



CONTROL PID DIGITAL

Algoritmo, diseño e implementación

Ing. Danny Ochoa Correa
Docente de la Facultad de Ingeniería

RESUMEN

Este artículo ofrece una guía procedimental de diseño e implementación de un controlador PID digital, dirigido a estudiantes que estén o hayan cursado las asignaturas Teoría de Control y Microprocesadores. Se plantea una metodología general, de tal manera que, pueda ser implementado en cualquier sistema microprocesado y lenguaje de programación, dando la libertad al alumno de mejorarlo y ejecutarlo de acuerdo a sus conveniencias técnicas y económicas. En la parte final se presenta una alternativa de implementación mediante la utilización de un computador personal y un microcontrolador.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sistemas de control cumplen un rol muy importante en el desarrollo y avance de la tecnología y por ende de la civilización moderna, ya que prácticamente cada aspecto de las actividades de nuestra vida diaria está afectado por algún sistema de control.

En los últimos años el uso de controladores digitales en sistemas de control ha ido en aumento, dado que permiten alcanzar una máxima productividad con un excelente desempeño a bajo costo y con el mínimo consumo de energía.

Las razones por las que actualmente se tiende a controlar los sistemas dinámicos en forma digital en lugar de analógica, es la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y las ventajas de trabajar con señales digitales en lugar de las señales en tiempo continuo.

Los sistemas en tiempo continuo se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales, del mismo modo, los sistemas en tiempo discreto se pueden representar mediante ecuaciones en diferencias, después de la apropiada discretización de las señales en tiempo continuo.

La mayoría de ingenieros deben tener un buen conocimiento de los avances en la teoría y práctica del control automático, dado que proporciona los medios para conseguir un óptimo comportamiento de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad al simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales entre otras actividades.

ESTRUCTURA DEL CONTROL DIGITAL

Un sistema de control digital (o discreto) se introduce en un lazo de control con el único propósito de reemplazar al controlador, por tanto, en la mayoría de los casos,

el proceso físico continúa siendo continuo (analógico).

La señal de salida del proceso de control se muestrea cada cierto intervalo de tiempo (llamado período de muestreo) y es discretizada mediante un convertidor analógico-digital (ADC). Esta información es procesada por el controlador digital y convertida nuevamente en analógica mediante un convertidor digital-analógico (DAC). Por lo tanto, internamente el controlador digital se independiza del tipo de señal con que está trabajando y ve todas las magnitudes como una serie de valores discretos. Por esta razón, resulta mucho más cómodo trabajar con ecuaciones en diferencia en lugar de ecuaciones diferenciales.

La estructura típica de un sistema de control digital en lazo cerrado se muestra a continuación:

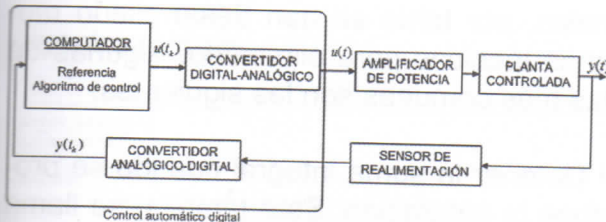


Figura 1. Estructura de un sistema de control digital en lazo cerrado

Características del control digital

Como características básicas del control digital se pueden mencionar las siguientes:

- El algoritmo puede ser implementado sin límite de complejidad. Los sistemas analógicos si presentan esta dificultad.
- La facilidad de ajuste y cambio que presentan los controladores digitales los hace muy flexibles. Esto implica que, los controladores digitales son modificados sim-

plemente reprogramando el algoritmo, mientras que, en los analógicos implica un cambio de componentes o, en el peor de los casos, un cambio del controlador completo.

- Los sistemas digitales presentan menor sensibilidad al ruido electromagnético.
- Si el controlador digital es implementado en un computador, este puede ser utilizado simultáneamente para otros fines, tales como: adquisición de datos, alarmas, administración, etc. Al mismo tiempo presenta una excelente interface con el operador del equipo.
- El costo es el principal argumento para utilizar un sistema de control digital en lugar de un analógico. El costo de un sistema analógico se incrementa en función del número de lazos, no así con el digital.

DISEÑO CONTROL PID PARALELO DIGITAL

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un mecanismo de control realimentado ampliamente utilizado en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido (realimentación) y el valor que se quiere obtener (referencia), calculándolo y luego sacando una acción correctiva que es ajustada al proceso que se desea controlar. La acción del controlador PID es llevada a cabo por tres componentes: el proporcional, el integral, y el derivativo.

La ecuación integro-diferencial que representa un controlador PID paralelo en tiempo continuo es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

donde: $K_i = K_p/T_i$ y $K_d = K_p T_d$, siendo K_p , K_i y K_d las constantes proporcional, integral y derivativa, respectivamente, y $e(t)$ el error en estado estacionario en función del tiempo.

Para implementar el bloque PID digital es necesario convertir la ecuación (1) de una representación continua a una discreta. Existen varios métodos para llevarlo a cabo. Uno de ellos es utilizar las definiciones estudiadas en Cálculo para aproximar las operaciones involucradas. Por tanto, para la integral se utilizará la *aproximación trapezoidal*, y para la derivada la *aproximación por diferencias finitas*:

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \sum_{k=1}^n e(t_k) \Delta t \quad (2)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{\Delta t} \quad (3)$$

donde:

$\Delta t \rightarrow$ Intervalo de muestreo (segundos)

Por tanto la ecuación (1) se transforma en:

$$u(t_k) = K_p e(t_k) + K_i \sum_{k=1}^n e(t_k) \Delta t + K_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{\Delta t} \quad (4)$$

La ecuación (4), es adecuada para implementar un sistema de control digital. Esta forma de controlador PID es a menudo conocida como *controlador PID posicional*. Nótese que la nueva acción de control es implementada cada intervalo de muestreo Δt .

Efecto wind-up en la integración discreta

En aplicaciones prácticas, todas las acciones involucradas en un proceso de control están limitadas físicamente. Como consecuencia, la señal de error no vuelve a cero y el término integral sigue sumándose

continuamente (Ec. 2). Este efecto se llama wind-up (o saturación integral), y como resultado, pueden ocurrir largos periodos de sobresalto (overshoot) en la respuesta de la planta. Un ejemplo sencillo de lo que sucede es el siguiente. Se desea controlar la velocidad de un motor y se produce un cambio grande en la referencia (set-point), por tanto el error también es grande. El controlador tratará de reducir el error entre la referencia y la salida. El término integral crecerá por la suma de las señales de error en cada muestra y una acción de control grande será aplicada al motor. Si se cambia el punto de referencia a otro valor, el término integral sigue siendo grande y no responde de inmediato a la referencia requerida. En consecuencia, el sistema tendrá una respuesta deficiente al momento de salir de esta condición.

El problema de wind-up en la integración afecta a los controladores PID posicionales, por tanto se han desarrollado muchas técnicas para eliminarlo. Algunas de las más comunes son las siguientes:

- Detener la suma integral cuando se produce la saturación. Esto también se llama integración condicional. La idea es establecer la entrada del integrador a cero si la salida del controlador está saturada.
- Fijar los límites del término integral entre un mínimo y un máximo.
- Reducir la entrada al integrador por alguna constante si la salida del controlador se satura.

ALGORITMO CONTROLADOR PID DIGITAL

En primera instancia, asignamos nombres a las variables a utilizar:

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
ref(tk) → referencia	Cualquiera que sea la variable física a controlar (velocidad en RPM, temperatura en °C, nivel de líquido en cm), la señal de referencia, generalmente, es de naturaleza eléctrica expresada en voltios y representa el valor al cual debe converger el controlador.
rea(tk) → realimentación	Es la señal eléctrica que representa el estado de alguna magnitud física. Se la obtiene en los terminales del sensor, o elemento de medición, que es un dispositivo que convierte la variable de la salida en otra manejable por el controlador, como un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia.
e(tk) → error_actual	Es la diferencia existente entre las señales de referencia y realimentación en un instante de tiempo tk.
e(tk-1) → error_previo	Es la diferencia existente entre las señales de referencia y realimentación en un instante de tiempo tk-1. Al contar con sistemas digitales, es posible ir almacenando estos datos en memoria.
Δt → delta_t	El intervalo de muestreo es la acción periódica (en segundos) en la cual se realizan las acciones de control y la adquisición de datos. Su dimensionamiento depende de la naturaleza de la planta a controlar.
u(tk) → salida	Señal eléctrica que representa las acciones tomadas por el controlador para alcanzar el punto de referencia. Es de naturaleza digital y, mediante un DAC, puede ser convertida en analógica para alimentar una planta controlada.

Algoritmo simple:

```

error_previo=0
integral=0

inicio:
    error_actual=referencia-realimentacion
    integral=integral+(error_actual)*delta_t
    derivada=(error_actual-error_previo)/delta_t
    salida=(Kp)*error_actual+(Ki)*integral+(Kd)*derivada
    error_previo =error_actual
    esperar delta_t
ir a inicio
    
```

• Es importante mencionar que, en cada iteración la variable realimentación se carga con el dato de lectura del ADC (sensor), y la variable salida, debe ser colocada en los terminales del DAC para que las acciones de control se transfieran a los componentes analógicos (Fig. 2).

Algoritmo anti-windup integral y en la salida

En sistemas de control digital prácticos, se utilizan convertidores ADC y DAC que po-

seen un número finito de bits (ej. 8 bits), con un rango de variación de tensión analógica de 0 a 5V. Por tanto, es importante mejorar el algoritmo anterior para que las señales digitales que maneja, no excedan la escala de los convertidores (0d-255d).

Esto se logra fácilmente, al colocar una protección *anti-windup*, tanto en la parte integral como en la salida del controlador digital, de la siguiente manera:

```

...
integral=integral+(error_actual)*delta_t
si (integral>255) entonces:
    integral=255
si (integral<-255) entonces:
    integral=-255
...
salida=(Kp)*error_actual+(Ki)*integral+(Kd)*derivada
si (salida>255) entonces:
    salida=255
si (salida<0) entonces:
    salida=0
    
```

Con esto se asegura que el valor de la variable integral no aumente exageradamen-

te, y el valor de salida no desborde la escala de conversión del DAC de 8 bits para este ejemplo.

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL PID DIGITAL

A continuación se presenta una alternativa de implementación del controlador PID, cuya parte digital consiste en un computador personal y un microcontrolador.

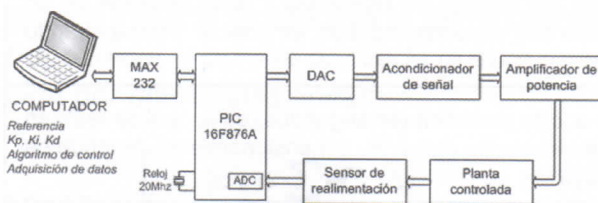


Figura 2. Configuración para la implementación del sistema de control digital

Computador (PC): Sistema micro-procesado en el cual está implementado el algoritmo de control digital PID. En éste se especifican los parámetros del controlador tales como: referencia, constante proporcional K_p , constante integral K_i , constante derivativa K_d y tiempo de muestreo. Recibe del ADC una señal codificada que representa la señal eléctrica del sensor de realimentación para las acciones correctivas. Además presenta una interfaz gráfica para el usuario.

MAX-232: Etapa necesaria para comunicar de forma serial el PIC con el computador (PC), dado que amplifica los niveles de tensión de la salida del PIC a los establecidos por el estándar RS-232 para que sea interpretado correctamente por el PC. El circuito eléctrico y electrónico a utilizar corresponde al sugerido por el fabricante del dispositivo en su hoja de especificaciones.

Microcontrolador PIC 16F876A: El PIC (*Peripheral Interface Controller*) cumple tres funciones principales en la estructura de control digital propuesta: realizar internamente la conversión analógica-digital, ser la interface de comunicación serial RS-232 entre el PIC y el computador (PC), y por último, enviar el valor digital de salida del controlador PID por uno de sus puertos de forma paralela hacia el convertidor digital-analógico externo.

Convertidor analógico digital (ADC): La mayoría de Microcontroladores PIC incluyen un conjunto de ADCs dentro de su encapsulado, por tanto, pueden ser utilizados en esta estructura para ahorrar espacio físico e inversión en componentes electrónicos.

Convertidor digital analógico (DAC): Puede ser implementado mediante una red de resistencias en escalera R2R o el circuito integrado DAC-0808. Debe estar conectado paralelamente a unos de los puertos de salida del PIC.

Acondicionador de señal: Etapa necesaria si la entrada del Amplificador de Potencia maneja niveles de energía diferentes a la salida del DAC.

Amplificador de potencia: El nivel de voltaje-corriente de la señal de salida del bloque controlador analógico muchas veces es inferior a la que requiere el actuador (planta controlada), por tanto es necesario amplificarla.

Planta controlada: La planta controlada constituye el medio en donde están montados físicamente los elementos: actuador y el sensor de realimentación. Es el proceso físico a controlar.

Actuador: El actuador permite, mediante la aplicación de una señal eléctrica, modi-

ficar las condiciones de una variable física (velocidad, temperatura, nivel de líquido, etc.).

La figura 3 muestra el panel de un controlador PID digital implementado en Microsoft Visual Basic.

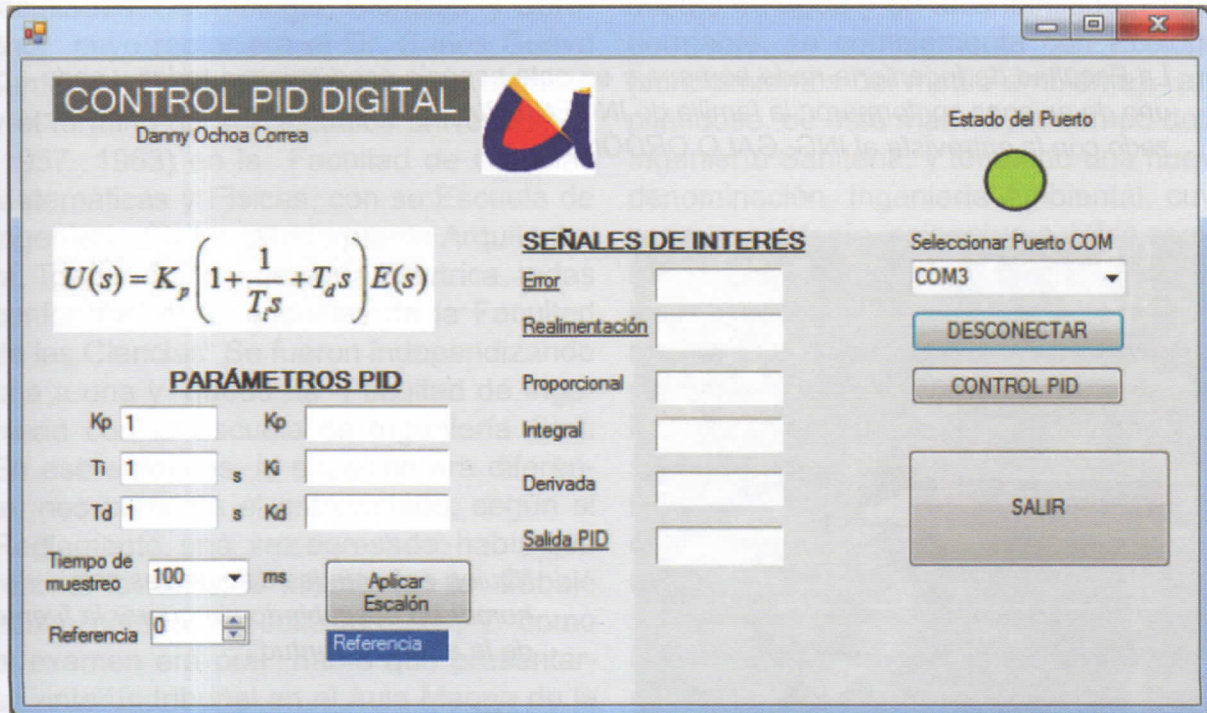


Figura 3. Interface del controlador digital mediante Visual Basic 2010.

BIBLIOGRAFÍA

- CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial, ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. Sexta edición. España, 1998.
- DOGAN, Ibrahim. Microcontroller Based Applied Digital Control. John Wiley & Sons Ltd, Sin edición, Inglaterra. 2006.
- KUO, Benjamín. Sistemas de control automático. Prentice Hall, Séptima edición, México, 1996.
- OCHOA CORREA, Danny. Modelación, Simulación e Implementación de equipos de laboratorio para la realización de prácticas de las asignaturas Teoría de Control e Instrumentación. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2011.
- OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderno. Ed. McGraw Hill, Cuarta edición, México, 2005.
- SHAW, John A. The PID Control Algorithm: How it works, how to tune it, and how to use it. Process Control Solutions, Segunda Edición. 2003.

“El éxito no es otra cosa que el logro consecutivo y ordenado de propósitos planificados”.

Loret.