

Experiencias del uso de laboratorios remotos en la enseñanza de la automática

Iván Santana Ching. Luis Hernández Santana.

Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. C. Camajuaní, km. 5 ½. Santa Clara. Cuba.
ching@uclv.edu.cu

**Manuel Ferre Pérez. Rafael Aracil Santonja.
Enrique Pinto Bermúdez.**

Dpto. de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial. Universidad Politécnica de Madrid. C/. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. España.
m.ferre@upm.es

Resumen: Los laboratorios remotos han tenido un gran desarrollo en los últimos años. Su integración en el ámbito académico ofrece muchas ventajas. En este artículo se presenta la implementación de prácticas de laboratorio remotas para el desarrollo del proyecto integrado en la asignatura Regulación Automática I de la Universidad Politécnica de Madrid usando el Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD).

Palabras clave: Educación en control. Laboratorios remotos.

Abstract: In recent years remote laboratories have been a great development. Their integration in the academic scope offers many advantages. This paper focuses on the implementation of remote laboratory practices for the development of the project integrated in the Regulación Automática I subject at the Universidad Politécnica de Madrid using the Distance Laboratory System (SLD).

Keywords: Control Education. Remote Laboratories.

INTRODUCCIÓN

Las universidades y otras instituciones de educación superior de todo el mundo están enfrentando el reto de servir a una población cada vez mayor de estudiantes, más diversificada social y culturalmente.

En la sociedad actual en que nos encontramos inmersos, la educación a distancia se presenta como la solución idónea para un conjunto de colectivos que exigen el disponer de sistemas de enseñanza mucho más flexibles, accesibles y adaptables (sin limitaciones espaciales ni temporales) (Dormido y Torres 2005). Una de las modalidades más utilizadas de la educación a distancia es la de los laboratorios virtuales y remotos a través de Internet.

El uso de laboratorios en la enseñanza de asignaturas de control automático constituye una parte esencial en la preparación de los estudiantes como fue enfatizado en el NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education (Antsaklis et al., 1999). Astrom planteó la importancia que tiene el uso de los laboratorios para lograr una correcta apreciación de la ingeniería del control (Astrom, 2006). Sin embargo, los recursos utilizados en los mismos son costosos así como la cantidad de estudiantes es elevada en la mayoría de los casos, lo que ha propiciado el uso de laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza del control.

Nickerson hace un estudio sobre la efectividad del uso de laboratorios remotos en la educación y sugieren su introducción de una forma gradual en los estudiantes (Nickerson et al., 2007). Por su parte los profesores Gokhan Gercek y Naveed Saleem de la Universidad de Houston, plantean la necesidad de cambiar los laboratorios tradicionales por laboratorios virtuales (Gercek and Saleem, 2008). Además en (Candelas et al., 2004) se evalúa el impacto del uso de un laboratorio remoto en la docencia, destacándose la aceptación del mismo por los estudiantes. Sin embargo varios autores dejan claro las limitaciones pedagógicas que envuelven los laboratorios virtuales y remotos (Aliane, 2010) por lo que se considera realizar un balance adecuado de su uso.

Son varios los ejemplos de laboratorios virtuales y remotos que se muestran en la actualidad. El grupo de educación en Automática del Comité Español de Automática (CEA-IFAC) ha desarrollado una página Web en la que se recopilan los recursos actuales en el área de los laboratorios virtuales y/o remotos, además de mostrar las clasificaciones de los mismos (Candelas and Sánchez, 2005).

El Automatic Control Telelab es un laboratorio que permite realizar experimentos remotos sobre diferentes plantas (motor CC, levitador magnético, helicóptero, robot LEGO, tanques) (Casini et al., 2004). Reolab es un laboratorio remoto que permite al usuario realizar el control (simulado o real) de un Servomotor de CC o de un cilindro deslizante (Puerto et al., 2005). El Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León tiene acceso a equipos industriales, como una planta piloto para la realización de experiencias de control de operación y supervisión remota, maquetas de procesos de control sobre variables de nivel, caudal, temperatura, etc. (Domínguez et al., 2005). Otro ejemplo es el sistema laboratorio virtual y remoto del Departamento de Informática y Automática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en el cual se hace uso del software Easy Java Simulations (EJS) (Dormido et al., 2008). Jara y sus colaboradores realizan un exhaustivo estudio sobre la utilización de la tecnología EJS en el desarrollo de laboratorios virtuales y remotos (Jara et al., 2009).

Este trabajo está enfocado al uso adecuado de los laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza del control, específicamente en el proyecto integrado de la asignatura. La asignatura objeto de estudio es Regulación Automática I, la cual es cursada por los estudiantes de Ingeniería Industrial en las especialidades de Ingeniería en Control e Ingeniería Eléctrica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Para realizar las actividades prácticas y el proyecto integrado se ha utilizado el Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD) (Santana et al., 2010) desarrollado por el Departamento de Automática y

Sistemas Computacionales de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas en cooperación con el Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

ORGANIZACIÓN DE LA ASIGNATURA REGULACIÓN AUTOMÁTICA I

Las actividades de la asignatura Regulación Automática I se clasifican en conferencias, problemas a solucionar, trabajos en el laboratorio de forma física o de forma remota, proyecto integrado de control, tutorías, seminarios dictados por expertos de la industria y exámenes. Todas estas actividades son bien definidas con respecto al contenido y al tiempo invertidos por el profesor y los estudiantes. La asignatura está programada para 144 horas de trabajo del alumno, lo que equivale a 4,8 créditos ECTS (Ferre et al., 2006).

El objetivo principal de cada actividad es el siguiente:

- Las conferencias se centran en la enseñanza del contenido teórico de cada uno de los temas. Las clases se organizan para dos horas y usando diapositivas generalmente. Todo el contenido se incluye en un libro preparado por los profesores de la asignatura, y también se recomienda bibliografía complementaria para ser utilizada por los estudiantes.
- La solución de problemas tiene como meta motivar el interés del estudiante mostrando problemas interesantes de la ingeniería de control para cada uno de los temas correspondientes.
- Los trabajos en el laboratorio se centran en interactuar con los sistemas físicos que son modelados por la función de transferencia correspondiente. El objetivo generalmente es definir un esquema de control y un regulador que alcance el comportamiento requerido. Cuando los estudiantes van al laboratorio interactúan directamente con los sistemas físicos, ponen en marcha los equipos, ejecutan software de adquisición, diseñan reguladores y capturan datos. Por otra parte, cuando acceden de forma remota, se centran en diseñar reguladores y adquirir datos. En ambos casos, los estudiantes tienen que realizar autoevaluaciones sobre el contenido teórico relacionado con el trabajo experimental.
- El proyecto integrado de control es una actividad centrada en integrar varios temas de la asignatura. Es decir, los estudiantes tienen que identificar un sistema, proponer una función de transferencia, diseñar un esquema de control y el regulador correspondiente. Finalmente, tienen que comprobar el comportamiento y desarrollar un informe sobre su progreso. Esto es una actividad muy interesante donde el estudiante dedica mucho tiempo y sobre ella está centrado este trabajo.
- Forman parte del curso también tutorías, seminarios y evaluaciones.

El programa de la asignatura está formado por catorce lecciones y ocho trabajos prácticos. Esto da una media aproximada de una lección por semana y un trabajo práctico cada quincena. Antes de realizar un trabajo práctico el alumno debe completar un ejercicio de autoevaluación. La autoevaluación se realiza a través de Internet, mediante una aplicación utilizada en la ETSII de la UPM llamada AulaWeb (García-Beltrán and Martínez, 2006). Las materias

estudiadas están dedicadas al modelado y análisis de sistemas discretos, y el estudio de sistemas realimentados, haciéndose énfasis en el cálculo de reguladores; también se incluye un capítulo relativo a los métodos de identificación de sistemas, mediante algoritmos basados en mínimos cuadrados.

Proyecto de Control Integrado

El proyecto de control es una actividad que se realiza para que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en la asignatura a la realización de un sistema de control. El trabajo realizado en este proyecto de control es equivalente al llevado a cabo en los trabajos prácticos de la asignatura. La diferencia fundamental está en que la realización de los trabajos prácticos está muy guiada por el profesor, y en la realización del proyecto de control el alumno debe elegir qué técnicas de modelado y qué herramientas de control ha de utilizar en cada momento.

Este proyecto permite cubrir las diferentes etapas de la automatización de un proceso. En primer lugar, se precisa llevar a cabo la identificación del sistema a controlar; seguidamente, se calculan los reguladores que cumplen las especificaciones de diseño deseadas; y finalmente, se evalúa el funcionamiento del sistema realimentado, planteándose en algunos casos el uso de nuevas alternativas de control. Esta es una actividad de gran interés para el alumno, pues le permite enlazar conceptos estudiados en las diferentes partes de las asignaturas de regulación automática, como son: modelado, análisis y diseño de sistemas de control. Uno de los requisitos para que los alumnos realicen este proyecto de forma individual es que el modelo con el que se trabaje sea diferente para cada uno, lo cual requiere que sea parametrizado con sus datos personales.

Otro aspecto importante que se desarrolla en el proyecto integrado es la evaluación del grado de aproximación que necesitan alcanzar para llevar a cabo un buen regulador. Los alumnos suelen tener dificultades para seleccionar el grado de precisión que se requiere de un modelo, durante la realización del proyecto aprenden a buscar un equilibrio entre la complejidad de un modelo y el grado de precisión que se requiere, lo cual tiene un gran valor formativo para los especialistas en control.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LABORATORIOS A DISTANCIA (SLD)

El SLD presenta características que le son comunes a varios de los laboratorios a distancia implementados en la actualidad como son (Santana et al., 2010):

- Disponibilidad: el sistema está disponible las 24 horas del día, con su adecuada autoprotección.
- Accesibilidad: el SLD puede ser accedido desde cualquier parte del mundo. Para ello solo es necesaria una computadora con conexión a Internet y un navegador Web.
- Facilidad de uso: para usar el sistema sólo se debe tener los conocimientos básicos de la disciplina objeto de prácticas.

- Interfaz de usuario rápida y fácil: la interfaz de usuario del SLD está basada en páginas HTML; esto permite que los usuarios puedan acceder al sistema de una forma rápida y sin necesidad de descargar o instalar ningún software adicional.
- Administración de múltiples pedidos en forma paralela: el SLD permite atender múltiples pedidos de forma paralela administrando de forma centralizada dispositivos similares que se encuentren geográficamente separados pero unidos por redes de área extensa (WAN).
- Desarrollo de controladores de forma remota usando Matlab y Simulink: una de las características más importantes del SLD es que permite a los usuarios diseñar sus propios controladores utilizando el ambiente Matlab/Simulink.
- Cambio de referencias: el sistema permite cambiar las referencias de los experimentos para comprobar el desempeño de un determinado sistema ante distintas señales de entrada.

La plataforma SLD permite realizar dos tipos de prácticas, las prácticas con controlador predefinido y las prácticas con controlador definido por el usuario.

En las prácticas con controladores predefinidos los usuarios realizan modificaciones de los parámetros de un esquema de control predefinido. Con estos esquemas es posible abordar temas de: identificación experimental de sistemas SISO, análisis dinámico de sistemas, análisis y diseño en el campo del tiempo, efectos de las acciones de control y ajuste de reguladores.

Una de las características más importantes del SLD es que permite a los usuarios la creación de sus propios controladores de forma remota. Estos controladores pueden ser creados utilizando los bloques de Simulink.

USO DEL SLD EN EL PROYECTO INTEGRADO

El SLD es utilizado tanto para las prácticas remotas como para el proyecto integrado.

El proyecto integrado está formado por tres partes. En la primera etapa el alumno identifica el sistema que varía en dependencia de su número de matrícula. El estudiante identifica los diferentes bloques que conforman el sistema usando los métodos enseñados en clases y teniendo muy en cuenta la complejidad. Para esto se ha diseñado una práctica del tipo paramétrica donde el estudiante ingresa su número de matrícula y obtiene las gráficas de salida y el juego de valores necesarios para realizar la identificación (Fig. 1).

El sistema a identificar está conformado por dos bloques Sys1 y Sys2 (Fig. 2). Un vez que la práctica es ejecutada, el alumno obtiene los datos de las señales en los puntos B y C ante entrada ruido blanco y en el punto C ante entrada escalón unitario. Además se le facilita la entrada de ruido blanco en el punto A. Con estos datos el alumno debe ser capaz de darse cuenta que el bloque Sys1 está conformado por más de un bloque interno y que cuenta con un punto de suma intermedio, dos posibles variantes son aplicables. Luego de hacer uso de la herramienta *ident* de Matlab y con los conocimientos adquiridos sobre identificación y trabajo con funciones en las clases teóricas, el alumno llega a la función transferencial de cada bloque, incluyendo los internos de

Sys1. Es importante destacar que mientras más complejos queden los bloques identificados, más complejos serán los reguladores a diseñar en las próximas etapas del proyecto, por lo que el estudiante llegará a un compromiso donde no siempre el 100% de semejanza es la opción correcta. El alumno debe comprobar además si el sistema obtenido puede o no ser reducido, es decir, lograr una cancelación de polos y ceros.

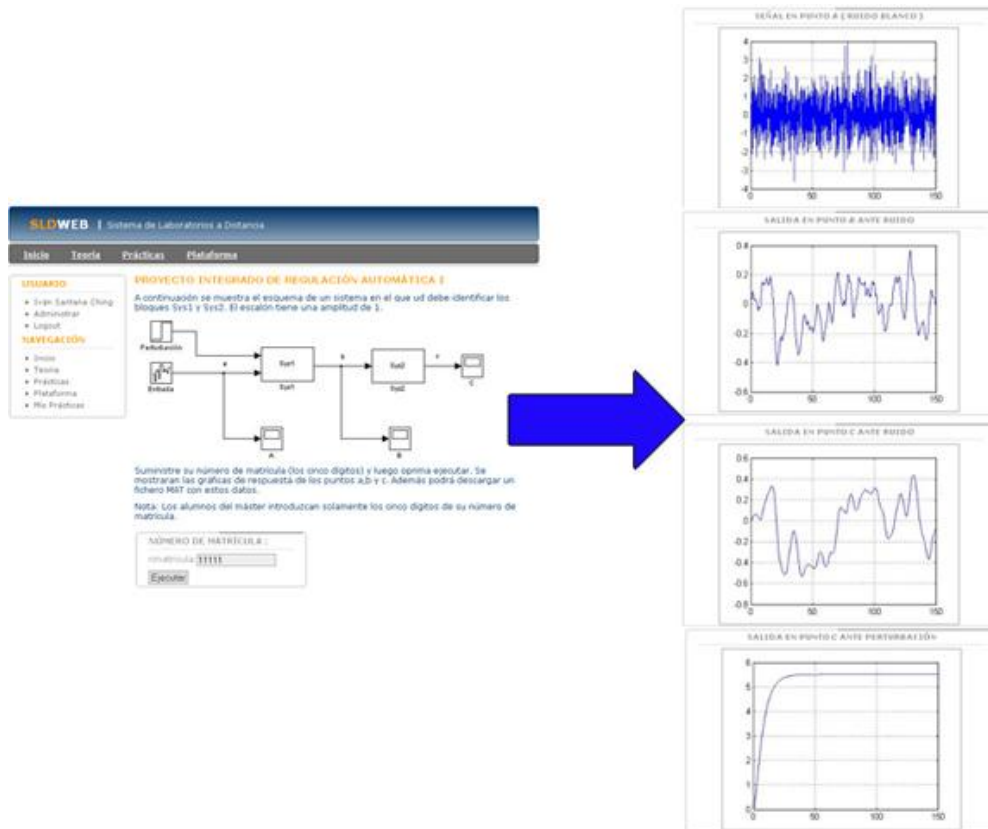


Figura 1. Gráficas de respuesta del sistema de acuerdo al número de matrícula.

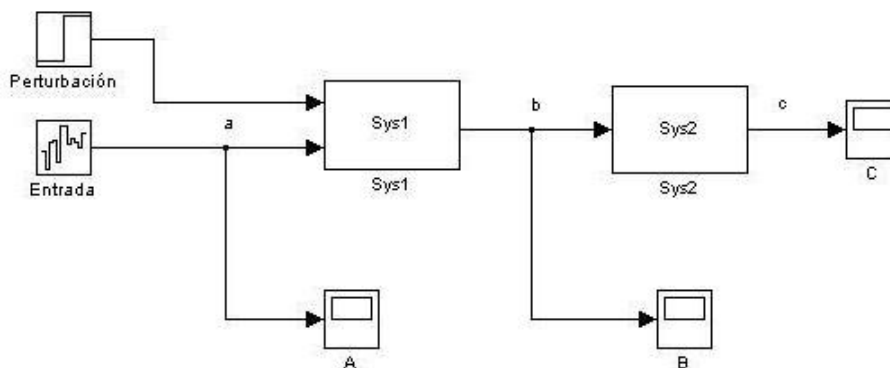


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema a identificar.

En la segunda parte, el alumno diseña un regulador digital que cumpla los requerimientos solicitados para el sistema identificado. Una vez que el alumno

ha identificado el sistema puede llegar a la síntesis del regulador deseado siguiendo los métodos teóricos y luego ajustando con la herramienta *rltools* de Matlab. Es muy importante llegar con una aproximación teórica a esta herramienta pues en caso contrario se pierde mucho tiempo en el diseño. Todo esto el alumno lo hace desde casa sin hacer uso del SLD. Luego que los resultados obtenidos son los deseados se pasa a hacer la comprobación con el sistema real mediante una práctica diseñada del tipo con controlador definido por el usuario. Es probable que una conclusión de esta fase sea que la identificación realizada no estuvo correcta y al igual que se hace de forma práctica se tenga que volver a identificar el sistema. En esta fase del proyecto se premia además el mínimo diseño, es probable que solamente se necesite un regulador P o PI para conseguir los objetivos y no sea necesario un PID, esto tiene influencia en el costo económico y computacional.

En la tercera y última parte se realizan diseños de compensación de realimentación y en cascada para lograr los requerimientos de respuesta del sistema. Esta fase tiene como principal objetivo evaluar la respuesta ante entrada de perturbación, tema muy importante en la ingeniería del control. La práctica diseñada con este fin es igualmente del tipo de controlador definido por el usuario y nuevamente el alumno compara su respuesta con la obtenida del sistema real.

Cada enunciado del proyecto integrado se encuentra en AulaWeb, mientras que los datos, gráficos y la comprobación de los reguladores se hacen mediante el SLD. Cada práctica considera el número de matrícula de los estudiantes lo que garantiza un juego de datos personalizado para cada uno. La entrega de los diferentes informes se hace mediante AulaWeb. El acceso al SLD se hace de forma transparente a través de AulaWeb mediante una pasarela diseñada con este fin, la cual exporta los datos necesarios como nombre de usuario, contraseña, dirección de correo electrónico, etc. Esto permite que el estudiante continúe con el mismo método de trabajo y se adapte con facilidad al SLD.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

No hubo incidencias en el acceso al SLD, a través del curso pasado se registraron más de cinco mil accesos, principalmente entre abril y junio de 2010. Todas las prácticas simuladas y el proyecto integrado se realizaron en el servidor Web, mientras que las prácticas remotas se desarrollaron en siete estaciones del laboratorio de automática. La figura 3 muestra los accesos al SLD a través del curso.

Se desarrolló una encuesta para evaluar los resultados del curso y los estudiantes evaluaron de forma aceptable el uso del SLD en las actividades remotas y el proyecto integrado. Más del 80% evalúa que el proyecto integrado contribuyó a un mejor entendimiento de la asignatura y a consolidar los conocimientos adquiridos. Mientras que solo el 20% considera que el tiempo para el desarrollo del proyecto integrado fue suficiente. Los profesores de la asignatura coinciden que hubo poca dedicación por algunos alumnos al desarrollo del proyecto. Los resultados principales de la encuesta se reflejan en la tabla 1.

Aspectos (1 to 5)	Promedio	Mediana	Desviación Estándar
Los trabajos prácticos son todos de interés para comprender la asignatura.	3.94	4	0.85
El número de trabajos prácticos y clases teóricas está equilibrado.	3.29	4	1.32
El proyecto integrado me ha servido para entender mejor la asignatura.	3.46	4	1.26
El tiempo para la realización del proyecto integrado fue suficiente.	2.23	2	1.17
Me fue fácil usar el Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD) en el proyecto integrado.	3.19	3	1.22

Tabla 1. Resultados de la encuesta realizada.

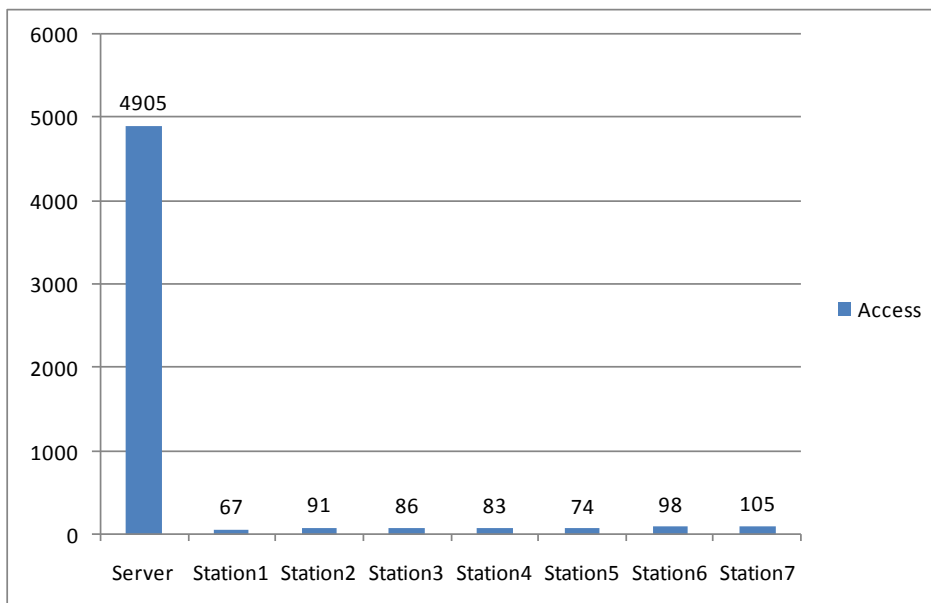


Figura 3. Accesos de los alumnos al sistema remoto.

CONCLUSIONES

El desarrollo de proyectos de control tiene un alto carácter formativo, con una influencia inmediata en el aprendizaje y la adquisición de habilidades en el alumno. Este proyecto permite cubrir las diferentes etapas de la automatización de un proceso y enlazar conceptos estudiados en las diferentes partes de las asignaturas de regulación automática.

El uso del SLD como laboratorio remoto en el desarrollo del proyecto integrado de Regulación Automática I fue de gran aceptación por parte de los estudiantes que evaluaron de forma positiva su uso. El SLD permitió personalizar el proyecto integrado de acuerdo al número de matrícula de cada

alumno. Su uso en conjunto con AulaWeb propició la mejor utilización del mismo. El uso de estas actividades provocó un mayor esfuerzo por parte del estudiante y este esfuerzo fue reflejado en las notas finales de la asignatura.

BIBLIOGRAFÍA

- Aliane, N., Pastor, R., and Mariscal, G. (2010) "Limitations Of Remote Laboratories In Control Engineering Education", International Journal of Online Engineering vol. 6, no.1.
- Antsaklis, P., Basar, T., DeCarlo, R., McClamroch, N.H., Spong, M., Yurkovich, S. (1999). Report on the NSF/CSS Workshop on new directions in control engineering education. IEEE Control Systems 19(5), 53-58.
- Astrom, K. J. (2006) "Challenges in control education", In Proc. of the 7th IFAC Symposium on Advances in Control Education- ACE'06, Madrid-Spain pp. 9-29.
- Candelas F. A. and Sánchez J.(2005). Recursos Didácticos Basados en Internet para el Apoyo a la Enseñanza de Materias del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 2(2), 93-101.
- Candelas F. A., Torres F, Gil P., Ortiz F., Puente S., Pomares J.(2004). Laboratorio Virtual Remoto para robótica y evaluación de su impacto en la docencia. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 1(2), 49-57.
- Casini M., Prattichizzo D., Vicino A. (2004). The Automatic Control Telelab. A Web-based technology for Distance Learning. IEEE Control Systems Magazine, 24(3), 36-44.
- Domínguez, M., Reguera, P., Fuertes, J.J. (2005). Laboratorio Remoto para la enseñanza de la Automática en la Universidad de Leon. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 2(2), 36-45.
- Dormido R., Vargas H., Duro N., Sánchez J., Dormido-Canto S., Farias G., Esquembre F., and Dormido S. (2008). Development of a Web-Based Control Laboratory for Automation Technicians: The Three-Tank System. IEEE Transactions on Education 51(1), 35-44.
- Dormido, S. and F. Torres (2005). "Aplicación de las TIC's a la Educación en Automática." Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial vol.2, num.2.
- Ferre M., Aracil R., Sebastián J. M., Pinto E. and Llorente J. (2006). Nueva metodología docente de las asignaturas de Regulación automática I y

Control por computador. In: Las I Jornadas de Innovación Educativa de la Escuela Politécnica Superior de Zamora, 183-186.

- García-Beltrán A. and Martínez R. (2006). Web Assisted Self-assessment in Computer Programming Learning Using AulaWeb. *The International Journal of Engineering Education* 22(5), 1063-1069.
- Gercek G. and Saleem N. (2008). Transforming traditional labs into virtual computing labs for Distance Education. *International Journal of Online Engineering (iJOE)* 4(1), 46-51.
- Jara C., Candelas F., Torres F., Dormido S., Esquembre F., Reinoso O. (2009). Real-time collaboration of virtual laboratories through the Internet. *Computers & Education* 52(1), 126–140.
- Nickerson J. V., Corter J. E., Esche S. K., Chassapis C. (2007). A model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education. *Computers & Education* 49(3), 708–725.
- Puerto, R., Reinoso, O., Neco, R., García, N., Jiménez, L. M. (2005). RECOLAB: Laboratorio remoto de control utilizando Matlab y Simulink. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2), 64-72.
- Santana, I., Ferre, M., Hernández, L., Aracil, R., Rodríguez, Y., Chiang, L., & Pinto, E. (2010). Aplicación del Sistema de Laboratorios a Distancia en Asignaturas de Regulación Automática. *RIAI*, Vol. 7(1).

Recibido: 11 marzo 2011.

Aceptado: 11 abril 2011.