

07_control_pid

June 19, 2026

1 Tema 7 - Conceptos Basicos de Control PID

Asignatura: Fundamentos de Control - GIERM

1.1 Objetivos de aprendizaje

1. Comprender el control ON-OFF y sus limitaciones (oscilacion permanente).
 2. Analizar la accion **proporcional (P)** y su efecto sobre el error en regimen permanente.
 3. Comprender las acciones **derivativa (D)** e **integral (I)** por separado.
 4. Diseñar controladores **PD**, **PI** y **PID** y comparar sus respuestas.
 5. Estudiar el efecto de cada parametro (K_p , T_I , T_D) sobre la respuesta.
 6. Aplicar los **metodos de Ziegler-Nichols** (curva de reaccion y oscilacion sostenida) para sintonizar controladores.
 7. Resolver ejercicios de diseno y sintonizacion de controladores PID.
-

1.2 1. Control ON-OFF (todo o nada)

El controlador mas simple posible. La senal de control solo toma dos valores:

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max} & \text{si } e(t) > 0 \\ U_{\min} & \text{si } e(t) < 0 \end{cases}$$

donde $e(t) = r(t) - y(t)$ es el error.

Características: - Muy sencillo de implementar (rele, termostato). - La salida **oscila permanentemente** alrededor de la referencia. - No se puede ajustar la respuesta transitoria. - Util cuando no se requiere precision (calefaccion domestica, etc.).

1.3 2. Controlador Proporcional (P)

La accion de control es proporcional al error:

$$C(s) = K_p$$

En el dominio del tiempo: $u(t) = K_p \cdot e(t)$.

Propiedades: - Aumentar K_p acelera la respuesta y reduce el error en regimen permanente. - Sin embargo, **el error en regimen permanente nunca se elimina** (excepto para plantas tipo 1+ con entrada escalon). - Un K_p excesivo genera sobreoscilacion y puede desestabilizar el sistema.

Para la planta $G(s) = \frac{1}{s(s+1)}$ (tipo 1), el error ante escalon unitario con controlador P es:

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_v} = 0 \quad (\text{tipo 1, escalon})$$

Pero ante **rampa**, el error seria $e_{ss} = 1/K_p$, que no se anula.

Observaciones del grafico:

K_p	Velocidad	Sobreoscilacion	Error e_{ss}
1	Lenta	Nula	0 (tipo 1, escalon)
5	Media	Moderada	0
20	Rapida	Alta	0
100	Muy rapida	Muy alta	0

Para esta planta tipo 1, el error ante escalon es cero para todo $K_p > 0$. Sin embargo, la **sobreoscilacion** crece dramaticamente con K_p . Veremos que ante **rampa**, el error si depende de K_p .

1.4 3. Controlador Derivativo (D)

$$C(s) = K_D \cdot s$$

En el dominio del tiempo: $u(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$.

Propiedades: - Actua sobre la **velocidad de cambio** del error: anticipa la tendencia. - **No puede usarse solo:** no genera accion ante error constante ($de/dt = 0$). - Mejora la estabilidad y reduce sobreoscilacion cuando se combina con P o PI. - Amplifica el ruido de alta frecuencia (problema practico importante).

En la practica, se utiliza siempre combinado con la accion proporcional (PD o PID).

1.5 4. Controlador Integral (I)

$$C(s) = \frac{K_i}{s}$$

En el dominio del tiempo: $u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$.

Propiedades: - Añade un **integrador** al lazo: aumenta el tipo del sistema en 1. - **Elimina el error en regimen permanente** ante la entrada para la cual el sistema original tenia error. -

Hace la respuesta **mas lenta y mas oscilatoria**. - Puede causar **inestabilidad** si la ganancia integral es demasiado alta. - El fenomeno de **windup** (saturacion del integrador) es un problema practico importante.

1.6 5. Controlador PD

Combina accion proporcional y derivativa:

$$C(s) = K_p(1 + T_D s) = K_p + K_p T_D s$$

donde T_D es la **constante de tiempo derivativa**.

Propiedades: - La accion derivativa “anticipa” el error y amortigua la respuesta. - **Reduce la sobreoscilacion** respecto al controlador P solo. - **No mejora el error en regimen permanente** (no anade integradores). - Mejora la estabilidad relativa (mayor margen de fase).

1.7 6. Controlador PI

Combina accion proporcional e integral:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = K_p \cdot \frac{T_I s + 1}{T_I s}$$

donde T_I es la **constante de tiempo integral**.

Propiedades: - **Elimina el error en regimen permanente** (anade un integrador al lazo abierto). - Hace la respuesta mas lenta y puede aumentar la sobreoscilacion. - T_I grande $\Rightarrow$ accion integral debil (lenta eliminacion del error). - T_I pequeno $\Rightarrow$ accion integral fuerte (rapida pero mas oscilatoria).

1.8 7. Controlador PID

Combina las tres acciones: proporcional, integral y derivativa:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = K_p \cdot \frac{T_I T_D s^2 + T_I s + 1}{T_I s}$$

Propiedades: - La accion **P** da respuesta rapida. - La accion **I** elimina el error en regimen permanente. - La accion **D** reduce la sobreoscilacion y mejora la estabilidad. - Es el controlador **mas utilizado en la industria** (>95% de los lazos de control).

La sintonizacion consiste en elegir K_p , T_I y T_D para cumplir las especificaciones.

Lectura del grafico:

Controlador	Error e_{ss}	Sobreoscilacion	Velocidad
P	$\neq 0$	Moderada	Rapida
PI	$= 0$	Mayor que P	Mas lenta
PD	$\neq 0$	Menor que P	Similar a P
PID	$= 0$	Controlada	Buena

El PID combina lo mejor de cada accion: **error cero** (I), **respuesta rapida** (P) y **baja sobre-oscilacion** (D).

1.9 8. Efecto de cada parametro del PID

1.10 9. Metodo de Ziegler-Nichols 1: Curva de reaccion

Aplicable a plantas con respuesta al escalon en forma de **S** (plantas estables sin integradores).

1.10.1 Procedimiento

1. Se aplica un **escalon** a la planta en lazo abierto.
2. Se traza la **tangente** en el punto de maxima pendiente.
3. Se determinan tres parametros de la curva:
 - K : ganancia estatica (valor final de la respuesta / amplitud del escalon).
 - L : **retardo** (interseccion de la tangente con el eje de tiempo).
 - T : **constante de tiempo** (desde L hasta donde la tangente alcanza el valor final).

1.10.2 Tabla de sintonizacion de Ziegler-Nichols (Metodo 1)

Controlador	K_p	T_I	T_D
P	$\frac{T}{KL}$	—	—
PI	$0.9 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	—
PID	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

1.10.3 Ejemplo resuelto: Ziegler-Nichols Metodo 1

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{2}{(s+1)(0.5s+1)}$, aplicar el metodo de la curva de reaccion para disenar controladores P, PI y PID.

1.11 10. Metodo de Ziegler-Nichols 2: Oscilacion sostenida

Aplicable a plantas donde se puede aumentar la ganancia hasta alcanzar el **limite de estabilidad**.

1.11.1 Procedimiento

1. Con solo control proporcional ($C(s) = K_p$), aumentar K_p hasta que el sistema en lazo cerrado **oscile de forma sostenida** (estabilidad marginal).
2. La ganancia critica se denomina K_{cr} y el periodo de oscilacion T_{cr} .
3. Usar la tabla de sintonizacion.

1.11.2 Tabla de sintonizacion de Ziegler-Nichols (Metodo 2)

Controlador	K_p	T_I	T_D
P	$0.5K_{cr}$	—	—
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{T_{cr}}{1.2}$	—
PID	$0.6K_{cr}$	$\frac{T_{cr}}{2}$	$\frac{T_{cr}}{8}$

1.11.3 Ejemplo resuelto: Ziegler-Nichols Metodo 2

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{1}{s(s+1)(0.2s+1)}$, aplicar el metodo de la oscilacion sostenida para disenar controladores P, PI y PID.

1.12 11. Ejercicios resueltos

1.12.1 Ejercicio 1: Diseno de controlador P para especificacion de error

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{4}{(s+2)(s+4)}$, disenar un controlador proporcional $C(s) = K_p$ tal que el error ante rampa sea menor que 0.1.

Solucion:

La planta es tipo 0. El error ante rampa con controlador P es $e_{ss} = \infty$ (no se puede). Sin embargo, si la referencia es un **escalón**, el error es:

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p \cdot G(0)} = \frac{1}{1 + K_p \cdot \frac{4}{2 \cdot 4}} = \frac{1}{1 + 0.5K_p}$$

Para $e_{ss} < 0.1$:

$$\frac{1}{1 + 0.5K_p} < 0.1 \implies 1 + 0.5K_p > 10 \implies K_p > 18$$

$K_p > 18$

1.12.2 Ejercicio 2: Diseno de controlador PI

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{4}{(s+2)(s+4)}$, disenar un controlador PI que elimine el error en regimen permanente ante escalon y tenga una respuesta aceptable.

Solucion:

Con controlador PI: $C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) = K_p \cdot \frac{T_I s + 1}{T_I s}$

El lazo abierto tiene un integrador (del PI), por lo que el sistema es tipo 1 y $e_{ss} = 0$ ante escalon para todo $K_p > 0$ (siempre que sea estable).

Elegimos $K_p = 5$, $T_I = 1.5$ (compromiso entre velocidad y sobreoscilacion):

$$C(s) = 5 \left(1 + \frac{1}{1.5s}\right) = 5 \cdot \frac{1.5s + 1}{1.5s}$$

1.12.3 Ejercicio 3: Diseno de controlador PID

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{4}{(s+2)(s+4)}$, disenar un controlador PID que elimine el error y tenga baja sobreoscilacion.

Solucion:

Partimos del PI del ejercicio anterior y anadimos accion derivativa para reducir la sobreoscilacion.

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

Con $K_p = 5$, $T_I = 1.5$, $T_D = 0.15$:

$$C(s) = 5 \left(1 + \frac{1}{1.5s} + 0.15s\right)$$

1.12.4 Ejercicio 4: Ziegler-Nichols Metodo 1 completo

Enunciado: La respuesta al escalon de una planta da una curva en S con los siguientes parametros: $K = 1.5$, $L = 0.3$ s, $T = 1.8$ s. Disenar controladores P, PI y PID por Ziegler-Nichols.

Solucion:

1.12.5 Ejercicio 5: Ziegler-Nichols Metodo 2 completo

Enunciado: Al aumentar la ganancia proporcional sobre una planta, se alcanza oscilacion sostenida con $K_{cr} = 10$ y periodo $T_{cr} = 1.5$ s. Disenar controladores P, PI y PID.

Solucion:

1.12.6 Ejercicio 6: Comparacion de controladores

Enunciado: Para la planta $G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+3)}$, comparar las respuestas al escalon de los controladores P ($K_p = 10$), PI ($K_p = 10$, $T_I = 2$), PD ($K_p = 10$, $T_D = 0.2$) y PID ($K_p = 10$, $T_I = 2$, $T_D = 0.2$). Medir el error en regimen permanente y la sobreoscilacion.

1.13 12. Catalogo de problemas tipo

A continuacion se presenta un catalogo de los tipos de problemas mas frecuentes en control PID, cada uno con su metodologia paso a paso y un ejemplo resuelto.

1.13.1 Tipo 1: Calcular el error en regimen permanente con controlador P

Metodologia: 1. Identificar el tipo de la planta $G(s)$ (numero de integradores). 2. Calcular la constante de error relevante (K_p , K_v , K_a) del lazo abierto $C(s)G(s)$. 3. Aplicar la formula del error: $e_{ss} = \frac{1}{1+K_p}$ (escalon, tipo 0), $e_{ss} = \frac{1}{K_v}$ (rampa, tipo 1), etc.

Ejemplo: $G(s) = \frac{5}{(s+1)(s+5)}$, $C(s) = 8$. Error ante escalon.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} C(s)G(s) = 8 \cdot \frac{5}{1 \cdot 5} = 8$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1+8} = \frac{1}{9} \approx 0.111$$

1.13.2 Tipo 2: Disenar K_p para especificacion de error

Metodologia: 1. Expresar e_{ss} en funcion de K_p . 2. Despejar K_p de la desigualdad $e_{ss} < e_{\max}$.

Ejemplo: $G(s) = \frac{3}{(s+2)(s+6)}$. Disenar K_p para $e_{ss} < 0.05$ ante escalon.

$$G(0) = \frac{3}{12} = 0.25. \text{ Luego } e_{ss} = \frac{1}{1+0.25K_p} < 0.05$$

$$1+0.25K_p > 20 \implies K_p > 76$$

$$K_p > 76$$

1.13.3 Tipo 3: Disenar controlador PI para error cero

Metodologia: 1. El PI anade un integrador $\implies$ aumenta el tipo del sistema en 1. 2. Elegir K_p y T_I para estabilidad y prestaciones aceptables. 3. Verificar estabilidad (Routh-Hurwitz o simulacion).

Ejemplo: $G(s) = \frac{2}{(s+1)(s+4)}$. Disenar PI para $e_{ss} = 0$ ante escalon.

$$C(s) = K_p \cdot \frac{T_I s + 1}{T_I s}. \text{ Con } K_p = 4, T_I = 1:$$

$$C(s) = 4 \cdot \frac{s+1}{s} = \frac{4s+4}{s}$$

El cero del PI en $s = -1$ cancela el polo de la planta, simplificando el diseno.

1.13.4 Tipo 4: Disenar controlador PD para reducir sobreoscilacion

Metodologia: 1. Disenar primero un P que cumpla la velocidad de respuesta. 2. Anadir accion D (T_D) para reducir sobreoscilacion. 3. Iterar T_D hasta cumplir la especificacion.

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{s(s+2)}$. Con $K_p = 20$, la sobreoscilacion es excesiva. Disenar PD para $M_p < 10\%$.

$$\text{Lazo cerrado con PD: } T(s) = \frac{K_p(1 + T_D s)}{s^2 + (2 + K_p T_D)s + K_p}$$

Para $M_p < 10\%$: $\zeta > 0.59$. Como $\omega_n = \sqrt{20}$, $2\zeta\omega_n = 2 + 20T_D$.

$$T_D = \frac{2 \cdot 0.59 \cdot \sqrt{20} - 2}{20} = \frac{5.28 - 2}{20} = 0.164$$

$$T_D \geq 0.164 \text{ s}$$

1.13.5 Tipo 5: Disenar PID completo

Metodologia: 1. Elegir K_p para velocidad de respuesta. 2. Anadir accion I (T_I) para eliminar error. 3. Anadir accion D (T_D) para controlar sobreoscilacion. 4. Ajustar iterativamente.

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+3)}$. Disenar PID con $e_{ss} = 0$, $M_p < 20\%$.

Con $K_p = 15$, $T_I = 1$, $T_D = 0.15$:

$$C(s) = 15 \left(1 + \frac{1}{s} + 0.15s \right) = 15 \cdot \frac{0.15s^2 + s + 1}{s}$$

1.13.6 Tipo 6: Sintonizacion por Ziegler-Nichols Metodo 1 (datos de la curva)

Metodologia: 1. Obtener K , L , T de la curva de reaccion. 2. Aplicar la tabla de ZN Metodo 1. 3. Verificar la respuesta.

Ejemplo: Curva de reaccion con $K = 2$, $L = 0.5$ s, $T = 3$ s.

$$\text{PID: } K_p = 1.2 \cdot \frac{3}{2 \cdot 0.5} = 3.6, T_I = 2 \cdot 0.5 = 1.0, T_D = 0.5 \cdot 0.5 = 0.25$$

$$C(s) = 3.6 \left(1 + \frac{1}{s} + 0.25s \right)$$

1.13.7 Tipo 7: Sintonizacion por Ziegler-Nichols Metodo 2 (datos criticos)

Metodologia: 1. Obtener K_{cr} y T_{cr} experimentalmente o por Routh-Hurwitz. 2. Aplicar la tabla de ZN Metodo 2. 3. Verificar la respuesta.

Ejemplo: $K_{cr} = 15$, $T_{cr} = 2$ s.

PID: $K_p = 0.6 \cdot 15 = 9$, $T_I = 2/2 = 1$, $T_D = 2/8 = 0.25$

$$C(s) = 9 \left(1 + \frac{1}{s} + 0.25s \right)$$

1.13.8 Tipo 8: Obtener K_{cr} y T_{cr} por Routh-Hurwitz

Metodologia: 1. Escribir la ecuacion caracteristica con $C(s) = K_p$: $1 + K_p G(s) = 0$. 2. Aplicar criterio de Routh para encontrar K_{cr} (valor que hace una fila cero). 3. Resolver para la frecuencia ω_{cr} usando la fila auxiliar. 4. $T_{cr} = 2\pi/\omega_{cr}$.

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+4)}$.

Ecuacion caracteristica: $s^3 + 5s^2 + 4s + K_p = 0$.

Tabla de Routh: - s^3 : 1, 4 - s^2 : 5, K_p - s^1 : $(20 - K_p)/5$, 0 - s^0 : K_p

Para estabilidad marginal: $(20 - K_p)/5 = 0 \Rightarrow K_{cr} = 20$.

Frecuencia: $5s^2 + 20 = 0 \Rightarrow s^2 = -4 \Rightarrow \omega_{cr} = 2$ rad/s.

$$K_{cr} = 20, \quad T_{cr} = \frac{2\pi}{2} = \pi \approx 3.14 \text{ s}$$

1.13.9 Tipo 9: Efecto de perturbacion con y sin accion integral

Metodologia: 1. Calcular la FT de perturbacion: $Y(s)/D(s) = G(s)/(1 + C(s)G(s))$. 2. Con P: error permanente ante perturbacion escalon $\neq 0$. 3. Con PI: la accion integral rechaza la perturbacion ($e_{ss} = 0$).

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{s+1}$, perturbacion escalon $D(s) = 1/s$.

- Con P ($K_p = 5$): $y_d(\infty) = \frac{G(0)}{1 + K_p G(0)} = \frac{1}{1 + 5} = \frac{1}{6}$.
- Con PI: la accion integral fuerza $y_d(\infty) = 0$.

$$\text{PI rechaza perturbaciones constantes: } e_{ss,d} = 0$$

1.13.10 Tipo 10: Calcular funcion de transferencia en lazo cerrado con PID

Metodologia: 1. Expresar $C(s)$ como cociente de polinomios. 2. Calcular $T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$. 3. Simplificar.

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{s+2}$, $C(s) = 3 \left(1 + \frac{1}{2s} + 0.5s \right) = \frac{3(s^2 + 2s + 1)}{2s} = \frac{3(s+1)^2}{2s}$.

$$T(s) = \frac{\frac{3(s+1)^2}{2s(s+2)}}{1 + \frac{3(s+1)^2}{2s(s+2)}} = \frac{3(s+1)^2}{2s(s+2) + 3(s+1)^2} = \frac{3(s+1)^2}{2s^2 + 4s + 3s^2 + 6s + 3}$$

$$T(s) = \frac{3s^2 + 6s + 3}{5s^2 + 10s + 3}$$

1.13.11 Tipo 11: Estabilidad del sistema con controlador PID

Metodología: 1. Obtener la ecuación característica del lazo cerrado. 2. Aplicar criterio de Routh-Hurwitz. 3. Determinar rango de parámetros para estabilidad.

Ejemplo: $G(s) = \frac{1}{s(s+3)}$, $C(s) = K_p(1 + 0.5s) = K_p(0.5s + 1)$.

Ecuación característica: $s^2 + 3s + K_p \cdot 0.5s + K_p = s^2 + (3 + 0.5K_p)s + K_p = 0$.

Routh: todos los coeficientes positivos $\Rightarrow K_p > 0$.

Estable para todo $K_p > 0$

1.13.12 Tipo 12: Comparar controladores y elegir el mejor

Metodología: 1. Simular la respuesta al escalón con cada controlador. 2. Medir: tiempo de subida t_r , sobreoscilación M_p , tiempo de establecimiento t_s , error e_{ss} . 3. Comparar con las especificaciones y elegir.

Ejemplo: $G(s) = \frac{2}{(s+1)(s+2)}$. Especificaciones: $e_{ss} = 0$, $M_p < 25\%$, $t_s < 5$ s.

- P ($K_p = 10$): $e_{ss} = 0.23 \neq 0 \Rightarrow$ NO cumple.
- PI ($K_p = 10$, $T_I = 1.5$): $e_{ss} = 0$, M_p puede ser alto.
- PID ($K_p = 10$, $T_I = 1.5$, $T_D = 0.2$): $e_{ss} = 0$, M_p controlado.

El PID cumple todas las especificaciones

1.14 13. Tablas resumen

1.14.1 Tabla 1: Acciones de control y sus efectos

Acción	Función de transferencia	Efecto sobre velocidad	Efecto sobre e_{ss}	Efecto sobre estabilidad
P	$C(s) = K_p$	Aumenta	Reduce (no elimina en tipo 0)	Puede degradar

Accion	Funcion de transferencia	Efecto sobre velocidad	Efecto sobre e_{ss}	Efecto sobre estabilidad
I	$C(s) = K_i/s$	Reduce	Elimina	Degrada
D	$C(s) = K_D s$	Poco efecto	Sin efecto	Mejora
PI	$K_p(1 + 1/(T_I s))$	Reduce ligeramente	Elimina	Degrada ligeramente
PD	$K_p(1 + T_D s)$	Similar a P	No mejora	Mejora
PID	$K_p(1 + 1/(T_I s) + T_D s)$	Buena	Elimina	Mejora

1.14.2 Tabla 2: Efecto de aumentar cada parametro del PID

Parametro	Tiempo de subida	Sobreoscilacion	Tiempo de establecimiento	Error e_{ss}
$\uparrow K_p$	Disminuye	Aumenta	Pequeno cambio	Disminuye
$\uparrow T_I$ (mas I)	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
$\uparrow T_D$ (mas D)	Pequeno cambio	Disminuye	Disminuye	Sin efecto

Nota: $\uparrow T_I$ significa $\downarrow$ la constante T_I (mas accion integral), lo cual corresponde a $\uparrow K_i = K_p/T_I$.

1.14.3 Tabla 3: Ziegler-Nichols - Metodo 1 (Curva de reaccion)

Controlador	K_p	T_I	T_D
P	$T/(KL)$	∞	0
PI	$0.9 \cdot T/(KL)$	$L/0.3 = 3.33L$	0
PID	$1.2 \cdot T/(KL)$	$2L$	$0.5L$

1.14.4 Tabla 4: Ziegler-Nichols - Metodo 2 (Oscilacion sostenida)

Controlador	K_p	T_I	T_D
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$T_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$T_{cr}/2$	$T_{cr}/8$

1.14.5 Tabla 5: Guia rapida de seleccion de controlador

Situacion	Controlador recomendado	Razon
Solo necesita velocidad, tolera error	P	Sencillo
Necesita error cero, tolera sobreoscilacion	PI	Elimina error

Situacion	Controlador recomendado	Razon
Necesita baja sobreoscilacion, tolera error	PD	Amortigua
Necesita error cero Y baja sobreoscilacion	PID	Combina todo
Planta con retardo puro	ZN Metodo 1	Aprovecha parametros de retardo
Se puede experimentar con la planta	ZN Metodo 2	Obtiene Kcr, Tcr experimentalmente

1.15 Resumen final

En este tema hemos estudiado:

1. **Control ON-OFF**: el mas simple, genera oscilacion permanente.
2. **Controlador P**: rapido pero con error permanente (en planta tipo 0).
3. **Controlador I**: elimina error pero es lento y oscilatorio.
4. **Controlador D**: anticipa el error, no se usa solo.
5. **PD**: reduce sobreoscilacion sin mejorar error.
6. **PI**: elimina error a costa de mas sobreoscilacion.
7. **PID**: combina las tres acciones para el mejor compromiso.
8. **Ziegler-Nichols Metodo 1**: sintonizacion a partir de la curva de reaccion (K, L, T).
9. **Ziegler-Nichols Metodo 2**: sintonizacion a partir de la oscilacion sostenida (K_{cr}, T_{cr}).

Las **formulas clave** del PID:

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