

## ANEXO III. MEMORIA FINAL DE PROYECTO

EXPERIENCIA DE TRABAJO EN EQUIPO: DISEÑO Y CONTROL DE UN SISTEMA MULTIVARIABLE DE DEPÓSITOS INTERCONECTADOS

TEAMWORK EXPERIENCE: DESIGN AND CONTROL OF A MULTIVARIABLE SYTEM OF INTERCONNECTED TANKS

Juan Garrido Jurado  
Fracisco Javier Vázquez Serrano  
[juan.garrido@uco.es](mailto:juan.garrido@uco.es)  
Universidad de Córdoba

Received: dd/mm/yyyy

Accepted: dd/mm/yyyy

### Abstract

This work presents a group work experience that aims to improve both general skills (organization, planning, problem solving, decision making, etc.) and specific skills (modelling, design and implementation of control systems) of the students involved. For this, the students had to set the structure and instruments of a proposed experimental plant of interconnected tanks in which the level in the tanks was controlled by acting on a frequency converter that drives a flow, and on a three-way servo valve, which distributes the flow between the two tanks. Then, a system model was obtained to simulate and analyse the system behaviour. The designed process is a system of two inputs and two outputs that shows interaction and therefore, its control is more difficult. After that, two working groups were created and each one had to design a multivariable control strategy fulfilling specifications in the frequency domain. After testing the designs proposed by each group in simulation, these were verified with the experimental plant. Finally, each group explained the work methodology developed.

**Keywords:** teamwork, multivariable control, experimental plant.

### Resumen

En este trabajo se presenta una experiencia de trabajo en grupo que pretende mejorar tanto competencias generales (organización, planificación, resolución de problemas, toma de decisiones, etc.) como específicas (modelado, diseño e implementación de sistemas de control) del alumnado implicado. Para ello, se propone el montaje e instrumentación por parte de los estudiantes de una planta experimental de tanques interconectados en los que se debe controlar el nivel en los tanques actuando sobre un variador de velocidad que impulsa un caudal, y sobre una servoválvula de tres vías que reparte el caudal entre ellos. Después se debe obtener un modelo del sistema que permita simular y analizar su comportamiento. El proceso diseñado es un sistema de dos entradas y dos salidas que muestra interacción y por tanto dificulta su control. Tras ello, se hacen dos grupos de trabajo y cada uno tiene que diseñar una estrategia de control multivariable cumpliendo unas especificaciones en el dominio de la frecuencia. Tras probar los diseños propuestos por cada grupo en simulación, estos son verificados con la planta experimental. Finalmente, cada grupo explica la metodología de trabajo desarrollada.

**Palabras clave:** trabajo en equipo, control multivariable, planta experimental

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de trabajo en equipo aparece en la mayoría de las guías docentes relacionadas con la Automática ya que un buen ingeniero de control debe aprender a manejar multitud de conceptos, ideas y técnicas y, además, saber aplicarlos a procesos reales de la industria. De ahí que el principal objetivo de la docencia en Automática sea cubrir no solo necesidades de carácter teórico, sino también dotar al alumnado de la capacidad de enfrentarse a problemas de ingeniería. Las experiencias de trabajo en equipo como actividades académicas dirigidas tienen como fin la mejora de varias competencias transversales; de esta manera se intenta mejorar la capacidad de planificación y organización del alumnado y su formación y desarrollo en la resolución de problemas complejos que requieren de grupos de trabajo. El presente trabajo en grupo intenta mejorar las siguientes competencias de los ingenieros:

- Genéricas
  - o Trabajo en equipo
  - o Resolución de problemas
  - o Proporcionar capacidades de abstracción, análisis y síntesis.
  - o Capacidad de organización y planificación
  - o Contribuir a la formación y desarrollo del razonamiento científico
- Cognitivas (Saber):
  - o Diseño e implementación de sistemas de control
  - o Modelado y análisis de sistemas
- Procedimentales/Instrumentales (Saber hacer):
  - o Resolución de problemas

- Actitudinales (Ser):
  - o Habilidad para trabajar de forma autónoma y en equipo
  - o Toma de decisiones

Por otro lado, la cada vez mayor complejidad de los procesos industriales actuales, en los que el número de magnitudes a controlar es cada vez mayor, obliga al desarrollo de estrategias de control más complejas (Garrido, 2012). Uno de los fenómenos que aparece en los sistemas multivariables es la interacción, por el cual el control sobre una de las variables tiene influencia en el resto de magnitudes, lo cual es indeseable en la mayoría de los casos (por ejemplo, en una planta mezcladora en la que el aumento de nivel de líquido en un recipiente no debe afectar a la concentración de alguno de los componentes presentes en la mezcla). Para solucionar esta problemática hay diversas metodologías de control multivariable como pueden ser el control descentralizado, control por desacoplo, control robusto, etc. (Skogestad, 2005).

En el presente trabajo, se ha diseñado una planta experimental de dos tanques donde controlar el nivel de agua. Dichos depósitos están interconectados en serie de tal forma que aparezca una interacción entre los actuadores de la planta y dichos niveles, lo cual da al proceso un carácter multivariable. Dicho proceso experimental ha sido montado por el alumnado, el cual además, ha elaborado diferentes estrategias de control que tratan con el problema de la interacción en sistemas multivariables. La experiencia se ha llevado a cabo principalmente en la asignatura Laboratorio de control de Procesos del Grado de Ingeniería en Electrónica Industrial de cuarto curso.

## 2. OBJETIVOS

Los principales objetivos de la experiencia lleva a cabo, y en los cuales se intenta promover el trabajo en equipo, son los siguientes:

- Diseño y montaje de una planta experimental multivariable de dos depósitos interconectados por parte del alumnado implicado. Dicha planta además pasaría a formar parte de las plantas experimentales del Laboratorio de Control de Procesos del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Córdoba para fines docentes.
- Selección y montaje de la instrumentación necesaria para medir los niveles de agua en cada tanque y para poder actuar sobre ellos.
- Elaboración de estrategias de control sobre la planta anterior por diferentes equipos . Ello implicaba el modelado de la planta y el diseño de un controlador.

Para llevar a cabo los objetivos anteriores se realizaron las siguientes fases:

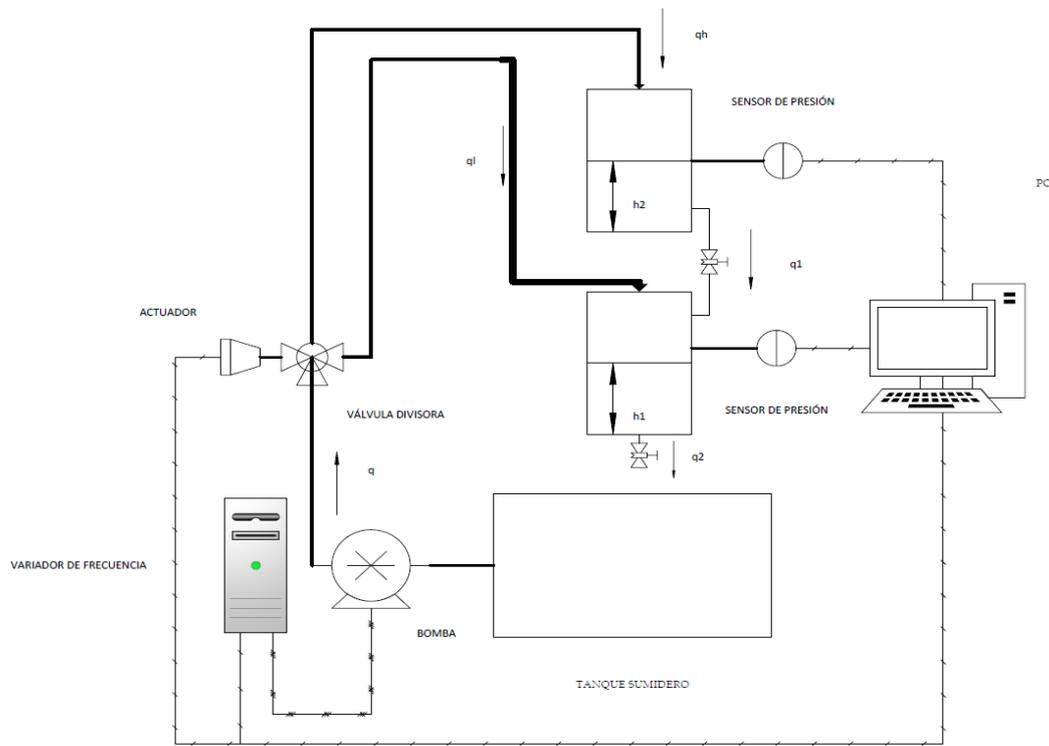
1. Se estableció un profesor responsable y coordinador de la experiencia.
2. Entre el alumnado, se eligió un coordinador de grupo, que fue el interlocutor con el profesor responsable.
3. En una reunión colectiva se establecieron los requisitos finales del equipo a diseñar.
4. Se seleccionaron los componentes adecuados para montar la planta experimental.
5. Montaje en su conjunto de todos los componentes que conforman el sistema.
6. Finalizado el montaje, se formaron dos equipos, los cuales debían implementar una estrategia de control.
7. Presentación de resultados experimentales de cada uno de los equipos. Cada equipo explicará al resto de compañeros la metodología usada para desarrollar su controlador. De esta forma, los estudiantes comparten entre ellos diferentes experiencias de diseño de controladores y de trabajo en equipo.

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1 DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA

El punto de partida de este trabajo supone el diseño y montaje de un sistema de dos tanques interconectados cuyo esquema se muestra en figura 1. El sistema está formado por tres tanques rectangulares, una bomba y una servoválvula de tres vías. La bomba coge agua del depósito sumidero y la impulsa a los tanques superiores (tanque 1 y tanque 2). El caudal total  $q$  que pasa por la bomba se divide en función de la apertura de la servoválvula en el caudal  $q_1$  que va al tanque 1 (inferior) y el caudal  $q_2$  que va al tanque 2 (superior). Además, la bomba se controla mediante un variador de frecuencia lo que permite modificar el caudal total  $q$ . Así pues, hay dos señales de control: frecuencia del variador (0-100 %) y porcentaje (0-100%) de reparto del caudal total a través de la válvula de tres vías que va a la rama superior, y ambas señales afectan a las dos salidas a controlar: los niveles de agua en los tanques 1 y 2 (ambos en cm). Esto hace que el proceso sea multivariable, con dos entradas y dos salidas, e interacción entre dichas variables. Los tanques 1 y 2 tienen un sensor de nivel para poder medir y controlar las alturas de líquido en ellos ( $h_1$  y  $h_2$ ). El líquido en el tanque 1 desagua al depósito sumidero a través de unas válvulas manuales, mientras que el tanque 2 lo hace al tanque 1, lo cual aumenta aun más la interacción del proceso.

El sistema de control, basado en PC, recibe las medidas de los sensores y regula el variador y la servoválvula mediante diferentes módulos de entrada y salida conectados a una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument. Dados unos niveles de referencia en cada tanque, el objetivo es alcanzar dichas referencias con el menor error posible y el menor esfuerzo de control. Dada la naturaleza multivariable de la planta, un cambio en la referencia de nivel de cualquiera de los tanques perturba de forma transitoria al otro debido a la interacción existente. En el PC, la tarjeta de adquisición se comunica con el software Matlab/Simulink® que es el que se utiliza para diseñar e implementar las estrategias de control. En la figura 2 se muestra una fotografía de la planta montada por los alumnos.



1. Esquema de la planta.



2. Planta experimental (estructura e instrumentación).

### 3.2 MODELADO E IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

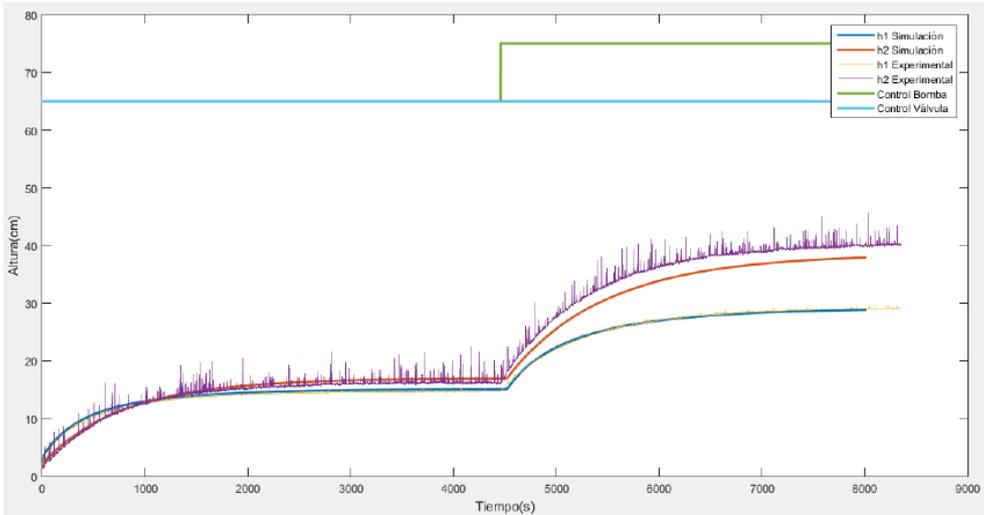
Una vez se han calibrado los instrumentos de medida y actuación, y se ha preparado el sistema de adquisición de datos, y antes de proceder a la fase de desarrollo de diferentes estrategias de control, es necesario disponer de algún modelo del sistema tanto para el diseño de las estrategias anteriores como para la simulación de la respuesta obtenida con estas.

Para ello, el alumnado realizó una identificación en lazo abierto mediante saltos escalón en las entradas del sistema (frecuencia del variador y apertura de la válvula) y midiendo los niveles en los tanques. A continuación con la herramienta ident de Matlab obtuvieron funciones de transferencia para cada pareja entrada-salida que se ajustaron a los datos

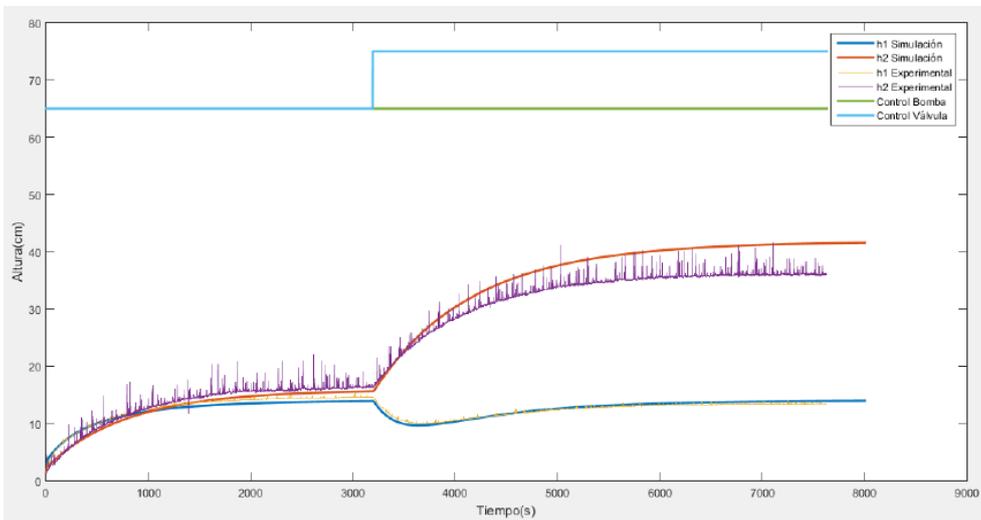
experimentales. El punto de operación en torno al cual se identificó el sistema viene dado por un 65% en ambas señales de control. El modelo resultante viene dado por la siguiente matriz de funciones de transferencia:

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{745s+1.46}{372926s^2+1335s+1} & \frac{-654s-0.11}{234639s^2+1160s+1} \\ \frac{2.4}{853s+1} & \frac{2}{864s+1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{bomba} \\ u_{válvula} \end{pmatrix} \quad (1)$$

En la figura 3 se muestra la respuesta experimental del sistema ante un salto de 10% en la bomba, así como la respuesta en simulación con el modelo identificado. En la figura 4 se muestra también la respuesta del sistema y la del modelo cuando el salto escalón del 10% se realiza en la válvula. El ajuste del nivel del tanque 1 (h1) es muy bueno en ambos casos; el de h2 es algo peor y la medida de este nivel contiene bastante ruido debido al rango del sensor de nivel usado. Aun así, el modelo obtenido tiene la misma tendencia que el sistema real y es válido para el diseño de controladores. En ambas experiencias se puede apreciar que las dos entradas tienen efecto en los dos niveles de agua a controlar, lo cual reafirma la presencia de interacción en este sistema multivariable.



3. Alturas h1 y h2 en lazo abierto (experimentales y simulación) ante salto en la bomba.



4. Alturas h1 y h2 en lazo abierto (experimentales y simulación) ante salto en la servoválvula.

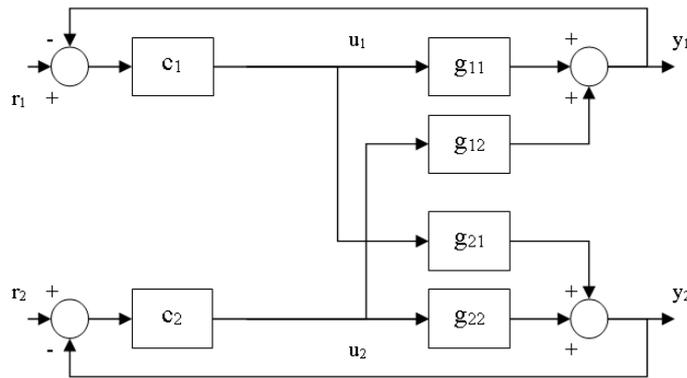
### 3.3 DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Una vez obtenido un modelo del sistema a controlar se formaron dos equipos de alumnos para que cada uno diseñara una estrategia de control multivariable diferente, en concreto un control descentralizado y un control por desacoplamiento simplificado. A continuación se detallan cada una de ellas.

#### 3.3.1. Control descentralizado

En una estrategia descentralizada, cada variable controlada se regula mediante una variable manipulada de manera independiente, sin que el controlador responsable reciba información del resto del proceso. La figura 5 muestra un esquema de control descentralizado. Por tanto, el primer paso es determinar con qué variables manipuladas se va a controlar cada salida, esto es, el problema de emparejamiento entradas-salidas. Para ello una herramienta útil es la matriz de ganancias relativas (RGA), la cual aconseja emparejamientos cuyos elementos correspondientes en dicha matriz estén próximos a la

unidad (Bristol, 1966). La RGA del modelo del sistema viene dada en (2), la cual recomienda emparejar la altura del tanque 1 con la frecuencia del variador, y el nivel del tanque 2, con la servoválvula.



5. Esquema de control descentralizado.

$$RGA = \begin{pmatrix} 0.92 & 0.08 \\ 0.08 & 0.92 \end{pmatrix} \tag{2}$$

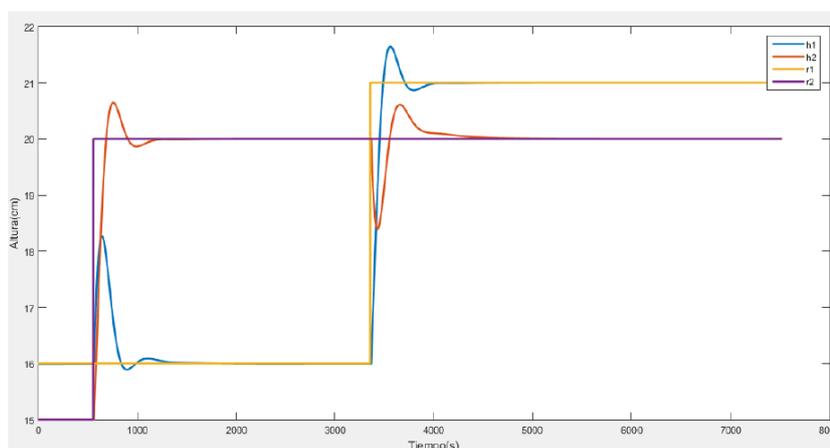
Seguidamente se decidió usar controladores PI (proporcional-integral) para cerrar los lazos. Un control PI proporciona una señal de control que es proporcional al error actual de la magnitud a controlar y proporcional a la integral del error (Astrom, 2006). Su expresión viene dada en (3), en la cual hay dos parámetros a ajustar: la ganancia proporcional  $K_p$  y la constante de tiempo integral  $T_i$ .

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) \cdot dt \tag{3}$$

Para ajustar los parámetros de los dos controladores PI se ha usado una metodología iterativa implementada en la herramienta TITO y usando un margen de  $60^\circ$  como especificación en ambos lazos. La herramienta TITO, elaborada por profesores del área de Ingeniería de Sistemas y Automática (Vázquez, 1999), ajusta los controladores teniendo en cuenta las influencias entre ambos lazos de control para mejorar la respuesta con respecto a una sintonía individual. En la tabla 1 se muestran los parámetros obtenidos para el lazo 1 (h1 frecuencia bomba) y lazo 2 (h2-válvula). Antes de probar el diseño con la planta real se ha realizado una simulación con el modelo de la planta para comprobar su respuesta. La figura 6 muestra los resultados de simulación. Se ha llevado a cabo un salto de 5 cm en la referencia de cada nivel. Puede apreciarse que ante estos cambios se alcanzan las nuevas referencias, pero sigue apareciendo algo de interacción en el lazo de control contrario, la cual es rechazada rápidamente por su controlador correspondiente.

Tabla 1. Parámetros del control descentralizado.

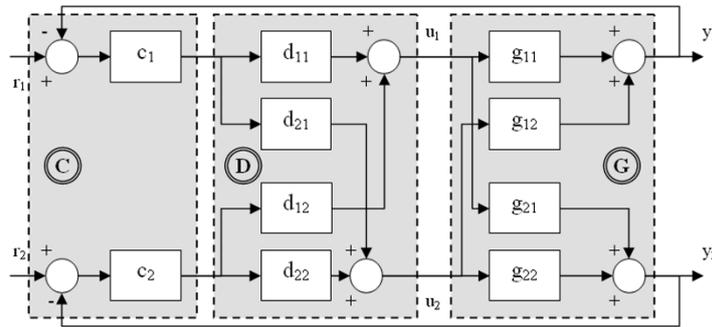
Parámetros	Valor
$K_{p1}$	4.6
$K_{p2}$	4
$T_{i1}$	314
$T_{i2}$	368



6. Simulación del control descentralizado.

### 3.3.2. Control por desacoplo simplificado

Esta metodología combina una red de desacoplo con un control descentralizado (figura 7). La red de desacoplo  $D(s)$  intenta eliminar o reducir la interacción del proceso, de tal manera que el conjunto red desacoplo más planta se comporte como dos sistemas independientes. De esta forma, cada uno de los controladores del control descentralizado se puede sintonizar de manera totalmente independiente (Wang, 2003).



7. Esquema de control descentralizado más red de desacoplo.

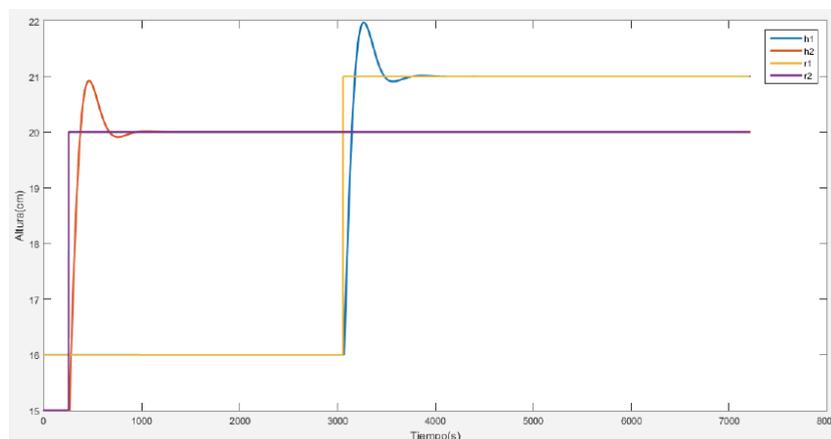
Hay diferentes tipos de redes de desacoplo. En este caso se decidió utilizar el desacoplo simplificado por la simplicidad de sus elementos, ya que los elementos de su diagonal son igual a la unidad (Garrido et al., 2012). La red resultante se muestra en la ec.(4).

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-(654s+0.11)(864s+1)}{2(234639s^2+1160s+1)} \\ \frac{2.4(372926s^2+1335s+1)}{(853s+1)(745s+1.46)} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Tras ello, se ajustan dos controladores PI para los dos procesos desacoplados (planta más desacoplo) usando como especificación un margen de fase de  $60^\circ$  en ambos lazos, de manera similar al caso de la estrategia puramente descentralizada. Los parámetros resultantes aparecen en la tabla 2, y la respuesta en lazo cerrado se muestra en la figura 8. Ahora la respuesta ante los cambios en las referencias es similar al caso descentralizado, pero, debido a la red de desacoplo, ya no aparece interacción en el lazo contrario.

Tabla 2. Parámetros del control descentralizado con desacoplo.

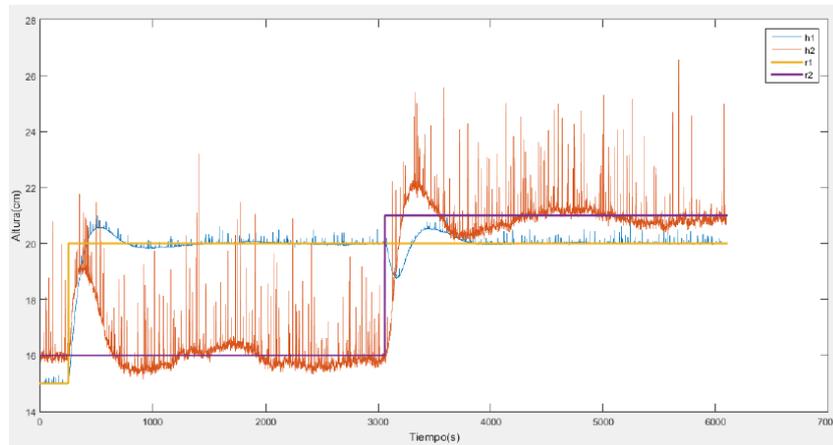
Parámetros	Valor
Kp1	2.2
Kp2	1.9
Ti1	68
Ti2	72



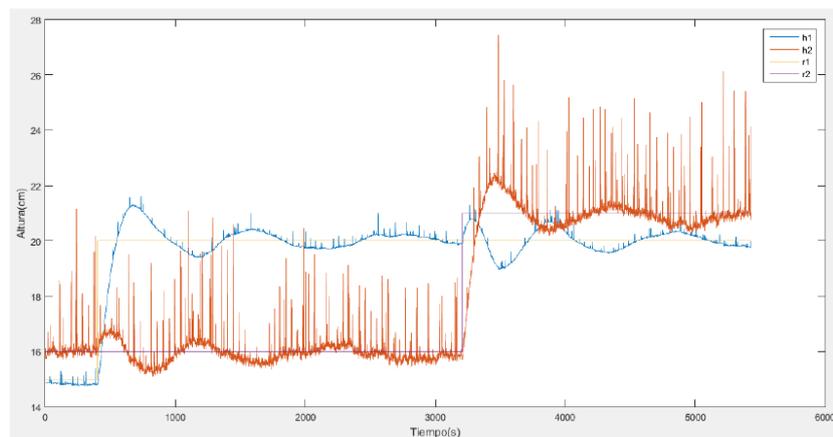
8. Simulación del control descentralizado con desacoplo.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

A continuación, los diseños desarrollados por cada equipo se implementaron y verificaron en el sistema real llevando a cabo una prueba similar a la de simulación, esto es, mismo punto de operación y mismos saltos en las referencias. Los resultados experimentales se muestran en las figuras 9 y 10. En ambos casos, el sistema se comporta cualitativamente de forma similar a la simulación. Bajo el control descentralizado, la respuesta es muy similar. En el caso del desacoplo, sigue apareciendo cierta interacción entre los lazos debido a los errores de modelado y las incertidumbres del sistema; sin embargo, dicha interacción es menor en comparación con el caso descentralizado. En ambos experimentos, también se aprecia una mayor oscilación del nivel h2 con respecto a la simulación. Esto es debido a efectos no lineales de la servoválvula de tres vías que no se tuvieron en cuenta en la fase de modelado.



9. Resultados experimentales del control descentralizado.



10. Resultados experimentales del control descentralizado con desacoplo.

#### 5. CONCLUSIONES

La experiencia de trabajo en equipo presentada en este trabajo y que ha implicado a varios estudiantes del Grado de Ingeniería en Electrónica Industrial ha potenciado la mejora en competencias:

- Mejora de competencias generales como la toma de decisiones, organización y planificación mediante el diseño y construcción de la planta real trabajando en grupo.
- Mejora en competencias específicas de la Automática (conocimiento del modelado, técnicas de control y aplicación a la automatización industrial) mediante la motivación de los estudiantes y una mejor comprensión de las principales etapas en el análisis y diseño de un problema de control: instrumentalización de la planta, modelado del sistema, diseño de la estrategia de control, simulación hasta alcanzar las especificaciones requeridas, implementación del controlador, experimentación real, etc.

Además, de manera más concreta, el trabajo profundiza en aspectos más avanzados de control como los sistemas multivariables y su problemática de interacción entre variables, y el diseño de diferentes estrategias de control multivariables. Finalmente, se ha obtenido una planta experimental operativa que pueda servir para prácticas en futuros cursos de las asignaturas implicadas.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad de Córdoba por la ayuda económica recibida para la financiación parcial de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTROM, K., HÄGGLUND, T. *Advanced PID Control*, North-Carolina, 2006.

BRISTOL, E. H. "On a New Measure of Interaction for Multivariable Processes Control", *IEEE Transactions on Automatic Control* 1966/11, p. 133-134.

GARRIDO, J., VÁZQUEZ, F., MORILLA, F. "Centralized multivariable control by simplified decoupling", *Journal of Process Control* 2012/22, p. 1044-1066.

GARRIDO, J. *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*, Doctoral Thesis, UNED, Madrid, 2012.

SKOGESTAD, S. & POSTLETHWAITE, I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, England, 2005.

VÁZQUEZ, F.; MORILLA, F.; DORMIDO, S., "An iterative method for tuning decentralized PID controllers", in *Proceedings of the 14<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Beijing, China, 1999.

WANG, Q. G. *Decoupling Control*, Berlin-Heidelberg, 2003.