proceso dura aproximadamente 2 horas en el laboratorio y finaliza con algunas mejoras comunes al controlador básico propuesto

por el profesor. Entonces, cada grupo debe presentar sus controladores finales cuatro semanas más tarde.

El controlador propuesto inicialmente por el profesor tiene las características siguientes:

- 2 entradas y 1 salida. Las 2 entradas son el error del controlador ( $e(t)$ ) y su derivada ( $de(t)/dt$ ).
- 5 conjuntos borrosos para cada variable (entradas y salidas). Estos conjuntos borrosos se muestran en la figura 6.17.
- Una base de reglas de  $5 \times 5 = 25$  reglas de control, que deben ser obtenidas por los estudiantes. En la tabla 6.12 se muestra una base de reglas vacía para ser rellenada en el laboratorio.

| Fuerza     |    | d e(t) /dt |    |   |   |   |
|------------|----|------------|----|---|---|---|
|            |    | -2         | -1 | 0 | 1 | 2 |
| Error<br>e | U  |            |    |   |   |   |
|            | -2 |            |    |   |   |   |
|            | -1 |            |    |   |   |   |
|            | 0  |            |    |   |   |   |
|            | 1  |            |    |   |   |   |
| 2          |    |            |    |   |   |   |

Tabla 6.12. Matriz de reglas inicial para el controlador del péndulo.

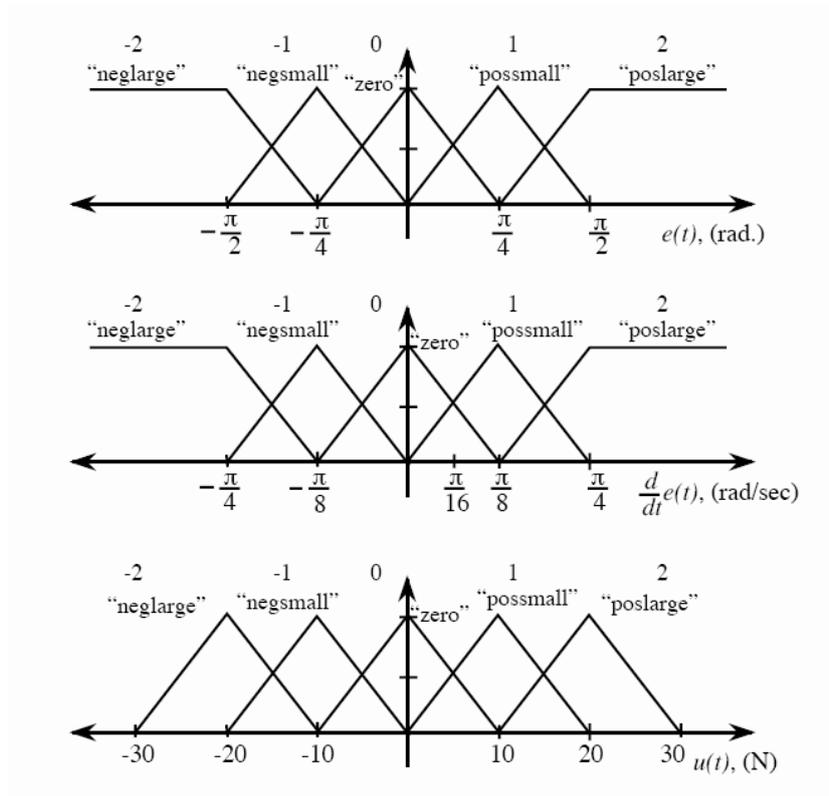


Figura 6.17. Conjuntos iniciales borrosos propuestos por el profesor.

Los estudiantes pueden modificar este controlador de muchas formas diferentes:

- Normalmente añaden más reglas al controlador para contemplar situaciones especiales. Por ejemplo, es muy habitual encontrarse que, aunque el controlador inicial funciona bien en situaciones generales, no se comporta correctamente cuando la posición inicial del péndulo no está demasiado cercana a su posición vertical deseada. En este caso se necesitan reglas de control adicionales para extender el rango de los valores de las condiciones iniciales en las que el controlador es estable. La mayoría de estudiantes optan por incluir más reglas al controlador para incrementar la magnitud de la señal de control cuando sea necesario, o para evitar la sobreoscilación cuando el péndulo se está aproximando a su posición deseada.
- También suelen intentar mejorar las prestaciones añadiendo más conjuntos borrosos con el objetivo de mejorar la precisión del controlador. Aunque esto tiene el efecto de mejorar la controlabilidad, también hace que el controlador sea más lento, lo cual es penalizado en la evaluación.

- Una alternativa a añadir más conjuntos borrosos es incluir 3 ganancias al esquema de control: una ganancia para cada entrada y otra ganancia para la salida del controlador. De esta forma, el controlador puede ser sintonizado cambiando los valores de estas tres ganancias, evitando la necesidad de modificar o incrementar los conjuntos borrosos iniciales.
- Existen algunas situaciones especiales en las que el sistema se hace inestable. En estos casos, los estudiantes deben modificar las reglas iniciales. La modificación de las reglas para estabilizar el sistema normalmente implica la realización de un análisis detallado del comportamiento dinámico del mismo.

Después del proceso de diseño, cada grupo presenta el controlador al profesor en un formato específico. En una sesión de laboratorio el profesor simula cada controlador entregado usando Matlab/Simulink con diferentes configuraciones iniciales para el péndulo y se evalúa su rendimiento según las especificaciones siguientes:

- Tiempo de establecimiento.
- Sobreoscilación.
- Robustez (respuesta a perturbaciones).
- Eficiencia temporal.

Para evaluar estas especificaciones, el profesor no asigna valores específicos que deban alcanzarse. Los estudiantes saben que deben mejorar el valor de las especificaciones de tal forma que el sistema tenga el mejor comportamiento posible. Usando estas especificaciones y considerando 10 grupos de estudiantes, los controladores entregados se ordenan en una lista. El mejor controlador obtiene 1 punto adicional a la calificación final de la asignatura, el segundo obtiene 0.9 puntos, y así sucesivamente hasta el décimo controlador que obtiene 0.1 puntos adicionales. Usando este enfoque, cada grupo debe competir con el resto de grupos y, para obtener buenos resultados, los miembros de cada grupo deben cooperar. Así, se consigue un método de aprendizaje combinado “competitivo-cooperativo”.

En la figura 6.18 se muestran las notas finales obtenidas en este módulo después de usar el método, comparadas con las notas obtenidas en cursos previos. Las notas A, B y C son aprobados, siendo A la nota más alta. Como puede observarse en la figura, se han obtenido mejores resultados usando aprendizaje cooperativo/colaborativo. También se ha observado que, usando este método, los estudiantes están mucho más activamente implicados en sus prácticas de laboratorio que en cursos previos. Esto es, probablemente, debido al hecho de tener que “competir” para obtener un resultado

mejor y, al mismo tiempo, a sentirse apoyados por el resto de compañeros de su grupo para superar las dificultades.

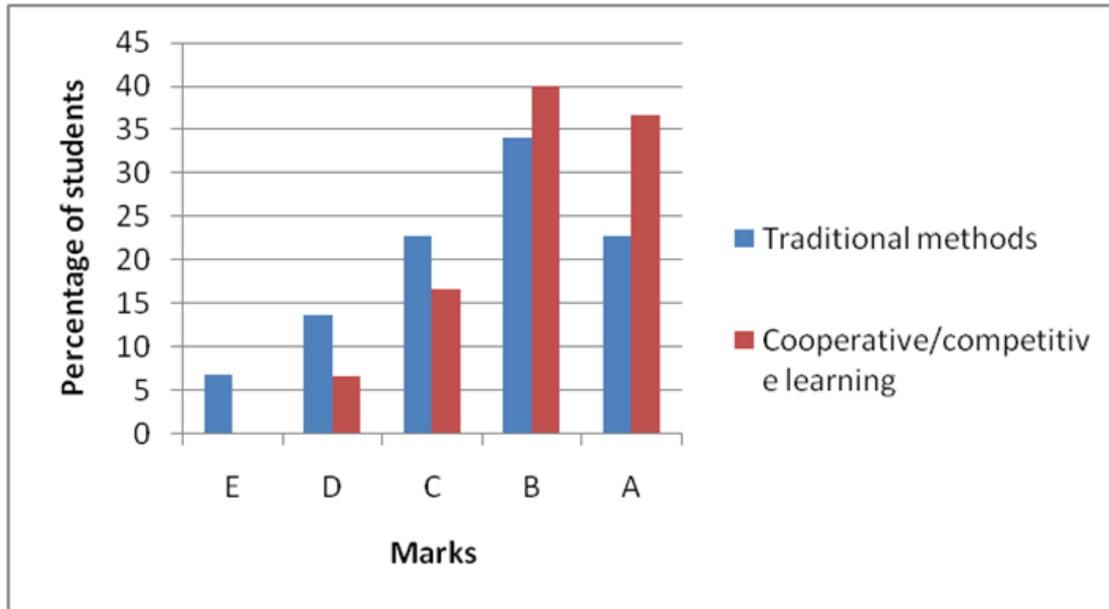


Figura 6.18. Comparativa entre los resultados obtenidos con la evaluación tradicional y empleando las técnicas cooperativas (Control Inteligente).

En las sesiones de laboratorio de esta asignatura, los alumnos han podido experimentar con las herramientas descritas en los capítulos 4 y 5. En particular, para el diseño de los controladores de mínima varianza y de control óptimo han tenido la posibilidad de usar la herramienta de control a través de Internet para simular y compartir los controladores diseñados en el grupo. De la misma forma, se han desarrollado esquemas de simulación en Scilab/Scicos para los controladores de esta asignatura, obteniendo resultados muy satisfactorios, similares a los obtenidos con programas comerciales (Matlab/Simulink).

### *Descripción de la experiencia en el bloque de Control Adaptativo*

En este bloque la tarea propuesta a los grupos consiste en el diseño y análisis de un controlador adaptativo para un modelo de primer orden en el que algunos de los parámetros son desconocidos o variables. Este modelo corresponde a un motor de corriente continua disponible en el laboratorio. La función de transferencia del sistema es:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

donde la ganancia y la constante de tiempo son desconocidas.

Los estudiantes pueden elegir dentro de una variedad de métodos de diseño estudiados en clase. Las alternativas disponibles son las siguientes:

- Regla del MIT o método del gradiente.
- Método de diseño por la teoría de estabilidad de Lyapunov para asegurar que el esquema de control sea estable.
- Reguladores autoajustables (STR, *Self-Tuning Regulators*) basados en identificación on-line.

En los dos primeros casos los estudiantes tienen que obtener un parámetro adicional llamado la *ganancia de adaptación* ( $\gamma$ ). Las prestaciones del controlador dependerán del valor de este parámetro.

El primer método (regla del MIT) tiene la ventaja de ser muy simple, pero el inconveniente de no poder asegurar la estabilidad del sistema para todos los valores de  $\gamma$ . Algunos grupos de estudiantes prefieren la simplicidad de este método incluso aunque están obligados a seleccionar el parámetro  $\gamma$  muy cuidadosamente para evitar la inestabilidad. Los estudiantes saben desde el principio que un sistema controlado que sea inestable es inútil en la práctica, así que deben buscar un equilibrio entre simplicidad de diseño frente a asegurar la estabilidad en todos los casos. Esta alternativa en el diseño fuerza a los estudiantes a entablar discusiones de trabajo muy interesantes y, al final, están obligados a alcanzar algún tipo de acuerdo para presentar el controlador al profesor.

El segundo método (basado en la teoría de estabilidad de Lyapunov) tiene el inconveniente de la complejidad de su diseño, pero se obtienen sistemas que son estables para cualquier  $\gamma$ . Este método es normalmente elegido por los estudiantes que son más analíticos y prefieren realizar un diseño más teórico y costoso para asegurar que el sistema es estable.

El tercer método es una solución intermedia en la que los estudiantes tienen que diseñar un identificador antes de diseñar el controlador. Los grupos que eligen esta alternativa están formados normalmente por estudiantes que han seguido o están siguiendo algún curso sobre identificación de sistemas.

Así, los estudiantes deben elegir entre una solución de diseño rápida y eficiente, corriendo el riesgo de la inestabilidad, una solución mucho más compleja teóricamente pero que es más robusta, o una solución intermedia. Estas decisiones son parecidas a

las que deberían tomar en un diseño real. Con la técnica cooperativa y competitiva es esperable que los alumnos discutan este tipo de cuestiones dentro del grupo, debiendo alcanzar un acuerdo y presentar una solución final.

El método de evaluación es el mismo que para el bloque anterior, pero en este caso los grupos deben explicar al resto de la clase las razones que les han llevado a elegir la solución y los problemas que han encontrado. El profesor usa el modelo de primer orden para comprobar los distintos controladores cambiando ligeramente los parámetros del sistema (la ganancia y el polo del sistema) e introduciendo 4 entradas de referencia diferentes: un escalón unitario, una secuencia de escalones, una rampa y una entrada generada aleatoriamente.

Las prestaciones de los controladores se miden como el tiempo que tarda en hacerse nulo el error de adaptación, o cuando su valor absoluto es menor que un umbral especificado. Los controladores son entonces ordenados dependiendo de sus prestaciones medidas y las notas finales se cambian en función de ellas (de forma análoga a como se hizo en el bloque anterior).

En la figura 6.19 se muestran los resultados obtenidos usando el método cooperativo/competitivo, comparado con los métodos tradicionales. En esta figura puede observarse que los estudiantes han obtenido mejores resultados, no sólo debido a los puntos adicionales obtenidos, sino también debido al trabajo, discusiones y análisis en profundidad de los controladores diseñados en los grupos cooperativos-competitivos.

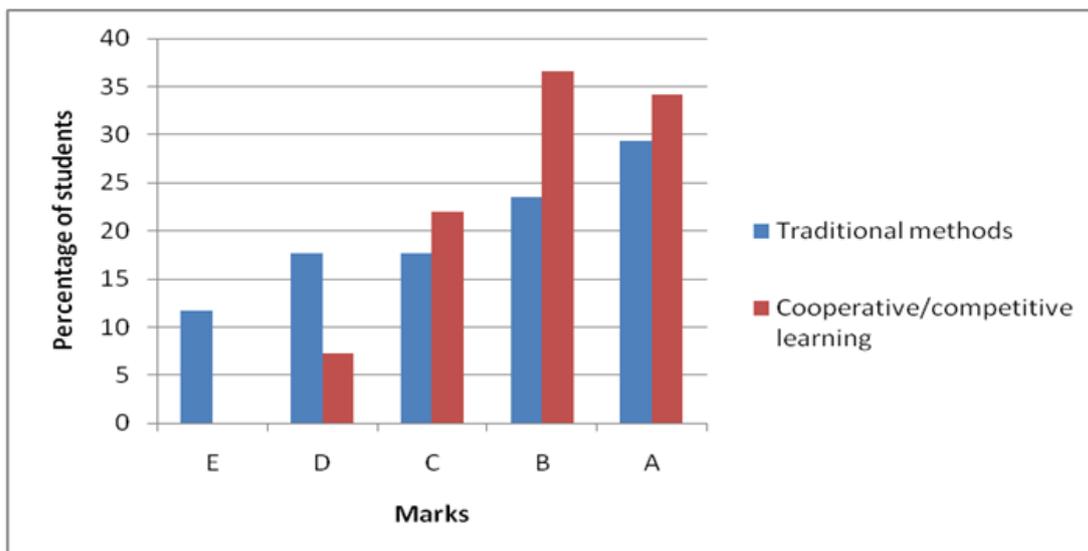


Figura 6.19. Comparativa entre los resultados obtenidos con la evaluación tradicional y empleando las técnicas cooperativas (Control Adaptativo).

Para el diseño de los controladores adaptativos, los alumnos han podido experimentar con el uso de las herramientas descritas en los capítulos 4 y 5 de la tesis. En particular, los experimentos se han realizado también en Scilab/Scicos, obteniendo resultados muy satisfactorios y análogos a los obtenidos con Matlab/Simulink.

### 6.4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este capítulo ha quedado patente que el empleo de técnicas de aprendizaje cooperativo, combinado con experiencias competitivas, mejora sustancialmente los resultados de los alumnos en un proceso de evaluación continua.

Los resultados que hemos obtenido demuestran por una parte que los alumnos muestran interés por estas actividades (dado el nivel de participación obtenido) y que les permite mejorar su rendimiento (a la vista de la comparación de las calificaciones de los alumnos que toman parte en estas actividades frente a las de los alumnos que deciden optar por la metodología tradicional de aprendizaje).

Como principal conclusión del uso de esta técnica como método docente para estas asignaturas puede decirse que se ha demostrado que es posible aplicar simultáneamente aprendizaje cooperativo y competitivo en este tipo de asignaturas del área de automática. La combinación de estos dos enfoques permite alcanzar simultáneamente dos objetivos:

- El desarrollo de competencias relacionadas con habilidades necesarias en el mundo laboral.
- El incremento de la motivación de los estudiantes por la asignatura.

Como ya se ha mencionado, las experiencias docentes que se han descrito en este capítulo se han desarrollado bajo el contexto de los proyectos de innovación docente promovidos por la Universidad Miguel Hernández, y cuyo fin es el extender el uso de las herramientas docentes tipo web 2.0 en el aula.

Nuestra experiencia demuestra que el uso de estas herramientas facilita la interacción entre los alumnos de los grupos de trabajo y también mejoran la comunicación entre el profesorado y los alumnos. Debido al perfil de los alumnos, el uso de herramientas basadas en Internet no supone ningún problema, más bien todo lo contrario, es una motivación adicional a la hora de desarrollar los trabajos, como hemos visto en las experiencias presentadas en este capítulo.

En el curso académico actual, 2010-2011, se pretende continuar con el uso de estas herramientas docentes en combinación con las técnicas metodológicas del aprendizaje en grupos cooperativos. Nuestros objetivos en este aspecto son los siguientes:

- Aumentar el porcentaje de alumnos que forma parte de la evaluación continua y los grupos de trabajo cooperativos frente a aquellos que eligen la evaluación tradicional.
- Ampliar los contenidos de las tareas y trabajos a realizar en grupos cooperativos.
- Utilizar las herramientas de Google para mejorar la interacción entre los alumnos y el profesorado.
- Mejorar la integración entre las herramientas desarrolladas en la tesis (Scilab/Scicos, Sysquake y ReColab).

# 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se inicia este capítulo con una revisión de los objetivos propuestos así como de las consecuciones de los mismos. Se exponen a continuación las conclusiones más relevantes aportadas en esta tesis así como los posibles trabajos futuros a realizar dentro del marco temático de la misma.

## 7.1. CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon al comienzo del trabajo de la tesis se han cubierto de forma satisfactoria. A continuación se enumeran dichos objetivos iniciales, se describe el grado de su cumplimiento y se enumeran logros adicionales o colaterales que se han conseguido alcanzar tras el trabajo realizado.

**Primer objetivo:** *Desarrollar herramientas sobre software libre para reducir el coste de la experimentación en docencia e investigación.*

Este objetivo se ha cumplido satisfactoriamente ya que se han diseñado dos herramientas utilizando software libre y software de evaluación. Más concretamente:

- Se han diseñado herramientas para su uso en las prácticas de laboratorio de asignaturas de Control Automático usando el software Scilab/Scicos [PUER10], [ÑEC10-2]. Se ha probado la efectividad de dichas herramientas en la docencia de asignaturas de Sistemas Electrónicos de Control en la Universidad Miguel Hernández de Elche (en titulaciones de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones).

La principal ventaja de estas herramientas radica en el hecho de que el software necesario es de libre disposición para los alumnos, no habiéndose encontrado inconvenientes importantes respecto al uso de herramientas más extendidas que no son gratuitas como Matlab y Labview.

- Se han diseñado herramientas interactivas para docencia de posgrado y, especialmente, para investigación, usando el entorno Sysquake [ÑEC09], [ÑEC10-1]. Por un lado, la herramienta interactiva diseñada permite el estudio de técnicas clásicas de control (PIDs continuos y discretos, controladores algebraicos), cubriendo en parte los mismos contenidos que se cubrieron con Scilab/Scicos.

Por otro lado se ha diseñado un módulo para el estudio de un tipo de controlador avanzado: controladores multifrecuencia. Este módulo (llamado MADT (*Multirate Analysis and Design Tool*)) está especialmente pensado para docencia e investigación en control multifrecuencia.

Se ha comprobado la eficacia de esta herramienta en asignaturas de posgrado de Ingeniería de Control en la Universidad Miguel Hernández (Máster en Tecnologías Industriales y de Telecomunicaciones), así como en tareas de investigación para la obtención de representaciones de la respuesta en frecuencia de dichos controladores, usando una versión libre [ÑEC10-2].

**Segundo objetivo:** *Desarrollar herramientas que permitan la utilización remota de equipos de laboratorio a través de Internet.*

Se ha diseñado un Laboratorio por Control Remoto (RECOLAB: *REmote COntrol LABoratory*) para ofrecer al alumno la posibilidad de realizar o continuar sus prácticas a distancia [PUER01], [PUER02-1], [PUER02-2], [PUER02-3], [PUER02-4], [PUER04], [PUER06], [JIM07], [PUER11]. Este laboratorio incluye la posibilidad de realizar experimentos con controladores básicos (PIDs, algebraicos), así como controladores más avanzados (realimentación del estado, mínima varianza) que pueden usarse tanto para docencia de grado como de posgrado.

Este laboratorio remoto se ha usado durante los últimos cursos académicos en asignaturas de Sistemas de Control en titulaciones de Ingeniería en la Universidad Miguel Hernández de Elche, con resultados muy satisfactorios [COS10], [PUER11].

**Tercer objetivo:** *Desarrollar metodologías docentes que, conjuntamente con las herramientas anteriores, sirvan para aumentar la motivación de los alumnos que cursan asignaturas de control automático.*

Para cumplir este objetivo se han desarrollado metodologías docentes combinadas basadas en los paradigmas *cooperativo* y *competitivo*. Estas metodologías se han

aplicado junto con las herramientas software y hardware diseñadas para aumentar la motivación de los alumnos y fomentar la colaboración dentro de equipos de alumnos [ÑEC10-2], [VIC10-2].

Esta metodología se ha usado en asignaturas de control automático de la Universidad Miguel Hernández obteniendo resultados muy satisfactorios, como se refleja en la mejora de las calificaciones y en las encuestas de opinión realizadas a los alumnos [ÑEC10-2], [VIC10-1].

### 7.2. APORTACIONES REALIZADAS

Las principales aportaciones realizadas en la tesis son las siguientes:

- Estudio comparativo de diversos paquetes software comerciales válidos para la experimentación en control automático frente a sus alternativas de libre distribución o gratuitas.  
Se ha comprobado de manera práctica en el aula que con el uso de las herramientas diseñadas usando software libre se obtienen los mismos resultados docentes que con herramientas más clásicas que no son libres.
- Propuesta de una herramienta interactiva de diseño de reguladores PID y algebraicos, sobre el software Sysquake. De forma análoga a otros trabajos previos, se ha diseñado una herramienta interactiva para docencia de conceptos básicos de control en titulaciones de grado.
- Plataforma específica para el análisis y diseño de controladores multifrecuencia (MADT), así como para la comparación de prestaciones entre controladores mono y bifrecuencia, sobre el software Sysquake. La herramienta MADT se ha usado para docencia en cursos avanzados de control en estudios de posgrado, siendo además una aportación como herramienta de investigación para el diseño y análisis de sistemas de control multifrecuencia.

En particular, se han implementado varias formas de representación de la respuesta en frecuencia de sistemas de control multifrecuencia lo cual ha permitido hacer más intuitivo el proceso de salvar uno de los inconvenientes más importantes de estos sistemas: la aparición de oscilaciones ocultas. El programa diseñado permite obtener el mecanismo para eliminar dichas oscilaciones de forma interactiva.

- Desarrollo de una batería de experimentos de control para su realización sobre la plataforma gratuita Scilab/Scicos, tanto para sistemas continuos como para sistemas discretos. Los resultados han sido satisfactorios y han demostrado que la plataforma Scilab/Scicos es válida para el análisis de sistemas, así como para el diseño y ajuste de controladores. Además, se ha desarrollado un tutorial específico para esta plataforma que posibilita la realización de experimentos adicionales.
- Propuesta de una arquitectura hardware y software para la realización de experimentos de control sobre diferentes sistemas físicos en tiempo real a través de Internet. La plataforma es válida para multitud de equipos de laboratorio y su funcionamiento ha quedado demostrado con pruebas satisfactorias sobre servomotores comerciales y sobre maquetas experimentales. Su idoneidad para la docencia también ha quedado probada en diferentes asignaturas a lo largo de los últimos años.
- Diseño de una batería de experimentos de control para ser realizados a través de Internet utilizando la plataforma anterior. Estos experimentos incluyen un primer paso de simulación y un segundo paso de realización de experimentos sobre la plataforma remota, y permiten la utilización de múltiples esquemas de control: PID, asignación de polos, tiempo mínimo, realimentación del estado, etc.
- Diseño y desarrollo de un cilindro deslizante por flujo de aire de bajo coste para la prueba de algoritmos de control, de forma local o remota, integrado con la herramienta remota diseñada.
- Propuesta de una metodología mixta competitiva y cooperativa para la docencia en asignaturas de control automático. Esta metodología tiene dos aspectos innovadores:
  - Utiliza dos técnicas aparentemente contradictorias: aprendizaje competitivo y aprendizaje colaborativo y se ha demostrado de forma práctica que se obtienen resultados satisfactorios.
  - Se ha integrado con las herramientas diseñadas en la tesis para docencia de grado y posgrado.
- Estudio de la efectividad de las herramientas desarrolladas en el ámbito docente de la Escuela Politécnica Superior de Elche. Todas las herramientas

propuestas en la presente tesis han sido utilizadas intensivamente en diferentes titulaciones, con resultados satisfactorios que se han comprobado mediante encuestas y mediante análisis comparativos de las calificaciones obtenidas por los alumnos.

### 7.3. TRABAJOS FUTUROS

Un trabajo de investigación como el presentado en esta tesis, destinado a ofrecer avances en herramientas de experimentación en control automático, podría no tener fin, ya que cualquier aspecto de la misma es susceptible de mejorarse y adaptarse a distintas situaciones, especialmente en un campo tan cambiante como es la automática.

Por su limitación en el tiempo, el trabajo de la tesis se ha centrado en cuestiones específicas, dejándose para trabajos futuros otros aspectos que se enumeran a continuación.

- Extensión de Scilab/Scicos con el desarrollo de un entorno para el control en tiempo real de sistemas físicos a través de una tarjeta o sistema de adquisición de datos, disponiendo para ello de las librerías Comedi y RTAI [WCOM], [WRTAI].
- Actualización a la última versión de Scilab utilizando la aplicación Xcos en lugar de Scicos.
- Estudio de distintos algoritmos de simulación para su uso en la herramienta MADT para controladores multifrecuencia.
- Mejora del grado de interactividad de la herramienta MADT obteniendo, por ejemplo, relaciones numéricas “directas” entre la respuesta en frecuencia y los parámetros de controlador.
- Habilitación el uso de otras estructuras de controladores multifrecuencia en la herramienta MADT (controladores adaptativos, predictivos, inteligentes, etc.).
- Adición de nuevos sistemas físicos y nuevos esquemas de control a RECOLAB para aumentar la variedad de experimentos a realizar.

- Creación una herramienta interactiva que sirva como foro de discusión sobre RECOLAB (foro o site Google).
- Adaptación de las técnicas docentes cooperativas/competitivas para su integración con herramientas web de enseñanza a distancia.

# APÉNDICES



## APÉNDICE A. DESCRIPCIÓN GENERAL DE MADT: HERRAMIENTA DE DISEÑO Y ANÁLISIS MULTIFRECUENCIA

El objetivo fundamental de MADT es ayudar a diseñar reguladores bifrecuencia usando la teoría vista en el capítulo 4. En este apéndice se describen las principales funcionalidades desarrolladas.

### *Menús disponibles (pestaña settings)*

#### *Menú sistema*

Los elementos que contiene dicho menú y que se van a explicar a continuación se presentan en la figura A.1:

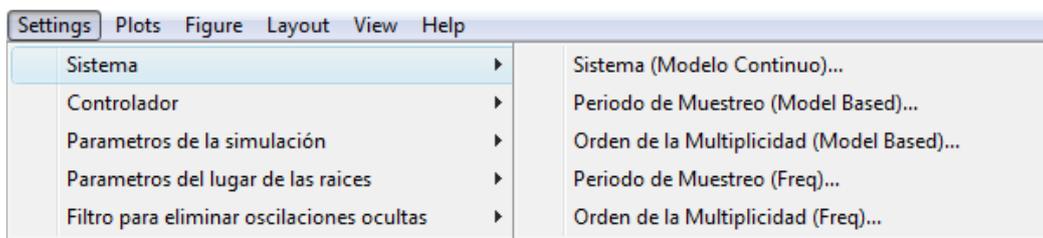


Figura A.1. Elementos del menú Sistema

- **Sistema (Modelo continuo):** Coeficientes de la función de transferencia continua de la planta a controlar, a introducir con el siguiente formato:

[coeficientes del numerador], [coeficientes del denominador]

Por ejemplo, introduciendo los coeficientes mostrados en la figura A.2:

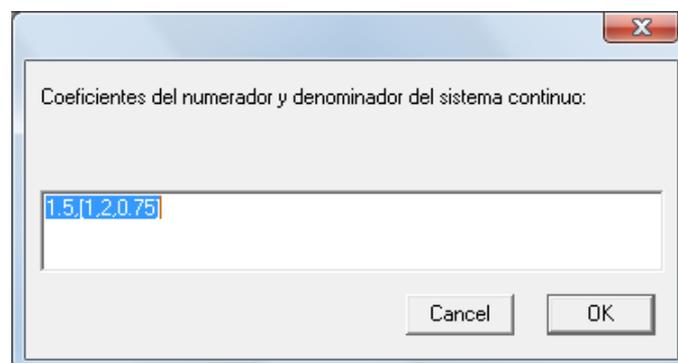


Figura A.2. Ejemplo de uso del menú Sistema

La función de transferencia de la planta es:

$$G(s) = \frac{1.5}{s^2 + 2s + 0.75}$$

- **Periodo de muestreo (Model Based):** Periodo de muestreo que usa el programa para obtener el controlador bifrecuencia. Al modificarlo, el periodo de muestreo definido en *Periodo de muestreo (Freq)* cambia (y viceversa)

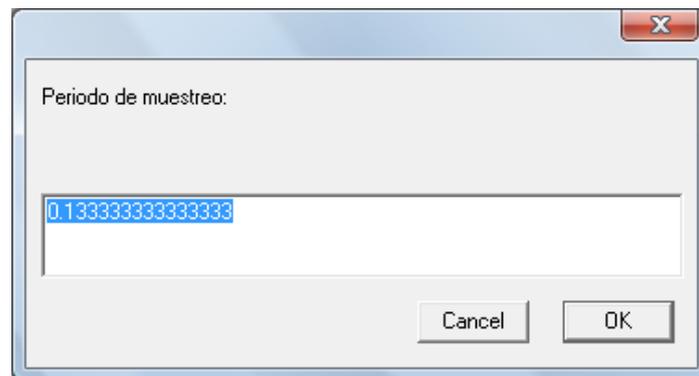


Figura A.3. Ejemplo de uso del menú Periodo de muestreo

Se han implementado dos formas distintas de definir el periodo de muestreo para simplificar la programación. Así, el algoritmo que obtiene el controlador bifrecuencia trabaja con:

- Periodo de muestreo lento:  $NT$
- Periodo de muestreo rápido:  $T$

Con:

$N$ : Orden de la multiplicidad (Model Based)

$T$ : Periodo de muestreo (Model Based)

Mientras que el algoritmo que obtiene la respuesta en frecuencia trabaja con:

- Periodo de muestreo lento:  $T/N1$
- Periodo de muestreo rápido:  $T/N2$

- Periodo de muestro para tomar medidas fuera del bucle:  $T/N3$

Con:

$N1, N2, N3$ : Orden de la multiplicidad (Freq)

$T$ : Periodo de muestreo (Freq)

- **Orden de la multiplicidad (Model Based)**: Valor entero para definir el periodo de muestreo lento.

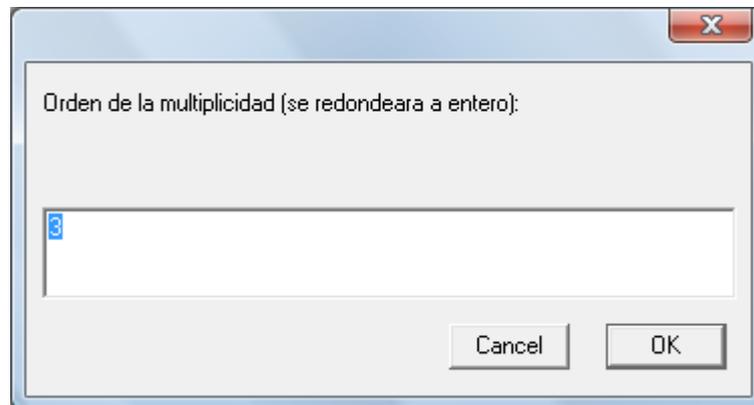


Figura A.4. Ejemplo de uso del menú “Orden de la multiplicidad (Model Based)”

- **Periodo de muestreo (Freq)**: Periodo de muestreo que usa el programa para obtener el controlador bifrecuencia. Al modificarlo, el periodo de muestreo definido en *Periodo de muestreo (Model Based)* cambia (y viceversa).

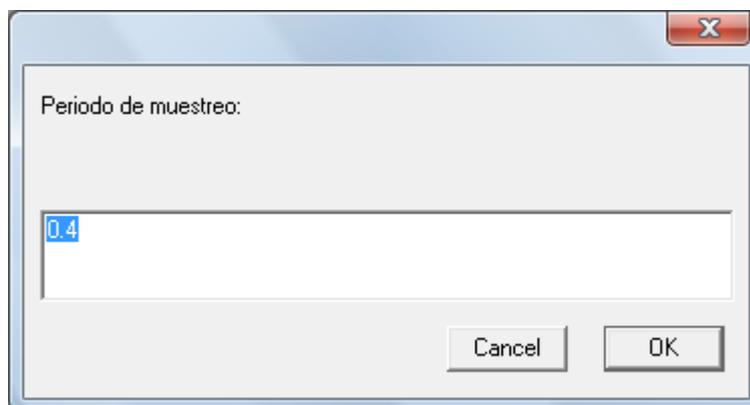


Figura A.5. Ejemplo de uso del menú “Periodo de Muestreo (Freq)”

- **Orden de la multiplicidad (Freq):** Valores enteros para definir los periodos de muestreo rápido y lento.

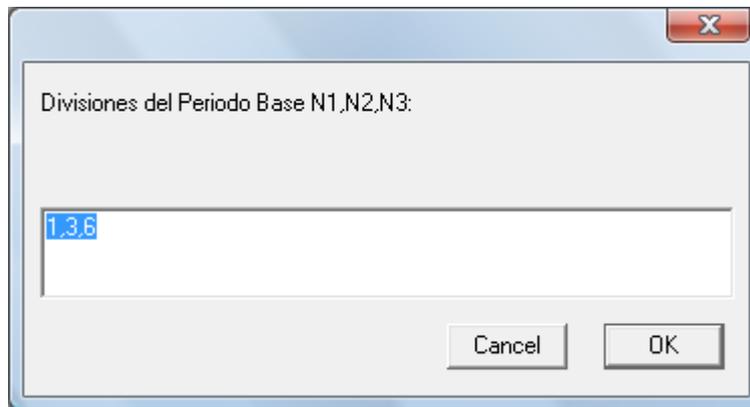


Figura A.6. Ejemplo de uso del menú Orden de la multiplicidad (Freq)

### Menú controlador

Los elementos que contiene dicho menú se presentan en la figura A.7.

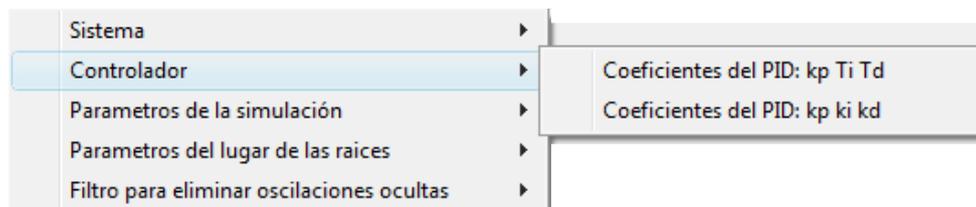


Figura A.7. Elementos del menú controlador

Es decir, se permiten dos formas de definir el controlador PID a partir del cual se va a obtener el controlador bifrecuencia: Usando las constantes de tiempo integral y derivativa ( $T_i$ ,  $T_d$ ) y la ganancia proporcional ( $k_p$ ) (figura A.8); o usando las constantes proporcionales integral y derivativa ( $k_i$ ,  $k_d$ ) y la ganancia proporcional ( $k_p$ ) (figura A.9).

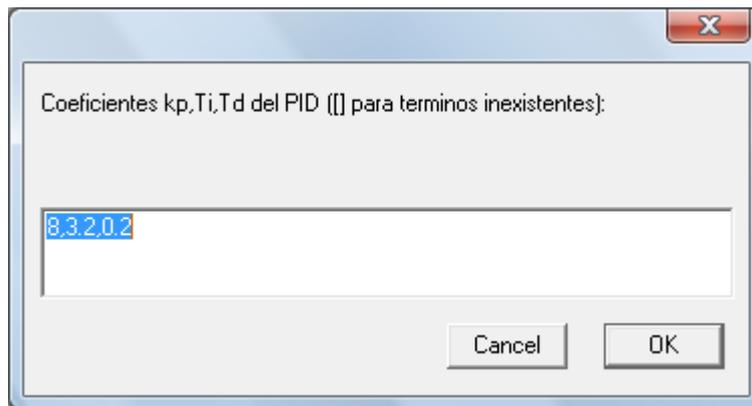


Figura A.8. Definición del PID usando  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$

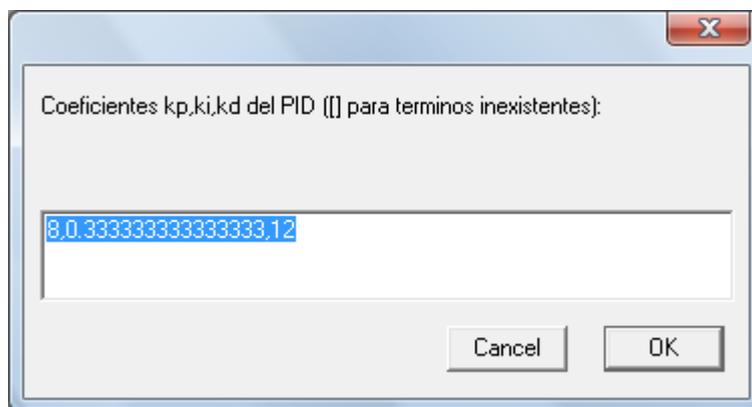


Figura A.9. Definición del PID usando  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$

Lógicamente, al modificar los parámetros en uno de los menús, los parámetros del otro menú son actualizados automáticamente.

### Menú parámetros de la simulación

Los elementos que contiene dicho menú y que se van a explicar a continuación se presentan en la figura A.10.



Figura A.10. Elementos del menú Parámetros de la Simulación

- **Tiempo de simulación:** Límite temporal superior para el que se van a mostrar los valores de las gráficas.

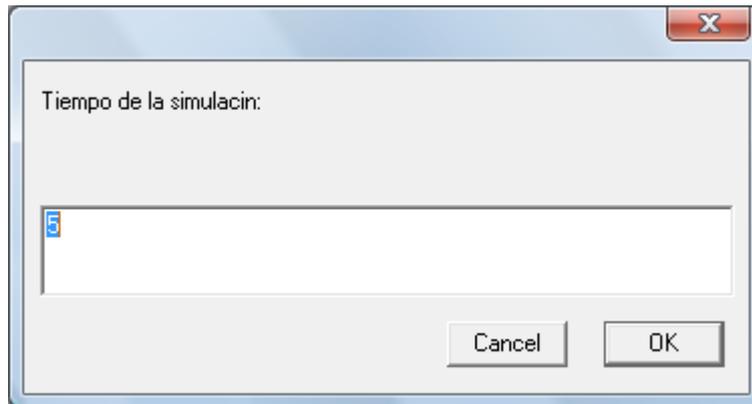


Figura A.11. Ejemplo de uso del menú Tiempo de Simulación

- **Escala de los diagramas en frecuencia:** Establecimiento del área de los diagramas de Bode que se va a mostrar en pantalla mediante el valor mínimo y máximo de cada eje en este orden:  $x_{\text{mínima}}$ ,  $x_{\text{máxima}}$ ,  $y_{\text{mínima}}$  e  $y_{\text{máxima}}$

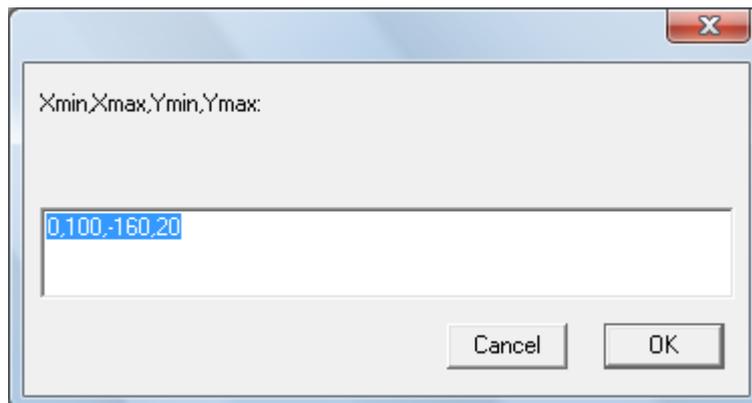


Figura A.12. Ejemplo de uso del menú Escala de los diagramas en frecuencia

- **Frecuencia a evaluar (Tabla de Bézout):** Frecuencia  $w$  para calcular la frecuencia  $w^*$ .

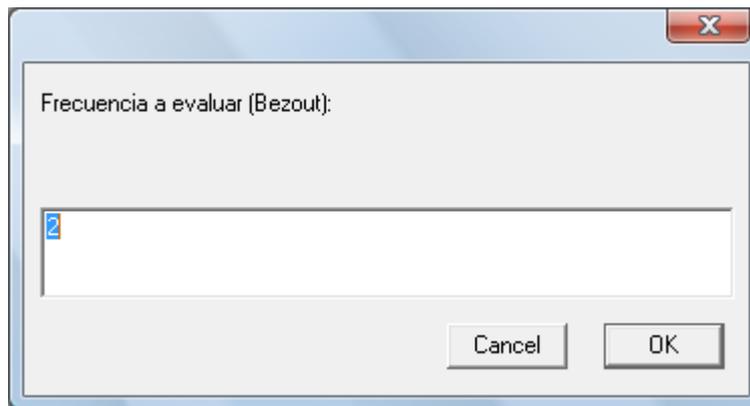


Figura A.13. Ejemplo de uso del menú Frecuencia a evaluar (Tabla de Bézout)

### *Menú parámetros del lugar de las raíces*

El elemento que contiene dicho menú se presenta en la figura A.14.

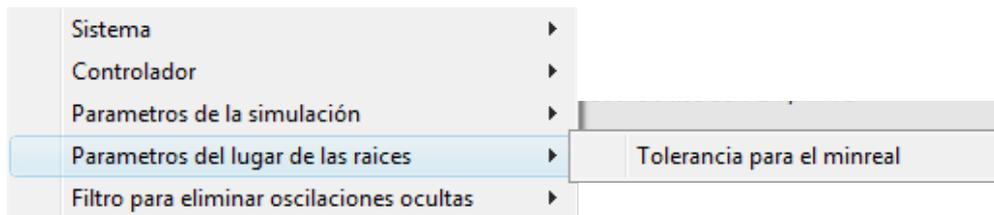


Figura A.14 Elementos del menú Parámetros del Lugar de las raíces

- **Tolerancia para el minreal:** Minreal es una función definida en Sysquake que permite simplificar las funciones de transferencia mediante la cancelación de parejas polo-cero. El sistema en bucle abierto formado por el controlador y la planta suele ser de un orden muy elevado. Esto hace que su representación del lugar de las raíces sea inservible si se hace directamente, de ahí la necesidad de usar la función minreal. La tolerancia usada por defecto por Sysquake para la cancelación de polos y ceros es de  $1.4901e-8$ ; y este valor permite cambiar a voluntad dicha tolerancia. Si la tolerancia aumenta, se producirán cancelaciones adicionales.

### Menú filtro para eliminar oscilaciones ocultas

- **Parámetros del filtro:** Coeficientes del numerador y del denominador del filtro para eliminar las oscilaciones ocultas.

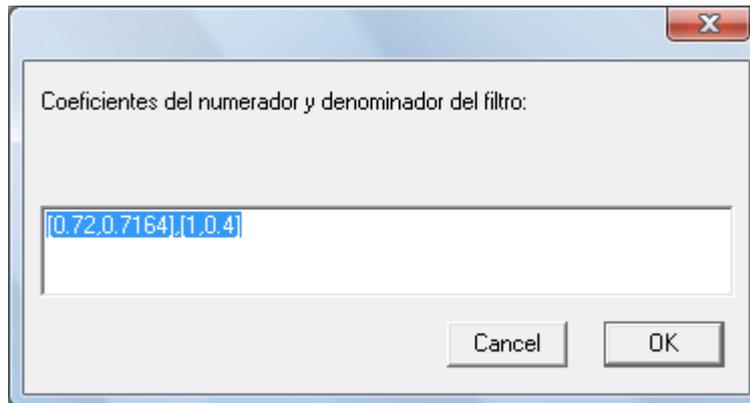


Figura A.15. Ejemplo de uso del menú “Parámetros del Filtro”

### Gráficos disponibles (pestaña plots)

Las gráficas disponibles en el programa se presentan en la figura A.16.

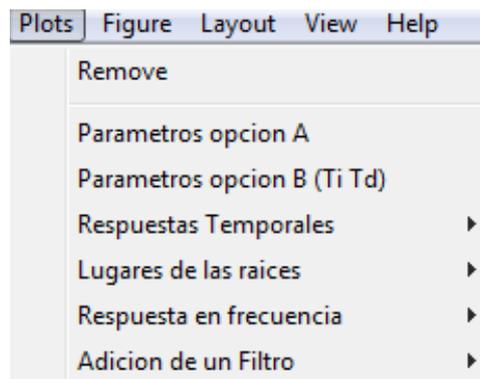


Figura A.16. Gráficas disponibles

### Parámetros opción A

Como se muestra en la figura A.17 esta gráfica proporciona *sliders* (barras deslizantes) para dar valores a los parámetros del PID ( $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ ), al tiempo de simulación y a la tolerancia de la función *minreal* para dibujar el lugar de las raíces.

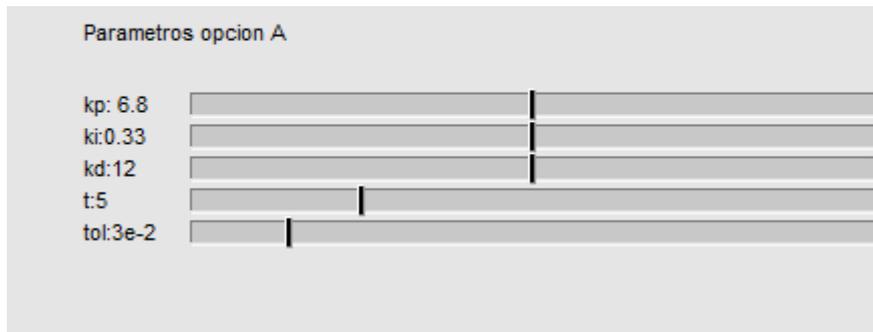


Figura A.17. Parámetros opción A

**Parámetros opción B**

Figura idéntica a la anterior, exceptuando que en vez de usar  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ , se usa  $K_p$ ,  $T_d$ ,  $T_i$ .

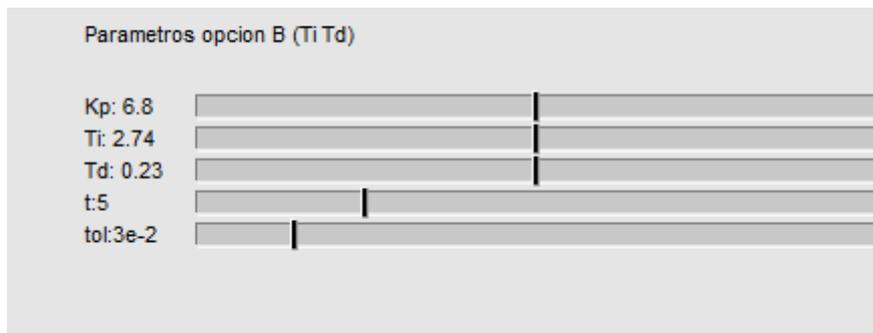


Figura A.18. Parámetros opción B

**Respuestas temporales**

Las gráficas disponibles en este menú se presentan en la figura A.19.

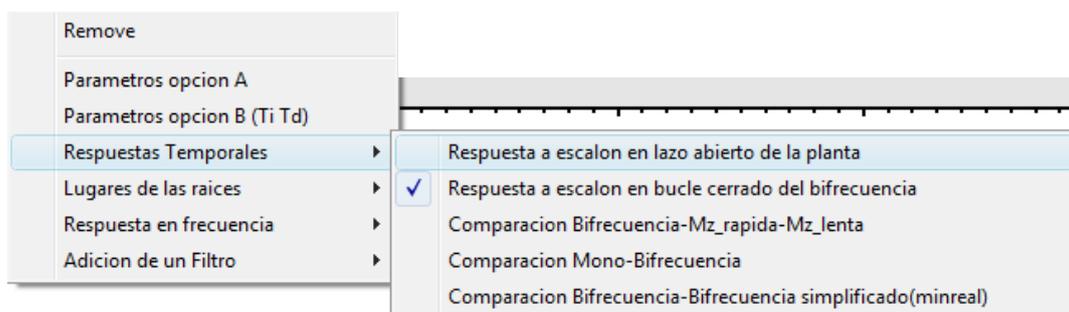


Figura A.19. Gráficas disponibles en el menú respuestas temporales

- **Respuesta a escalón en lazo abierto de la planta**

Como se puede ver en la figura A.20, esta gráfica muestra en negro la respuesta de la planta continua cuando se le aplica una entrada escalón; y en azul una señal escalón.

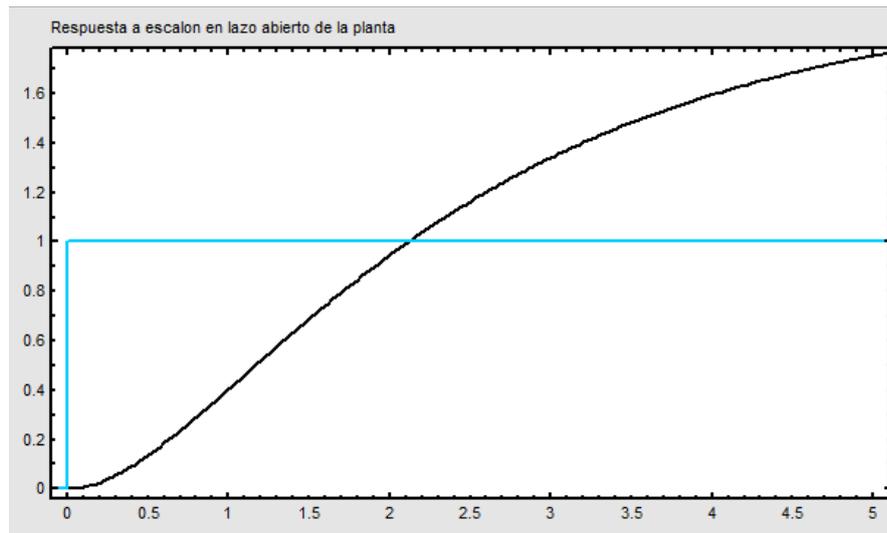


Figura A.20. Respuesta a escalón en lazo abierto de la planta

- **Respuesta a escalón en bucle cerrado del bifrecuencia**

Como se puede ver en la figura A.21, esta gráfica muestra en negro la respuesta del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante una entrada escalón; y en azul una señal escalón.

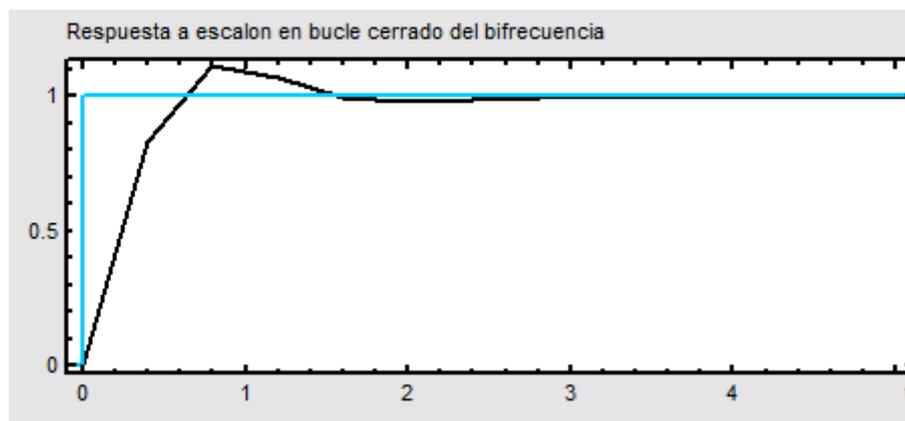


Figura A.21. Respuesta a escalón en bucle cerrado del bifrecuencia

- **Comparación bifrecuencia-M(z) Rápida-M(z) Lenta**

Muestra en una única gráfica (figura A.22):

- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante entrada escalón (verde).
- La respuesta temporal de la función de transferencia  $M(z)_{\text{rápida}}$  (definida en el apartado 4.3 como  $M_R^T(z)$ ) ante entrada escalón (rojo)
- La respuesta temporal de la función de transferencia  $M(z)_{\text{lenta}}$  (definida en el apartado 4.3 como  $M_R^{NT}(z)$ ) ante entrada escalón (negro)
- Una señal escalón (azul).

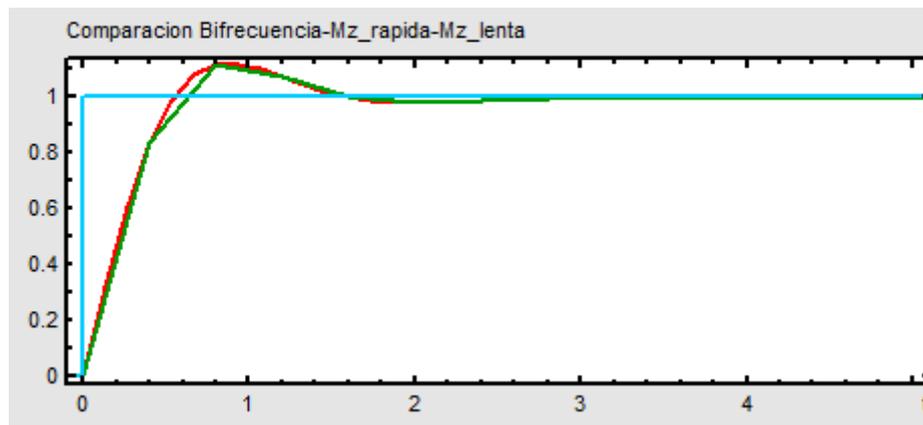


Figura A.22. Comparación Bifrecuencia-M(z) rápida–M(z) lenta

Evidentemente, la salida de las funciones de transferencia  $M(z)_{\text{rápida}}$  y  $M(z)_{\text{lenta}}$  coincide en los instantes de muestreo.

- **Comparación mono-bifrecuencia**

Muestra en una única gráfica (figura A.23):

- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante una entrada escalón (negro).
- La respuesta temporal del sistema con el controlador monofrecuencia lento en bucle cerrado ante una entrada escalón (verde).
- La respuesta temporal del sistema con el controlador monofrecuencia rápido en bucle cerrado ante una entrada escalón (rojo).
- Una señal escalón (azul).

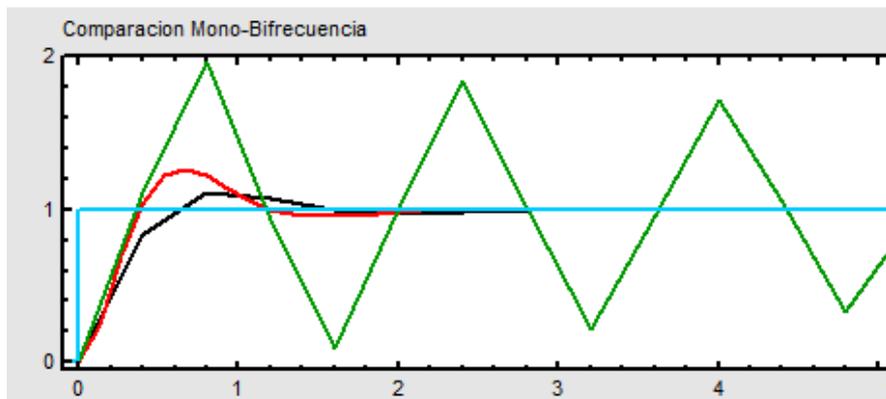


Figura A.23. Comparación Mono-Bifrecuencia

- **Comparación bifrecuencia-bifrecuencia simplificado (uso de *minreal*)**

Muestra en una única gráfica (figura A.24):

- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante una entrada escalón (negro).
- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante una entrada escalón, previa aplicación a la correspondiente función de transferencia en bucle abierto del comando *minreal*, ya explicado en el apartado anterior del presente documento (rojo).
- Una señal escalón (azul).

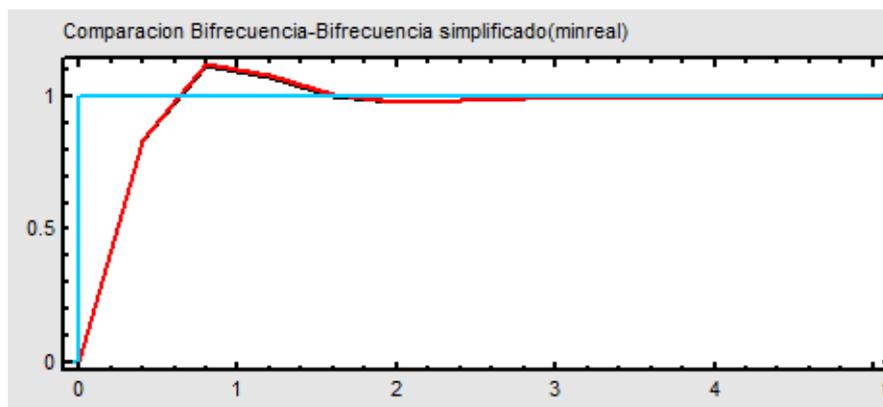


Figura A.24. Comparación Bifrecuencia-Bifrecuencia simplificado (uso de *minreal*)

El propósito de esta gráfica es el de poder saber de forma visual cuando hemos definido una tolerancia para la función *minreal* demasiado grande (las respuestas temporales serán diferentes)

### Lugares de las raíces

Las gráficas disponibles en este menú se presentan en la figura A.25.

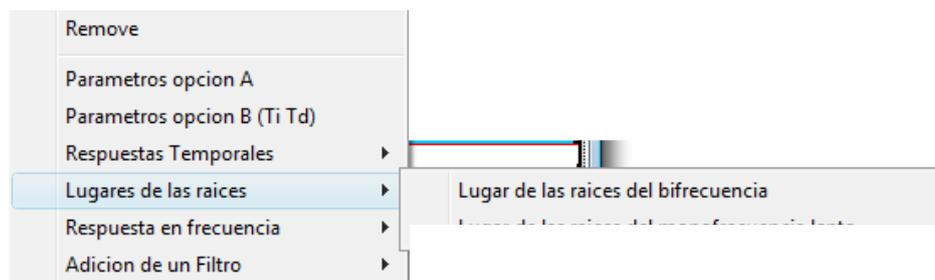


Figura A.25. Gráficas disponibles en el menú lugares de las raíces

- **Lugar de las raíces del bifrecuencia**

Los elementos que aparecen en esta gráfica son los siguientes:

- Círculos azules: Ceros de G1
- Cruces azules: Polos de G1
- Círculos verdes: Ceros de G2
- Cruces verdes: Polos de G2
- Círculos negros: Ceros del sistema bifrecuencia en bucle abierto
- Cruces negras: Polos del sistema bifrecuencia en bucle abierto

Al pasar el ratón por cualquier punto de la gráfica aparecen sus coordenadas en la esquina inferior izquierda del programa. Si además dicho punto coincide con la posición de un polo/cero, en dicha esquina aparecerá también de que elemento se trata.

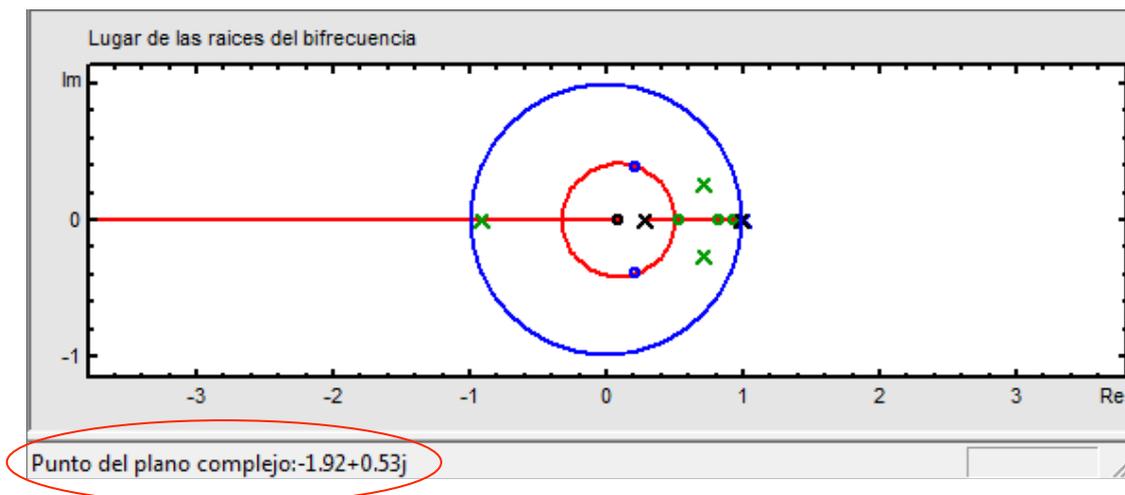


Figura A.26. Lugar de las raíces del bifrecuencia

- **Lugar de las raíces del monofrecuencia lento**

Los elementos que aparecen en esta gráfica son los siguientes:

- Círculos azules: Ceros del PID lento
- Cruces azules: Polos del PID lento
- Círculos negros: Ceros de la planta
- Cruces negras: Polos de la planta
- Triángulo: Ganancia del sistema

Al pasar el ratón por cualquier punto de la gráfica aparecen sus coordenadas en la esquina inferior izquierda del programa. Si además dicho punto coincide con la posición de un polo/cero, en dicha esquina aparecerá también de que elemento se trata.

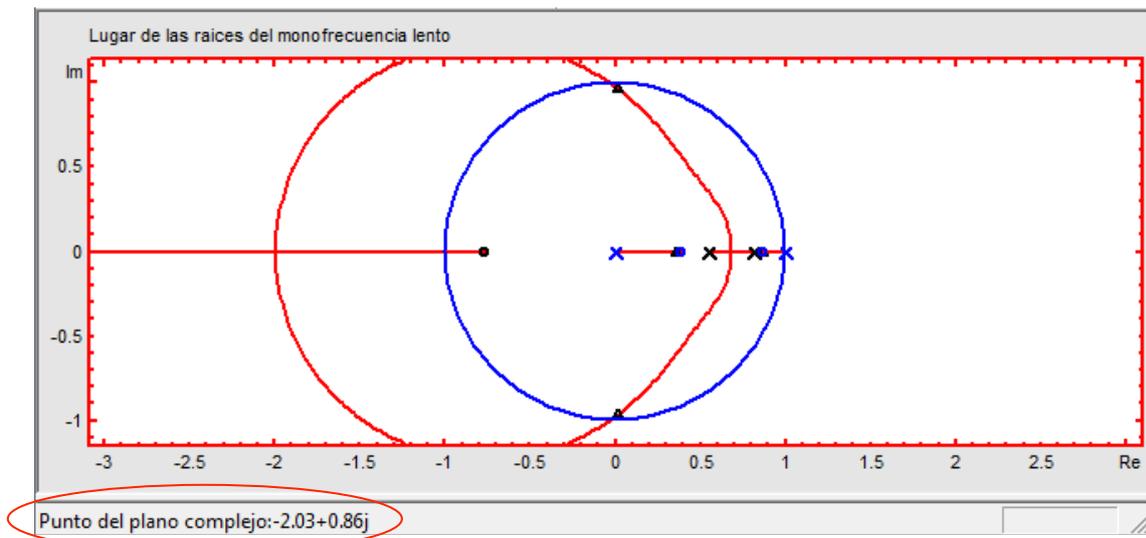


Figura A.27. Lugar de las raíces del monofrecuencia lento

Esta gráfica, además, es interactiva: Tanto los ceros del PID como la ganancia del sistema se pueden modificar pinchando y arrastrando con el ratón. Al hacer esto, los parámetros del PID se actualizarán automáticamente, así como el resto de gráficas del programa.

### Respuesta en frecuencia

Las gráficas disponibles en este menú se presentan en la figura A.28.

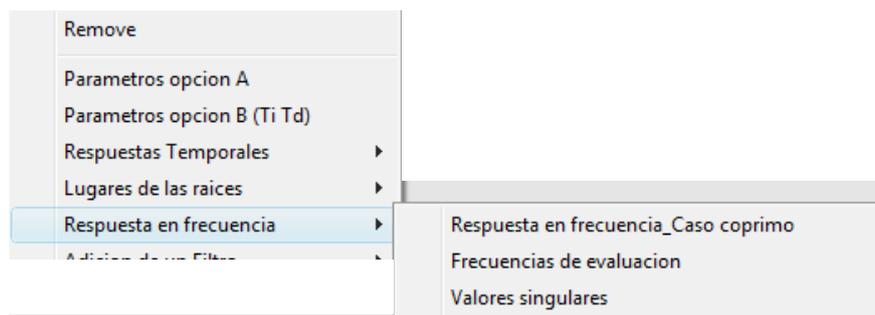


Figura A.28. Gráficas disponibles en el menú respuesta en frecuencia

- **Respuesta en frecuencia: Caso Coprimo**

Diagrama de Bode del sistema diseñado según el método explicado en [SALT11]. Al pasar el ratón por cualquier punto de la gráfica aparece su valor frecuencial en la esquina inferior izquierda del programa, como se puede observar en la figura A.29.

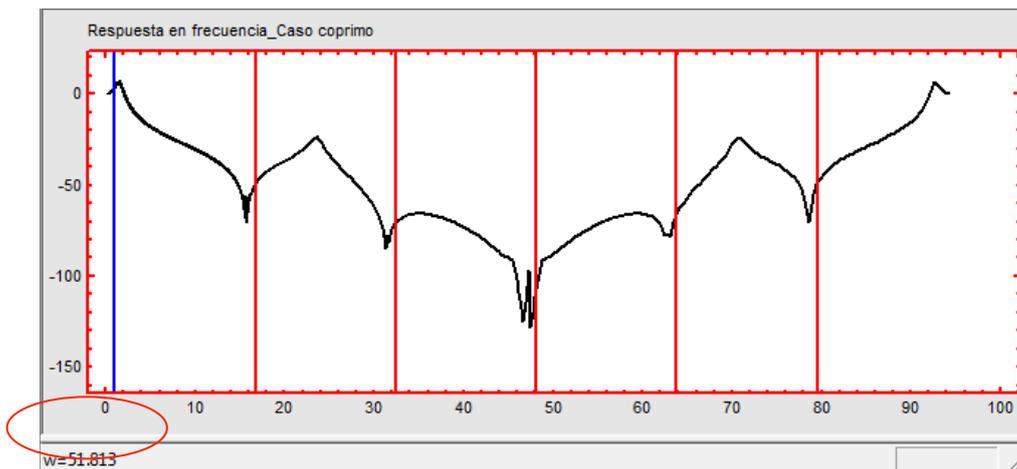


Figura A.29. Respuesta en frecuencia. Caso Coprimo

Esta gráfica, además, es interactiva: Hacer click con el ratón en cualquier punto de la misma provoca que la barra vertical azul se mueva a dicha posición; y las barras rojas cambien en consecuencia.

- **Frecuencias de evaluación**

Muestra de forma escrita la resolución de la tabla de Bézout, con  $N_u = N1$  y  $N_y = N3$

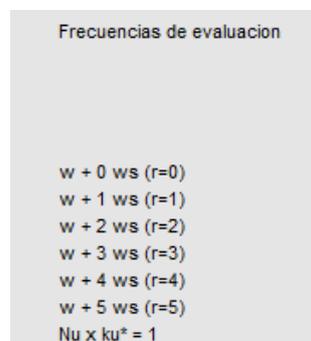


Figura A.30. Frecuencias de evaluación

- **Valores singulares:**

Obtención de la respuesta en frecuencia mediante valores singulares. Al pasar el ratón por cualquier punto de la gráfica aparece su valor frecuencial en la esquina inferior izquierda del programa, como se puede observar en la figura A.30.

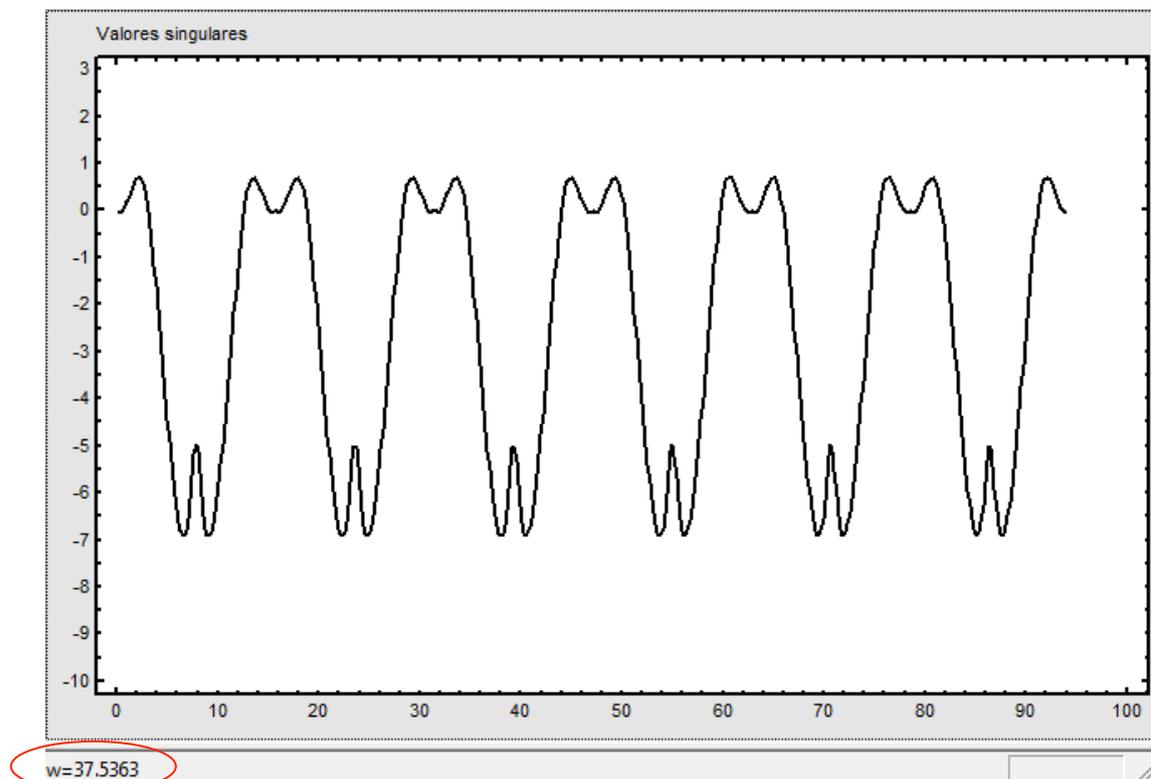


Figura A.30. Valores Singulares

### Adición de un filtro

Las gráficas disponibles en este menú se presentan en la figura A.31.

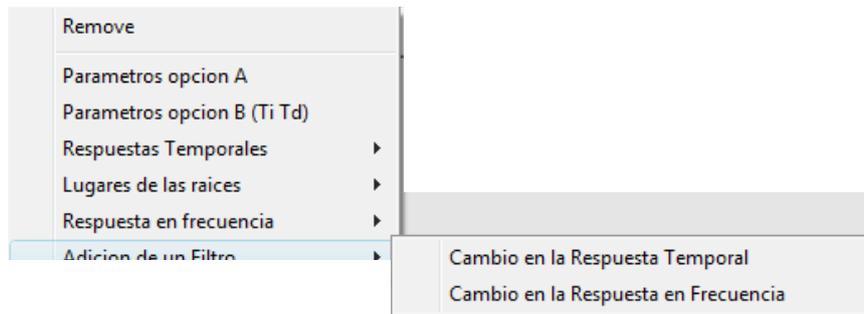


Figura A.31. Gráficas disponibles en el menú adición de un filtro

- **Cambio en la Respuesta Temporal**

Muestra en una única gráfica (figura A.32):

- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado ante una entrada escalón (negro).
- La respuesta temporal del sistema con controlador bifrecuencia en bucle cerrado al que se le ha añadido un filtro –cuyo objetivo principal es eliminar las oscilaciones ocultas- ante una entrada escalón (rojo).
- Una señal escalón (azul).

Al pasar el ratón por cualquiera de las gráficas de este menú, en la esquina inferior izquierda aparecerá el valor del eje x o, lo que es lo mismo, el valor del tiempo de simulación en ese instante.

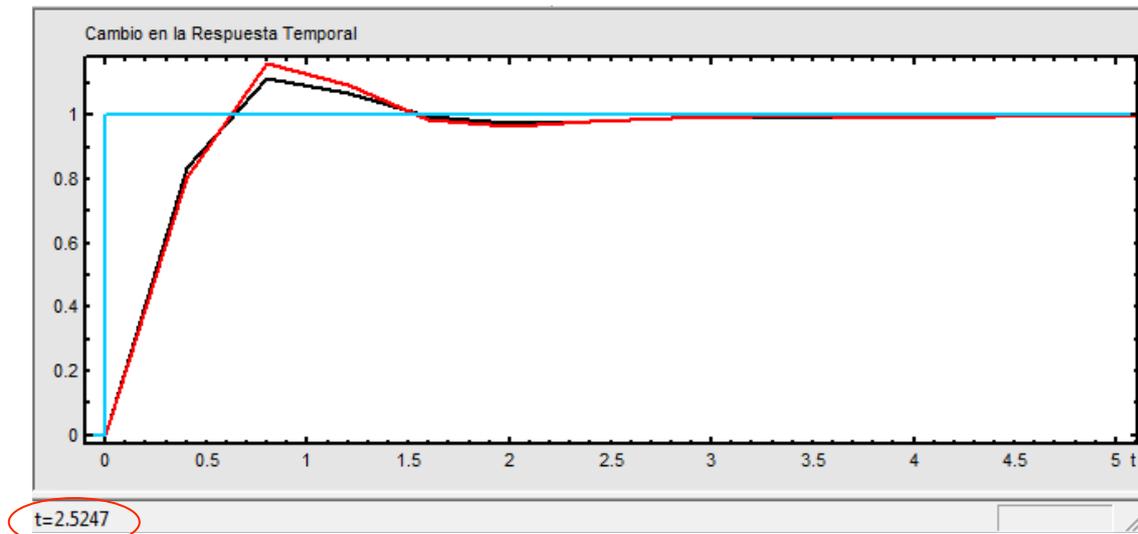


Figura A.32. Cambio en la respuesta temporal al añadir un filtro

- **Cambio en la Respuesta en Frecuencia**

Muestra en una única gráfica:

- El diagrama de Bode del sistema diseñado según [SALT11].
- El diagrama de Bode del sistema, al que se le ha añadido un filtro cuyo objetivo principal es eliminar las oscilaciones ocultas (azul)

Al pasar el ratón por cualquier punto de la gráfica aparece su valor frecuencial en la esquina inferior izquierda del programa, como se puede ver en la figura A.33.

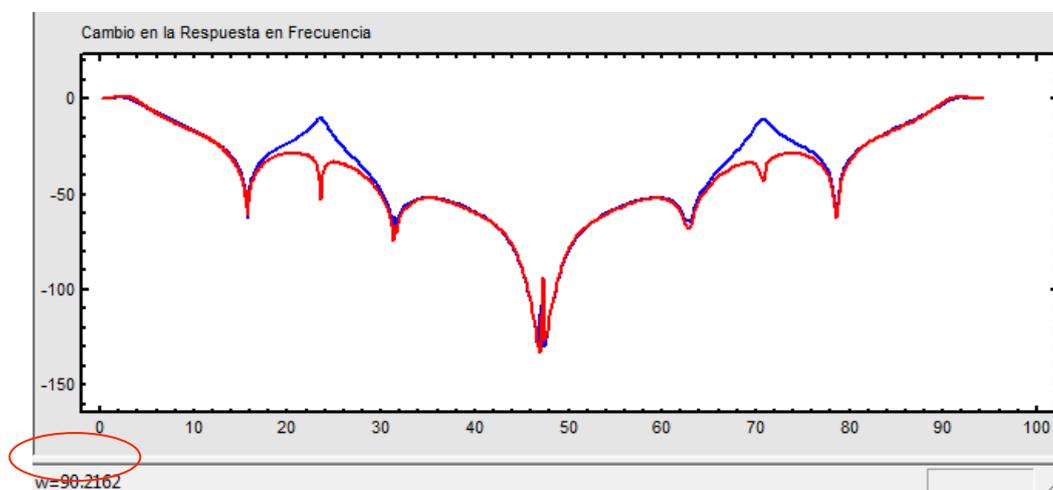


Figura A.33. Cambio en la respuesta en frecuencia al añadir un filtro

### Visualización gráfica inicial

Por defecto, al ejecutarse el archivo MADT.sq se visualizan los siguientes gráficos (figura A.34):

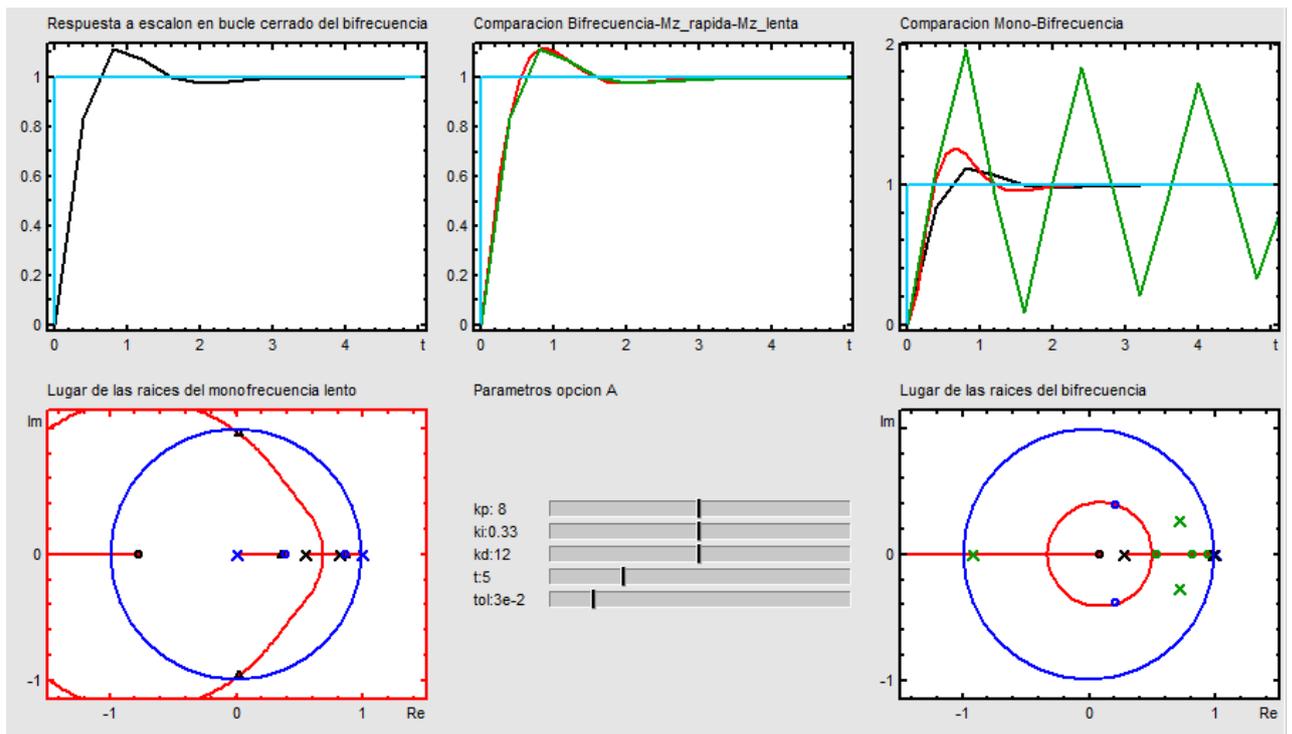


Figura A.34. Gráficos iniciales

De izquierda a derecha y de arriba abajo, son las siguientes:

- Respuesta a Escalón en Bucle Cerrado del Bifrecuencia
- Comparación Bifrecuencia- $M(z)$  Rápida- $M(z)$  Lenta
- Comparación Mono-Bifrecuencia
- Lugar de las raíces del monofrecuencia lento
- Parámetros opción A
- Lugar de las raíces del monofrecuencia lento

Se han elegido estas gráficas por considerarlas representativas de las diversas funcionalidades que ofrece el programa (Nota: La única gráfica “relevante” que falta en esta presentación inicial es la que ofrece la respuesta en frecuencia. Su no inclusión es debida a motivos funcionales: su carga computacional es muy alta comparada con el

resto de gráficas; con lo que cuando esta gráfica se muestra en pantalla la velocidad de respuesta del programa a los cambios de parámetros disminuye notablemente.).



## APÉNDICE B. PROYECTOS DE INNOVACIÓN DOCENTE

### B.1. INTRODUCCIÓN

Con la intención de favorecer la innovación y la mejora continua en la docencia, la Universidad Miguel Hernández promueve, desde el curso 2008-2009, la convocatoria de ***Proyectos de Innovación Docente en la UMH***.

Como ya se ha señalado en el capítulo 6 del presente documento, parte de las experiencias realizadas que son detalladas en esta tesis, se han desarrollado bajo el contexto de estos proyectos de innovación docente. En este apéndice se enumeran algunos de los detalles y contenidos de las acciones docentes realizadas por el autor de esta tesis junto con otros compañeros de Departamento.

#### ***Profesores participantes***

- César Fernández Peris
- Ramón P. Ñeco García
- Rafael Puerto Manchón
- M. Asunción Vicente Ripoll

Los profesores participantes pertenecen al área de *Ingeniería de Sistemas y Automática* de la Universidad Miguel Hernández de Elche, así como al grupo de investigación consolidado *Laboratorio de Control y Sistemas Inteligentes* (<http://lcsi.umh.es/>).

#### ***Entidad financiadora***

Universidad Miguel Hernández

## B.2. PROYECTO DE INNOVACIÓN, CURSO 2008-2009

### *Título del proyecto*

Aplicación de las nuevas metodologías de aprendizaje cooperativo y competitivo en las clases prácticas y teóricas de las asignaturas de Ingeniería Industrial: “Sistemas Electrónicos y Automáticos”, “Teoría de Circuitos y Sistemas” y “Control Avanzado de Sistemas”.

### *Objetivos*

- Fomentar el desarrollo de competencias.
- Integrar el trabajo en equipo como metodología de aprendizaje en el aula.
- Aumentar el interés de los alumnos por la asignatura.
- Utilizar los grupos de trabajo como método de evaluación para incrementar la nota media de los alumnos matriculados.
- Usar la competición entre grupos para aumentar la calidad de los trabajos realizados.

### *Asignaturas involucradas*

- Control avanzado de sistemas (4º de Ing. Industrial)
- Sistemas electrónicos y automáticos (4º de Ing. Industrial)
- Teoría de circuitos y sistemas (2º de Ing. Industrial)

### *Descripción de la acción*

La acción de innovación consiste en la aplicación de nuevas metodologías de aprendizaje diferentes de las clásicas “clases magistrales” en el aula de teoría y las “prácticas guiadas” en el laboratorio. En concreto, se han utilizado los aprendizajes cooperativo y competitivo en las clases prácticas y teóricas de las asignaturas de Ingeniería Industrial: Sistemas Electrónicos y Automáticos (SEA, de 4º curso de Ingeniería Industrial), Teoría de Circuitos y Sistemas (TCS, de 2º curso de Ingeniería Industrial) y Control Avanzado de Sistemas (CAS, de 4º curso de Ingeniería Industrial).

### *Cronograma de la acción*

#### *1º cuatrimestre curso 2008-2009:*

- Utilizar como metodología innovadora: grupos cooperativos en Instrumentación (SEA)

#### *2º cuatrimestre curso 2008-2009:*

- Utilizar como metodología innovadora:
  - grupos cooperativos y trabajos competitivos en Microcontroladores (SEA)
  - exámenes cooperativos y trabajos competitivos en prácticas de laboratorio de Sistemas (TCS)
  - grupos cooperativos y trabajos competitivos en CAS

#### *1º cuatrimestre curso 2009-2010:*

- Se repetirá la experiencia, corrigiendo los problemas que hayan surgido durante el curso anterior.

## B.3. PROYECTO DE INNOVACIÓN, CURSO 2009-2010

### *Título del proyecto*

Uso de la nueva aplicación docente “Sitio Web Colaborativo de la Asignatura” para desarrollar y potenciar las metodologías de aprendizaje cooperativo y competitivo en las asignaturas de Ingeniería Industrial indicadas en el proyecto: SEA, TCS, CAS y MIS.

### *Objetivos*

- Utilización del Sitio Web Colaborativo de la Asignatura por parte de los alumnos.
- Optimizar la gestión de la asignatura por parte del profesor.
- Integrar el trabajo en equipo como metodología de aprendizaje en el aula.
- Aumentar el interés de los alumnos por la asignatura.

- Utilizar los grupos de trabajo como método de evaluación para incrementar la nota media de los alumnos matriculados.
- Usar la competición entre grupos para aumentar la calidad de los trabajos realizados.

### *Asignaturas involucradas*

- Control avanzado de sistemas (4º de Ing. Industrial)
- Modelado e Identificación de sistemas (5º de Ing. Industrial)
- Sistemas electrónicos y automáticos (4º de Ing. Industrial)
- Teoría de circuitos y sistemas (2º de Ing. Industrial)

### *Descripción de la acción*

Nuestra propuesta se basa en la introducción de la nueva aplicación docente “Sitio Web Colaborativo de la Asignatura (SWCA)” para desarrollar y potenciar las metodologías de aprendizaje cooperativo y competitivo en las asignaturas de Ingeniería Industrial en las que actualmente estamos utilizando estos métodos para mejorar la docencia y motivar el interés del alumnado.

La herramienta SWCA está diseñada con la finalidad de facilitar la interacción entre los alumnos y el profesor. Para ello, dispone de una serie de funciones o aplicaciones como la wiki, donde el profesor puede publicar sus apuntes de una forma ordenada y los alumnos pueden participar en la mejora de éstos; los blogs y debates, donde se pueden crear líneas específicas de discusión y diálogo; y la biblioteca de documentos, donde el profesor puede publicar material y los alumnos pueden subir sus propios documentos (por ejemplo, trabajos realizados).

Actualmente, la interacción entre los alumnos dentro de un mismo grupo de trabajo (los grupos de trabajo cooperativos están compuestos por equipos de 3 o más alumnos) se realiza mediante las reuniones físicas de su grupo para realizar las tareas en equipo y mediante el uso del correo electrónico personal. Para la mayoría de los alumnos, esta interacción es suficiente para desarrollar y completar con éxito sus trabajos; sin embargo, algunos alumnos que disponen de menos tiempo para reunirse físicamente con sus compañeros, necesitan de alguna otra herramienta on-line que les permita mayor comunicación entre los miembros de su grupo. La herramienta SWCA puede ayudar en este aspecto.

Por otro lado, la interacción entre los alumnos (en grupo e independientes) y el profesor se realiza actualmente durante las clases presenciales, las tutorías y por email. El profesor dispone de mayor capacidad de comunicación puesto que tiene a su disposición la web de la asignatura que le permite publicar documentación y mensajes. Además, en nuestro caso, disponemos de un servidor web que utilizamos de apoyo para la difusión de la información.

Sin embargo, la comunicación desde el alumno hacia el profesor es más compleja y costosa para el profesor, sobre todo, cuando el profesor pretende recopilar información de los alumnos, entonces debe utilizar por ejemplo, el email y procesar posteriormente la información. Un ejemplo de la dificultad y el coste de esta comunicación ya lo hemos experimentado con la asignatura SEA, que pasamos a describir:

En el bloque de Instrumentación, dentro de la asignatura de SEA, una tarea cooperativa ha sido realizar un trabajo en equipo y procesarlo para que luego el resto de compañeros lo evalúen. Este proceso se ha realizado de la siguiente forma:

1. El profesor publica la descripción del trabajo en la web de asignatura (dentro de material) y como anuncio.
2. Los alumnos trabajan en grupo y realizan el trabajo. Le dan formato HTML o PDF y lo envían al profesor por email o se lo entregan físicamente mediante un CD.
3. El profesor recopila todos los trabajos y realiza una web para publicarlos y que todos los alumnos puedan acceder a ellos. Además publica un anuncio donde se explica cómo realizar el proceso de evaluación (votación por email).
4. Los alumnos consultan los trabajos del resto de compañeros y realizan la votación de los trabajos, enviando un email al profesor con las notas.
5. El profesor procesa la información recibida de los alumnos por email (las notas de los trabajos) y, publica los resultados como un anuncio.

Para completar con éxito todo el proceso anterior el profesor ha de utilizar diferentes herramientas de ámbitos muy diferentes: email, material en la web oficial, programa para crear un HTML donde enlazar los trabajos, acceso por ftp al servidor local para publicar la web, anuncios en web oficial, programa Excel... y dedicar mucho tiempo para procesar toda la información hasta obtener finalmente una tabla con las calificaciones de los trabajos.

La herramienta SWCA puede ayudar a reducir el coste de la tarea antes descrita, puesto que permite que una misma herramienta sea utilizada por profesores y alumnos para interactuar, por ejemplo, en la publicación de documentos (guiones de tareas del profesor y trabajos de los alumnos) y el debate de los trabajos.

Nuestra propuesta consiste en estudiar a fondo todas las posibilidades que ofrece la herramienta SWCA, aplicarla a las actividades de aprendizaje cooperativo y competitivo en las asignaturas de este proyecto (SEA, TCS, CAS y MIS), y adicionalmente, añadir funcionalidades que permitan, entre otras, las siguientes interacciones:

- Creación de grupos de trabajo cooperativos (equipos de alumnos con un número determinado de miembros), de modo que, puedan enviarse información entre ellos de modo privado.
- Posibilitar un sistema de votación para que los alumnos puedan evaluar los trabajos de sus compañeros.
- Utilización de los blogs para que el profesor pueda comprobar que la interacción entre los alumnos de un grupo ha sido la adecuada y que todos los alumnos han colaborado en la realización de las tareas.

### *Cronograma de la acción*

#### *1º cuatrimestre curso 2009-2010*

- Utilizar como metodología innovadora:
  - grupos cooperativos en Instrumentación (SEA)
  - grupos cooperativos y trabajos competitivos en CAS
  - grupos cooperativos y trabajos competitivos en MIS
  - exámenes cooperativos y trabajos competitivos en prácticas de laboratorio de Sistemas (TCS)

#### *2º cuatrimestre curso 2009-2010*

- Añadir la herramienta Sitio Web Colaborativo de la Asignatura para la docencia junto con las metodologías ya mencionadas:
  - grupos cooperativos y trabajos competitivos en Microcontroladores + Sitio Web Colaborativo (SEA)

- exámenes cooperativos y trabajos competitivos en prácticas de laboratorio de Sistemas + Sitio Web Colaborativo (TCS)
- grupos cooperativos y trabajos competitivos + Sitio Web Colaborativo en CAS
- grupos cooperativos y trabajos competitivos + Sitio Web Colaborativo en MIS

#### *1º cuatrimestre curso 2010-2011*

- Se repetirá la experiencia si ha sido positiva, corrigiendo los problemas que hayan surgido durante el curso anterior.

### B.4. PROYECTO DE INNOVACIÓN, CURSO 2010-2011

#### *Título del proyecto*

Materiales docentes y estrategias cooperativas en asignaturas avanzadas de automatización industrial

#### *Objetivos*

- Proporcionar a los estudiantes materiales docentes adaptados al nivel exigido en las asignaturas implicadas para su uso tanto en la docencia presencial como online.
- Introducir las herramientas Google en las asignaturas avanzadas de especialidad de automatización industrial para conseguir una mayor interacción docente con los estudiantes.
- Fomentar las técnicas de aprendizaje cooperativo y colaborativo.

#### *Asignaturas involucradas*

- Control Avanzado de Sistemas (4º de Ing. Industrial)
- Ingeniería de Control (Master en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación)

#### *Descripción de la acción*

Se pretende elaborar materiales docentes y de divulgación didáctica de dos asignaturas (una de grado y otra de postgrado) en el ámbito de las titulaciones de Ingeniería. Los materiales se elaborarán con el objetivo de suplir la carencia de bibliografía adecuada al nivel que se exige en estas asignaturas además de fomentar el aprendizaje cooperativo y colaborativo. Se utilizarán los recursos Google como herramientas para compartir el material y coordinar las tareas cooperativas en la docencia de las asignaturas

### *Cronograma de la acción*

#### *1º cuatrimestre curso 2010-2011*

- Elaboración del material docente y conversión a formato electrónico para su posterior divulgación.

#### *2º cuatrimestre curso 2010-2011:*

- Creación de los sitios web de las asignaturas implicadas en la acción y divulgación de los contenidos desarrollados

#### *1º cuatrimestre curso 2011-2012:*

- Se repetirá la experiencia, corrigiendo los problemas que hayan surgido durante el curso anterior.

# BIBLIOGRAFÍA



- [AGU03] A. Aguado Behar, M.A. Martínez Iranzo, *Identificación y Control Adaptativo*, Prentice-Hall, 2003.
- [ALB03] P. Albertos, J. Salt, S. Dormido and A. Cuenca, *An interactive simulation tool for study of multirate sampled data systems*, in *IFAC Symposium on Advances Control Education*, Oulu, 2003.
- [ANG10] J. Ang, B. Sangram, B.P. Ingalls, D.R. McMillen, *Considerations for using Integral Feedback Control to Construct a Perfectly Adapting Synthetic Gene Network*, *Journal of Theoretical Biology* vol. 266 pp. 723-738, 2010.
- [AND10] M. Anderle, S. Celikovsky, D. Henrion, J. Zikmund, *Advanced LMI based Analysis and Design for Acrobot Walking*, *International Journal of Control*, vol. 83, no. 8, pp. 1641–1652, 2010.
- [ARA10] Santina de F. Arantes, J.E. Muñoz Rivera, *Optimal Control Theory for Ambient Pollution*, *International Journal of Control*, vol. 83, no. 11, pp. 2261-2275, 2010.
- [AST09] Karl J. Aström, T. Hägglund, *Control PID avanzado*, Ed. Pearson Education, 2009.
- [AUS99] Ausserhofer, *Web-based teaching and learning: A panacea?*, *IEEE Commun Mag* 37, 92 – 96, 1999.
- [AYAS07] S. Ayasun and G. Karbeyaz, *DC motor speed control methods using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses*, *Computer Engineering Education* 15, 347 – 354, 2007.
- [BAC99] D. R. Bacon, K. A. Stewart, and W. S. Silver, *Lessons from the best and worst student team experiences: How a teacher can make the difference*, *J. Manage. Educ.*, vol. 23, pp. 467–488, 1999.
- [BALD08] S. Baldiris, O. C. Santos, S. Baldiris, C. Barrera, J. G. Boticario, J. Velez, R. Fabregat, *Integration of educational specifications and standards to support adaptive learning scenarios*, in *International Journal of Computer Science and Applications (IJCSA)*. Special Issue on New Trends on AI techniques for Educational Technologies. Vol 5, 1, 2008.
- [BAR10] G. Bartolini; E. Punta, *Reduced order observers for the sliding mode control of mechanical systems with elastic joints*, *International Journal of Control*, vol. 83, no. 7, pp. 1364–1373, 2010.

- [BELL64] R.E. Bellman, R. Kalaba, *Selected papers on mathematical trends in control theory*, Dover Publications, 1964.
- [BER05] Bermejo, S., *Cooperative electronic learning in virtual laboratories through forums*, IEEE Transactions on Education, vol.48, no.1, pp. 140- 149, Feb. 2005.
- [BER99] E. Bernabéu, M. Martínez, *Diseño Algebraico de Controladores Discretos. Problemas Resueltos*, S.P. UPV, 1999
- [BERN97] Bernabeu E.J., Valera A., Puerto R., Salt J., *Identificación y control adaptativo de sistemas. Una metodología para su aprendizaje*, V Congreso universitario sobre innovación metodológica en las enseñanzas técnicas, Barcelona 1997.
- [BIR02] C. Birmingham and M. McCord, *Group process research: Implications for using learning groups*, in *Team-Based Learning: A Transformative Use of Small Groups*, L. K. Michaelsen, A. B. Knight, and L. D. Fink, Eds. Sterling, VA: Stylus, pp. 77–97, 2002.
- [BOSC94] P.P.J van den Bosch, A.C. van der Klauw, *Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems*, CRC Press, 1994.
- [BOT03] González Boticario, J. y Gaudioso E., *Sistemas Interactivos de Enseñanza/Aprendizaje*. Editorial: Sanz y Torres, 2003.
- [BOW00] Bowen, C.W., *A quantitative literature review of cooperative learning effects on high school and college chemistry achievement*. Journal of Chemical Education, 77(1), 116–119, 2000.
- [BRI09] Brito, N., Ribeiro, P., Soares, F., Monteiro, C., Carvalho, V., Vasconcelos, R., *A Remote System for Water Tank Level Monitoring and Control - a Collaborative Case-study*, in *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronic (ICELIE)*, Porto, Portugal, 2009.
- [CAS04] Casanova V., *Sistemas de Control Basados en Red. Modelado y Diseño de Estructuras de Control*, Tesis Doctoral, UPV 2005.
- [CASA05] Casini, M., Prattichizzo, D., Vicino, A., *The Automatic Control Telelab. A Web based technology for Distance Learning*, IEEE Control Systems Magazine 24(3), 36–44, 2004.
- [CASIO3] M. Casini, D. Prattichizzo, and A. Vicino, *The automatic control telelab: A user-friendly interface for distance learning*, IEEE Transaction Education 46 (2003), 252 – 257 .

- [CEF03] Cefalo, M., Lanari, L., Oriolo, G., Venditelli, M., *The REAL Lab: Remote Experiments for Active Learning*, in Proceedings XLI AICA Annual Congress, Trento, Italia, 2003.
- [CHA11] Chang Woo Nam, Ronald D. Zellner, *The relative effects of positive interdependence and group processing on student achievement and attitude in online cooperative learning*, Computers & Education, Volume 56, Issue 3, April 2011, Pages 680-688, 2011.
- [CHAN07] J.P. Chancelier, F. Delebecque, C. Gomez, M. Goursat, R. Nikoukhah, S. Steer, *Introduction à Scilab*, 2007, ISBN: 978-2-287-25247-1
- [CHEN06] Chen, C., Wu, J., & Yang, S., *The efficacy of online cooperative learning systems: the perspective of task-technology fit*. Campus-Wide Information Systems, 23(3), 112–127, 2006.
- [COFF66] T.C. Coffey y I.J. Williams, *Stability analysis of multiloop, multirate sampled systems*, AIAA J. Guild. Control Dyna., nº 4, pp 2178-2190, 1966.
- [COL00] Colbeck, C. L., Campbell, S. E., & Bjorklund, S. A., *Grouping in the dark: what college students learn from group projects*, The Journal of Higher Education, 71(1), 60–83, 2000.
- [COS09] Costas, L., Fariña, J., Rodríguez, J., *A Configurable Framework for the Education of Digital Electronic Control Systems*, in Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronic (ICELIE), Porto, Portugal, 2009.
- [COS10] Costa-Castelló, R., Vallés, M., Jiménez, L., Díaz-Guerra, L., Valera, A. & Puerto, R., *Integración de dispositivos físicos en un laboratorio remoto de control mediante diferentes plataformas: Labview, Matlab y C/C++*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI) 7(1), 23–34, 2010.
- [CU06] Cuesta, A., Grau, Luis ; Lopez, I., *CACSD tools for tuning Multi-Rate PID controllers in time and frequency domains*, Computer Aided Control System Design, IEEE International Conference on Control Applications, IEEE International Symposium on Intelligent Control, 4-6 oct. 2006.
- [DEW95] J. Dewell, *Democracia y educación*, Morata, 1995.
- [DEW08] J. Dewell, *Teoría de la valoración*, Siruela, 2008.
- [DIEZ98] Díez J.L., Puerto R., *Procesamiento de Señal. Prácticas con Matlab y Simulink*, S.P. UPV, Valencia 1998.

[DIEZ98-1] Díez J.L., Puerto, R., Frías, V., *Aplicación del Método del Caso en los Estudios de Ingeniería*, VI Congreso universitario de innovación educativa en las enseñanzas técnicas, Las Palmas de G.C. (Spain) 1998.

[DIEZ02] J. L. Díez, M. Valles, A. Valera, and J. L. Navarro, *Remote industrial process control with Matlab web Server*, Internet Based Control Education (2002).

[DIMM00] M. Dimmler, Y. Pigué, *Intuitive design of complex real-time control systems*. In Rapid System Prototyping, Paris, 2000.

[DING06] J. Ding, F. Marcassa, S. Ch. Wu, M. Tomizuka, *Multirate control for computing saving*, IEEE Transactions on control systems technology, vol. 14, no 1, 2006.

[DIX01] W. Dixon, D. Dawson, B. Costic, and M. de Queiroz, *Towards the standardization of a matlab-based control systems laboratory experience for undergraduate students*, Proc Am Control Conf (2001), 1161 – 1166.

[DIX02] W. Dixon, D. Dawson, B. Costic, and M. de Queiroz, *A matlab-based control systems laboratory experience for undergraduate students: Toward standardization and shared resources*, IEEE Trans Educ 45 (2002), 218 – 226.

[DOM02] S. Domínguez, P. Campoy, J.M. Sebastian, A. Jiménez, *Control en el Espacio de Estado*, Ed. Prentice Hall, 2002.

[DOR03] S. Dormido, *The role of interactivity in control learning*. In Proc. of 6th IFAC Symposium on Advances in Control Education, pages 11-22, Oulu, Finland, 2003.

[DOR04-1] Dormido, S., Martín, C., Pastor, R., Sánchez, J., Esquembre, F., *Magnetic levitation system*, in Proceedings of the American Control Conference, Boston, USA, 2004.

[DOR04-2] S. Dormido, *Control learning: present and future*, Annual Reviews in Control, vol. 28, no. 1, pp. 115–136, 2004.

[DOR05] S. Dormido, S. Dormido-Canto, R. Dormido, J. Sánchez, and N. Duro, *The role of interactivity in control learning*, International Journal of Engineering Education, vol. 21, no. 6, pp. 1122–1133, 2005.

[DORF05] R.C. Dorf, R.H. Bishop, *Sistemas de Control Moderno*, Pearson Educación, 2005.

[DOY90] J. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., 1990.

- [EIK06] Eikaas, T. I., Foss, B. A., Solbjorg, O. K., Bjolseth, T., *Game-based dynamic simulations supporting technical education and training*, International Journal of Online Engineering 2(2), 2006.
- [EMB06] M. Embiruçu, C. Fontes, *Multirate multivariable generalized predictive control and its application to a slurry reactor for ethylene polymerization*, Chemical Engineering Science, Elsevier Ltd., vol. 61, issue 17, pp. 5754-5767, 2006.
- [ESQ04] Esquembre, F., *Easy Java Simulations: a software tool to create scientific simulations in Java*, Computer Physics Communications 156, 109–204, 2004.
- [EXEL00] M. Exel, S. Gentil, F. Michau, and D. Rey, *Simulation workshop and remote laboratory: Two web-based training approaches for control*, Proc Control Conf (2000), 3468 – 3472.
- [FEL99] R. M. Felder and R. Brent, *How to improve teaching quality*, Quality Management Journal, vol. 6, no. 4, pp. 9–21, 1999.
- [FEL98] R. M. Felder, G. N. Felder, and E. J. Dietz, *A longitudinal study of engineering student performance and retention—Comparisons with traditionally- taught students*, Journal of Engineering Education, vol. 87, no. 4, pp. 469–480, 1998.
- [FERN04] Fernández C., Vicente M.A., Puerto R., *Enseñanza en asignaturas de Control apoyada en equipos experimentales virtuales*, VI Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, Valencia 2004.
- [FERN06] Fernández C., Vicente M.A., Gil A., Puerto R., Payá L., *Asignaturas intensivas impartidas por profesores visitantes en el marco del programa Sócrates/Erasmus*, VI Congreso Internacional Virtual de Educación CIVE 2006 (CiberEduca), 2006.
- [FERN99] Fernández C. Puerto R., Reinoso O., Aracil R., *Learning Strategies for Teleoperation*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent Robotic, Coimbra (Portugal) 1999.
- [FIE85] S. B. Fiechtner and E. A. Davis, *Why some groups fail: A survey of students' experiences with learning groups*, Org. Behav. Teach. Rev., vol. 9, pp. 75–88, 1985.
- [GAR99] Garcia, R. C., Heck, B. S., *Enhancing classical controls education via interactive GUI design*, IEEE Control Systems Magazine, 19, nº 3, pp. 77-82, 1999.
- [GDUMH07] J.F. González Carbonell y M.C. López Ruíz, *Guía docente de la UMH*, Universidad Miguel Hernández, 2007.

- [GIL07] C. Gil, M.G. Montoya, A. Alias, R. Baños: *Comparative Study Between Individual and Group Activities*. International Technology, Education and Development Conference, INTED 2007.
- [GIL08] C. Gil, F. G. Montoya, R. Baños, A. Alías, M.G. Montoya, *Competencies Development in Engineering via Active Methodologies*, International Technology, Education and Development Conference, INTED 2008. pp 511, 2008.
- [GLAS89] Glaser, R., & Bassok, M, *Learning theory and the study of instruction*, Annual Review of Psychology, 40(1), 631–666, 1989.
- [GLU11] T. Glück, W. Kemmetmüller, C. Tump, A. Kugi, *A Novel Robust Position Estimator for Self-Sensing Magnetic Levitation Systems based on Least Squares Identification*, Control Engineering Practice, vol. 19, no. 2, pp. 146-157, 2011.
- [GODB90] L. F. Godbout, D. Jordan, I.S. Apostolakis, *Closed loop model for general multirate digital control systems*, IEE Proceedings, Vol. 137, pp. 326-336, 1990.
- [GOL99] Goldberg, K., Gentner, S., Sutter, C., & Wiegley, J., *The Mercury Project: A Feasibility Study for Internet Robots*. IEEE Robotics & Automation Magazine , Vol. 7, Núm. 1, págs. 35-40, 1999.
- [GOM07] Gomes, L., García – Zubía (eds.), *Advances on remote laboratoires and e-learning experiences*, University of Deusto, 2007.
- [GOR09] R.B. Gorbet, K.A. Morris, R.C. Chau, *Controller Gain Optimization for Position Control of an SMA Wire Actuator*, Smart Materials and Structures, vol. 18, no. 9, 2009.
- [GUZ06] J. L. Guzman, *Interactive control system design*. Ph.D. thesis, Universidad de Almeria, Spain, 2006.
- [GUZ07] Guzmán, J.L., Vargas, H., Sánchez, J., Berenguel, M., Dormido, S., *Education Research in Engineering Studies: Interactivity, Virtual and Remote Labs*. Distance Education Research Trends, Nova Science Publisher , págs. 1-43, 2007.
- [HAN00] Hahn, H. H., Spong, M. W., *Remote Laboratories for Control Education*, in Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control), Sydney, Australia, 2000.
- [HEW08] Hew, K., & Cheung, W. *Attracting student participation in asynchronous online discussions: a case study of peer facilitation*. Computers & Education, 51(3), 1111–1124, 2008.
- [HES00] Hesselink, L., Bjornson, E., Rizal, D., *CyberLab, A New Paradigm in Distance Learning*. NSF Meeting, 2000.

- [HUR64] A. Hurwitz, *On The Conditions under which an Equation has Only Roots With Negative Real Parts*, Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory, 1964.
- [JIE09] Jie Liu; Ruidong Su; Shan Liu; *A Scilab/Scicos-based modeling and simulation toolbox for flexible manipulator*, IEEE International Workshop on Open-source Software for Scientific Computation (OSSC), 2009.
- [JIM00] Jiménez L.M., Puerto, R., Reinoso O., *Sistemas Informáticos de Tiempo Real*, ISBN: 84-95315-51-3, UMH, Elche, 2000.
- [JIM05] Jiménez L.M., Puerto, R., Reinoso O., Fernández C., Ñeco R., *RECOLAB: Laboratorio Remoto de Control utilizando Matlab y Simulink*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI), Abril 2005.
- [JIM07] Jiménez L.M., Puerto, R., Reinoso O., Fernández C., Ñeco, *Remote Control Laboratory using Matlab and Simulink*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo - Spain June 4-7 2007, Ed. IEEE ISBN: 1-4244-0755-9 ISSN: IEEE Catalog Number: 07H8928C - pp. 2963-2967
- [JOH06] Johnson, D.W.; Johnson, R.T.; Smith, K.A. *Active Learning: Cooperation in the College Classroom*, 3ª edición. Interaction Book Company, 2006.
- [JOH02] D. W. Johnson, R. T. Johnson, and E. J. Holubec, *Circles of Learning: Cooperation in the Classroom*, 5th ed. Edina, MN: Interaction Book Company, pp. 95–160, 2002.
- [JOH98] Johansson, M., Gäfvert, M., Åström, K. J., *Interactive tools for education in automatic control*, IEEE Control Systems Magazine, 18, nº 3, pp. 33-40, 1998.
- [JON05] Jones, A., & Issroff, K., *Learning technologies: affective and social issues in computer-supported collaborative learning*. Computers & Education, 44(4), 395–408, 2005.
- [KLEIR96] N. A. Kleir, K. J. Astrom, D. Auslander, K. Cheok, G. F. Franklin, N. Masten, and M. Rabins, *Control systems engineering education*, Automatica 32 (1996), 147 – 166.
- [KOL96] A. Kolmos, *Reflections on project work and problem-based learning*, European Journal of Engineering Education., vol. 21, no. 2, pp. 141–148, 1996.
- [KUO01] B. Kuo , *Sistemas de Control Automático*, Prentice-Hall, 1996.
- [LEV96] William S. Levine (Ed.), *The Control Handbook*, CRC Press and IEEE Press, 1996.

- [LIA09] Liao Wenjiang, Dong Nanping, Fan Tongshun, *The application of Scilab/Scicos in the lecture of automatic control theory*, IEEE International Workshop on Open-source Software for Scientific Computation (OSSC), 2009.
- [LOP09] López, J.A., *Nuevas estrategias en el desarrollo de competencias en criptografía. el lado oscuro de la asignatura*, IX Jornada sobre Aprendizaje Cooperativo y II Jornada sobre Innovación Docente Almería, 9 y 10 de Julio de 2009.
- [LUT06] Luther, E., *Developing Interactive Simulations with the LabView Player*. Rice University. Internal Report, 2006.
- [MAS95] Mascha, M., Gentner, S., Rossman, J., & Rothenberg, N., *Beyond the Web: Manipulating the Real World*. Computer Networks and ISDN Systems Journal , Vol. 28, Núm. 1, 1995.
- [MASC05] V. Mascarós, V. Casanova, J. Salt, *Implementación de controladores monofrecuencia y bifrecuencia en un sistema de control basado en red Profibus-DP*, XXVI Jornadas de Automática, Alicante, 2005.
- [MAT10] Tomás de Jesús Mateo Sanguino, *Contribuciones al desarrollo de laboratorios virtuales y remotos en robótica*, Tesis Doctoral, Universidad de Huelva, 2010.
- [MAX67] J.C. Maxwell, *On Governors*, Proceedings of the Royal Society of London, vol. 16, pp. 270–283, 1867.
- [MAY75] O. Mayr, *The Origins of Feedback Control*, MIT Press, 1975.
- [MENG09] Z. Meng, W. Ren, Z. You, *Decentralized cooperative attitude tracking using Modified Rodriguez Parameters*, Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 853-858, 2009.
- [MOB08] Mobasser F., Hashtrudi – Zaad K., *Transparent Rate Mode Bilateral Teleoperation Control*, International Journal of Robotics Research, January 2008.
- [MON07] G. Montoya, C. Gil, A. Alías, F. Gil. *The Importance of Teaching Teams as a Formative and Innovation Strategy*, International Technology, Education and Development Conference, (INTED), 2007.
- [MON08] M..G. Montoya, C. Gil, R. Baños, F. G. Montoya, A. Alías, *Cooperative work in the faculty and in the classroom: a key to coordination of the teaching staff and development of students' competences*, International Technology, Education and Development Conference (INTED). pp. 576, 2008.

- [NIEM00] M. Niemiec, C. Kravaris, *Nonlinear multirate control of a polymerization reactor: an experimental study*, Proceedings of the 2000 American Control Conference, vol. 4, pp. 2270-2274, 2000.
- [ÑEC09] Ñeco, R.P., Puerto, R., *Herramienta docente interactiva para el análisis y diseño de sistemas electrónicos de control*, XXX Jornadas de Automática, Valladolid, septiembre 2009.
- [ÑEC10-1] Ñeco, R.P., Puerto, R., Vicente, M.A., Fernández, C., *Simulador interactivo para la docencia de sistemas electrónicos de control*, IX Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica – TAEE2010, Madrid, abril 2010.
- [ÑEC10-2] Ñeco, R.P., Puerto, R., Vicente, M.A., Fernández, C., *Team learning in advanced control engineering courses*, International Conference on Education and New Learning Technologies 2010 – EDULEARN10, Barcelona, Julio 2010.
- [OAK02] B. Oakley, *It takes two to tango: How 'Good' students enable problematic behavior in teams*, J. Student Center. Learn., vol. 1, pp. 19–27, 2002.
- [OAK07] Oakley, B.A.; Hanna, D.M.; Kuzmyn, Z.; Felder, R.M., *Best Practices Involving Teamwork in the Classroom: Results From a Survey of 6435 Engineering Student Respondents*, IEEE Transactions on Education, vol.50, no.3, pp.266-272, Aug. 2007.
- [OBA99] A. Obaya, *Getting cooperative learning*, Sci. Educ. Int., vol. 10, pp. 25–27, 1999.
- [OGA10] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall, 2010.
- [OGA96] K. Ogata, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, Prentice-Hall, 1996.
- [OLL91] A. Ollero, *Control por Computador: Descripción interna y diseño Óptimo*, Marcombo, 1991.
- [OREI05] O'Reilly, T. *What Is Web 2.0. Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software*, Tribuna 2005.
- [PAS01] R. Pastor, J. Sanchez, and S. Dormido, *Related: A framework for publish web laboratory control system*, In IFAC Internet Based Control Education (2001), 207 – 212.
- [PEE05] Peek, C.S., Crisalle, O.D., Depraz, S., y Gillet, D., *The Virtual Control Laboratory Paradigm: Architectural Design Requirements and Realization Through a DC-Motor Example*. International Journal of Engineering Education, 21(6), 1134–1147, 2005.
- [PEN05] Pendharkar, I., *Rltool for Scilab: a public domain tool for SISO system design*, Control Systems Magazine, IEEE Volume: 25, Issue: 1, 2005.

**[PIG06]** Piguet, Y. & Longchamp, R. (2006), Interactive applications in a mandatory control course, in 'Proceedings of the 7th IFAC Advanced Control Education', Madrid, Spain.

**[PIG99-1]** Piguet, Y., *SysQuake: User Manual*, Calerga, 1999.

**[PIG99-2]** Piguet Y., Holmberg, U., Longchamp, R., *Instantaneous performance display for graphical control design methods*. In Proc. of the IFAC world congress, Beijing, volume L, pages 403-408, 1999.

**[PIP09]** Pipan, M., Arth, T., Blazic, B.J., *Advanced eVocational Education of Mechatronic Professions*. International Journal of Education and Information Technologies, 3(1), 12—19, 2009

**[PUER95]** R. Puerto, *Revisión y Análisis de Técnicas de Control no Lineal*. Simulación mediante Matlab y Simulink, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia, 1995.

**[PUER97]** Puerto R., Salt J., Bernabeu E.J., Valera A., *Práctica de laboratorio sobre filtrado digital de señales en estudios de ingeniería*, V Congreso universitario sobre innovación metodológica en las enseñanzas técnicas, Barcelona 1997.

**[PUER99]** Puerto R., Fernández C., *Training exercises on engineering courses. A practical application on digital signal filters*, EAEIE 99 (European Association for Education in Electrical and Information Engineering), Capri 1999.

**[PUER01]** Puerto R., Reinoso O., Ñeco R., García N., Jiménez L.M., *Remote Lab for Control Applications using Matlab*, Internet Based Control Education (IBCE'01), UNED, Madrid 2001.

**[PUER02-1]** Puerto R., Reinoso, O, Ñeco R., García N., Jiménez L.M., *Remote Lab for Control Applications using Matlab*, ISBN 0-08-0439845, Elsevier – IFAC publications, 2002

**[PUER02-2]** Puerto R., Jiménez L.M., Reinoso O., Fernández C., *RECOLAB: Laboratorio de Prácticas de Control de Procesos Vía Internet*, III Jornadas de Trabajo: Enseñanza vía Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática (EIWISA'02), Alicante 2002.

**[PUER02-3]** Puerto R., L. Jiménez, O. Reinoso, C. Fernández, *Laboratorio Vía Internet para control de Procesos*, III Conferencia Internacional sobre Educación, Formación, Nuevas Tecnologías y e-Learning Empresarial (VirtualEduca 2002), Valencia 2002.

- [PUER02-4] Puerto R., Jiménez L.M., Fernández C., Ñeco R., García N., *RECOLAB: prácticas de control sobre procesos reales via internet utilizando Matlab*, XXIII Jornadas de Automática, Las Palmas (España) 2002.
- [PUER03] Puerto R., Jiménez L.M., Alenda J.A., Aracil R, *RT-Linux based control of an Experimental Platform for Teleoperated Systems with 1dof*, 5<sup>th</sup> Real-Time Linux Workshop, Valencia 2003.
- [PUER04] Puerto, R., Jiménez L.M., Reinoso O., Fernández R., Ñeco, R., Remote Control Laboratory using Matlab and Simulink: Application to a DC motor model, IFAC Workshop IBCE'04, Grenoble (France) 2004.
- [PUER06] Puerto, R., Blanco D., Jiménez L.M., Ñeco, R, Gil A., *Desarrollo de maquetas experimentales en estudios de ingeniería aplicados a la mejora de la docencia*, VII Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica TAAE 2006, Madrid, julio 2006
- [PUER10] Puerto R., Ñeco, R., Fernández, C., Vicente, M.A., *Implantación del software Scilab/Scicos en las prácticas de asignaturas afines al Área de Ingeniería de Sistemas y Automática*, IX Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica TAAE 2010, Madrid, abril 2010.
- [PUER11] Puerto R., Jiménez L.M., Reinoso O., *Remote Control Laboratory Via Internet using Matlab and Simulink*, Computer Applications in Engineering Education, John Wiley & Sons, 2011. Pendiente de publicación.
- [RAE04] Rae, S., *Using Telerobotics for remote kinematics laboratories*. The University of Western Australia. Final Year Project, pp. 1-116, 2004.
- [REI01] Reinoso O., Rubio A.E., Puerto R., Saltarén R, Azorín J.M., *Identificación y Control de un Cilindro Neumático con Válvulas Proporcionales*, XXII Jornadas de Automática, Barcelona 2001.
- [REI01-1] Reinoso O., Fernández, C., Aracil, R., Puerto R., García N., *Teleoperated Systems for Working in Remote Environments*, Acta Press ISBN 0-88986-313-X, pp. 7-11, Florida 2001.
- [RIB07] Ribes, X. *La Web 2.0. El valor de los metadatos y de la inteligencia colectiva*, TELOS, 2007.
- [RIO97] D. A. Riordan, D. L. Street , and B. M. Roof, *Group Learning: Applications in Higher Education*. Harrisonburg, VA: Institute for Research in Higher Education, 1997.
- [ROBS00] R. Robson and M. Shor, *A student-centered feedback control model of the educational process*, Front Educ Conf 2 (2000), 14 – 19.

- [ROM09] Romero, C.M., *Una experiencia combinando ac y otras herramientas de aprendizaje en estructura y tecnología de computadores*, IX Jornada sobre Aprendizaje Cooperativo y II Jornada sobre Innovación Docente Almería, 9 y 10 de Julio de 2009.
- [ROU77] E.J. Routh, *A Treatise on the Stability of a Given State of Motion, Particularly Steady Motion*, Macmillan and co., 1877.
- [SALT05] Julian J. Salt y Pedro Albertos, *Model-Based Multirate Controllers Design*, IEEE Transactions on control systems technology, vol. 13, nº 6, 2005.
- [SALT06] J. Salt, V. Mascarós, A. Cuenca y V. Casanova, *A PID dual rate controller implementation over a networked control system*, IEEE International Conference on Control Applications, 2006.
- [SALT11] Julian J. Salt, Antonio Sala, Jesus Sandoval, *Perturbation and Exact Intersample Ripple detection in Discrete Dual-Rate Systems*. Pendiente de publicación.
- [SCH01] C. Schmid, *Virtual control laboratories and remote experimentation in control engineering*, Proc 11th Annual Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering, 213 – 218 , 2001.
- [SEBAS03] Sebastián J.M., Jiménez L.M., García D., Puerto R., Ángel, L., *Sistema TITERE: Realización de Prácticas de Vision por computador a través de Internet*, Workshop on Education and Practice in Artificial Vision, ISBN: 84-7653-830-8, Palma de Mallorca (Spain), 2003.
- [SHOR00] M. Shor, *Remote-access engineering educational laboratories: Who, what, when, why, and how?* Proc Control Conf (2000), 2949 – 2950.
- [SIM00] Simmons, R., Fernandez, J., Goodwin, R., Koenig, S., Oapos, Sullivan, J., *Lessons learned from Xavier*. IEEE Robotics & Automation Magazine , Vol. 7, Núm. 2, págs. 33-39, 2000.
- [SIRA05] H. Sira-Ramírez, R. Márquez, F. Rivas-Echeverría, O. Llanes-Santiago, *Control de Sistemas no Lineales*, Pearson Educación, 2005.
- [SKLA55] J. Sklansky y J.R. Ragazzini, *Analysis of errors in sampled-data feedback systems*, AIEE Trans., pt. II, vol. 74, pp. 65-71, 1955.
- [SLO91] Jean-Jaques Slotine, Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall International, 1991.

- [SON98] E.D. Sontag, *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*, Springer, 1998.
- [SPR97] L. Springer, M. E. Stanne, and S. Donovan, *Effects of Small-Group Learning on Undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: A Meta-Analysis*. Madison, WI: National Institute for Science Education, 1997.
- [SPR99] Springer, L., Stanne, M. E., Donovan, S. S., *Effects of small-group learning on undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: a meta-analysis*. Review of Educational Research, 69(1), 21–51, 1999.
- [STA01] Stafford-Fraser, Q., *The Life and Times of the First Web Cam: When convenience was the mother of invention*. Communications of the Association for Computing Machinery , Vol. 44, Núm. 7, págs. 25-26, 2001.
- [STE02] Stephen L. Campbell, Jean-Philippe Chancelier & Ramine Nikoukhah, *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos*, Ed. Springer 2002
- [SYS04] Sysquake 3. User's Manual, Calerga Sarl, 2004.
- [TANEN91] Tanenbaum A., *Sistemas Operativos: Diseño e Implementación*, Addison – Wesley, 1992.
- [TAOU97] D. Taoutaou, R. Puerto, R. Ortega, L. Loron, *A New Field – Oriented Discrete – Time controller for Current – fed induction Motors*, Control Engineering Practice, vol. 5, pp. 209–219, 1997.
- [TER01] P. T. Terenzini, A. F. Cabrera, C. L. Colbeck, J. M. Parente, and S. A. Bjorkland, *Collaborative learning vs. lecture discussion: Students' reported learning gains*, Journal of Engineering Education, vol. 90, pp. 123–130, 2001.
- [THOM86] P. M. Thompson, *Gain and phase margins of multirate sampled-data feedback systems*, International Journey of Control, Vol. 44, No 3, pp. 833-846, 1986.
- [TON06] Tona, P.; *Teaching process control with Scilab and Scicos*, American Control Conference, 2006.
- [TOR90] Tornero J., Salt J., *Sistemas digitales de control*, S.P. UPV, 1990.
- [TRA00] Travis, J., *Internet Applications in LabVIEW*. Upper Saddle River, EEUU: Prentice Hall, 2000.
- [TSCIL] Tutorial oficial Scilab, "Intro Scilab-user guide", [www.scilab.org](http://www.scilab.org).
- [VAL02] Ángel Valera, *Modelado y control en el espacio de estados*, Editorial UPV D.L. 2002.

[VAL05] Valera, A., Díez, J. L., Vallés, M., Albertos, P., *Virtual and Remote Control Laboratory Development*, IEEE Control Systems Magazine 25(1), 35–39, 2005.

[VAR09] H. Vargas, J. Sánchez, Ch. Salzmán, F. Esquembre, D. Gillet, S. Dormido, *Web-enabled Remote Scientific Environments*, Computing in Science and Engineering. Vol. 11, Nr. 3, pp. 36-46, 2009.

[VEL00] C. M. Vélez, J. Salt, *Simulation of irregular multirate systems*, in 8th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design, 2000.

[VIC10-1] Vicente, M.A., Ñeco, R.P., Fernández, C., Puerto, R., *Experiences with cooperative and competitive learning in engineering courses*, International Technology, Education and Development Conference – INTED 2010, Valencia, marzo 2010.

[VIC10-2] Vicente, M.A., Fernández, C., Ñeco, R.P., Puerto, R., *Google groups for communication enhancement in cooperative learning strategies*, International Conference on Education and New Learning Technologies – EDULEARN10, Barcelona, Julio 2010.

[VIL09] Villalba, G.; Zamora, M.A., Santa, J. ; Herrero, P., *Experiencias en la implantación de aprendizaje basado en proyectos para desarrollar la creatividad en asignaturas de domótica*, IX Jornada sobre Aprendizaje Cooperativo y II Jornada sobre Innovación Docente Almería, 9 y 10 de Julio de 2009.

[WAPA] Online Apache documentation: <http://www.apache.org>.

[WAUTO] Página web de AutomatL@bs: <http://lab.dia.uned.es/automatlab/>.

[WBID10] Blog de Innovación docente de la UMH, <http://blogs.umh.es/innovacion-docente/>

[WCEA] Página web del grupo de Educación en Control del Comité Español de Automática – CEA: (<http://www.cea-ifac.es/wwwgrupos/educontrol>).

[WCOM] Página web del proyecto Comedi: [www.comedi.org](http://www.comedi.org)

[WCOMP] Página web del grupo COMPING: <http://www.comping.es>

[WCON] Control theory, Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory).

[WEJS] EJS web-site: <http://fem.um.es/Ejs>.

[WFEE] Online Feedback educational models documentation: <http://www.fbk.com>.

[WGIAC] Página web del grupo GIAC: <http://giac.upc.es>

- [WHG10] Herramientas de Google, <http://www.google.es/intl/es/options/>
- [WHIT80] R.F. Whitbeck, D.C.J. Didaleusky, *Multirate digital control systems in simulation applications*, Report AFWAL-TR-80-3101, vols. I,II,III, Flight Dynamics Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratory, Wright Patterson Force Base, Ohio, 1980.
- [WIL08] Wilson, M., Gerber, L.E. How generational theory can improve teaching: strategies for working with the “millennials”. *Currents in teaching and learning*, 2008, vol. 1(1), pp. 29-44.
- [WIT98] Wittenmark, B.; Häglund, H.; Johansson, M., *Dynamic pictures and interactive learning*, IEEE Control Systems Magazine, 18, nº 3, pp. 26-32, 1998.
- [WIT98] Wittenmark, B.; Häglund, H.; Johansson, M., *Dynamic pictures and interactive learning*, IEEE Control Systems Magazine, 18, nº 3, pp. 26-32, 1998.
- [WMATW] Página web oficial de Matlab: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [WMATLAB] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [WNAT] Página web de información de la tarjeta de adquisición de datos NI PCI – 6024E: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/10968>
- [WOCT] Página web oficial del proyecto Octave: [www.gnu.org/software/octave](http://www.gnu.org/software/octave)
- [WPHP] Online PHP documentation: <http://www.php.net>.
- [WREC] RECOLAB web portal <http://isa.umh.es/recolab/>.
- [WRPRO] Página web oficial de R: [cran.r-project.org](http://cran.r-project.org)
- [WRTAI] Página web del proyecto RTAI: [www.rtai.org](http://www.rtai.org)
- [WSCIC] Página web del proyecto Scicos: [www.scicos.org](http://www.scicos.org)
- [WSCIL] Página web del proyecto Scilab: [www.scilab.org](http://www.scilab.org)
- [WSID10] Site de Innovación Docente de la UMH, <http://sites.google.com/site/innovaciondocenteumh2010>
- [WSYS] Página web oficial de Sysquake: <http://www.calerga.com>.
- [WWAT] Página oficial del proyecto OpenWatcom: [www.openwatcom.org](http://www.openwatcom.org).
- [WXCOS] Página web del proyecto Xcos: <http://www.scilab.org/en/products/xcos>

**[YUN10]** B. Yun, B.M. Chen, K.Y. Lum, T.H. Lee, *Design and Implementation of a Leader-Follower Cooperative Control System for Unmanned Helicopters*, Journal of Control Theory and Applications, vol. 8, no. 1, pp. 61-68, 2010.

**[ZHE10]** J. Zheng, H. Yu, M. Zheng, W. Liang, P. Zeng, *Coordination of Multiple Mobile Robots with Limited Communication Range in Pursuit of Single Mobile Target in Cluttered Environment*, Journal of Control Theory and Applications, vol. 8, no. 4, pp. 441-446, 2010.

**[ZIE42]** J.G. Ziegler, N.B. Nichols, *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, vol. 64. pp. 759–768, 1942.

**[ZIM03]** B.J. Zimmer, S.P. Lipshitz, K.A. Morris, J. Vanderkooy, E. Obasi, *An Improved Acoustic Model for Active Noise Control in a Duct*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 125, no. 3, pp. 382-395, 2003.