

OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS REGULADORES Y SERVOMECANISMOS PID

Víctor M. Alfaro Ruiz

Resumen

Se presenta el procedimiento empleado para la obtención de nuevas ecuaciones para la sintonización de controladores *PID* optimizando el criterio *IAE*, válidas para valores de $-0,05 \leq t_m/ \leq 2,0$.

Se compara el comportamiento de un sistema de control como regulador y como servomecanismo utilizando diferentes métodos de sintonización y se muestra la bondad de las nuevas ecuaciones de sintonización para plantas dominadas por el tiempo muerto.

Se ilustra con un ejemplo como, mediante una mejor identificación del modelo del proceso, es posible determinar parámetros del controlador que proporcionen índices de desempeño cercanos al óptimo.

Palabras clave: controladores PID, sintonización, optimización

Abstract

The method used for obtaining a new set of PID tuning rules optimizing the IAE performance criteria and valid for $-0,05 \leq t_m/ \leq 2,0$ is presented.

A performance comparison of regulators and servomechanisms tuned with different methods is made, and the goodness of the new tuning rules for plants with high time-delay is show.

Using an example, how by using a better plant model is possible to obtain controllers parameters for a near-to-optimum performance is demonstrated.

Keywords: PID controllers, tuning rules, optimization

1. INTRODUCCIÓN

Como parte del procedimiento de sintonización del controlador de un lazo de control como el mostrado en la Figura 1, debe considerarse el criterio con que se evaluará su desempeño junto con el funcionamiento requerido del mismo, como servomecanismo o como regulador, el tipo de controlador a sintonizar y la información requerida del proceso, para aplicar el método de sintonización seleccionado. El criterio de evaluación, del desempeño del lazo de control, permitirá determinar cuan cercano está este del deseado.

Una forma frecuente de medir el desempeño de los sistemas de control, es mediante la utilización

de funciones de costo basadas en el error, siendo éste la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada, normalmente conocidas como *criterios de desempeño integral*, los cuales se detallarán más adelante.

Basándose en estos criterios integrales han sido desarrollados varios procedimientos de sintonización de controladores de amplia utilización, entre los que se pueden citar el de López, el de Rovira, el de Kaya y Sheib y el de Sung.

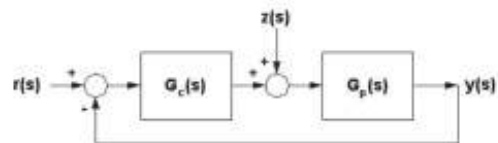


Figura 1. Sistema de control realimentado

Aunque los métodos de sintonización antes indicados están basados en la optimización de los mismos criterios integrales, mediante pruebas comparativas por simulación, (Alfaro, 2002) encontró diferencias importantes entre los índices de desempeño obtenidos al utilizar los diferentes métodos de sintonización indicados, y que estos índices eran significativamente mayores a los obtenidos a partir de la optimización del desempeño del sistema de control basándose en el modelo exacto del proceso controlado. Lo anterior despertó el interés por verificar la bondad de los métodos de sintonización de controladores basados en los criterios integrales tradicionales y su posible mejora, cuyos resultados se detallan más adelante.

2. CRITERIOS INTEGRALES

Uno de los criterios o índices de desempeño de los lazos de control basados en la señal de error $e(t)$ más utilizados, es la *Integral del error absoluto* definida como

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1)$$

en donde el error está dado por

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

Este índice establece un criterio de operación económica, con mínimo material fuera de especificaciones y bajo error máximo.

Otros criterios integrales utilizados son la *Integral del tiempo por el error absoluto (ITAE)*, la *Integral del error cuadrático (ISE)* y la *Integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE)*.

Para una planta dada, el objetivo es entonces determinar los parámetros del controlador que minimizan una función de costo determinada, por lo que estos parámetros serán óptimos bajo el criterio de desempeño establecido.

Para controladores de un grado de libertad, esto debe realizarse en forma independiente para cada una de las dos entradas al sistema de control.

Para cambios en el valor deseado $r(t)$ cuando el funcionamiento principal requerido es tener un buen seguimiento de este, esto es operando como servomecanismo, y en la perturbación $z(t)$ cuando es necesario mantener la variable controlada en su valor deseado ante cambios en las entradas no controladas, o sea, operando como regulador.

3. MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

Los métodos de sintonización que emplean los criterios integrales están basados en el establecimiento de una función de costo de la forma

$$\frac{\partial \Phi}{\partial K_c} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial T_i} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial T_d} = 0 \quad (3)$$

la cual cuantifica el desempeño del lazo de control ante una entrada dada. Entre menor sea el valor de la función establecida, mejor será el desempeño del sistema de control bajo ese criterio, por lo que el desempeño óptimo se obtiene cuando sea mínima.

Como la función de costo es función de los parámetros del controlador (K_c , T_i , T_d) el valor mínimo de se obtiene resolviendo

$$\Phi = \int_0^{\infty} F[e(t), t] dt \quad (4)$$

El procedimiento de optimización deberá realizarse entonces para una planta y controlador específico.

La mayoría de los métodos de sintonización basados en la optimización de una función integral del error, utilizan un modelo de primer orden más tiempo muerto para la planta dado por

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} \quad (5)$$

en donde k_p , y t_m son la ganancia, la constante tiempo y el tiempo muerto del modelo, por lo que las relaciones para el cálculo de los parámetros óptimos deben de expresarse en función de los parámetros del modelo de la planta.

(Willis, 1962a; Willis, 1962b) fue uno de los primeros en utilizar los criterios integrales para estudiar el efecto de los parámetros del controlador sobre el valor de estos índices, mostrando sus conclusiones en forma gráfica.

(López *et al.*, 1967) estudiaron los controladores P , PI y PID con los criterios integrales IAE , $ITAE$ e ISE y establecieron relaciones matemáticas para el cálculo de los parámetros de un controlador PID -Ideal para sistemas operando como reguladores para valores de $t_m/\tau \leq 1,0$.

Por su parte (Rovira *et al.*, 1969) lo hicieron para controladores PI y PID , en sistemas operando como servomecanismo con los criterios IAE e $ITAE$ y determinaron ecuaciones para la sintonización de un controlador PID -Ideal válidas también para valores de $t_m/\tau \leq 1,0$.

Como se ha indicado anteriormente, las ecuaciones de López y las de Rovira se pueden aplicar directamente para el cálculo de los parámetros de un controlador PID -Ideal cuya función de transferencia es

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) \quad (6)$$

usualmente con $\alpha = 0,1$.

Posteriormente (Kaya y Sheib, 1988) realizaron nuevamente el estudio para determinar los parámetros de los controladores optimizados con los criterios IAE , $ITAE$ e ISE para valores de $t_m/\tau \leq 1,0$, pero para controladores PID -Serie, una variante del PID -Paralelo y el PID -Industrial. Las características de los diferentes controladores PID y las ecuaciones para la conversión de los parámetros entre estos, son presentadas por (Alfaro, 1993)

Una función de costo ISE ponderada ($WISE$) fue utilizada por Nishikawa *et al.*⁹ (1984), para establecer polinomios para el cálculo de los parámetros de controladores PI y PID -Ideal para cambios tanto en el valor deseado como en la perturbación.

Por su parte (Sung *et al.*, 1996), optimizaron la función de costo $ITAE$ a partir de un modelo de segundo orden más tiempo muerto, con un controlador PID -Ideal y ajustaron las ecuaciones de sintonización para $0,05 \leq t_m/\tau \leq 2,0$.

4. OPTIMIZACIÓN DEL ÍNDICE IAE PARA CONTROLADORES PID

4.1 Ecuaciones de sintonización

Para investigar la bondad de los métodos de sintonización existentes, se realizó el proceso de optimización del desempeño de los sistemas de control seleccionado el índice IAE , un controlador PID -Ideal, y un modelo de primer orden más tiempo muerto para la planta.

La simulación y optimización se efectuó utilizando el programa VisSim® 3.0 (Visual Solutions, 1999) sobre un intervalo de solución de (0 a 20) segundos, el método de integración de Runge-Kutta de 4º orden con un paso fijo de 0,0002 segundos, junto con el método de Powell para la minimización. El programa de simulación utilizado se muestra en la Figura 2, en el cual se definen como “parameterUnknow” los parámetros variables a determinar (K_c , T_i y T_d) y la función objetivo “cost” (IAE) a optimizar.

Como el valor de la ganancia de la planta solo tiene incidencia sobre el valor de la ganancia del controlador, se utilizó una planta con ganancia unitaria ($k_p = 1$). Para considerar la constante de tiempo y el tiempo muerto del modelo, se definió un tiempo muerto normalizado como la variable adimensional

$$\tau_o = \frac{t_m}{\tau} \quad (7)$$

y se obtuvieron los parámetros óptimos para valores de $0,5 \leq \tau_o \leq 2,0$ en incrementos de 0,05 ó 0,1.

El parámetro τ_o es utilizado usualmente como una medición de la dificultad para controlar una planta. Valores bajos de τ_o indican una planta dominada por la constante de tiempo fácil de controlar, mientras que valores altos

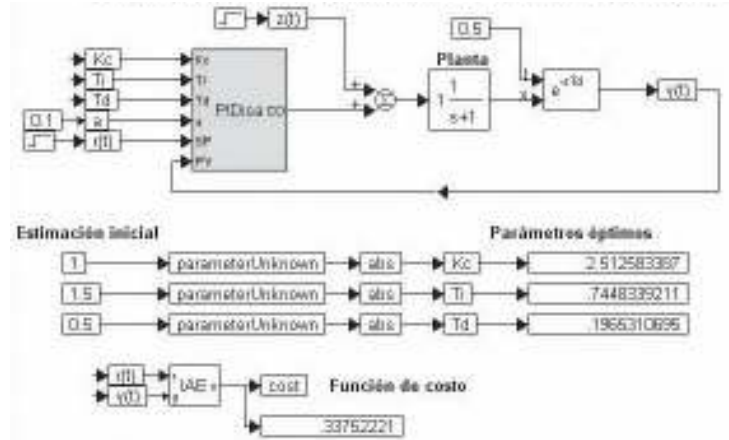


Figura 2. Programa para la optimización de los parámetros de un controlador PID

Cuadro 1. Constantes para parámetros PID óptimos según criterio IAE

| | a | b | c | d | e | f | g | h |
|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Servo | 0,329 5 | 0,718 2 | -0,997 1 | 0,978 1 | 0,372 3 | 0,845 6 | 0,341 6 | 0,941 4 |
| Regulador | 0,206 8 | 1,159 7 | -1,015 8 | -0,222 8 | 1,300 9 | 0,502 2 | 0,395 3 | 0,846 9 |

corresponden a plantas con tiempo muertos grandes y por lo tanto difíciles de controlar. Como se indicó anteriormente la mayoría de las relaciones para el cálculo de los parámetros de los controladores de los métodos existentes, son válidas solo para valores de $\tau_0 \leq 1,0$.

Al realizar la optimización se detectaron problemas de arribo al óptimo para los valores de τ_0 muy bajos, cercanos a 0,05, y también en la vecindad del valor unitario, por lo que se incrementó la cantidad de puntos a investigar en la cercanía de estos valores. Para el intervalo de 0,05 a 2 en total se obtuvieron los parámetros óptimos para 36 valores diferentes de τ_0 , lo que contrasta ampliamente con los tres puntos empleados por Kaya y Sheib.

Para la determinación de las ecuaciones de sintonización del controlador *PID*, se utilizó la función para ajuste de curvas por mínimos cuadrados *lsqcurvefit* de MATLAB® (Coleman *et al*, 1999), y se determinaron las constantes de ecuaciones generales de la forma

$$(K_c k_p, T_i / \tau, T_d / \tau) = a_0 + a_1 (\tau_0)^{f_1} \tag{8}$$

$$(K_c k_p, T_i / \tau, T_d / \tau) = a_1 (\tau_0)^{f_2} \tag{9}$$

evaluándose luego cual de estas dos se ajustaba a los datos de la optimización con el menor error.

Las ecuaciones obtenidas para la sintonización de un controlador *PID-Ideal* están dadas entonces por

$$K_c = \frac{[a + b(\tau_0)^f]}{k_p} \tag{10}$$

$$T_i = [d + e(\tau_0)^f] \tau \tag{11}$$

$$T_d = g(\tau_0)^h \tau \tag{12}$$

en donde las constantes *a* hasta *h* requeridas se muestran en el Cuadro 1.

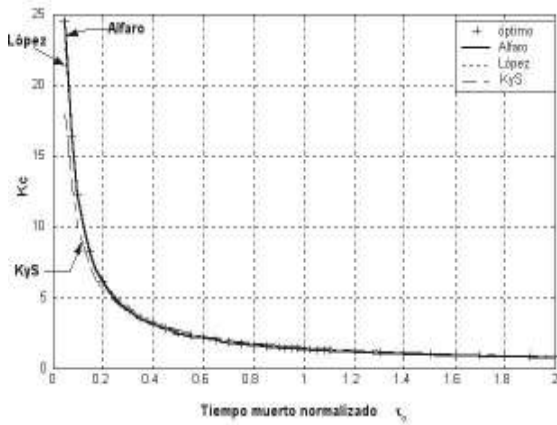


Figura 3. Regulador, Ganancia K_c versus τ_c

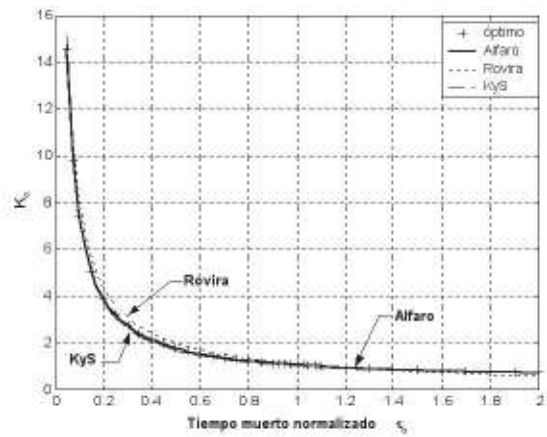


Figura 6. Servomecanismo, Ganancia K_c versus τ_c

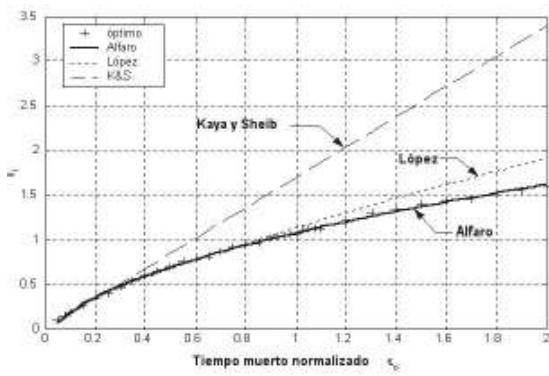


Figura 4. Regulador, tiempo integral T_i versus τ_c

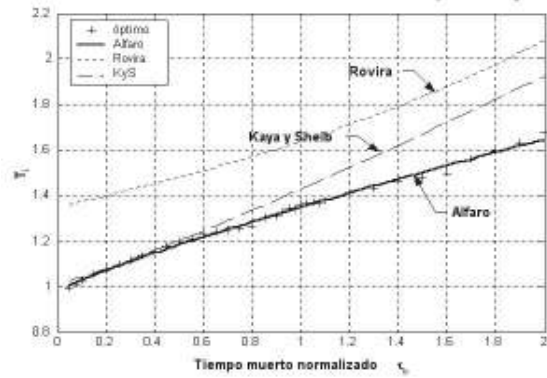


Figura 7. Servomecanismo, tiempo integral T_i versus τ_c

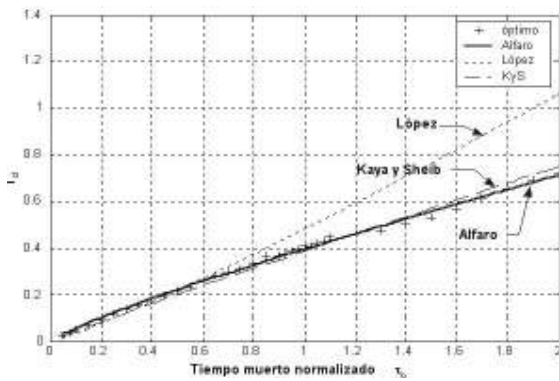


Figura 5. Regulador, Tiempo derivativo T_d versus τ_c

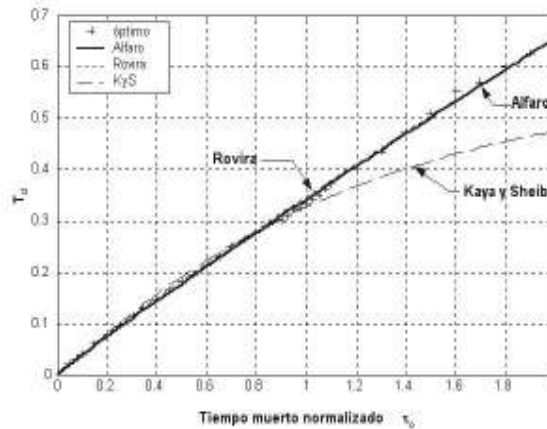


Figura 8. Servomecanismo, tiempo derivativo T_d versus τ_c

4.2 Comparación de los parámetros óptimos

Los parámetros óptimos del controlador *PID-Ideal* como regulador determinados para el criterio *IAE*, así como los calculados por los métodos de López, Kaya y Sheib y las nuevas ecuaciones (10) a (12), se muestran en las Figuras 3, 4 y 5. En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran los parámetros óptimos del controlador *PID-Ideal* como servomecanismo determinados para el criterio *IAE*, así como los calculados por los métodos de Rovira, Kaya y Sheib y las nuevas ecuaciones.

Para el caso de los reguladores se ve que los tres procedimientos dieron valores para la ganancia K_c muy similares y cercanos al óptimo; para el tiempo integral T_i el método de López mostró divergencias del óptimo para valores altos de ω . Como podría esperarse, sin embargo, los valores de Kaya y Sheib¹ presentaron grandes desviaciones respecto al valor óptimo; en el caso del tiempo derivativo T_d fueron más bien los valores calculados por López los que más se desviaron de los óptimos.

En forma similar, para el caso de los servomecanismos los valores de las ganancias K_c calculadas por los tres métodos, también fueron muy similares y cercanos al óptimo; para el tiempo integral T_i los valores de Kaya y Sheib mostraron desviaciones que crecen al aumentar el valor de ω , mientras que el método de Rovira dio valores siempre mayores que el óptimo; para el tiempo derivativo T_d fueron más bien los valores de Kaya y Sheib los que se desviaron, mientras que los valores de Rovira estuvieron muy cerca del óptimo.

4.3 Comparación del desempeño con una planta de prueba

La sola comparación de los parámetros del controlador calculados con los diferentes métodos de sintonización no es suficiente para poder concluir sobre el desempeño del lazo de control,

ya que la respuesta del controlador depende de todos sus parámetros, por lo que se comparó el desempeño de los diferentes métodos con una planta de prueba.

Para las pruebas comparativas de funcionamiento se seleccionó una de las plantas sugeridas por Aström y Hägglund, 2000 y dada por la función de transferencia

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^n} \quad (13)$$

con $n = 2, 3, 4$ y 8 .

Para los cuatro casos se obtuvo la curva de reacción del proceso y se identificó un modelo de primero orden más tiempo muerto por el método de (Ho *et al*, 1995). En la Cuadro 2 se muestran los parámetros de los modelos identificados. Como se puede apreciar, la constante de tiempo normalizada τ varió desde un valor bajo para la planta de segundo orden, hasta uno alto para la de octavo orden, lo que permitió verificar el efecto que este parámetro pudiera tener sobre el desempeño de los lazos de control sintonizados con los diferentes métodos.

En el Cuadro 3 se muestran los valores del índice *IAE* obtenidos con los métodos de sintonización comparados para las cuatro plantas de prueba operando como reguladores y como servomecanismos. Se han incluido en ellas los resultados obtenidos con los parámetros determinados con las ecuaciones recalculadas por (Arrieta, 2003), como parte de un estudio comparativo sobre el desempeño de controladores *PI* y *PID*.

De los datos anteriores se puede apreciar que para el caso de la operación como regulador, el método de López mostró los mejores resultados para las plantas hasta de cuarto orden, aunque las diferencias con los índices de los demás métodos no fueron muy significativas. Para la planta de octavo orden, el desempeño del controlador con los parámetros calculados con las nuevas ecuaciones presentadas aquí, fue el mejor de todos.

Cuadro 2. Parámetros de los modelos de la planta de prueba

| n | kp | t | tm | to |
|---|-----|-------|-------|-------|
| 2 | 1,0 | 1,432 | 0,628 | 0,439 |
| 3 | 1,0 | 1,758 | 1,360 | 0,774 |
| 4 | 1,0 | 2,027 | 2,140 | 1,056 |
| 8 | 1,0 | 2,842 | 5,490 | 1,932 |

Cuadro 3. Índices de desempeño IAE

| Reguladores | | | | | |
|-----------------|--------|--------------|---------|--------|---------|
| n | López | Kaya y Sheib | Arrieta | Alfaro | Óptimo |
| 2 | 0,401 | 0,423 | 0,425 | 0,430 | - |
| 3 | 1,160 | 1,236 | 1,251 | 1,249 | - |
| 4 | 2,044 | 2,506 | 2,196 | 2,177 | - |
| 8 | 7,145 | 10,051 | 6,536 | 6,248 | 5,2 751 |
| Servomecanismos | | | | | |
| n | Rovira | Kaya y Sheib | Arrieta | Alfaro | Óptimo |
| 2 | 0,945 | 0,985 | 0,946 | 0,966 | - |
| 3 | 2,021 | 1,988 | 1,932 | 1,943 | - |
| 4 | 3,234 | 3,016 | 2,950 | 2,914 | - |
| 8 | 9,519 | 7,462 | 7,586 | 6,998 | 6,5337 |

Cuadro 4. Parámetros e índices de desempeño para la planta de octavo orden

| Regulador | | | | | |
|----------------|------------|-------|-------|-------|---------|
| Modelo | Parámetros | Kc | Ti | Td | IAE |
| Exacto | Óptimos | 1,069 | 4,485 | 2,599 | 5,275 1 |
| 2° Orden | Óptimos | 1,080 | 4,573 | 3,171 | 5,405 2 |
| 1er Orden | Óptimos | 0,827 | 4,435 | 2,000 | 6,207 0 |
| 1er Orden | Alfaro | 0,800 | 4,513 | 1,962 | 6,248 0 |
| Servomecanismo | | | | | |
| Modelo | Parámetros | Kc | Ti | Td | IAE |
| Exacto | Óptimos | 0,843 | 4,732 | 2,245 | 6,533 7 |
| 2° Orden | Óptimos | 0,781 | 4,324 | 2,940 | 6,790 0 |
| 1er Orden | Óptimos | 0,724 | 4,629 | 1,836 | 6,891 0 |
| 1er Orden | Alfaro | 0,700 | 4,626 | 1,836 | 6,998 0 |

Para el caso del servomecanismo los resultados favorecieron al controlador sintonizado con las nuevas ecuaciones, especialmente para valores altos del tiempo muerto normalizado τ .

La mejora obtenida en el desempeño del sistema de control con las nuevas ecuaciones para plantas donde el tiempo muerto aparente es significativo, es evidente al observar las curvas de respuesta del sistema de control.

Los cuadros anteriores muestran también que, aunque es posible obtener un buen desempeño con las ecuaciones determinadas para el cálculo de los parámetros del controlador, éste será inferior al determinado por medio de la optimización directa del desempeño del controlador, si se cuenta con el modelo exacto de la planta, como se muestra en la Cuadro 3 para el caso de la planta de octavo orden estudiada.

En las Figuras 9 y 10 se muestra la respuesta del sistema de control como regulador y como servomecanismo respectivamente, para la planta de tercer orden con tres conjuntos de parámetros. En este caso las respuestas fueron relativamente parecidas.

Por el contrario en el caso de la planta de octavo orden, para la cual las respuestas del regulador y el servomecanismo se muestran en las Figuras 11 y 12 respectivamente, es evidente la gran diferencia que muestran todas ellas y como la respuesta de los sistemas de control sintonizados con las nuevas ecuaciones (10) a (12), aunque no óptimas, tuvieron un comportamiento que, para este caso particular, podría ser más deseable que el proporcionado por la sintonización óptima, por ser menos oscilatorias y tener tiempos de asentamiento menores.

4.4 Influencia de la bondad del modelo

En las pruebas anteriores para la planta de octavo orden, se comparó el comportamiento de los sistemas de control con los parámetros óptimos determinados a partir de la función de transferencia de la planta, con el obtenido con los parámetros calculados a partir del modelo de primer orden más tiempo muerto, con las nuevas ecuaciones de sintonización que se han determinado.

Para analizar el efecto que sobre el índice de desempeño puede tener el modelo identificado para el sistema, se obtuvo un modelo de segundo orden utilizando el método de tres puntos de (Stark y Mollempak, 1984), resultando éste ser la siguiente función de transferencia:

$$G_{m2}(s) = \frac{0,0967e^{-3,149s}}{s^2 + 0,416s + 0,0967} \quad (14)$$

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros del controlador *PID* óptimos obtenidos por simulación utilizando el modelo exacto de la planta,

los modelos de segundo y primer orden identificados y los parámetros calculados a partir del modelo de primer orden utilizando las ecuaciones de sintonización (10) a (12) determinadas; también se incluye el valor del índice de desempeño *IAE* resultante con todos estos conjuntos de parámetros.

Si bien las ecuaciones de sintonización derivadas proveen una forma rápida de determinar los parámetros del controlador a partir de un modelo simple identificado para el proceso, de los resultados obtenidos es evidente que de poder contar con modelos más precisos es posible, mediante la realización de una optimización dinámica, obtener un conjunto de parámetros que brinden un mejor desempeño.

Los resultados mostraron que si se realiza la optimización con el mismo modelo de primer orden utilizado para el cálculo de los parámetros la mejora es insignificante, solo un 0,66 % en el caso del regulador y un 1,55 % para el servomecanismo, sin embargo, si se utiliza el modelo de segundo orden la mejora es mayor, 15,6 % en el caso del regulador y un 3,1 % en el caso del servomecanismo. Debe destacarse que las respuestas obtenidas a partir de la optimización con el modelo de segundo orden son en este caso, solamente un 2,47 % (regulador) y un 3,92 % (servomecanismo) inferiores a la óptima con el modelo exacto.

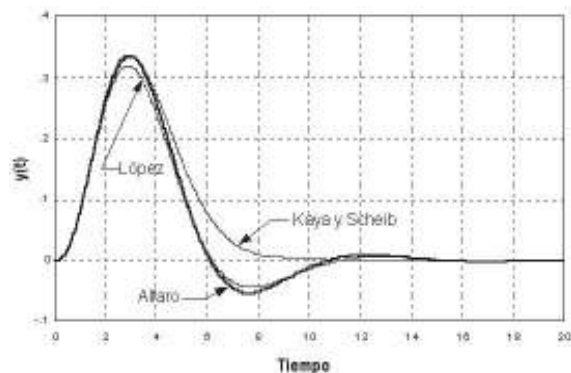


Figura 9. Respuesta a una perturbación planta de tercer orden

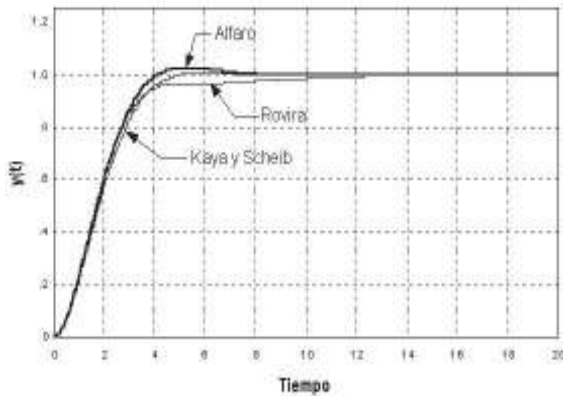


Figura 10 Cambio en el valor deseado, planta de tercer orden

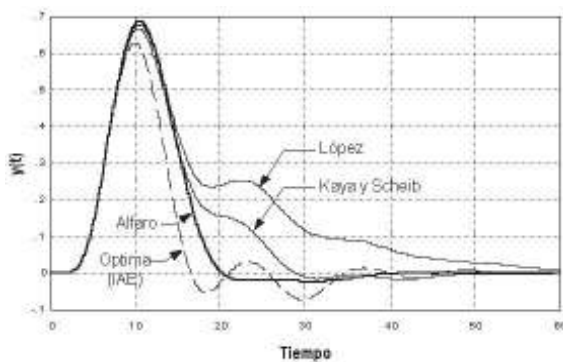


Figura 11. Respuesta a una perturbación, planta de octavo orden.

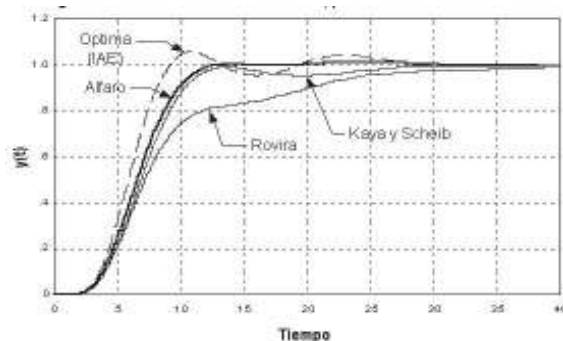


Figura 12. Cambio en el valor deseado planta de octavo orden.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se desprende que mediante la optimización dinámica de una función de costo basada en el error u otra característica de la respuesta del sistema, es posible determinar los parámetros del controlador que brindan el valor mínimo de la misma y que estos valores pueden utilizarse para determinar, como en el caso presentado, ecuaciones simples de sintonización del controlador.

Las ecuaciones (10) a (12) determinadas para la selección de los parámetros de un controlador *PID-Ideal* que optimiza el índice de desempeño *IAE* tanto como regulador y como servomecanismo, tienen la ventaja sobre las de otros métodos existentes, que extienden su validez a plantas dominadas por el tiempo muerto, en particular son válidas para valores de $0,05 \leq t_m / \leq 2,0$.

Los resultados comparativos obtenidos también permiten concluir que un mejor modelo conduce a mejores resultados de la optimización y que la determinación de los parámetros óptimos se puede hacer en forma rápida a partir del modelo identificado utilizando un programa de simulación y optimización dinámica como el VisSim®.

SIMBOLOGÍA

| | |
|----------|--|
| $G_p(s)$ | Función de transferencia de la planta |
| $G_c(s)$ | Función de transferencia del controlador |
| k_p | Ganancia estática |
| | Constante de tiempo |
| t_m | Tiempo muerto aparente |
| s | Variable compleja |
| k_c | Variable compleja |
| T_i | Tiempo integral |
| T_d | Tiempo derivativo |
| $e(t)$ | Señal de error |
| $r(t)$ | Valor deseado |
| $y(t)$ | Variable controlada |
| $z(t)$ | Perturbación |

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, V. M. (1993) ¿Son todos los controladores PID iguales?, *Ingeniería*, 1 (3), 11-19.
- Alfaro, V. M. (2001). *Métodos de sintonización de controladores PID – comparación por simulación*, Proyecto de Investigación N° 731-A0-160, Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, (Rev. Nov. 2002)
- Arrieta, O. (2003). *Comparación del desempeño de los métodos de sintonización de controladores PI y PID basados en criterios integrales* (Publicación interna). Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.
- Aström, K. J. & Hägglund, T. (2000). Benchmark systems for PID control, *IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control*, April, 5-7.
- Coleman, T., Branch, M. H., Grace, A. (1999). *Optimization toolbox for use with MATLAB –User's Guide, Version 2. The Matworks, Inc.*
- Ho, W. K., Hang, C. C., Cao, L.S. (1985). Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications. *Automatica*, 3(31), 497-502.
- Kaya, A. & Sheib, T. J. (1988). Tuning of PID controllers of different structures. *Control Engineering*, December, 62-65.
- López, A. M., Miller, J. A., Smith, C. L., Murrill P. W. (1967). Tuning controllers with error-integral criteria. *Instrumentation Technology*, November.
- Nishikawa, Y., Sannomiya, N., Ohta, T., Tanaka H. (1984). A method for auto-tuning of PID control. *Automatica*, 3(20), 321-331.
- Rovira, A., Murrill, P. W., Smith C. L. (1969). Tuning controllers for setpoint changes. *Instrumentation & Control Systems*, December, 67-69.
- Stark, D. M., en Mollempak, R. A. (1984). *Introduction to automatic process control*, EUA: Instrument Society of America.
- Sung, S.W., O, J., Lee, I. B. Lee J. Yy, S. H. (1996). Automatic tuning of PID controller using second-order plus time delay model. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 6(29), 990-999.
- Visual Solutions (1999). *VisSim User's Guide Version 3*, Westford, Ma., EUA, Visual Solutions.
- Wills, D. M. (1962a). Tuning maps for three-mode controllers. *Control Engineering*, April, 104-108.
- Wills, D. M. (1962b). A guide to controllers tuning. *Control Engineering*. August, 93-94

SOBRE EL AUTOR**Víctor M. Alfaro**

Profesor Asociado, Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.

Apartado postal 2-10, 2060 UCR, San José, Costa Rica.

Teléfono: 207-4472, Facsímil: 207-4139

Correo electrónico: valfaro@eie.ucr.ac.cr

El presente trabajo fue realizado como parte del proyecto N° 731-A0-169 inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.