

Implementación Comercial del Algoritmo de Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

L. F. Rojas, *Student Member, IEEE*

Resumen--El ingeniero de control automático se enfrenta en su labor ante la problemática de que la estructura del algoritmo Proporcional Integral Derivativo (PID) propuesta en la teoría difiere de la implementada en los controladores comerciales.

Debido a que cada fabricante incorpora el PID de manera particular, surgió la necesidad de conocer la estructura de los controladores más representativos del mercado y de determinar cuál es el conjunto de modificaciones típicas. Con tal objetivo se acudió a los manuales del usuario de controladores de lazo y controladores lógicos programables.

Finalmente se obtuvo que el controlador más común en el mercado proviene de la forma ideal en el caso de los PLC mientras que es de la forma serie en los controladores de lazo; para ambos casos la derivada es aplicada sobre la señal realimentada e incluye una constante que limita la ganancia derivativa.

Palabras clave—adaptable, algoritmo, anti-reset windup, autosintonía, autómata programable, controlador lógico programable, función de transferencia, PID, PLC, proporcional-integral-derivativo, sintonización automática, transferencia sin saltos.

I. NOMENCLATURA

e	Error
$G_c(s)$	Función de transferencia del controlador
$G_p(s)$	Función de transferencia de la planta
h	Periodo de muestreo
ISA	The Instrumentation Systems and Automation Society
K_c	Ganancia del controlador
K_p	Ganancia de la planta
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PLC	Controlador lógico programable
r	Valor deseado
T_d	Tiempo integral
T_i	Tiempo derivativo
t_m	Tiempo muerto
τ_p	Constante de la planta para modelo de primer orden
u	Señal de salida del controlador
y	Señal realimentada
z	Perturbación

II. INTRODUCCIÓN

Los controladores PID son los mayoritariamente usados en las aplicaciones que involucran lazos de control a nivel industrial. Más del 90% de los controladores empleados usan el algoritmo PID, debido a su simplicidad, funcionalidad y aplicabilidad [5].

El nacimiento del primer controlador PID comercial se remonta a los años 1940 cuando hubo un rápido crecimiento de la industria de instrumentación, que incluía a más de 600 empresas. Sin embargo, el mercado era acaparado mayoritariamente por unas pocas compañías, de las cuales Foxboro, Brown y Taylor eran las más grandes [6]. Fue en el año de 1939 en que el departamento de investigación de Taylor desarrolló su Modelo 100 Fulscope, el cual incluía los modos proporcional, integral y derivativo, y que empezaría a comercializarse en 1940 [4].

El nuevo controlador neumático, enfrentaba el problema de que se tenían que ajustar simultáneamente tres parámetros. Fue en la década de 1940 que los ingenieros John Zigler y Nathaniel Nichols, de Taylor, publicaron su famoso método de sintonización para la elección de los parámetros del PID [4]. El método, con algunas modificaciones, es todavía incluido en los manuales de los fabricantes como propuesta para la sintonización manual.

Durante la década de los años 1950, empresas como Foxboro, Taylor Instrument, Honeywell, Leeds & Northrup, Manning, Maxwell & Moore y Swartwout incursionaron en la comercialización de controladores electrónicos.

El que se considera como el primer controlador PID electrónico, fue comercializado por Swartwout Co. con el nombre de AutroniC en 1951.

Los aparatos electrónicos resultaron capaces de realizar todas las funciones que previamente solo eran posibles con aparatos neumáticos, además de incluir funciones como suma, multiplicación, raíz cuadrada y otras operaciones matemáticas. De todos modos existía una desconfianza en el uso de tubos al vacío hasta que aparecieron los controladores de estado sólido, como el Consotrol de Foxboro en 1959.

La década de los años 1960 se caracteriza por el auge de los controladores lógicos programables (PLC). El primer PLC, el 084, fue fabricado por Bedford Associates (más adelante Modicon) por pedido de General Motors. Este PLC consistía en un equipo de resolución por lógica secuencial o “Ladder Logic” [6].

Este trabajo se deriva del proyecto final de graduación, llamado “Controladores PID comerciales”.

L. F. Rojas es estudiante de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la UCR, San José, Costa Rica (e-mail: feliperojas@ieee.org)

En 1976 se introduce el primer controlador PID electrónico digital y en 1981, Leeds & Northrup empieza la comercialización del primer controlador PID autosintonizable. Honeywell en 1982 introduce el UDC500 basado en microprocesador, para el control de lazo y que incluía conectividad con una central de comando.

En 1987, Foxboro populariza los controladores 760 y 761, los primeros en emplear tecnología en inteligencia artificial [6].

En la actualidad la fabricación de controladores PID se encuentra prácticamente en manos de cuatro compañías: ABB, Foxboro, Honeywell y Yokogawa. Elsag Bailey, Kent-Taylor, Hartman & Brown y Alfa Laval han sido adquiridas por ABB. Emerson Process Management Group es propietaria de Brooks Instruments, Daniel, Delta V, Fisher, Rosemount, Intellution, Micro Motion, Provox, RS3 y Westinghouse Process Control. Invensys Production Management Division por su parte consiste en APV, Avantis, Esscor, Eurotherm, Foxboro, Pacific Simulation, Triconex y Wonderware [5].

La mayoría de los esfuerzos en investigación relacionados con el control PID tienen que ver con el problema del control adaptativo. La autosintonía se ha convertido en una característica deseable e incluso indispensable entre los compradores, pues reduce las dificultades de la puesta en marcha de los equipos de control. A pesar de la facilidad que ofrece la opción de autosintonía presente en los controladores PID, es necesario conocer la estructura del controlador para realizar una sintonización optimizada del lazo de control y poder sacarle mejor provecho.

El problema que surge a la hora de elegir los parámetros de sintonización es que los fabricantes realizan el algoritmo PID en forma sustancialmente diferente a las ecuaciones ideales [2].

Se puede encontrar en la literatura técnica múltiples formas de referirse al controlador PID tales como: ideal, serie, industrial, paralelo, PI-D, I-PD, de un grado de libertad, de dos grados de libertad, interactuante, no interactuante, clásico, de ganancias independientes, estándar, ISA y mezclas de éstos. La falta de normalización en la implementación del algoritmo PID ha inducido a una confusión innecesaria [1].

Es por ello que la presente investigación tiene como finalidad determinar la estructura de los controladores disponibles comercialmente y realizar un análisis comparativo entre las distintas estructuras ofrecidas por los fabricantes.

III. ALGORITMO PID

La Figura 1 muestra un lazo de control realimentado en el dominio de la frecuencia, en el cual $G_p(s)$ representa la función de transferencia del modelo de la planta y $G_c(s)$ al controlador. El sistema de control posee como entradas el valor deseado $r(s)$ o "set point" (SP), y la perturbación $z(s)$. La variable de error $e(s)$ corresponde a la diferencia entre el valor deseado y el valor medido de la variable controlada. La salida del controlador es $u(s)$.

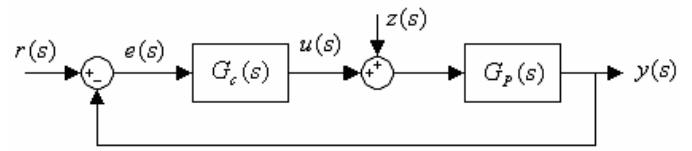


Fig. 1. Lazo de control realimentado

Los controladores empleados comúnmente para el control de lazo están compuestos por una combinación de modos Proporcional, Integral y Derivativo, de donde surge el nombre de controladores PID.

No existe sin embargo una representación única del algoritmo PID debido a una falta de estandarización por parte de los fabricantes.

La forma principal empleada en la teoría para representar dichos controladores es conocida como la forma Ideal. También se le conoce como no interactuante porque el tiempo integral T_i no influye en la parte derivativa, así como el tiempo derivativo T_d no influye con la parte integral. La representación en el dominio de la frecuencia es:

$$G_{cPIDIdeal}(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (1)$$

donde K_c es la ganancia, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. Su representación en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

y su representación por medio de diagrama de bloques es

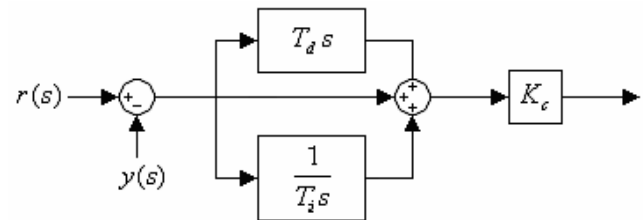


Fig. 2. Diagrama de bloques del controlador PID

Existen otros dos tipos de configuraciones básicas que son la representación Serie y la Paralela.

La representación Serie esta dada por la función de transferencia

$$G_{cPIDSerie}(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \quad (3)$$

Este controlador, es denominado interactuante.

El controlador Serie es más fácil de sintonizar. Hay una razón histórica que explica la preferencia por el controlador interactuante. Los primeros controladores neumáticos eran más fáciles de construir empleando la forma interactuante y con el paso de los años cuando se cambió a la tecnología electrónica y finalmente a la digital, donde ésta se conservó.

El controlador no interactuante se puede representar siempre como interactuante, por medio de la siguiente conversión de parámetros [10]:

$$\begin{aligned}
K'_c &= \frac{K_c}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\
T'_i &= \frac{T_i}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\
T'_d &= \frac{2T_d}{1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}}}
\end{aligned} \quad (4)$$

El controlador interactuante que corresponde al no interactuante puede ser encontrado solo si

$$T_i \geq 4T_d$$

Otra forma equivalente es la conocida como PID Paralelo dado por

$$G_{cPIDParalelo}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (5)$$

El controlador PID paralelo por su parte posee una ganancia independiente para la acción proporcional, para la diferencial y para la integral. Los parámetros están relacionados con la forma ideal a través de la siguiente conversión [10]:

$$\begin{aligned}
K_p &= K_c \\
K_i &= \frac{K_c}{T_i} \\
K_d &= K_c T_d
\end{aligned} \quad (6)$$

Banda proporcional es el término utilizado en muchos controladores en las especificaciones PID, para el ajuste del modo proporcional.

La ganancia y la banda proporcional están relacionadas por:

$$PB = \frac{100\%}{K_c} \quad (7)$$

A. Discretización

Para implementar el algoritmo de un controlador PID en un controlador digital, es necesario aproximar las derivadas e integrales.

Existen varios métodos para aproximar [8]:

- Diferencias retrógradas ("backward differences")
- Diferencias hacia delante ("forward differences")
- Aproximación de Tustin
- Equivalencia rampa

Sin embargo en la práctica, solo resulta práctico aplicar el algoritmo por diferencias retrógradas. Por medio de dicha aproximación, la función del PID ideal discretizada es:

$$u(t) = K_c \{P(t) + I(t) + D(t)\} = K_c \left\{ e(t) + \frac{h}{T_i} \sum e(t) + \frac{T_d}{h} \Delta e(t) \right\} \quad (8)$$

Para el instante $t=t_k$, la salida del controlador es

$$u(t_k) = K_c \left\{ e(t) + \frac{h}{T_i} e(t_k) + I(t_{k-1}) + \frac{T_d}{h} \Delta e(t_k) \right\} \quad (9)$$

donde $I(t_{k-1})$ es la sumatoria de todos los aportes del modo integral antes del muestreo actual.

Los algoritmos descritos anteriormente son llamados algoritmos de posición porque indican directamente la salida del controlador. En la implementación digital es común el uso del algoritmo incremental (también llamada de velocidad), en el que la salida indica la adición de incrementos.

$$\Delta u(t_k) = u(t_k) - u(t_{k-1}) = K_c \{ \Delta P(t_k) + \Delta I(t_k) + \Delta D(t_k) \} \quad (10)$$

Los incrementos de la parte proporcional, la parte integral y la parte derivativa son fácilmente calculados empleando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\Delta P(t_k) &= P(t_k) - P(t_{k-1}) = e(t) - e(t_{k-1}) \\
\Delta I(t_k) &= I(t_k) - I(t_{k-1}) = \frac{h}{T_i} e(t_k) \\
\Delta D(t_k) &= D(t_k) - D(t_{k-1}) = \frac{T_d}{h} [\Delta e(t_k) - \Delta e(t_{k-1})]
\end{aligned} \quad (11)$$

IV. MODIFICACIONES TÍPICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN COMERCIAL

A. Prevención del desbordamiento del modo integral

Todos los actuadores tienen limitaciones, así por ejemplo un motor tiene una velocidad limitada mientras que una válvula tiene un límite de apertura.

Para un sistema de control con un amplio margen de operación, puede ocurrir que la variable de control alcance los límites del actuador. Cuando esto ocurre, se rompe el lazo de realimentación y el sistema continúa funcionando en lazo abierto. Bajo estas circunstancias el modo integral continuará actuando sobre la señal de error.

Esto implica que el modo integral puede volverse muy largo y desbordarse ("integral wind-up"). Se requiere por lo tanto que el error tenga signo opuesto antes de que se regrese a condiciones normales. Se tiene como consecuencia que el controlador tenga transitorios largos cuando el actuador se satura [8].

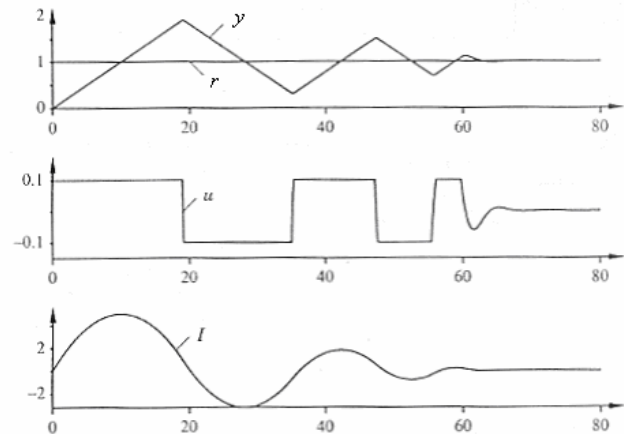


Fig. 3. Desbordamiento integral. [8]

El fenómeno de desbordamiento del modo integral de un

controlador PI se muestra en la Figura 3, el cual muestra un la acción de un controlador PI. El cambio en el valor deseado inicial es tan grande que el actuador satura en su límite superior. El modo integral crece inicialmente porque el error es positivo y alcanza su máximo cuando el error es cero. La salida permanece saturada por el gran valor que posee el modo integral. Luego continúa en el límite de saturación hasta que el error haya sido negativo por suficiente tiempo como para permitir a la parte integral descender a un nivel más bajo. Este comportamiento hace que el tiempo de recuperación del sistema a las condiciones constantes sea extremadamente largo, además de que deteriora los actuadores.

Para corregir este efecto indeseado, se usan varias técnicas para la prevención del desbordamiento integral. A continuación se mostrarán algunas soluciones:

- Recalculamiento y seguimiento (“Backcalculation and tracking”): Cuando el PID utilizado es de la forma Serie, resulta mucho más conveniente aplicar el modo integral directamente a la salida del controlador y sumar el aporte integral por medio de una realimentación que se suma al resultado PD. Esta configuración es conocida popularmente como “realimentación integral” y se ilustra a continuación

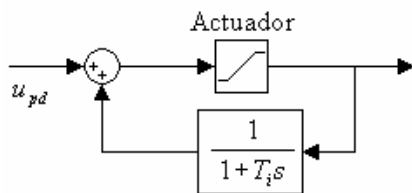


Fig. 4 Circuito de prevención del desbordamiento en la forma Serie.

- Integración condicional: La integración condicional es una alternativa al recalculamiento o el seguimiento. En éste método la integración se deshabilita cuando el sistema se encuentra lejos de las condiciones de régimen permanente. Se deben cumplir con que el controlador esta saturado y que la actualización del integrador es tal que la señal de control se vuelve más saturada. La integración condicional es sumamente fácil de implementar cuando el algoritmo del PID es de la forma ideal. Así pues, cuando se detecta que la salida a llegado a sus límites en el instante $t=t_k$, se ordena al modo integral a que $\Delta I(t_{k+1})=\Delta I(t_{k+2})=\dots=0$ si el PID es calculado por incrementos, pero si el PID es calculado por el algoritmo de posición, la salida del modo integral permanece en su último valor previo a la saturación.

B. Filtro derivativo

Se ha visto que los controladores PID actúan sobre la señal de error dada por $e(t)=r(t)-y_r(t)$, donde $r(t)$ es la referencia y $y_r(t)$ es la suma total de la señal medida a la salida $y_m(t)$ más el ruido en la medición $y_r(t)$, es decir, $y_r(t)=y_m(t)+y_r(t)$. El modo derivativo tiene la desventaja de que amplifica las señales de alta frecuencia, lo que da como resultado de que el controlador sea sumamente sensible y actúa de manera errónea.

Como solución, se introduce un filtro pasa-bajas en el modo derivativo de la siguiente forma:

$$G_d(s) = \frac{T_d s}{T_f s + 1}, \quad T_f = \alpha T_d \quad (12)$$

$$G_d(s) = \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1}$$

En los controladores PID comerciales, el valor de α óptimo debe ser elegido para estar entre el rango de $0,05 < \alpha < 0,2$ [1].

C. Transferencia entre automático y manual sin saltos

Cuando el sistema se encuentra en modo manual, el algoritmo de control produce una señal de control que puede ser diferente de la de la generada manualmente. Es necesario asegurarse que las dos salidas coincidan en el momento de la conmutación para obtener una transferencia sin saltos.

Cuando la forma del PID es del tipo Serie, la misma modificación utilizada para prevenir el desbordamiento puede ser útil para suavizar la transferencia del modo manual al automático [8], como se muestra a continuación

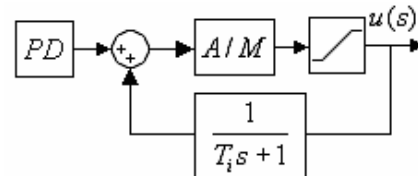


Fig. 5. Transferencia sin saltos en un PID Serie

Obsérvese de la Figura 5 que el intercambiador de los modos es colocado antes de la integración, por lo que la salida del PID es siempre la misma, independientemente de si esta en modo manual o automático.

La práctica más común en los controladores PID comerciales con la estructura ideal, consiste en obligar la salida del PID para que sea idéntica a la salida del modo automático. Cuando el controlador recibe el orden de la transferencia, sustituye inmediatamente la actual salida del modo automático, por la salida del modo manual para que el PID logre continuidad en el comportamiento.

D. Acción derivativa sobre el error o la señal realimentada

El algoritmo de control PID en la teoría actúa sobre la señal de error, sin embargo en la práctica esto ocasiona un salto indeseado a la salida del controlador, debido a la acción del modo derivativo [8].

La solución a este inconveniente resulta en mover el modo diferencial al lazo de realimentación. Generalmente el algoritmo que posee tal modificación es conocido como PI-D, para denotar que la derivada actúa sobre la señal realimentada.

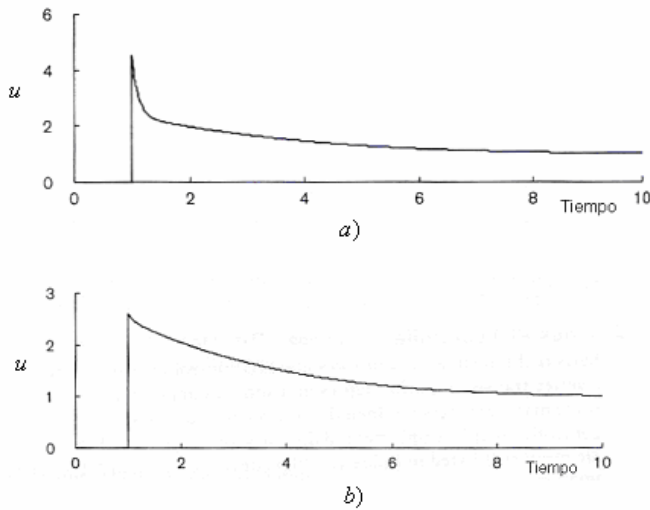


Fig. 6. Salida del controlador con la derivada sobre a) el error y b) la señal realimentada [8]

Comparando las señales a) y b) de la Figura 6 se puede ver que el salto debido al modo integral es menor en el PI-D.

E. Selector de acción

El selector de acción ha sido diseñado para seleccionar entre dos acciones:

- Una acción directa (-1) en la que la salida del controlador u crece cuando la señal realimentada y crece.
- Una señal inversa (+1) para la cual la salida del controlador u decrece cuando la señal realimentada y crece.

El producto de la ganancia por la acción debe ser elegida de tal manera que sea siempre positivo. La selección de la acción debe hacerse siempre antes de que entre en funcionamiento el lazo de control [1]. En la Figura 7 se muestra la colocación apropiada del selector.

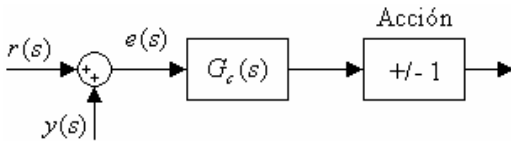


Fig. 7. Controlador PID con selector de acción

F. Factores de peso

El controlador genera una señal de control como respuesta a un error. Una estructura más flexible se puede obtener al manipular el valor deseado de manera separada. Se tiene entonces

$$e_p(t) = K_{rp} \cdot r(t) - y(t) \quad (13)$$

$$u_p(s) = K_{cp} \left[\frac{K_{rp}}{\tau_{rp}s + 1} r(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} (r(s) - y(s)) + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} (K_{rd} r(s) - y(s)) \right] \left(\frac{1}{\tau_f s + 1} \right) \quad (14)$$

$$u_s(s) = K_{cs} \left[\left(\frac{K_{rp}}{\tau_{rp}s + 1} + \frac{1}{T_i s} \right) \left(1 + \frac{K_{rd} T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) r(s) - \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(1 + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) y(s) \right] \left(\frac{1}{\tau_f s + 1} \right) \quad (15)$$

donde e_p es el error sobre el cual actúa el modo proporcional y K_{rp} es el factor de peso sobre el valor deseado.

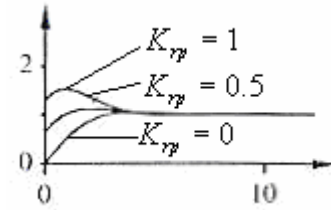


Fig. 7. Respuesta a los cambios en $r(s)$ para diferentes valores de K_{rp}

La Figura 7 muestra claramente el efecto del cambio en K_{rp} . El sobrepaso para los cambios en el valor deseado son menores para $K_{rp}=0$, el cual es el caso donde el modo proporcional se aplica solo sobre la señal realimentada, e incrementa con el aumento en el valor de $K_{rp}=1$.

Se desea en general que un sistema tenga una respuesta con un sobrepaso moderado ante los cambios en el valor deseado cuando el lazo ha sido sintonizado como regulador. Se intenta por lo tanto obtener la mejor repuesta como regulador y como servomecanismo utilizando el mismo controlador. Cuando el modo proporcional actúa sobre el error, se dice que es de un grado de libertad, pero cuando hay un factor de peso para el valor deseado, se dice que el controlador es de dos grados de libertad y se obtiene más flexibilidad para satisfacer los compromisos de diseño [1].

Se puede encontrar igualmente en los controladores un factor de peso de la acción derivativa K_{rd} elegible entre 0 y 1, con el que se puede aminorar el sobrepaso cuando ocurre un escalón igualmente en el valor deseado. Lo más común en realidad es que K_{rd} sea únicamente los valores de 0 o 1.

V. ECUACIONES PID UNIVERSALES

A partir de las modificaciones que ha enfrentado el algoritmo PID como resultado de la necesidad de minimizar efectos indeseados de su puesta en marcha, ha ocasionado que la nomenclatura para referirse a ellos o para representarlos se torne confuso.

Alfaro propone dos ecuaciones en las que se pueden sintetizar las estructuras de los PID ofrecidos comercialmente [1]:

- El controlador PID universal tipo Paralelo (PID_{up}): las acciones de los tiempos integral y derivativo no interactúan entre sí. Se encuentra representado por (14)

- El controlador PID universal tipo Serie (PID_{us}): la acción derivativa e integral se encuentran en serie según es muestra en (15).

La constante de tiempo τ_p pertenece a un filtro sobre el valor deseado mientras que τ_f es la constante de tiempo de un filtro a la salida del controlador cuando se emplean técnicas de control con modelo interno (IMC).

VI. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ESTRUCTURAS

La comparación de las estructuras de los controladores PID comerciales requiere del uso de una nomenclatura y representación que permita agrupar todas las modificaciones posibles del algoritmo PID.

De las modificaciones mencionadas en el Capítulo IV, se pudieron identificar las siguientes en los controladores comerciales:

1. Las constantes de tiempo T_i y T_d pueden interactuar entre sí o ser independientes la una de la otra.
2. La acción derivativa posee un filtro paso bajo con una constante de tiempo αT_d que es proporcional al tiempo derivativo.
3. El modo derivativo puede estar aplicado sobre el error o sobre la señal realimentada.
4. Puede existir un factor de peso sobre el valor deseado sobre el cual se aplica el término derivativo.
5. El modo proporcional puede actuar ante cambios en el valor deseado o en la realimentación.
6. Puede presentarse un factor de peso sobre el valor deseado que sobre el que actúa el modo proporcional
7. La introducción de los parámetros K_c , T_i y T_d en el controlador puede ser en términos de ganancias K_p , K_i y K_d .
8. La ganancia del controlador K_c debe ser ingresada como una banda proporcional BP .

Hay que tener presente que en la mayoría de los casos, el controlador posee la opción de modificar la estructura, ya sea ejecutando funciones diferentes o simplemente eligiendo entre alguna de las opciones de modificación mencionadas en la lista anterior.

Para un análisis comparativo lo ideal sería representar todos los controladores PID disponibles en el mercado mediante una sola estructura que contemple todas las variaciones posibles, sin embargo según Alfaro (2002) no es posible debido a que no todos los controladores Serie tienen un equivalente Ideal. Se hace necesario por lo tanto hacer uso de las ecuaciones PID Universales tipo Serie y tipo Paralelo propuestas por Alfaro (2002) representadas respectivamente por las ecuaciones (14) y (15).

La información obtenida de la Tabla 1 sobre las estructuras, permite inferir que la mayoría de los fabricantes implementan el algoritmo PID con las siguientes características:

1. La ganancia es elegida por medio de K_c y no de una banda proporcional
2. El modo proporcional actúa sobre el error.
3. El modo derivativo es aplicado sobre la señal realimentada
4. Existen un filtro pasa bajas en la acción derivativa. Lo más común es que $0 \leq \alpha \leq 1$, sin embargo resultado difícil indicar un rango más pequeño de valores típicos.
5. No hay filtro sobre el valor deseado o a la salida del controlador.
6. Las formas tipo Universal Serie o Universal Paralelo son utilizadas tanto en controladores de lazo como en controladores lógicos programables, aunque si guardan cierta tendencia. Así pues, es mucho más común encontrar PLCs con el PID no interactuante mientras que en los controladores de lazo lo común es que se emplee una estructura interactuante.

Las estructuras típicas encontradas son:

- En PLC

$$u(s) = K_c \left[e(s) + \frac{1}{T_i s} e(s) - \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} y(s) \right] \quad (16)$$

- En controladores de lazo

$$u(s) = K_c \left[\left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) r(s) - \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(1 + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) y(s) \right] \quad (17)$$

Los motivos de esta tendencia son más que todo por razones históricas, ya que muchos de los equipos de control de lazo son fabricados o pertenecieron a empresas que existieron cuando las implementaciones eran neumáticas o analógicas.

Las empresas fabricantes de PLC surgieron en una época en que ocurría un cambio tecnológico importante hacia la lógica digital y son mucho más recientes. El algoritmo PID discretizado no posee inconvenientes de costos o de construcción física ya que es elaborado a nivel de software. Las iniciativas de la ISA de promover el algoritmo Ideal puede que haya inclinado la balanza para que los fabricantes de PLC optaran por una estructura Universal Paralela.

El PLC Quantum de Telemecanique es el único que posee la opción de ejecutar una estructura similar a la forma Universal Serie con banda proporcional. El controlador Quatum pertenece a la legendaria familia de controladores Modicon, nombre bajo el que se comercializó el primer PLC (en los años de 1960). Es probable que la manera en que se implementaba el algoritmo PID haya influido en la inclusión de una función de la forma interactuante.

TABLA 1
ESTRUCTURAS COMERCIALES USANDO LAS ECUACIONES PID UNIVERSALES

Marca	Modelo	Equipo	Tipo*	Kc	Ti	Td	Krp	Krd	Trp	α	Tf
ABB [11]	Advant Controller [32]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	1	0	0,333	0
	53SL6000 [34]	CL	US	100/BP	Ti'	Td'	1	0	0	0	0
	ECA [33]	CL	US	Kc	Ti'	Td'	0	0	0	0,125	0
Autom. Direct [13]	Protronic [35]	CL	US	Kc	Ti'	Td'	1	0	0	0,1-1	0
	Direct Logic [37]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	1	0	0,05-1	0
Delta Elect. [15]	DVP Series [38]		UP	Kp	Kp/Ki	Kd/Kp	1	1	0	0,05-1	0
		PLC	UP	Kp	Kp/Ki	Kd/Kp	1	0 o 1	0	0	0
Fuji [20]	Compact Controller M [41]	CL	UP	100/BP	Ti	Td	1	0	0	0,01	0
GE FANUC [21]	S90-30/90-60/Versamax [42]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0 o 1	0	?	0
			UP	Kp	Kp/Ki	Kd/Kp	1	0 o 1	0	?	0
Honeywell [22]	UDC [43]	CL	US	Kc	Ti'	Td'	1	1	0	0,1	0
Eurotherm [16]	2604/2704 [39]	CL	UP	100/BP	Ti	Td	1	0 o 1	0	0	0
Foxboro [19]	762CNA [40]	CL	US	100/BP	Ti'	Td'	1	0	0	0,25-0,99	0
Mitsubishi [23]	Melsec System Q [44]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	0,0 - 1,0	0,0-1,0	0	0.000001 - 999999	0
Panasonic [25]	FP0/FP2/FP2SH/FP10SH [47]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	0 o 1	0	0	0,13	0
Omron [24]	SYSMAC CP/CS/CJ [45]	PLC	UP	100/BP	Ti	Td	0,00 - 0,99	0	0	0,333	0
	E5CK [46]	PLC	UP	100/BP	Ti	Td	0,00 - 0,99	0	0	0,333	0
Allen Bradley [12]	PLC-5/Logix500/MLogix/SLC [36]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0 o 1	0	0,0625	0
	PLC-5/Logix500 [36]	PLC	UP	Kp	Kp/Ki	Kd/Kp	1	0 o 1	0	0,0625	0
Siemens [26]	352PLUS/353 [48]	CL	US	Kc	Ti'	Td'	1	0	0	0,03-1	0
	Sipart [49]	CL	UP	Kc	Ti	Td	1	0	0	0,1-10	0
	S5-95U [50]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0 o 1	0	0	0
Smar [27]	545/555/575 [51]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0	0	0,05-0,1	0
	CD600/CD600plus [52]	CL	UP	Kc	Ti	Td	0 o 1	0 o 1	0	0,13	0
		UP	Kp	Kp/Ki	Kd/Kp	0 o 1	0 o 1	0	0,13	0	
Telemecanique [29]	LC700 [53]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	0 o 1	0 o 1	0	0,13	0
	Quantum Large PLC [54]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0 o 1	0	?	0
		US	100/BP	Ti'	Td'	1	0	0	0,03-0,5	0	
Toshiba [30]	TSX Micro PLC [56]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	1	0	0	0
	Premium Large PLC [55]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0 o 1	0	(0,29E-38)-1	0
Yokogawa [31]	T-Series/V-Series [57]	PLC	UP	Kc	Ti	Td	1	0	0	0,1	0
	YS1000 Series [58]	CL	UP	100/BP	Ti	Td	0 o 1	0	0	0,1	0

*US: Universal tipo Serie, UP: Universal tipo Paralelo

La banda proporcional BP es un parámetro de sintonización exclusivamente de los controladores de lazo.

Los fabricantes Mitsubishi y Omron son los únicos controladores con un PID de dos grados de libertad. Omron por su parte ofrece módulos de expansión para control de procesos que pueden ser instalados en los PLC Melsec Q de Mitsubishi. Sin duda el algoritmo PID de la línea Melsec Q es el más completo ya que tiene factores de peso sobre el valor deseado tanto en la derivada como en la acción proporcional.

El controlador YS1000 de Yokogawa incorpora un filtro en función de T_i y T_d y con factores de peso α_i y α_d en el valor deseado, según se aprecia en (18).

$$r(s) = \frac{1 + (\alpha_i T_i - \alpha_d T_d) s}{1 + (T_i + T_d) s} r'(s) \quad (18)$$

donde $0 \leq \alpha_i \leq 1$, $0 \leq \alpha_d \leq 1$ y $r'(s)$ es el valor deseado sin filtrar. El filtro ha sido diseñado para mejorar la respuesta como

servomecanismo cuando los parámetros han sido optimizados para un funcionamiento como regulador. El efecto es equiparable al de un controlador de dos grados de libertad.

Los equipos de control TSX de Telemecanique y el DL405 de Automation Direct/Koyo son los únicos que usan la forma Ideal del PID.

Existen ciertas variaciones que no pueden ser identificadas usando las ecuaciones PID Universales como lo son la transferencia sin saltos y la prevención del desbordamiento integral. En la forma Universal Serie, es común que se use realimentación interna en el modo integral. Generalmente, lo que se hace es que la configuración es similar a la mostrada en la Figura 5. Con dicha variación es posible prevenir el desbordamiento de la integral a la vez que se logra que la salida del modo automático y del modo manual sea igual en el preciso instante de la transferencia para que no ocurra sobresalto alguno.

$$u_p(s) = K_c \left[K_{rp} r(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} (r(s) - y(s)) + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} (K_{rd} r(s) - y(s)) \right] \quad (19)$$

$$u_s(s) = K_c \left[\left(K_{rp} + \frac{1}{T_i s} \right) \left(1 + \frac{K_{rd} T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) r(s) - \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(1 + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) y(s) \right] \quad (20)$$

Cuando se usa la forma Universal Paralelo, lo que más predomina es que se obligue a ciertas variables a adoptar un valor determinado con el fin de evitar el efecto indeseado. Cuando ocurre una transferencia entre automático y manual, se obliga a que ambos modos valgan igual o permanecen ejecutando únicamente la acción integral cuando se encuentra en manual.

La prevención del desbordamiento integral depende de si el cálculo es de posición o incremental, pero se trata siempre de una integración condicional.

Con respecto a la implementación digital, hay quienes usan la forma incremental y otros que usan la de posición, sin que haya un predominio de alguno de los dos métodos.

VII. CONCLUSIONES

La idea de la cual surgió la presente investigación fue la necesidad de conocer la estructura PID más utilizada. Las modificaciones que ha enfrentado el algoritmo PID ideal han sido como respuesta ante los inconvenientes que conlleva su puesta en marcha.

Todos los controladores PID estudiados quedaron cubiertos por las ecuaciones (19) y (20), que son más reducidas que las ecuaciones PID universales.

Se ha determinado que la estructura típica del PID disponible en el mercado es de la forma universal paralelo, con un filtro en la derivada, siendo ésta aplicada sobre la señal realimentada y con $T_{rp}=T_f=0$.

A la hora de comparar las estructuras usadas en los PLC y en el controladores de lazo, se pudo apreciar que la estructura definida por (6-1) es la más usada en los PLC pero en los controladores de lazo, la ecuación (6-2) es mucho más común debido a que sus fabricantes han conservado las modificaciones empleadas cuando los sistemas de control eran neumáticos o analógicos.

VIII. REFERENCIAS

Artículos:

- [1] Alfaro, V. "Ecuaciones para controladores PID universales", Ingeniería, Costa Rica, Vol 12 N°1, 2002.
- [2] Alfaro, V. "¿Son todos los controladores PID iguales?", Ingeniería, Costa Rica, Vol 3 N°1, 1993.
- [3] Bennett, S. "The Past of PID Controllers", Digital Control 2000: Past, Present and Future of PID Control, A Proceedings Volume for the IFAC Workshop, España, 2000.
- [4] Blickley, G. "Modern Control Started with Ziegler-Nichols Tuning", Control Engineering, E.U.A, Vol. 37, N°12(2), Octubre 1990.
- [5] Heong, K.; Chang, G.; Li Y. "PID Control System Analysis, Design and Technology", IEEE Transactions on Control Systems Analysis Technology, Vol. 13, N°4, Julio 2005.
- [6] Strothman, J. "More than a century of measuring and controlling industrial process", InTech, E.U.A., Junio 1995.

Libros:

- [7] Åström, K.; Hägglund, T. "Advanced PID control", 1era. Edición, ISA, 2005.
- [8] Åström, K.; Hägglund, T. "PID Controllers: theory, design and tuning", 2da. Edición, ISA, 1995.
- [9] O'Dwyer, A. "Handbook of PI and PID controller tuning rules", 2da Edición, Imperial College Press, 2006.
- [10] Wilkie, J.; Jonson, M.; Katebi, R. "Control Engineering: An introductory Course", 1era edición, Palgrave, 2002.

Páginas de internet:

- [11] ABB; www.abb.com
- [12] Allen Bradley; www.ab.com
- [13] Automation Direct; www.automationdirect.com
- [14] BESTune; "PID controllers in BESTune"; bestune.50megs.com/PLC.htm
- [15] Delta Electronics; www.deltaww.com/
- [16] Eurotherm; www.eurotherm.com
- [17] ExperTune Inc.; "PID Algorithms Supported by ExperTune's PlantTriage and PID Tuner", www.expertune.com/controllerAlgos.html
- [18] ExperTune Inc.; "What ExpertTune Needs to Know About Your PID Algorithm", www.expertune.com/contType.html
- [19] Foxboro; www.foxboro.com
- [20] Fuji Electric Corp. of America; www.fujielectric.com/
- [21] GE Fanuc; www.gefanuc.com
- [22] Honeywell; www.honeywell.com
- [23] Mitsubishi Electric Industrial Automation; www.mitsubishi-automation.com
- [24] Omron; <http://www.omron.com/index3.html>
- [25] Panasonic Electric Works; www.panasonic-electric-works.es
- [26] Siemens; w1.siemens.com/entry/en/index.htm
- [27] Smar; www.smar.com
- [28] Techmation; "Protuner Application Manual", www.protuner.com
- [29] Telemecanique/Schneider Electric; www.telemecanique.com/en/index.htm
- [30] Toshiba Industrial Systems; www.toshiba.com/ind
- [31] Yokogawa; www.yokogawa.com

Manuales de fabricante:

- [32] ABB, Librería de bloques funcionales del Advant Controller 31, 2001.
- [33] ABB, Manual de instalación y configuración del ECA06/60/600 versión 1.05, 2000.
- [34] ABB, Manual de instrucciones del controlador MicroDCI 53SL6000, 2001.
- [35] ABB, Manual de configuración y parametrización del Protronic 100/500/550 revisión 0,6.
- [36] Allen Bradley, Set de referencia de instrucciones del PLC-5, 1998.
- [37] Automation Direct/Koyo, Manual de usuario del DL405, 2004.
- [38] Delta Electronics, DVP-PLC Manual de aplicación y programación.
- [39] Eurotherm, Manual de ingeniería del controlador Modelo 2704, 2004.
- [40] Foxboro, Instrucciones del Controlador Single Station Micro 762CNA, 1998.
- [41] Fuji Electric, Manual de instrucciones del Compact Controller M, 2004.
- [42] GE Fanuc Automation, Set de instrucciones de la CPU del Series 90-30/20/Micro PLC, 2002.
- [43] Honeywell, Manual del producto del UDC3500, 2007.
- [44] Mitsubishi Electric, Instrucciones de Control de Procesos de Melsec Q, 2002.
- [45] Omron, Manual de programación de la unidad de CPU CPH/CP1L, 2007.
- [46] Omron, Manual del usuario del E5CK, 2005.

- [47] Panasonic, Manual de Programación del controlador programable FP0/FP2/FP2SH/FP10SH, 2000.
- [48] Siemens, Manual del usuario del Moore 353 rev. 11, 2003.
- [49] Siemens, Manual del Sipart DR24, 2006.
- [50] Siemens, Manual del sistema del S5-95U ed. 3, 1994.
- [51] Siemens, Manual del Usuario de Simatic 545, 555, 575.
- [52] Smar, Manual del usuario del CD600Plus, 2005.
- [53] Smar, Manual de configuración del LC700, 2007.
- [54] Telemecanique, Guía del usuario de la librería de la Lógica de Bloques en Escalera del Quantum, 2006.
- [55] Telemecanique, Manual del usuario de control de procesos usando Premium y Atrium, 2006.
- [56] Telemecanique, Manual de programación de control de procesos del TSX17.
- [57] Toshiba, Manual de Usuario del Prosec T1-16S, 2001.
- [58] Yokogawa, Manual del usuario de YS1000 Series ed.3, 2007.

IX. BIOGRAFÍA

Felipe Rojas nació en San Carlos, Costa Rica el 13 de agosto de 1985. Cursó estudios secundarios en el Colegio Científico Costarricense Sede San Carlos. Posee el grado de bachiller en ciencias en la carrera de Ingeniería Eléctrica con énfasis en Sistemas de Energía otorgado por la Universidad de Costa Rica y se encuentra debidamente incorporado al Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. El proyecto de graduación lo desarrolló en el área de control automático y se titula "Controladores PID comerciales". Se encuentra cursando estudios de licenciatura en Ingeniería Eléctrica igualmente en la UCR. Es miembro estudiante del IEEE desde el año 2005 y forma parte del del Power & Energy Society desde el 2007.