

Construcción de Laboratorios Reales y Virtuales para la Enseñanza del Control: Primeras Experiencias en la PUCV

G. Farias*, M. Caro*, D. Aravena*, A. España*, H. Vargas*, G. Hermosilla*
A. Aracena*, D. Muñoz de la Peña** S. Dormido***

*Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2147, Valparaíso, Chile.
e-mail: gonzalo.farias@ucv.cl, mauricio.caro@live.cl, dav.htm@gmail.com,
sir.mplx@gmail.com, hector.vargas@ucv.cl, gabriel.hermosilla@ucv.cl, alvaro.aracena@ucv.cl

**Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain.
e-mail: dmunoz@us.es

*** Universidad Nacional de Educación a Distancia, C/ Juan del Rosal 16, Madrid, Spain.
e-mail: sdormido@dia.uned.es

Resumen: La comprensión de los conceptos fundamentales del control automático requiere de la integración de los aspectos prácticos de la disciplina. En este artículo se describen el desarrollo y uso en el aula de dos plantas pilotos demostrativas y de dos laboratorios virtuales. Las plantas pilotos corresponden a un sistema control de doble péndulo invertido, y a un sistema de control de posición y trayectoria de una esfera en un plano. Los dos laboratorios virtuales son simulaciones interactivas de un sistema de control de levitación magnética, y de un sistema de control de posición y velocidad de un motor DC. Los resultados, que han sido satisfactorios en opinión de los alumnos, se describen en detalle.

Keywords: Control Education, Virtual Labs, Simulations.

1. INTRODUCCION

Es sabido que la comprensión completa de los conceptos fundamentales en la mayoría de las asignaturas impartidas en las carreras de Ciencias e Ingenierías requiere de un complemento importante desde el punto de vista práctico. La disponibilidad de laboratorios bien equipados generalmente no es suficiente ante la existencia de grupos de estudiantes numerosos. Es por ello que incorporar horas pedagógicas cuya finalidad sea reforzar la teoría desde la práctica resulta todo un desafío en asignaturas como Control Automático. En las últimas décadas, las tecnologías de la información y comunicación (TICs) están teniendo un fuerte impacto en educación. El uso de entornos altamente interactivos, con gran riqueza gráfica, o la incorporación de redes sociales, ofrece nuevas posibilidades a la enseñanza de disciplinas donde el espacio para lo práctico cumple un rol clave, ver Heck (1999), Dormido (2004) y Farias (2010).

En este artículo se describe brevemente el trabajo realizado para reducir la brecha existente entre los principios teóricos y los aspectos prácticos en la asignatura de Control Automático que se imparte a las carreras de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). El trabajo consiste en la incorporación de nuevos recursos pedagógicos en el aula. Concretamente se han construido dos plantas pilotos demostrativas y dos laboratorios virtuales de plantas ya existentes en el laboratorio de control automático.

Las dos plantas pilotos corresponden a un sistema control de doble péndulo invertido denominado Pendubot, ver Caro (2014), y a un sistema de control de posición y trayectoria de

una esfera en un plano conocido como Ball and Plate, ver Aravena (2014). Ambas plantas han sido construidas por alumnos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica como parte de su proyecto de título. Las plantas pilotos son de fácil transporte y permiten demostrar en el aula algunos conceptos claves en el control como la estabilidad, perturbación, punto de operación, variables controladas, etc. Los dos laboratorios virtuales en tanto, corresponden a simulaciones gráficas y de elevadas capacidades interactivas de un sistema de control de levitación magnética de una esfera de metal denominado Maglev, ver España *et al.* (2013), y de un sistema de control de posición y velocidad angular de un motor DC denominado Servo Motor, ver Vargas *et al.* (2008). El diseño y desarrollo de los laboratorios virtuales ha sido posible gracias a la herramienta de autor denominada Easy Java Simulations (EJS), ver Esquembre (2008). Esta herramienta gratuita permite crear aplicaciones en Java de manera sencilla y directa, concentrando el esfuerzo de desarrollo más en los aspectos pedagógicos de la simulación que en los detalles técnicos. Para el laboratorio virtual del Servo Motor se ha desarrollado además un módulo que permite la evaluación automática de un guión de prácticas o protocolo de actividades. Esto ha sido posible gracias a la combinación de un nuevo elemento de EJS denominado Automatic Evaluation Element (AEE) y el servidor Goodle GMS, ver Farias *et al.* (2012).

El artículo está estructurado como sigue. En la Sección 2 se presenta una breve descripción de las plantas piloto. La Sección 3 ofrece detalles de los laboratorios virtuales. El uso en el aula de estos recursos pedagógicos son descritos en la Sección 4. Finalmente, la Sección 5 presenta las principales conclusiones y trabajos futuro propuestos.

2. PENDUBOT Y BALL AND PLATE

2.1 Descripción del Pendubot

El Pendubot es un sistema electromecánico que consiste en dos eslabones rígidos acoplados en un punto común mediante una unión rotacional. El extremo de uno de ellos (eslabón 1) está sujeto a un par, mientras que el otro (eslabón 2) se encuentra libre. Dada la estructura de este sistema, se lo considera un sistema de dos grados de libertad sub-actuado, en el cual, la aplicación de un par al eslabón 1, afectará al estado del eslabón 2 a través de una relación no lineal.

La aplicación del par al primer eslabón se realiza mediante un motor DC que se encuentra fijo a una mesa, de tal manera que los eslabones se puedan mover en el plano vertical, como se muestra en la Fig. 1. Para la medición de la velocidad y la posición angular de cada enlace se emplean dos encoders ópticos de tipo incremental, uno situado en el eje del motor y el otro acoplado en la unión de los eslabones.

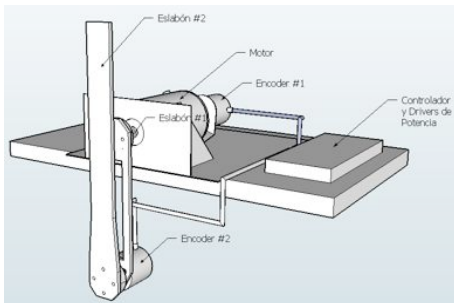


Fig. 1. Vista diseño del Pendubot con eslabones en la posición abajo-arriba.

2.2 Control del Pendubot

Para diseñar un controlador del sistema en una posición determinada, el planteamiento del control se divide en dos pasos: un controlador denominado Swing-up, diseñado mediante control por realimentación parcial de estados, que permita sacar los eslabones desde el reposo y llevarlos a la posición cercana a la mostrada en la Fig. 1. Posteriormente se requiere de un segundo controlador de Equilibrio que mantenga los eslabones estabilizados en una de las seis posición deseadas, y que ha sido diseñado por realimentación de estados mediante la técnica Regulador Cuadrático Lineal (LQR).

Para realizar el control por realimentación de estados se debe linealizar el modelo del Pendubot en uno de los seis puntos de equilibrios elegidos. La Ecuación (1) muestra la función de transferencia de la posición de la Fig. 1. Donde θ_1 corresponde al ángulo del primer eslabón y V a la tensión aplicada al motor DC.

$$\frac{\theta_1(s)}{V(s)} = \frac{219.1(s^2 - 59.1)}{s^4 - 16.2s^2 - 5011} \quad (1)$$

Obsérvese que una vez equilibrado el Pendubot en un punto deseado, el sistema de control debe considerar el cambio de referencia hacia otro punto de equilibrio. Por este motivo, se debe modificar lentamente el ángulo del primer eslabón, y

una vez próximo al punto de equilibrio deseado, se deben cambiar las ganancias del controlador de realimentación de estados por las ajustadas al modelo linealizado del punto nuevo.

La simulación del Pendubot se realiza en Matlab/Simulink. La Fig. 2 muestra el modelo completo del sistema de control descrito.

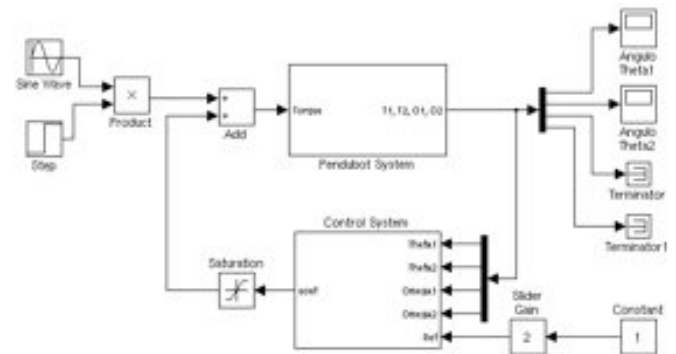


Fig. 2. Modelo Simulink del sistema de control del Pendubot.

2.3 Construcción del Pendubot

Con el fin de tener un primer diseño aproximado del sistema se ha utilizado la herramienta gráfica Sketch-up. Mediante este software se han definido los tamaños, formas y disposiciones de cada uno de los elementos del Pendubot. La Fig. 1 presenta una vista del diseño propuesto. El diseño y construcción del sistema real han requerido una constante adecuación y depuración debido a las limitaciones existentes desde el punto de vista del material utilizado en la construcción de los eslabones (aluminio), así como también a las restricciones físicas del actuador (el par disponible del motor) y los sensores (tamaño y peso de los encoders). El peso total del conjunto del pendubot a equilibrar (2 eslabones, 1 encoder y 2 acopladores) es de aproximadamente 365 [grs], mientras que el par máximo especificado para el motor es 1.8 [Nm]. La Fig. 3 presenta la disposición final del Pendubot construido controlado en un punto de equilibrio.

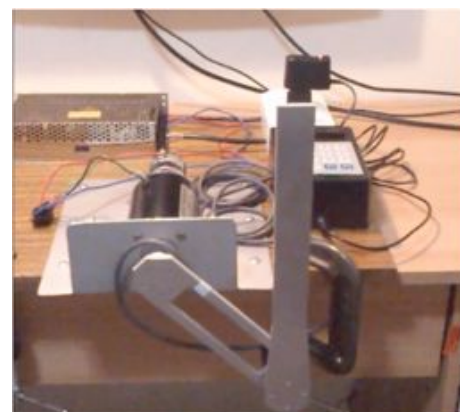


Fig. 3. Vista del sistema Pendubot construido.

Para la implementación del sistema de control se decidió separar en dos el sistema de adquisición y control. Por una parte la adquisición de datos de los encoders se han utilizado dos microcontroladores PIC encargados de realizar el conteo

de pulsos de cada encoder y de enviar la información a un microcontrolador Arduino. El microcontrolador Arduino Mega funciona como un procesador central, el cual comanda la ejecución de rutinas de adquisición en los demás microcontroladores. De esta forma, cada determinado periodo de tiempo ordena a cada microcontrolador PIC el envío de la cuenta de pulsos de los encoders para su correspondiente procesamiento, lo cual en definitiva permite generar una acción de control adecuada mediante el accionamiento del motor DC.

2.4 Descripción del Ball and Plate

La planta Ball and Plate (BP) es la extensión en dos dimensiones del sistema Ball and Beam o Bola y Viga, donde este último consiste en balancear una esfera con el objetivo de posicionarla en un punto específico de una viga finita. El sistema BP tiene la misma finalidad, solo que posiciona y balancea la bola sobre una plataforma o plano, proporcionándole al usuario una mayor variedad de aplicaciones de control sobre la esfera, tales como posicionarla en un punto determinado en el plano, seguimiento de trayectorias circulares, o realizar trayectorias más complejas como las denominadas figuras de Lissajous.

Se dispone de dos servo motores (actuadores) para generar los ángulos de inclinación (θ_x y θ_y) que forma la plataforma con los ejes en las direcciones en X e Y respectivamente. Los actuadores están acoplados a enlaces metálicos que van unidos a la plataforma de manera que la esfera se mueva bajo la influencia de la fuerza de gravedad.

La detección de la posición de la esfera sobre la plataforma se realiza mediante el procesamiento de imágenes obtenidas por una cámara montada en la parte superior de la planta. Un diseño de la planta en Sketch-up se presenta en la Fig. 4.

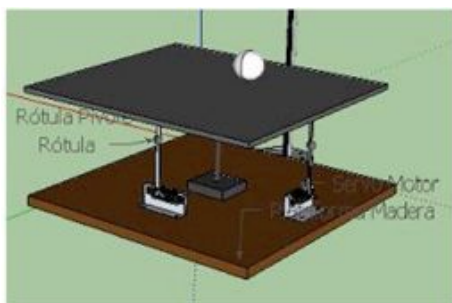


Fig. 4. Vista diseño del Ball and Plate.

2.5 Control del Ball and Plate

La Ecuación (2) representa la dinámica de un modelo lineal del comportamiento del sistema respecto a la inclinación en el eje X. La entrada $V_x(s)$ corresponde a la tensión aplicada al servo motor encargado del eje X. La salida $P_x(s)$ representa la posición medida por el sistema de visión.

$$\frac{P_x(s)}{V_x(s)} = \frac{-7}{s^2} \quad (2)$$

Un análisis del Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) permite observar que el control del sistema en cada eje puede realizarse mediante un controlador Proporcional Derivativo (PD) debido a la incorporación de un cero real más una ganancia negativa. Durante la realización del proyecto, también se han diseñado otras estrategias de control para el sistema real tales como un controlador por realimentación de estados y un controlador PID. Las implementaciones y prueba de las diferentes estrategias de control disponibles se pueden simular en el modelo Simulink desarrollado del sistema.

2.6 Construcción del Ball and Plate

Al igual que el proceso de desarrollo del Pendubot, el diseño y construcción del sistema BP se ha efectuado de forma iterativa mediante Sketch-up. La mayor dificultad del diseño mecánico proviene de evitar el huelgo producido por las uniones y acoplamientos que convierten la rotación de los servo motores en las inclinaciones requeridos del plano. La Fig. 5 presenta la disposición final del sistema Ball and Plate construido.

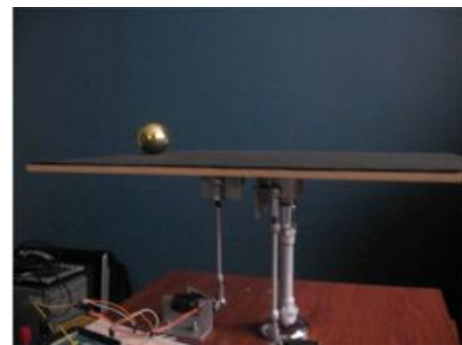


Fig. 5. Vista del sistema Ball and Plate construido. El sistema de visión se encuentra adosado a un soporte que permite a la cámara capturar una imagen perpendicular del plano.

Similar al trabajo realizado con el Pendubot, la implementación de los sistemas de control se ha realizado en un microcontrolador Arduino Mega. Respecto del sistema de visión, el cálculo de la posición de la esfera se ha implementado mediante las librerías de procesamiento de imágenes disponibles en el ambiente de programación Labview. La posición es transmitida al microcontrolador a través de una conexión USB al computador que ejecuta la aplicación Labview.

3. MAGLEV Y SERVO MOTOR

3.1 Descripción del Maglev

La planta Maglev (Magnetic Levitation) de la marca Feedback, ver Fig. 6, es una planta que por medio del uso de las leyes electromagnéticas y en combinación con técnicas de control hace posible la suspensión y el control de la posición en una dimensión de un objeto metálico de aproximadamente 20 [grs]. Para lograr esto la planta Maglev tiene un electroimán y un sensor de posición con los cuales se hace posible suspender y controlar el objeto en cuestión.

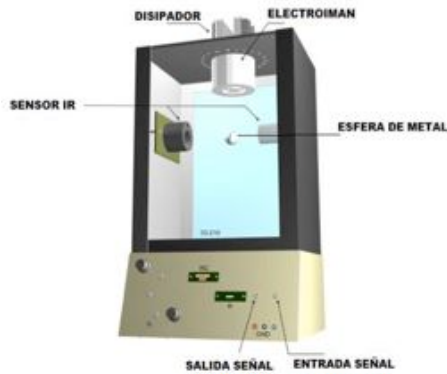


Fig. 6. Sistema Maglev de Feedback.

La fuerza electromagnética producida por el electroimán se puede controlar mediante la corriente que circula en la bobina. La medición de la posición se realiza mediante un sistema foto-emisor y foto-receptor de infrarrojos ubicados de forma transversal a la esfera metálica. Al foto-emisor se le aplica una cantidad constante de voltaje y este a su vez emite un haz de luz, el cual es recibido por el foto-receptor. La salida del foto-receptor es directamente proporcional a la cantidad de luz infrarroja recibida. Y es así que cuando el objeto metálico se aleja del electroimán, la cantidad de luz recibida por el foto-receptor aumenta, por otro lado si la cantidad de luz disminuye significa que el objeto se acerca al electroimán.

3.2 Control del Maglev

El control de la planta se ha realizado mediante diferentes estrategias de control. Dependiendo del modelo utilizado es posible aplicar desde simples técnicas de control lineal tales como asignación de polos, PID, y realimentación de estados, hasta técnicas avanzadas de control no-lineal tales como modos deslizantes y linealización exacta por realimentación.

La Ecuación (3) representa la dinámica de un modelo lineal sencillo y representativo del comportamiento del sistema en un punto de equilibrio. La entrada $U(s)$ corresponde la corriente que circula por la bobina del electroimán. La salida $V(s)$ representa la tensión medida en el foto-receptor del sensor de posición de la planta.

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{-3695}{s^2 - 2180} \quad (3)$$

Un análisis del LGR del modelo lineal permite considerar como primer intento de control el uso de un controlador Proporcional Derivativo (PD). Dicho controlador permite estabilizar el sistema en lazo cerrado mediante la ubicación de un cero real en el semiplano derecho más la utilización de una ganancia proporcional negativa. Sin embargo, debido a que el sistema es de tipo cero, el uso de un controlador PID o un controlador por realimentación de estados proporciona unas mejores prestaciones.

La adquisición de datos y control de la planta Maglev se realiza mediante un modelo en Matlab/Simulink desarrollado

originalmente por la empresa Feedback, y que ha sido modificado y adaptado para incorporar una mayor variedad de estrategias de control.

3.3 Laboratorio Virtual del Maglev

La simulación diseñada en EJS, ver Esquembre (2004), y presentada en la Fig. 7, tiene como principal característica una interfaz gráfica representativa de la dinámica y percepción visual del sistema real Maglev. De este modo al momento de realizar experiencias, los estudiantes pueden observar efectos similares a los obtenidos con la planta real.

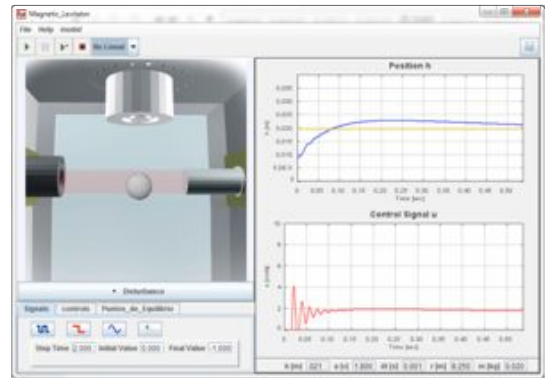


Fig. 7. Vista del laboratorio virtual del Maglev.

La interfaz gráfica e interactiva se obtiene mediante la programación en EJS de los paneles de Modelo y Vista. Además del aspecto visual de la simulación, es posible encontrar diversos elementos que dan dinamismo a la simulación. Dentro de estos son importante destacar las diversas señales de entradas: seno, impulso, escalón y referencia, tres tipos de controladores PD, PID y por realimentación de estados, en los cuales es posible cambiar los parámetros de sintonía, y así los alumnos sean capaces de probar sus propias ganancias de los controladores.

3.4 Descripción del Servo Motor

El Servo Motor consiste en una planta diseñada por Feedback que permite controlar la posición y velocidad angular de un disco (ver Fig. 8). La medición de las variables se efectúa mediante un tacómetro y un potenciómetro adosado al eje del motor DC.



Fig. 8. Servo Motor de Feedback.

3.5 Control del Servo Motor

La dinámica de la velocidad angular del motor puede modelarse como un sistema de primer orden. A este sistema se puede agregar un integrador puro para modelar la posición angular del disco. La Ecuación (4) presenta la función de transferencia de este último modelo donde θ representa la posición angular y V la tensión aplicada al motor DC.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2.5}{10.1s^2 + s} \quad (4)$$

El control de la planta se puede realizar fácilmente con un controlador proporcional. Aunque puede ser también necesario utilizar algún controlador PD o PID si la zona muerta (dead-zone) del motor es demasiado grande.

3.6 Servo Motor: Laboratorio Virtual

El laboratorio virtual utilizado ha sido desarrollado bajo el proyecto Automatl@bs de la UNED, ver Vargas *et al.* (2008). En este laboratorio el estudiante puede manipular en lazo abierto o en lazo cerrado el control mediante un PID de la posición y velocidad del motor. El sistema simulado corresponde a un modelo de primer orden con zona muerta y saturación de la tensión de entrada al motor. La interfaz de usuario del laboratorio virtual desarrollado también en EJS se presenta en la Fig. 9.

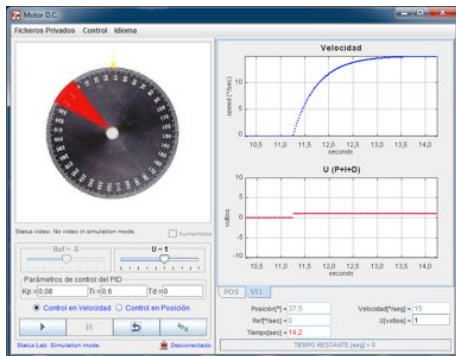


Fig. 9. Vista del laboratorio virtual del Servo Motor.

3.7 Servo Motor: Evaluación Automática

Debido a la interactividad y facilidad de uso del laboratorio virtual del Servo Motor, se decidió incorporar un sistema de evaluación automática a la simulación (AEE), ver Farias *et al.* (2012). Este mecanismo (ver Fig. 10) permite personalizar a cada alumno las constantes principales de la planta (ganancia, constante de tiempo y zona muerta del motor). La personalización se realiza de manera automática y transparente una vez que el alumno se autentica en el sistema.

Posterior a la personalización, el estudiante debe realizar un protocolo de actividades y contestar adecuadamente las cuestiones que se le inquieren a través de un formulario que proporciona el mismo laboratorio virtual. Las preguntas van desde la identificación de las constantes principales de la planta, hasta el diseño de un controlador que disminuya el error en estado estacionario, o que la variable controlada

(posición o velocidad angular) cumpla ciertas especificaciones de control.

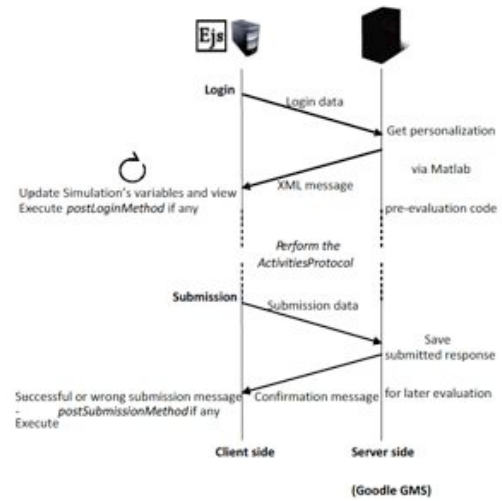


Fig. 10. Diagrama de secuencia entre la aplicación EJS+AEE y Google GMS.

Una vez que el alumno responde completamente el protocolo de actividades, las respuestas pueden ser enviadas a un servidor Google GMS que evalúa las mismas con un modelo Simulink de dinámica idéntica al utilizado en la aplicación EJS (y con los mismos parámetros personalizados asociados al alumno).

La evaluación determina de forma automatizada si las respuestas están acordes al modelo utilizado por el estudiante en el laboratorio virtual. Evidentemente existe una cierta tolerancia en la comparación de las respuestas para evitar errores de redondeo. Al finalizar la evaluación el servidor pondera las respuestas correctas y genera un informe con una calificación del estudiante. Son claras las ventajas de utilizar la evaluación personalizada y automática especialmente cuando hace frente a un grupo numeroso de estudiantes.

4. USO DE LOS DESARROLLOS EN EL AULA

4.1 Plantas piloto en el aula

Las plantas pilotos del Pendubot y Ball and Plate desarrolladas y descritas en la Sección 2, son utilizadas en el aula como recursos demostrativos de la aplicación de la teoría de control automático. Su finalidad es más bien de incentivar y motivar la inquietud en los estudiantes por los conceptos que se estudiarán en la asignatura de Control Automático. Por ello, estas plantas han sido presentadas al comienzo y en la mitad del semestre. Ambas plantas son de fácil transportar al aula, y en el caso del Pendubot no se requiere de la asistencia de un computador para monitorear o controlar el proceso gracias a que todo está embebido en microcontroladores.

Las plantas pilotos son muy adecuadas para explicar de manera didáctica conceptos como la estabilidad, realimentación, variables manipuladas y controladas, perturbaciones, puntos de operación, modelado y linealización entre otros.

4.2 Laboratorios virtuales en y fuera del aula

Las simulaciones interactivas desarrolladas como los laboratorios virtuales del Maglev y del Servo Motor permiten experimentar de manera sencilla diversas estrategias de control directamente en el computador. El uso de estos laboratorios en el aula se hace de manera que todos los alumnos puedan observar al mismo tiempo los efectos del control en la simulación. Sin embargo, debido a que los laboratorios pueden distribuirse, los alumnos tienen la posibilidad de experimentar con las variadas opciones disponibles también fuera del aula (por ejemplo en su casa), a su propio ritmo, y convenientemente en el horario que deseen. Desde el punto de vista del diseño de estrategias de control, el caso de la simulación del Maglev claramente ofrece una gran gama de alternativas. Así por ejemplo, es posible realizar un diseño del controlador relativamente simple mediante el uso de la técnica LGR, aunque también está la posibilidad de diseñar una estrategia de control PID, o incluso por realimentación de estados.

El caso del laboratorio virtual del Servo Motor, aunque es muy sencillo, es bastante útil para la evaluación automática. En efecto resolver el protocolo de tareas (o guión de prácticas) de laboratorio permite a los alumnos obtener una nota ponderada en un 10% de la calificación final de la asignatura. El plazo para contestar el protocolo de tareas es de alrededor de 2 semanas, y normalmente se planifica casi al finalizar el semestre. Es importante recalcar que evidentemente los estudiantes intercambian opiniones y dudas respecto al protocolo de tareas, pero debido a que el modelo del Servo Motor está personalizado a cada alumno, los valores numéricos por sí solos no ayudan en nada en la resolución de las cuestiones.

4.3 Evaluación de los desarrollos por los estudiantes

El uso de los recursos educativos desarrollados se ha ido introduciendo paulatinamente en la asignatura desde hace cuatro semestres. En el segundo semestre de 2012 se hizo uso del laboratorio virtual del Servo Motor, debido fundamentalmente a que tanto la simulación como el sistema de evaluación automático estaban bastante avanzados. Las principales dificultades que han indicado los estudiantes por el uso de este recurso provienen de fallas detectadas en el sistema de evaluación, las cuales en su gran mayoría consisten principalmente en errores de redondeo y validación de respuestas (por ejemplo preguntas sin contestar, símbolos inválidos, uso de coma decimal en vez de punto, etc.). Todas las cuales se han ido depurando en la medida que son detectadas.

En una encuesta anónima realizada sobre el uso de la evaluación automática cerca del 82% de los estudiantes respondió que el laboratorio virtual le ayudó a comprender conceptos relevantes de la asignatura. Solo un 15% del alumnado no observó valor educativo en el uso del laboratorio. Respecto al uso demostrativo de plantas piloto en el aula, los comentarios en general son bastante buenos, aunque también depende mucho de si los sistemas mostrados

han sido vistos con anterioridad. Lo cual puede ser un constante desafío de construir o utilizar nuevas plantas.

5. CONCLUSIONES

Los recursos didácticos desarrollados han permitido un mejor acercamiento a los conceptos teóricos de la asignatura de Control Automático dictada en la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Las opiniones son en general positivas respecto al uso de plantas piloto demostrativas así como también del uso de mecanismos de evaluación automática en laboratorios virtuales. Es evidente que las plantas piloto al ser construidas normalmente presentan mayor dificultad al momento de realizar el control. Sin embargo, la construcción de las plantas representa un desafío interesante para el estudiante de ingeniería, y permite incrementar la disponibilidad de las mismas a un costo mucho menor que las proporcionadas por proveedores reconocidos. Como trabajo futuro, es probable que se incorpore el mecanismo de evaluación automática al laboratorio virtual del Maglev, esto debido a que el sistema de evaluación automática puede incorporarse a cualquier aplicación desarrollada con EJS. Además de la creación de laboratorios virtuales de las plantas piloto Pendubot y Ball and Plate.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT 11121590 otorgado por el MINEDUC, y por el proyecto PIA 37.411/2014 de la PUCV.

REFERENCIAS

- Aravena D. (2014), *Diseño, Simulación y Control del Sistema Ball and Plate*. Trabajo de Título. EIE, PUCV.
- Caro M. (2014), *Control e Implementación de un Sistema de Doble Péndulo*. Trabajo de Título. EIE, PUCV.
- Dormido S. (2004). *Control learning: Present and future*. *Annual Control Reviews*, 28, 115–136.
- España A., Farias G., Vargas H., Hermosilla G. (2013), Laboratorio virtual de un levitador magnético. *XXVI Sochedi 2013*, Viña del Mar, Chile.
- Esquemre, F. (2004) *Easy Java Simulations: A software tool to create scientific simulations in Java*, *Comput. Phys. Commun.*, 156(2), 199–204.
- Farias G. (2010), *Adding Interactive Human Interfaces to Engineering Software*. Ph. D. Thesis, Computer Science and Automatic Control Dept., UNED.
- Farias G., Gomez-Estern F., De la Torre L., Muñoz de la Peña D., Sánchez C., Dormido S. (2012) Enhancing Virtual and Remote Labs to Perform Automatic Evaluation. *Proceedings of the 9th IFAC Symposium Advances in Control Education*, Nizhny Novgorod, Russia.
- Heck B. (1999) *Special report: Future directions in control education*. *IEEE Control Systems Magazine*, 19(5), 35-58.
- Vargas H., Sánchez J., Duro N., Dormido R., Dormido-Canto S., Farias G., Dormido S., Esquemre F., Salzmann C., and Gillet D. (2008) *A Systematic Two-Layer Approach to Develop Web-based Experimentation Environments for Control Engineering Education*, *Intelligent Automation and Soft Computing*, 14(4), 505-524.