
Comparación entre diferentes procedimientos de ajuste de controladores PID. I. Valores máximos de la variable controlada y de la señal reguladora

**Eduard Barberà, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull
Via Augusta 390, 08017-Barcelona, Spain**

*Comparison between different tuning methods of PID controllers. II.
Gain and phase margins and behavior as regulator*

*Comparació entre diferents procediments d'ajust de controladors PID.
II. Marges de guany i fase i comportament com a regulador*

Recibido: 11 de marzo de 2013; revisado: 17 de octubre de 2013; aceptado: 22 de octubre de 2013

RESUMEN

La doble normalización (ganancia y tiempo) de los procesos de primer orden con tiempo muerto (First Order Plus Dead Time, FOPDT) permite el análisis sistemático de la respuesta dinámica de los sistemas controlados, por lo que se presenta un ejercicio de comparación entre diferentes métodos de ajuste de controladores.

En este artículo la comparación se basa en el análisis de los márgenes de ganancia y de fase y en su comportamiento como regulador.

Palabras Clave: PI, PID, ajuste, margen de fase, margen de ganancia, regulador

SUMMARY

The double normalization (gain and time) of the processes of first order with dead time (First Order Plus Dead Time, FOPDT) allows the systematic analysis of the dynamic answer of the controlled systems, this is the reason to present an exercise of comparison between different methods of controller tuning.

On this article the comparison is based on the analysis of the gain and phase margins and its behavior like regulator.

Key words: PI, PID, tuning rule, phase margin, gain margin, regulator

RESUM

La doble normalització (guany i temps) dels processos de primer ordre amb temps morts (First Order Plus Time Delay, FOPDT) permet l'anàlisi sistemàtica de la resposta dinàmica dels sistemes de control, així que es presenta un exercici de comparació entre diferents mètodes d'ajust dels controladors.

En aquest article, la comparació es basa en l'anàlisi dels marges de guany i de fase i en el seu comportament com a regulador.

Paraules clau: PI, PID, ajustament, marge de guany, marge de fase, regulador

1. - INTRODUCCIÓN

A pesar de la existencia de las técnicas modernas de control, los controladores PID continúan siendo ampliamente utilizados en las plantas químicas. La sencillez, el bajo coste, la disponibilidad y los resultados satisfactorios obtenidos con este tipo de controladores hacen que los ingenieros los apliquen en muchos casos. Ya sea en forma analógica, tanto neumática como electrónica, o, actualmente, en su forma digital, los controladores PID son componentes habituales en las plantas industriales.

En consecuencia, el ajuste de los controladores PID es una tarea familiar para los ingenieros de control. Un controlador PID bien ajustado mejora la eficiencia de los procesos disminuyendo costes e incrementando la productividad, pero el ajuste no es siempre una tarea fácil para el ingeniero. Un ajuste defectuoso puede conducir a una pobre respuesta transitoria o, incluso, a la inestabilidad del sistema, pudiendo producir graves pérdidas o accidentes. Los procedimientos de ajuste de la ganancia y de los tiempos integral y derivativo han merecido la atención de los ingenieros desde 1942, cuando J.G. Ziegler y N.B. Nichols (1) publicaron la primera aproximación sistemática al tema. Los dos procedimientos publicados son completamente empíricos y están basados en la experiencia de sus autores.

La aplicación de este procedimiento no siempre conduce a resultados adecuados, incluso puede llevar a la inestabilidad del sistema. En consecuencia, han ido apareciendo diferentes procedimientos alternativos para mejorar el comportamiento de los sistemas controlados con PID, algunos se presentan a continuación:

K.L. Chien et al. (2) en 1952 proponen una estrategia diferente de ajuste de controladores PID.

En 1953, G.H. Cohen and G.A. Coon (3) introducen algunos cambios en las expresiones de Ziegler y Nichols para obtener mejores resultados cuando el proceso tiene un tiempo muerto dominante.

Más tarde, A.M. Lopez y col. (4) presentan una aproximación diferente para ajustar los parámetros del controlador basada en la minimización de diferentes criterios de error: CECI (Integral Square Error, ISE), CEAI (Integral Absolute Error, IAE) y CEAIT (Integral Time Absolute Error, ITAE).

Más recientemente, R. Padma Sree y col. (5) publican un nuevo procedimiento de ajuste para procesos de primer orden con tiempo muerto. En su trabajo utilizan una aproximación al tiempo muerto en el denominador de la función de transferencia de lazo cerrado.

El autor (6, 7) también ha contribuido con un procedimiento de ajuste que se basa en el procedimiento de doble normalización y en la optimización del criterio CEAIT. El procedimiento de doble normalización también ha sido utilizado, posteriormente, por C.R. Madhuranthakam et al. (8).

Se han escogido como parámetros de comparación entre los diferentes procedimientos de ajuste de controladores, los valores máximos de la variable controlada y de la señal reguladora, también llamada a veces variable manipulada, frente a un cambio del punto de consigna del tipo escalón. El valor máximo de la variable controlada proporciona la máxima desviación respecto del valor de régimen estacionario, este valor puede condicionar de forma importante el diseño del equipo y repercute directamente en la calidad del producto o servicio que produce el proceso, por tanto

será importante tanto en el coste de inversión como en el de funcionamiento.

El valor máximo de la señal reguladora está directamente relacionado con la dimensión del actuador, lo que tiene consecuencias económicas, dado que el coste del actuador depende de sus dimensiones.

Se ha elegido trabajar con un modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT) (ecuación 1) porque además de ser un proceso muy común, constituye una aproximación suficientemente correcta para finalidades de control en un elevado número de casos, con la excepción de aquéllos que posean subprocesos muy subamortiguados.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (\text{ec. 1})$$

2. - COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE AJUSTE: VALORES MÁXIMOS DE LAS VARIABLES CONTROLADA Y MANIPULADA

Las expresiones matemáticas para el cálculo de los parámetros del controlador correspondientes a cada procedimiento se pueden encontrar en la bibliografía reseñada.

- Ziegler - Nichols

Fue el primer procedimiento de ajuste aparecido (1), se aplica con resultados aceptables en los procesos de tiempo muerto normalizado no dominante, es decir, tiempo muerto menor que la constante de tiempo.

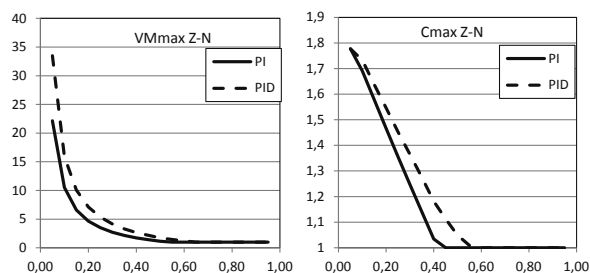


Figura 1: Valores máximos de la señal reguladora (VM) y de la variable controlada (C) en función del tiempo muerto normalizado

Los procesos de bajo tiempo muerto tienen valores máximos muy elevados (Fig.1), un valor de variable manipulada de 20 supondría que la dimensión del actuador debería ser 20 veces mayor que la necesaria para mantener el régimen estacionario deseado, lo que lo hace totalmente inviable desde el punto de vista económico.

Así mismo, un sobreimpulso del 70% es excesivamente grande y puede ser completamente inasumible, por ejemplo: si la temperatura correcta de funcionamiento de un biorreactor para un proceso determinado es de 30°, en la fase transitoria se alcanzaría una temperatura de 50° lo que podría comportar la pérdida de actividad del catalizador, enzima o microorganismo, o el deterioro de sustancias termolábiles.

Cuando el tiempo muerto es dominante, los valores máximos de la variable controlada alcanzan la unidad, este hecho supone la ausencia de un máximo sobreimpulso, lo que, en principio podría parecer positivo, pero se obtiene a costa de suponer un tiempo de establecimiento exageradamente grande, por lo que no se considera deseable.

Una buena velocidad de respuesta comporta la presencia de un sobreimpulso, por lo que su presencia es deseable siempre que sea un valor modesto.

- Chien et al.

Estos autores (2) presentan dos posibilidades, una que intenta obtener una respuesta sin máximo sobreimpulso (overshot), y otra, cuyo objetivo es alcanzar un máximo sobreimpulso del 20%.

Sin máximo sobreimpulso

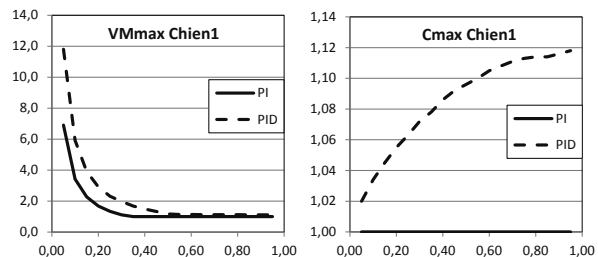


Figura 2: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Se puede apreciar una gran mejora en los resultados respecto del procedimiento de Ziegler y Nichols en todos los parámetros. La reducción en los valores del CEAIT es extraordinaria, principalmente a valores altos de tiempo muerto (7).

El objetivo de alcanzar sobreimpulso nulo se cumple perfectamente en el caso del controlador PI, para el PID el máximo sobreimpulso se acerca al 12%, lo que constituye un valor aceptable.

Sobreimpulso del 20%

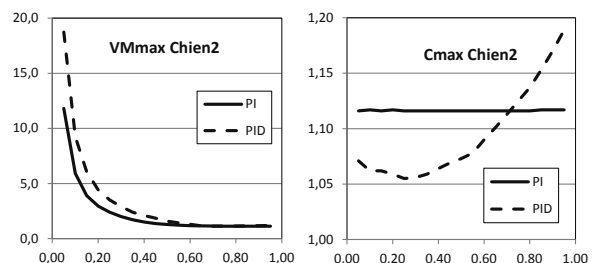


Figura 3: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Se puede apreciar un aumento de los valores máximos de las señales reguladoras respecto del procedimiento anterior a valores bajos de tiempo muerto normalizado.

El máximo sobreimpulso para el controlador PI se mantiene muy constante e inferior del valor de diseño, 20%. Para el controlador PID existe una mayor variabilidad.

- Cohen - Coon

Los autores (3) presentan unas modificaciones a las expresiones de Ziegler y Nichols introduciendo la relación entre el tiempo muerto y la constante de tiempo.

Este cambio tiene el objetivo de mejorar el comportamiento cuando el tiempo muerto es significativamente mayor que la constante de tiempo. Cuando el tiempo muerto es pequeño el ajuste se aproxima al obtenido con el método de Ziegler-Nichols, se puede comprobar fácilmente que las expresiones coinciden para $R = 0$, donde R es el cociente entre el tiempo muerto y la constante de tiempo (3).

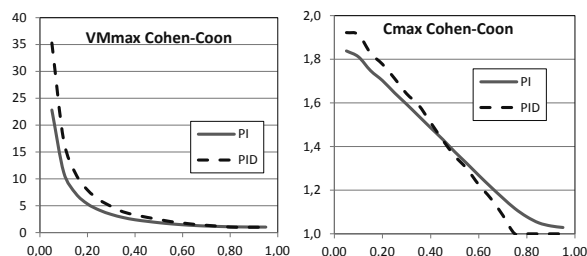


Figura 4: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Los valores máximos de variable controlada y de variable manipulada continúan siendo demasiado grandes a valores de tiempo muerto pequeños. El máximo sobreimpulso llega a cero en el caso del controlador PID a tiempo muerto muy grande, indicando que se alcanza el valor final lentamente y sin sobrepasar el punto de consigna.

- Lopez et al.

Estos autores (4) presentan algunas expresiones matemáticas para los parámetros de control obtenidas minimizando los criterios de error CECI, CEAI y CEAIT para controladores P, PI y PID.

En este estudio se han utilizado únicamente las expresiones obtenidas en la minimización del CEAIT para controladores PI y PID.

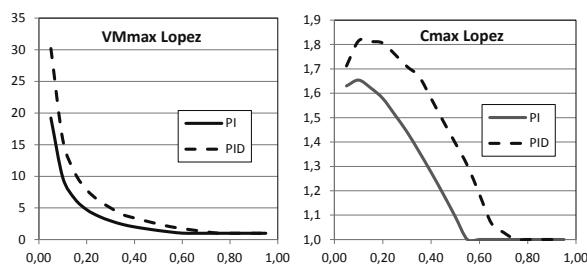


Figura 5: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Tal como se puede apreciar (Fig. 5), los resultados mejoran los obtenidos mediante el procedimiento de Ziegler y Nichols.

- Padma Sree et al.

En esta publicación (5) se presenta un procedimiento de ajuste únicamente para controladores PID deducido a partir de la sustitución del tiempo muerto que aparece en el denominador de la función de transferencia de lazo cerrado por una aproximación por serie de Taylor.

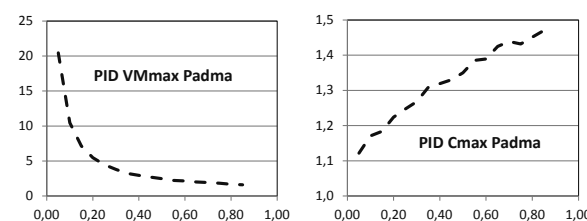


Figura 6: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Los valores máximos de la variable manipulada o señal reguladora siguen la misma tendencia que en todos los casos anteriores, el máximo sobreimpulso crece al aumentar

el tiempo muerto y se mantiene en valores altos aunque inferiores al 50 %.

- Barberà

Este procedimiento (6, 7), fue diseñado por el autor para optimizar el valor del CEAIT para un cambio escalón en el punto de consigna y utilizando el procedimiento de la doble normalización. Las expresiones siguientes permiten calcular los parámetros normalizados del controlador a partir del tiempo muerto normalizado, $\theta_N = \theta/(\theta+\tau)$ (6, 7). La aplicación del controlador a un caso real requiere la posterior inversión de la normalización en la ganancia y en el tiempo (6,7).

PI

$$K = \frac{1}{1.5853\theta_N^2 + 2.0214\theta_N + 0.00911} \quad T_i = 0.9894 \exp(-0.9707\theta_N) \quad (\text{Ec. 2})$$

PID

$$K = \frac{1}{2.2132\theta_N^2 + 1.0802\theta_N + 0.001045} \quad T_i = 1.3167 \exp(-1.1734\theta_N) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$T_d = \frac{-0.2088\theta_N + 0.2371}{K}$$

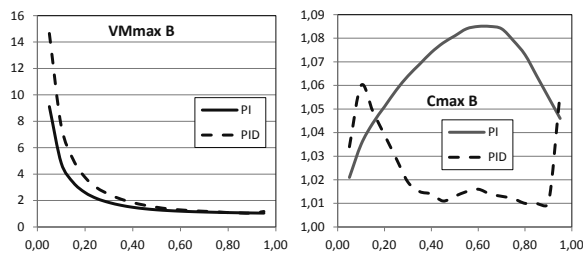


Figura 7: Valores máximos de la variable manipulada y de la variable controlada en función del tiempo muerto normalizado

Aunque los valores máximos de la variable manipulada siguen la misma tendencia que en todos los casos anteriores, se mantienen en valores inferiores respecto de los otros procedimientos, aunque siguen siendo excesivos para valores pequeños de tiempo muerto.

Respecto al sobreimpulso, se comprueba que en ningún caso se supera el 10%.

Debido a los resultados anteriores, se ha considerado oportuno comprobar la influencia que tendría la limitación en la variable manipulada en el valor del criterio CEAIT. Se contemplan dos casos posibles: un actuador sobredimensionado cuatro veces mayor que el necesario para mantener el valor de régimen estacionario y otro, más normal, dimensionado al doble.

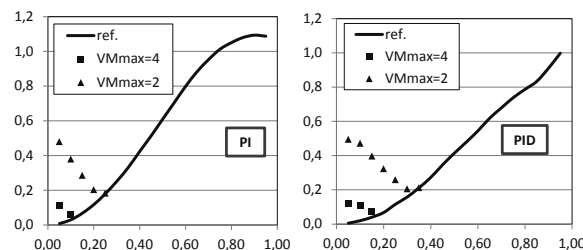


Figura 8: Valores de CEAIT con limitación en el valor de la señal reguladora o variable manipulada en función del tiempo muerto normalizado

La limitación en la variable manipulada provoca una respuesta más lenta del sistema, incrementando los valores de CEAIT.

Tal como se puede apreciar, la influencia se nota en los valores pequeños de tiempo muerto normalizado y más para el controlador PID que para el PI, siendo mayor cuanto mayor es la limitación.

Aunque los valores de CEAIT pueden llegar a ser muy superiores al haber limitación en la señal reguladora, se comprueba que se mantienen en valores aceptablemente pequeños.

No se ha extendido este último estudio al resto de procedimientos por conducir éstos a valores máximos excesivamente grandes de la variable manipulada.

3. - CONCLUSIONES

Con el método de doble normalización se puede explorar de forma muy exhaustiva las cualidades de cualquier procedimiento de ajuste de controladores para procesos de tipo 0, más concretamente, este trabajo se ha limitado a procesos de primer orden con tiempo muerto.

Se han comparado diversos procedimientos, analizando los valores máximos de la variable controlada y de la manipulada, éstos constituyen valores muy representativos para evaluar la bondad del controlador obtenido. Se puede concluir que el procedimiento del autor es el que proporciona los mejores resultados respecto a los valores máximos de las variables controlada y manipulada.

4. - REFERENCIAS

1. J.G. Ziegler; N.B. Nichols, Optimum settlings for automatic controllers, ASME Transactions, 64, 759-768 (1942)
2. K.L. Chien; J.A. Hrones; J.B. Reswick, On the automatic control of generalized passive systems, ASME Transactions, 74, 175-185 (1952)
3. G.H. Cohen; G.A. Coon, Theoretical considerations of retarded control, ASME Transactions, 75, 827-834 (1953)
4. A.M. Lopez; J.A. Miller; C.L. Smith; P.W. Murrill, Tuning controllers with error-integral criteria, Instrumentation Technology, 57-62 (1967)
5. R. Padma Sree; M.N. Srinivas; M. Chidambaram, A simple method of tuning PID controllers for stable and unstable FOPTD systems, Computers and Chemical Engineering, 28, 2201-2218 (2004)
6. E. Barberà, First order plus dead-time (FOPDT) processes: A new procedure for tuning PI and PID controllers, 10 Mediterranean Congress of Chemical Engineering, Barcelona, november 15-18 (2005)
7. E. Barberà, Procesos de primer orden con tiempo muerto (FOPDT): Un nuevo procedimiento para el ajuste de controladores PI y PID, Laboratorios y proveedores, (150), 53, marzo-abril (2006)
8. C.R. Madhuranthakam, A. Elkamel, H. Budman, "Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes", Chemical Engineering and Processing, 47, 251-264 (2008)