

Controladores PID: algoritmos y estructuras

Fernando Morilla García

Fernando Morilla García es profesor titular del área de Ingeniería de Sistemas y Automática, en el departamento de Informática y Automática de la Facultad de Ciencias, UNED.



Sumario

1. Introducción
2. Algoritmos de control PID
3. Estructuras de control PID
4. El control PID en los reguladores industriales
5. Conclusiones
6. Bibliografía

Palabras clave:

*Controladores PID
Algoritmos de control*

Keywords:

*PID Controllers
Control algorithms*

El efecto de los parámetros sobre la respuesta de un sistema de control PID depende del tipo de algoritmo que utilice el controlador, lo cual puede acarrear más de una sorpresa cuando llega la hora de sustituir un controlador de planta por otro diferente. El presente artículo arroja un poco de luz a la cara oculta de las especificaciones de los controladores comerciales, indicando las relaciones que existen entre los distintos tipos de algoritmos y estructuras PID.

The effect of parameters on the response of a PID control system depends on the type of algorithm used by the controller, and this can cause its fair share of surprises when substituting one plant controller for another. This article throws some light on the specifications of commercial controllers, indicating the relations that exist between different types of algorithm and PID structures.

Controladores PID: algoritmos y estructuras

1. Introducción

En los últimos veinticinco años se han producido grandes avances en la teoría de sistemas, en la electrónica y en la informática que han facilitado la utilización, en aplicaciones reales, de complejos algoritmos de control. Sin embargo, el controlador PID sigue siendo el equipo más utilizado en la regulación de procesos industriales.

Las razones por las que los modernos algoritmos de control no han conseguido desplazar al PID hay que buscarlas no sólo en sus dos grandes ventajas (la robustez y las intuitivas relaciones entre sus parámetros y la respuesta del sistema) sino también en que, dada su flexibilidad, el control PID se ha podido beneficiar de esos avances.

La prueba más clara de la evolución en los controladores PID es que la mayoría de los fabricantes están dotando a sus reguladores industriales de ayudas al operario en el ajuste de parámetros (sintonía automática o presintonía), o de procedimientos para el ajuste automático de parámetros cuando las condiciones de funcionamiento del sistema así lo requieran (autosintonía). Sin entrar en los aspectos de sintonía y de autosintonía que serán objeto de estudio en otro artículo, en este trabajo se hace una revisión de los diferentes algoritmos y estructuras de control PID, que tienen una importancia relativa en el ajuste de los parámetros.

2. Algoritmos de control PID

En los reguladores industriales es frecuente encontrar distintas versiones del algoritmo de control PID. Cualquiera de ellas se puede considerar como perteneciente a uno de los tres grupos de controladores PID (no interactivos, interactivos y paralelos), cuyo diagrama de bloques y función de transferencia se resume en la figura 1. En dicha figura los bloques P, I

y D en el paralelo representan cada una de las acciones básicas de control, el bloque D en el interactivo es equivalente a un bloque PD clásico con ganancia proporcional a la unidad, y los bloques PI y PID representan las combinaciones clásicas de las acciones de control. No obstante, los fabricantes emplean de forma diferente estos términos, de manera que la única forma de saber qué tipo de algoritmo incorpora un determinado regulador es comparar la ecuación del controlador con las de la figura 1.

Se conoce con el nombre de *algoritmo no interactivo* de control PID al algoritmo clásico. Con el calificativo de no interactivo se quiere poner de manifiesto que las acciones de control integral y derivativa son independientes, aunque exista un parámetro del controlador, la ganancia proporcional K_p , que afecte a las tres acciones (proporcional, integral y derivativa). Este algoritmo está considerado como estándar por la ISA (*Instrument Society of America*), es el más citado en la bibliografía y el más utilizado actualmente.

Se denomina *algoritmo interactivo* de control PID al algoritmo generalmente empleado en los antiguos reguladores analógicos. Con el calificativo de interactivo se quiere recalcar que la modificación en cualquiera de las constantes de tiempo T_I' o T_D' afecta a las tres acciones (proporcional, integral y derivativa), tal como se entienden dichas acciones en el algoritmo clásico.

Finalmente, se conoce como *algoritmo paralelo* de control PID al algoritmo que permite modificar cada acción por separado. Con el calificativo de paralelo se quiere indicar que las tres acciones (proporcional, integral y derivativa) son independientes.

El estudio de los tres tipos de algoritmos de control PID permite establecer unas relaciones de equivalencias entre ellos. Conocidos los parámetros de un determinado tipo de controlador, la tabla 1 da las fórmulas necesarias para obtener los parámetros de otro tipo de controlador que sea equivalente a él. Es-

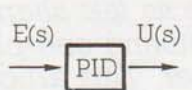
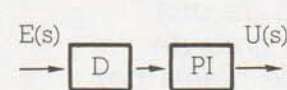
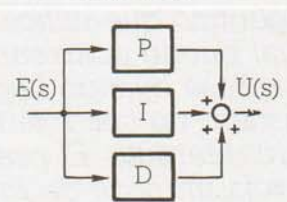
Controladores PID			
Tipo	No interactivo	Interactivo	Paralelo
Diagrama de bloques			
Función de transferencia	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$	$K_p' \left(1 + \frac{1}{T_I' s} + T_D' s \right)$	$K_p'' + \frac{1}{T_I'' s} + T_D'' s$

Fig. 1. Tres algoritmos de control PID

$$K_p' \left(1 + \frac{1}{T_I' s} \right) (1 + T_D' s)$$

Controladores PID: algoritmos y estructuras

tas fórmulas son muy útiles cuando se quiere sustituir un controlador por otro, sin que el lazo de control se altere.

La funciones de transferencias de la figura 1 se conocen con el nombre de *ideales* porque, en la práctica, el cálculo de la derivada es imposible de realizar y se sustituye por una pseudoderivada. En el caso no interactivo, la parte derivativa se sustituye por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = \frac{K_p T_D s}{\beta T_D s + 1} \quad (1)$$

Siendo $\beta < 1$ el factor de filtro derivativo, que toma valores típicos entre 0,05 y 0,1. Esta modificación se puede interpretar como que la acción derivativa ideal es filtrada por un sistema de primer orden con constante de tiempo βT_D . La nueva acción derivativa actuará como verdadera derivada sólo a frecuencias bajas, y su ganancia a altas frecuencias está limitada a K_p/β . Luego el ruido a altas frecuencias será amplificado como mucho por ese valor y no por un valor elevado como en el caso ideal.

En la realización práctica de un controlador PID interactivo, el bloque D se sustituye por una red de adelanto, dada por la siguiente función de transferencia, con valor típico $\beta' = 0,1$. El efecto que se obtiene es similar al caso anterior, pero no el mismo a igualdad de factores $\beta' = \beta$.

$$\frac{1 + T_D' s}{1 + \beta' T_D' s} \quad (2)$$

La figura 2 es un ejemplo de sistema de control realimentado, mientras que la figura 3 muestra, mediante simulación, lo que puede ocurrir si el controlador PID inicial, que era de tipo no interactivo y se había ajustado adecuadamente, se sustituye por un PID interactivo o paralelo con los mismos parámetros de control. Se observa que la respuesta del sistema para cambios en la temperatura de consigna o en la carga ha empeorado en ambos casos. Esta situación se puede evitar si los nuevos valores de los parámetros de control se calculan aplicando las fórmulas de conversión.

3. Estructuras de control PID

El sistema de control PID permite una gran flexibilidad, no sólo en el algoritmo de control, sino también por lo que se refiere al tratamiento de la señal de re-

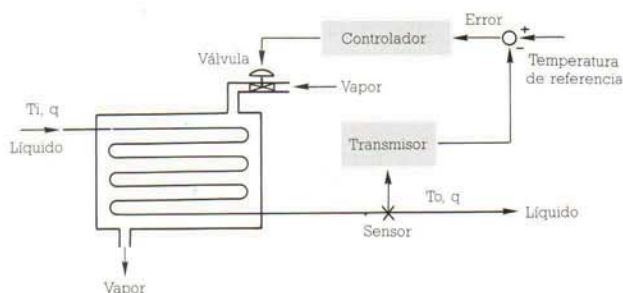


Fig. 2. Sistema de control en un intercambiador de calor.

ferencia. Algunos fabricantes incorporan esta última característica en sus reguladores industriales, lo que permite elegir entre diferentes estructuras de control. La figura 4 muestra las tres posibles estructuras de control PID.

La elección de una u otra estructura no afecta a la estabilidad del sistema en lazo cerrado, pues la ecuación característica es la misma en los tres casos, ni afecta a la respuesta del sistema a cambios en la carga, pero en cambio sí afecta a la respuesta del sistema para cambios en el punto de consigna.

Nuestra experiencia [4] nos permite afirmar que, en igualdad de condiciones, es decir, con los mismos parámetros de control, los cambios de estructura tienen las siguientes consecuencias:

- El cambio de estructura PID a PI-D suele dar lugar a respuestas con mayor tiempo de subida y mayor sobrelongación (para cambios del punto de

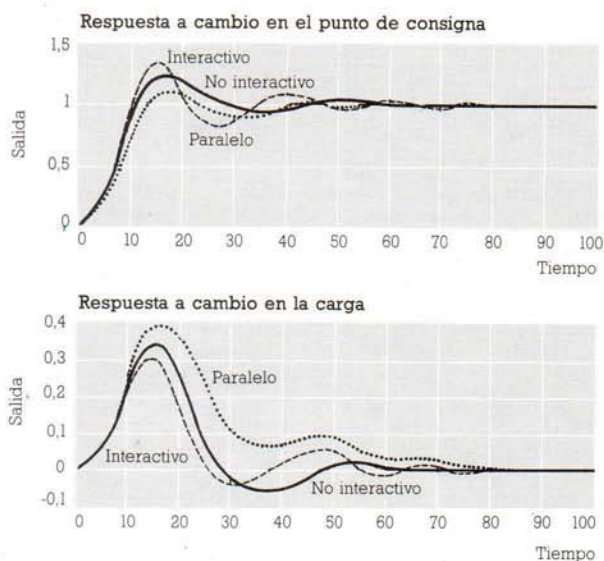


Fig. 3. Ejemplo del efecto que, sobre las repuestas del sistema, puede tener el cambio de algoritmo de control.

Controladores PID: algoritmos y estructuras

PID	Parámetros		
No interactivo	K_p	$K_p' \left(1 + \frac{T_D'}{T_I'}\right)$	K_p''
	T_I	$T_I' + T_D'$	$K_p'' T_I''$
	T_D	$\frac{T_I' T_D'}{T_I' + T_D'}$	$\frac{T_D''}{K_p''}$
Interactivo	$\frac{K_p}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_D}{T_I}}\right)$	K_p'	$\frac{K_p''}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 T_D''}{T_I'' K_p''^2}}\right)$
	$\frac{T_I}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_D}{T_I}}\right)$	T_I'	$\frac{K_p'' T_I''}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 T_D''}{T_I'' K_p''^2}}\right)$
	$\frac{T_I}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{T_D}{T_I}}\right)$	T_D'	$\frac{K_p'' T_I''}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 T_D''}{T_I'' K_p''^2}}\right)$
Paralelo	K_p	$K_p' \left(1 + \frac{T_D'}{T_I'}\right)$	K_p''
	$\frac{T_I}{K_p}$	$\frac{T_I'}{K_p'}$	T_I''
	$K_p T_D$	$K_p' T_D'$	T_D''

Tabla 1. Fórmulas de conversión entre controladores PID.

Controladores PID: algoritmos y estructuras

consigna) y por tanto suele alargar el transitorio. Al mismo tiempo, este cambio de estructura implica una gran reducción en el valor inicial de la señal de control pero no una mejora en su evolución. De ahí que *la estructura PI-D no signifique una mejora en la respuesta del sistema.*

- El cambio de estructura PID a I-PD da lugar a respuestas con mayor tiempo de subida, menor sobrelongación y prácticamente el mismo tiempo de asentamiento, por tanto mejora el transitorio. Todo ello con un esfuerzo mucho menor en la señal de control, lo que hace *muy recomendable la estructura I-PD en sistemas de control sometidos a grandes cambios en el punto de consigna.*

La figura 5 es un ejemplo de estas afirmaciones: muestra las diferencias en la evolución de la salida y de la señal de control para el sistema de la figura 2 cuando se utiliza el controlador PID no interactivo con los mismos parámetros de control pero con distintas estructuras.

4. El control PID en los reguladores industriales

Para sacar el máximo rendimiento a un determinado regulador industrial, es conveniente conocer su algoritmo de control PID, así como el tipo de estructura y el tipo de parámetros que emplea. Los fabricantes están muy poco por esta labor, porque suministran escasa información sobre el funcionamiento interno del bloque controlador y porque utilizan distinta terminología para describir los algoritmos y parámetros de control.

Sin embargo, a base de consultar folletos de las casas comerciales, artículos científicos y otras referencias, llegamos a las siguientes conclusiones:

- *El algoritmo no interactivo se ha impuesto en los controladores PID digitales, como lo son todos actualmente.* No obstante, algunos fabricantes, sirva de ejemplo el modelo CLC01 de *Bailey*, incorporan en sus equipos una serie de bloques básicos que permiten realizar cualquier tipo de algoritmo de control PID. Otros reguladores, como el *Electromax V* de *Leeds & Northrup*, utilizan el algoritmo paralelo.
- *Todos los reguladores industriales incluyen la estructura de control PID, de uso generalizado siempre que no sean frecuentes los cambios bruscos en el punto de consigna.* Pero algunos fabricantes incluyen además la posibilidad de elegir otra estructura, por ejemplo la PI-D en el modelo 53MC2002 de *Fischer & Porter* y la I-PD en el modelo UDC3000 de *Honeywell*.
- En cuanto a los parámetros de control, se impone

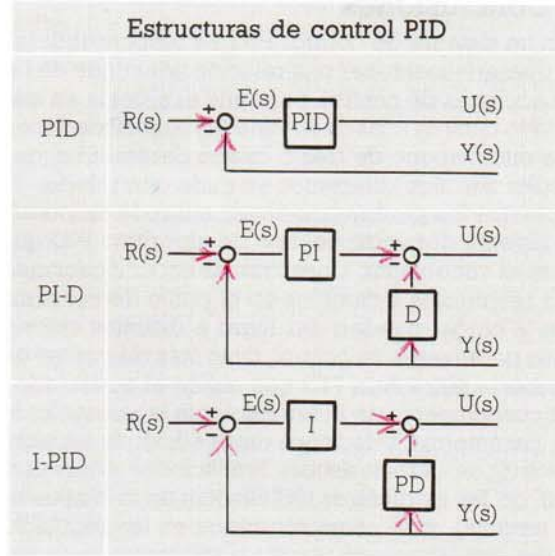


Fig. 4. Estructuras de control PID

el uso, ya tradicional, de la *banda proporcional* y también se observa un mayor uso de la *constante de tiempo integral*, salvo que el algoritmo de control sea paralelo e imponga la frecuencia de reposición. El modelo UDC3000 de *Honeywell* permite, sin embargo, el uso de ambos tipos de parámetros, según se desee. Pocos fabricantes, sirvan como ejemplo *Bailey* y *Leeds & Northrup*, incorporan filtro sobre la acción derivativa con parámetro variable. En el resto de los casos puede estar implícito el uso de un filtro con valor típico $\beta = 0,1$, pero no se dice explícitamente.

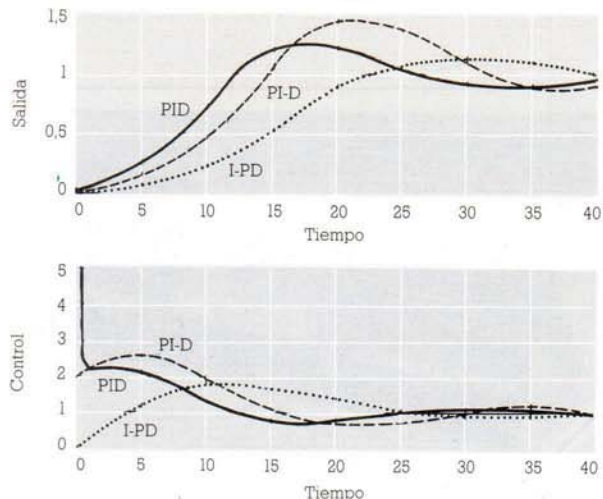


Fig. 5. Ejemplo del efecto que, sobre la repuesta del sistema a un cambio en el punto de consigna y sobre la señal de control, puede tener el cambio de estructura de control.

Controladores PID: algoritmos y estructuras

5. Conclusiones

En un sistema de control PID, es responsabilidad del operario mantener una relación adecuada de las tres acciones de control, para que el sistema en lazo cerrado cumpla unas determinadas especificaciones. Para ello dispone de tres o cuatro parámetros, que pueden ser algo diferentes en cada controlador. El efecto que los parámetros tienen sobre la respuesta del sistema depende del tipo de algoritmo PID que utilice el controlador. Unas mismas especificaciones, para respuestas a cambios en el punto de consigna y en la carga, pueden dar lugar a distintos valores de los parámetros de control, tanto más diferentes según sea la estructura PID que utilice el controlador.

El conocimiento de la terminología (acciones básicas, parámetros, relaciones entre ellos), de los algoritmos (tipos, características, limitaciones, equivalencias), de las estructuras (influencias en la respuesta del sistema), y de cómo se utilizan en los reguladores industriales, puede marcar la diferencia entre una acción correcta y otra equivocada en cuestiones tan prácticas como:

- la elección del regulador,
- la sustitución de un controlador PID analógico o digital por otro,
- el ajuste de los parámetros,

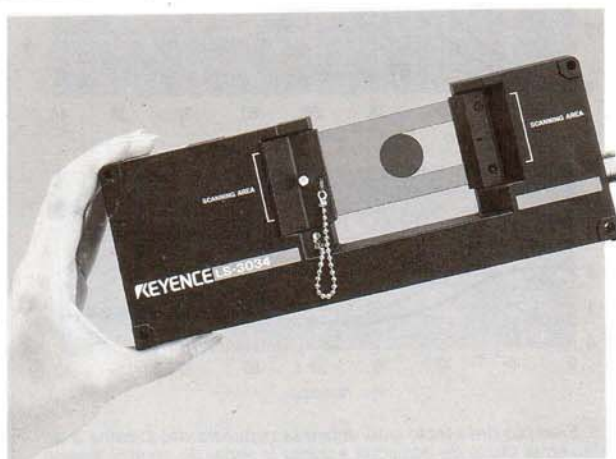
- la obtención del máximo rendimiento de un regulador.

Y a aquéllos que aún conservan la curiosidad que en su día les llevó a realizar una carrera técnica, saber estas cosas les permitirá encontrar una explicación a fenómenos que hasta ahora estaban envueltos de misterio.

6. Bibliografía

- [1] Dormido, S., De Prada, C. *Fundamentos y Técnicas Básicas en el Control de Procesos por Ordenador*. Notas del IV curso de Automática en la Industria. AEIA, 1984.
- [2] Gerry, J.P. A Comparison of PID Control Algorithms. *Control Engineering*, March 1987, pp. 102-105.
- [3] Kaya, A., Scheib, T.J. Tuning of PID Controls of Different Structures. *Control Engineering*, July 1988, pp. 62-65.
- [4] Morilla, F. *Contribución a los Métodos de Auto-sintonía de Reguladores PID*. Tesis doctoral. UNED, 1987.
- [5] Quevedo, J., Reus, J. Reguladores digitales. *Regulación y Mando Automático*, nº 147, Abril 1985, pp. 117-131.

AEI



MEDIDORES SIN CONTACTO DE:
DIAMETRO • EXCENTRICIDAD
DESPLAZAMIENTO • GROSOR

BITMAKERS S.L.

INGENIERIA ELECTRONICA • AUTOMATIZACION INDUSTRIAL

Alcolea, 123 - 1º - Tel. (93) 339 12 32 - Fax (93) 411 17 34 - 08014 BARCELONA