

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

Ing. Diego S. Benítez M.
Ingeniero en ELECTRONICA Y
CONTROL
AICO
AUTOMATIZACION INDUSTRIAL Y
CONTROL

Ing. Patricio Burbano R.
MSc. SYSTEMS AND CONTROL
PROFESOR PRINCIPAL
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN:

Se diseña y construye un prototipo para control de nivel de líquidos, formado por tres tanques acoplados, que permite experimentar con sistemas de primero, segundo o tercer orden, dependiendo del número de tanques que se utilice.

El problema básico es regular el nivel en uno de los tanques variando la velocidad de una bomba de circulación. La interconexión entre los tanques se realiza mediante válvulas de control de flujo que permiten variar el flujo entre los tanques, el nivel en el tanque de control es sentido mediante un transductor de presión de estado sólido.

El control puede realizarse de manera analógica y digital; y, es una introducción práctica al diseño, aplicación y operación de los controladores PID.

Finalmente, se presenta una aplicación práctica en el modelo de la Cámara de Interconexión entre las centrales Hidroeléctricas San Francisco y Agoyán.

ABSTRACT:

A level control prototype is designed and build. It is formed by tree coupled tanks that allow experiment with first, second or third order systems depending on the number of tanks that they will be used.

The basic control problem is to regulate the liquid level in one of the tanks by varing the speed of the circulating pump.

The tanks are interconnected by flow control valves that may be used to vary the flow between the tanks.

The level into the control tank is sensed by a piezoresistive pressure type depth transducer.

The control can be analogue or digital and it is a practical introduction into the design, operation and application of PID controllers.

Finally, a practical application is show in the model of the interconecction chamber between San Francisco and Agoyan Hydraulic Electric Power Plants.

1. INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo fue diseñar y construir un prototipo para realizar el control de nivel de líquidos tanto de manera analógica como digital, orientado a su utilización en prácticas de control automático sobre un prototipo a escala que representa un sistema real.

El equipo didáctico construido permite realizar un estudio práctico de las diferentes técnicas de control aplicadas a un sistema real.

El equipo en sí, consta de un prototipo de nivel de líquidos que constituye la planta, formada por tres tanques acoplados, para representar sistemas de primero, segundo y tercer orden, sobre los cuales se va a trabajar, y un módulo de control principal dividido en dos submódulos, analógico y digital, que es el encargado de realizar el control sobre la planta, a fin de cumplir con los requerimientos asignados al sistema.

Una de las características del equipo es poseer fuentes de alimentación propias tanto para la circuitería de control como para el circuito de potencia, lo que le da cierta autonomía de trabajo. Sin embargo, para realizar el control digital del simulador se requiere de un sistema de adquisición de datos y de un computador que deben ser conectados al módulo principal de control.

La parte de control contiene dos tipos de controladores electrónicos exclusivamente. Un control de tipo análogo que cuenta con un controlador PID y un controlador de tipo digital que se sirve de un sistema de adquisición y salida de datos, el cual está conectado a un computador digital en donde se realiza el control por software.

El sistema de control es con realimentación. La señal de realimentación al sistema de control proviene de un sensor de presión diferencial de estado sólido que sensa indirectamente el nivel de líquido en el último tanque del prototipo, para controlar la variable de salida del lazo de control, que en este caso será la altura o nivel del líquido en el último tanque. Se utilizará un sistema de bombeo de líquido dentro del tanque, como lo muestran las figuras 1.1. y 1.2.

2. MODELO Y PRUEBA DE SIMULACION.

Considérese a la planta como un sistema de primer orden, (un solo tanque) figura 2.1, en estas condiciones las ecuaciones dinámicas que describen al sistema son:

$$Q_i = Q_a - Q_o \quad (2.1)$$

donde:

Q_i = caudal de entrada al tanque [m^3/s]
 Q_o = caudal de salida del tanque [m^3/s]
 Q_a = caudal almacenado en el tanque [m^3/s]

El caudal de salida del tanque viene dado por:

$$Q_o = K_v \cdot \sqrt{hI} \quad (2.2)$$

donde:

hI = altura del agua en el tanque [m]
 K_v = constante de la válvula [m^3/h]

Se considera que la válvula de desfogue se encuentra al ras de la base del tanque.

El volumen almacenado dentro del tanque puede representarse por:

$$Q_a = \frac{dV_a}{dt} = A \cdot \frac{dhI}{dt} = A \cdot h\dot{I} \quad (2.3)$$

donde:

V_a = volumen del tanque ocupado por el agua [m^3]
 A = area transversal del tanque [m^2]

Reemplazando las ecuaciones (2.2) y (2.3) en la ecuación (2.1) se tiene:

$$Q_i = A \cdot h\dot{I} + K_v \cdot \sqrt{hI} \quad (2.4)$$

El segundo término de la ecuación 2.4 no es un término lineal, para linealizarlo, se debe derivar esta expresión y evaluarla en el punto de operación ($H1$ = altura de trabajo = 16 cm.).

Linealizando la ecuación 2.4 se tiene:

$$\frac{Q_i}{A} = h\dot{I} + \frac{K_v}{2 \cdot A \cdot \sqrt{H1}} \cdot hI \quad (2.5)$$

Aplicando la transformada de Laplace a esta última ecuación queda:

$$\frac{H1(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_2}{k_1 + s} \quad (2.6)$$

donde:

$k_1 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H1})$

$k_2 = 1/A$

$H1$ = altura de trabajo = 16 cm.

K_v = constante de la válvula [m^3/h]

Realizando pruebas de simulación con la ecuación 2.6, se determinó que las dimensiones convenientes que debe tener cada tanque para que el prototipo trabaje adecuadamente (constantes de tiempo no muy grandes) son:

A = sección transversal del tanque 144 cm^2 (12 cm * 12 cm)

h = altura de cada tanque 40 cm

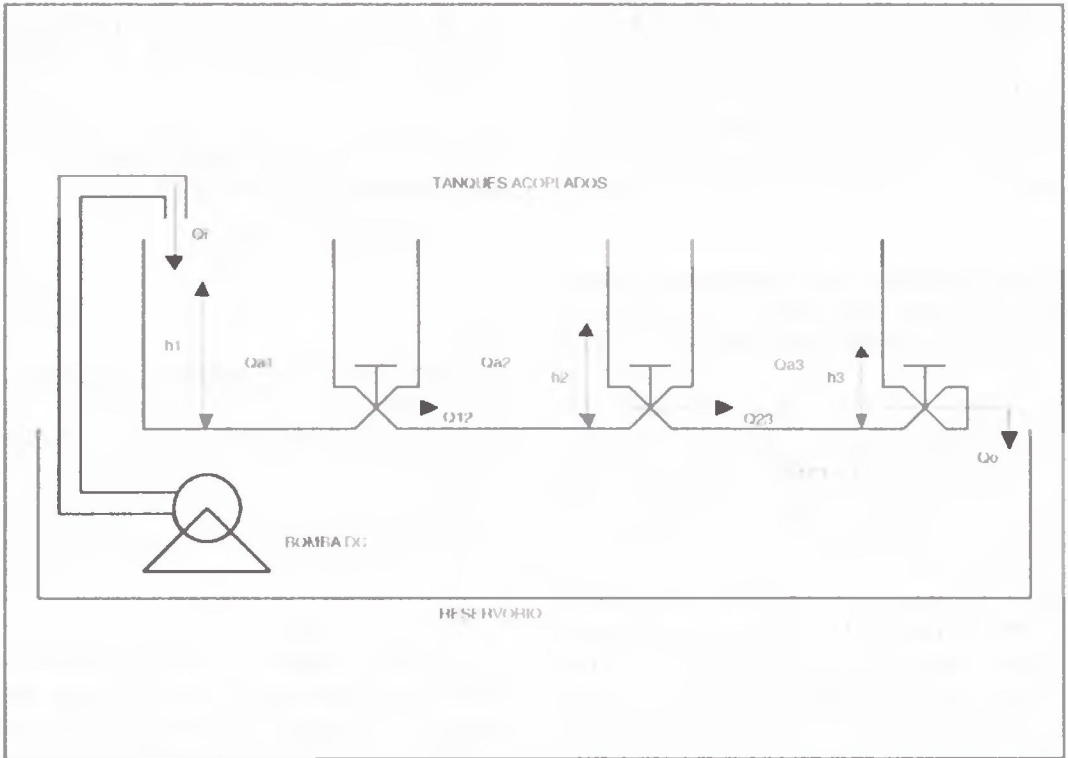


FIG. 1.1 PROTOTIPO DE TANQUES ACOPLADOS.



FIG. 1.2 FOTOGRAFIA DEL CONTROL DE NIVEL COMPUTARIZADO DEL PROTOTIPO.

Se consideran válvulas de control de flujo del tipo de aguja con un $K_v=0.9288 \text{ [m}^3/\text{h]}$.

El punto de trabajo en el último tanque debe ser aproximadamente 16 cm. Reemplazando valores en la ecuación 2.6, y graficando la respuesta en el tiempo, en lazo abierto para una entrada paso unitario en el programa CAD CONTROL se obtiene el gráfico de la figura 2.2.

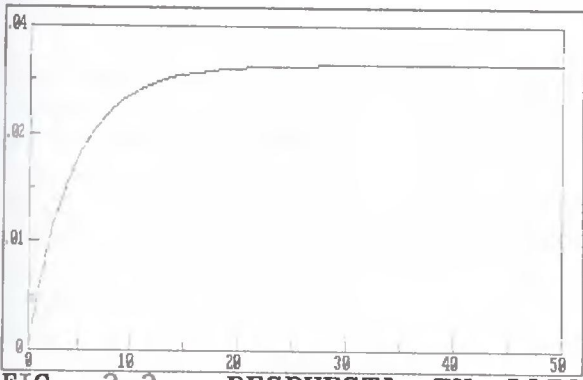


FIG. 2.2 RESPUESTA EN LAZO ABIERTO A LA FUNCION PASO, ECUACION 2.6 (1 TANQUE).

3. SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

La parte más crítica de todo proceso es la medición exacta de la variable de salida, en este caso el nivel del líquido en el último tanque del prototipo. Por lo tanto el sensor a utilizarse para este propósito debe, a más de ser bastante preciso, presentar una buena insensibilidad al ruido, ser bastante lineal en todo el rango de trabajo, tener una buena sensibilidad y por supuesto no verse afectado por los cambios de temperatura.

El sensor utilizado es un sensor de presión diferencial de estado sólido (SCX01DNC) que sensa indirectamente el nivel del líquido en el tanque, fabricado por la casa SENSYSM.

Sensa indirectamente el nivel del líquido en el tanque porque en realidad lo que mide es la presión hidrostática en el fondo del último tanque del prototipo, pero como la presión hidrostática es directamente proporcional a la

altura del líquido que la produce se puede utilizar a este sensor para medir el nivel del líquido.

Se utiliza la configuración diferencial, pues en el fondo del tanque lo que se tiene es la suma de la presión hidrostática, producida por la columna de agua, más la presión atmosférica, entonces para tener únicamente la presión hidrostática, que es la que interesa, se debe restar la presión atmosférica a la presión sensada en el fondo del tanque. (ver figura 3.1)

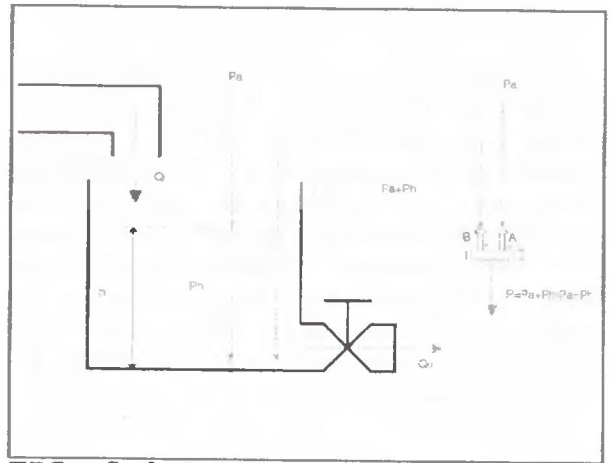


FIG. 3.1 UTILIZACION DEL SENSOR DE PRESION DIFERENCIAL.

donde:

P_a = presión atmosférica

P_h = presión hidrostática= $\delta \cdot g \cdot h$

δ = densidad del agua [1 Kg/cm^3]

g = gravedad

h = altura del agua dentro del tanque

El sensor de presión SCX01DNC está montado sobre una tarjeta SCX-EB universal de amplificación también fabricada por la misma casa SENSYSM, que acondiciona la señal de salida del chip sensor a un voltaje de 0-10 VDC a plena escala, este valor de voltaje a plena escala puede ser variado, pero para este caso 0-10 V es el voltaje adecuado de trabajo.

4. BOMBA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL.

El agua es empujada desde el reservorio hacia los tanques del prototipo mediante una bomba centrífuga acciona-

da por un motor DC, la bomba es del tipo centrífugo sumergible diseñada para ser usada en tanques, sistemas de almacenamiento de agua y otros fluidos. Esta ensamblada en forma muy compacta de manera que no tenga la menor filtración hacia el motor. La bomba puede operar en cualquier posición bajo el nivel del fluido a bombear.

El circuito implementado permite controlar la velocidad del motor de la bomba en proporción directa al voltaje de entrada al circuito y que proviene del controlador análogo o digital.

Para controlar la velocidad del motor lo que se hace es un control de velocidad por voltaje, es decir se varia el voltaje de alimentación de la bomba en forma proporcional al voltaje de entrada al circuito del DRIVER, para ello se emplea un "CHOPPER DE DC" que permite trozear la señal continua de potencia y enviar solamente una fracción de la misma en un período de tiempo a la carga.

5. CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

El prototipo en sí está constituido por los tres tanques acoplados principales (cuyas dimensiones fueron determinadas anteriormente) contruidos de material acrílico transparente (PLEXY-GLASS) de 4 mm. En esta estructura de tanques acoplados es en donde se va a realizar el control del nivel de agua en el último tanque. La parte frontal de cada uno de los tanques esta graduada de manera de poder fácilmente mirar el nivel que va alcanzando el agua en cada uno de los tanques.

En la parte superior de cada uno de los tanques que conforman el prototipo de control de nivel de líquidos, se encuentra localizado un interruptor de nivel máximo.

Las válvulas que se utilizan son del tipo ALKON JF3.

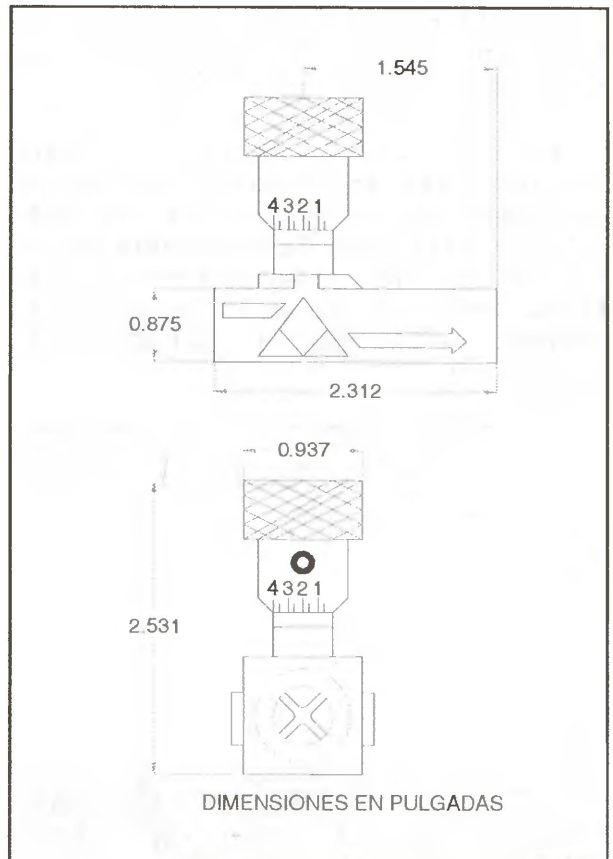


FIGURA 5.1 DIMENSIONES DE LAS VALVULAS DE CONTROL DE FLUJO.

Esta estructura completa, (soporte más tanques acoplados) descansa sobre el reservorio o cubeta que es en donde se almacena toda el agua que será bombeada por la bomba de inmersión, que también esta alojada en su interior, hacia la estructura de tanques acoplados.

6. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

Realizando la respectiva modelación se obtienen los valores de k_p , k_i y k_d que sirvieron para dar los márgenes de variación de dichos parámetros en el diseño preliminar del controlador PID. Posteriormente, ya de forma experimental y basándose en los cálculos obtenidos se escogieron los siguientes rangos de variación para estos parámetros:

k_p : de 0 a 10
 k_i : de 0 a 5
 k_d : de 0 a 5

Estos rangos se escogen en base a la consideración de que se puede bajar la ganancia proporcional y subir la ganancia integral.

Para el control digital la señal de control proviene de una tarjeta de adquisición y salida de datos, que esta conectada a un computador digital. A esta tarjeta también ingresa la señal del sensor de nivel (voltaje estandarizado entre 0 y 10 V) que previamente y por seguridad pasa por una etapa de desacople.

Esta señal de voltaje es digitalizada en la tarjeta y su valor es almacenado dentro del computador para realizar las operaciones de control. En el computador digital se fija el nivel de referencia, los algoritmos de control se realizan por SOFTWARE y la señal de control sale a través de la tarjeta que convierte su valor digital en analógico (voltaje entre 0 y 10 V) hacia el DRIVER de la bomba dc.

La tarjeta que se utiliza es la tarjeta DAS-128 que esta acoplada al computador existente en el Laboratorio de Control.

Esta tarjeta es manejada desde el computador mediante el programa para control digital directo que se utiliza en prácticas dentro del mismo laboratorio.

En el módulo de control, se encuentran disponibles los terminales tanto de salida como de entrada para conectarse a esta tarjeta a fin de realizar el control de manera digital. La señal de control se encamina al DRIVER de la bomba DC, mediante la selección adecuada del tipo de control en el panel de control. La señal proveniente del sensor de nivel está siempre disponible en los terminales de salida y puede ser utilizada por otros instrumentos como registrador de papel, osciloscopio, etc.

7. SOFTWARE DESARROLLADO PARA CONTROL

El software desarrollado para realizar el control de manera digital, utiliza

las subrutinas y algoritmos de control implementadas en el programa de control digital directo CCD.

Dichas subrutinas trabajan con señales de voltaje de 0 a 10 V pero las procesa como valores de altura para la entrada y voltaje para la salida que maneja al driver. La conversión de voltaje a altura se realiza por software dentro del programa, esta es una de las variaciones realizadas a las subrutinas originales.

Se crearon dos subrutinas adicionales que permiten obtener dos tipos de gráficos de respuesta para la aplicación de control de nivel de líquidos: la primera (figura 7.1) permite observar en la pantalla del computador la respuesta en el tiempo del sistema (variación de altura), así como también la señal de control (voltaje de salida al driver). La otra pantalla (figura 7.2), permite además de lo anterior mirar un gráfico representativo del tanque en el cual se observa como varía el nivel del líquido dentro del tanque. El tipo de gráfico que se mostrará en pantalla se escoge en el submenú de opciones dentro del programa principal.

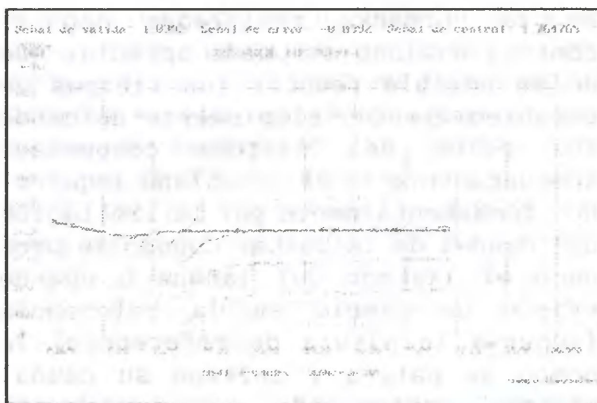


FIG. 7.1 GRAFICO DE RESPUESTA EN PANTALLA.

8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Cabe mencionar en este punto, que el funcionamiento individual de cada una de las tarjetas que conforman el módulo de control, se realizó por separado de manera independiente.

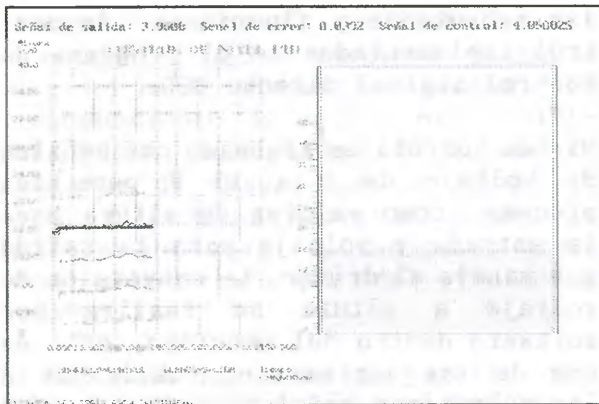


FIG. 7.2 GRAFICO COMBINADO EN PANTALLA.

Cada tarjeta fue probada y comprobada de manera satisfactoria, antes de ensamblar el módulo en conjunto. Esta acotación es válida, pues el módulo de control fue construido y concebido de manera modular. Cada tarjeta es un módulo independiente que realiza una función determinada y específica. El sistema fue diseñado así, pues esto facilita la tarea de calibración y mantenimiento o reparación, pues en caso de que algo suceda solamente será necesario desmontar la tarjeta que presente fallas para su reparación, sin necesidad de desmontar el resto del equipo.

De las pruebas realizadas con el control análogo se puede apreciar que no es posible reducir los tiempos de establecimiento, simplemente ubicando los polos del sistema compensado adecuadamente en el semiplano izquierdo, fundamentalmente por la limitación del caudal de la bomba. Cuando se produce el llenado del tanque o cuando existe un cambio en la referencia (aumenta la altura de referencia) la bomba se satura y entrega su caudal máximo, manteniendo esta situación hasta cuando la altura del nivel real llega cerca del nivel de referencia en la cual el sistema se comporta en forma lineal (no existe saturación) y el control actúa en forma normal en base a los parámetros prefijados.

Así mismo, se trabaja con ganancias bajas, ya que el control funciona con un voltaje de la bomba entre 3 y 5 V en el rango lineal y al triplicar la

ganancia ya se produce saturación de la bomba. Adicionalmente cabe señalar que la válvula debe estar totalmente abierta (para el sistema de primer orden).

Estas limitaciones de bomba y válvula no afectan al funcionamiento del sistema de primer orden, por lo que este control es satisfactorio, claro esta que si se manejara un mayor rango de caudales en la bomba y en la válvula se podría acelerar el tiempo de respuesta.

Algunos de los resultados obtenidos utilizando la opción de control digital se muestran a continuación:

Prueba P1:

La figura 8.1 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

Parámetros utilizados:

- ti= 300 ms (Período de muestreo)
- kp= 35
- ki= 2
- Perturbación: de 16 a 18 cm

Resultados:

- Mp= 0 %
- Ts= 15 seg.
- Ep= 1.94 %

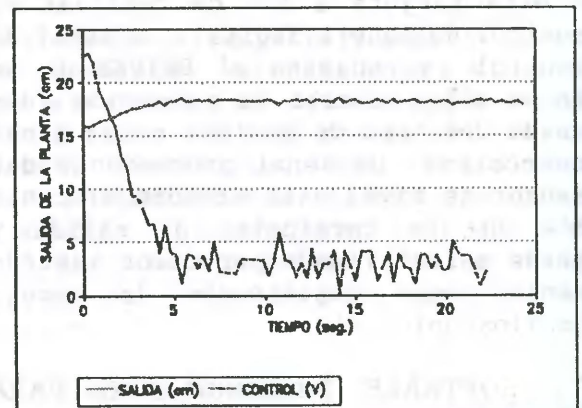


FIG. 8.1 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN PERTURBACION DE 16 a 18 cm.

Prueba P2:

La figura 8.2 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

Parámetros utilizados:
 $t_i = 300 \text{ ms}$ (Período de muestreo)
 $k_p = 35$
 $k_i = 2$
 Perturbación: de 16 a 24 cm

Resultados:
 $M_p = 15.67 \%$
 $T_s = 59.1 \text{ seg.}$
 $E_p = 1.96 \%$

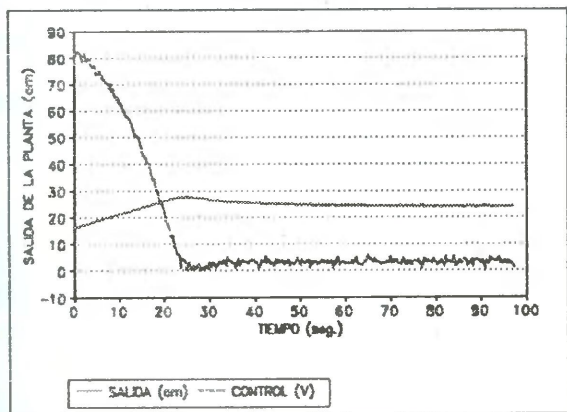


FIG. 8.2 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN PERTURBACION DE 16 a 24 cm.

Prueba P3:

La figura 8.3 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

Parámetros utilizados:
 $t_i = 50 \text{ ms}$ (Período de muestreo)
 $k_p = 30$
 $k_i = 4$
 Perturbación: de 16 a 20 cm

Resultados:
 $M_p = 9 \%$
 $T_s = 22 \text{ seg.}$
 $E_p = 2 \%$

9. CONCLUSIONES

El prototipo y el módulo de control

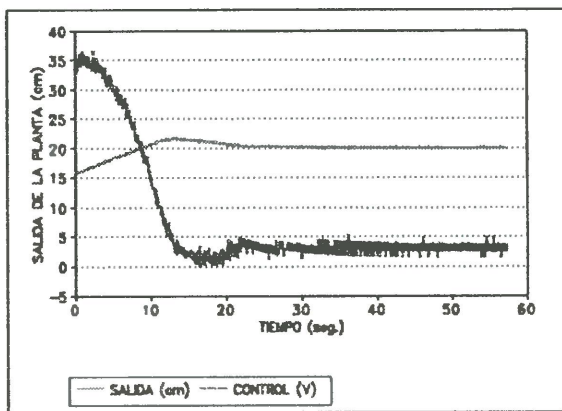


FIGURA 8.3 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN PERTURBACION DE 16 a 20 cm.

han sido probados extensamente, tanto en su operación manual como en el control automático analógico y digital, con resultados satisfactorios. De hecho este equipo ha sido utilizado y será utilizado en prácticas de control automático.

El control de un sistema de primer orden entrega resultados totalmente satisfactorios, es rápido, tiene un error admisible y responde muy bien a perturbaciones. En el caso del control para un sistema de segundo orden, el control es bueno, pero existe un error debido a que no se mide el nivel en el segundo tanque. En el caso de un sistema de tercer orden, se llega a controlar el sistema pero en este caso el control es pobre, pues no se puede manejar el caudal de las válvulas de control de flujo para mejorar el control; por estas razones, es preferible para su uso como prototipo de laboratorio, realizar el control sobre un solo tanque, es decir como un sistema de primer orden.

Los distintos circuitos que conforman el módulo de control en sí, se hallan configurados en tarjetas individuales, haciendo de esta manera un equipo modular, que hace fácil identificar y manipular individualmente a cada uno de estos circuitos, esto es una gran ventaja para fines de mantenimiento y calibración del equipo.

En cuanto al control digital, este presenta la ventaja de que las contan-

tes del compensador PID pueden ser modificadas fácilmente y no están limitadas a un rango de variación restringido, esto es bastante útil en laboratorio para fines didácticos. La respuesta del sistema utilizando el control digital es aceptable, aunque esta limitada a sistemas de primer orden, pues con sistemas de segundo y tercer orden este tipo de control es pobre, debido especialmente a la saturación de la señal de control.

10. APLICACION

MODELO HIDRAULICO: "CAMARA DE INTERCONEXION ENTRE LAS CENTRALES HIDRAULICAS AGOYAN Y SAN FRANCISCO" Proyecto INECCEL-EPN

El proyecto SAN FRANCISCO es uno de los proyectos que forma parte del PROYECTO de ELECTRIFICACION NACIONAL, dicha central utilizará las aguas turbinadas por la Central AGOYAN aguas arriba.

Para interconectar las dos centrales es necesario la construcción de una CAMARA DE INTERCONEXION que amortiguara los efectos de rechazo de caudal (Efecto Golpe de Ariete) en las turbinas de la central SAN FRANCISCO que se encuentra aguas abajo. Esta cámara de interconexión es de vital importancia para la estabilidad del sistema, pues una falla en la central SAN FRANCISCO (Aguas abajo) puede arrastrar a la central AGOYAN (aguas arriba) con consecuencias lamentables.

Por tal motivo en esta primera fase de estudio de la Cámara de Interconexión a nivel de MODELO HIDRAULICO A ESCALA es necesario tener un adecuado control sobre el nivel que se alcanza dentro de los distintos puntos de la Cámara a fin de poder determinar sus dimensiones y estructura.

Para realizar dicho control se utilizarán sensores de presión similares a los utilizados en el presente trabajo ubicados en los distintos puntos de interés, en este caso el control de caudal se realizará mediante electroválvulas proporcionales que interconectan las tuberías. Las distintas

señales se procesarán mediante la implementación de un sistema tipo SCADA que recibirá las señales de los distintos sensores y las llevará a un computador central donde se podrán monitorear y procesar en tiempo real las señales de interés, así como también comandar los actuadores a través de un PLC.

Cabe mencionar que este proyecto se encuentra ya en ejecución en el LABORATORIO DE INVESTIGACIONES HIDRAULICAS de la EPN.

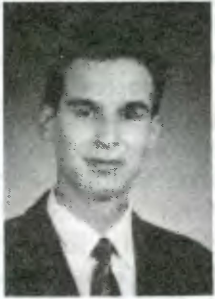
BIBLIOGRAFIA

- 1.- Benítez D., "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS", Tesis de grado, E.P.N. 1994
- 2.- Creuss A., " INSTRUMENTACION INDUSTRIAL", 2da. Edición, Editorial Marcombo, México 1981
- 3.- Cevallos F., "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS PARA COMPUTADORES PERSONALES", Tesis de grado, E.P.N. 1993
- 4.- Fustillos P., "ALGORITMOS PARA CONTROL DIGITAL DIRECTO", Tesis de grado, E.P.N. 1994
- 5.- Sensyn, "SOLID-STATE SENSOR HANDBOOK", USA 1994
- 6.- National Semiconductors, "LINEAR HANDBOOK", USA 1982
- 7.- Ogata Katsuhiko, "INGENIERIA DE CONTROL MODERNO", 2da. Edición, Pretince Hall, México 1993
- 8.- Alkon Corporation, "IN LINE FLOW CONTROLS, NEEDLE & CHECK VALVES CATALOG", USA 1992
- 9.- Garzón J., "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL ANALOGO Y DIGITAL DE NIVEL DE LIQUIDOS EN TANQUES ACOPLADOS", Tesis de grado, E.P.N. 1990
- 10.- Salgado F., "SIMULADOR PARA MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS", Tesis de grado, E.P.N. 1987

11.- Bennet B. , "PRACTICAL CONTROL EXERCISES", U.M.I.S.T., Manchester-Inglaterra 1979

gación CONUEP-EPN "Control de Procesos en Tiempo Real". Ha dirigido más de 40 tesis de grado en ingeniería.

BIOGRAFIAS



BENITEZ, DIEGO.- Nació en Quito el 9 de enero de 1970. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio "La Salle" de Quito. Distinciones: Abanderado y mejor egresado promoción 86-87.

Es profesor a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional.

Su área de interés es el control computarizado de procesos industriales.

Obtuvo el Título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en 1994. Actualmente presta sus servicios en la Empresa AICO Ltda. en el área de Automatización Industrial y Control.

Es además Investigador Asociado en el área de Ingeniería de Instrumentación en el Proyecto: "Cámara de Interconexión entre las Centrales Hidroeléctricas Agoyán y San Francisco" Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas Escuela Politécnica Nacional.

Sus áreas de interés actuales son: Instrumentación Industrial, Automatización y Sistemas SCADA.

BURBANO, PATRICIO.- Nació en Quito, el 9 de Octubre de 1951. Sus estudios Universitarios los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el Título en Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.



Obtuvo el Posgrado en la Universidad de Manchester Inglaterra con el Título de MSc. in Systems and Control.

Fue Director del Proyecto de Investi-