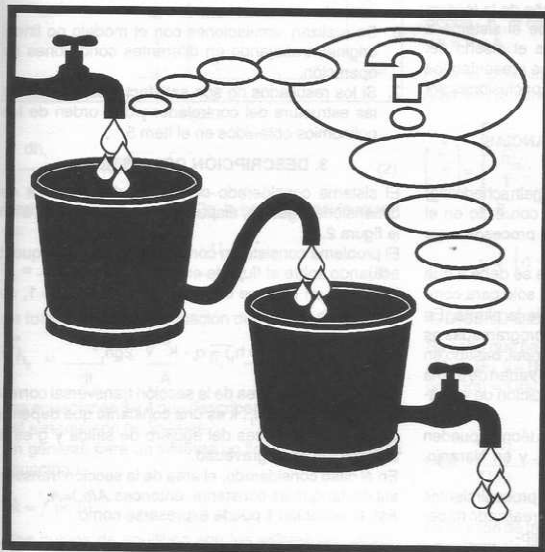


Control por "Gain Scheduling" de dos tanques en cascada



RESUMEN

En este artículo se presenta la técnica del control adaptativo por ganancias programadas, se ilustra su aplicación en un proceso con características no lineales, así como el procedimiento realizado para la linealización del proceso y el diseño del controlador; además, el artículo presenta las bondades de la técnica como una solución para controlar sistemas no lineales, en los que el comportamiento del proceso debe estar totalmente establecido.

ABSTRACT

Adaptive control using programmable-gain applied to a non-linear process is presented. The design of the controller and the technique used to linearize the process are also illustrated. This article highlights the benefits of this method to control non-linear

systems where the process behavior must be fully determined.

PALABRAS CLAVES

Control adaptativo, control por ganancias programadas, "feedforward".

KEYWORDS

Adaptive control, gain scheduling Control, feedforward.

* Este texto se recibió, para ser publicado, en julio de 1996.

□ Edinson Franco M, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Asistente - Universidad del Valle

□ Carlos R. Pinedo, M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado - Universidad del Valle

□ Freddy Naranjo Pérez, M.Sc.
Ingeniero Mecánico
Profesor Corporación Universitaria
Autónoma de Occidente - Cali

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los procedimientos más utilizados en el diseño de controladores para sistemas no lineales consiste en linealizar las ecuaciones que modelan el sistema, realizando una expansión por series de Taylor, alrededor de un punto nominal de operación. A partir del modelo linealizado, se diseña un controlador lineal, utilizando alguno de los enfoques existentes. Sin embargo, cuando el rango de variación de las condiciones de operación es amplio, un controlador lineal no garantiza un adecuado funcionamiento del sistema. En esos casos, es necesario diseñar un controlador no lineal.

En este trabajo se presenta una aplicación de una técnica de control no lineal conocida como control por ganancias programadas o "Gain Scheduling". En la sección 2 se presenta una breve reseña de la técnica utilizada. En la sección 3 se describe el sistema a controlar. En la sección 4 se realiza el diseño del controlador y en las secciones 5 y 6 se presentan los resultados de las simulaciones y las conclusiones del trabajo.

2. EL CONTROL POR GANANCIAS PROGRAMADAS

El control por ganancias programadas (gain scheduling) es una técnica que ha sido aplicada con éxito en el control de aviones y, en general, en procesos cuyo modelo no lineal es bien conocido.

El nombre de ganancias programadas se debe a que originalmente este esquema se utilizó sólo para compensar los cambios en la ganancia de la planta. En general, un controlador de ganancias programadas es un controlador por realimentación no lineal, basado en un controlador lineal cuyos parámetros varían de forma pre-programada, en función de la condición de operación [1], (ver figura 1).

Algunos ejemplos de aplicación de esta técnica pueden encontrarse en Shamma y Athans 2 y en Naranjo, Mena y Tombé 3.

Aunque la técnica está basada en procedimientos heurísticos, en los últimos años se han realizado trabajos tendientes a su formalización conceptual y metodológica 4. En esa dirección, es importante destacar los trabajos de Baumann y Rugh 5, quienes propusieron un procedimiento de diseño llamado linealización extendida.

El diseño de un controlador por ganancias programadas se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento

1. Disponiendo del modelo no lineal de la planta, se selecciona una variable y se define el rango de variación de ésta para las diferentes condiciones de operación. La variable seleccionada

puede ser una variable de estado o la salida de la planta.

2. Se determinan los puntos de operación del sistema en función de la variable seleccionada en el ítem 1.
3. Utilizando una expansión en serie de Taylor, se obtienen modelos linealizados alrededor de un número determinado de condiciones de operación.
4. Se define una estructura de control lineal y se diseña un controlador para cada punto de operación, de acuerdo a unas especificaciones de desempeño dadas. Las estructuras más utilizadas son las tipo PI, PID, de adelanto o atraso de fase y de realimentación del estado.
5. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados, se obtiene un polinomio para cada parámetro del controlador. Este polinomio es función de la variable seleccionada en el ítem 1.
6. Se realizan simulaciones con el modelo no lineal original, trabajando en diferentes condiciones de operación.
7. Si los resultados no son satisfactorios, se cambia la estructura del controlador y/o el orden de los polinomios obtenidos en el ítem 5.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema considerado consta de dos tanques de dimensiones iguales, dispuestos como se muestra en la figura 2.

El problema consiste en controlar el nivel de tanque 2 actuando sobre el flujo de entrada al tanque 1.

Haciendo un balance de materias en el tanque 1, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} (A(h_1) \cdot h_1) = q_i - K \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

donde $A(h_1)$ es el área de la sección transversal correspondiente al nivel h_1 , K es una constante que depende de las características del agujero de salida y g es la aceleración de la gravedad.

En el caso considerado, el área de la sección transversal del tanque es constante, entonces $A(h_1) = A$.

Así, la ecuación 1 puede expresarse como:

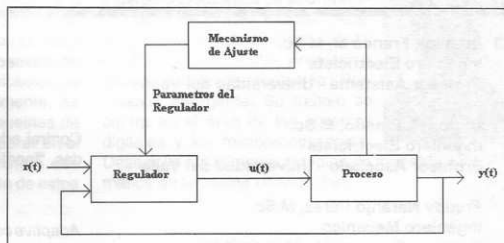


Figura 1.

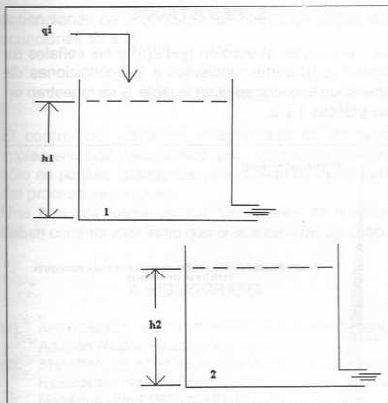


Figura 2.

$$A \frac{dh_1}{dt} = q_i - K\sqrt{2g} \sqrt{h_1} \quad (2)$$

haciendo $u(t) = q_i$, $C = K\sqrt{2g}$, la ecuación del tanque 1 es:

$$\dot{h}_1 = \frac{dh_1}{dt} = -\frac{C}{A} \sqrt{h_1} + \frac{U}{A} \quad (3)$$

de forma análoga, la ecuación del tanque 2 es:

$$\dot{h}_2 = \frac{dh_2}{dt} = -\frac{C}{A} \sqrt{h_2} + \frac{C}{A} \sqrt{h_1} \quad (4)$$

Las ecuaciones 3 y 4 que describen el comportamiento del sistema son no lineales.

En general, para un sistema no lineal, descrito por la ecuación

$$\dot{x} = f(x, u)$$

los puntos de equilibrio son los valores de (x_0, u_0) , tales que

$$f(x_0, u_0) = 0 \quad (5)$$

En este caso, los puntos de equilibrio son (x_0, u_0) , tales que:

$$-\frac{C}{A} \sqrt{h_{10}} + \frac{u_0}{A} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{C}{A} \sqrt{h_{10}} - \frac{C}{A} \sqrt{h_{20}} = 0 \quad (7)$$

Es decir:

$$h_{10} = \frac{u_0^2}{C^2} = h_{20} \quad (8)$$

Al linealizar el sistema mediante una expresión en series de Taylor alrededor de un punto de equilibrio, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \frac{C}{A} \frac{1}{\sqrt{h_{10}}} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{C}{A} \frac{1}{\sqrt{h_{10}}} & -\frac{1}{2} \frac{C}{A} \frac{1}{\sqrt{h_{20}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

donde h_i = desviación del estado h tal que $\Delta h_i = h_i - h_{i0}$ (11)

Para el caso tratado, se asume que $A=0.5$ y $C=1$. Además, teniendo en cuenta que $h_{10} = h_{20}$, se tiene

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{h_{20}} & 0 \\ \frac{1}{h_{20}} & -\frac{1}{h_{20}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (12)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Se sabe que para un sistema representado de la forma $\dot{x} = Ax + Bu$, $y = Cx$, la función de transferencia esta dada por $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$. En este caso:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{Ah_{20}}}{(s + \frac{1}{h_{20}})^2} \quad (13)$$

La función de transferencia obtenida en una función de transferencia parametrizada por h_{20} , parámetro que varía cuando cambia el punto de operación.

Se requiere que en cualquier punto de operación el sistema controlado satisfaga los siguientes criterios de desempeño:

$$e_{s.s.} = 0, \text{ y } 8 \text{ seg. y M.P. } 10\%$$

Para cumplir estas especificaciones se utiliza un controlador con estructura proporcional derivativa (PID), de la forma

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + T_d \frac{d}{dt} e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (14)$$

donde $e = h_{2ref} - h_2$ y K_p , T_i , T_d son parámetros a determinar.

En este trabajo se consideran 10 puntos de operación y para cada uno de ellos se diseñó un controlador PID. Los valores de los parámetros obtenidos se muestran en la tabla 1.

h_2	K_p	T_i	T_d
0.5	0.69	0.5	0
1.0	1.041	1.5	0.166
1.5	1.156	2.5	0.400
2.0	1.214	3.5	0.643
2.5	1.250	4.5	0.880
3.0	1.270	5.5	1.136
3.5	1.288	6.5	1.385
4.0	1.301	7.5	1.633
4.5	1.310	8.5	1.880
5.0	1.319	9.5	2.13

el controlador resultante es un controlador no lineal de la forma

$$u(t) = K_p(h_2) \cdot e(t) + T_d \frac{d}{dt} e(t) + \frac{1}{T_i(h_2)} \int e(t) dt \quad (15)$$

Utilizando un ajuste polinomial por mínimos cuadrados, se obtienen las siguientes expresiones:

$$K_p = 0.0234 \cdot h_2^3 - 0.243 \cdot h_2^2 + 0.8227 \cdot h_2 - 0.3752 \quad (16)$$

$$T_d = -0.0059 \cdot h_2^3 + 0.0587 \cdot h_2^2 + 0.3137 \cdot h_2 - 0.1815 \quad (17)$$

$$T_i = 2 \cdot h_2 - 0.5 \quad (18)$$

una realización del controlador en variables de estado es:

$$e = h_{2ref} - h_2 \quad (19)$$

sea la variable de estado Z

$$\dot{z} = e$$

$$u = K_p(h_2) \cdot [e(t) + T_d(h_2) \dot{e} + \frac{1}{T_i(h_2)} \int e(t) dt] \quad (20)$$

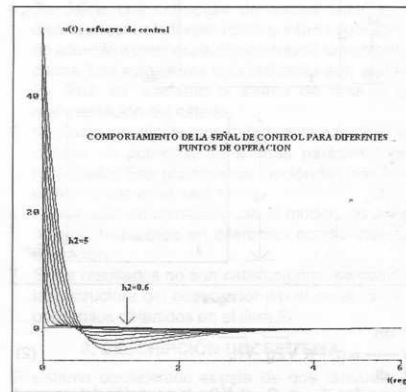
donde:

$$\dot{e} = \frac{d}{dt} (h_{2ref} - h_2) = -\dot{h}_2 = -\frac{C}{A} [\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}] \quad (21)$$

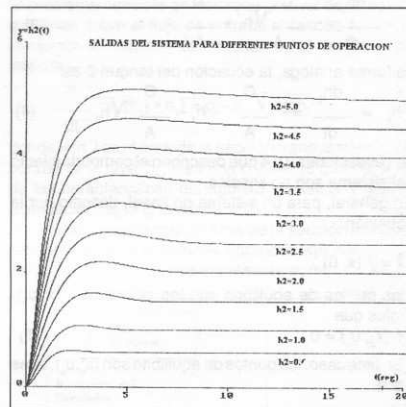
Teniendo en cuenta que K_p y T_i son funciones de la variable h_2 es evidente que el controlador propuesto tiene una estructura no lineal.

5. RESULTADOS

Las respuestas al escalón ($y=h_2(t)$) y las señales de control ($u(t)$) correspondientes a las condiciones de operación especificadas en la tabla 1, se muestran en las gráficas 1 y 2



Gráfica 1



Gráfica 2.

En la gráfica 2 se ilustra el comportamiento del sistema con el esquema de "Control PID gain scheduling" para los diferentes puntos de operación listados en la tabla 1, en donde los parámetros del controlador se ajustan

dependiendo de la condición de operación según las ecuaciones 16 a 20.

6. CONCLUSIONES

El control por ganancia programada es de fácil implementación y económico, pero su implementación sólo es posible cuando las condiciones de operación del proceso se conocen.

Una limitante fuerte es que las señales de medida deben cambiar más lento que la dinámica del proceso.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ASTROM, K.J. WITTENMARK, B. Adaptive Control, Addison-Wesley, Reading MA, 1989
- [2]. SHAMMA, J.S. ATHANS, M. "Gain Scheduling: Potential Hazards and Possible Remedies", IEEE Control Systems Magazine, June 1992, p. 101-107.
- [3]. NARANJO, F. MENA, J.C. TOMBE, J. "Control de un Sistema de Levitación Magnética", Memorias del I Congreso de la Asociación Colombiana de Automática, Cali, 1994, p. 178-182.
- [4]. RUGH, W.J. "Analytical Framework for Gain Scheduling", IEEE Control Systems Magazine, January, 1991, p. 79-84
- [5]. BAUMANN, W. RUGH, W. "Feedback Control of Nonlinear Systems by Extended Linearization", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 31, No. 1, 1986, p. 40-46.
- [6]. ASTROM, K.J. WITTENMARK, B. Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [7]. FRANCO, E. El control adaptativo como una estrategia de control para sistemas no lineales. Revista Energía y Computación, Universidad del Valle. Volumen II, No. 2. Edición No. 6, 1993.
- [8]. ASTROM, K.J. BJORN WITTENMARK. Sistemas Controlados por Computador. Paraninfo, Madrid, 1988.
- [9]. ISERMANN, R. LACHMANN, H. MATKO, D. Adaptive Control Systems, Prentice Hall, 1991.
- [10]. NARENDRA, K.S. ANNASWAMY, A.M. Stable Adaptive Systems, Prentice Hall, 1989

AUTORES

Freddy Naranjo Pérez

Ingeniero Mecánico, Magíster en Controles de la Universidad de Sao Paulo, Brasil. Actualmente se desempeña como profesor y director de investigaciones de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente y como docente hora cátedra del Magíster en Automática y de la Especialización en Automatización Industrial de la Universidad del Valle. Su área de investigación es el control no lineal. Actualmente es presidente de la Asociación Colombiana de Automática y cursa estudios de Doctorado en Automática e Informática Industrial en la Universidad Politécnica de Valencia.

E-mail : frenaran@maxwell.univalle.edu.co



Edinson Franco Mejía

Ingeniero Electricista, Magíster en Automática de la Universidad del Valle. Profesor asistente del Departamento de Electricidad de la Universidad del Valle, integrante de la cátedra de Automática y Robótica. Dirige los programas académicos de Magíster en Automática y Especialización en Automatización Industrial del Programa de Posgrados de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de la Computación de la Universidad del Valle. Su campo de investigación es el control adaptativo.

E-mail : efm@maxwell.univalle.edu.co

Carlos R. Pinedo

Ingeniero Electricista, Magíster en Automática de la Universidad del Valle. Profesor asociado del Departamento de Electricidad de la Universidad del Valle, integrante de la cátedra de Percepción y Sistemas Inteligentes. Su campo de investigación son los sistemas de Información y tratamiento de señales.

E-mail : cpinedo@maxwell.univalle.edu.co



Si no cumples tus deberes con justicia estas creando las condiciones para que se violenten tus derechos. Esta no es una ley de los hombres, es una ley de la naturaleza.

Joel Pam