

ServoHis : Un laboratorio Virtual para el estudio de servomecanismos con control relé

Alba Escolà¹, Arnau Dòria-Cerezo^{1,2}, Ramon Costa-Castelló^{1,3}

¹ Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials

² Dept. d'Enginyeria Elèctrica

³ Dept. d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Abstract—En este trabajo se presenta un laboratorio virtual diseñado para ilustrar diferentes conceptos relacionados con el estudio de un servomecanismo con control tipo relé. El laboratorio virtual se utiliza como complemento de la prácticas experimentales. La aplicación presentada busca un alto grado de interactividad, y está desarrollada mediante el Easy Java Simulations (EJS), que permite una fácil programación y diseño. Finalmente, también se proponen algunos ejercicios para realizar con el laboratorio virtual con el fin de poder experimentar algunos fenómenos que pueden ocurrir en la práctica real.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de la enseñanza de la Ingeniería, y en particular de la Automática, la realización de actividades prácticas experimentales que ilustren las exposiciones teóricas es de vital importancia y difícilmente sustituible por otro tipo de actividades tales como la simulación o las clases magistrales [7] [2].

Sin embargo, existen diferentes factores que dificultan la realización de dichas actividades prácticas. El gran número de estudiantes y la reducida capacidad de los laboratorios docentes, ya sea en medios o en espacio, hace necesaria una elevada ocupación de dichos laboratorios. Como contrapartida, el uso intensivo de los laboratorios supone un coste económico importante y permanente debido a la necesidad de personal de atención y vigilancia lo que a veces resulta difícil asumir. A fin de obviar esta dificultad se ha extendido el interés por poner en marcha plataformas que permitan la realización de prácticas virtuales con un contenido pedagógico similar al de las realizadas de forma presencial.

Las prácticas virtuales facilitan a los estudiantes acceso a los laboratorios en horarios sin restricciones y un mayor número de veces. La posibilidad de realizar prácticas virtuales es de particular importancia en los cursos semipresenciales ya que introduce una flexibilidad imprescindible en este tipo de estudios. Debido a todo ello, en la actualidad se están implantando numerosos laboratorios virtuales remotos para la realización de prácticas de Automática, y, en particular, de Robótica [6] [10], aunque existen también otros ámbitos de aplicación como el diseño de controladores [7][3] [11][2].

La realización de prácticas virtuales requiere que el estudiante pueda percibir sensaciones análogas a las que tendría frente al proceso físico [7]. En el ámbito de la realización de prácticas virtuales, esta realimentación sensorial se suele centrar principalmente en la visión [8] [10] [5].

Dentro del ámbito de la automática un tema de especial dificultad para los estudiantes es el relacionado con el control no lineal. Con el fin de salvar estas dificultades es importante incrementar el número de prácticas a realizar con el fin que los estudiantes interioricen los conceptos de especial relevancia. Uno de los temas más comúnmente analizados son los sistemas de control mediante relé, por ello son objeto de estudio en la mayoría de asignaturas del área.

En este artículo se presenta un laboratorio virtual desarrollado mediante *Easy Java Simulations* (EJS) [1] que permite profundizar analizar el comportamiento de un sistema de control mediante relé. La herramienta, totalmente gráfica e interactiva, incorpora además herramientas de análisis mediante plano de fases y función descriptiva.

El trabajo está estructurado de la manera siguiente: en la sección II se describen brevemente la herramientas utilizadas para el desarrollo de la aplicación; en la sección III se presenta el ámbito para el que ha sido desarrollado el laboratorio remoto; la sección IV describe el laboratorio virtual (estructura y funcionalidades); la sección V describe las prácticas que se realizan con el laboratorio virtual, y finalmente en la sección VI se describen las principales conclusiones y las ampliaciones previstas para el futuro.

II. DESARROLLO

En el momento de plantearse el desarrollo de un laboratorio virtual con fines docentes, es importante tener en cuenta que el laboratorio deberá ser desarrollado y mantenido por el profesorado. Este hecho introduce restricciones en el tipo de herramientas que pueden utilizarse.

Como objetivos colaterales es importante utilizar herramientas no propietarias y multiplataforma.

Una herramienta que permite alcanzar todos estos objetivos es Easy JAVA Simulations (EJS). Una herramienta de software diseñada por Francisco Esquembre para la creación de simulaciones informáticas en lenguaje JAVA [1]. Es especialmente interesante desde el punto de vista pedagógico, ya que posee un potente interfaz visual que permite representar gráfica e interactivamente, la evolución de un sistema. Aunque inicialmente fue diseñado para el campo de la física, actualmente se está aplicando con éxito en la ingeniería de control [4] entre otros campos.

Una aplicación EJS está compuesta por tres elementos principales: el modelo, la vista y la interactividad. El modelo, implementado por el desarrollador (transparente para el usuario)

corresponde a la descripción del sistema físico y puede desarrollarse en EJS mediante la introducción de un conjunto de ecuaciones diferenciales o mediante otros programas de simulación entre los que se incluye MATLAB/Simulink (en este trabajo se ha optado por introducir la ecuaciones diferenciales con el fin de permitir una ejecución independiente de software propietario). La vista corresponde a los elementos gráficos que reflejan el comportamiento del modelo, este componente se diseña mediante un modelo gráfico jerárquico integrado en EJS. Finalmente la interactividad corresponde a un conjunto de elementos que pueden ser modificados por el usuario final, dichos elementos permiten modificar parámetros o provocar cambios el sistema de una forma sencilla e interactiva.

La vista y la interactividad del laboratorio virtual desarrollado son motivo de estudio en las secciones siguientes.

III. ÁMBITO DE APLICACIÓN



Fig. 1. Sistema de control para el posicionamiento de un motor CC.

En la actualidad en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Barcelona (ETSEIB) se imparten diferentes titulaciones, entre ellas destacan (1r y 2n ciclo) la Ingeniero Industrial (1r y 2do ciclo), Ingeniero Químico (2do ciclo), Ingeniero de Materiales (1r y 2do ciclo), Ingeniero Europeo de materiales (2do ciclo) y Ingeniero en Organización Industrial (2do ciclo).

En la titulación de Ingeniero industrial existentes diferentes tipos de asignaturas, troncales (definidas por el descriptor del BOE), obligatorias (definidas por el plan de estudios propio de la escuela), optativas y asignaturas de libre elección. En el plan 94, vigente en la actualidad no existen especialidades, alternativamente se ofrecen intensificaciones, dichas intensificaciones están formadas por un conjunto de asignaturas optativas de temática afín.

Una de las intensificaciones más demandadas por los estudiantes es la intensificación en automática. Dicha intensificación está impartida por el departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática, e Informática Industrial (ESAI). Para obtener el diploma asociado a dicha intensificación es necesario superar un total de 7 asignaturas. Una de estas 7 asignaturas corresponde a la de Control Avanzado. Dicha asignatura pretende introducir al estudiante en los conceptos avanzados de la teoría de control, especialmente en la temática

de control de sistemas no lineales. Esta asignatura consta de 4,5 créditos teóricos y 1,5 créditos prácticos.

El objetivo de la asignatura es complementar los conocimientos sobre control automático adquiridos en las asignaturas troncales Dinámica de Sistemas y Control por Computador, y en las otras asignaturas de la Intensificación de Automática, mediante el estudio de algunas de las técnicas actuales de control. En concreto se pretende:

- Mostrar las posibilidades del control digital multivariable mediante la realimentación del estado, los observadores y la realimentación de la salida.
- Proporcionar conocimientos básicos sobre el análisis y diseño de sistemas de control no-lineal.
- Introducir al control adaptativo por modelo de referencia y con reguladores autosintonizados, así como a los aspectos teóricos y prácticos de la identificación en línea de procesos.

Los contenidos concretos de las sesiones de teoría són :

- 1) Técnicas avanzadas de control
- 2) Sistemas multivariables de tiempo discreto
- 3) Propiedades de los sistemas
- 4) Asignación de polos
- 5) Introducción a los sistemas no-lineales
- 6) Análisis en el plano de fases
- 7) Teoría de estabilidad de Liapunov
- 8) Análisis mediante la función descriptiva
- 9) Diseño de sistemas de control no-lineal
- 10) Introducción al control adaptativo
- 11) Control adaptativo
- 12) Identificación en línea

Los Trabajos Prácticos de la asignatura se realizan en 5 sesiones de tres horas cada una, en los laboratorios del departamento de ESAII en la ETSEIB. Su contenido es el siguiente:

- 1) Modelado linealizado de un sistema multivariable, y diseño y simulación de un sistema de control por realimentación de estado.
- 2) Diseño e implementación de un controlador por realimentación de estado de un sistema multivariable linealizado, usando un observador de estado.
- 3) Análisis en el plano de fases de un servosistema no-lineal de posición angular.
- 4) Análisis mediante la función descriptiva de un servosistema no-lineal de posición angular.
- 5) Implementación de un controlador no-lineal de linealización por realimentación de estado de un sistema multivariable no-lineal.

El laboratorio virtual presentado en este artículo está diseñada para complementar las sesiones 3 y 4. Dicho laboratorio representa un sistema de control para posicionamiento de un motor de corriente continua, Mechanical Unit 33-100 –Servo Fundamentals Trainer– de Feedback Instruments Limited, Figura 1, que es el equipo de prácticas utilizado en las sesiones presenciales. La herramienta presentada pretende acercar al alumno al funcionamiento de la planta y hacer incipiente en el efecto de las no linealidades del sistema (objetivos principales de la sesiones 3 y 4).

IV. EL LABORATORIO VIRTUAL

A. El modelo y el esquema de control utilizado

En esta sección se detalla, primeramente, el modelo para el motor de CC utilizado. Seguidamente se muestran los diferentes bloques del esquema de control.

El modelo utilizado para el motor de CC sólo contempla la dinámica de la parte mecánica ya que se considera que la parte eléctrica es mucho más rápida. Entonces, este modelo corresponde a un sistema de primer orden, $G(s)$,

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

con un integrador para obtener la posición angular, θ , ver Figura 2. El parámetro N indica la reducción que se aplica a la velocidad del motor respecto a la velocidad del indicador.

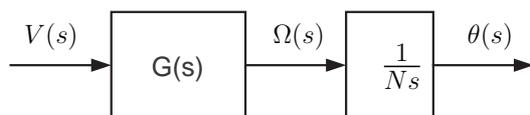


Fig. 2. Modelo utilizado para el motor CC.

El esquema de control consiste en una acción proporcional y una función de histéresis, ver Figura 3.

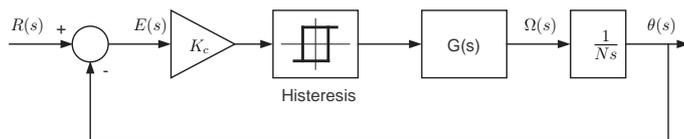


Fig. 3. Esquema de control utilizado.

El bloque relé, representado en la Figura 4, añade un comportamiento no-lineal al sistema. Esta no-linealidad del sistema en lazo cerrado permite el estudio de los ciclos límites mediante el uso de la función descriptiva.

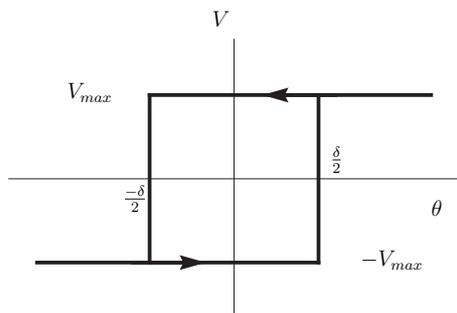


Fig. 4. Bloque de histéresis.

B. Descripción de la aplicación

La herramienta desarrollada se presenta en la Figura 5. En ella está representado la apariencia real del sistema, y una interfaz gráfica que permite modificar los valores de diferentes parámetros del sistema; ya sea la planta (K y τ) o del controlador (K_c o el ancho de histéresis $\frac{\delta}{2}$). Desde la

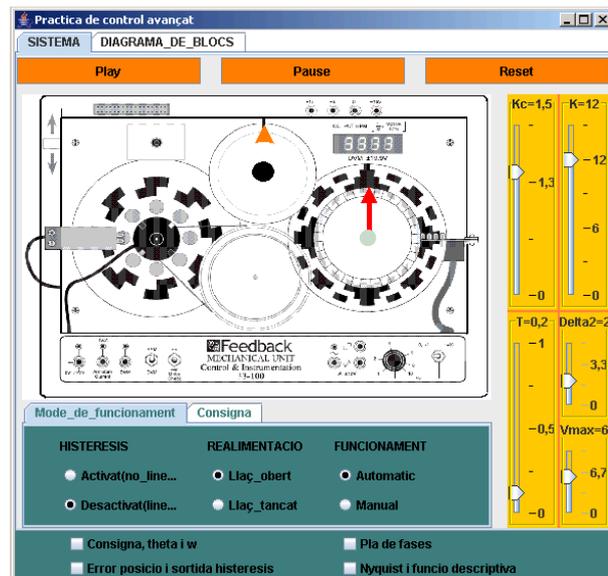


Fig. 5. Apariencia de la pantalla principal de la aplicación.

misma pantalla principal se puede acceder a las propiedades de funcionamiento:

- Consigna: manual o periódica (escalón, rampa o senoidal).
- Realimentación: lazo abierto o lazo cerrado.
- Histéresis: activa o desactiva el bloque de histéresis.

En función de las propiedades de funcionamiento elegidas los parámetros que influyen en el comportamiento del sistema aparecen en la parte derecha de la aplicación. El haber integrado todos los componentes principales en la misma ventana permite al estudiante analizar la influencia de los diferentes parámetros de una forma sencilla e interactiva.

Los resultados de la simulación se pueden obtener a partir de la opción de gráficas. Las variables representadas son:

- la consigna, la posición angular θ y la velocidad, ver Figura 6,
- el error y la salida del bloque no lineal, Figura 7,
- el plano de fases del sistema (θ vs. ω), Figura 8.

El diagrama de bloques correspondiente a la configuración deseada (lazo abierto/cerrado, sin/con relé) se muestra en la opción "Diagrama de bloques".

C. Análisis mediante función descriptiva

El análisis mediante función descriptiva es una herramienta analítica que predice y caracteriza la existencia de ciclos límite, y en su caso la amplitud y frecuencia de los mismos. El sistema estudiado en las prácticas presenta un comportamiento de ciclo límite que podrá ser caracterizado mediante estas herramientas.

La función descriptiva de un elemento no lineal se define como la relación compleja entre la componente armónica del elemento no lineal y la entrada senoidal [9], que en el caso de la histéresis de la Figura 4 es

$$N(A) = \frac{4}{A^2\pi} V_{max} \left(j\frac{\delta}{2} - \sqrt{A^2 - \left(\frac{\delta}{2}\right)^2} \right). \quad (2)$$

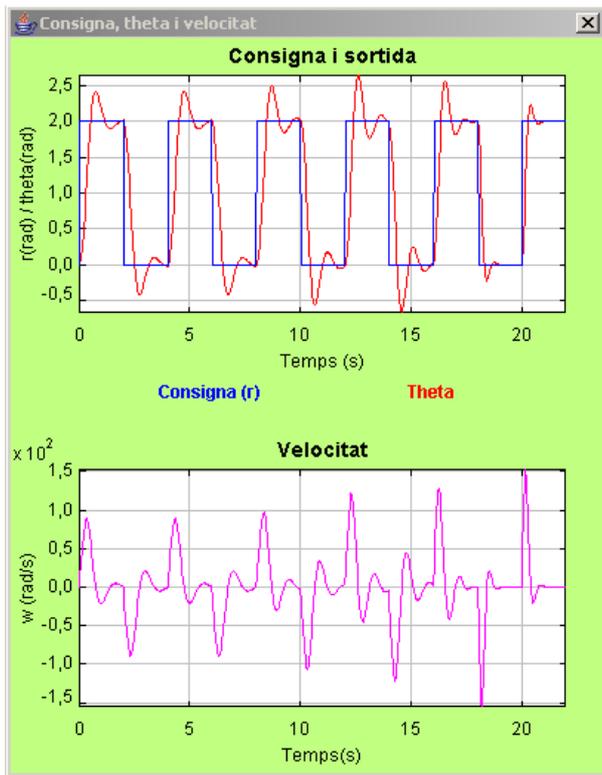


Fig. 6. Apariencia de las gráficas de la consigna, posición (θ) y velocidad (ω).

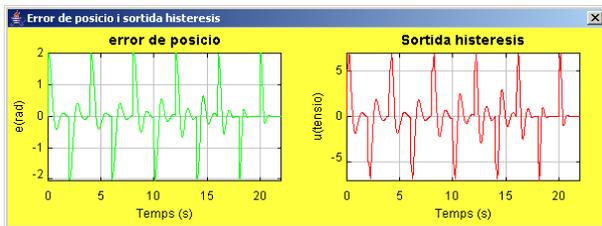


Fig. 7. Apariencia de las gráficas de error y la salida del bloque de histeresis.

dónde A es la amplitud y ω la frecuencia de la senoide de salida.

A partir de la expresión (2) se calcula la función $-\frac{1}{N}$ y junto el diagrama de Nyquist del sistema se puede determinar la existencia de ciclos limites.

La herramienta desarrollada permite trazar el diagrama de Nyquist de la planta y la función $-\frac{1}{N}$, ver Figura 9. Este cálculo permite hallar la frecuencia y amplitud de las oscilaciones del sistema.

Esta aplicación permite ver la evolución de las curvas en función de los diferentes parámetros. Así, los parámetros de la planta y controlador proporcional (K , τ o K_c), que afectaran al diagrama de Nyquist, mientras que los del bloque no lineal (V_{max} y δ) modificaran la curva $-\frac{1}{N}$.

V. EJERCICIOS PRÁCTICOS

Aunque la aplicación permite realizar diferentes tipos de ensayos, su mayor uso se centra en complementar las prácticas

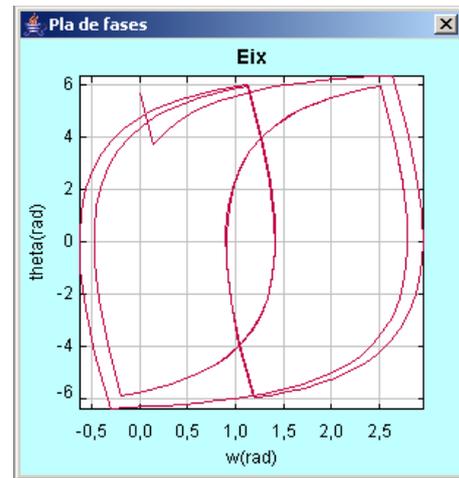


Fig. 8. Apariencia de la gráfica del plano de fases, θ vs ω .

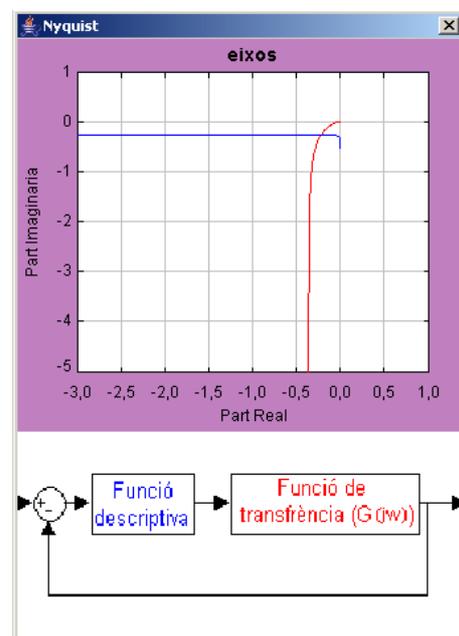


Fig. 9. Apariencia del diagrama de Nyquist y la función $-\frac{1}{N}$ para el análisis de la función descriptiva.

presenciales de la asignatura de Control Avanzado¹. Dentro de este marco los experimentos que se plantean a los estudiantes son los siguientes:

1) Análisis de los componentes en lazo abierto.

Los estudiantes realizan de una caracterización de los diferentes elementos (planta, relé). Esta caracterización puede llevarse a cabo utilizando los métodos de la respuesta temporal, estudiando la respuesta al escalón, o con métodos frecuenciales, respuesta a una entrada senoidal. Ambas posibilidades están disponibles en esta aplicación, que deben realizarse con el sistema en lazo abierto, y comparando la respuesta con el elemento no lineal y sin él. La visualización se puede realizar con

¹Para ello se ha desarrollado un manual de usuario que complementa el de las prácticas presenciales

las gráficas de la consigna, la posición angular θ y la velocidad (Figura 6).

Un punto interesante es ver y analizar la influencia de los diferentes parámetros (ganancias del controlador, K_c , y la planta, K , constante de tiempo, τ , parámetros del relé, δ , V_{max} ...) en la salida.

2) Análisis del comportamiento del sistema lineal el lazo cerrado.

Se pide que los estudiantes caractericen el comportamiento del sistema lineal, tanto su respuesta temporal como su plano de fase.

Este ejercicio se realiza con las mismas entradas utilizadas para el ejercicio anterior (escalón y senoidal). El estudio a realizar, en este caso, se limita a la parte lineal, así pues el relé debe estar siempre deshabilitado.

En este caso el comportamiento también se puede visualizar en la gráfica de la consigna, la posición angular θ y la velocidad (Figura 6). Además, el uso de la gráfica del plano de fase permite otra visión de la respuesta del sistema.

3) Análisis del comportamiento del sistema no lineal en lazo cerrado mediante plano de fase.

Los estudiantes pueden observar el plano de fase y caracterizar sus características.

El uso del plano de fase permite analizar las características de las oscilaciones debidas al uso del elemento tipo relé. La mejor visualización puede conseguirse mediante el modo manual, que permite la variación de la consigna de posición.

En este ejercicio es aconsejable ver la influencia del parámetro del controlador proporcional K_c en el comportamiento del sistema en el plano de fase.

4) Análisis del comportamiento del sistema no lineal en lazo cerrado mediante Función Descriptiva.

Los estudiantes pueden observar el plano de Nyquist con la función descriptiva y detectar las características principales del mismo.

Para éste análisis, la función descriptiva permite la predicción de ciclos límite. Se propone ver la influencia de los parámetros V_{max} y δ del bloque relé en la gráfica del plano de Nyquist.

5) Análisis de la dependencia de los parámetros.

La variación de los diferentes parámetros del sistema afectan a su comportamiento. Identificar la influencia de los parámetros K y τ del sistema en el comportamiento lineal en lazo cerrado. Observar el cambio en el comportamiento a medida que se va modificando el valor de δ en los parámetros del bloque de histeresis.

Cabe mencionar que el laboratorio virtual se utiliza como herramienta para complementar las prácticas presenciales, y para ayudar a mejorar la intuición de los estudiantes sobre el comportamiento del sistema y su relación con las herramientas de análisis. En ningún caso se pretende substituir el análisis analítico mediante el uso de simulaciones numéricas.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un laboratorio virtual diseñado mediante el Easy Java Simulations, que reproduce la

planta utilizada en el laboratorio de el curso de Control Avanzado que se imparte en la ETSEIB. Esta aplicación permite al estudiante analizar el comportamiento del sistema en lazo abierto, lazo cerrado, así como añadir un elemento no-lineal al sistema. Estas simulaciones permiten ilustrar diferentes conceptos como son lazo abierto/cerrado, el plano de fase o la función descriptiva. También se han propuesto algunos ejemplos para poder ayudar en la comprensión de los temas tratados en esta aplicación.

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto para el diseño de aplicaciones interactivas para la docencia. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de aplicaciones de sistemas de gestión de la energía, convertidores de potencia y en técnicas de control avanzado (*Sliding Mode Control*).

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos *Introducción de la interactividad en el proceso de diseño e implementación de controladores* (ESAII-2006), *Fichas de aprendizaje interactivo de teoría de sistemas lineales* (UPC 2005-2006), *Diseño e implementación de laboratorios virtuales para la enseñanza de la ingeniería* (Medellín, Colombia) [CCD U-017/2007], *Herramientas interactivas para el aprendizaje de la dinámica y el control de los convertidores de potencia* [2007MQD00046] y CICYT DPI2004-06871-C02-02.

REFERENCES

- [1] ESQUEMBRE, F. *Creación de Simulaciones Interactivas en Java. Aplicación a la Enseñanza de la Física*. Pearson Prentice Hall. Educación, 2005.
- [2] GIRALT, X., JOFRE, D., COSTA CASTELLÓ, R., AND NEZ, L. B. Proyecto de laboratorio remoto de automática: Objetivos y arquitectura propuesta. In *III Jornadas de Trabajo Enseñanza vía Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática. EIWISA'02* (Universitat d'Alacant. Alacant - ESPAÑA, 8-19 Abril 2002 2002), pp. 93-98.
- [3] MANCHÓN, R. P., GARCÍA, L. M. J., ÓSCAR REINOSO GARCÍA, AND PERIS, C. F. Recolab: Laboratorio de prácticas de control de procesos vía internet. In *Actas de de las III Jornadas de Trabajo EIWISA'02* (Alicante, España, 18-19 Abril 2002).
- [4] MARTÍN, C., DORMIDO, S., PASTOR, R., SÁNCHEZ, J., AND ESQUEMBRE, F. sistema de levitación magnética: un laboratorio virtual en easy java simulation. In *XXIV Jornadas de Automática* (2003).
- [5] MAZA ALCAÑIZ, J. I., DE CASTRO ORBEA, A., AND OLLERO BATURONE, A. Hetero v2.0: Herramienta para la tele-enseñanza de la robótica. In *Actas de de las III Jornadas de Trabajo EIWISA'02* (Alicante, España, 18-19 Abril 2002).
- [6] MCKEE, G. T. Online robot educational environments. In *Actas de de las III Jornadas de Trabajo EIWISA'02* (Alicante, España, 18-19 Abril 2002).
- [7] SÁNCHEZ, J., AND DORMIDO, F. M. S. Teleoperation of an inverted pendulum through the world wide web. In *Workshop On Internet Based Control Education. IBCE'01* (Madrid, Spain, 2001), pp. 12-14.
- [8] SERRANO, C., COSTA, R., AND NEZ, L. B. Vmrl-java aplicaciones a la programación fuera de línea de robots industriales. In *6to Congreso de la Asociación Española de Robótica y Automatización Tecnologías de la producción* (Barcelona, Octubre 1999), AER, pp. 20-22.
- [9] SLOTINE, J. J. E., AND LI, W. *Nonlinear Applied Control*. Prentice-Hall, 1991.
- [10] TORRES, F., CANDELAS, F. A., POMARES, J., PUENTE, S. T., ORTIZ, F. G., AND GIL, P. Laboratorio virtual remoto para la enseñanza de robótica. In *Actas de de las III Jornadas de Trabajo EIWISA'02* (Alicante, España, 18-19 Abril 2002).
- [11] VALLÉS, M., VALERA, A., AND DÍEZ, J. Desarrollo y control de procesos virtuales mediante matlab web server. In *Actas de de las III Jornadas de Trabajo EIWISA'02* (Alicante, España, 18-19 Abril 2002).