

ENTORNO DE EXPERIMENTACIÓN SOBRE CONTROL DE NIVEL Y CONTROL DE CAUDAL

Fernando Morilla

Dpto de Informática y Automática, Facultad de Ciencias UNED, fmorilla@dia.uned.es

Andrés Isabel

Dpto de Informática y Automática, Facultad de Ciencias UNED, andresisabel@yahoo.es

José Sánchez

Dpto de Informática y Automática, Facultad de Ciencias UNED, jsanchez@dia.uned.es

Resumen

En este trabajo se presenta un entorno de experimentación con 19 configuraciones de control de nivel y control de caudal. El entorno se ha desarrollado con el objetivo de incorporarlo en el laboratorio virtual del Departamento de Informática y Automática de la UNED.

Palabras Clave: control de nivel, control de caudal, control PID, laboratorio virtual.

1 INTRODUCCIÓN

El Departamento de Informática y Automática de la UNED inició hace varios años una línea de investigación sobre el impacto de Internet y de las tecnologías de la información en la enseñanza a distancia, que ha dado lugar a varias publicaciones, entre las que cabe destacar [1], [2], [4] y [6]. Actualmente se encuentra inmerso en un proyecto CICYT que tiene entre sus objetivos la puesta en marcha de un laboratorio virtual y remoto de Automática. Uno de los pilares de este laboratorio son los entornos de experimentación basados en simulación, descritos con amplio detalle en la tesis doctoral de J. Sánchez [5].

Estos entornos se caracterizan por permitir al alumno la interacción dinámica sobre modelos realistas, con una sensación análoga a la que tendría si estuviera en una sala de control y centrará su atención en una parte atómica del proceso. Al mismo tiempo, los entornos están dotados de una cierta flexibilidad para permitir al instructor su adecuación a la explicación y comprensión de conceptos relacionados con la Ingeniería de Control, mediante la correspondiente configuración de experimentos.

En la concepción de los entornos se consideran tres partes perfectamente diferenciadas: a) la ventana de

navegación para localización de los experimentos, b) las interfaces gráficas de experimentación para cada uno de los procesos, c) los modelos dinámicos de los procesos con sus respectivos controladores. Todo ello se acompaña de un conjunto de archivos en formato texto para que el instructor pueda particularizar la ventana de navegación, con el número de experimentos y los objetivos docentes que considere adecuados, y adecuar las interfaces de experimentación a estos objetivos [3] y [5].

Bajo el mismo paradigma de entorno local de experimentación propuesto en la tesis de J. Sánchez, los autores de este trabajo han desarrollado un entorno para experimentación sobre control de nivel y control de caudal, compuesto de: tres modelos dinámicos, tres interfaces gráficas de experimentación (una para cada uno de los procesos que constituyen la base del entorno), tres tipos de archivos de configuración de experimentos, y una ventana de navegación para selección de un total de 19 experimentos con sus correspondientes archivos de configuración.

En la sección 2 se presentan los tres procesos y las 19 configuraciones de control a las que pueden dar lugar. La sección 3 se dedica a justificar cómo se ha abordado la configuración de los experimentos, presentando los modelos estáticos y dinámicos en los que ésta se basa y unas tablas con los parámetros que el instructor debe prefijar y los parámetros que el entorno de experimentación determina de forma automática. También se incluye un ejemplo representativo de parametrización. En la sección 4 se describen los tipos de experimentos que se pueden abordar, haciendo una mención especial al modelo lineal que tiene asociado cada una de las configuraciones de control, con vistas a cómo debería proceder el instructor para diversificar los experimentos y para plantear experiencias de ajuste de los controladores. Por último, en esta misma sección, se muestran dos ejemplos representativos de interfaces de experimentación.

2 LOS PROCESOS Y LAS CONFIGURACIONES DE CONTROL

La base del entorno de experimentación son tres procesos, modelados en SIMULINK, cuyos esquemas se muestran en las figuras 1, 2 y 3. El primer proceso contiene un depósito, el segundo dos depósitos conectados en cascada y el tercero dos depósitos conectados en paralelo.

En el primer proceso, véase figura 1, se distinguen dos caudales de entrada, uno de ellos procedente de una bomba, y dos caudales de salida, uno a través de una válvula y el otro a través de una bomba. En el segundo proceso, véase figura 2, el primer depósito recibe dos caudales, uno de ellos procedente de una bomba, y genera dos caudales de salida, uno a través de una válvula y el otro a través de una bomba, el segundo depósito recibe un caudal de entrada, el procedente del primer depósito a través de la válvula, y genera un caudal de salida a través de una segunda válvula. En el tercer proceso, véase figura 3, los dos depósitos están interconectados a través de una válvula, el primer depósito recibe dos caudales de entrada, uno de ellos procedente de una bomba, y genera dos caudales de salida, uno a través de la válvula de interconexión y el otro a través de una bomba, el segundo depósito recibe un caudal de entrada, el procedente del primer depósito a través de la válvula de interconexión, y provoca un caudal de salida a través de una segunda válvula.

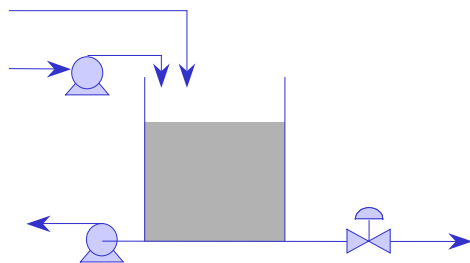


Figura 1: Esquema del proceso con un depósito

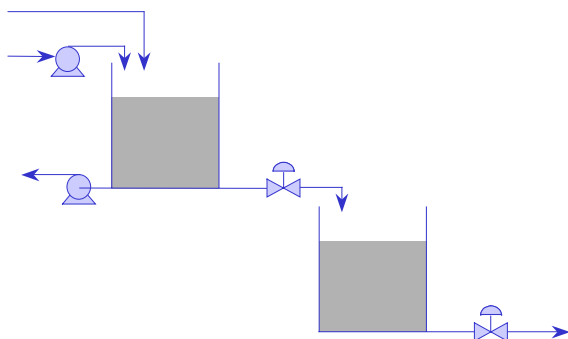


Figura 2: Esquema del proceso con dos depósitos en cascada

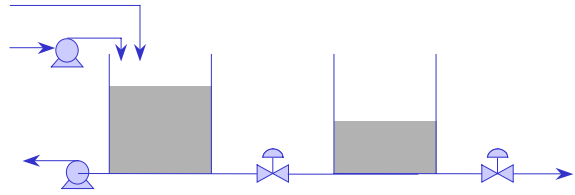


Figura 3: Esquema del proceso con dos depósitos en paralelo

Estos procesos podrían dar lugar a múltiples configuraciones de control, entre las que estarían las estrategias selectivas de nivel o de caudal y las estrategias multivariadas con dos o tres actuadores. Pero incluso, aunque en este trabajo sólo se considere uno de los elementos actuadores (válvula, bomba a la entrada o bomba a la salida), hay diecinueve configuraciones interesantes de control PID monovariante, de nivel (LC) o de caudal (FC), repartidas como se indica a continuación.

Seis configuraciones en el proceso con un depósito:

- LC con la válvula, con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida
- FC con la válvula, con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida

Cuatro configuraciones en el proceso con dos depósitos en cascada:

- LC en el segundo depósito con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida del primer depósito
- FC a la salida del segundo depósito con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida del primer depósito

Nueve configuraciones en el proceso con dos depósitos en paralelo:

- LC en el segundo depósito con la segunda válvula, con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida del primer depósito
- FC a la salida del segundo depósito con la segunda válvula, con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida del primer depósito
- LC en el primer depósito con la segunda válvula, con la bomba a la entrada o con la bomba a la salida del primer depósito

3 LA CONFIGURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

El entorno de experimentación se acompaña con 19 experimentos, uno para cada posible configuración de control. Pero está abierto a la inclusión de nuevos experimentos o a la modificación de los ya existentes. Esta tarea corre a cargo del instructor, modificando los archivos que definen la estructura de

navegación y/o modificando los archivos de parametrización de los experimentos, todos ellos en formato texto. La sintaxis de estos archivos siguen las pautas marcadas por J. Sánchez en [5] y [6].

En la sección 3.3 se presentan los aspectos más relevantes de una propuesta homogénea de parametrización de experimentos para los tres procesos. En esta propuesta se han utilizado los modelos estáticos y los modelos dinámicos que se describen a continuación.

3.1 MODELOS ESTÁTICOS

Los modelos estáticos, dados por las expresiones (1) a (3), se han obtenido por balance de los caudales de entrada y de salida a todos y cada uno de los depósitos, con las siguientes hipótesis:

- 1ª) El caudal de líquido a través de una válvula es directamente proporcional a la raíz cuadrada del nivel de líquido en el depósito y a la apertura de la válvula. Siendo la constante de proporcionalidad, c_v , el parámetro característico de la válvula. Si la válvula sirve de interconexión de dos depósitos, el caudal es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de nivel de líquido en los depósitos.
- 2ª) El caudal de líquido a través de la bomba a la entrada de un depósito es directamente proporcional a la velocidad de la bomba. Siendo la constante de proporcionalidad, k_b , el parámetro característico de la bomba a la entrada.
- 3ª) El caudal de líquido a través de la bomba a la salida de un depósito es directamente proporcional a la velocidad de la bomba y a la raíz cuadrada del nivel de líquido en el depósito. Siendo las constantes de proporcionalidad, b_1 y b_2 , los parámetros característicos de la bomba a la salida.

Utilizan la siguiente nomenclatura:

- a apertura de la válvula
- h nivel de líquido en el depósito
- q_e caudal de entrada al primer (o único) depósito
- v_{be} velocidad de la bomba de entrada
- v_{bs} velocidad de la bomba de salida
- $1, 2$ subíndices para distinguir si el nivel se refiere al primer o al segundo depósito, o si la apertura o el c_v se refiere a la primera o a la segunda válvula
- o subíndice para indicar que se trata del valor de la variable en estado estacionario

Modelo estático del proceso con un depósito.

$$q_{eo} + k_b v_{beo} = a_o c_v \sqrt{h_o} + \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_o} \quad (1)$$

Modelo estático del proceso con dos depósitos en cascada.

$$q_{eo} + k_b v_{beo} = a_{1o} c_{v1} \sqrt{h_{1o}} + \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{1o}} \quad (2)$$

$$a_{1o} c_{v1} \sqrt{h_{1o}} = a_{2o} c_{v2} \sqrt{h_{2o}}$$

Modelo estático del proceso con dos depósitos en paralelo.

$$q_{eo} + k_b v_{be} = a_{1o} c_{v1} \sqrt{h_{1o} - h_{2o}} + \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{1o}} \quad (3)$$

$$a_{1o} c_{v1} \sqrt{h_{1o} - h_{2o}} = a_{2o} c_{v2} \sqrt{h_{2o}}$$

3.2 MODELOS DINÁMICOS

Despreciando la dinámica de los elementos actuadores, planteando las ecuaciones dinámicas que describen el cambio instantáneo de nivel de líquido en todos y cada uno de los depósitos, y linealizándolas en torno a un punto de operación se llega a los modelos dinámicos descritos por las expresiones (4) a (16). Donde intervienen las secciones S de los distintos depósitos y se indican las constantes de tiempo τ características en función de los parámetros del proceso y de las variables en el punto de operación.

Mientras que el modelo dinámico para el proceso con un solo depósito es completo y constituye la base para la obtención de los otros dos modelos. En el modelo de los dos depósitos en cascada se ha supuesto que las dos válvulas actúan como grifos, con una apertura fija, para simplificar las expresiones. Y en el modelo de los dos depósitos en paralelo se ha supuesto que la primera válvula actúa como grifo.

Modelo dinámico del depósito con válvula, bomba a la entrada y bomba a la salida.

$$Q_s(s) = \frac{a c_v}{2 \sqrt{h_o}} H(s) + c_v \sqrt{h_o} A(s) \quad (4)$$

$$H(s) = \frac{\tau}{\tau s + 1} Q_e(s) + k_b \frac{\tau}{\tau s + 1} V_{be}(s) - c_v \sqrt{h_o} \frac{\tau}{\tau s + 1} A(s) - \frac{b_1 v_{bso}}{\sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_o}} \frac{\tau}{\tau s + 1} V_{bs}(s)$$

siendo

$$\tau = \frac{2 S \sqrt{h_o} \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_o}}{a_o c_v \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_o} + b_2 \sqrt{h_o}} \quad (6)$$

Modelo dinámico de los depósitos en cascada con sendos grifos en sus salidas, bomba a la entrada y bomba a la salida del primer depósito.

$$Q_s(s) = \frac{a_2 c_{v2}}{2\sqrt{h_{20}}} H_2(s) \quad (7)$$

$$H_2(s) = \frac{a_1 c_{v1}}{2\sqrt{h_{10}}} \frac{\tau_2}{\tau_2 s + 1} H_1(s) \quad (8)$$

$$H_1(s) = \frac{\tau_1}{S_1 s + 1} Q_c(s) + k_b \frac{\tau_1}{\tau_1 s + 1} V_{bc}(s) - \frac{b_1 v_{bso}}{\sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}}} \frac{\tau_1}{\tau_1 s + 1} V_{bs}(s) \quad (9)$$

siendo

$$\tau_1 = \frac{2S_1 \sqrt{h_{10}} \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}}}{a_1 c_{v1} \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}} + b_2 \sqrt{h_{10}}} \quad (10)$$

$$\tau_2 = \frac{2S_2 \sqrt{h_{20}}}{a_2 c_{v2}} \quad (11)$$

Modelo dinámico de los depósitos interconectados por un grifo, con bomba a la entrada y bomba a la salida del primer depósito y válvula a la salida del segundo depósito

$$Q_s(s) = \frac{a_{20} c_{v2}}{2\sqrt{h_{20}}} H_2(s) + c_{v2} \sqrt{h_{20}} A(s) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(S_1 s + \frac{S_1}{\tau_1} \right) \left(S_2 s + \frac{S_2}{\tau_2} \right) - \frac{a_1^2 c_{v1}^2}{4(h_{10} - h_{20})} \right] H_2(s) = \\ & = \frac{a_1 c_{v1}}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} \left[Q_c(s) + k_b V_{bc}(s) - \frac{b_1 v_{bso}}{\sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}}} V_{bs}(s) \right] - \\ & - c_{v2} \sqrt{h_{20}} \left(S_1 s + \frac{S_1}{\tau_1} \right) A(s) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(S_1 s + \frac{S_1}{\tau_1} \right) \left(S_2 s + \frac{S_2}{\tau_2} \right) - \frac{a_1^2 c_{v1}^2}{4(h_{10} - h_{20})} \right] H_1(s) = \\ & = \left(S_2 s + \frac{S_2}{\tau_2} \right) \left[Q_c(s) + k_b V_{bc}(s) - \frac{b_1 v_{bso}}{\sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}}} V_{bs}(s) \right] - \\ & - \frac{a_1 c_{v1} c_{v2} \sqrt{h_{20}}}{2\sqrt{h_{10} - h_{20}}} A(s) \end{aligned} \quad (14)$$

siendo

$$\tau_1 = \frac{2S_1 \sqrt{h_{10} - h_{20}} \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}}}{a_1 c_{v1} \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_{10}} + b_2 \sqrt{h_{10} - h_{20}}} \quad (15)$$

$$\tau_2 = \frac{2S_2 \sqrt{h_{10} - h_{20}} \sqrt{h_{20}}}{a_{20} c_{v2} \sqrt{h_{10} - h_{20}} + a_1 c_{v1} \sqrt{h_{20}}} \quad (16)$$

3.3 PARAMETRIZACIÓN

La base de la parametrización de los experimentos son las condiciones de operación del proceso, dejando que el entorno de experimentación determine de forma automática aquellos parámetros característicos del depósito (o depósitos), de los elementos actuadores y del controlador que permitan trabajar en esas condiciones. Las condiciones básicas de operación en el proceso con un depósito son: el nivel en el depósito, la apertura de la válvula, el caudal de entrada y la velocidad de la bomba cuando ésta se utilice. De forma análoga, las condiciones básicas de operación en el proceso con dos depósitos son: el nivel en ambos depósitos, las aperturas de ambas válvulas, el caudal de entrada y la velocidad de la bomba.

En el proceso con un depósito, además de las condiciones básicas de operación, el instructor está obligado a decidir si existe o no bomba y si ésta está situada a la entrada o a la salida del depósito. Si no existe bomba, el control se llevará a cabo con la válvula, pero si existe bomba, ésta será el actuador y por tanto la válvula hará el papel de grifo. Si la bomba está a la entrada, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal total de entrada llega a través de la bomba. Y si la bomba está a la salida, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal de entrada abandona el depósito a través de la bomba. El único parámetro físico que está obligado a elegir es la sección del depósito, salvo que lo quiera elegir de forma indirecta, fijando en su lugar la constante de tiempo del proceso. No obstante si la bomba está a la salida también debe decidir qué razón b_2/b_1 (comprendida entre 0 y 1) desea mantener en los parámetros de la bomba. Mediante esta razón, el instructor puede forzar a que el caudal evacuado por la bomba sea casi independiente del nivel de líquido en el depósito o a todo lo contrario. Por último el instructor está obligado a elegir si desea realizar control de nivel o de caudal.

En el proceso con dos depósitos en cascada, el instructor está obligado a decidir si la bomba está situada a la entrada o a la salida del primer depósito. Si la bomba está a la entrada, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal total de entrada llega a través de la bomba. Y si la bomba está a la salida, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal de entrada abandona el primer depósito a través de la bomba. Los únicos parámetros físicos que está obligado a elegir son las secciones de los depósitos, salvo que las quiera elegir de forma indirecta, fijando en su lugar las constantes de tiempo. Pero si la bomba está a la salida también debe decidir qué razón b_2/b_1 desea mantener en los

parámetros de la bomba. Por último el instructor está obligado a elegir si desea realizar control de nivel o de caudal en el segundo depósito. No se contemplan las opciones de control en el primer depósito pues este tipo de experimentos se pueden realizar con el proceso de un depósito.

En el proceso con dos depósitos en paralelo, el instructor está obligado a decidir si existe o no bomba y si ésta está situada a la entrada o a la salida del primer depósito. Si no existe bomba, el control se llevará a cabo con la válvula a la salida del segundo depósito, pero si existe bomba, ésta será el actuador y por tanto la válvula a la salida del segundo depósito hará el papel de grifo. Si la bomba está a la entrada, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal total de entrada llega a través de la bomba. Y si la bomba está a la salida, el instructor está obligado a indicar qué porcentaje del caudal de entrada abandona el primer depósito a través de la bomba. Los únicos parámetros físicos que está obligado a elegir son las secciones de los depósitos, salvo que las quiera elegir de forma indirecta, fijando en su lugar las constantes de tiempo del proceso. No obstante si la bomba está a la salida también debe decidir qué relación b_2/b_1 (comprendida entre 0 y 1) desea mantener en los parámetros de la bomba. Por último el instructor está obligado a elegir si desea realizar control de nivel en el primer o en el segundo depósito o si por el contrario desea realizar control de caudal.

Todas las variables básicas de operación (niveles, aperturas, caudales de entrada y velocidades de bomba) tienen su respectivo rango, delimitado por un valor mínimo y un valor máximo, que, aunque no están recogidos en las tablas para evitar que éstas fueran muy grandes, el instructor elige inicialmente. Estos rangos también son importantes en la configuración de experimentos, pues como parte de ella se ha incluido la determinación automática de las restricciones de operación del lazo de control, que el instructor puede solicitar que se haga o no. Estas restricciones se determinan en función del rango completo asignado a la variable manipulada (la apertura si el control es con la válvula o la velocidad de la bomba en caso contrario) y en función del tipo de control elegido. Las restricciones informan sobre los cambios de la variable de perturbación (el caudal de entrada) que se pueden rechazar, y sobre las consignas (nivel o caudal de salida) del lazo de control que se pueden alcanzar.

Las tablas 1, 2 y 3 resumen el proceso de parametrización para los tres procesos utilizados en el entorno de experimentación, haciendo distinción de cuál es el elemento actuador (válvula, bomba a la entrada o bomba a la salida) pues existen ligeras diferencias en cada caso. En la columna etiquetada

“Parámetros prefijados” se recogen tanto las variables como los parámetros que el instructor debe elegir, mientras que en la columna etiquetada “Parámetros calculados” se recogen los parámetros que determina el entorno de experimentación para completar la configuración del experimento.

Actuador	Parámetros prefijados	Parámetros calculados
Válvula	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial (h_o) - Apertura inicial (a_o) - Caudal de entrada (q_{eo}) - Sección del depósito (S) o cte de tiempo (τ) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v de la válvula - Sección S del depósito si se ha prefijado la cte de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para el controlador de nivel
Bomba a la entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial (h_o) - Apertura del grifo (a_o) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bo}) - Caudal de entrada total - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Sección del depósito (S) o cte de tiempo (τ) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v del grifo - k_b de la bomba - Sección S del depósito si se ha prefijado la cte de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para el controlador de nivel y el controlador de caudal
Bomba a la salida	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial (h_o) - Apertura del grifo (a_o) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bo}) - Caudal de entrada (q_{eo}) - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Razón entre los parámetros de la bomba - Sección del depósito (S) o cte de tiempo (τ) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v del grifo - Parámetros (b_1 y b_2) de la bomba - Sección S del depósito si se ha prefijado la cte de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para el controlador de nivel y el controlador de caudal

Tabla 1: Parametrización de experimentos con un depósito.

3.4 EJEMPLO DE PARAMETRIZACIÓN

A continuación se muestra, como ejemplo representativo de parametrización, la secuencia de pasos que se siguen para determinar los parámetros en el caso del proceso con un depósito si el control es con la bomba a la salida.

1) Todo el caudal de entrada tiene que salir del depósito, una parte a través del grifo y el resto a través de la bomba. Por tanto, de los datos (caudal de entrada q_{eo} y porcentaje x a través de la bomba) se determina el caudal de salida a través del grifo q_{so} y el caudal a través de la bomba q_{bo}

$$q_{so} = \frac{100-x}{100} q_{eo} \quad ; \quad q_{bo} = \frac{x}{100} q_{eo}$$

2) Conocido el caudal a través del grifo q_{so} y los datos (apertura del grifo a_o y nivel de líquido h_o) se determina el c_v del grifo

$$c_v = \frac{q_{so}}{a_o \sqrt{h_o}}$$

3) Conocido el caudal a través de la bomba q_{bo} y los datos (velocidad de la bomba v_{bso} , nivel de líquido h_o y razón r entre los parámetros de la bomba) se determinan los parámetros b_1 y b_2 de la bomba

$$b_1 = \frac{q_{bo}^2}{v_{bso}^2 + r h_o} \quad ; \quad b_2 = r b_1$$

4) Si el instructor ha fijado el valor de la constante de tiempo τ , el valor de la sección S del depósito se despeja de la expresión (6), pues todas las variables y parámetros que intervienen en ella son ya conocidos

Actuador	Parámetros prefijados	Parámetros calculados
Bomba a la entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles iniciales en ambos depósitos (h_{1o} y h_{2o}) - Aperturas de los grifos (a_1 y a_2) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bso}) - Caudal de entrada total - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Secciones de los depósitos (S_1 y S_2) o ctes de tiempo (τ_1 y τ_2) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v de los grifos - k_b de la bomba - Secciones de los depósitos si se han prefijado la ctes de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para el controlador de nivel y el controlador de caudal
Bomba a la salida	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles iniciales en ambos depósitos (h_{1o} y h_{2o}) - Aperturas de los grifos (a_1 y a_2) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bso}) - Caudal de entrada (q_{eo}) - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Razón entre los parámetros de la bomba - Secciones de los depósitos (S_1 y S_2) o ctes de tiempo (τ_1 y τ_2) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v de los grifos - Parámetros (b_1 y b_2) de la bomba - Secciones de los depósitos si se han prefijado la ctes de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para el controlador de nivel y el controlador de caudal

Tabla 2: Parametrización de experimentos con dos depósitos en cascada.

5) La única forma de rechazar las variaciones del caudal de entrada es mediante la velocidad de la bomba. Si el caudal de entrada disminuye (aumenta) la velocidad de la bomba debe disminuir (aumentar) para conseguir que el caudal de salida del depósito siga siendo el mismo y que el nivel permanezca en su punto de consigna. Por tanto el caudal mínimo q_{emin} que se puede admitir en este proceso es la suma del caudal de salida a través del grifo y el que puede atravesar la bomba cuando su velocidad es nula. Mientras que el caudal máximo admisible a la

entrada del depósito q_{emax} coincidirá con la suma del caudal de salida a través del grifo y el que puede atravesar la bomba cuando su velocidad es máxima

v_{bso}

$$q_{emin} = q_{so} + \sqrt{b_2 h_o} \quad ; \quad q_{emax} = q_{so} + \sqrt{b_1 v_{bso}^2 + b_2 h_o}$$

Actuador	Parámetros prefijados	Parámetros calculados
Válvula	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial en el primer depósito (h_{1o}) - Nivel inicial en el segundo depósito ($h_{2o} < h_{1o}$) - Aperturas del grifo y de la válvula (a_1 y a_{2o}) - Caudal de entrada (q_{eo}) - Secciones de los depósitos (S_1 y S_2) o ctes de tiempo (τ_1 y τ_2) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v del grifo y de la válvula - Secciones de los depósitos si se han prefijado la ctes de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para los controladores de nivel
Bomba a la entrada	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial en el primer depósito (h_{1o}) - Nivel inicial en el segundo depósito ($h_{2o} < h_{1o}$) - Aperturas de los grifos (a_{1o} y a_{2o}) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bso}) - Caudal de entrada total - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Secciones de los depósitos (S_1 y S_2) o ctes de tiempo (τ_1 y τ_2) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v de los grifos - k_b de la bomba - Secciones de los depósitos si se han prefijado la ctes de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para los controladores de nivel y el controlador de caudal
Bomba a la salida	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel inicial en el primer depósito (h_{1o}) - Nivel inicial en el segundo depósito ($h_{2o} < h_{1o}$) - Aperturas de los grifos (a_{1o} y a_{2o}) - Velocidad inicial de la bomba (v_{bso}) - Caudal de entrada (q_{eo}) - Porcentaje de caudal a través de la bomba - Razón entre los parámetros de la bomba - Secciones de los depósitos (S_1 y S_2) o ctes de tiempo (τ_1 y τ_2) del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - c_v de los grifos - Parámetros (b_1 y b_2) de la bomba - Secciones de los depósitos si se han prefijado la ctes de tiempo - Rango para el caudal de entrada - Consignas para los controladores de nivel y el controlador de caudal

Tabla 3: Parametrización de experimentos con dos depósitos en paralelo.

6) Si el caudal de entrada permanece constante, la disminución (el aumento) de la consigna de nivel llevará implícita un aumento (una disminución) de la velocidad de la bomba. Por tanto la menor consigna de nivel $s_{ph_{min}}$ que se puede conseguir coincidirá con la situación en la que la bomba ha alcanzado su

velocidad máxima, salvo que el nivel de líquido hubiera ya alcanzado el mínimo valor físico posible (0) o el fijado por el instructor (h_{\min}). Y de la misma forma, la mayor consigna de nivel sph_{\max} que se puede conseguir coincidirá con la situación de bomba parada, salvo que este valor esté por encima de la altura del depósito (h_{\max}) fijada por el instructor, que es el límite físico al máximo nivel de líquido sin que se produzca rebose. En definitiva la determinación de sph_{\min} y de sph_{\max} obliga a resolver las dos ecuaciones siguientes imponiendo los límites físicos [h_{\min} h_{\max}] previamente fijados por el instructor

$$q_{eo} = a_o c_v \sqrt{sph_{\min}} + \sqrt{b_1 v_{bsmax}^2 + b_2 sph_{\min}}$$

$$q_{eo} = a_o c_v \sqrt{sph_{\max}} + \sqrt{b_2 sph_{\max}}$$

7) Las consignas de caudal spq_{\min} y spq_{\max} están directamente relacionadas con las consignas de nivel determinadas en el paso anterior mediante las expresiones siguientes

$$spq_{\min} = a_o c_v \sqrt{sph_{\min}} \quad ; \quad spq_{\max} = a_o c_v \sqrt{sph_{\max}}$$

4 TIPOS DE EXPERIMENTOS

Las constantes de tiempo de los modelos dinámicos descritos en la sección 3.2 juegan un papel importante en la parametrización de los experimentos, pues es la forma más cómoda que tiene el instructor de fijar o de conocer la principal característica dinámica de los procesos. Y por tanto el camino para fijar o dejarse asesorar sobre otro tipo de parámetros como son la duración de la simulación, el periodo de muestreo (el intervalo de tiempo que utilizará el controlador entre cada cálculo de la señal de control) y el periodo de grabación de datos (el intervalo de tiempo entre las muestras que el entorno de experimentación grabará en un archivo de datos).

Pero los modelos dinámicos son además una fuente inagotable para la definición de experimentos, desde los que están relacionados con el conocimiento cualitativo del proceso [5] y de su respuesta dinámica, a los que se pueden plantear sobre registros de datos con ayuda de algún método de estimación paramétrica, y a todos los relacionados con la selección y ajuste del controlador [2]. La tabla 4 muestra una clasificación de los seis tipos de modelos paramétricos a los que dan lugar las 19 configuraciones de control del entorno de experimentación, con sus respectivas funciones de transferencia entre la variable manipulada y la variable controlada. En la columna de las configuraciones se han utilizado las siguientes siglas: LC y FC para indicar el tipo de control (nivel o caudal); 1 ó 2 para indicar el primer o segundo depósito; V, BE o BS para indicar el tipo de actuador

(válvula, bomba a la entrada o bomba a la salida); y DC o DP para indicar si los depósitos están en cascada o en paralelo.

Modelo	Función de transferencia	Configuraciones
1	$\frac{K}{\tau s + 1}$	LCV, LCBE, FCBE, LCBS, FCBS
2	$\frac{K s}{\tau s + 1}$	FCV
3	$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	LC2BEDC, FCBEDC, LC2BSDC, FCBSDC
4	$\frac{K}{\frac{\tau_1 \tau_2}{p} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{p} s + 1}$	LC1VDP, LC2BEDP, FCBEDP, LC2BSDP, FCBSDP
5	$\frac{K s (\tau_3 s + 1)}{\frac{\tau_1 \tau_2}{p} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{p} s + 1}$	FCVDP
6	$\frac{K (\tau_1 s + 1)}{\frac{\tau_1 \tau_2}{p} s^2 + \frac{\tau_1 + \tau_2}{p} s + 1}$	LC2VDP, LC1BEDP, LC1BSDP

Tabla 4: Funciones de transferencia entre la variable manipulada y la variable controlada.

Como información adicional a la tabla 4 se sabe que el parámetro p de los modelos 4, 5 y 6 es siempre menor que la unidad, y por tanto que sus polos son siempre reales. Luego, a la vista de la tabla 4 se puede concluir que las respuesta escalones de las configuraciones de control en lazo abierto serán monótonas crecientes salvo que se trate de una configuración de control de caudal con la válvula, pues en ese caso el correspondiente modelo, 2 ó 5, tiene un cero en el origen y su respuesta escalón presentará un cambio instantáneo, recuperando de forma suave el estacionario inicial.

Cualquiera de los seis modelos, con independencia del valor concreto de sus parámetros, se puede controlar con un PI, por tanto este tipo de controlador será el más utilizado en el entorno de experimentación. Fijando unos parámetros de control, será muy fácil programar experimentos de regulación o de servo (seguimiento de consignas) con excepción de las configuraciones de control de caudal con la válvula que sólo se prestan a experimentos de regulación. Estos experimentos pueden servir para ajustar el controlador por prueba y error, pero lógicamente el conocimiento de los seis modelos lineales y de sus parámetros permitirá al instructor poder plantear el ajuste del controlador en

otros entornos de diseño y aplicar los métodos que considere más oportunos en cada momento. Por ello se ha considerado oportuno que como consecuencia de la parametrización, el instructor reciba información de la función de transferencia que debería utilizar para ajustar el controlador, y unos parámetros de control para el controlador PI. Es decir, el entorno de experimentación tiene incorporada la sintonía automática de un controlador PI para todas y cada una de las configuraciones de control. Pero al facilitar el modelo utilizado, está permitiendo que el instructor pueda probar otros ajustes u otros métodos de diseño.

El entorno de experimentación usa internamente tres interfaces gráficas, una para cada uno de los procesos, que se presentan al alumno particularizadas según la configuración que se haya hecho del experimento. Las figuras 4 y 5 son dos ejemplos representativos de estas interfaces. La primera muestra la interfaz de experimentación para el proceso con un depósito cuando se ha programado un experimento de control de nivel con la válvula. Y la segunda muestra la interfaz de experimentación cuando se ha programado un experimento sobre los dos depósitos en cascada, con la configuración de control de nivel en el segundo depósito mediante la bomba de salida del primer depósito.

La parte central de todas las interfaces está ocupada por el esquema del proceso, con animación gráfica del nivel (de los niveles) de líquido en el depósito (los depósitos), con los indicadores numéricos habituales, con el controlador de nivel, y con los objetos interactivos que el instructor ha decidido presentar para interactuar con las posibles perturbaciones. En el caso de la figura 4, sólo está permitido interactuar sobre el caudal de entrada, y en caso de la figura 5, está permitido interactuar sobre el caudal de entrada y sobre la apertura de la válvula del segundo depósito. En la parte superior hay indicación numérica del tiempo transcurrido en la simulación y están los botones para comenzar/continuar el experimento, arrancar de nuevo, y seleccionar al gráfico con todas las variables del proceso. En la parte inferior hay dos registros gráficos para mostrar las dos variables más importantes del experimento, la señal de control y la variable controlada, pero la selección puede ir cambiando conforme avanza el experimento.

Sobre los escalados de nivel de las figuras 4 y 5 aparecen unas marcas en rojo que delimitan las consignas alcanzables de nivel, el entorno de experimentación las determina de forma automática pero el instructor tiene la opción de mostrarlas u ocultarlas en función del tipo de experimento que quiera plantear al alumno. Los registros que se muestran corresponden a la duración completa del

experimento en ambos casos para un cambio en la consigna de nivel, con los parámetros de control determinados automáticamente por el entorno de experimentación.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un entorno de experimentación con:

- 3 tipos de procesos que combinan depósitos, válvulas y bombas; el más elemental con un depósito, otro con dos depósitos en cascada, y el tercero con dos depósitos en paralelo.
- 19 configuraciones de control PID, de las cuales 11 corresponden a control de nivel, 6 a control de caudal y 2 a regulación de caudal.

El entorno, que está diseñado con el objetivo de cubrir los contenidos docentes básicos del control de procesos, es configurable por el instructor con el fin de atender experimentos relacionados con:

- El estudio cualitativo del proceso y de su dinámica.
- La obtención de registros para la aplicación de técnicas de estimación paramétrica.
- El diseño y prueba de controladores PID sobre seis tipos de modelos.

El entorno aún sólo se puede utilizar en modo local, pero en el futuro se incorporará en el laboratorio virtual del Departamento de Informática y Automática de la UNED, para su uso remoto a través de Internet.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del Plan de Promoción de la Investigación UNED 2000 y por la CICYT a través del proyecto DPI 2001-1012.

Referencias

- [1] Dormido, S., J. Sánchez, F. Morilla (2000). "Laboratorios virtuales y remotos para la práctica a distancia de la Automática", Sesión Plenaria, Actas de las XXI Jornadas de Automática, Sevilla 18, 19 y 20 de septiembre.
- [2] Morilla, F., A. W. Fernández, S. Dormido Canto (2001). "Control systems análisis & design server", *Workshop on Internet Based Control Education IBCE'01*, Madrid, December 12-14.
- [3] Sánchez, J., F. Morilla, S. Dormido, J. Aranda and P. Ruipérez (1999). Curso sobre Control de Procesos. Manual del Instructor. Dpto. de Informática y Automática, UNED. Incluye CD-Rom.

- [4] Sánchez, J., F. Morilla, S. Dormido, J. Aranda and P. Ruipérez (2000). "Conceptual learning of control by Java-based simulations", *IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE'2000)*. Gold Coast (Australia).
- [5] Sánchez, J. (2001). Un nuevo enfoque metodológico para la enseñanza a distancia de asignaturas experimentales: análisis, diseño y

desarrollo de un laboratorio virtual y remoto para el estudio de la Automática a través de Internet. Tesis doctoral, UNED.

- [6] Sánchez, J., F. Morilla, S. Dormido, J. Aranda and P. Ruipérez (2002). Virtual and Remote Control Labs Using Java: A Qualitative Approach. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, no. 2, pp. 8-20.

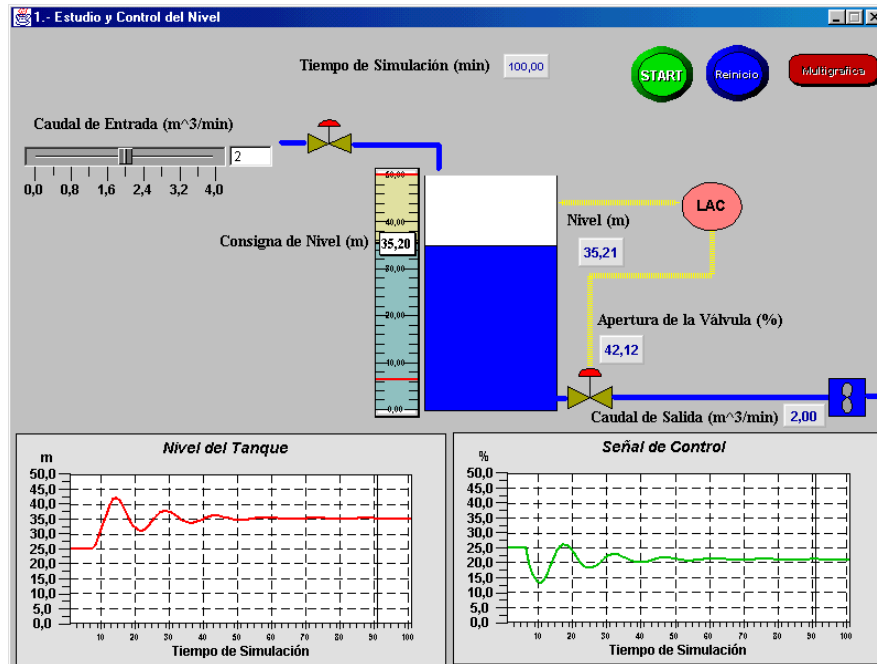


Figura 4: Ejemplo de interfaz de experimentación para el proceso con un depósito.

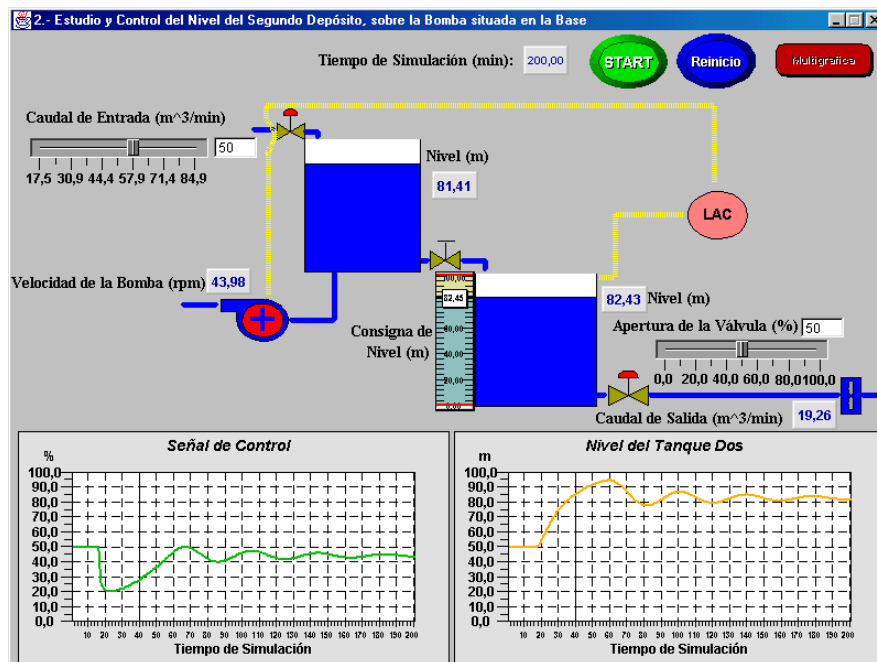


Figura 5: Ejemplo de interfaz de experimentación para el proceso con dos depósitos en cascada.