

# El sistema de tres tanques: un laboratorio virtual y remoto usando *Easy Java Simulations*

Natividad Duro, Héctor Vargas, Raquel Dormido, Sebastián Dormido, José Sánchez  
Dpto. de Informática y Automática. Universidad Nacional de Educación a Distancia C/ Juan del Rosal nº 16,  
28040 Madrid  
{nduro, hvargas, raquel, sdormido, jsanchez} @dia.uned.es

## Resumen

En la actualidad, las nuevas tecnologías basadas en Internet posibilitan la mejora y la sustitución de los laboratorios de control de carácter presencial por sesiones de experimentación virtual y remota. Este artículo presenta el estado de desarrollo en que se encuentra un completo laboratorio virtual y remoto para la realización de experiencias sobre un sistema MIMO no-lineal: *el sistema de tres tanques*. El laboratorio permite trabajar en modo simulación y remoto con la misma interfaz gráfica y la misma batería de controladores. La interfaz del cliente ha sido desarrollada íntegramente usando el sistema de desarrollo conocido como *Ejs*, una herramienta *open source* para generar potentes aplicaciones y *applets* sin necesidad de tener conocimientos avanzados de programación.

## 1. Introducción

La educación de calidad en ciencias e ingeniería siempre está asociada a dos niveles de conocimiento – el teórico y el práctico. Mientras que el conocimiento teórico puede ser fácilmente transferido a los estudiantes en las clases presenciales, muchos de los problemas propuestos en ellas, en ciertas ocasiones, únicamente se llegan a comprender tras horas de experimentación en el laboratorio.

Afortunadamente, el impresionante desarrollo que las tecnologías basadas en Internet han tenido en los últimos años ha contribuido a incrementar la importancia de la enseñanza-aprendizaje basada en el Web en muchos campos de investigación. El control automático es una de las áreas técnicas de la ingeniería en la que el impacto de estas tecnologías ha sido especialmente significativo en todo lo relativo al desarrollo de herramientas para

el aprendizaje y la experimentación [14]. Un tratamiento a fondo acerca del significado e impacto que estas tecnologías están teniendo en la educación del control automático se describe en [3].

Tradicionalmente, los laboratorios basados en el Web se dividen en dos categorías en función de la naturaleza del sistema con el que operan. Así, aparecen los conceptos de *laboratorio virtual* y *laboratorio remoto* o *tele-laboratorio*. En un laboratorio virtual, la interfaz de experimentación trabaja contra una simulación del proceso físico [2], [8] y [17]. Por el contrario, en un laboratorio remoto, el proceso físico es real, existe y es accesible vía Internet [12], [15] y [20].

Mediante el uso de los laboratorios basados en el Web, los estudiantes pueden observar la evolución dinámica de fenómenos, a menudo difíciles de explicar de forma escrita y, por consiguiente, estática. Además, la experimentación interactiva con plantas reales alimenta la motivación de los estudiantes, y también desarrolla un nuevo enfoque para la solución de problemas reales. El empleo de simulaciones para reforzar la enseñanza en la ingeniería de control es un camino apropiado y muy utilizado pero, en general, no puede llegar a reemplazar completamente la experimentación sobre plantas reales, puesto que una simulación es tan buena como lo es el modelo, y un modelo no es más que una aproximación que no puede reproducir todos los aspectos del proceso, tales como, por ejemplo, perturbaciones no esperadas, histéresis en los elementos mecánicos, o ruido en las señales.

En un laboratorio remoto basado en el Web, los estudiantes acceden al laboratorio desde una localización remota que les permite interactuar con el experimento real. Es posible cambiar los parámetros de control, ejecutar los experimentos,

ver resultados y descargar los datos a través del Web [10]. Además, una aproximación experimental para explicar los sistemas de control más usuales podría mejorar la motivación de los estudiantes, evitando así que su experiencia práctica quede ligada exclusivamente a la experimentación con modelos y entornos virtuales.

En este contexto, el sistema de tres tanques ha recibido gran atención en la literatura de control ya que presenta propiedades muy interesantes para la investigación y la educación. El sistema exhibe características típicas de un sistema híbrido con restricciones [9] y ha sido probada su utilidad para servir como plataforma de test de algoritmos relacionados con la estimación de parámetros, el control y la identificación de sistemas híbridos [11]. Por estas razones, el sistema de tres tanques ha sido seleccionado por diferentes grupos de investigación para presentar los resultados de diferentes estrategias de control así como herramienta para la enseñanza de técnicas de control clásico y avanzado.

El artículo se organiza de la siguiente manera: el proceso de tres tanques se describe brevemente en la Sección 2. La Sección 3 introduce los conceptos básicos de *Easy Java Simulations* (de aquí en adelante, *Ejs*), una herramienta de software que ayuda a crear simulaciones científicas dinámicas e interactivas en lenguaje Java. La creación mediante *Ejs* del laboratorio virtual del sistema de tres tanques se relata en la Sección 4. Una breve descripción de la conexión de la vista generada en *Ejs* con la planta real remota se describe en la Sección 5. La Sección 6 presenta dos experiencias de control con el laboratorio funcionando en modo virtual y remoto. Y para finalizar, la Sección 7 recoge algunas conclusiones y consideraciones de carácter genérico respecto de futuros trabajos.

## 2. El sistema de tres tanques

El sistema de tres tanques que se ha utilizado como modelo para el desarrollo del laboratorio virtual ha sido el equipo DTS-200 fabricado por la empresa alemana Amira GmbH [1] (Figura 1).

La planta consta de tres cilindros (o tanques) T1, T2 y T3 de sección  $A$ . La estructura completa de la planta se muestra en la Figura 2. Estos

cilindros están interconectados en serie mediante tuberías de sección  $S_n$ . En el lado derecho del tanque T2 se encuentra la válvula de desagüe, la cual presenta también una sección  $S_n$ . El líquido que sale a través de la válvula se acumula en un depósito rectangular ubicado debajo de los tanques. Este depósito suministra el líquido a las bombas 1 y 2 que, a su vez, se encargan de generar el flujo de entrada a los tanques T1 y T2.



Figura 1. El sistema de tres tanques de Amira.

La planta es un sistema cerrado, donde el líquido que llega al depósito inferior desde los tanques retorna a los mismos a través de las bombas. Por seguridad, estas bombas se desconectan de forma automática cuando el líquido en los tanques T1 o T2 excede un límite prefijado en fábrica. Además de la válvula de desagüe de T2, existen otras cinco válvulas. Dos de ellas se utilizan para conectar dos tanques consecutivos (una para los tanques T1-T3 y otra para la conexión de los tanques T3-T2), pudiendo ser cerradas manualmente para cancelar la comunicación entre dos tanques consecutivos. Las otras tres válvulas, denominadas válvulas de drenaje, se encuentran colocadas en la parte inferior de cada tanque. Mediante estas tres válvulas es posible vaciar de forma manual los tanques.

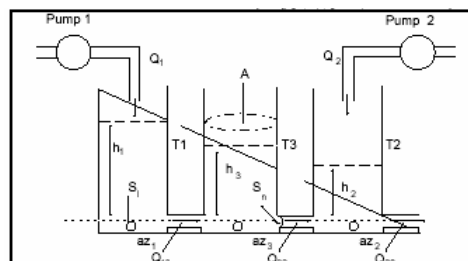


Figura 2. Estructura completa de la planta.

En el sistema global, los caudales de flujo de cada bomba corresponden a las señales de entrada del proceso, es decir, son las variables manipuladas, y los niveles de los tanques T1 y T2 son las señales de salida o variables controladas.

### 2.1. El modelo matemático

El modelo de la planta responde a las siguientes ecuaciones de balance:

$$A \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13} - Q_{1leak} \quad (1)$$

$$A \frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32} - Q_{3leak} \quad (2)$$

$$A \frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} - Q_{2leak} \quad (3)$$

donde  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  representan los niveles de líquido en cada tanque,  $A$  representa la sección de los tanques,  $Q_1$  y  $Q_2$  son los caudales de flujo de las bombas 1 y 2, y  $Q_{ij}$  representa los caudales de flujo entre  $T_i$  y  $T_j$  (si  $j = 0$  representa el caudal a la salida del sistema). Estas tres ecuaciones representan que la variación del volumen en cada tanque es igual a la suma de los caudales de flujo que llegan y salen del mismo.

Los flujos  $Q_{13}$ ,  $Q_{32}$  y  $Q_{20}$  son variables desconocidas en las ecuaciones (1), (2) y (3). Para obtenerlas, se utiliza la Ley de Torricelli:

$$Q_{ij} = az_i S_n \operatorname{sgn}(h_i - h_j) \sqrt{2g|h_i - h_j|} \quad (4)$$

donde  $az_i$  es el coeficiente del flujo saliente,  $\operatorname{sgn}(z)$  es el signo del argumento  $z$  y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Así, las ecuaciones resultantes para calcular los flujos parciales son:

$$Q_{13} = az_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|} \quad (5)$$

$$Q_{32} = az_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|} \quad (6)$$

$$Q_{20} = az_2 S_n \operatorname{sgn}(h_2 - h_0) \sqrt{2gh_2} \quad (7)$$

Las válvulas de las tuberías que interconectan

los tanques, las bombas y las válvulas de drenaje han sido modeladas utilizando las relaciones mostradas en [18].

### 3. ¿Qué es *Easy Java Simulations*?

*Easy Java Simulations* es una herramienta software creada, específicamente, para el desarrollo de simulaciones interactivas en el campo de la física, aunque actualmente también se puede utilizar con total garantía para la creación de laboratorios virtuales o remotos en otras materias [7].

La arquitectura de *Ejs* deriva del paradigma modelo-vista-control. Este paradigma expresa que una simulación interactiva se compone de tres partes perfectamente diferenciadas:

1. el *modelo*, que describe el fenómeno bajo estudio en término de variables y relaciones entre éstas expresadas mediante algoritmos en un computador.
2. el *control*, que define las acciones que un usuario puede ejecutar sobre una simulación,
3. la *vista*, que recoge una representación de los diferentes estados que el fenómeno puede presentar.

De acuerdo con esto, los pasos para construir una aplicación en *Ejs* son: (1) identificar el conjunto de variables que describen al sistema y las ecuaciones matemáticas que las relacionan; (2) definir la vista para poder representar los estados por los que pasa el modelo; y (3) especificar el control con el objeto de describir las acciones que se pueden realizar sobre la simulación.

Las tres partes están estrechamente vinculadas ya que el estado del modelo afecta a la vista, y las acciones de control afectan al estado del modelo. Finalmente, la vista afecta al modelo y al control debido a que la interfaz gráfica, es decir, la vista, contiene información sobre ambos.

*Ejs* va un paso más adelante en el proceso de simplificar la construcción de una simulación al suprimir el elemento de control y fusionar una parte en la vista y otra en el modelo. De esta forma, las aplicaciones se crean definiendo el modelo a simular con el núcleo de simulación interno de *Ejs* y construyendo una vista que visualice el estado del modelo y que responda adecuadamente a las acciones del usuario.

Así, para definir el modelo en *Ejs* es necesario identificar las variables que describen el proceso, inicializarlas y, además, describir las ecuaciones matemáticas que constituyen el modelo. Las últimas versiones de *Ejs* soportan el empleo de *Matlab/Simulink* como herramienta externa para la descripción y simulación del modelo.

La vista constituye la interfaz entre el modelo y el usuario. Se construye para proporcionar una representación visual de las propiedades más relevantes del modelo y de su comportamiento dinámico, y para posibilitar la interactividad de las acciones del usuario. *Ejs* incluye una completa librería de elementos visuales con los que el diseñador puede construir vistas muy elaboradas. Las propiedades de los elementos de la vista pueden ser enlazadas a las variables del modelo, estableciéndose un flujo bidireccional de información entre vista y modelo. Cualquier cambio en una variable del modelo es automáticamente recogido y trasladado a la vista. Recíprocamente, cualquier acción del usuario sobre la vista automáticamente modifica el valor de la variable del modelo que corresponda.

Resumiendo, el modelo es la parte científica de la simulación; sin embargo, la creación de la interfaz gráfica del usuario (la vista) es la parte de la simulación que requiere un mayor conocimiento de técnicas avanzadas de programación.

Una vez que el diseñador ha definido el modelo y la vista de la simulación interactiva, *Ejs* genera el código Java, compila el programa, comprime todos los ficheros resultantes en un único archivo, y genera un conjunto de páginas HTML que permiten ejecutar la simulación como un *applet*. De esta forma, una vez que el usuario concluye puede ejecutar la simulación bien como una aplicación o como un *applet* y publicarla en Internet.

*Easy Java Simulations* al completo, es decir, el paquete software y la documentación, se puede descargar gratuitamente en el servidor Web indicado en [6].

#### 4. El sistema de tres tanques en EJS

Esta sección describe la vista del sistema de tres tanques que ha sido desarrollada utilizando *Ejs*. El modelo ya ha sido descrito en la Sección 2 de este

documento.

La vista principal del laboratorio virtual y remoto consta de una ventana principal mostrada en la Figura 3. La ventana se compone de dos partes. La parte superior contiene un esquema del sistema que varía en consonancia con el estado de la simulación. En la parte inferior de la ventana se ubica un panel mediante el que se cambia la estrategia de control.

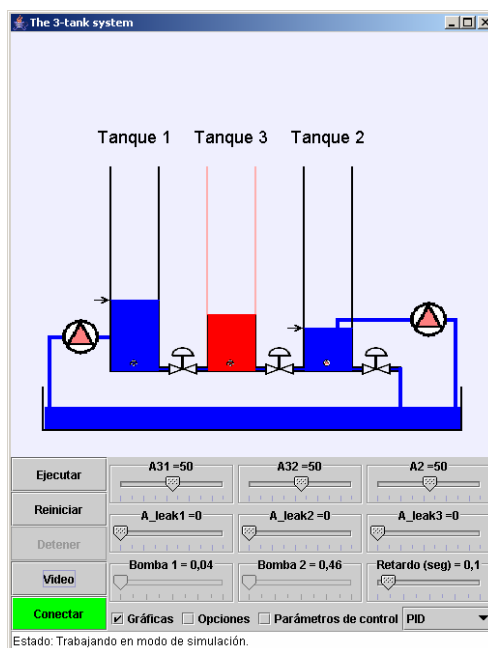


Figura 3. Interfaz gráfica desarrollada con los elementos gráficos de *Ejs*.

El sistema se ha representado en *Ejs* recurriendo a los siguientes elementos:

(1) *Un tanque*. Este elemento se replica tres veces en la vista. El tanque más a la izquierda corresponde a T1, el tanque central es T3 y el tanque de la derecha es T2.

(2) *Un depósito* situado bajo los tanques. Este depósito recoge el líquido que sale de los tanques a través de la válvula situada en el lateral de T2.

(3) *Una válvula*. El sistema utiliza seis válvulas. Dos de ellas se emplean para interconectar los tanques T1-T3 y T3-T2. Otra válvula permite vaciar el sistema a través de T2. Las restantes se ubican en la parte inferior de los tanques y se usan para drenar el sistema de forma manual.

(4) *Una bomba*. Son necesarias dos bombas: una para suministrar el líquido a T1 y otra para T2. En la vista se sitúan a ambos lados de los tanques.

(5) *Una flecha*. Es necesario recurrir al empleo de dos flechas en la vista para representar las consignas de los dos controladores PI.

En la parte inferior de la ventana principal se sitúan los controles para cambiar el modo de operación del sistema. A la izquierda, se sitúan cinco botones (*Ejecutar*, *Reiniciar*, *Detener*, *Vídeo* y *Conectar*) para controlar la ejecución. El botón *Conectar* permite a los usuarios trabajar en modo remoto con el sistema de tres tanques del laboratorio (este aspecto se describe en la Sección 5). Si el usuario no pulsa el botón *Conectar*, la aplicación trabaja por defecto en modo de simulación. Pulsado el botón *Conectar*, es posible visualizar el comportamiento de la planta real pulsando el botón *Vídeo*.

Por otro lado en la parte inferior derecha de la vista se dispone de un menú desplegable que permite seleccionar el tipo de controlador con el que se va a trabajar. Si se selecciona un tipo de control PID es posible trabajar en modo *Manual* o *Automático*. Si el control está en modo manual, el usuario puede fijar el voltaje de las bombas mediante dos *sliders* (*Pump1* y *Pump2*). El modo de operación y el controlador se puede fijar con independencia de que se esté trabajando en modo simulación o contra la planta real.

Para establecer la apertura de las válvulas hay tres *sliders*, *A31*, *A32* y *A2*, cuyo valor puede oscilar del 0% (cierre total) al 100% (apertura completa). La vista cuenta con tres *sliders* adicionales para la apertura de las válvulas de drenaje (*A\_leak1*, *A\_leak\_2*, *A\_leak3*), otros dos más para fijar el caudal de las bombas cuando el sistema se encuentra en modo manual (*Pump1*, *Pump2*) y un último *slider* para fijar el retardo (*Delay*).

Para finalizar, hay tres botones de selección adicionales. Seleccionando el botón *Graficas* se visualiza un panel compuesto de cuatro gráficas en las que se recoge la evolución de las dos variables manipuladas y las dos variables controladas del proceso. Si se activa el botón *Control*, se obtiene un panel con los parámetros de los dos controladores. En el botón *Opciones* se selecciona el idioma en el que se quiere trabajar.

## 5. Arquitectura del laboratorio remoto

La arquitectura del laboratorio remoto se basa en la conocida estructura cliente-servidor [15] [10], estando funcionando en el ordenador remoto el servidor Web, que da acceso al *applet*, y el sistema de control en tiempo real (Figura 4).

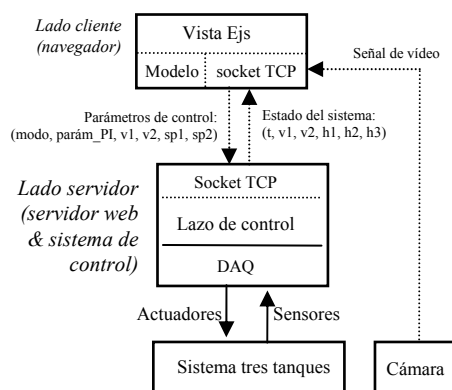


Figura 4. Arquitectura cliente-servidor. El lado del cliente lo constituye la vista *Ejs*, la cual puede funcionar como laboratorio virtual (modo simulación) o como laboratorio remoto (sistema real). En el lado del servidor hay un ordenador en el que trabajan simultáneamente un servidor HTTP y el lazo de control en tiempo real. El servidor Web permite a los estudiantes descargar el *applet Ejs*. El lazo de control regula el funcionamiento del sistema en función de los paquetes de datos enviados desde la vista. Los parámetros de control remitidos desde la vista al controlador son: modo de control (manual/automático), parámetros de los controladores PI ( $Kp1$ ,  $Ti1$ ,  $Kp2$ ,  $Ti2$ ), voltajes a los motores ( $v1$ ,  $v2$ ) y consignas de nivel ( $sp1$ ,  $sp2$ ). La información que la vista obtiene como respuesta está compuesta de seis valores: instante de muestreo, voltaje aplicado a los motores ( $v1$ ,  $v2$ ) y niveles de los tanques ( $h1$ ,  $h2$ ,  $h3$ ).

La interfaz del cliente ya se ha descrito en la sección previa, puesto que se trata de la vista construida con *Ejs*. Esta vista interactiva puede funcionar como laboratorio virtual utilizando el modelo matemático de la planta o como laboratorio remoto. En este caso, la vista establece una conexión TCP con el controlador del lado del servidor. De esta forma, el canal de comunicación TCP entre la vista y la planta sustituye al canal de comunicación local entre la vista y el modelo cuando la interfaz se utiliza en modo remoto.

Esta sustitución se produce cuando el usuario

pulsa el botón *Conectar*. Desde este momento, cada acción sobre la vista produce el envío de un paquete de datos al servidor, obteniéndose como respuesta un vector con el estado actual de la planta. La composición de los paquetes de datos intercambiados entre cliente y servidor se describe en la Figura 4. La longitud del paquete de datos enviado por la vista es de 42 bytes, y de 20 para el estado del sistema.

El lazo de control ha sido creado con LabView [19]. El controlador está compuesto de dos lazos de información: el lazo asíncrono de supervisión y el lazo síncrono de control de la planta. El primero de ambos lazos se cierra a través de Internet con la vista *Ejs*, y sufre de los retardos propios de la red.

En el lado del servidor, ambos lazos intercambian información a través de variables globales que comparten. Estas variables almacenan la información correspondiente a los parámetros de los dos controladores, las consignas de nivel de los depósitos, los voltajes de los motores de las dos bombas y los niveles actuales. De esta forma, cada vez que un usuario modifica cualquier valor en la vista, este nuevo valor se envía a través del lazo de supervisión al servidor y se escribe en la variable correspondiente; cada periodo de muestreo el lazo de control leerá estas variables y aplicará el nuevo valor al sistema.

## 6. Ejemplos de experiencias de control interactivas

En esta sección se describen dos experiencias de control con el sistema de tres tanques, usando para ello el laboratorio virtual presentado en este trabajo. Las condiciones iniciales del sistema son las siguientes:

(1) El nivel del tanque T1 es de 250 mm, el nivel del tanque T3 es de 200 mm, y el nivel del tanque T2 es de 150 mm. Los niveles de los tres tanques pueden variar en un rango de 0 mm (tanque vacío) a 630 mm (tanque lleno).

(2) Las dos válvulas colocadas entre los tanques T1-T3 y entre los tanques T2-T3 están abiertas al 50%.

(3) La válvula de salida colocada en el lado derecho inferior del tanque T2 está abierta también al 50%.

(4) Las válvulas de drenaje de los tres tanques

están totalmente cerradas.

(5) La bomba de abastecimiento del tanque T1 trabaja al 5.5%. La bomba de abastecimiento de T2 trabaja al 55%.

(6) Los dos controladores PI tienen los mismos parámetros de control:  $K_p = 3$  y  $T_i = 1$ .

La experiencia comienza con el sistema trabajando en modo manual y se cambia al modo automático en el instante  $t = 150$  s. En  $t = 300$  s, la consigna del tanque T1 aumenta hasta 450 mm, y posteriormente, en  $t = 780$  s la consigna del segundo tanque T2 se fija a 250 mm. Ambos controladores responden adecuadamente alcanzando las consignas exigidas, tal como se muestra en la Figura 5.

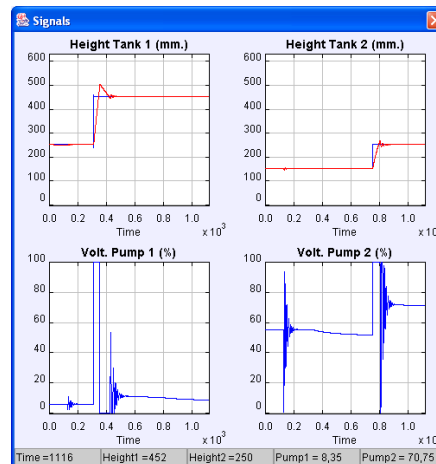


Figura 5. Evolución de las variables controladas y manipuladas del proceso simulado en la primera experiencia.

La Figura 5 presenta cuatro gráficas. Las gráficas colocadas en la fila superior muestran la evolución de las variables controladas del sistema (los niveles en los tanques T1 y T2), así como las consignas que siguen. Las gráficas de la fila inferior de la Figura 5 muestran la evolución de las variables manipuladas del sistema, es decir, los voltajes de las bombas de abastecimiento de los tanques T1 y T2. La gráfica ubicada en la izquierda de la fila inferior representa el comportamiento de la bomba que suministra caudal al tanque T1 y la situada en la derecha, el comportamiento de la bomba que suministra caudal al tanque T2. Las dos variables son modificadas por la acción de los controladores PI

colocados en el sistema a tal efecto.

Se puede apreciar que la evolución de las variables controladas es adecuada, dado que ambas variables alcanzan las consignas que deben seguir muy rápido. Del mismo modo la evolución de las variables manipuladas también es buena, dado que alcanzan el estado estacionario sin problema, después de un pequeño transitorio.

La segunda experiencia comienza desde el mismo estado estacionario inicial comentado anteriormente. No obstante, en esta segunda experiencia se trata de comprobar si el sistema es capaz de rechazar posibles perturbaciones de forma efectiva.

En este caso, la experiencia comienza en modo automático de control y en  $t = 160$  s, la válvula de drenaje del primer tanque se abre desde 0% hasta 50%. Posteriormente, se introduce una nueva perturbación en el tanque T2, abriendo su válvula de drenaje desde un 0% hasta un 50% en  $t = 330$  s.

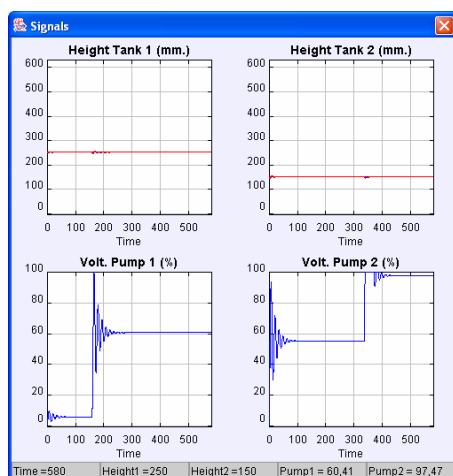


Figura 6. Evolución de las variables controladas y manipuladas del proceso simulado en la segunda experiencia.

El resultado de la experiencia es lo que se refleja en la Figura 6. De la observación de la Figura 6 se puede concluir que el experimento presentado obtiene resultados satisfactorios. Las variables controladas son prácticamente constantes y las manipuladas tienen un buen comportamiento, satisfaciendo los requerimientos pedidos. Se puede concluir, por tanto, que el sistema de control es capaz de rechazar las perturbaciones a las que ha sido sometido, manteniendo los niveles de los

tanques T1 y T2 sin problemas. Para validar los resultados con el laboratorio virtual se han realizado las mismas experiencias en el laboratorio remoto, obteniendo comportamientos muy similares para todas las variables.

## 7. Conclusiones y trabajo futuro

La investigación en el campo de la experimentación virtual y remota en la educación de las ingenierías es un tema relativamente joven. Sin embargo, ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos años, especialmente en el ámbito de la educación a distancia. No obstante, el procedimiento para transformar un sistema físico en un laboratorio interactivo virtual y remoto no es todavía tan sencillo. Primeramente, se tiene la dificultad de desarrollar vistas interactivas desde el punto de vista del cliente, es decir, laboratorios virtuales diseñados específicamente utilizando avanzados lenguajes de programación gráfica. En este punto, *Ejs* ha demostrado ser una solución más que adecuada para la enseñanza de control en las ingenierías [4], [5],[13] y [16].

No obstante, todavía existen una serie trabajos técnicos a desarrollar a largo plazo en la creación de laboratorios remotos. Las posibilidades de *Ejs* aún pueden ser aumentadas de forma relativamente sencilla mediante conexiones programadas desde el lado servidor de forma más intuitiva especialmente si se elige NI LabVIEW como herramienta software para crear el lado servidor.

En relación con los laboratorios basados en el Web presentados en este artículo, su diseño permite crear una completa reproducción de la experimentación a llevar a cabo sobre el proceso físico, haciendo uso de una sesión remota en la que se puede operar tanto con el sistema real como con el sistema simulado. Este modo de funcionamiento da un giro a los métodos tradicionales de estudio, orientándolos hacia un aprendizaje más flexible y personalizado, reduciendo así la presencia obligatoria del alumno en el sitio de experimentación y fomentando un trabajo más creativo. La experimentación en el desarrollo de laboratorios proporciona una característica fundamentalmente educacional,

puesto que con ellos los estudiantes pueden observar con facilidad los resultados del comportamiento dinámico de un proceso dado y darse cuenta de distintos fenómenos físicos que son difíciles de explicar fundamentalmente desde un punto de vista teórico.

En este punto, el trabajo actual y futuro está destinado a construir una batería de laboratorios basados en el Web, para poder ofrecer a nuestros alumnos un variado abanico de experiencias (concretamente en este momento están siendo desarrollados también los laboratorios de dos y cuatro tanques). Estos laboratorios virtuales y remotos deben cubrir todos los tópicos posibles, desde los más básicos hasta los más avanzados. Por otro lado, la infraestructura de los laboratorios basados en el Web lleva consigo también la necesidad de incluir temas relacionados con el reconocimiento de los accesos que se hacen a cada planta, el almacenamiento de recursos y diversos temas de seguridad.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo a la CICYT en el marco del proyecto DPI2004-01804 y a la Comisión Europea en el marco del proyecto "Leonardo da Vinci Pilot-Project. N° 2004 N/04/B/PP 165.011".

### Referencias

- [1] Amira GmbH' home page at <http://www.amira.de>.
- [2] Dormido, S, The role of interactivity in control learning. Plenary Lecture *15<sup>th</sup> IFAC Symposium on Advanced Control Education*. Oulu, pp. 11-22, 2003.
- [3] Dormido, S. Control learning: Present and future, *Annual Reviews in Control*, 28 (1), pp. 115-136, 2004.
- [4] Dormido, S. and Esquembre, F. The Quadruple-Tank Process: An Interactive Tool for Control Education, *European Control Conference ECC'03*, Cambridge (UK), September 2003.
- [5] Dormido, S., Martín, C., Pastor, R., Sánchez, J., and Esquembre, F. Magnetic Levitation System: A Virtual Lab in Easy Java Simulation, *ACC'04*, Boston (USA), July 2004.
- [6] Easy Java Simulations' home page at <http://fem.um.es/Ejs>.
- [7] Esquembre, F. Easy Java Simulations: A software tool to create scientific simulations in Java, *Comp. Phys. Comm.* 156 (2), pp 199-204, 2004.
- [8] Gillet, D., Fakas, G., Rekik, Y., Zeramdini, K., Geoffroy, F., and Ursulet, S. The Cockpit: An Effective Metaphor for Remote Experimentation in Engineering Education, *International Journal of Engineering Education*, 19 (3), pp. 389-397 2003.
- [9] Heiming, B., and Lunze, J. Definition of the Three-Tank Benchmark Problem for Controller Reconfiguration. *Proceedings European Control Conference*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [10] Ko, C.C., Chen, B.M., and Chen, J. *Creating Web-based Laboratories*. London: Springer, 2005.
- [11] Mignone, D. *Estimation and Control of Hybrid Systems*. Automatic Control Laboratory, ETH Zürich, 2002.
- [12] Pastor, R., Sánchez, J., and Dormido, S. A XML-based framework for the development of web-based laboratories focused on control systems education, *International Journal of Engineering Education*, 19 (3), pp. 445-454, 2003.
- [13] Pastor, R., Sánchez, J., and Dormido, S. Web-based virtual lab and remote experimentation using Easy Java Simulations, *16th IFAC World Congress*, Prague (Czech Rep.), July 2005. (accepted).
- [14] Poindexter, S.E., Heck, B.S. Using the web in your courses. What can you do? What should you do?, *IEEE Control System Magazine* 19 (1), pp. 83-92, 1999.
- [15] Sánchez, J., Dormido, S., Morilla, F., and Pastor, R. A Java/Matlab-Based Environment for Remote Control System Laboratories: Illustrated With an Inverted Pendulum, *IEEE Transactions on Education*, 47 (3), pp. 321-329, 2004.
- [16] Sánchez, J., Dormido, S., Pastor, R., and Esquembre, F. Interactive learning of control concepts using Easy Java Simulations, Plenary Lecture, *IFAC Workshop Internet Based Control Education IBCE'04*, Grenoble (France), September 2004.
- [17] Sánchez, J., Morilla, F., Dormido, S., Aranda, J., and Ruipérez, P. Virtual control lab using Java and Matlab: A qualitative approach, *IEEE Control Systems Magazine*, 22 (2), pp. 8-20, 2002.
- [18] Shinskey, F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning 4<sup>th</sup> edition*, McGraw Hill, 1996.
- [19] Travis, J. *Internet Applications in LabVIEW*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2000.
- [20] Valera, A., Díez, J.L., Vallés, M., and Albertos, P. Virtual and Remote Control Laboratory Development, *IEEE Control System Magazine*, 25(1), pp. 35-39, 2005.