

## Práctica 1. Control de un proceso industrial

---



**Informática Industrial y Robótica**  
**Grado en Ingeniería Informática**  
**Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica (TEP-197)**

# Práctica 1.

## Control de un proceso industrial

### Introducción

En esta práctica se van a revisar conceptos básicos de modelado, simulación y diseño de controladores en tiempo continuo, tomando como planta objeto de estudio un sistema de control de nivel de un tanque.

Como es habitual, los pasos que se seguirán en el diseño del sistema de control son:

- Identificar las variables de proceso que van a ser controladas y el grado de precisión requerido.
- Identificar las propiedades del proceso que van a ser manipuladas por los elementos finales de control para mantener a las variables controladas dentro de los límites requeridos.
- Seleccionar el sistema de medida apropiado para que cada variable sea controlada.
- Seleccionar los elementos de control final necesarios para proporcionar la manipulación requerida.
- Seleccionar los elementos restantes del sistema de control, teniendo en cuenta factores tales como conexiones, cableado, etc.
- Desarrollar un modelo matemático que describa el funcionamiento del sistema y comparar los resultados obtenidos con el modelo con los resultados reales en planta.
- Diseñar controladores adecuados para cumplir las especificaciones y analizar el funcionamiento del sistema de control cuando se aplica al modelo matemático, considerando factores tales como las respuestas a cambios en el valor de referencia, perturbaciones, velocidad de respuesta, etc.
- Modificar el sistema de control para conseguir el funcionamiento del sistema requerido.
- Construir el propio sistema de control.
- Probar el sistema para asegurarse de que cumple con los requisitos de rendimiento requeridos

### Descripción de la planta: Maqueta de los 4 tanques

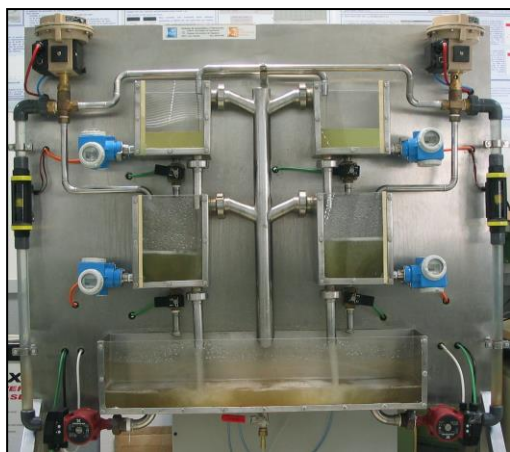
La planta de 4 tanques del laboratorio, cuyo esquema se muestra en la Figura 1, constituye un excelente campo de ensayo de estrategias de control multivariable a nivel industrial (nótese que todos los actuadores y sensores que implementa son además de amplio uso en entornos químicos e industriales en general).

Los cuatro tanques de la planta tienen una capacidad de 8 litros y están montados en un panel de acero inoxidable de 140x115cm, distribuidos dos en la mitad superior y los otros dos en la mitad inferior. El nivel en cada tanque se mide por medio de unos transmisores de presión Endress & Hauser PCM 731. El líquido se impulsa por medio de dos bombas Grundfos UPE 25-40, equipadas con módulos de expansión Grundfos MC 40/60, que son regulables mediante una señal analógica. La planta dispone de dos válvulas neumáticas de tres vías Samson 3226, de apertura regulable con posicionadores Samson 3760, que determinan la distribución del caudal entre los tanques de la diagonal correspondiente. Por último, cuenta con electroválvulas todo/nada SMC, que se encuentran instaladas en la base de cada tanque y cuyo propósito es generar perturbaciones. Las secciones de descarga inferiores han sido configuradas a  $a_1=a_2= 2.1382 \text{ cm}^2$  y las superiores valen  $a_3=a_4= 0.9503 \text{ cm}^2$ . Las secciones de los tanques tienen un valor  $A_i=389.16 \text{ cm}^2$

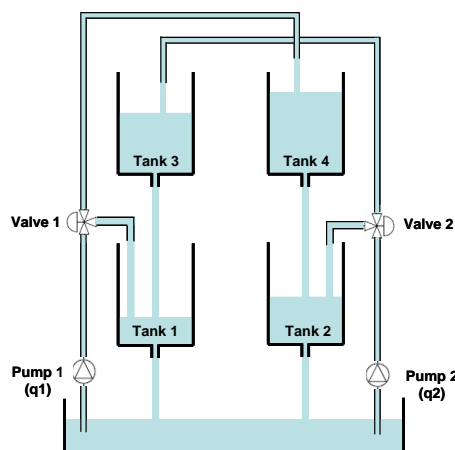
Las dos señales de control que se utilizan son las tensiones (0-10 V) que se envían desde el computador de control a las bombas, cuya dinámica no-lineal se ha linealizado usando un control interno en cascada, de forma que se obtiene el caudal demandado actuando sobre la tensión de alimentación. El objetivo de esta planta es controlar la altura de los dos tanques inferiores actuando sobre las bombas. Las válvulas de tres vías permiten fraccionar el caudal que va por cada una de las ramas, de modo que parte del caudal circula hacia uno de los depósitos inferiores y el resto hacia el superior de la banda contraria. De esa forma, según sea la posición que se escoge de las válvulas de tres vías, se puede hacer que el sistema sea más o menos complejo de controlar. Intuitivamente, parece más sencillo controlar el sistema cuando la fracción de caudal que circula por las ramas

inferiores es mayor a la que circula por las ramas superiores, que hacen de perturbaciones para la altura de los tanques inferiores (caso en que el comportamiento es de fase mínima). En el caso contrario, el sistema es de fase no mínima y resulta muy complejo de controlar.

Aunque el objetivo principal de esta planta es el desarrollo y estudio de estrategias de control multivariable, gracias a su gran flexibilidad en esta práctica se va a utilizar para modelar y controlar la altura de un tanque.



(a) Planta Real



(b) Esquema de la planta

Figura 1. Planta de los cuatro tanques

El diagrama de bloques que representa el sistema de control de la maqueta viene dado en la figura 2.

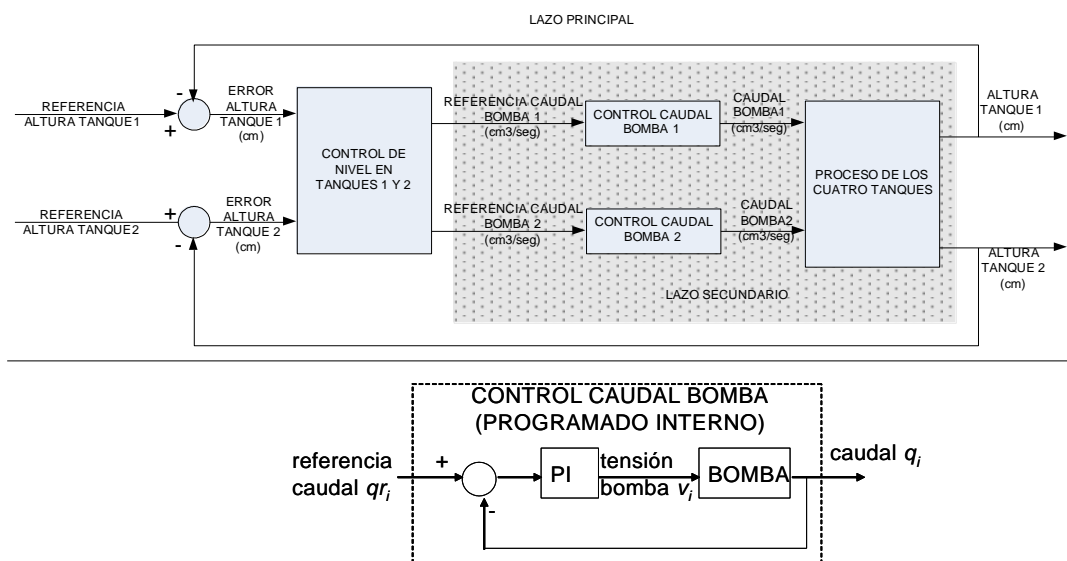


Figura 2. Diagrama de control

## Modelado y control de nivel de un único tanque

Para trabajar con un solo tanque, en este caso el tanque 1, hay que posicionar una de las válvulas de tres vías para que todo el fluido caiga únicamente en el tanque inferior, mientras que la otra válvula se sitúa para que únicamente pase por el tanque superior, tanque 3. De esa forma, se podrá controlar la altura de un tanque mediante la manipulación del caudal de la bomba asociada,  $q_1$ , y se podrán introducir perturbaciones realizando descargas desde el tanque superior, que se ha llenado utilizando la otra bomba,  $q_2$ .

El modelo de este supuesto práctico vendría dado por (ecuación diferencial no lineal en el dominio del tiempo):

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{1}{A_1} q_1 \\ \frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{1}{A_3} q_2 \end{cases}$$

Donde  $A_i$  es el área de sección del tanque  $i$ ,  $a_i$  representa el área del orificio de salida y  $h_i$  el nivel del agua del tanque  $i$ , respectivamente,  $g$  denota la aceleración de la gravedad.

Para un punto de operación estacionario caracterizado por  $h_i^0$  y  $q_i^0$ , a partir del modelo no lineal previo, se deduce que:

$$\begin{cases} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} = \frac{1}{A_1} q_1^0 + \frac{1}{A_1} q_2^0 \\ a_3 \sqrt{2gh_3^0} = q_2^0 \end{cases}$$

De esta forma el modelo linealizado (ver Figura 4), y una vez aplicada la Transformada de Laplace, (ver Nota 1) vendría dado por la siguiente función de transferencia (ver Nota 2):

$$H_1(s) = \underbrace{\frac{c_1}{T_1s+1}}_{G_1(s)} Q_1(s) + \underbrace{\frac{c_1}{(T_3s+1)(T_1s+1)}}_{G_3(s)} Q_2(s)$$

donde

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}} \text{ y } c_i = \frac{T_i}{A_i}$$

Este modelo linealizado proporciona mucha flexibilidad en el diseño. Si no se tienen en consideración perturbaciones sobre el sistema procedentes del tanque superior, la función de transferencia que relaciona el caudal de la bomba 1 con la altura del tanque 1 es  $G_1(s)$ , que es una función de transferencia de primer orden para la cual es sencillo diseñar un controlador tipo PI. Si se utiliza el tanque 3 como fuente de perturbaciones, la influencia de dicho tanque sobre el nivel del tanque 1 viene dada por  $G_3(s)$ . La siguiente figura muestra un esquema del modelo. Hay que resaltar que los modelos lineales considerados sólo son válidos cuando se trabaja entorno a un punto de trabajo, por lo que habrá que llevar al sistema de forma manual (actuando sobre las bombas respectivas) al punto de trabajo dado por  $(q_i^0, h_i^0)$ .

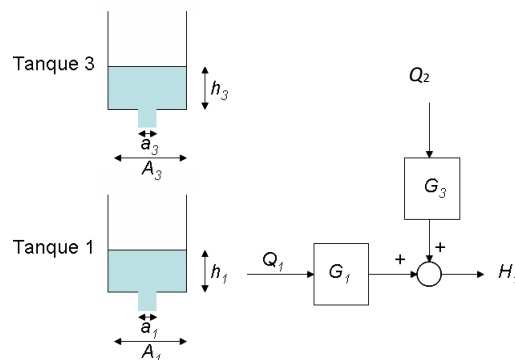
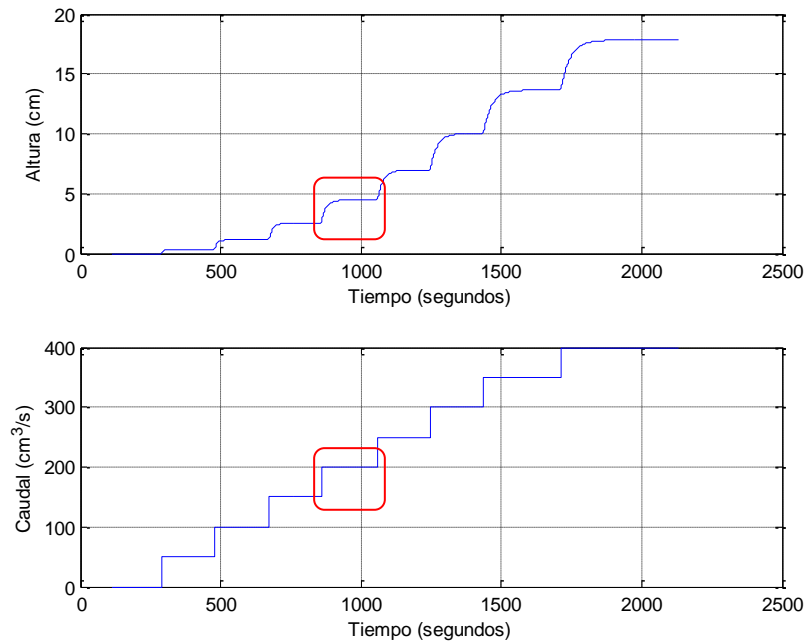
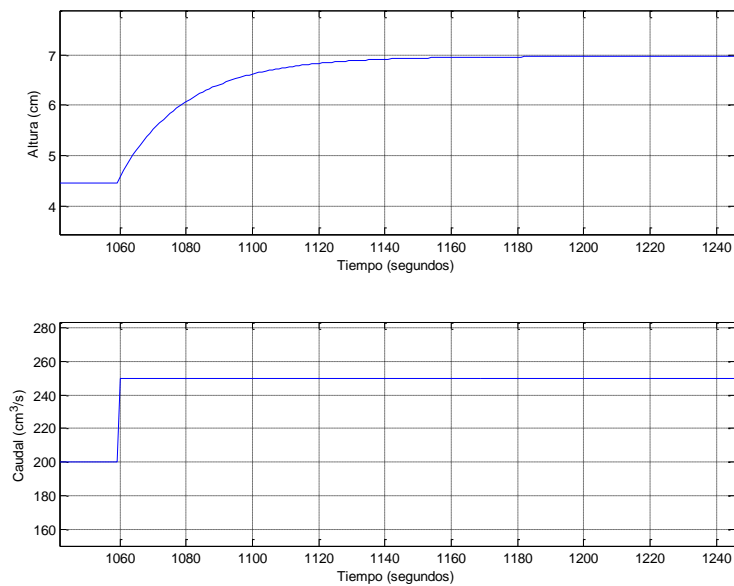


Figura 3. Diagrama del control de la altura de un único tanque



(a) Comportamiento no lineal del tanque



(b) Comportamiento lineal del tanque en torno a un punto de operación  $h^1_0=4.5$  cm y  $q^1_0=200$  cm³/s

Figura 4. Simulación de altura del tanque frente a cambios en escalón asumiendo  $q_2=0$



#### Nota 1. Transformada y dominio de Laplace

Como hemos visto, en el estudio de procesos es necesario considerar modelos dinámicos, es decir, modelos de comportamiento variable respecto al tiempo. Esto trae como consecuencia el uso de ecuaciones diferenciales respecto al tiempo para representar matemáticamente el comportamiento de un proceso. Estas ecuaciones diferenciales tienen la forma (por ejemplo, para un circuito eléctrico):

$$e_i(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

La transformada de Laplace es una de las herramientas matemáticas utilizadas para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales. La transformada de Laplace convierte la ecuación diferencial en una ecuación algebraica en  $s$  (operador de Laplace). Transformada de Laplace del modelo del circuito eléctrico anterior:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

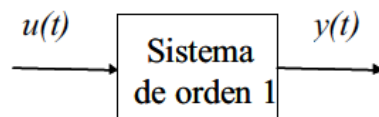


#### Nota 2. Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema representa la relación que existe entre la transformada de Laplace de la salida de dicho sistema con respecto a la transformada de Laplace de la entrada.

$$\begin{array}{c} U(s) \longrightarrow \boxed{G(s)} \longrightarrow Y(s) \end{array} \quad Y(s) = U(s) \cdot G(s) \Rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Para el caso de un sistema con una ecuación diferencial de primer orden (derivada de orden uno), la transformada de Laplace y su correspondiente función de transferencia es:



$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t) \Rightarrow \text{Laplace} \Rightarrow \tau s Y(s) + Y(s) = kU(s) \Rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{1 + \tau s}$$

donde al denominador de la función de transferencia se le llama **Polinomio característico**, a las raíces de dicho denominador se las llama **polos del sistema**, a las raíces del numerador se las llama **ceros del sistema** y el grado del polinomio característico se le llama **orden del sistema**. Nótese que analizando dicho polinomio característico se puede determinar la estabilidad del sistema.

## Laboratorio virtual y remoto de la planta

En esta sección se describe el entorno desarrollado para la planta de dos tanques. La aplicación tiene dos partes bien diferenciadas (ver Figura 5). En la parte de la izquierda (que se denominará a partir de ahora ventana de representación) se puede observar un esquema del sistema. En la parte de la derecha (que se denominará ventana de evolución) se muestra la evolución de las principales variables del proceso.

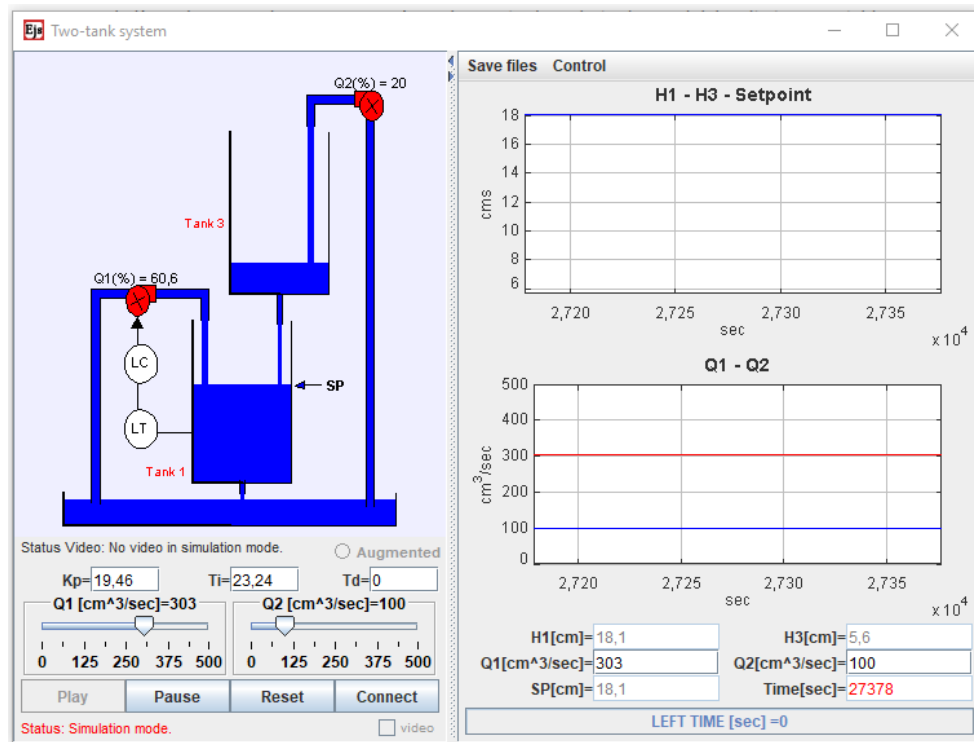


Figura 5. El sistema de dos tanques.

### Ventana de representación del proceso

En la parte superior de la ventana de representación se puede observar un esquema del sistema de los dos tanques, cuyo nivel de los tanques puede variar en función de la simulación que se está llevando a cabo. En la parte inferior hay un panel con una serie de botones que se van a utilizar para actuar sobre el sistema, y que serán descritos con más detalle a continuación.

La planta se puede visualizar de dos formas diferentes:

- *En modo simulación.* La planta se muestra tal y como aparece en la Figura 5. Cuando se trabaja en este modo, el sistema opera localmente y evoluciona en base a un modelo matemático del proceso.
- *En modo remoto (usando la conexión por Video).* Se muestra la planta real que está en el laboratorio remoto (ver la Figura 6). Este modo de funcionamiento se muestra la imagen tomada por vídeo de la planta real que se encuentra en el laboratorio.



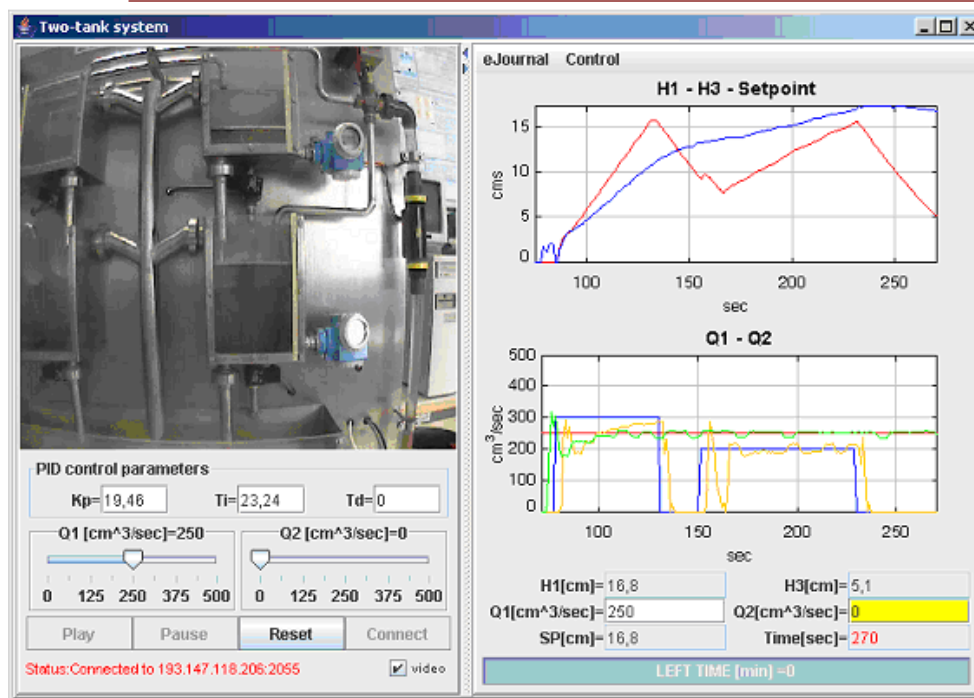


Figura 6. Vista general de la planta real utilizando la conexión por video.

Por debajo de la visualización del sistema se encuentran disponibles varios campos para cambiar una serie de parámetros. Estos parámetros están representados por un conjunto de sliders (o barras de desplazamiento) y campos de texto, así como una serie de botones que permiten definir diversas situaciones en la dinámica del proceso (por ejemplo, realizar un cambio en el valor de las bombas o modificar los parámetros del controlador PID).

Concretamente existen tres campos numéricos que permiten variar los parámetros del controlador. Se puede por tanto variar el valor de la ganancia proporcional ( $K_p$ ), el tiempo integral ( $T_i$ ) y el tiempo derivativo ( $T_d$ ). Inicialmente tendrán asignados unos valores que permiten operar con el sistema de una forma razonable. Por otro lado, existen dos sliders que permiten modificar los valores de los caudales de las bombas cuando el sistema se encuentra en modo manual. De la misma forma, cuando el sistema se encuentra en modo automático, es posible modificar el valor del caudal de la bomba 2 que actúa como perturbación.

Debajo de estos parámetros existe una nueva línea de botones que permiten al usuario controlar las principales operaciones relativas a la evolución del sistema. En concreto puede realizar las acciones siguientes:

- **Play.** Sirve para iniciar la simulación.
- **Pause.** Sirve para establecer una pausa en la simulación.
- **Reset.** Sirve para resetear la simulación que se esté mostrando e iniciar de nuevo la simulación desde 0.
- **Connect.** Si no se presiona este botón, al pulsar el Play la aplicación funciona en modo simulación, por lo tanto, se está ejecutando la aplicación como laboratorio virtual. Si se presiona, permite la conexión con la planta en modo remoto (utilizando el sistema real que se encuentra en el laboratorio) una vez superado el control de acceso (véase la Figura 13). Las claves de acceso se facilitarán cuando se permita el acceso a la planta a un determinado estudiante. Es importante notar también que cuando se está trabajando en modo remoto los botones de Play, Pause y Reset no están activos.





Figura 7. Control de acceso al modo remoto.

- Disconnect. Durante el tiempo que la planta está trabajando en modo remoto, el botón Connect se sustituye por el de Disconnect que sirve para parar el funcionamiento del laboratorio y regresar a modo simulación.

### Ventana de evolución del sistema

A la derecha de la ventana de representación aparece lo que se conoce como ventana de evolución del sistema en la que se muestra como su propio nombre indica la evolución de las principales variables del proceso (ver Figura 5).

#### Menú de archivos de la ventana de evolución

##### Manejando el *Save files*

En la parte superior izquierda de la ventana de evolución del sistema hay una opción denominada *Save files*. Si se pulsa aparece un menú desplegable con diferentes opciones:

- Save Graph. Permite guardar una imagen de la evolución de las variables controladas en formato .gif., es decir, guarda una imagen de las dos gráficas que se encuentran bajo el menú y del valor de los parámetros que están registrado, cuya información se encuentra debajo de las gráficas en la ventana de evolución. Una vez guardada esta información se puede visualizar en la sección de archivos privados tal y como se comentó en el correspondiente apartado de la sección anterior.
- Start Record. Comienza a grabar en un fichero .m (script con variables del ensayo) los parámetros de los controladores y los valores de la evolución temporal de las variables controladas y manipuladas, es decir, las alturas de los tanques (H1, H3) y los estados de funcionamiento de las bombas (Q1, Q2), junto con el vector de tiempos del ensayo (t). De esta forma, exportando a MATLAB esta información se pueden representar las gráficas que se deseen relativas a los experimentos que se están realizando.
- Stop Record. Se activa una vez que la grabación ha comenzado, hasta entonces está deshabilitado. Y cuando se selecciona esta opción se detiene la grabación de datos, finalizando la generación del fichero.



**Nota 3:** Se recomienda planificar la utilización de la opción de grabación (Start Record y Stop Record) para guardar sólo la ventana de datos de interés. De esta forma, se evita la carga de ficheros excesivamente grandes que puedan bloquear momentáneamente la aplicación.

Cada vez que se va a guardar una información en la opción *Save files*, tanto si es una figura como si es un fichero MATLAB, se pregunta al usuario si desea realizar esta acción, indicándole el nombre con el que se va a guardar y permitiéndole la opción de cambiarlo si lo desea.

#### Control del sistema

En el mismo menú de archivos donde está la opción de *Save files* (parte superior de la ventana de evolución) se encuentra la opción *Control*, cuyo menú desplegable permite realizar dos posibles acciones sobre el sistema. Dichas acciones son las siguientes:

- Manual. Permite que el sistema trabaje en modo manual, es decir, el usuario debe ajustar el caudal de las bombas que suministran líquido al sistema, para obtener las consignas de nivel deseadas en los tanques.

- Automatic. Permite que el sistema pase a estar controlado por el controlador PID. A partir de este momento el caudal de la bomba 1 será gobernado por el controlador y el caudal de la bomba 2 podrá ser modificado de manera manual por el usuario.

#### Gráficas de la ventana de evolución

Debajo del menú de archivos de la ventana se encuentran dos gráficas en las que se recoge la evolución de las variables más importantes del proceso. En la gráfica superior se representan las medidas de los niveles de los tanques H1, en azul, y H3, en rojo, junto con la consigna deseada para el tanque T1 representada en verde. En la gráfica inferior se representa la evolución de las variables manipuladas, es decir de las bombas 1 y 2. La primera de ellas se representa en rojo y la segunda en azul.

Debajo de ambas gráficas se muestran un conjunto de campos numéricos que indican el valor de las distintas variables de interés del proceso. En concreto están disponibles los siguientes campos, descritos de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo:

- H1 y H3: muestran los valores de las alturas de los tanques en cada momento expresadas en centímetros.
- Q1 y Q2: muestran los valores de las variables manipuladas en cada momento, expresas en  $\text{cm}^3/\text{s}$ . Si se está trabajando en modo Manual, los valores de estas variables serán campos editables, para poder ser modificados por el usuario.
- SP: que muestra el valor de la consigna deseada para la variable controlada, por tanto, está también expresada en centímetros. Este campo se convierte en campo editable, o sea modificable, cuando esté seleccionada la opción *Automatic*.
- Time: muestra el instante de tiempo en el que se encuentra la simulación en cada momento, expresada en segundos.

Con el objetivo de acelerar la simulación, cuando se está en modo simulación, el tiempo de muestreo es de 5 s. Cuando se trabaja en modo remoto, la planta está muestreada cada 1 s, para poder visualizar bien la respuesta.



#### Nota 3. Recomendaciones Importantes.

Recuerde que cuando esté trabajando en modo remoto estará operando con las plantas reales ubicadas en el laboratorio de nuestra Universidad, y por lo tanto, existirán ciertas cuestiones relacionadas con la **seguridad** de las mismas durante su manipulación. En este sentido, a continuación, se describen un conjunto de recomendaciones o sugerencias a tener en consideración:

- **Planificación del experimento.** Una correcta planificación del experimento a realizar antes de conectarse a la planta real (modo remoto) optimizará su ejecución y el tiempo ocupado para dicha tarea.
- **Cómo actuar ante un bloqueo de la aplicación.** Si durante la ejecución de algún experimento (modo virtual o remoto) la aplicación sufriera algún tipo de bloqueo, utilizar el botón **Reset** para iniciar nuevamente el trabajo.
- **Seguridad del equipamiento en el laboratorio.** Procure trabajar en los niveles nominales de actuación (voltaje aplicado a los actuadores) mencionados en la sección de experimentos del guión de prácticas. La aplicación prolongada de un voltaje próximo a los niveles de saturación del actuador podría dañar el equipamiento electrónico ubicado en el laboratorio de la Universidad.