



MEMORIA DE LAS ACCIONES DESARROLLADAS  
PROYECTOS DE MEJORA DE LA CALIDAD DOCENTE  
VICERRECTORADO DE INNOVACIÓN Y CALIDAD DOCENTE  
XIII CONVOCATORIA (2011-2012)

## DATOS IDENTIFICATIVOS:

### 1. Título del Proyecto

EXPERIENCIA DE TRABAJO EN EQUIPO: DISEÑO Y CONTROL DE SISTEMAS BOLA EN EQUILIBRIO

### 2. Código del Proyecto

115017

### 3. Resumen del Proyecto

*En la presente memoria se expone el resultado de una experiencia de trabajo en grupo para alumnos de las titulaciones de Ingeniería Técnica Industrial en la especialidad de Electrónica Industrial, y sobre todo, Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial.*

*El trabajo ha consistido en el diseño de dos plantas experimentales: un sistema bola-barra y un sistema bola-placa, en las cuales se han implementado diferentes estrategias de control para mantener la bola en equilibrio en una posición de referencia. Estas plantas ilustran muy bien la problemática de control de sistemas inestables en lazo abierto. Por ello, y debido a que son equipos de bajo coste, son usados en otras universidades para la realización de diversas prácticas. Además, el sistema bola-placa presenta una dificultad añadida, ya que al ser un proceso multivariable de dos entradas y dos salidas, puede requerir el uso de metodologías de control más avanzadas.*

### 4. Coordinador del Proyecto

Nombre y Apellidos	Departamento	Código del Grupo Docente	Categoría Profesional
Juan Garrido Jurado	Informática y Análisis Numérico	054	PDI

### 5. Otros Participantes

Nombre y Apellidos	Departamento	Código del Grupo Docente	Categoría Profesional
Francisco Javier Vázquez Serrano	Informática y Análisis Numérico	054	PDI
Jorge Eugenio Jiménez Hornero	Informática y Análisis Numérico	054	PDI
Luis Manuel Fernández de Ahumada	Informática y Análisis Numérico	054	PDI
Mario Luis Ruz Ruiz	Informática y Análisis Numérico	054	Becario

## **6. Asignaturas afectadas**

<b>Nombre de la asignatura</b>	<b>Área de Conocimiento</b>	<b>Titulación/es</b>
<b>Ingeniería de Control I</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	Ing. Automática y Electrónica
<b>Ingeniería de Control II</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	Ing. Automática y Electrónica
<b>Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	Ing. Automática y Electrónica
<b>Control de Procesos</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	Ing. Automática y Electrónica
<b>Regulación Automática</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	I. T. I. Electrónica Industrial
<b>Regulación Automática</b>	Ingeniería de Sistemas y Automática	Grado Ingeniería Electrónica Industrial

## **MEMORIA DE LA ACCIÓN**

### **Especificaciones**

*Utilice estas páginas para la redacción de la memoria de la acción desarrollada. La memoria debe contener un mínimo de cinco y un máximo de 10 páginas, incluidas tablas y figuras, en el formato indicado (tipo y tamaño de letra: Times New Roman, 12; interlineado: sencillo) e incorporar todos los apartados señalados (excepcionalmente podrá excluirse alguno). En el caso de que durante el desarrollo de la acción se hubieran producido documentos o material gráfico dignos de reseñar (CD, páginas Web, revistas, vídeos, etc.) se incluirá como anexo una copia de buena calidad.*

### **Apartados**

#### **1. Introducción**

En las guías docentes ECTS realizadas para las asignaturas relacionadas con Control Automático aparece el concepto de trabajo en equipo. Un buen ingeniero de control debe saber manejar gran cantidad de conceptos, técnicas e ideas y, lo más importante, ser capaz de aplicarlos a problemas reales de la industria. Por lo tanto, el principal objetivo de la docencia en Control Automático consiste en cubrir las necesidades de base teórica de los estudiantes, así como la de proporcionarles la capacidad de hacer frente a procesos de ingeniería.

Las experiencias de trabajo en equipo tienen como finalidad la mejora de determinadas competencias transversales: de esta forma se pretende mejorar la capacidad de organización y planificación del alumno, su visión general a la hora de resolver problemas, así como contribuir a la formación y desarrollo en la resolución de problemas complejos que requieren de grupos de trabajo.

En la presente memoria se incluye una actividad de trabajo en grupo que intenta mejorar las competencias específicas de los ingenieros, cognitivas como son el modelado y análisis de sistemas o implementación de sistemas de control, procedimentales e instrumentales, como son la resolución de problemas complejos, y actitudinales tales como son fomentar la habilidad para trabajar de forma autónoma y en equipo y la capacidad en la toma de decisiones.

Experiencias previas en años precedentes han dado resultados satisfactorios. Todos los solicitantes ya han sido responsables o han participado en proyectos de innovación y mejora de calidad docente a lo largo de los últimos años, y en concreto han participado en proyectos similares cuyo objetivo consistía en que los alumnos llevaran a cabo una planificación de las actividades a realizar, selección y adquisición de los componentes, implementación de las plantas proyectadas, etc. Tras los buenos resultados de convocatorias anteriores, el presente proyecto ha pretendido llevar a cabo un trabajo similar pero usando un proceso inestable en lazo abierto, el cual presenta importantes dificultades de control.

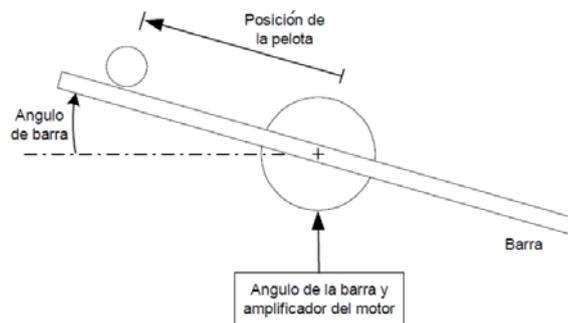
#### **2. Objetivos**

La experiencia realizada ha consistido en el diseño de dos equipos donde se pueden implementar diferentes estrategias de control. Una vez construidas, se han diseñado diferentes controladores para cada planta con la intención de cumplir ciertas especificaciones. Por otro lado, también era objeto de este proyecto que dichas plantas sirvan como herramientas didácticas al estudiante.

### 3. Descripción de la experiencia (exponer con suficiente detalle lo realizado en la experiencia)

#### Sistema bola-barra

El sistema de barra-bola es un clásico modelo de laboratorio para enseñar ingeniería de control y sistemas. Es muy popular porque es un sistema simple y fácil de entender que puede ser utilizado para estudiar muchos de los métodos clásicos y modernos de diseño en ingeniería de control. Posee una propiedad muy interesante para el ingeniero de control: es inestable en lazo abierto.



El sistema se muestra en la figura superior: consiste en una bola rodando sobre una barra montada sobre el eje de un motor eléctrico. En esta configuración, la barra se puede inclinar con respecto de su eje central aplicando una señal de control al amplificador que regula el motor. La posición de la bola en la barra es medida con un sensor. El objetivo de control es regular automáticamente la posición de la bola en la barra actuando sobre el ángulo de la barra.

A continuación se describen los pasos seguidos para el montaje de esta planta. Los principales componentes son el soporte para motor y barra, el motor, el sensor de posición y el sistema de control.

- Soporte y barra: sobre un tablón de madera se hizo un dibujo del soporte para el motor, y se procedió a su corte mediante una sierra de calar. Posteriormente mediante Autocad se diseñó el soporte para la barra, de manera que encajara perfectamente con el eje del motor; seguidamente con una impresora 3d se consiguió la pieza. La maqueta resultante se puede ver en la siguiente imagen.



- Sensor de proximidad por infrarrojos: para medir la posición de la bola en la barra se ha usado el sensor GP2Y0A21YK de la marca Sharp, que dispone de un conector JST de 3 pines y proporciona un valor analógico detectado. La salida proporciona 3,1V a 10cm hasta 0,4V a 80cm. Con el amplificador operacional LM358, conseguimos filtrar la señal que tiene una componente de ruido bastante elevada y amplificar la señal para conseguir que esté dentro del rango que es capaz de leer la entrada analógica de la tarjeta Arduino.



Sensor de proximidad por infrarrojos

- Motor paso a paso con reductora: se ha utilizado un motor paso a paso con caja reductora monopolar y ángulo de paso de  $7,5^\circ$ . Es un motor paso a paso de 5 V de imán permanente equipado con una caja reductora ovoidal que proporciona una reducción de velocidad rotacional y una salida de par superior. Ideal para aplicaciones en las que se requiere control digital de velocidad y posición. Normalmente en este tipo de sistemas se utiliza un servomotor o un motor DC, alimentado por la señal de control amplificada según las características del respectivo motor. Para tener en cuenta el ángulo de giro, sería necesario un encoder. Sin embargo, utilizando un motor paso a paso no es necesario, puesto que sabemos que con cada pulso se gira un determinado ángulo, sabiendo el número de pulsos sabremos el ángulo girado. Esto se realizara mediante software.



Motor paso a paso con reductora

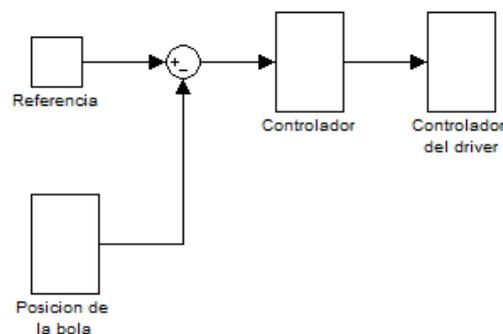
- Sistema de control: está formado por una tarjeta Arduino, los drivers del motor paso a paso y un ordenador personal. Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores.

Esta tarjeta se utiliza de interfaz entre los elementos de la planta y el ordenador personal, ya que por un lado, Arduino se comunica con los drivers del motor paso a paso para controlar su posición, y lee la posición de la bola a partir del sensor de proximidad. Dichos datos se intercambian con el ordenador personal, en donde está implementada la estrategia de control haciendo uso del software Matlab-Simulink.



Placa Arduino

A continuación se describe el control de la planta mediante el software Matlab-Simulink. En la siguiente imagen se puede ver el circuito diseñado con Simulink y compuesto por tres bloques: el bloque de lectura de la señal analógica, que nos indica la posición de la bola; el bloque controlador del driver, con el que se actúa sobre el motor; y el bloque controlador, donde se implementa el control de posición de la bola.



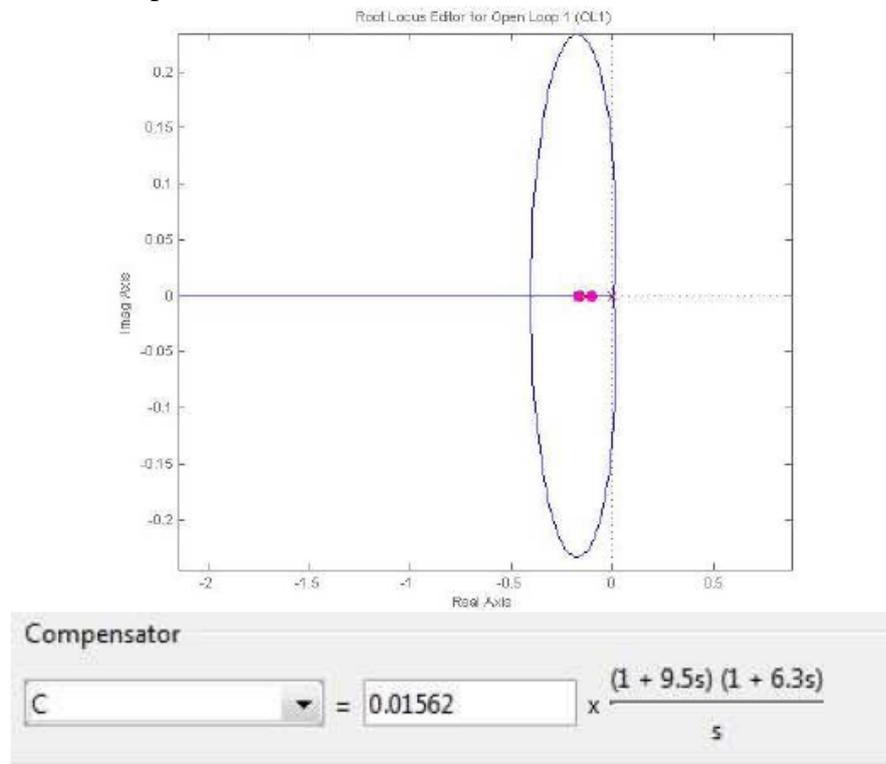
**Bloque de lectura de la entrada analógica:** el sensor de posición por infrarrojos da una medida con una componente de ruido bastante elevada, por esto se decidió aplicarle un filtro paso bajo con un amplificador operacional. Además de este filtro también se ha colocado un filtro de medias para conseguir mejorar aun más la señal.

**Bloque de control del motor:** con este bloque lo que conseguimos es decidir la dirección de giro del motor, así como la velocidad con la que deberá girar. A parte de todo esto también hacemos un bucle interno donde vamos midiendo el ángulo que se ha girado. El bloque tiene una única entrada que es la señal de control que proporciona la salida del controlador (que es el ángulo de inclinación de la barra, lo cual se traduce en un ángulo de giro del motor) y tres salidas correspondientes a cada una de las patillas sobre las que actuará el driver.

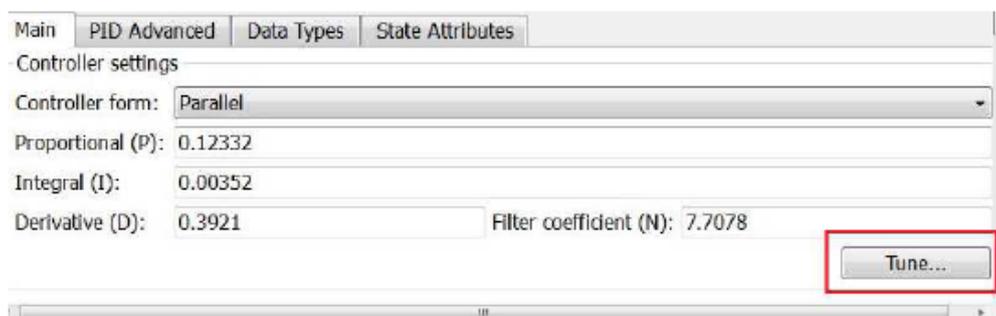
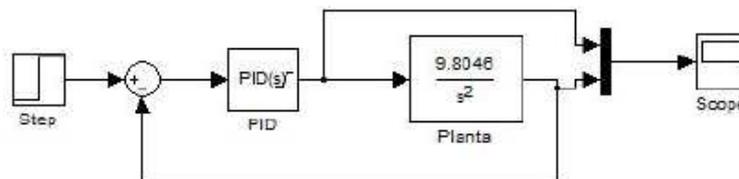
**Bloque controlador:** es donde se implementa el control de posición de la bola y que previamente ha sido diseñado y simulado mediante el modelo matemático del sistema. La característica especial del sistema bola-barra es su respuesta inestable en lazo abierto, lo que significa que tiene que existir un adelanto de fase en el sistema de control para estabilizarlo. Existen diferentes alternativas en la teoría de control para diseñar un controlador adecuado para estabilizar tal sistema, como por ejemplo:

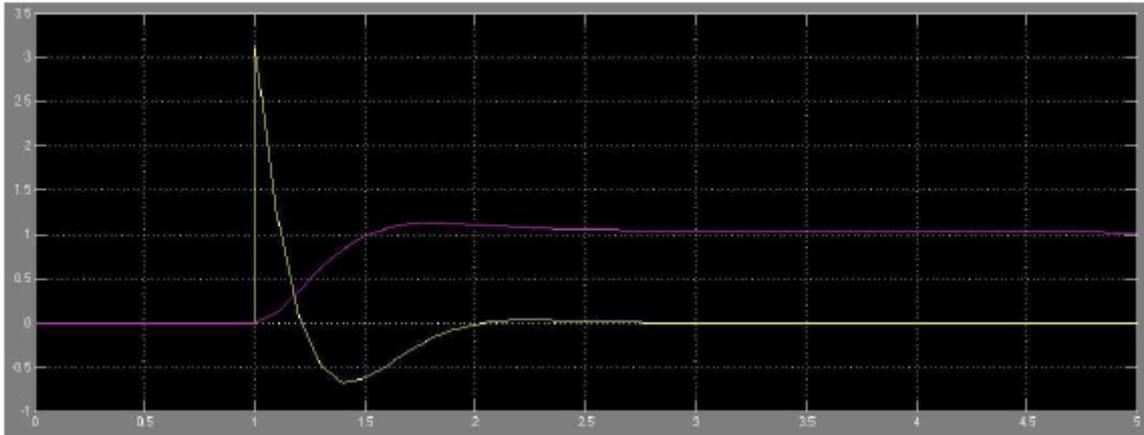
1. Control proporcional-derivativo (PD).
2. Compensación de adelanto de fase.
3. Observadores de estado con control retroalimentado.
4. Regulador cuadrático lineal (LQR)
5. Regulador cuadrático Gaussiano (LQG)
6. Control robusto.

Se va a exponer un primer controlador utilizado sobre el modelo y posteriormente utilizado sobre el sistema real. Primero con la *rltool* de Matlab se ha diseñado un controlador PID para el modelo de la planta:



Para ver la respuesta del modelo usando este controlador utilizamos el siguiente esquema de Simulink. El bloque del controlador tiene un botón denominado *tune* con el que se realiza una resintonía del controlador y se mejoran su características de tiempo de asentamiento, de subida, sobrepaso... En la última imagen se puede ver la respuesta del sistema y la señal de control obtenidas.

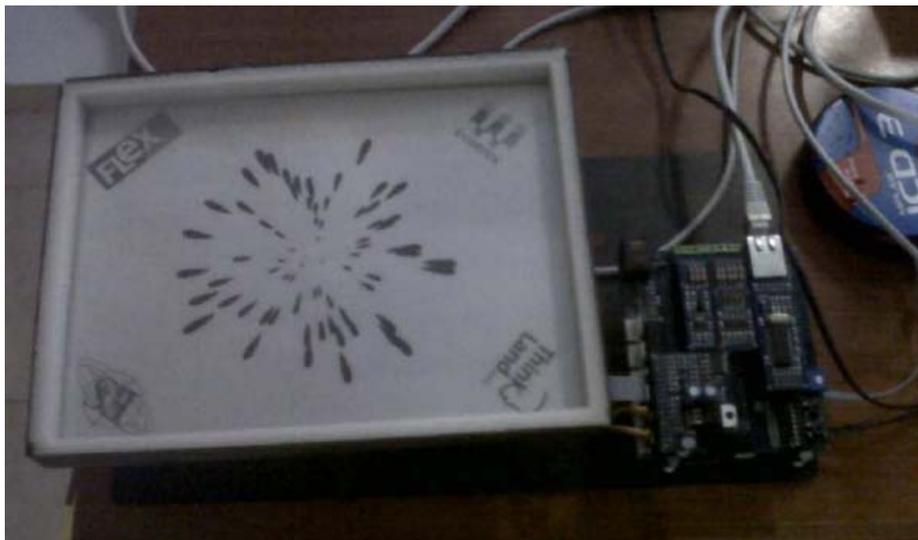




### Sistema bola-placa

El sistema físico consiste en una placa mecánica, dos mecanismos de accionamiento para inclinar la placa alrededor de dos ejes, un sensor de posición de la bola, la instrumentación para el procesamiento de señales, y el control de software / hardware. Todo el sistema está montado sobre una placa de base mecánica (de acero) que está soportado por cuatro resortes verticales y una articulación central. Mediante los motores se controla la inclinación de la placa con la intención de llevar la bola a la posición deseada. Para el control de los motores se emplea una señal PWM. Los servos se alimentan mediante una fuente de alimentación de 6 V DC. Se utiliza una pantalla táctil resistiva de vidrio sensible (que es en realidad una pantalla táctil de ordenador) para detectar la posición de la bola.

El sistema puede ser utilizado como un excelente banco de pruebas para probar varios esquemas de control. Se puede diseñar un controlador óptimo utilizando realimentación completa de estados para lograr un rendimiento aún mejor. Aunque los controladores basados en el modelo lineal funcionan bien, esta planta será interesante para aplicar controles basados en principios no lineales y buscar cualquier otra mejora en el rendimiento del sistema.

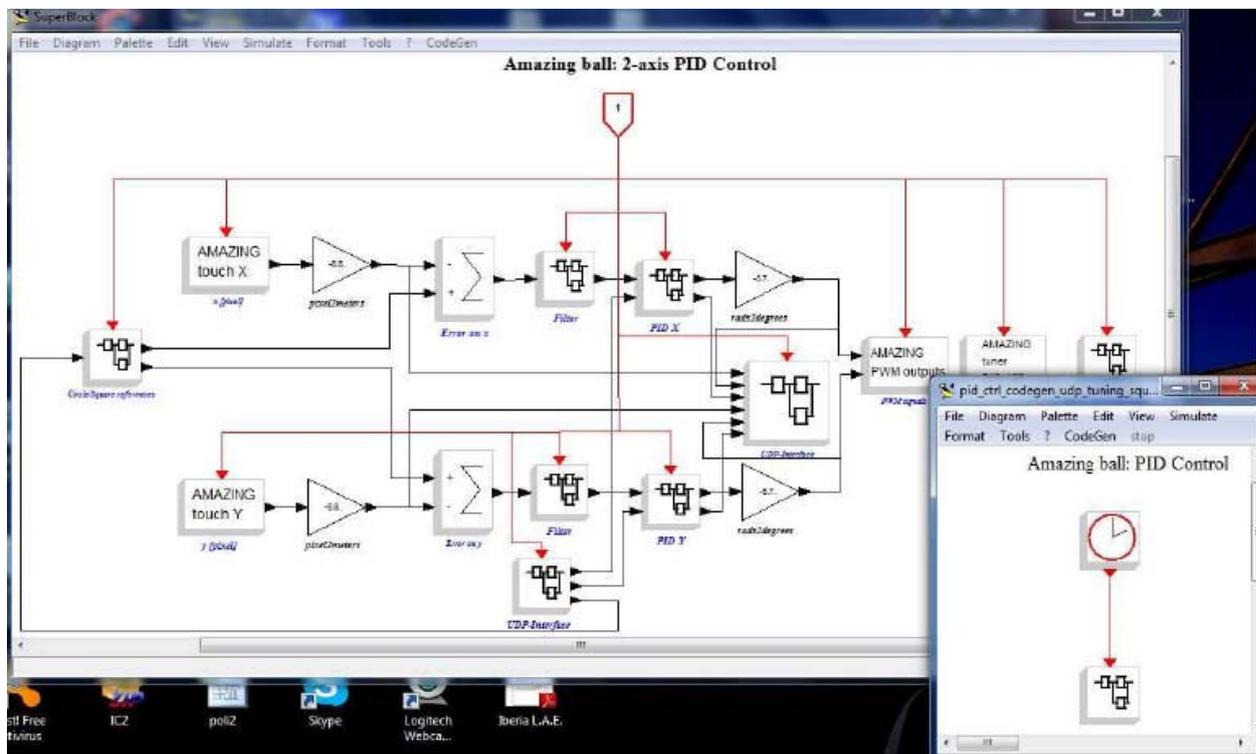


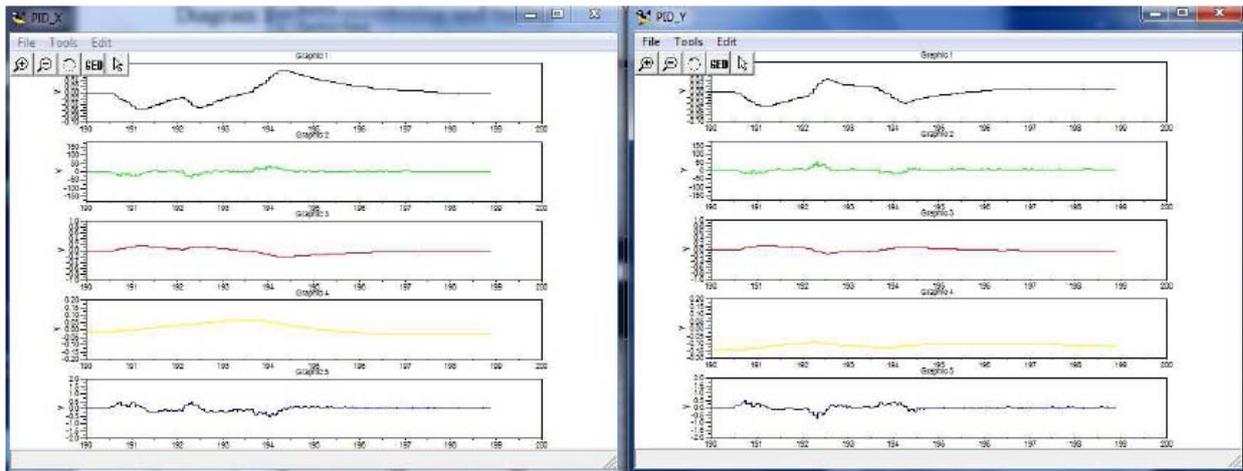
El sistema tiene los siguientes componentes:

- 1 x Oscillating plate
- 1 x Metal ball

- 1 x Touch screen
- 2 x Servo motors
- 1 x FLEX Light base board
- 1 x FLEX Demo2 board
- 1 x FLEX Servo motor plug-in
- 1 x FLEX Multibus Ethernet Module
- 1 x FLEX Multibus RS232 Module
- 1 x FLEX Multibus RS485 Module
- 1 x FLEX Multibus CAN Module
- 1x Erika Enterprise CD + SCICOS pack
- 1 x Power supply (DC 12V, 2000mA)
- MPLAB ICD 3 Debugger/Programmer

Para la generación del código para controlar el sistema es necesario el software Scicoslab, con el cual mediante un lenguaje de bloques similar a Simulink se pueden aplicar las diferentes estrategias de control. Como ejemplo se muestra un esquema de control mediante un PID y los resultados obtenidos en cada uno de los ejes X-Y.





#### 4. **Materiales y métodos** (describir la metodología seguida y, en su caso, el material utilizado)

Para llevar a cabo las actividades mencionadas en el apartado anterior se estableció la siguiente metodología:

1. Se estableció un profesor responsable de la experiencia, de entre los firmantes del presente documento. En concreto fue el profesor Juan Garrido.
2. Entre los alumnos, se eligió un coordinador del grupo, interlocutor con el profesor responsable.
3. Se establecieron los requisitos del equipo a diseñar (componentes adecuados dentro del presupuesto disponible, especificaciones del diseño, etc).
4. Entre los participantes de este proyecto y los alumnos se estudiaron las principales características de los componentes necesarios para el desarrollo del sistema.
5. Los estudiantes se enfrentaron a problemas de tipo software (programación) y de tipo hardware (montaje de los equipos), siempre bajo la supervisión y ayuda del profesor responsable.
6. Finalmente se presentaron los resultados obtenidos y se discutieron las líneas futuras de aplicación en base a los dispositivos con los que se ha trabajado.

#### 5. **Resultados obtenidos y disponibilidad de uso**

Los equipos implementados se han puesto a disposición de los alumnos de las asignaturas correspondientes al comienzo del curso 2012/2013 para la realización de prácticas. En este momento, se encuentra en fase de documentación el manual de usuario. Se prevé también llevar a cabo en el nuevo curso académico, el benchmark de control entre varios equipos de alumnos, que inicialmente estaba planteado pero que por impedimentos temporales finalmente no ha podido ser realizado en el curso anterior.

#### 6. **Utilidad**

El proyecto ha cumplido su principal objetivo, que consistía en lograr una experiencia de trabajo en equipo que motivara al alumno a enfrentarse con un problema de ingeniería real como el diseño, implementación y control de plantas reales. El esfuerzo invertido en el montaje y puesta a punto de las plantas, así como su modelado matemático y controles propuestos, permiten que los resultados obtenidos en esta experiencia sirvan como punto de partida para

futuros proyectos fin de carrera o de investigación. Además, las plantas desarrolladas podrán ser usadas para fines docentes en las diferentes asignaturas implicadas.

## 7. Observaciones y comentarios

El único comentario que se desea hacer es en relación a los recursos económicos consumidos. Aunque el presupuesto concedido para la presente experiencia fue de 2231 € solo se han gastado 1454,22 €. La razón es que durante su desarrollo, se han seguido buscando diferentes alternativas más económicas. Ello deja un remanente o ahorro de 776,78 € en la Unidad de Calidad.

## 8. Autoevaluación de la experiencia

Desde el punto de vista formativo, los alumnos han participado en una actividad próxima a la que tendrán que desenvolver en su futuro profesional, seleccionando componentes en catálogos, adquiriéndolos al mejor precio, instalándolos, acertando y equivocándose en la elección, etc.

Desde el punto de vista de las competencias actitudinales, los alumnos han realizado en grupo una actividad en la que las sumas de las partes ha formado un todo tangible: las plantas. A su vez, se ha trabajado en una actividad donde el profesor no sólo ha transmitido sus conocimientos sino que ha sido un elemento más en el equipo de trabajo, coordinando, aconsejando y, en algunos momentos de dificultad, también trabajando. Se ha favorecido la relación profesor-alumno fomentando el paradigma de enseñar a aprender.

## 9. Bibliografía

- Charles L., Phillips, H., Troy Nagle, Jr. (1987) “Sistemas de control digital. Analisis y diseño”. Gustavo Gili.
- Katsuhiko, O. (1987) “Discrete-Time Control Systems”. Prentice Hall.
- Sobhani, M., Neisius, B., Jayasuriya, S., Rumler, E. and Rabins, M.J. (1992) “Some new insights on the classical beam and ball balancing experiment”, Proceedings of the American Control Conference.
- Stuart B. (1999) “Real-Time Computer Control”. Prentice Hall.
- Wellstead, P. (2000) “Introduction to physical system modelling”, Control Systems Principles.
- <http://cats-fs.rpi.edu/~wenj/ECSE4962S04/final/team2finalreport.pdf>
- <http://erika.tuxfamily.org/scilabscicos.html>
- <http://erika.tuxfamily.org/forum/>
- [http://csd.newcastle.edu.au/simulations/ball\\_sim.html](http://csd.newcastle.edu.au/simulations/ball_sim.html)
- <http://erika.tuxfamily.org/wiki/>
- [http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=Amazing\\_Ball\\_Introduction](http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=Amazing_Ball_Introduction)
- [http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=Tutorial:\\_Installing\\_scicoslab\\_and\\_generating\\_code\\_from\\_a\\_Scicos\\_diagram](http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=Tutorial:_Installing_scicoslab_and_generating_code_from_a_Scicos_diagram)

**Córdoba, 26 de septiembre de 2012**