

PRÁCTICAS DE CONTROL PRESENCIALES Y REMOTAS CON LEVITADOR MAGNÉTICO

Juan Carlos Milena

Dpt. Teoría de la Señal y Comunicaciones, UPC, jmil5678@alu-etsetb.upc.edu

Rosa M^a Fernández-Cantí

Dpt. Teoría de la Señal y Comunicaciones, UPC, rfernandez@tsc.upc.edu

Sergio Zarza Sánchez

Dpt. Teoría de la Señal y Comunicaciones, UPC, szarza@tsc.upc.edu

Tery Caisaguano Vásquez

Dpt. Teoría de la Señal y Comunicaciones, UPC, tery.caisaguano@estudiant.upc.edu

Resumen

En este trabajo se ilustra la versatilidad de un levitador magnético, no lineal e inestable, en la enseñanza de la teoría de control a distintos niveles y tanto en formato presencial como remoto. En concreto se presentan las prácticas presenciales de control clásico para estudiantes de grado y los experimentos de control moderno y no lineal propuestos para cursos de control avanzado. Asimismo, se describen las acciones que se han realizado para la adaptación de las prácticas a un entorno de laboratorio remoto, consistentes en modificar la planta a fin de evitar la caída definitiva de la bola o su contacto permanente con el imán, y el diseño de la interfaz de comunicación.

Palabras Clave: Levitador magnético, control clásico, control no lineal, laboratorio remoto

1 INTRODUCCIÓN

El levitador magnético (MagLev) de la Figura 1 constituye uno de los experimentos de control más interesantes y valorados por los estudiantes. El interés radica en que se trata de una planta no lineal e inestable cuyo modelo analítico pueden obtener fácilmente los estudiantes de un curso de grado. A partir del modelo linealizado, el proceso de diseño del controlador lineal ilustra de manera práctica y efectiva los conceptos más importantes vistos en clase: algoritmos de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), el diseño mediante el LGR (Lugar Geométrico de las Raíces) de Evans o el diseño de un control óptimo ITAE (*Integral Time Absolute Error*) mediante la solución de la ecuación diofántica. Los estudiantes diseñan sus controladores en casa y los prueban en el laboratorio. A la vista del

comportamiento de la bola, se establece un diálogo muy estimulante entre los estudiantes presentes y, como consecuencia, ellos mismos ven cómo son capaces de ajustar razonadamente sus diseños hasta conseguir el comportamiento deseado. En el repositorio de material docente del CEA (Comité Español de Automática) es posible encontrar otras prácticas realizadas con este mismo equipo en otras universidades, ver por ejemplo [6].

En un segundo nivel de dificultad, el MagLev es una planta idónea para los trabajos de investigación realizados por los estudiantes de proyecto final de carrera y en las prácticas de los cursos de control de posgrado y doctorado. En estos experimentos los estudiantes pueden abordar el estudio de estrategias de control avanzado tales como el control robusto, el control borroso o el control mediante redes neuronales; y estrategias de control no lineal como la linealización por retroacción, modos deslizantes o control adaptativo.

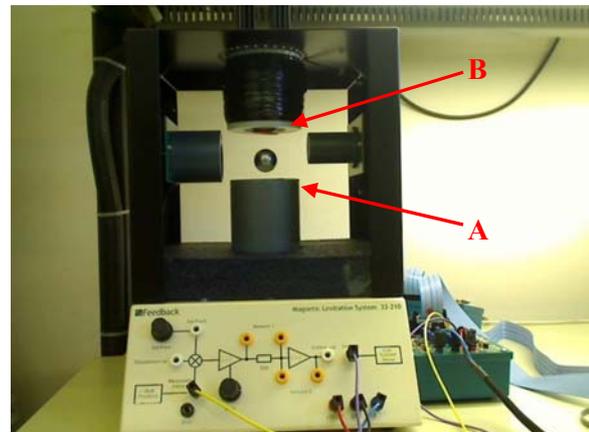


Figura 1: Levitador magnético docente de *Feedback Instruments Ltd.* con los ajustes necesarios (A, B) para la realización de prácticas remotas

Finalmente, y dentro del marco del EEES (Espacio Europeo de Educación Superior), se ha visto la necesidad de adaptar el equipo para la realización de prácticas remotas optando así por un modelo mixto que combina la presencialidad con la posibilidad de realizar los experimentos a distancia [1], [2], [4], [5], [9]. Sin embargo, a diferencia de la planta magnética de [2], consistente en un disco guiado, el levitador de la Figura 1 presenta una dificultad fundamental: cuando el sistema se desestabiliza, la bola o bien cae o bien se queda pegada al electroimán, con lo que el experimento finaliza y la bola no queda en la posición necesaria para iniciar un nuevo experimento. Para resolver este problema hemos diseñado e implementado unos elementos que, cuando esto ocurre, sitúan de nuevo a la bola cerca del punto de operación lineal (ver A y B en Figura 1). Estos ajustes se han revelado muy interesantes también a la hora de realizar los experimentos presenciales ya que hacen más robusto el comportamiento de la planta, sobre todo en los instantes iniciales del experimento.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2 se describe la planta y se resume el diseño de los controladores clásicos con los que trabajan los estudiantes de grado. En la Sección 3 se presentan algunas de las estrategias de control que se están ensayando como parte de un proyecto final de carrera. En la Sección 4 se describen las acciones que se han tomado para adaptar los experimentos al entorno de laboratorio remoto, ilustrando la mejora obtenida gracias a los ajustes implementados. En todas estas secciones se presentan resultados experimentales. Finalmente en la Sección 5 se extraen unas conclusiones y se valora el grado de satisfacción de los estudiantes.

2 CONTROL CLÁSICO

2.1 EL PROBLEMA

2.1.1 Objetivo del control

El objetivo es situar la bola a una distancia del electroimán tal que la fuerza magnética anule la fuerza de la gravedad, consiguiendo así el efecto de levitación. Sin embargo, si la bola está demasiado lejos del imán, entonces el campo magnético es demasiado débil y la bola cae. Si la bola está demasiado cerca del imán, el campo magnético es demasiado fuerte y la bola queda pegada al imán. Vemos pues que estamos ante una planta que se puede desestabilizar fácilmente.

2.1.2 Ecuaciones del MagLev

La planta es el levitador magnético de *Feedback Instruments Ltd.*, modelo 33-210 [7]. La fuerza magnética la genera el electroimán y es función de la tensión $v(t)$ aplicada a la bobina. La altura $h(t)$ de la bola se mide mediante un sensor óptico cuya sensibilidad es k_s .

Las ecuaciones que describen la dinámica de la planta vienen dadas por la segunda ley de Newton y por la ley de Kirchoff de tensión:

$$m \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = mg - k \left(\frac{i(t)}{h(t)} \right)^2 \quad (1)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) - Ri(t)$$

donde m es la masa de la bola, g es la constante gravitacional, L es la inductancia de la bobina, R es la resistencia de la bobina, y k es el factor de acoplamiento entre el campo magnético y la bola. La entrada a la planta $u(t)$ es la tensión aplicada a la bobina, $u(t) = v(t)$, y la salida $y(t)$ es la tensión que genera el fotosensor de posición, $y(t) = k_s \cdot h(t)$.

El equipo incluye un controlador interno que consigue que la corriente de la bobina sea proporcional a la tensión aplicada, $i(t) = k_v \cdot v(t)$. Gracias a esta relación, la dinámica de la planta se puede caracterizar con una única ecuación:

$$m \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = mg - k \cdot k_v^2 \left(\frac{v(t)}{h(t)} \right)^2 \quad (2)$$

La Tabla 1 muestra los valores numéricos de los principales parámetros.

Tabla 1: Valores de los parámetros de la planta.

Parámetro	Descripción
$m=0.02\text{Kg}$	Masa de la bola
$k_s=143.48\text{V/m}$	Sensibilidad del fotosensor
$k_v=1.05\text{A/V}$	Cte. controlador interno
$k=2.5 \times 10^{-5} \text{Nm}^2/\text{A}^2$	Cte. acoplamiento magnético
$g=9.81\text{m/s}^2$	Cte. gravitacional

2.1.3 Punto de operación y modelo lineal

El primer paso es decidir el punto de operación alrededor del cual obtendremos un modelo lineal de la planta. Este punto se caracteriza por el par (h_0, i_0) , o bien (h_0, v_0) , y se denomina punto de equilibrio. En él la atracción gravitatoria se iguala a la fuerza magnética atractiva. Definiendo una posición deseada h_0 , la corriente i_0 que se requiere para que la bola esté en esa posición es

$$i_0^2 = \frac{mg}{k} h_0^2 \quad (3)$$

Conociendo el punto de equilibrio, podemos hallar un modelo lineal realizando el desarrollo en serie de Taylor alrededor de él y despreciando los términos de orden 2 y superiores. El modelo linealizado es

$$\frac{d^2 \tilde{h}(t)}{dt^2} = \frac{2g}{h_0} \tilde{h} - \frac{2gk_v}{i_0} \tilde{v} \quad (4)$$

donde $\tilde{h} = h - h_0$ y $\tilde{v} = v - v_0$. La aplicación de la transformada de Laplace a la ecuación anterior nos permite obtener la función de transferencia entre las tensiones de entrada y salida,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-K_v}{s^2 - K_h} \quad (5)$$

donde $K_v = 2gk_v^2 k_s / i_0$ y $K_h = 2gk_v / h_0$. Para una altura y corriente de equilibrio, $h_0=9\text{mm}$, $i_0=0.8\text{A}$, tenemos que $G(s) = -3691/(s^2 - 2178)$, que corresponde a unos polos en ± 46.67 . La planta es, pues, inestable.

2.1.4 Configuración de control

La Figura 2 muestra la configuración de control escogida para las prácticas de grado, donde r es la señal de referencia, u la tensión que se aplica al electroimán, d son las perturbaciones sobre la posición de la bola e y es el equivalente de la posición de la bola en voltios. El control se implementa digitalmente mediante el *Real Time Workshop* de Simulink/Matlab y una tarjeta Advantech PCI 1711.

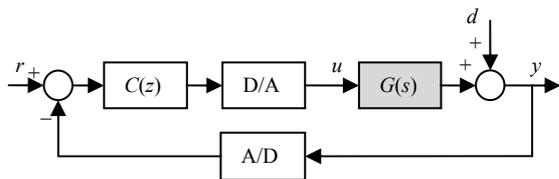


Figura 2: Configuración de control

2.2 CONTROL PD y PID

El controlador mínimo que puede estabilizar esta planta es un PD, $C(s) = k_p + k_d s$. Para su diseño, se pide a los estudiantes que sitúen el cero entre el polo estable de la planta y el origen, por ejemplo en -20 , y a continuación, ajusten la ganancia mediante el LGR de Evans (ver Figura 3).

Para el diseño del PID se proponen dos técnicas diferentes. En primer lugar, diseñar un PI y ponerlo en serie con el PD diseñado anteriormente y, en segundo lugar, diseñar el PID, $C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$, según la posición deseada para los polos dominantes del servo. Puesto que la función de transferencia del servo con PID tiene tres polos, se escoge uno de los polos lejano y los dos restantes serán los dominantes.

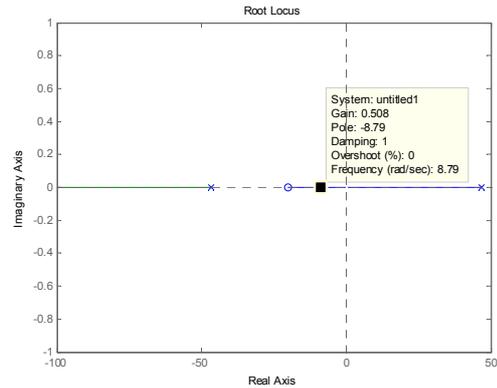


Figura 3: Control PD: Lugar Geométrico de las Raíces de Evans. Planta (inestable) y cero en -20 .

La Figura 4 muestra los resultados experimentales para un PD y un PID. La consigna es una señal cuadrada de frecuencia $f=0.15\text{Hz}$, amplitud de pico $A=0.4\text{V}$ y nivel de continua -1V . En los primeros 25s del experimento el controlador que está actuando es el PD. A los 25s entra en juego la acción integral, por lo que puede observarse cómo el error permanente a este tipo de señal de consigna tiende a cero. El PD escogido es $k_p=2$, $k_d=0.1$. El PID es $k_p=2$, $k_i=1$ y $k_d=0.1$. El periodo de muestreo en todos los casos es $T_s=1\text{ms}$.

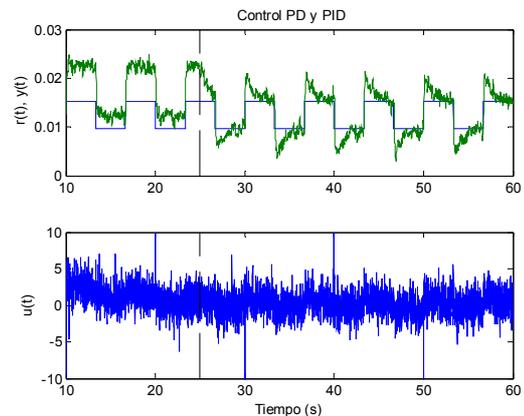


Figura 4: Seguimiento a consigna y esfuerzo de control para un PD y un PID

2.3 CONTROL ÓPTIMO ITAE

En este caso los estudiantes deben obtener un controlador óptimo por síntesis directa [3]. El objetivo del diseño es que la función de transferencia del servo minimice el ITAE (con error de aceleración nulo). Puesto que la planta (5) es de orden $n=2$, se escoge un denominador para el servo $D_M(s)$ de orden $2n-1=3$,

$$D_M(s) = s^3 + 2.97\omega_0 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3 \quad (6)$$

con $\omega_0=100\text{rad/s}$. El controlador resultante $C(s) = B(s)/A(s)$ será de orden $n-1=1$. La solución de la ecuación diofántica

$$D_M(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) \quad (7)$$

donde $N(s)$ y $D(s)$ son el numerador y el denominador de la planta respectivamente, da como resultado el siguiente compensador de avance de fase:

$$C(s) = 14 \frac{s + 32}{s + 297} \quad (8)$$

cuyo comportamiento se muestra en la Figura 5. En el instante $t=25\text{s}$ se añade acción integral al lazo mediante la inclusión de un PI ($k_p = k_i = 1$) en serie con $C(s)$. A los estudiantes les resulta muy llamativo cómo esta respuesta es mucho más “limpia” que la obtenida con los diseños clásicos PD y PID.

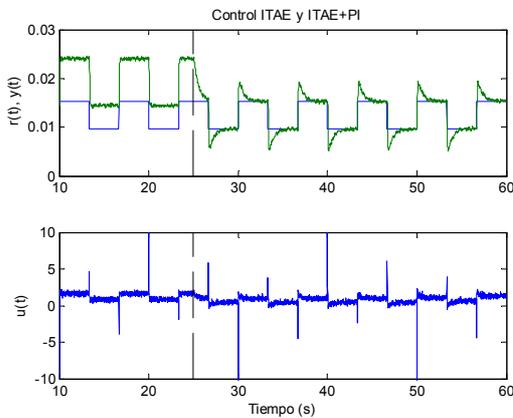


Figura 5: Seguimiento a consigna y esfuerzo de control para un controlador ITAE y un ITAE+PI

3 CONTROL MODERNO Y NO LINEAL

3.1 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

La representación de un sistema en el espacio de estados nos permite expresar un sistema de orden n ,

en n ecuaciones de orden 1 [8]. Las ecuaciones de estado del modelo linealizado del levitador, tomando $x_1(t) = h(t)$, $x_2(t) = \dot{h}(t)$, son:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_h & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -K_v \end{pmatrix}}_b u \quad (9)$$

$$y = \underbrace{(1 \quad 0)}_c \mathbf{x}$$

En este apartado ilustraremos el comportamiento del control por retroacción del estado $\mathbf{x}^T = (x_1 \quad x_2)$ de la planta. Como la planta no incluye ningún integrador, introducimos acción integral en el lazo definiendo un nuevo estado $\xi = r - y$ tal y como se muestra en la Figura 6. Así, la ley de control total es:

$$u = -\mathbf{k}_x \mathbf{x} + k_i \xi \quad (10)$$

y la planta “aumentada” resultante es:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\xi} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0_{2 \times 1} \\ -\mathbf{c} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} r \quad (11)$$

$$y = (\mathbf{c} \quad 0) \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{pmatrix}$$

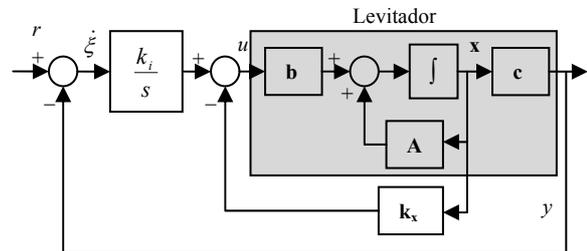


Figura 6: Retroacción de estados con acción integral

Existen diversas posibilidades para seleccionar los valores de \mathbf{k}_x y k_i . Una opción es fijar los polos del servo mediante la fórmula de Ackermann (ver apartado 3.2). Aquí se ilustra la obtención de los valores de \mathbf{k}_x y k_i que minimizan la siguiente función de coste con horizonte infinito:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x} + \rho \cdot u^2) dt \quad (12)$$

donde la penalización del error viene dada por la matriz \mathbf{Q} y la penalización del esfuerzo de control por el factor ρ . Para el caso

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}, \rho = 10 \quad (13)$$

el resultado es $\mathbf{k}_x = (3.01 \ 0.32)$ y $k_i = -7.07$.

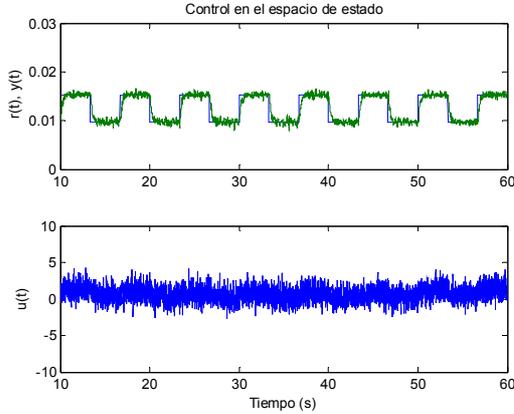


Figura 7: Seguimiento a consigna y esfuerzo de control de un regulador de estado óptimo con acción integral

3.2 CONTROL NO LINEAL

Existen diferentes técnicas no lineales que pueden servir para controlar el levitador magnético, siendo las de mayor interés docente la “linealización exacta”, los “modos deslizantes” y el “control adaptativo” [10]. En este apartado ilustraremos la primera de ellas.

El procedimiento es el siguiente: Se considera el sistema SISO (*Single Input Single Output*) no lineal descrito por las siguientes ecuaciones en el espacio de estados.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) \cdot u \\ y &= h(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (14)$$

con $f(\mathbf{x}) = g$, $g(\mathbf{x}) = -\frac{k \cdot k_v^2}{m \cdot h^2}$ y $h(\mathbf{x}) = x_1$.

El sistema de ecuaciones (14) se dice que es linealizable para estado-entrada de forma exacta si existe una región $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, en la que existe un difeomorfismo $\mathbf{z} = \phi(\mathbf{x})$ y una ley de control no lineal

$$u = \alpha(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x}) \cdot w \quad (15)$$

tal que las nuevas variables de estado y la nueva entrada satisfacen la siguiente relación lineal e invariante con el tiempo,

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{b}w \quad (16)$$

donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

El nuevo estado \mathbf{z} se denomina estado linealizado. Ahora el problema se reduce a hallar, por cualquier método lineal, la ley de control w que cumpla con nuestros requisitos para, a continuación, calcular la ley de control no lineal (15) a partir de w y $\alpha(\mathbf{x})$, $\beta(\mathbf{x})$.

La elección del difeomorfismo $\phi(\mathbf{x})$ y de $\alpha(\mathbf{x})$, $\beta(\mathbf{x})$, se realiza mediante el álgebra de Lie (ver el procedimiento completo en [10]). Para el levitador bajo estudio esta elección es $\mathbf{z} = \phi(\mathbf{x}) = (x_1 \ x_1)$, $\alpha(\mathbf{x}) = -f(\mathbf{x})/g(\mathbf{x})$ y $\beta(\mathbf{x}) = 1/g(\mathbf{x})$. Las ecuaciones de estado son

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot w \quad (18)$$

Añadimos acción integral al lazo mediante la definición de un nuevo estado, $\xi = r - z_1$ y obtenemos las ganancias del controlador de forma análoga al apartado 3.1. Pero, en este caso, forzaremos los polos del servo a $[-10 \ -15 \ -20]$ y calcularemos las ganancias mediante la fórmula de Ackermann. El resultado es $\mathbf{k}_x = (650 \ 45)$ y $k_i = -3000$. El comportamiento experimental del levitador se muestra en la Figura 8.

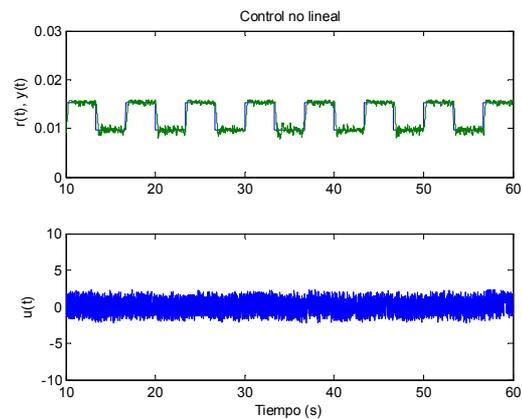


Figura 8: Seguimiento a consigna y esfuerzo de control para un controlador no lineal

4 ADAPTACIÓN DEL LEVITADOR AL LABORATORIO REMOTO

4.1 NECESIDAD E INTERÉS DEL LABORATORIO REMOTO

La posibilidad de realizar prácticas remotas se enmarca totalmente dentro de la filosofía EEES, donde el trabajo del estudiante fuera de clase es un aspecto fundamental. Desde el punto de vista educativo, reemplazar un laboratorio real por otro remoto no es solamente una cuestión de desarrollar un sistema utilizando una tecnología u otra, sino que su utilización requiere un enfoque pedagógico completamente distinto y en el cual las prácticas deben ser intuitivas y fáciles en el ámbito funcional para que, de esta manera, se pueda focalizar el aprendizaje del alumno en la parte educativa de la práctica.

La gran ventaja de poder realizar unas prácticas remotas es que nos permite sacar mayor rendimiento al material didáctico disponible del laboratorio, el cual por norma suele tener un alto coste. Con estos cambios se consigue abaratar el precio a la hora de equipar los laboratorios y a su vez, ampliar el abanico de prácticas. La ganancia es sustancial, tanto en tiempo como en la variedad de prácticas que se pueden realizar. Además, los alumnos pueden realizar dichas prácticas desde cualquier lugar y en cualquier franja horaria, con tan solo disponer de conexión a Internet, lo que supone una gran flexibilidad y tener un laboratorio disponible las 24 horas los 365 días del año.

4.2 LA PROBLEMÁTICA DE LOS LEVITADORES DE BOLA

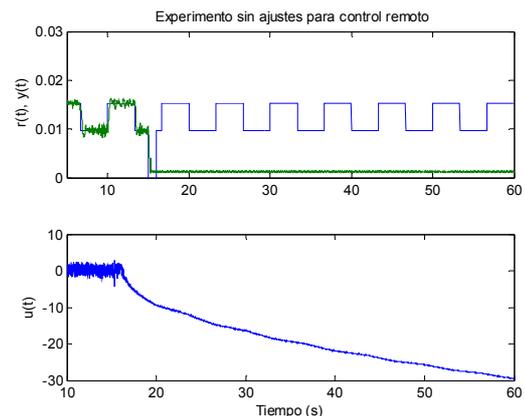
A nivel práctico, los levitadores de bola no parecen *a priori* una buena opción para un laboratorio remoto puesto que cuando el sistema de desestabiliza la bola se pierde (o se cae o queda pegada al imán). Sin embargo, los estudiantes prefieren ver una bola “flotar en el aire” antes que controlar el movimiento de subida y bajada de un disco guiado como el de [2]. Después de buscar y no encontrar ningún centro docente que haya realizado prácticas remotas con el equipo objeto del presente artículo, nos planteamos buscar una solución y diseñar nuestros propios ajustes a fin de ofrecer la posibilidad de trabajar remotamente.

Los problemas más graves a los que hemos tenido que dar solución son los derivados de la desestabilización del sistema: (a) el evitar que, al caer la bola, quede tan lejos del punto de operación que el sistema no pueda volver a levitarla; y (b) el

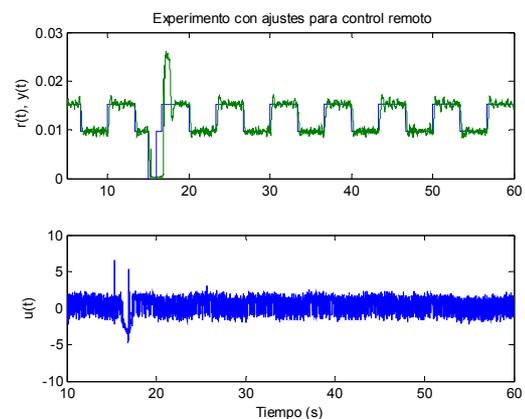
conseguir que, cuando la bola entra en contacto con el imán, no se quede pegada permanentemente.

Después de probar diferentes materiales y de configurar distintas plataformas a la vez que se garantizaba que las propiedades magnéticas de la planta no se veían afectadas por las modificaciones, se ha implementado la solución mostrada en la Figura 1. Para evitar la caída de la bola fuera del alcance del campo magnético del imán se ha confeccionado la plataforma de PVC mostrada en A. Para evitar el contacto con el imán, y puesto que el equipo, por razones de protección, no permite cambiar la polaridad del mismo a fin de liberar la bola, se ha debido de adoptar una solución mecánica (ver B en Figura 1) que, sin cambiar la dinámica de la planta, impide que la bola esté atrapada arriba demasiado tiempo.

El excelente comportamiento de estos ajustes queda ilustrado en la Figura 9. Con el sistema funcionando en régimen permanente, se aplica un pulso de consigna desestabilizador de amplitud $-1.5V$ y duración $1s$ en el instante $15s$.



(a) Sin ajustes para control remoto



(b) Con los ajustes para control remoto

Figura 9: Recuperación de la bola en un experimento remoto “fallido”, sin y con los ajustes implementados

Vemos como en el caso sin ajustes (Figura 9(a)) la bola queda pegada al imán (y por ello su posición ya no se modifica) y, lo que es peor, a no ser que alguien quite la bola del imán ya no es posible realizar un nuevo experimento. En cambio, con los ajustes implementados (Figura 9(b)), vemos que efectivamente el sistema se ha desestabilizado pero, pasados algunos segundos, el sistema ha recuperado la bola y se puede tanto terminar el experimento en curso como realizar otros nuevos.

Finalmente, cabe comentar que estos ajustes se han revelado útiles también en los experimentos presenciales. En concreto, el hecho de que el imán recoja la bola de la plataforma y no de una mano humana hace mucho más robusto el comportamiento del sistema, sobre todo en los instantes iniciales donde, a menudo e inadvertidamente, la mano imprime un cierto momento de inercia a la bola, capaz, a veces, de desestabilizar por completo al sistema.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS REMOTAS

La comunicación remota con la planta supone (a) poder descargar el algoritmo de control al levitador, (b) poder iniciar y finalizar el experimento, y (c) poder monitorizar el comportamiento, no sólo mediante la recepción de los datos de tensión (de entrada y salida) sino también visualmente por medio de una cámara.

Tal y como se ha comentado en el apartado 4.1 es fundamental que el entorno sea sencillo y amigable para el usuario. Por ello las pantallas contienen la información imprescindible, ni más ni menos, para seleccionar el algoritmo de control y ajustar sus parámetros (ver Figura 10).

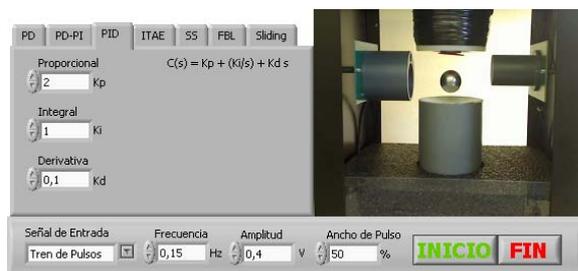


Figura 10: Pantalla de acceso a los diversos algoritmos de control y sintonización de los parámetros

En estos momentos se está llevando a cabo la fase de desarrollo de la interfaz para las prácticas remotas las cuales entrarán en funcionamiento en el curso 2010/2011 en la ETSETB (Escuela Técnica Superior

de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona). En un primer momento serán accesibles desde la red de área local del departamento pero está previsto que, a final de curso ya sean accesibles desde la página web del grupo de Sistemas Electrónicos de Control, www.control.upc.edu.

4.4 VALORACIÓN DE LA EXPERIENCIA CON LOS ESTUDIANTES

El equipo se adquirió en diciembre de 2009 y la primera experiencia con los estudiantes se ha llevado a cabo en el cuatrimestre de primavera del curso 2009/2010. En concreto, han realizado prácticas con este equipo un total de 20 estudiantes de la asignatura troncal *Sistemas Electrónicos de Control*, de cuarto curso de la titulación de Ingeniería Electrónica de la ETSETB (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona). Y, actualmente, es la planta usada en un proyecto fin de carrera cuyo objetivo es comparar el control no lineal con el control lineal robusto. Esta primera experiencia y las que estamos preparando para el siguiente curso nos serán muy valiosas en el diseño de las prácticas que se impartirán en la asignatura equivalente en los nuevos estudios de grado y que entrará en funcionamiento en el curso 2011/2012 con una matrícula estimada de 40 estudiantes por grupo.

La respuesta de la totalidad de estudiantes ha sido muy estimulante. Todos ellos han valorado muy positivamente la posibilidad de hacer prácticas con un equipo real. Se han sentido muy motivados y nos han comentado que estas prácticas les han permitido tanto entender conceptos (como el de la inestabilidad) como consolidar las técnicas de diseño y análisis presentadas en clase. Más aún, han sido conscientes de que la asignatura de control es quizás una de las asignaturas de su escuela con un enfoque más ingenieril, en el sentido de que las herramientas matemáticas tienen una utilidad directa en el mundo real.

Un factor que creemos que ha sido determinante en generar este entusiasmo ha sido el enfoque “competitivo” de las prácticas. Los estudiantes debían realizar un primer diseño en casa y ajustarlo razonadamente en el laboratorio con la ayuda de los compañeros. El resultado fue un desarrollo de las prácticas donde los estudiantes disfrutaron comparando sus diseños y midiendo sus conocimientos y, finalmente, votando al mejor diseño.

5 CONCLUSIONES

El levitador magnético de bola de *Feedback Instruments Ltd.* se revela como una planta muy versátil en la enseñanza de la teoría de control, tanto

clásica como avanzada y tanto en formato presencial como remoto. Las prácticas y proyectos que pueden llevarse a cabo con él son muy variados y abarcan multitud de aspectos de la teoría de control. A fin de poder adaptar las prácticas a un entorno de experimentación remoto hemos tenido que realizar unos ajustes en el equipo original. Con estos ajustes hemos conseguido que, aunque el experimento remoto resulte fallido, la bola quede situada rápidamente en posición de volver a iniciar otro experimento.

Nuestra experiencia con los estudiantes es muy positiva, siendo el levitador uno de los equipos de prácticas más valorados. Además, una vez realizadas las prácticas presenciales, la posibilidad de realizar experimentos remotos adicionales les puede animar a probar otras estrategias de control y a ser más atrevidos en sus diseños al no estar el profesor presente.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a Josep Ramon Casas quien, en su cargo de subdirector de infraestructuras y laboratorios del departamento de TSC, aprobó la adquisición de este equipamiento por parte del grupo de Sistemas Electrónicos de Control.

Referencias

- [1] Aliane, N., (2008) “Limitaciones Pedagógicas de los Laboratorios Remotos de Control”, XXIX Jornadas de Automática, CEA-IFAC.
- [2] Casini, M., D. Prattichizzo, A. Vicino, (2003), “The Automatic Control Telelab: A User-Friendly Interface for Distance Learning”, *IEEE Trans. on Education*, 46(2).
- [3] Chen, C.-T., (1993), *Analog and Digital Control System Design. Transfer Function, State-Space, and Algebraic Methods*, Saunders College Publishing.
- [4] Dormido, S., (2004), “Control Learning: Present and Future”, *Annual Review in Control*, 18(1), pp.115-136.
- [5] Guzmán, J.L., F. Rodríguez, M. Berenguel, S. Dormido, (2005), “Laboratorio Virtual para la Enseñanza de Control Climático de Invernaderos”, *RIAI*, 2(2), pp. 82-92.
- [6] Laboratorio 4 Sistemas: Levitación Magnética. Prácticas de la asignatura de Teoría de Circuitos y Sistemas, de 2º curso de Ingeniería Industrial.

Universidad Miguel Hernández.
(<http://www.cea-ifac.es/w3grupos/educontrol/>)

- [7] *Magnetic Levitation Installation & Commissioning*, 33-9421C, Feedback Instruments Ltd., 2006.
- [8] Ogata K., (1997), *Modern Control Engineering*, 3ª ed., Prentice Hall.
- [9] Santana, I., M. Ferre, L. Hernández, R. Aracil, Y. Rodríguez, E. Pinto, (2010), “Aplicación del Sistema de Laboratorios a Distancia en Asignaturas de Regulación Automática”, *RIAI*, 7(1), pp.46-53.
- [10] Slotine, J.-J. E., W. Li, (1991), *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.