



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Ejercicio N° 1 EL42D: Control de Sistemas. (Semestre Primavera 2008)

Profesora: Dra. Doris Sáez H.
Ayudante: Camila Troncoso Solar.
(camtroncoso@gmail.cl)

Diseño de Estrategias de Control para un Estanque

a) Objetivos

Diseñar e implementar controladores PI analógicos y digitales, para luego comparar los resultados teóricos implementados mediante simulaciones, con los resultados experimentales en la planta real.

b) Instrucciones

Para el desarrollo del Ejercicio 1 se deben realizar los siguientes tópicos:

- 1) Trabajar en equipo según los roles asignados.
- 2) Desarrollar bitácoras individuales de máximo ½ página, que se entregan vía U-cursos.
- 3) Seguir el siguiente calendario de actividades.

Actividad	Fecha de entrega	Lugar de entrega
Bitácora 1	Viernes 29 de Agosto, 12:00	U-Cursos
Bitácora 2	Viernes 5 de Septiembre, 12:00	U-Cursos
Entrega Informe 1: Diseño de controladores, partes e) y f).	Lunes 8 de Septiembre, 12:00	Secretaría Docente 1° piso.
Parte experimental (Sesión de Laboratorio donde se realiza parte g)).	Semana 7 (Entre el 08 y 14 de Septiembre)	Laboratorio de Automática
Entrega Informe 2: Parte experimental.	Dos días después de realizada la experiencia, 14:00	Secretaría Docente 1° piso.
Presentaciones	Martes 23 de Septiembre, 14:15	Sala de Clases

4) Pauta de evaluación:

Actividad	% Nota Ejercicio 1
Informe 1	60%
Trabajo de Laboratorio	30% { 5% Auto-Evaluación 10% Co-Evaluación 15% Evaluación Docente
Informe 2	10%
Presentaciones *sólo para los grupos que presentan.	*15% Exposición *15% VI. Parte experimental (Laboratorio).



fcfm

Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

c) Introducción

Controles de nivel para tanques de almacenamiento de agua

Los controles del nivel máximo del agua en un tanque de almacenamiento tienen la doble función de garantizar la seguridad de las estructuras y de evitar el desperdicio de agua. El control del nivel máximo se hace mediante un sensor de nivel conectado ya sea mecánica o electrónicamente, con la operación de una válvula a la entrada del tanque. Como todo mecanismo siempre puede fallar en el momento de su operación, es importante que el tanque disponga de un sistema de seguridad de funcionamiento totalmente automático como por ejemplo un vertedero libre, eventualmente conectado con una alarma.

El control del **nivel mínimo** del agua tiene la función de garantizar el buen funcionamiento del sistema evitando la entrada de aire en la tubería que se encuentra aguas abajo del tanque, como por ejemplo en la red de distribución de agua, o en la succión de la o las bombas. En este caso también el sistema está compuesto por un sensor de nivel conectado a una alarma, para que el operador intervenga, o en sistemas más sofisticados, donde el sensor actúa directamente, para aumentar la entrada de agua al tanque.

Control de nivel en un embalse

El control de nivel de un embalse es fundamental para garantizar la seguridad de la presa y de las poblaciones situadas en el valle, aguas abajo. El control del nivel máximo del agua en los embalses se puede efectuar mediante compuertas operadas según reglas de operación bien precisas y generalmente testeadas en modelos reducidos antes de la construcción del embalse, para que los incrementos bruscos de caudal aguas abajo no erosionen las márgenes ni causen problemas a las estructuras allí existentes.



Figura 1: Vertedero de una presa



d) Estanque de Nivel

La planta que posee los estanques de nivel consiste en un sistema hidráulico en el que se encuentran conectados un estanque cónico y un estanque cuadrado, junto con un estanque de recirculación y una bomba hidráulica (figura 2). La bomba es accionada por un variador de frecuencia de corriente de excitación. Esta bomba controla el flujo de salida del estanque de recirculación, permitiendo también, junto a las válvulas respectivas, regular los flujos de entrada y salida de los estanques cónico y cuadrado.



Figura 2: Planta de nivel del Laboratorio de Automática.

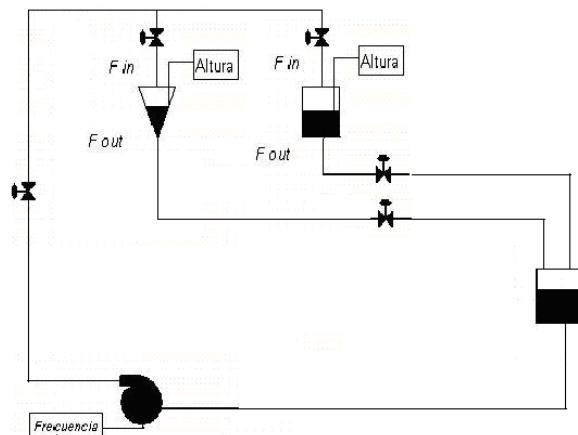


Figura 3: Diagrama de la planta de nivel.



La bomba impulsa agua desde el estanque de recirculación hacia el estanque cónico o cuadrado, según la configuración de la planta como muestra la figura 3, generando un flujo de entrada en el estanque correspondiente.

Los estanques cónico y cuadrado poseen una abertura en la parte inferior para que se produzca un flujo de salida de agua por gravitación. Este flujo es captado por cañerías y devuelto al estanque de recirculación, formando un circuito cerrado de flujo de agua.



Figura 5: Estanque cónico.



Figura 6: Estanque cuadrado.

La función de transferencia que relaciona el flujo impulsado [cm^3/s]¹ y la frecuencia de excitación de la bomba [Hz] (que tiene una velocidad máxima de giro de 2900 rpm) está dada por:

$$\frac{F_{in}(s)}{f(s)} = \frac{1.4308}{s + 0.15468}$$

En este trabajo se diseñarán estrategias de control para el sistema antes mencionado, que permitan controlar el nivel de agua de ambos estanques, por separado. El nivel de agua (en cm.) de los estanques cónico y cuadrado es medido mediante un sensor ultra sónico, mientras que el nivel del estanque de recirculación es medido mediante un sensor de presión.

¹ Considere todos los modelos medidos en el sistema de unidades CGS.



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Antes de comenzar su análisis deben recordar que todos los parámetros están expresados en el sistema CGS.

e) Diseño de controladores para el estanque cónico

Suponga que se cierran las válvulas de entrada y salida del estanque cuadrado, es decir sólo circulará agua por el estanque cónico.

La ecuación diferencial que rige el nivel de agua en el estanque cónico está dada por:

$$\frac{dh}{dt} = a \frac{F_{in} - F_{out}}{h^2}$$

Donde $a = 0.4687$ es una constante que depende del ángulo entre el eje de simetría del cono y su superficie. La ecuación diferencial anterior corresponde a una ecuación de conservación de flujo.

Dada la forma del estanque, la función de transferencia es no lineal. Para facilitar el cálculo de los controladores es conveniente linealizar la función de transferencia en torno a un punto de operación. Para la linealización, la válvula neumática de flujo de entrada se encuentra completamente abierta. Es decir, el flujo que entra al estanque cónico es exactamente el que la bomba impulsa.

Si se realiza la linealización en torno a $h = 20[\text{cm}]$, bajo el supuesto que el flujo de salida es cercano a cero (válvula que regula el flujo de salida se encuentra casi cerrada), se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{H(s)}{F_{in}(s)} = \frac{0.0011035}{s}$$

Con esta función, junto con la función de transferencia del actuador, es posible obtener la ecuación característica del sistema retroalimentado correspondiente, considerando que el sensor es ideal, y de ese modo, obtener los controladores necesarios para el estanque, dados los requerimientos.

En esta parte del ejercicio se solicita diseñar distintos controladores de nivel para el estanque cónico. Se desea que el sistema retroalimentado siga la siguiente referencia $r_1(t)$:



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

$$r_1(t) = \begin{cases} 20[cm] & 0 \leq t \leq 200 \\ 10[cm] & 200 \leq t \leq 400 \\ 30[cm] & 400 \leq t \leq 600 \end{cases}$$

• Actividades a realizar:

- 1) Realice un diagrama de bloques del sistema indicando posibles perturbaciones del sistema (al menos 2). También indique cuales son las variables controlada y manipulada, e identifique el actuador.
- 2) Obtenga la función de transferencia del sistema "estanque Cónico – Bomba". Indique explícitamente todos los supuestos utilizados.
- 3) Calcular analíticamente la ganancia K_p de un **controlador proporcional continuo** tal que el sistema tenga un tiempo de estabilización de al menos 50[s]. Estime analíticamente el sobre nivel máximo resultante.
- 4) Utilizando la función de transferencia continua obtenida en el paso 2, diseñe analíticamente las ganancias de un **controlador PI continuo** para el estanque cónico. El sistema controlado debe tener un tiempo de estabilización de 80[s] y una sobre oscilación del 8%.
- 5) Simule la respuesta en lazo cerrado de la planta para ambos controladores (partes 3 y 4), usando Matlab Simulink y la referencia $r_1(t)$ propuesta. Grafique la variable controlada y la variable manipulada. Justifique y comente los resultados de sus simulaciones.

f) Diseño de Controladores para el Estanque Cuadrado

Suponga ahora que se cierran las válvulas de entrada y salida del estanque cónico, es decir sólo circulará agua por el estanque cuadrado.

El nivel de agua en el estanque cuadrado (en cm.) es medido mediante un sensor ultrasónico. Para sus cálculos considere que este sensor es ideal.

El estanque posee un área basal $A_1 = 1681[cm^2]$. Recibe un flujo de agua entrante dependiente de la velocidad de giro de la bomba y el flujo de salida es cercano a cero, por lo que puede considerarse que es constante e independiente de las diferencias de



presión existentes. La función de transferencia del sistema puede obtenerse a partir de la aplicación de la ley de conservación de la energía.

En esta segunda parte del ejercicio se solicita diseñar distintos controladores de nivel para el estanque cuadrado. Se desea que el sistema retroalimentado siga la siguiente referencia $r_2(t)$:

$$r_2(t) = \begin{cases} 25[cm] & 0[s] \leq t \leq 200[s] \\ 45[cm] & 200[s] < t \leq 400[s] \end{cases}$$

● **Actividades a realizar:**

- 1) Realice un diagrama de bloques del sistema. Indique cuales son las variables controlada y manipulada, identifique el actuador e indique al menos 2 posibles perturbaciones de la planta.
- 2) Plantee las ecuaciones fenomenológicas del sistema utilizando conservación de flujo. Obtenga la función de transferencia del sistema "estanque cuadrado-bomba". Posteriormente discretice la función de transferencia obtenida utilizando un periodo de muestreo de $T=3[s]$ y un retenedor de orden cero. Indique explícitamente todos los supuestos utilizados.
- 3) Calcular analíticamente la ganancia K_p de un **controlador proporcional continuo** tal que el sistema tenga un tiempo de estabilización de al menos $50[s]$. Estime analíticamente el sobre nivel máximo resultante.
- 4) Diseñe un **controlador PI continuo** que tenga un tiempo de estabilización de $80[s]$ y una sobre oscilación del 8%. Simule la respuesta de lazo cerrado de la planta usando Matlab Simulink. Interprete los resultados gráficos de la salida y de la acción de control del sistema (variable controlada y variable manipulada). Pruebe el modelo para un cambio de referencia dado por $r_2(t)$.
- 5) Diseñe un **controlador PI discreto** a partir de la función de transferencia discretizada de la parte 2), que tenga un tiempo de estabilización de $80[s]$ y una sobre oscilación del 8%. Simule utilizando la misma referencia de la parte anterior (parte 4) y compare los resultados obtenidos entre el controlador análogo y el controlador digital. Comente sus resultados.
- 6) Simule la respuesta en lazo cerrado de la planta, con el controlador proporcional de la parte 3) y compare con el controlador PI continuo.



Justifique sus resultados. Grafique la variable controlada y la variable manipulada.

- 7) Observe el comportamiento de los controladores antes diseñados frente a una perturbación en el flujo de salida del sistema ocurrida a los 250 segundos como muestra la función $F_{out}(t)$. Utilice una referencia de 25[cm] y grafique la variable controlada y la variable manipulada. Compare y explique sus resultados.

$$F_{out}(t) = \begin{cases} 0[cm^3 / s] & 0[s] \leq t \leq 250[s] \\ 500[cm^3 / s] & 250[s] < t \leq 400[s] \end{cases}$$

g) Control del estanque cuadrado del Laboratorio de Automática

En esta actividad se implementarán los controladores obtenidos para el estanque cuadrado en el laboratorio en la planta real.

- 1) Implemente el **controlador P** diseñado para el estanque cuadrado. Utilice una referencia de 10[cm] y un tiempo de simulación de 400 [s].
- 2) Realice una prueba del **controlador PI discreto** (tiempo de simulación = 400 [s]) utilizando la referencia $r_3(t)$ siguiente:

$$r_3(t) = \begin{cases} 10[cm] & 0[s] \leq t \leq 200[s] \\ 15[cm] & 200[s] < t \leq 400[s] \end{cases}$$

- 3) Realice una prueba del **controlador PI continuo**, pero aplicando la perturbación de la parte 7), es decir luego de aprox. 250 [s] abra la válvula del flujo de salida hasta tener un flujo de salida considerable (como referencia usar el mismo que $F_{out}(t)$). Utilice un tiempo de simulación de 500[s] y una referencia de 10 [cm].
- 4) Explique y comente sus resultados experimentales.

Obs.: Recuerde llevar un pendrive al laboratorio para que pueda almacenar sus datos.