



## PLATAFORMA PARA LA REALIZACIÓN DE ACTIVIDADES PRÁCTICAS A DISTANCIA EN TIEMPO REAL. POTENCIALIDADES DE UTILIZACIÓN EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

**Hernández Santana, Luis\***; **Santana Ching, Iván\***; **Aracil Santonja, Rafael\*\***; **Sartorius Castellanos, Aldo\*\*\***;  
**Rubio Rodríguez, Ernesto\***

\*Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales  
Carretera a Camajuaní Km. 5 ½ Santa Clara, Villa Clara, Cuba

\*\* Universidad Politécnica de Madrid

División de Ingeniería de Sistemas y Automática  
José Gutiérrez Abascal 2 E-28006 Madrid, España

\*\*\*Instituto Tecnológico de Minatitlan, México

Departamento de Ingeniería Industrial

### RESUMEN

En este trabajo es presentada una plataforma para laboratorios virtuales y a distancia enfocada al control de sistemas físicos en tiempo real a través de Internet, la cual permite a los usuarios desarrollar y probar sus propios algoritmos de control de una forma sencilla e intuitiva, usando el paquete Matlab-Simulink con el Toolbox Real Time Windows Target. Una de las principales características de la plataforma propuesta es la implementación de un software de administración de prácticas que mantiene la funcionalidad y filosofía del Matlab Web Server. En la plataforma están implementadas actualmente varias prácticas de control de motores y de control de un robot manipulador. Son presentadas las potencialidades de utilización de la plataforma como apoyo a la impartición de las prácticas de laboratorio en asignaturas de la disciplina Sistemas de Control de la carrera de Automática de la Universidad Central de Las Villas, así como las posibilidades de uso en otras disciplinas o carreras de la Educación Superior.

Palabras claves: Control, Laboratorios remotos, Laboratorios virtuales, Tiempo real

### INTRODUCCION

Debido principalmente al alto costo del desarrollo, mantenimiento y operación de los laboratorios de prácticas, la experimentación con sistemas reales ha tenido una disminución en la última década y ha sido sustituida por las herramientas de simulación. Las cuales a pesar de presentar grandes ventajas por su facilidad de uso y relativo bajo costo, son deficientes en simular el ruido, la respuesta en frecuencia, la conversión analógica digital y otros fenómenos físicos que caracterizan a los sistemas reales [1].

Como respuesta a este problema se ha empezado a usar Internet como un medio de ayuda en la enseñanza y de compartir recursos de software y hardware costosos. Esto ha permitido que a través de las nuevas tecnologías de la información, se hayan desarrollado prácticas en laboratorios virtuales [2] y remotos [3] los cuales tratan de combinar la flexibilidad que ofrecen las simulaciones sin perder las características importantes que rigen a los sistemas físicos [4]. Esto permite experimentar en plantas reales sin la necesidad de estar en un laboratorio.

Actualmente, en el caso de los laboratorios para la enseñanza del control automático, la mayoría de los laboratorios remotos presentan esquemas predefinidos de control [5]. Esto limita la práctica a escoger algún tipo de regulador (PI,

PID, espacio de estado, etc.) y ajustar sus parámetros para lograr una respuesta deseada. En la plataforma presentada ese es un problema resuelto pues la misma permite a los usuarios la realización de prácticas con esquemas predefinidos de control, así como la creación de sus propios controladores usando software altamente conocido en el medio como lo es Matlab-Simulink [6]. En la plataforma están implementadas actualmente varias prácticas de control de motores de corriente directa y de control de un robot manipulador. [7].

Indudablemente la plataforma presentada es una poderosa herramienta de apoyo a la docencia al permitir el acceso a equipamiento de tecnología de punta de muy alto valor con fines de entrenamiento para un gran número de usuarios mediante la realización de actividades prácticas sobre dichos equipos reales a distancia a través de la Internet, abriendo todo un campo de trabajo para docentes que podrán desarrollar con sus estudiantes actividades con equipos reales con una pequeña inversión de recursos.

Como ejemplo de las potencialidades de uso de la plataforma es presentado en este trabajo el caso de la disciplina de Sistemas de Control de la Carrera de Automática de la UCLV, donde teniendo en cuenta las características dinámicas de los sistemas físicos conectados a la misma, motores de corriente directa y un robot manipulador, son propuestas varias temáticas factibles de soportar actividades prácticas con sistemas reales con el uso de esta herramienta, como ejemplo de las potencialidades presentadas serán mostradas dos prácticas implementadas actualmente en la plataforma.

La plataforma tiene la capacidad de soportar cualquier tipo de práctica de laboratorio donde existan sensores tales que las señales de medición y mando sean eléctricas. Por ejemplo, resultaría muy fácil implementar la mayoría de las prácticas de laboratorio de los componentes de Electricidad y Magnetismo de la Disciplina Física para ser realizadas a distancia, lo que indudablemente sería un aporte al aumento de la calidad de la educación.

## 1 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:

*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 solo se debe tener los conocimientos básicos de la disciplina objeto de prácticas, en el caso presentado conocimientos básicos de sistemas de control.

*Interfaz de usuario rápida y fácil:* La interfaz de usuario del SLD esta 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.

## 2 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LA PLATAFORMA

El Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD) se divide en tres partes:

1.- Interfaz del usuario

2.- Administración de los pedidos de las prácticas.

3.- Procesamiento de las prácticas.

La Figura 1 muestra la interacción de estas tres partes. Los usuarios interactúan con el sistema a través de Internet. Al acceder al sitio Web, se elige la práctica que se desea realizar. Se llenan correctamente todos los datos en el formulario asociado a la práctica y finalmente se elige entre ejecutarla de manera simulada o real.

Al enviar los datos se ejecuta un CGI que se encuentra en el servidor Web, el cual los recibe y posteriormente los manda al Servidor de Administración de Prácticas (SAP) y le informa que hay un nuevo pedido. El SAP inserta dicho pedido en una lista y se queda a la espera de una respuesta para trasmitirla finalmente al usuario que realizó el pedido.

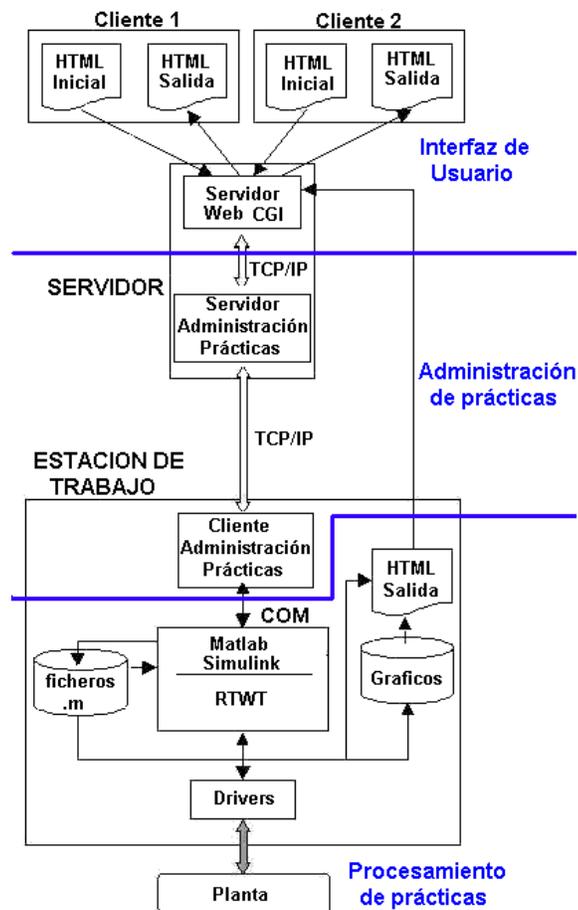


Figura 1. Funcionamiento general del Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD).

El SAP está constantemente chequeando la lista de pedidos tratando de encontrar para cada uno de los pedidos una estación de trabajo que sea capaz de procesarlo. Una vez que la encuentra, saca el pedido de la lista y se lo envía al Cliente de Administración de Prácticas (CAP). Cuando el pedido llega al CAP se identifica que tipo de práctica es y dependiendo de esto se elige la forma en que se debe procesar. Una vez que la práctica ha sido procesada se transmite el resultado en sentido inverso al que trajo el pedido para que al final llegue hasta el usuario. La respuesta es una página Web que muestra los resultados del procesamiento.

### 3 ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA

La implementación de laboratorios a distancia con prácticas virtuales, utilizando la plataforma desarrollada, requiere de la creación de una serie de archivos, algunos de los cuales van a estar localizados en el servidor Web de la plataforma y otros en la estación de trabajo donde se van a ejecutar las prácticas. En la figura 2 se aprecia la distribución de los mismos en la plataforma. A continuación describiremos algunos de estos archivos y su interrelación con el funcionamiento de la plataforma.

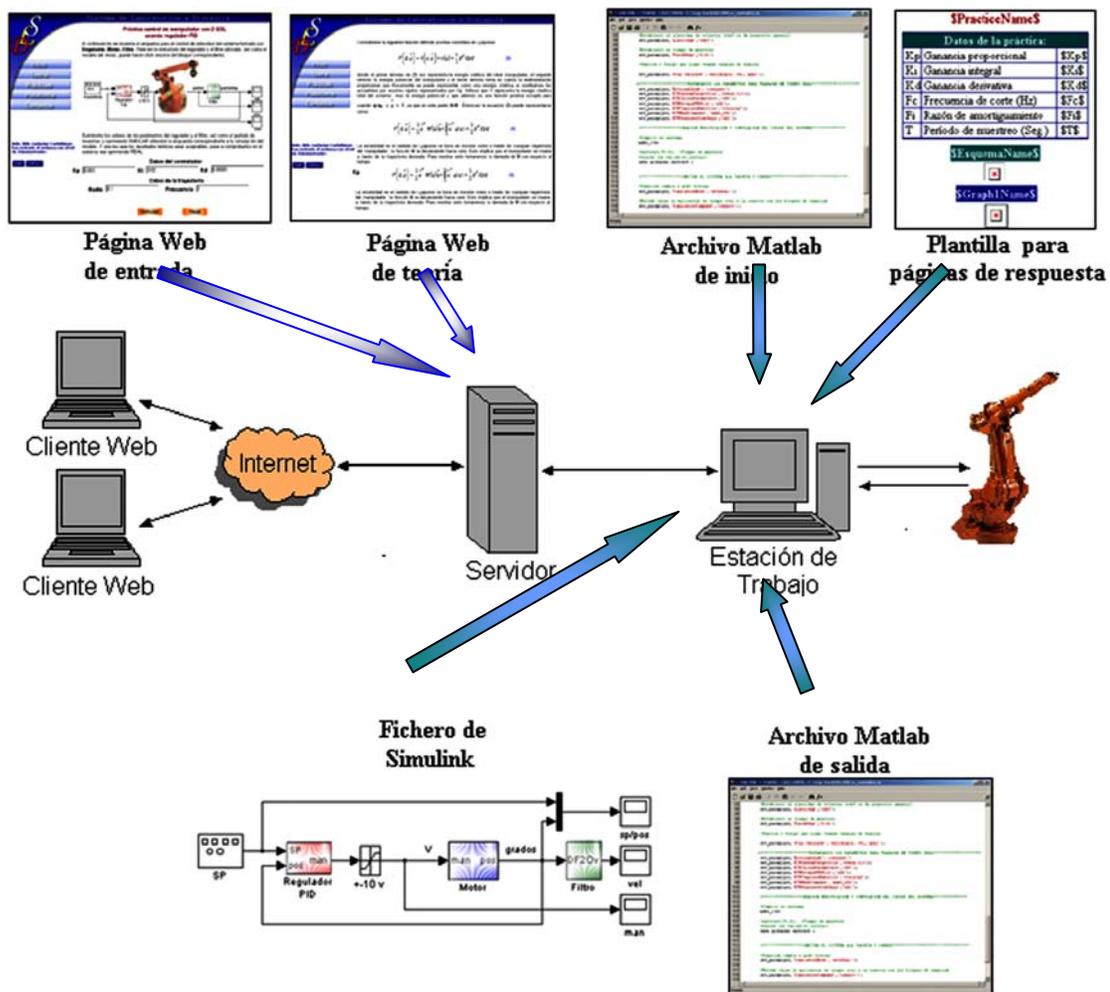


Figura 2. Arquitectura de la plataforma.

### **3.1 Interfaz del usuario**

Una parte muy importante en el desarrollo de un sistema de laboratorios a distancia es la interfaz del usuario mostrada como Página Web de entrada. La función principal de la interfaz de usuario es conformar el pedido de las prácticas y enviarlo hasta el servidor Web. El sistema puede ser accedido desde cualquier computadora con conexión a Internet usando cualquier navegador para Web (Netscape, Internet Explorer u otro).

Adicionalmente cada práctica tiene asociada una página Web de teoría, que ofrece el basamento para la realización de la práctica y los datos necesarios para la realización de la misma.

### **3.2 Administración de los pedidos de prácticas**

La principal función de esta parte del sistema es recibir las prácticas provenientes del sitio Web y enviarlos hacia el software encargado de procesar las prácticas en cuestión. Posteriormente se enviara la respuesta de la ejecución de la práctica hacia el navegador del usuario.

Para la administración de los pedidos de prácticas, se desarrollo una arquitectura cliente/servidor, donde los datos provenientes del servidor Web se envían a alguna estación que pueda realizar la práctica. Este software mantiene toda la funcionalidad y filosofía del Matlab Web Server. Adicionalmente permite atender múltiples pedidos de una misma práctica de forma paralela, llevándolas a cabo en estaciones de trabajo que pueden estar separadas por redes de magnitud WAN tal como Internet.

Por otro lado el software de administración de prácticas permite el intercambio de archivos con el usuario, siendo esta una de las características más importantes del sistema ya que posibilita la creación y prueba de reguladores diseñados por los usuarios. El software de administración de prácticas se divide en el Servidor de Administración de Prácticas (SAP) que es un componente del sistema que se comunica con el servidor Web a través del protocolo TCP/IP y en el Cliente de Administración de Prácticas (CAP) que se implementa en una computadora la cual esta conectada al hardware de accionamiento y a los sensores específicos para esa práctica.

### **3.3 Procesamiento de las prácticas**

Esta parte del sistema es la encargada de ejecutar la práctica que ha sido solicitada por el usuario. Existen diversas formas de llevar a cabo la ejecución de las prácticas. El sistema realiza las prácticas con Matlab-Simulink y el Toolbox Real Time Windows Target debido a la facilidad de uso y potentes capacidades presentadas por este software.

Por una parte, Real-Time Workshop proporciona la conexión en tiempo real con el sistema de adquisición de datos, mientras que Real-Time Windows Target permite la ejecución del esquema Simulink en tiempo real sobre Windows. El hecho de ejecutar directamente un esquema Simulink supone ventajas, ya que el tiempo y la complejidad de crear nuevos algoritmos de control se reducen drásticamente y permite una fácil creación y modificación de esquemas de control.

## **4 POTENCIALIDADES INMEDIATAS DE USO DE LA PLATAFORMA EN ACTIVIDADES PRÁCTICAS DE LA DISCIPLINA SISTEMAS DE CONTROL**

La plataforma desarrollada tiene la capacidad de soportar cualquier tipo de práctica de laboratorio donde las señales de medición y mando sean eléctricas, no obstante, las experiencias desarrolladas hasta ahora han girado alrededor de los accionamientos eléctricos de motores de corriente directa, en la versión del control de un motor simple y de un sistema multivariable de varios motores como un robot industrial. Por ello explicaremos las potencialidades inmediatas de usar los recursos disponibles en al UCLV hasta este momento para apoyar la docencia de la disciplina de Sistemas de Control, aclarando que de una forma u otra todas las soluciones potenciales planteadas han sido logradas con la plataforma y el hardware disponible.

Asignaturas de pregrado que pueden ser apoyadas por la plataforma.

| Asignaturas de pregrado | Área de conocimientos   |
|-------------------------|---|
| Modelado y simulación   | -Identificación experimental de sistemas SISO.<br>-Análisis dinámico de sistemas.   |
| Sistemas de control 1   | -Análisis y diseño en el campo del tiempo.<br>-Diseño de redes de compensación.<br>-Selección de esquemas de control y ajuste de controladores.   |
| Sistemas de control 2   | -Diseño en el espacio de estados de sistemas SISO.<br>-Diseño de observadores de estado.<br>-Diseño de sistemas de control digital de sistemas SISO.<br>-Control optimo<br>-Control adaptable de sistemas SISO. |
| Accionamiento eléctrico | -Síntesis y ajuste de reguladores de motores de CD.   |

Asignaturas de postgrado que pueden ser apoyadas por la plataforma.

| Asignaturas de postgrado   | Área de conocimientos  |
|----------------------------|--|
| Teoría avanzada de control | -Diseño de reguladores en el espacio de estados.<br>-Diseño de observadores de estado completo y reducido.<br>-Diseño de reguladores por realimentación no lineal.<br>-Control adaptable de sistemas multivariables. |
| Dinámica de sistemas       | -Identificación experimental de sistemas SISO y MIMO.<br>-Síntesis de reguladores.   |
| Control digital            | -Diseño de redes de compensación de atraso digitales<br>-Diseño de redes de compensación de adelanto digitales<br>-Diseño de redes de compensación de digitales<br>-Selección y ajuste de controladores digitales    |
| Robótica                   | -Modelación dinámica de manipuladores.<br>-Generación y planificación de trayectorias.<br>-Diseño de controladores acoplados y desacoplados.   |

## 5 EJEMPLOS DE USO DE LA PLATAFORMA EN LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS A DISTANCIA

Cuando los usuarios acceden al sitio Web del SLD debe registrarse en el sistema con su login y password. En este momento la plataforma tiene montada un número de actividades prácticas con dos versiones principales, prácticas con controlador predefinido y prácticas con controlador definido por el usuario, a continuación explicaremos como con estas posibilidades desarrolladas es posible apoyar diversos temas de asignaturas de la disciplina Sistemas de Control.

### 5.1 Prácticas con controlador predefinido

Dos páginas de este tipo práctica se presentan en la figura 3, en los dos casos el objetivo de la práctica es la sintonía de un regulador PID, en caso a) en un sistema SISO compuesto por un motor de corriente directa y en el b) en un sistema multivariable de un robot industrial de dos grados de libertad [7], en cada caso la página da las opciones de realizar la práctica simulada o real.

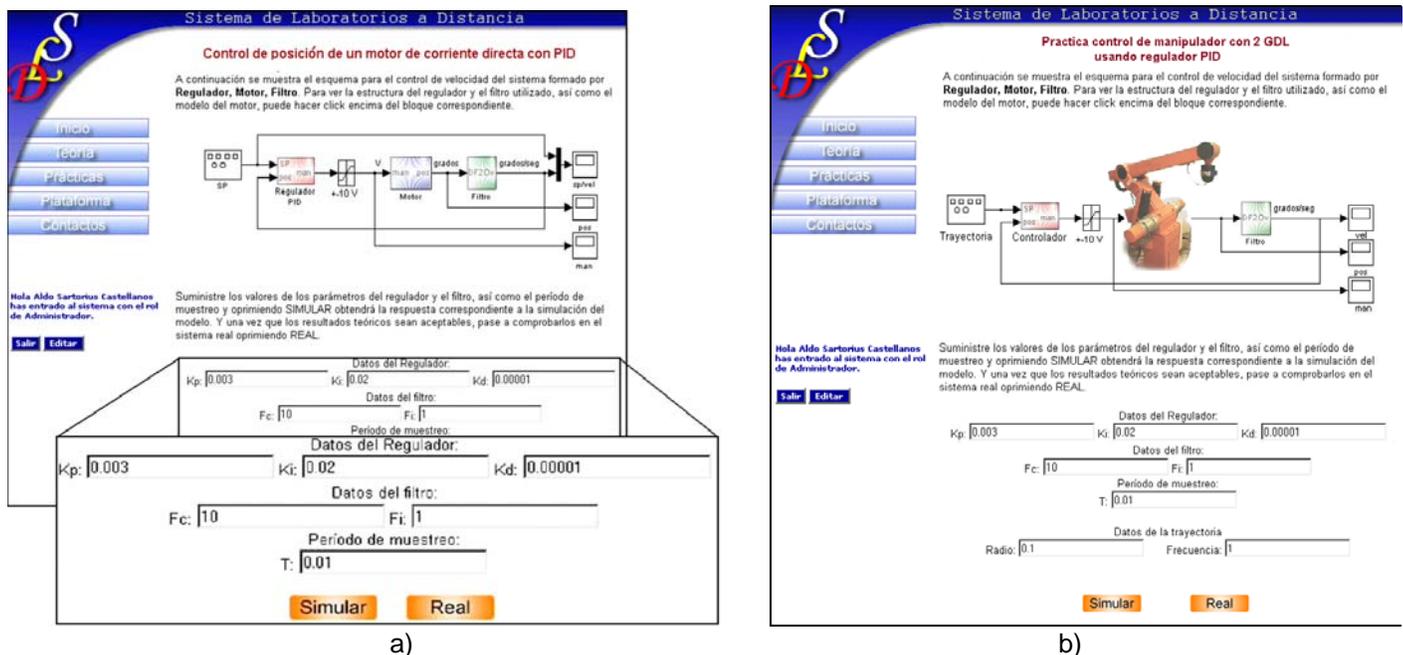


Figura 3. Pagina Web de práctica con controlador predefinido a) motor, b) robot manipulador.

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, ajuste de reguladores de motores de CD, ajuste de controladores, diseño de controladores desacoplados, con las características particulares de los sistemas SISO y MIMO.

### 5.2 Prácticas con controlador definido por el usuario

Una de las características más importantes del SLD es que permite a los usuarios la creación de sus propios controladores de forma remota [6]. Estos controladores pueden ser creados utilizando solo bloques de Simulink o de forma opcional, una combinación de bloques de Simulink con funciones definidas por el usuario. Estas facilidades están montadas en el motor de corriente directa y en el robot manipulador. Presentamos como ejemplo el caso del motor de CD.

Cuando el usuario selecciona una práctica con posibilidad de crear un controlador, se le muestra una página Web que contiene un formulario como el mostrado en la Figura 4 a). En esta página el usuario debe descargar un archivo de Simulink que contiene el diagrama de bloques de la práctica (Motor.mdl en este caso), Figura 4 b). En este archivo el usuario puede modificar los subsistemas Referencia y Controlador utilizando el software MATLAB-Simulink, sin alterar el nombre de las entradas y salidas de los subsistemas. En este caso el interesado utiliza una suma de tres señales sinusoidales como referencia en el subsistema Referencia y crea un controlador PID dentro del subsistema Controlador.

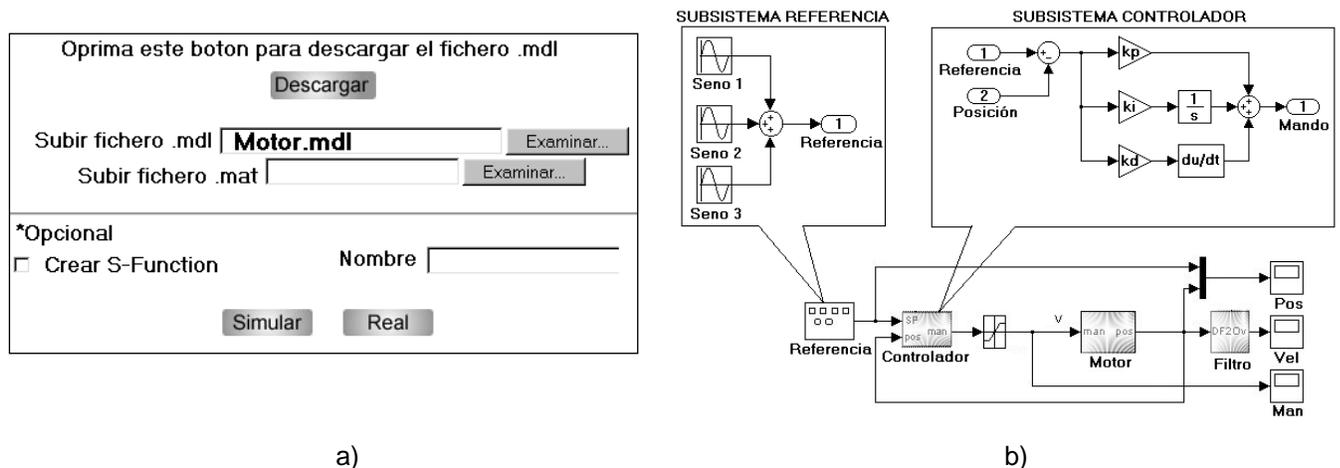


Figura 4. Práctica con controlador definido por el usuario. a) Página Web, b) Bloque Simulink.

Una vez realizados los cambios, el usuario debe subir al servidor el fichero de Simulink modificado y decidir si quiere realizar una simulación o controlar el proceso real. Cuando se ha mandando ha ejecutar el proceso real el SLD realiza primero una simulación del sistema y sobre los datos obtenidos de la misma se realizan una serie de pruebas para determinar si el controlador se puede implementar en el sistema real. En el caso del motor de CD estas pruebas se centran en determinar si el sistema presenta oscilaciones de alta frecuencia que puedan dañar al motor mecánicamente o por temperatura. Una vez determinados estos aspectos el SLD se encarga de implementar el controlador creado, compilar el sistema utilizando el Toolbox Real Time Workshop (RTW) y realizar la práctica en tiempo real.

Esta potencialidad del sistema abre el campo de diseño de reguladores en múltiples asignaturas de la Disciplina Sistemas de Control, la única limitante que se puede encontrar es la complejidad dinámica de las plantas objeto de estudio, aunque esto no es responsabilidad de la plataforma, con lo demostrado es posible cubrir las temáticas de: diseño analógico y digital de reguladores en todas sus variantes, redes, espacio de estado, observadores, etc., síntesis de reguladores especialmente para accionamiento, incluyendo control multivariable y control del robot [6].

## CONCLUSIONES

La plataforma para laboratorios virtuales y a distancia, enfocada al control de sistemas físicos en tiempo real a través de Internet, es una importante herramienta para impulsar la calidad de la docencia en la educación superior. Esta permite el acceso a equipamiento de tecnología de punta de muy alto valor con fines de entrenamiento para un gran número de usuarios mediante la realización de actividades prácticas a distancia a través de la Internet con un costo relativamente bajo. Su potencialidad de uso en la disciplina de Sistemas de Control de la Carrera de Automática de la UCLV está probada, principalmente en las asignaturas de Sistemas de Control y Accionamiento, por las características de las plantas conectadas actualmente, quedando claro que su extensión a otras asignaturas como Control de Procesos solo depende de la selección de los procesos adecuados. De manera similar se puede hablar respecto a otras disciplinas y asignaturas. La plataforma garantiza el acceso remoto a dispositivos físicos para hacer

actividades prácticas con múltiples usuarios, queda el trabajo de seleccionar los sistemas físicos con señales de tipo eléctrico y desarrollar el trabajo metodológico para implementar las prácticas.

## REFERENCIAS

- [1] **HITES, MICHEL**., "Creating and Running Undergraduate Experiments Controlled Through the Internet" en *American Society for Engineering Education*, Chicago, Illinois, 2002.
- [2] **ANIDO, L., M. LLAMAS Y M. J. FERNANDEZ**., "SimulNet: Building Virtual Teaching Laboratories for the Web" en *Proceedings of 8th International World Wide Web Conference*, Toronto, Canada, 1999.
- [3] **KO, C. C., BEN M. CHEN, JIANPING CHEN, YUAN ZHUANG Y KAY CHEN TAN**., "Development of a Web-Based Laboratory for Control Experiments on a Coupled Tank Apparatus" en *IEEE Transactions On Education*, 2001.
- [4] **PUERTO, R., O. REINOSO, R. ÑECO, N. GARCIA Y L. M. JIMENEZ**., "Remote Lab for Control Applications Using Matlab" en *Proceedings on Internet Based Control Education*, Madrid, España, 2001.
- [5] **SARTORIUS, A., HERNÁNDEZ, L., ARACIL, R., RUBIO, Á., SANTANA, I.**, "Sistema de Laboratorios a Distancia (SLD): Laboratorio para la enseñanza del control automático a distancia". *Revista Informática na Educação: Teoría & Prática*. Brasil.
- [6] **SARTORIUS, A., HERNÁNDEZ, L., ARACIL, R., RUBIO, Á., SANTANA, I.**, "Platform for distance development of complex automatic control strategies using Matlab". *The International Journal of Engineering Education*, special issue on Matlab and Simulink in Engineering Education. (Aceptado para publicar)
- [7] **SARTORIUS, A., HERNÁNDEZ, L., ARACIL, R., RUBIO, Á., SANTANA, I.**, "Virtual and remote laboratory for robot manipulator control study". *The International Journal of Engineering Education*, special issue on Robotic in Engineering Education. (Aceptado para publicar)

*Luis Hernández Santana*, graduado de Ingeniero en Control Automático en 1981. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias Técnicas en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas en 1993. Actualmente dirige el grupo de robótica de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas y esta a cargo del Programa de Cooperación Universitaria Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas y el Consejo de Universidades Flamencas de Bélgica. Sus intereses en la investigación se enfocan a la robótica, los sistemas de control adaptable y los sistemas de visión artificial.

*Iván Santana Ching*, graduado de Ingeniero en Automática en 1999 en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. En esa misma institución obtuvo el grado de MSc. en Automática con mención en Robótica y Control Inteligente en el año 2003. Actualmente se desempeña como catedrático y sus intereses en la investigación incluyen el desarrollo de sitios Web enfocados a la educación a distancia.

*Rafael Aracil Santonja*, Profesor de tiempo completo en el Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid. Graduado de Ingeniería Eléctrica en el año 1971, obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería en 1975 en esta Universidad. Sus principales actividades son en el área de automatización, la robótica y el procesamiento de imágenes. Actualmente se encuentra trabajando en el desarrollo de robots para nuevas aplicaciones y para tele operación inteligente. Es autor de varios libros, artículos y comunicados sobre los tópicos citados. Es miembro de varias organizaciones científicas y técnicas y dirige el Grupo Español de Visión por Computador de la IFAC así como La Red Latinoamericana de Robótica. Ha trabajado en varios proyectos de la Unión Europea, tales como ESPRIT, BRITE y EUREKA.

*Aldo R. Sartorius Castellanos*, graduado de Ingeniero Mecánico Electricista en la Universidad Veracruzana de México en el año 2000, obtuvo el grado de MSc en Automática con mención en Sistemas Computacionales en la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Actualmente se encuentra cursando estudios doctorales en la misma Institución, becado por el Instituto Tecnológico de Minatitlán en donde se desempeña como Jefe de laboratorios de la carrera de



Ingeniería Industrial. Sus intereses en la investigación incluyen los sistemas de control adaptable, la robótica y los sistemas de visión artificial

*Ángel Ernesto Rubio Rodríguez*, graduado de Ingeniero en Automática en 1997 en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. En esa misma institución obtuvo el grado de MSc en Automática con mención en Robótica y Control Inteligente en el año 2000. Actualmente se encuentra realizando estudios doctorales en el campo de la robótica en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas con articulaciones neumáticas en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid.