

# Práctica académica con un regulador tipo P alternativo, basada en PLC

J. Domingo, J. Segura, H. Martínez

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática i Informàtica Industrial (ESAII)

Grupo de Sistemas de Control Inteligente, SIC

Centro de Supervisión, Seguridad y Control Automático (CS2AC-UPC)

Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech (UPC)

Barcelona, <joan.domingo><joan.segura>@upc.edu

**Resumen**— En las asignaturas de materias de Control en los estudios de ingeniería, se incluyen conocimientos sobre reguladores continuos, siendo el más frecuente el del regulador proporcional, integral y derivativo, PID y las prácticas, por lo general, se realizan mediante reguladores industriales comerciales de este tipo. La parte, los conocimientos de automatización de la misma asignatura, realizan sus prácticas con controladores lógicos programables, PLC, y es cada vez más frecuente que dichos controladores incorporen reguladores PID con posibilidad de auto-sintonía.

No obstante, para PLC que no incorporen este tipo de recurso, existe la posibilidad de programar en ellos reguladores que no necesiten integradores ni derivadores, de forma sencilla, que aun presentar un cierto error estático, consideramos perfectamente admisibles para fines didácticos y amplían la diversidad de conocimientos de los estudiantes en esta materia, extendiéndola más allá del PID y sus variantes. En esta contribución se presenta una práctica con un regulador de tipo P alternativo que presenta un error estático que es sólo una fracción del error estático que presenta un regulador de tipo P convencional y que puede ser admisible para regular muchos procesos no críticos.

**Palabras clave:** controlador lógico programable, regulación proporcional, práctica académica.

## I. INTRODUCCIÓN

El control basado en reguladores proporcionales presenta un error estático irresoluble [1] mediante la estructura básica formada por un restador que permite comparar la entrada deseada con la salida obtenida del sistema (el error) y multiplicar por una cierta constante de proporcionalidad,  $k_p$ , dicho error para entregar este valor resultante a la entrada del sistema a regular.

Tanto un sistema de primer orden como de segundo orden, a lazo abierto, con ganancia  $K$ , presentarán el valor final en estado estable a su salida,  $Gy_0$ , que se establece en (1).

$$Gy_0 = K(SP + D) \quad (1)$$

En la figura 1 se puede ver el diagrama de bloques del que se obtiene dicha función, donde  $SP$  es el valor de la consigna y  $D$  el de la perturbación externa que se pueda producir entre el regulador y la entrada del sistema. Cuando se regula el sistema de la figura 1 con un regulador serie [2] de tipo proporcional en la forma que propone la figura 2, en la que se considera, asimismo, una entrada de perturbación entre la salida del regulador y la entrada del sistema, se tiene que la ganancia en estado estable es (2).

$$Gy_P = \frac{K(SP \cdot k_p + D)}{Kk_p + 1} \quad (2)$$

Debe destacarse que, si la perturbación está presente en la salida del sistema en vez de en la entrada, la expresión (2) diferiría algo (la perturbación no quedaría multiplicada por  $K$ ), pero el resultado obtenido, en cuanto a la ganancia, sería prácticamente el mismo, así como la acción de control. Por otra parte, la existencia de perturbaciones es quizás lo que da más sentido a la regulación en sí misma [3].

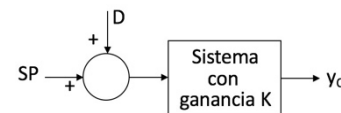


Fig. 1.- Sistema a lazo abierto con perturbación en la entrada.

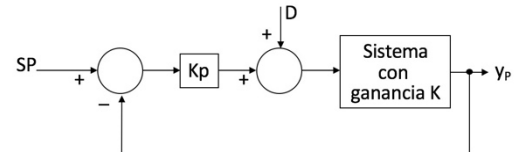


Fig. 2.- Sistema a lazo cerrado con un regulador de tipo P, con perturbación en la entrada.

A la vista de la expresión (2) es sencillo deducir que, para cualquier valor de la ganancia proporcional,  $k_p$ , el valor del estado final de la salida  $y_P$  del sistema siempre será inferior al del estado final de la salida a lazo abierto,  $y_0$ , y será inferior también sean cuales sean los valores de la consigna  $SP$ , de la perturbación  $D$  y de la ganancia  $K$  del sistema.

La existencia de esta limitación, para valores de consigna y perturbación constantes, exige que la ganancia proporcional  $k_p$  deba ser elevada para minimizar el efecto de este error estático, pero en contra de este aumento está el hecho de que la salida del controlador requerirá, si el sistema a controlar es de primer orden, valores muy elevados iniciales puesto que la constante de tiempo del conjunto regulador más sistema, disminuirá a medida que  $k_p$  aumente, y que si el sistema es de segundo orden, el sistema tenderá a ser más subamortiguado y se presentarán unas oscilaciones que aumentarán con el valor de  $k_p$ , añadido al elevado valor de salida que deberá suministrar el controlador al sistema durante el período transitorio inicial o cada vez que haya un cambio de consigna o se presente una perturbación. Así pues, es posible aumentar el valor de  $k_p$ , pero dentro de unos

límites que no hagan que se supere el rango de salida del regulador.

Es sencillo, entonces, comprobar en una práctica académica ambos comportamientos, tanto el de lazo abierto como el de lazo cerrado con un regulador proporcional convencional, sobre sistemas de primero y segundo orden, reforzando así el aprendizaje de los estudiantes.

En el caso de implementar un regulador a lazo cerrado con un controlador lógico programable (PLC) debe considerarse la limitación ocasionada por los valores de cálculo que se entreguen por la salida analógica hacia el sistema, porque a raíz de los cálculos, se pueden producir sobre-rangos que supongan que dicha salida no pueda suministrar. Por ello, en la práctica, deberá tenerse en consideración que, en función de algunos resultados de cálculo programados en el PLC, generalmente debidos al producto del error por  $k_p$  durante el período transitorio, se puede exceder del rango numérico para la representación interna de valores que utiliza el PLC que, en el caso del que se ha utilizado en la práctica que nos ocupa, y por la naturaleza de sus convertidores analógico-digitales y digitales-analógicos, operan entre los números enteros -27648 y +27649. Cualquier rebase de dichas cantidades generará un error en el PLC, se anulará cualquier valor a la salida y la acción de control deseada se perderá, lo que supondrá una evidencia de la limitación en los valores de  $k_p$ , así como, si se diera el caso de ganancias elevadas del sistema controlado,  $K$ , se deberían disponer atenuadores en el lazo de realimentación (que no es el caso de los sistemas de primero y segundo orden utilizados en la práctica que se plantea, puesto que son ambos de ganancia unitaria).

Por otra parte, el uso de enteros, no permite valores de  $k_p$  de tipo real, por lo que, si se desea utilizarlos, se deberá usar una estrategia que permita valores que, aun ser enteros, sean lo más parecidos posible a reales, consistente en multiplicar por una cierta cantidad y dividir posteriormente por otra, que puede ser 1 si se desea usar enteros. Así, un valor por ejemplo de  $k_p=2,5$  que sería un real, puede obtenerse estableciendo  $k_p=25$  y dividiendo por 10, puesto que tanto 25 como 10 son enteros.

Por ello, fijamos nuestro interés en casos básicos de sistemas sobre los que implementar reguladores en forma de práctica de laboratorio para estudiantes de ingeniería del ámbito industrial mediante una planta de primer orden basada en un filtro RC con ganancia unidad y constante de tiempo de 4,7 s y en otra de segundo orden basada en un filtro activo de Sallen-Key con estructura de pasa-bajos, como se puede ver en la figura 3, al que se han puesto dos seguidores de tensión para desacoplar impedancias respecto a la entrada y la salida analógicas del PLC y con respuesta subamortiguada.

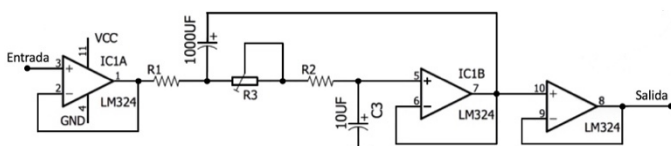


Fig. 3.- Sistema de segundo orden para realizar la práctica.

El sistema de la figura 3 se alimenta con una sola tensión de +10V para que la señal de entrada y salida sean compatibles con los niveles de las entradas y salidas analógicas del PLC y para ello se debe seleccionar un amplificador operacional con alimentación mono-tensión en vez de con tensión simétrica; se usa el LM324 por su simplicidad y bajo coste. En este circuito es posible ajustar la respuesta mediante el potenciómetro R3 para que varíe entre unos límites, posibilitando una infinidad de sistemas subamortiguados similares pero diferentes, lo que facilita que, a cada estudiante en prácticas, se le pueda asignar un sistema diferente para poderlo regular.

En el caso práctico de regulación proporcional que se plantea, lo que se persigue es el mejor seguimiento del valor de la consigna a fin de que el error  $e(t)$  sea nulo o lo más pequeño posible; ello se consigue plenamente en una práctica en la que se programa un control de tipo PID, aprovechando el que contiene internamente el PLC utilizado, un Siemens S7-1200 con CPU 1214C-AC/DC/Rly (entradas digitales a 24Vdc, salidas a relé y alimentación a 230Vac), con dos entradas analógicas de  $\pm 10Vdc$ , una salida analógica de +10Vdc, 14 entradas digitales a +24Vdc y 10 salidas a relé, libres de tensión. No obstante, se extiende el caso a no utilizar dicho recurso, utilizando un regulador proporcional alternativo.

II. REGULADOR DE TIPO PROPORCIONAL ALTERNATIVO

En la figura 4 se presenta una estructura de regulación alternativa a la convencional presentada en la sección anterior que supone añadir, solamente, un sumador más al programa que se implemente en un PLC cualquiera, con lo que la dificultad y coste añadido, son mínimos. La literatura consultada no refiere este tipo de regulador.

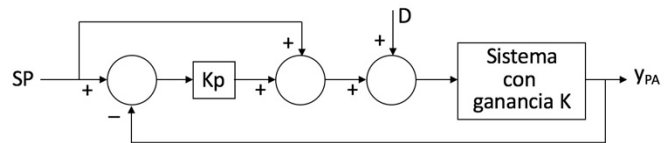


Fig. 4.- Sistema de regulación que incorpora un regulador proporcional alternativo.

La estructura de la figura 4 presentará el valor final en estado estable a su salida,  $G_{YPA}$ , que se establece en (3).

$$G_{YPA} = \frac{K[SP(k_p+1)+D]}{Kk_p+1} \quad (3)$$

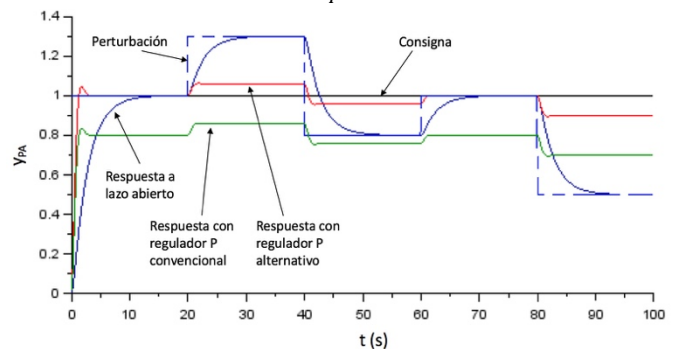


Fig. 5.- Sistema de segundo orden simulado,  $G(s)=1/(0,8s^2+2,8s+1)$ .

Este valor de ganancia en estado estable difiere del de la expresión (2), básicamente, en que el numerador contiene un

término  $k_p+1$  al igual que en el denominador por lo que, bajo determinadas condiciones, el error estático, será nulo, algo que es imposible en un sistema que incorpore un regulador de tipo proporcional clásico.

Si se comparan, a igualdad de condiciones, el sistema a lazo abierto, el sistema con regulador P convencional y con regulador P alternativo, se puede observar en la simulación de la figura 5, que el error estático mejora drásticamente con el regulador P alternativo, sometidos ambos reguladores a perturbaciones de valor elevado, tanto positivas como negativas.

En el caso de la figura 5 se ha simulado un sistema sobreamortiguado de segundo orden con  $K=1$ , con un valor de  $k_p=4$ , una consigna unitaria y diversos valores positivos y negativos de la perturbación D; dentro de la estructura del regulador, el sistema pasa a ser algo subamortiguado debido al valor de  $k_p$  y a que, tanto el coeficiente de amortiguación como la pulsación natural, se ven divididos por un factor  $k_p+1$ .

Debe considerarse que para el caso de ganancia  $K=1$  y sin perturbación, la expresión (3) se reduce al valor de la consigna, independientemente del valor de  $k_p$ , que sólo afectará a la pulsación natural y al factor de amortiguamiento en un sistema de segundo orden y en la constante de tiempo de un sistema de primero orden, sin error estático. En cambio, estas mismas condiciones para un regulador de tipo P convencional, la expresión (2) se convierte en la (4), donde no se consigue en ningún caso esta situación de error estático nulo y además el valor obtenido, siempre inferior a la unidad, depende del valor de  $k_p$ .

$$Gy_{PA} = \frac{k_p}{k_p+1} \quad (4)$$

### III. REDUCCIÓN DEL ERROR

El factor de reducción, FR, del error en estado final que se obtiene con el regulador proporcional alternativo respecto del regulador proporcional convencional, se puede demostrar que sigue la ley que se expresa en (5).

$$FR = \frac{SP \cdot K}{k_p+1} \quad (5)$$

Esta reducción depende del valor de la consigna SP, de la ganancia del sistema a lazo abierto, K, y de la ganancia proporcional  $k_p$ , pero es independiente de la perturbación D.

Como puede verse en la figura 6, el error se reduce en proporción inversa al valor de la ganancia proporcional  $k_p$ , algo que es favorable a la implementación de este tipo de regulador en un PLC puesto que las operaciones aritméticas más comprometidas, esto es, aquellas por las que se puede producir un sobre-rango en la salida analógica del PLC, que es quien lleva implementada la estructura del controlador, y que corresponden a la multiplicación entre el valor del error y la ganancia proporcional  $k_p$  y la suma de dicho resultado con el valor de la consigna SP, aumentan de riesgo a medida que  $k_p$  aumente.

Por ello, es importante utilizar valores pequeños de la constante  $k_p$ , algo interesante, además, puesto que la mayor ventaja del regulador alternativo respecto del convencional se obtiene con valores bajos de  $k_p$ .

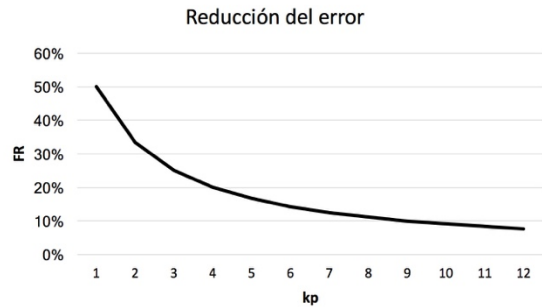


Fig. 6.- Factor de reducción, FR, del error entre un regulador P convencional y el P alternativo propuesto.

En las figuras 7 y 8 se pueden observar los errores que se obtienen para el regulador convencional y para el regulador alternativo, sometidos a una perturbación del +20% y del -20% respectivamente respecto del valor de consigna, que, en el caso de estas figuras, se ha tomado una consigna unitaria, para diferentes valores de  $k_p$ .

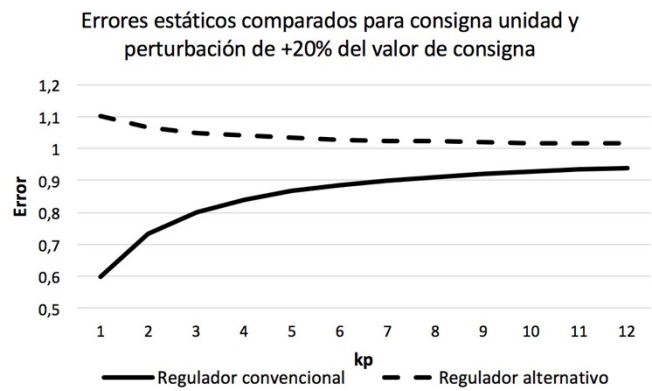


Fig. 7.- Comparación entre el error estático obtenido con un regulador de tipo P convencional y uno de tipo P alternativo para  $SP=1$  y  $D=0,2$ .

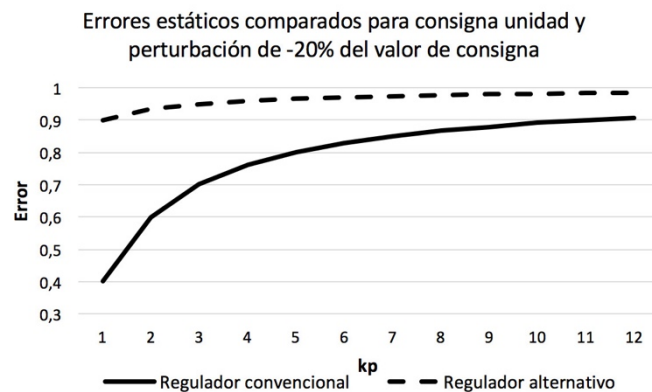


Fig. 8.- Comparación entre el error estático obtenido con un regulador de tipo P convencional y uno de tipo P alternativo para  $SP=1$  y  $D=0,2$ .

Evidentemente, estas curvas del valor del error estático varían con el valor de perturbación y de consigna, pero, en cualquier caso, se consigue la disminución del error en el caso

del regulador de tipo P alternativo respecto del convencional expresado en (5), con mayor beneficio cuando la ganancia proporcional,  $k_p$ , es baja.

Puesto que la perturbación, por su naturaleza, no es algo medible, puede determinarse su valor conociendo, por medición sobre el sistema, cuál es el error estático,  $G_{PA}$  y conocidos los valores de consigna,  $SP$ , ganancia proporcional,  $k_p$ , y ganancia del sistema a lazo abierto,  $K$ . El valor de la perturbación que actúa sobre el sistema, entonces, y aun no ser medible, podría calcularse con la expresión (6).

$$D = G_{PA} \left( k_p + \frac{1}{K} \right) - SP(k_p + 1) \quad (6)$$

#### IV. IMPLEMENTACIÓN

La implementación en un PLC del regulador alternativo propuesto arroja los resultados previstos y el programa es muy sencillo y al alcance de prácticamente cualquier PLC.

Desde el punto de vista de la estructura física que se pone a disposición del estudiante, el diagrama es el de la figura 9, en la que el sistema de segundo orden se puede cambiar por uno de primer orden, con un sencillo conmutador.

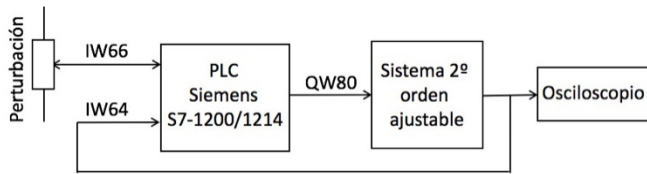


Fig. 9.- Elementos que intervienen en la práctica.

Se debe poner especial atención a considerar la importancia de declarar todas las variables analógicas como enteras INT con signo puesto que la mayoría de operaciones serán con signo.

#### V. PROGRAMA

El programa que se ha utilizado es relativamente breve, sólo de unas pocas líneas en lenguaje KOP, y cuyo algoritmo es el que se puede ver en la figura 10.

```

IF IO.1 = 1 AND IO.0 = 0
    MW00 ← consigna
    MW02 ← valor de  $k_p$ 
    MW04 ← MW0 - IW64
    MW06 ← MW4 x MW2
    MW10 ← MW06 + MW0
    MW12 ← MW10 + IW66
    QW80 ← MW12
END_IF

IF IO.0 = 1 AND IO.1 = 0
    QW80 ← #0000
END_IF
    
```

Fig. 10.- Algoritmo básico del regulador de tipo P alternativo.

La parte de la propia práctica de laboratorio, consiste en programar en el PLC los pasos del algoritmo de la figura 10 (donde las posiciones de memoria utilizadas pueden ser otras, naturalmente). A los estudiantes se les solicita que, frente a este algoritmo básico, programen diferentes mejoras incorporando líneas que saturen a un valor máximo la salida en caso de sobrerangos, cambiando diferentes consignas, y propongan valores conocidos de perturbación desde posiciones de memoria en vez de valores procedentes de una entrada analógica. A su vez, programan también un regulador proporcional convencional y comparan resultados.

El tiempo destinado a la práctica es de dos horas y el beneficio de aprendizaje derivado tanto del tiempo destinado en las horas de teoría, donde se simula el comportamiento de ambos reguladores, el convencional y el alternativo, como en la propia práctica, se observa en el proyecto de curso realizado en equipo que en la asignatura se solicita, relacionado con un proceso industrial de producción automatizada, puesto que los estudiantes escogen este tipo de regulador en las partes de regulación no-críticas, dejando el PID para la parte crítica y utilizando un solo PLC para el control del conjunto del proceso.

En el caso de la práctica, debe considerarse, adicionalmente, que la perturbación, aunque conste como una entrada al PLC, no necesariamente forma parte del regulador implementado, puesto que la magnitud analógica de salida del regulador reside en la posición de memoria MW10 y que se vería externamente afectada en más o en menos por la perturbación, pero que en el caso de la práctica, esta afectación se suma o resta al valor de la salida del regulador por lo que, la acción de control, no conoce el valor de dicha perturbación, tal como sucede en la realidad, donde el valor de la perturbación no es medible y, por tanto, no puede incorporarse al regulador.

La perturbación deberá añadirse a la entrada del sistema físico sin conocerse su valor (que se podría calcular a partir de (6)), siendo el PLC quien realice la operación numérica de suma o resta.

Asimismo, es cierto que la perturbación, tal como se plantea en el diagrama de la figura 9 sólo es positiva, pero se asume que el estudiante entenderá que igualmente podría tener dos signos, sin variar el espíritu de la práctica planteada. La evaluación consiste en determinar la calidad de las modificaciones establecidas por cada estudiante al algoritmo original básico.

#### VI. RESULTADOS

El tiempo necesario de la práctica para escribir el programa, añadido al de implementar un regulador de tipo proporcional convencional es muy bajo, y la mayor parte del mismo el estudiante lo emplea ajustando de forma empírica el valor de  $K_p$  para obtener la mejor respuesta del sistema y el menor error estático, no llegando al sobre-rango del PLC, a la vez que protegiendo al sistema contra ello.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 11 en la que se muestra la respuesta de un sistema de primer orden frente a tres valores de perturbación positiva.

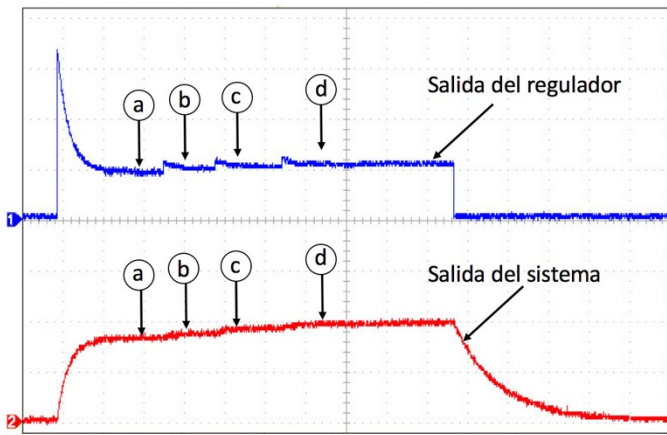


Fig. 11.- Señales de entrada y salida al sistema con un regulador de tipo P alternativo con  $k_p = 3$  y consigna de 1V para los siguientes casos: a) sin perturbación, b) con 16% de perturbación, c) 33% de perturbación y d) con 50% de perturbación.

Nótese en la figura 11 que una perturbación de hasta el 50% del valor de consigna supone una relativamente baja variación del valor final. Asimismo, debe señalarse que una perturbación del 50% es realmente una perturbación notable.

VII. CONCLUSIONES

Se ha presentado una práctica académica con un regulador de tipo proporcional alternativo implementado en un PLC y destinada a estudiantes de ingeniería de la rama industrial, de muy diferentes titulaciones, en una asignatura básica, común a todas las especialidades, que reduce notablemente el error estático, algo muy ventajoso para aquellos sistemas cuya regulación no sea crítica puesto que se tiene un error estático menor.

Con ello se consigue aproximar a los estudiantes a un tipo de regulador relativamente sencillo de implementar que puede ser una solución razonable a muchos casos donde la regulación no precise de una gran exactitud, como algunas presiones, velocidades, niveles o temperaturas.

La dificultad en la programación es mínima y los efectos de aprendizaje derivados, muy importantes desde el punto de vista ya no sólo de técnicas de regulación, sino también de los efectos negativos que se pueden desprender del uso inadecuado de los tipos de variables y de sus límites numéricos en PLC.

REFERENCIAS

[1] Ogata, K. "Ingeniería de control moderna". Pearson Educación. 4ª Edición, 2003.  
 [2] Kuo, B. "Sistemas de control automático". Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 7ª Edición, 1996.  
 [3] Åström, K. y Wittenmark, B. "Computer controlled systems. Theory and design". Prentice Hall Information and system sciences serie. Third edition. 1997. [Chapter 10: disturbances].

La presencia de la perturbación puede tenerse a) entre el regulador y la entrada del sistema, b) a la salida del sistema (algo que, al producirse una perturbación, producirá sobre-picos en la parte transitoria de la respuesta del regulador propuesto y que se deberán limitar saturando el valor de salida), o c) en el lazo de realimentación por error de medición (donde peor se comportarán tanto el regulador P como el P alternativo, en cuanto al error estático); en función de dónde se encuentre la perturbación, el error estático que se obtendrá en un regulador de tipo P y en uno de tipo P alternativo, será el de la tabla 1.

	<b>P</b>	<b>P alternativo</b>
<b>a</b>	$\frac{K(k_p \cdot SP + D)}{K \cdot k_p + 1}$	$\frac{K[SP(k_p + 1) + D]}{K \cdot k_p + 1}$
<b>b</b>	$\frac{K \cdot k_p \cdot SP + D}{K \cdot k_p + 1}$	$\frac{K \cdot SP(k_p + 1) + D}{K \cdot k_p + 1}$
<b>c</b>	$\frac{K \cdot k_p(SP - D)}{K \cdot k_p + 1}$	$\frac{K[SP(k_p + 1) - k_p D]}{K \cdot k_p + 1}$

Tabla 1.- Error estático comparado, en función de la situación de la perturbación.

Obsérvese la fuerte similitud entre los casos a) y b). Lo que expone que la perturbación antes o después del sistema controlado, prácticamente no afecta al error estático, y una notable diferencia con el caso c), en el que la perturbación estaría en el lazo de realimentación. Asimismo, es sencillo obtener la influencia sobre el error estático en el caso de perturbaciones múltiples en diferentes situaciones del lazo de control. Para aquellos casos en los que  $K=1$  y  $D=0$ , esto es, ganancia unitaria y sin perturbación, la tabla 1 pasaría a ser la tabla 2, en la que lógicamente, sin perturbación, los tres casos son el mismo.

	<b>P</b>	<b>P alternativo</b>
<b>a, b, c</b>	$SP \frac{k_p}{k_p + 1}$	$SP$

Tabla 2.- Error estático comparado, para  $K=1$  y  $D=0$ .

Para aquellos casos en los que  $K=1$  y  $D \neq 0$ , esto es, ganancia unitaria y con perturbación, la tabla 1 pasaría a ser la tabla 3.

	<b>P</b>	<b>P alternativo</b>
<b>a, b</b>	$\frac{k_p \cdot SP + D}{k_p + 1}$	$SP + \frac{D}{k_p + 1}$
<b>c</b>	$\frac{k_p(SP - D)}{k_p + 1}$	$SP - \frac{D}{1 + \frac{1}{k_p}}$

Tabla 3.- Error estático comparado, para  $K=1$  y  $D \neq 0$ .

Naturalmente, la respuesta del sistema, sea de primero o segundo orden, variará, algo que también es observable en la práctica y, por tanto, formativo para los estudiantes. En uno de primero orden la constante de tiempo disminuirá y en uno de segundo orden cambiarán tanto la pulsación natural como el coeficiente de amortiguamiento, desplazando los polos hacia el eje imaginario del plano s.