**Controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo)**

**1. Introducción**

En el ámbito de la ingeniería de control, el objetivo principal es diseñar estrategias que garanticen que una variable de interés siga un valor de referencia (**set point**) a pesar de perturbaciones externas y variaciones internas. Los sistemas de retroalimentación constituyen la herramienta esencial para lograrlo, ya que permiten comparar la salida del proceso con la consigna y generar acciones correctivas.

El **controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo)** se ha consolidado como la técnica más empleada en el control automático. Esto se debe a su sencillez estructural, robustez y aplicabilidad en una gran variedad de procesos (Cárdenas, 2019, p. 146). Se estima que más del 90% de los lazos de control industriales implementan PID o alguna de sus variantes.

**2. Principio de funcionamiento**

El controlador PID se basa en la retroalimentación negativa. La diferencia entre la referencia r(t) y la salida y(t) define el **error**:

A partir de este error, el PID genera la señal de control u(t)u(t)u(t) combinando tres acciones: proporcional, integral y derivativa (Cárdenas, 2019, pp. 147–150).

Cada componente cumple una función específica:

* **Proporcional (P):** actúa sobre el error presente, aumentando la rapidez de la respuesta, pero sin eliminar el error permanente.
* **Integral (I):** acumula errores pasados y garantiza error nulo en estado estacionario, aunque en exceso puede producir oscilaciones.
* **Derivativa (D):** anticipa la tendencia del error y mejora la estabilidad, siendo sensible al ruido en la señal de medición.

**3. Representación en el dominio de Laplace**

La ecuación del PID expresada en el dominio de Laplace es (Cárdenas, 2019, p. 152):

Este modelo permite analizar la interacción entre el controlador y la planta mediante herramientas como el **criterio de Routh–Hurwitz, Nyquist o Lugar Geométrico de las Raíces**, evaluando estabilidad y desempeño.

**4. Implementación práctica**

Existen dos modalidades principales de implementación (Cárdenas, 2019, pp. 153–155):

1. **Implementación analógica:** realizada con amplificadores operacionales configurados como sumadores, integradores y derivadores.
2. **Implementación digital:** predominante en la actualidad, mediante microcontroladores, PLCs o software de control. En este caso, la ecuación se discretiza:

donde ​ es el tiempo de muestreo. Esta modalidad facilita el ajuste en línea y la integración con sistemas SCADA.

**5. Métodos de sintonización**

El desempeño del PID depende de la adecuada elección de , , ​. Entre los métodos más reconocidos se encuentran (Cárdenas, 2019, pp. 157–160):

* **Prueba y error:** ajuste empírico a partir de la observación de la respuesta.
* **Ziegler–Nichols:** basado en la ganancia última ​ y el período de oscilación ​.
* **Métodos computacionales modernos:** optimización numérica y técnicas basadas en inteligencia artificial.

**6. Aplicaciones**

El controlador PID se utiliza en procesos de naturaleza diversa (Cárdenas, 2019, pp. 161–163):

* **Temperatura:** hornos, calderas, sistemas HVAC.
* **Velocidad y posición:** motores eléctricos, robots industriales, servomecanismos.
* **Procesos hidráulicos:** nivel de tanques, caudal y presión.
* **Procesos químicos:** regulación de pH, concentración y reacciones.

Su versatilidad lo convierte en una herramienta imprescindible en el campo de la automatización.

**7. Conclusiones**

El controlador PID es un pilar fundamental de la ingeniería de control automático. Su estructura combina acciones correctivas que consideran el error actual, acumulado e incluso anticipado, lo que le otorga un equilibrio entre rapidez, precisión y estabilidad.

De acuerdo con Cárdenas (2019), la clave de su desempeño radica en la **sintonización de parámetros** y en la adecuada selección de la modalidad de implementación.

En consecuencia, el PID se mantiene como la técnica de control más empleada en la industria moderna, y su dominio constituye un conocimiento esencial para ingenieros y técnicos en automatización.

**Referencias**

* Cárdenas, M. A. (2019). *Introducción al análisis e implementación de sistemas de control automático*. Universidad de Pamplona.
* Programación Multidisciplinar. (2021, marzo 3). *¿Qué es un controlador PID?* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=WGLnqBhUD38](https://www.youtube.com/watch?v=WGLnqBhUD38&utm_source=chatgpt.com)

**¿Qué es PWM?**

**PWM** (Pulse Width Modulation, o *Modulación por Anchura de Pulsos*) es una técnica en la que una señal digital (generalmente una onda cuadrada) se mantiene constante en voltaje y frecuencia, pero se varía el **tiempo** que permanece en estado *alto* (“ON”) dentro de cada ciclo lo que se conoce como **duty cycle** o ciclo de trabajo

En otras palabras, se controla la energía promedio enviada a una carga (como un motor o LED) sin cambiar el voltaje ni degradar componentes, simplemente modulando cuánto tiempo dura cada pulso alto frente a un pulso bajo.

**Componentes clave de una señal PWM**

Cada señal PWM se caracteriza por tres parámetros fundamentales

* **Amplitud**: el voltaje del nivel alto (por ejemplo, 5 V).
* **Frecuencia**: cuán rápido se repite cada ciclo (por ejemplo, 4 Hz frente a 25 kHz).
* **Ciclo de trabajo (Duty Cycle)**: el porcentaje del tiempo que la señal permanece en alto dentro de un período.

Ejemplo intuitivo: Si el ciclo de trabajo es del 50 %, significa que por cada período, la señal está activa la mitad del tiempo; si es del 75 %, está activa el 75 % del tiempo.

**¿Cómo regula el PWM la energía?**

Imaginemos que tienes un motor de 5 V y una señal PWM de 100 Hz:

* Si el duty cycle es del **100 %**, el motor recibe potencia completa y gira a máxima velocidad.
* Si es del **0 %**, no recibe potencia y está detenido.
* Si es del **50 %**, recibe energía equivalente a 2.5 V promedio y gira a una velocidad media

Esto permite, por ejemplo, regular la velocidad del motor sin disminuir el voltaje continuo, solo ajustando el perfil temporal de encendido/apagado.

**Frecuencia y suavidad del control**

La frecuencia PWM es clave para lograr una respuesta suave:

* A frecuencias bajas (ej. 4 Hz), el motor responde con “tirones” visibles: arranca y frena de forma brusca.
* A frecuencias altas (ej. 25 kHz), el motor recibe pulsos tan rápidos que no se perciben, resultando en un movimiento uniforme y silencioso
* Además, frecuencias muy bajas pueden generar ruido audible o vibraciones perceptibles.