

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329573223>

Entorno virtual de Simulación de un Sistema de 4 Tanques Acoplados

Conference Paper · December 2018

CITATIONS

0

READS

143

3 authors:



Mario Soto Angles

Pontifical Catholic University of Peru

4 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

SEE PROFILE



Gustavo Pérez-Zuñiga

Pontifical Catholic University of Peru

29 PUBLICATIONS 52 CITATIONS

SEE PROFILE



Javier Sotomayor

Pontifical Catholic University of Peru

56 PUBLICATIONS 182 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Distributed diagnosis [View project](#)



Entorno virtual de Simulación de un Sistema de 4 Tanques Acoplados [View project](#)

Entorno virtual de Simulación de un Sistema de 4 Tanques Acoplados

Soto Angles Mario *. Sotomayor Moriano Javier*. Pérez-Zúñiga Gustavo*. Cruz Olano Christian

* Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima, Perú Email: {mario.soto, gustavo.perez, a20057013} @pucp.pe; jsotom@pucp.edu.pe

Resumen: En este artículo se desarrolla un entorno de simulación de un proceso de 4 tanques acoplados, para uso en pruebas de simulación de controladores. Se explica el modelamiento matemático de un sistema de 4 tanques acoplados con las configuraciones más utilizadas en la literatura. Se describen los requerimientos para desarrollar un Entorno Virtual de Simulación (EVS) utilizando un software libre, en este caso EJS Java. Finalmente se presentan pruebas de uso del entorno para evaluar el desempeño del sistema con control PID.

Keywords: Tanques acoplados, Entorno Virtual, Controladores, Sistema Multivariable.

1. INTRODUCCIÓN

En control automático, el empleo de un entorno virtual constituye una excelente herramienta para llevar a cabo pruebas experimentales con modelos apropiados de los componentes de un sistema. Este tipo de herramientas pueden emplearse con fines de enseñanza e investigación.

Entre los requerimientos que se demandan a los EVS son: fácil interacción con el usuario, funcionalidad (con uso de software de fácil acceso), uso de modelos apropiados en el entorno, validez de los resultados de las pruebas de simulación, etc.

Para la fácil interacción con el usuario, se aplican los conceptos de imágenes dinámicas y sistemas interactivos virtuales, donde el cambio de algún elemento activo en las ventanas gráficas genera una actualización inmediata y nueva presentación del entorno, visualizándose el efecto de las modificaciones realizadas (Wittenmark, 1998).

Es deseable que el EVS esté programado con software de fácil acceso, por ejemplo, EJS, el cual es una herramienta desarrollada en Java que es gratuita y de código abierto y está diseñada para crear simulaciones interactivas mediante representación gráfica y permite el desarrollo de modelos dinámicos, sin necesidad de tener muchos conocimientos de programación (Fabregas, 2013). En la actualidad, bajo el concepto de “Internet de las Cosas” (IoT), la principal idea de diseño de EVS es usar una plataforma Web como una estructura de comunicación y un navegador Web como interfaz de usuario (Jie et al, 2017). Las herramientas interactivas que son accesibles en internet, se consideran un gran estímulo para el desarrollo del aprendizaje en ingeniería (Sotomayor, 2017).

En los EVS, se emplean diversos tipos de modelos. Por ejemplo, en Dormido et al (2008) se presenta un entorno virtual

y un laboratorio remoto para experimentación de sistemas no lineales multivariados, el sistema estudiado es una planta de 3 tanques acoplados, donde se emplea un modelo no lineal basado en balance de flujos, asimismo, se obtienen funciones de transferencia linealizando el modelo alrededor de un punto de operación.

La validez de los resultados de las pruebas, implica que los datos obtenidos a partir del EVS sean muy aproximados a los obtenidos a partir del sistema real. En Fabregas (2013) se muestran los datos de dos plataformas de uso académico para experimentos en control, tales como bola y aro, bola y plato, presentando el EVS y la planta real de cada uno de ellos, al comparar los datos obtenidos se comprobó que estos fueron muy aproximados. En Dormido et al (2008) se mostró los datos de un EVS y del control remoto de la planta real de tres tanques acoplados, correspondientes al seguimiento de trayectoria, en este caso, los datos obtenidos fueron bastante similares.

En el presente artículo se optó utilizar simulaciones simples en java (EJS-Java), las cuales permiten desarrollar simulaciones interactivas de forma completa en tres pasos, utilizando una simplificación del paradigma arquitectónico Modelo – Vista – Controlador (MVC), es decir una arquitectura que implementa de manera independiente el aspecto visual, la lógica del sistema o proceso a implementar, y las relaciones e interacciones entre componentes y acciones de usuario, además proporciona una estructura simplificada para el desarrollo de las ecuaciones que representan el comportamiento dinámico del sistema (Heradio et al, 2016).

Este artículo se estructura de la siguiente manera: En la sección 2 se detalla el modelo matemático del sistema de 4 tanques acoplados, donde se explican las principales variables que intervienen en el proceso. En la sección 3 se explica el proceso de implementación de las ecuaciones del modelo en el EVS; en

esta sección también se describe la conectividad con Matlab. En la sección 4 se presentan pruebas de uso del EVS para evaluar un controlador PID.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE 4 TANQUES ACOPLADOS

Para describir el modelo se presentan las dos configuraciones más difundidas para esta planta piloto de tipo benchmark. La primera, conocida como configuración básica, fue presentada inicialmente en (Johansson, 2000) y la segunda, conocida como configuración modificada, ha sido presentada originalmente en (Numsomram, 2008). A partir de estas, con el cierre y/o apertura de algunas de las válvulas que conforman el sistema, es posible obtener otras configuraciones.

2.1. Modelado de la Configuración básica

En la Fig. 1 se aprecia la configuración básica del sistema de 4 tanques acoplados presentada por Johansson (Johansson, 2000, Alvarado, 2006)

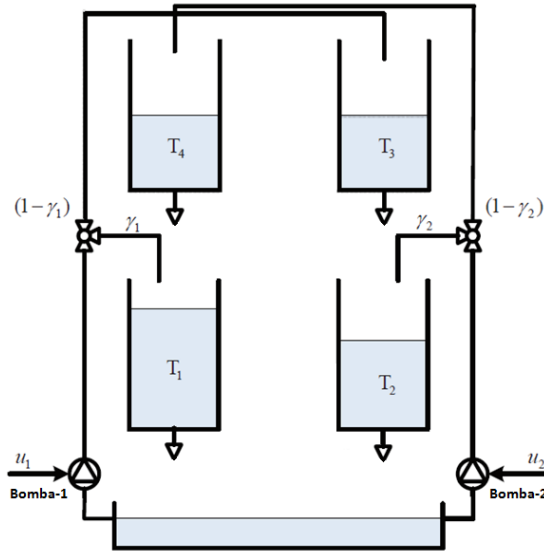


Fig. 1. Configuración básica del proceso de 4 tanques (Alvarado, 2006)

Esta configuración está compuesta por un reservorio amplio en su base y otros cuatro tanques de menores dimensiones distribuidos en pares en dos niveles, con cada tanque del nivel superior (tanques 3 y 4) encima de su correspondiente tanque en el nivel inferior (tanques 1 y 2). Una bomba 1, que alimenta del reservorio a los tanques 1 y 4, con su respectiva válvula de 3 vías para regular el caudal distribuido a cada tanque; de modo similar una bomba 2 que alimenta los tanques 2 y 3, también con su respectiva válvula de 3 vías.

Se realiza el balance de flujos para cada tanque de la configuración básica mostrada en la Figura 1 y se obtiene el modelo no lineal del sistema (Alvarado, 2006):

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1}{A_1}q_a \quad (1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2}{A_2}q_b \quad (2)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)}{A_3}q_a \quad (3)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)}{A_4}q_b \quad (4)$$

Donde:

A_i : Sección transversal del tanque i (cm^2).

a_i : Sección transversal del orificio de salida del tanque i (cm^2).

h_i : Nivel del agua en el tanque i (m).

q_a y q_b : Flujo de salida de las bombas (m^3/h)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

q_i : Flujo de entrada al tanque (m^3/h)

γ_i : Parámetro de apertura de la válvula de 3 vías.

2.2. Modelado de la Configuración modificada

Se incluye una conexión en la parte inferior entre los tanques 1 y 2, con una válvula reguladora R_x en medio de esta. Este modelo modificado además asume que el área de la sección transversal de los tanques es la misma e igual a "A". Adicionalmente, se agrega una válvula regulable en los orificios de fuga de cada tanque con la finalidad de graduar el flujo a través de los mismos. Esto genera una modificación del comportamiento dinámico del nivel de agua de los tanques 1 y 2. Estas modificaciones se muestran en la Fig. 2 (Numsomran, 2008).

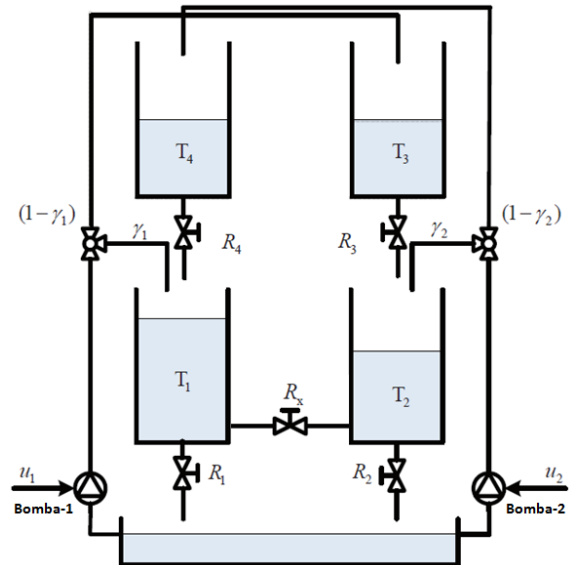


Fig. 2. Configuración Modificada del Proceso de 4 tanques. (Numsomran, 2008)

Se realizaron los respectivos balances de flujos obteniéndose las siguientes ecuaciones que definen el modelo:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-\beta_1 a_1}{A} \sqrt{2gh_1} + \frac{\beta_3 a_3}{A} \sqrt{2gh_3} - \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1 - h_2) \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + \frac{\gamma_1}{A} q_a \quad (5)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{-\beta_2 a_2}{A} \sqrt{2gh_2} + \frac{\beta_4 a_4}{A} \sqrt{2gh_4} - \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1 - h_2) \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + \frac{\gamma_1}{A} q_b \quad (6)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{\beta_3 a_3}{A} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)}{A} q_a \quad (7)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{\beta_4 a_4}{A} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)}{A} q_a \quad (8)$$

Donde:

β_i : Parámetros de apertura de las válvulas de salida del tanque i

β_x : Parámetro de apertura de las válvulas de conexión entre tanques 1 y 2.

2.3. Linealización del modelo de configuración básica.

En el entorno EVS se trabaja con el modelo no lineal a fin de obtener una mejor aproximación al comportamiento real.

El objetivo de linealizar, es poder llevar a cabo el diseño del sistema de control (con controlador PID). El modelo linealizado del sistema para entradas q_a , q_b de la configuración básica se muestra en la ecuación (9) (Alvarado, 2006).

$$dx = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x$$

Donde:

$$x_i = h_i - h_i^0; u_j = q_j - q_j^0$$

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}} \geq 0; i = 1, 2, 3, 4$$

Son las constantes de tiempo de cada tanque.

Donde (h_i^0, q_j^0) es el punto de operación del modelo linealizado.

2.4. Linealización del modelo de configuración modificada

De manera similar se obtiene el modelo linealizado para la configuración modificada (Ecuación 10)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_x} & \frac{1}{T_x} & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ \frac{1}{T_x} & -\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_x} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_{p1}}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_{p2}}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_{p2}}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_{p1}}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$T_i = \frac{A}{\beta_i a_i} \sqrt{\frac{2\bar{h}_i}{g}}; T_x = \frac{A}{\beta_x a_x} \sqrt{\frac{2|\bar{h}_1 - \bar{h}_2|}{g}}; i = 1, 2, 3, 4$$

3. DESARROLLO DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

El EVS se desarrolla en Java con ayuda del API (Application programming interface) EJS, que proporciona un conjunto de librerías e interfaces predefinidas para simulaciones de control. Adicionalmente, se provee al entorno, la capacidad de trabajo de manera integrada con Matlab/Simulink, haciendo uso del API SoftwareLinks (Sanchez, 2005). En el EVS propuesto, se emplearán los datos de diseño de una planta piloto de 4 tanques acoplados (ver fig. 3), implementada en el Lab. de Control Avanzado de la PUCP, en esta planta:

- Caudal máx. entregado por las bombas: 16lt/min (266.7cm³/s)
- Diámetro de la tubería: ½" (1.27cm)
- Altura máxima en los tanques: 40cm



Fig. 3. Planta piloto de 4 tanques acoplados. Lab. de Control Avanzado de la PUCP

3.1. Requerimientos básicos de trabajo

Para utilizar el EVS con la funcionalidad de comunicación con Matlab, físicamente se requiere de al menos dos computadoras. Una que funcione como cliente y otra como servidor, las que podrían estar instaladas en un mismo equipo físico.

El cliente requiere contar con (necesario):

- Plataforma Java: JDK o JRE 1.6 o superior
- RPC Matlab Client (Cliente JIM, solo si se requiere funcionalidad adicional de ejecutar código en Matlab)
- EJS (solo para el desarrollo, mas no para la ejecución de la aplicación desarrollada)

Y en el lado del Servidor se requiere tener instalado

- Plataforma Java: JDK O JRE 1.6 o superior
- Matlab / Simulink
- RPC Matlab Server (Servidor JIM)

3.2. Entorno de Simulación

La arquitectura del EVS se describe de la siguiente manera:

- El modelo: describe el comportamiento del sistema de cuatro tanques en función a las variables utilizadas.
- El controlador: define las acciones que se pueden ejecutar por parte del usuario.
- La vista: proporciona todos los elementos visuales que se presentan al usuario tanto para su interacción como para representar visualmente el modelo estudiado.

3.3. Proceso de desarrollo

- Definición de Variables: parámetros del modelo, estados, variables de control, etc.
- Inicialización de Variables: establecimiento de las condiciones iniciales.
- Definición de la dinámica del proceso: funciones en ecuaciones diferenciales resueltas con el método de Runge-Kutta de orden 4, a ser resueltas de manera recurrente.
- Definición de restricciones: tales como las alturas máximas a alcanzar en cada uno de los tanques.
- Desarrollo de la interfaz gráfica: con ayuda de la interfaz proporcionada por EJS que facilita el mismo, al tener precargados los elementos como tuberías y tanques.
- Asociación de elementos de la interfaz gráfica con variables o propiedades.
- Relacionamiento de acciones con elementos de la interfaz gráfica.
- Definición de funciones personalizadas para la implementación del PID.
- Definición de la lógica de control a aplicar de manera recurrente
- Creación del elemento de conexión con Matlab: para la lectura escritura de variables entre plataformas y el envío remoto de sentencias a ejecutar en Matlab/Simulink.

3.4. Comunicación con Matlab

Para la comunicación con Matlab/Simulink se utiliza una arquitectura Cliente – Servidor, para lograr la misma se trabaja con un conjunto de librerías que añaden al EVS la posibilidad de trabajar en conjunto con este software de manera externa e incluso de manera remota. Para esto se instala un servidor JIM para crear conexión entre Matlab instalado en el mismo y Java instalado en el cliente JIM a través de RPC (remote procedure calls). El servidor JIM se instala por medio de un archivo .jar (Java) ejecutable, que luego de iniciado debe mantenerse en ejecución en el servidor, el “RPC Matlab Server”. El cliente JIM denominado EJS Matlab Connector Element es un plugin implementado que debe ser incluido en la carpeta de ejecución del entorno de simulación, para estar accesible cuando sea requerido. Adicionalmente se requiere incluir en el workpath de JAVA un conjunto de librerías matlabcontrol para comunicación local o remota con MATLAB. En la Fig. 4 el esquema Cliente- Servidor utilizado.

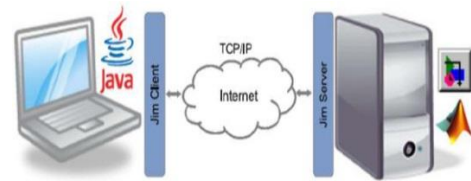


Fig. 4. Esquema Cliente-Servidor

3.4. Implementación del Controlador PID

En el controlador PID empleado la señal v es la suma de los términos proporcional, integral y derivativo.

$$v(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (11)$$

La salida del controlador es $u = sat(v)$, donde sat es la función de saturación que modela el actuador.

Para el cálculo de la acción proporcional se considera la constante proporcional k_p por la versión discreta del error.

$$P(t_k) = k_p(y_r(t_k) - y(t_k)) \quad (12)$$

Donde t_k denota los instantes de muestreo, de manera que:

$$t_{k+1} = t_k + T_s$$

Donde T_s es el tiempo de muestreo.

La acción integral se calcula aproximando la integral:

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + K_i T_s e(t_k) + K_t(u - v) \quad (13)$$

Donde K_t es un término antiwindup y K_i es la constante integrativa.

Se considera una acción derivativa con filtro obtenida mediante diferencias en retroceso:

$$D(t_k) = \frac{T_f}{T_f + T_s} D(t_{k-1}) - \frac{K_d}{T_f + T_s} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (14)$$

Donde K_d es la constante derivativa y T_f es un parámetro del filtro. La ventaja de usar diferencias en retroceso es que el parámetro $T_f/(T_f + T_s)$ es no negativo y menor que 1 para todo $T_s > 0$, lo que garantiza que la ecuación diferencial es estable.

Finalmente se obtiene el entorno de simulación mostrado en la Fig. 5. Donde se aprecia las distintas opciones de utilización de

la configuración básica y modificada, así como el control en modo manual y automático.

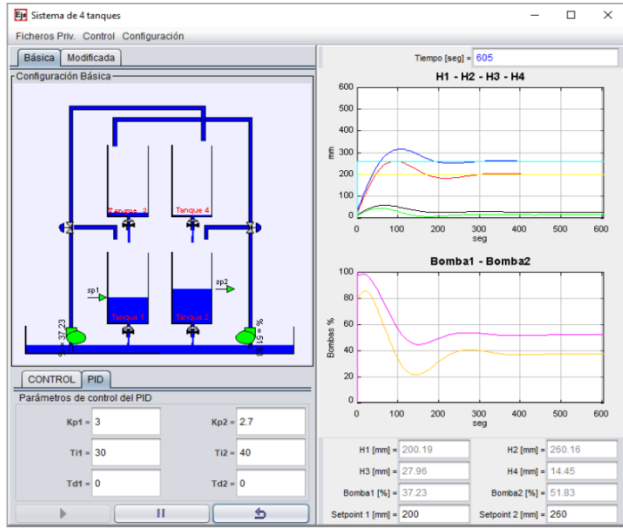


Fig. 5. Vista del entorno de simulación funcionando bajo el modo de control automático. H1→Rojo, H2→Azul, H3→Negro, H4→Verde, Bomba1→Amarillo, Bomba2→Magenta.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

4.1. Configuración básica para $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$.

La estrategia de control se desarrolló a partir del supuesto de que la suma de las aperturas de las válvulas de 3 vías era mayor a 1 ($\gamma_1 + \gamma_2 > 1$). Se evalúan 3 casos para comprobar la efectividad de la estrategia de control en base al comportamiento teórico del proceso estudiado. Primero se ejecuta la simulación para $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$, se observa en la Fig. 6 que efectivamente el sistema alcanza los valores deseados de nivel de líquido en los tanques 1 y 2.

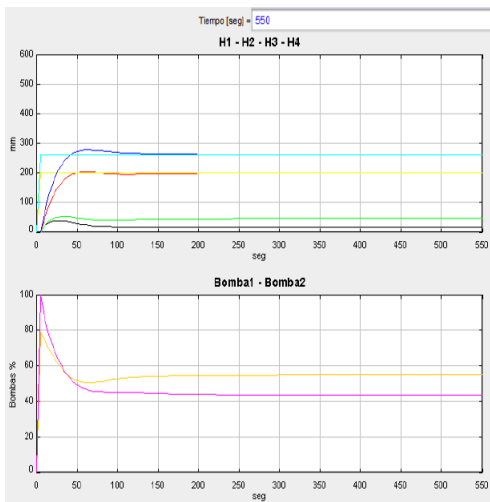


Fig. 6. Simulación para $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$

4.2. Configuración básica para $\gamma_1 = 0.5$ y $\gamma_2 = 0.5$.

Este es el caso límite teórico a partir del cual la estrategia de control deja de ser efectiva pues $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$. Observándose también que se cumple lo analizado teóricamente, el controlador no es capaz de alcanzar los valores deseados de nivel de los tanques 1 y 2. No obstante, el sistema alcanza valores estacionarios como se puede apreciar en la Figura 7.

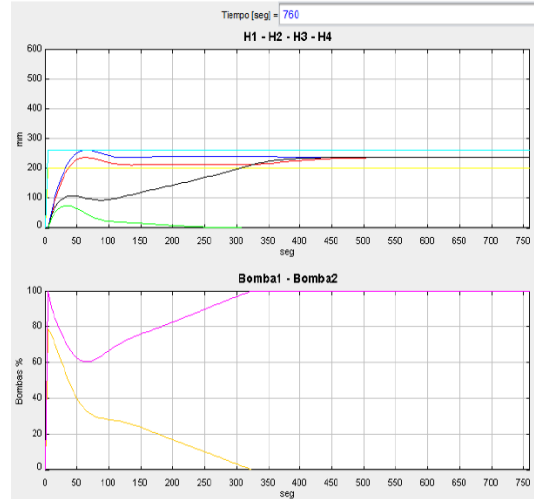


Fig. 7. Simulación para $\gamma_1 = 0.5$ y $\gamma_2 = 0.5$

4.3. Configuración básica para $\gamma_1 = 0.3$ y $\gamma_2 = 0.4$.

En la Fig. 8 se muestra la simulación para $\gamma_1 = 0.3$ y $\gamma_2 = 0.4$. Este caso es aún más extremo pues $\gamma_1 + \gamma_2 < 1$. Se observa también que se cumple lo planteado teóricamente, el supuesto analizado con la matriz de ganancias relativas deja de cumplirse totalmente de modo que el nivel de líquido en el tanque 1 no es principalmente afectado por la bomba 1 y similar en caso del nivel en el tanque 2. La estrategia de control es totalmente inadecuada y rápidamente el tanque 4 se llena alcanzando a activarse el mecanismo de seguridad que apaga ambas bombas.

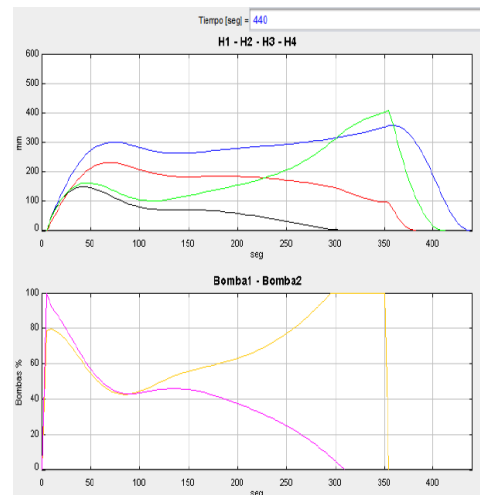


Fig. 8. Simulación para $\gamma_1 = 0.3$ y $\gamma_2 = 0.4$

4.4. Configuración modificada con $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$ y $A_{perX}=0.2$ (bajo)

A continuación, se evalúa la efectividad del controlador para distintos valores de apertura de la válvula indicada (AperX). Para valores bajos de porcentaje de apertura, como es el caso de 20%, el sistema no presenta problemas para alcanzar los valores de nivel deseados como se observa en la Fig. 9.

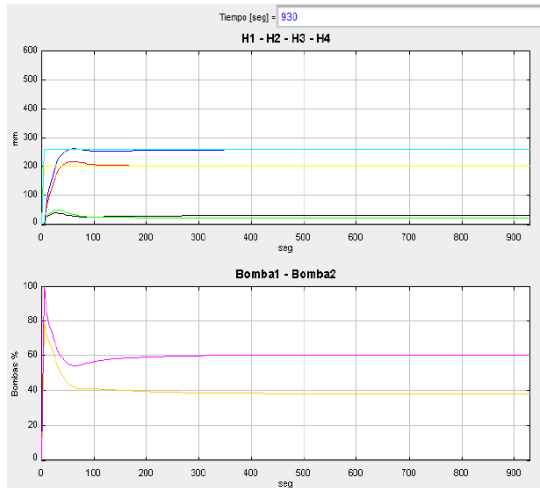


Fig. 9. $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$ y AperX=0.2 (bajo)

4.5. Configuración modificada con $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$ y AperX=0.8 (alto)

A medida que los porcentajes de apertura aumentan, el sistema presenta mayor demora para alcanzar los valores de niveles deseados y en valores próximos o mayores a 80% por ejemplo, el sistema ya no es capaz de alcanzar los valores de nivel deseados como se observa en la Fig. 10.

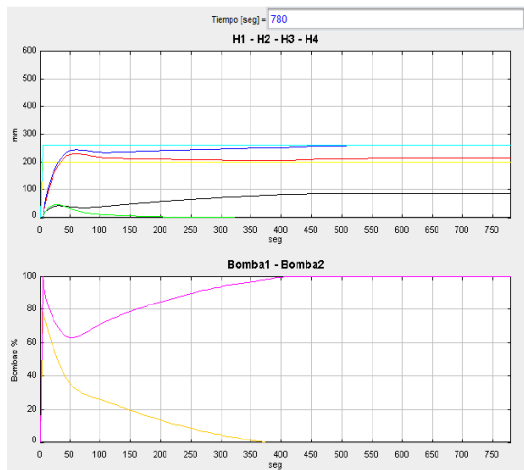


Fig. 10. $\gamma_1 = 0.6$ y $\gamma_2 = 0.7$ y AperX=0.8 (alto)

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un Entorno Virtual de Simulación para un sistema de 4 tanques acoplados y se validó su funcionamiento con resultados reales obtenidos en una planta piloto. Los resultados obtenidos son satisfactorios.

Se describió el proceso de desarrollo y comunicación para la creación de un Entorno Virtual de Simulación utilizando software libre, en este caso EJS Java.

Se presentaron pruebas de simulación de control del sistema de 4 tanques utilizando un controlador convencional en dos configuraciones del sistema con variaciones en las aperturas de válvulas y ante la presencia de perturbaciones.

El entorno virtual diseñado permite una conectividad en línea con Matlab/Simulink, en ese sentido, el trabajo actual se enfoca en evaluar el desempeño de la plataforma con estrategias de control avanzado.

REFERENCIAS

- Alvarado, I., Limon, D., García, W., Alamo, T., and Camacho, E. (2006). An Educational Plant Based on the Quadruple-Tank Process. *7th IFAC Symposium on Advances in Control Education*, vol. 8, no.6, pp. 82-87. Elsevier.
- Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sánchez, J., Dormido-Canto, S., Farias, G., Esquembre, F., and Dormido, S. (2008). Development of Web-Based Control: The Three-Tank System. *IEEE Transactions on Education*, vol.51, no.1, pp. 35-44.
- Heradio, R., De la Torre, L., and Dormido, S. (2016) Virtual and remote labs in control education: A survey. *UNED Madrid Spain*. vol. 42, pp. 1-10.
- Fabregas, E. (2013), *Plataformas interactivas de experimentación virtual y remota* Tesis doctoral UNED Capítulo 3 pp. 85-125, Madrid, España.
- Jie, Lin., Wei, Yu., Nan, Zhang., Xinyu, Yang., Hanlin, Zhang., and Wei, Zhao. (2017) *A Survey on Internet of Things. Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications* IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no.5, pp. 1125-1142.
- Johansson, K. (2000) The Quadruple-Tank Process; A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 3. pp. 456-465.
- Numsomran, A., Tipsuwanporn, V., and Tirasesth, K. (2008) Modeling of the modified quadruple-tank process. *Proceedings of SICE Annual Conference*, Vols 1-7, pp. 783-788.
- Sotomayor, J., Pérez-Zuñiga, C.G. (2017). *Cuadernos de Innovación en la Docencia*. Dirección Académica del Profesorado. PUCP
- Sánchez, J., Esquembre, F., Martín, C., Dormido, S., Pastor, R., Urquía, A. (2005) Easy Java Simulations: an Open-Source Tool to Develop Interactive Virtual Laboratories Using MATLAB/Simulink. *UNED, Madrid, España*. Vol. 21, No. 5, pp. 798-813. Tempus Publications.
- Wittenmark, B. Häglund, H., Johansson, M. (1998). Dynamic pictures and interactive learning, *IEEE Control Systems Magazine*, 18, no. 6, pp. 26-32.