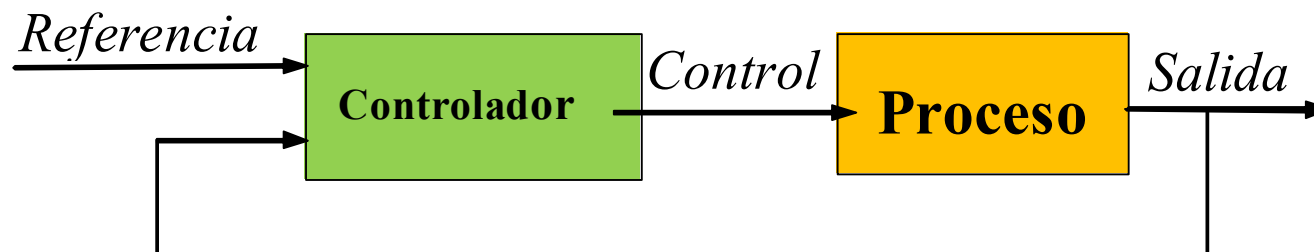


1.3 CONTROL DE PROCESOS

CONTROL DE PROCESOS

El diseño de un controlador:

- ⇒ **seleccionar un controlador**
- ⇒ **ajustar sus parámetros**
- ⇒ **SINTONÍA (calibración)**





PASOS

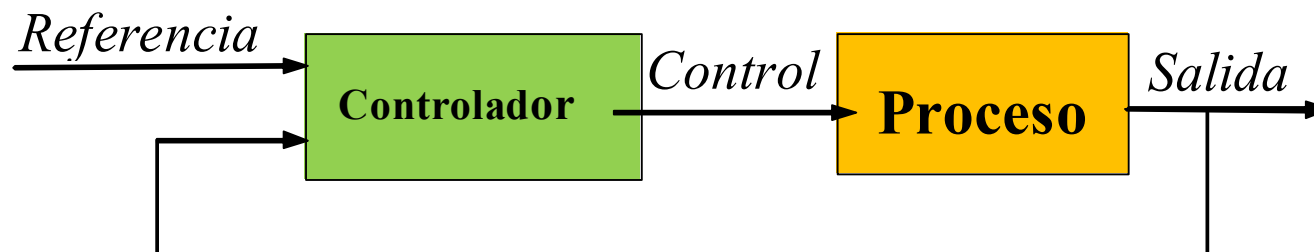
- Qué tipo de sistema se desea controlar
- Obtener un modelo matemático: función de transferencia (relación de Laplace entre la salida y la entrada) o el modelo de espacio de estado.
- Decidir qué tipo de control (según medidas disponibles, especificaciones, etc)
- Diseñar el controlador
- Programar el algoritmo y evaluarlo en el modelo de la planta
- Implementarlo (hardware / software) y evaluarlo en el sistema real



CONTROL DE PROCESOS

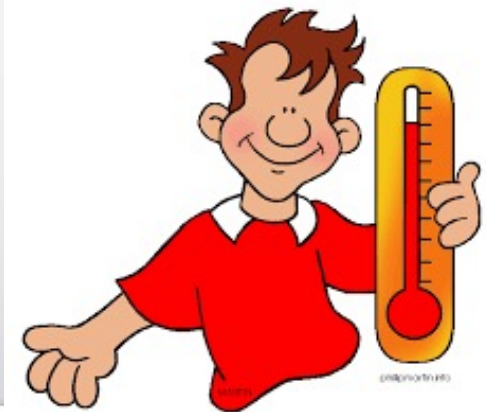
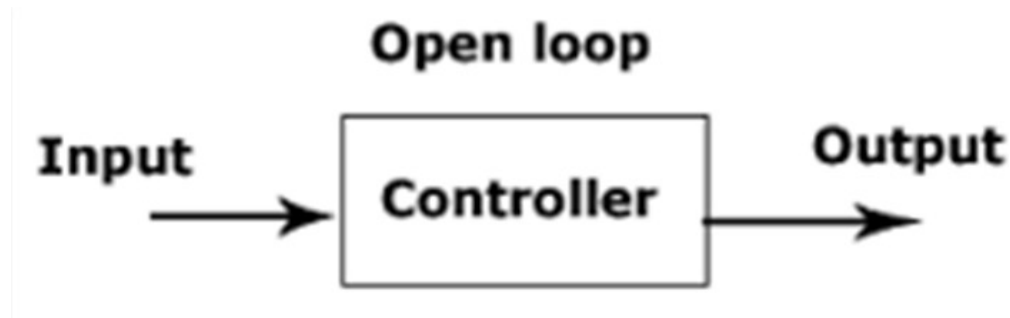
Especificaciones

⇒ **cómo quiero que sea la respuesta**
- tiempo de respuesta, sobreelongación, etc.



¿LAZO ABIERTO O LAZO CERRADO?

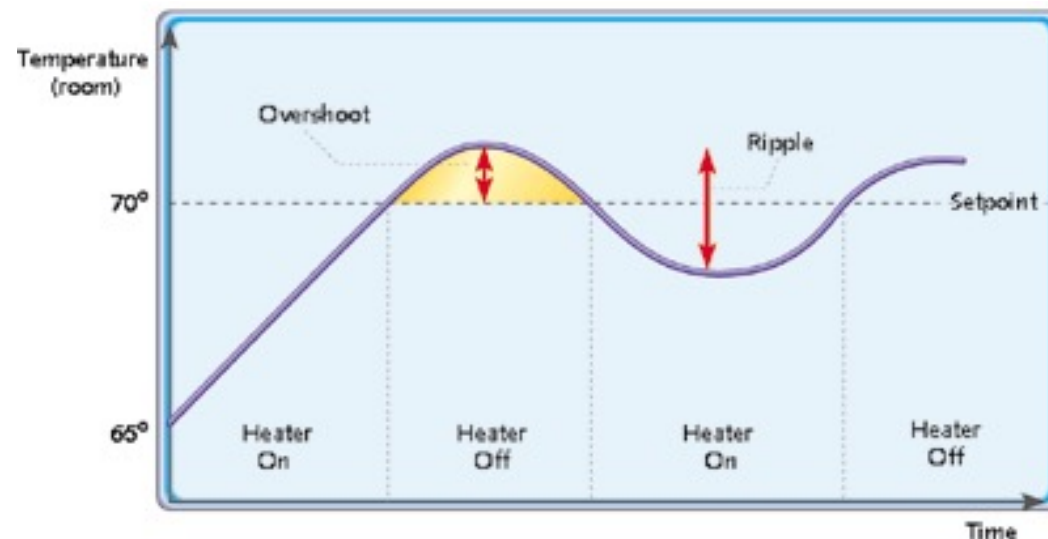
- El termostato de un calentador es un ejemplo de control on-off
 - Un sensor de temperatura enciende el calentador si la temperatura baja del set-point y lo apaga cuando la alcanza



No realimentación, no veo cómo evoluciona (y no puedo hacer nada más que encender o apagar)

CONTROL ON-OFF

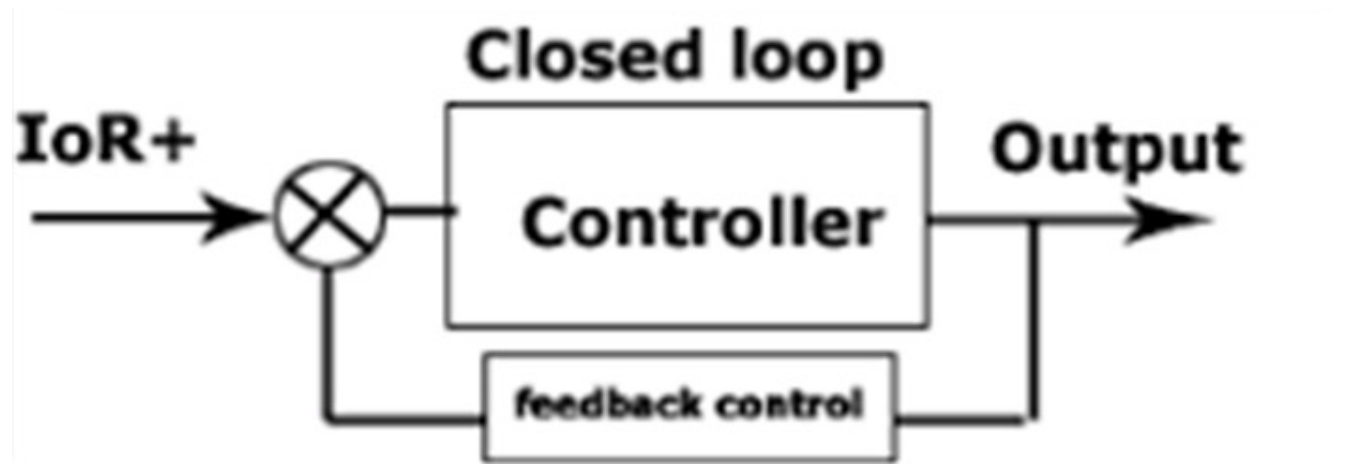
- Aumenta o disminuye la señal de calor a su máximo/mínimo valor (1/0)
- El control on-off no funciona bien para todo tipo de sistemas
 - Si el termostato espera a que se alcance la temperatura deseada para apagarse, puede producir sobreelongación.
 - Esos picos y oscilaciones pueden no ser aceptables por otros sistemas (ascensor)



¿LAZO ABIERTO O LAZO CERRADO?

REALIMENTACIÓN

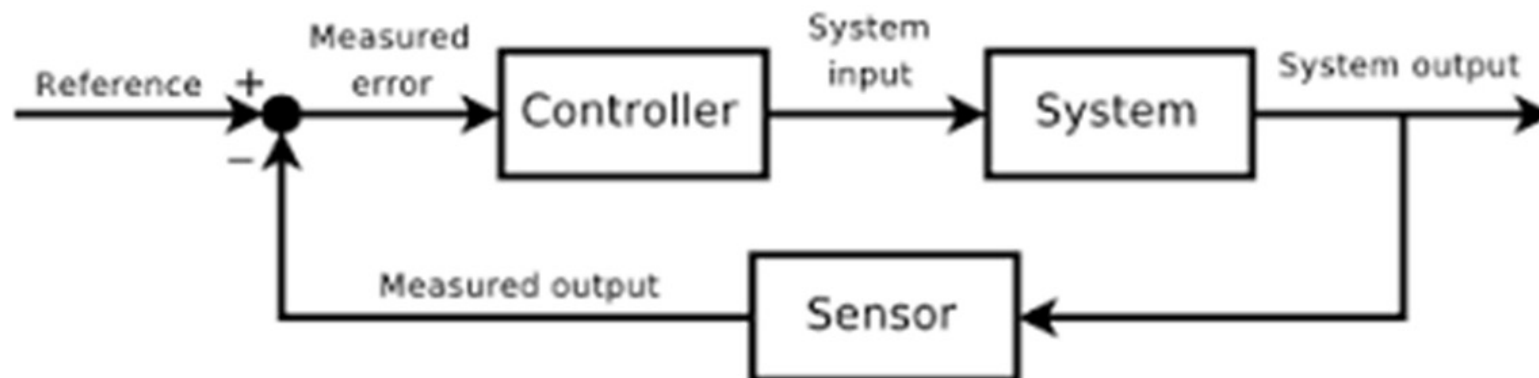
- Medida de la diferencia entre la consigna (valor deseado) y el valor actual
 - *Error*



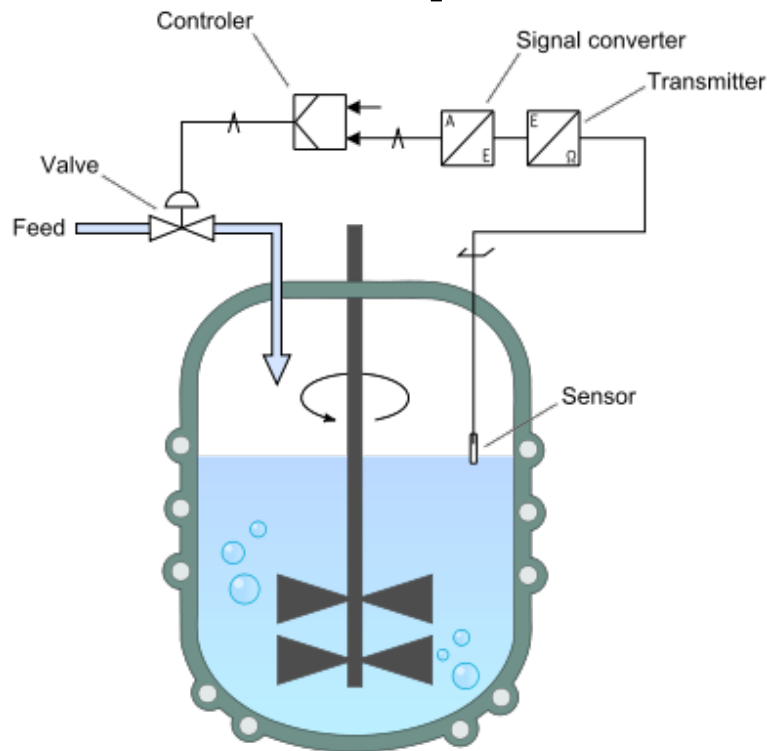


Ejemplo 1: control de velocidad de crucero en un automóvil

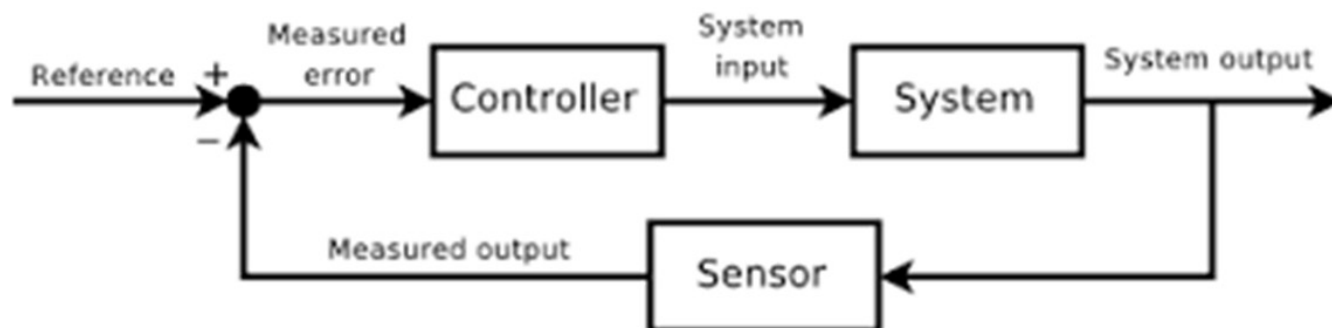
- La velocidad es la *variable medida* (**salida del sistema**).
- El operador (conductor) ajusta la velocidad **de consigna o referencia** (deseada) (100 km/h)
- El controlador mide la velocidad (sensor) y compara la velocidad medida con el punto de consigna (**error**)
- El controlador corrige cualquier desviación ajustando la posición de la válvula de combustible, que es la *variable manipulada* (**señal de control**)



Ejemplo 2: control del nivel de un depósito



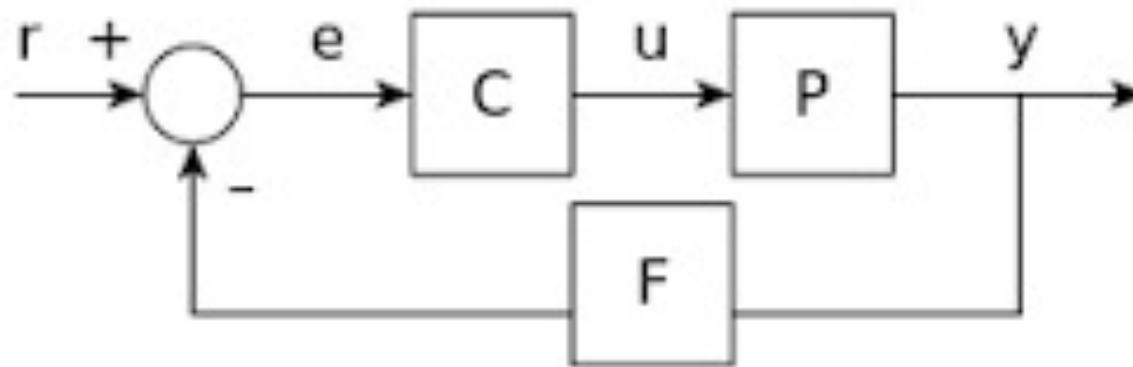
- El nivel del depósito es la *variable medida (salida del sistema)*
- El operador ajusta el **punto de consigna o referencia** al nivel deseado
- El controlador observa el sensor de nivel y compara el nivel medido con el punto de consigna (**error**)
- El controlador determina si es necesario abrir más o menos la válvula (*variable manipulada*) para mantener constante el nivel (**señal de control**)





SEÑALES EN UN SISTEMA DE CONTROL

- Referencia o consigna: $r(t)$
- Salida del sistema: $y(t)$ Error: $e(t) = r(t) - y(t)$
- Acción de control: $u(t)$ $u(t) = f(e(t))$



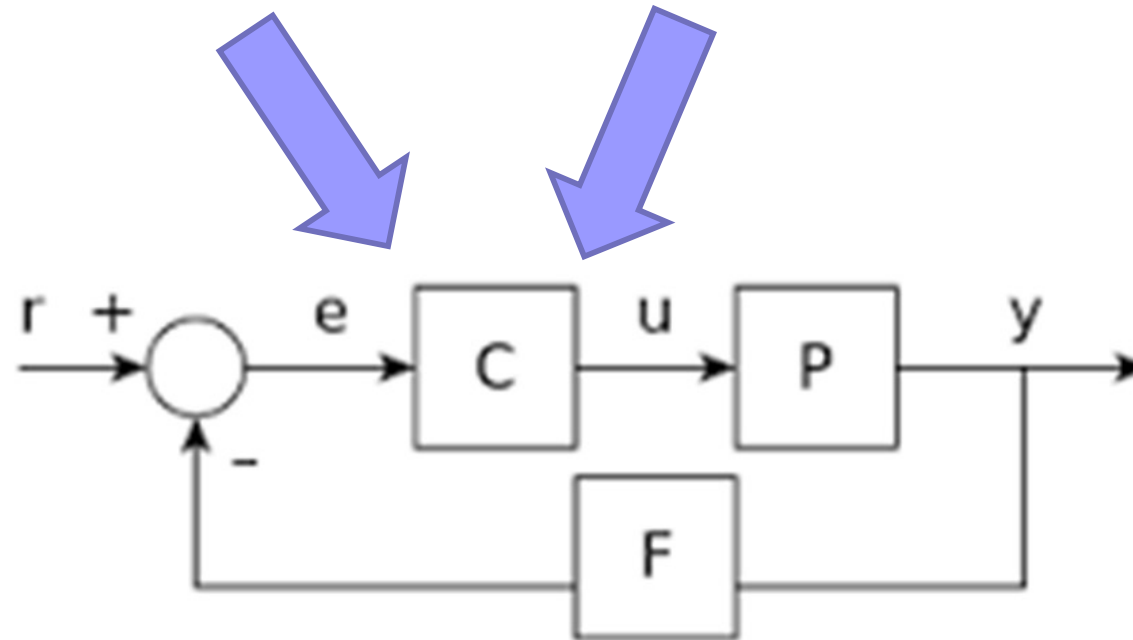


CONTROL CLÁSICO

CONTROL INTELIGENTE

Técnicas
Clásicas

Inteligencia
Artificial





CONTROL DE PROCESOS

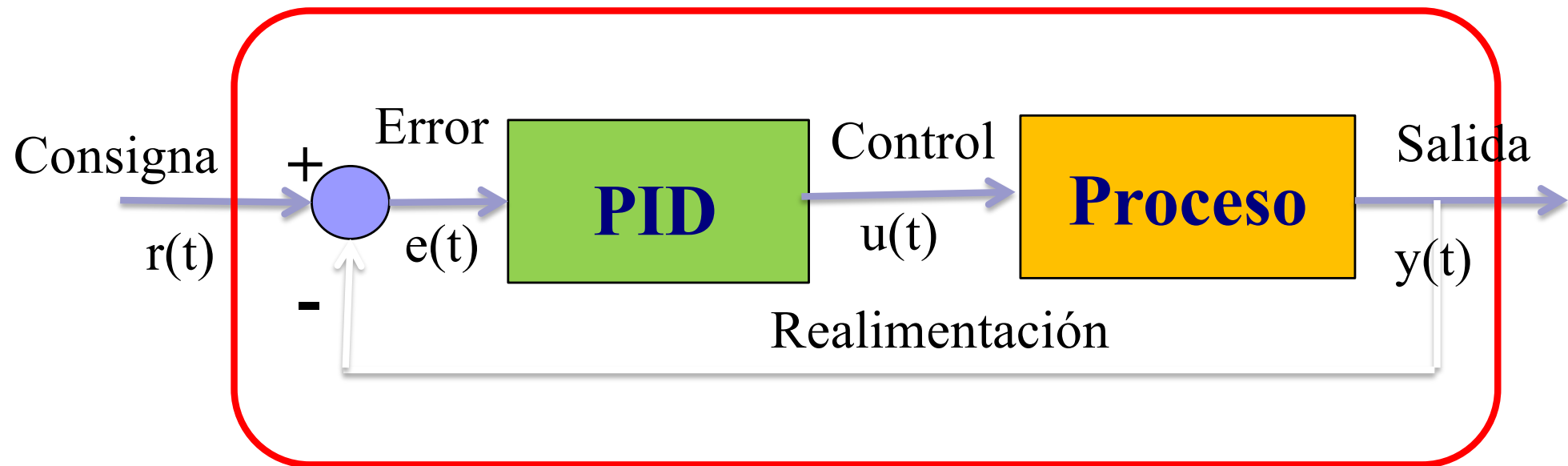
- En la mayoría de los procesos industriales, controladores convencionales con resultados aceptables
- La aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial:
 - ampliar el rango de aplicación de los controladores convencionales
 - facilitar el diseño de controladores no lineales que incorporan conocimiento de los operadores
 - dotarles de funcionalidades avanzadas (adaptación, auto-ajuste, ...)



CONTROLADOR CONVENCIONAL

- ✓ Robustez, simplicidad, lineal
- ✓ Eficiente (problemas simples)
- ✓ Facilidades de funcionamiento y de ajuste
- ✓ Sencillo, rápido, fácil de implementar
- ✓ Sintonía bien establecida (no trivial)
- ✓ Estructura conocida y aceptada en el mundo industrial (85-90 %, desde 1930)
 - ✓ los operarios de planta: conocimiento de sus parámetros y sintonía
 - ✓ cómodos trabajando en ese entorno (experiencia)

CONTROL CONVENCIONAL: PID

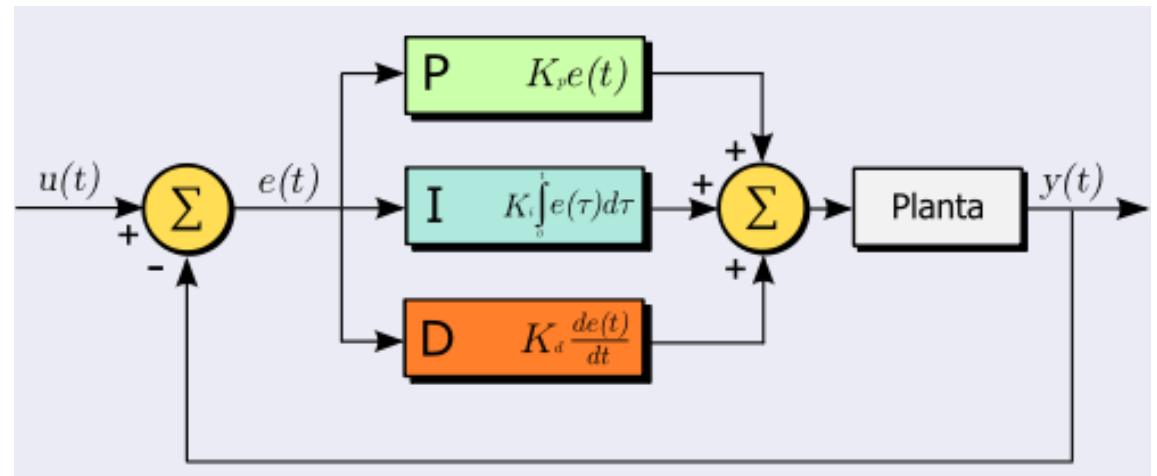


$u(t)$: señal de control o variable manipulada

$e(t) = r(t) - y(t)$: señal de error o desviación entre la señal de referencia o de consigna $r(t)$ y la salida del proceso, que es la variable medida $y(t)$

PID: 3 acciones de control

- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativa (D)



$$u(t) = \boxed{K_p \cdot e(t)} + \boxed{\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau} + \boxed{K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}}$$



$$u(t) = Kp.e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Kp.Td. \frac{de(t)}{dt}$$

◆ ***Acción de control proporcional (u_p)***: a la desviación de la salida del proceso respecto al punto de consigna (error)

$$u_p(t) = Kp.e(t)$$

✓ ***Ganancia proporcional Kp***

Realimentación

- Rechazo de perturbaciones



$$u(t) = Kp.e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Kp.Td. \frac{de(t)}{dt}$$

◆ ***Acción de control integral (u_i):*** proporcional al tiempo que la salida del proceso ha sido diferente del punto de consigna, a la historia pasada del error

$$u_i(t) = \frac{Kp}{Ti} \cdot \int_0^t e(\tau) . d\tau$$

✓ ***Ganancia integral $Ki = Kp/Ti$***

Elimina el error estacionario



$$u(t) = Kp.e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Kp.Td. \frac{de(t)}{dt}$$

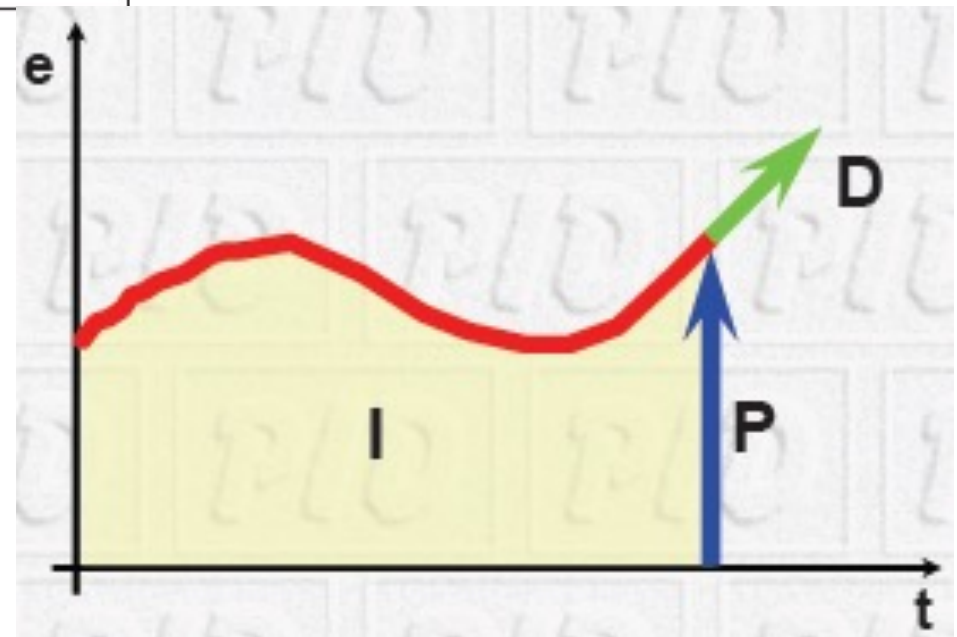
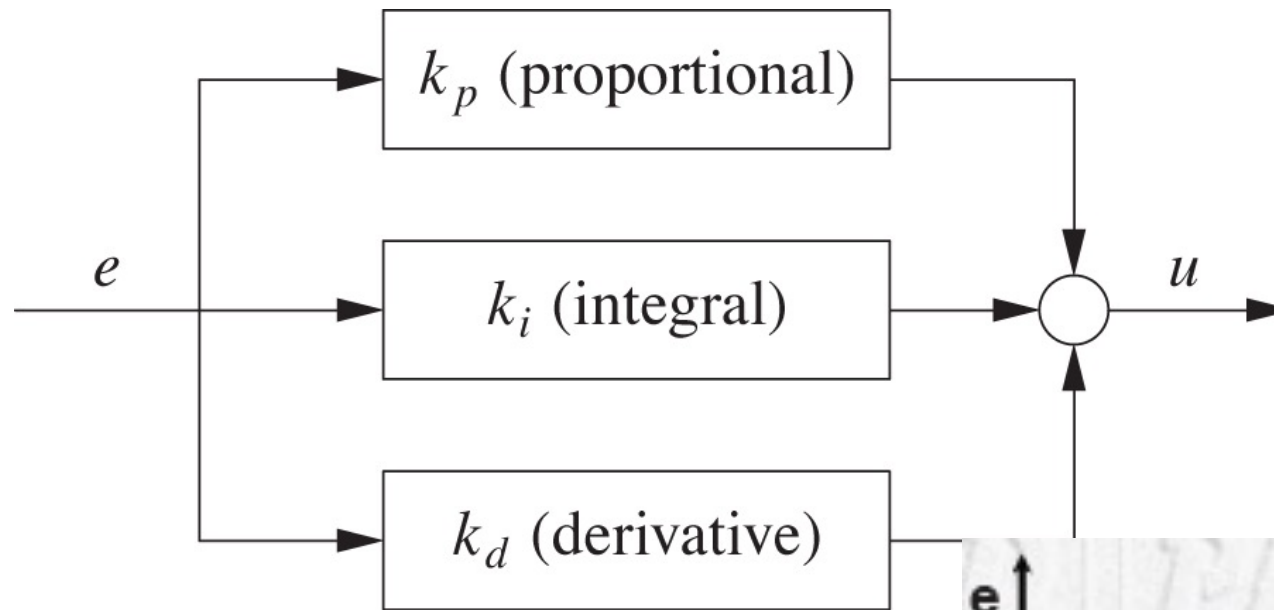
◆ ***Acción de control derivativa (u_d)***: proporcional a la velocidad del error. Predice los cambios

$$u_d(t) = Kp.Td. \frac{de(t)}{dt}$$

✓ ***Ganancia derivativa $Kd = Kp.Td$***

Anticipa

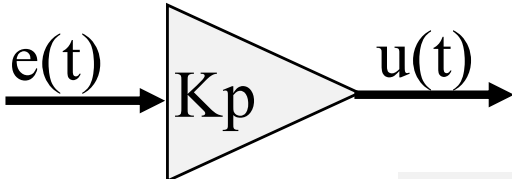
ACCIONES DEL PID



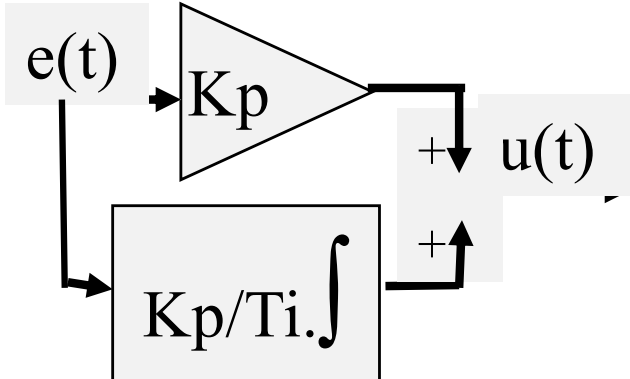
CONTROLADOR P, PI, PD, PID

PID (ISA)
$$u(t) = Kp \cdot \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Td \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]$$

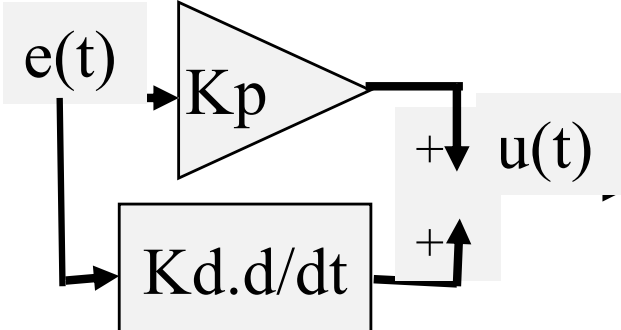
P
$$u(t) = Kp \cdot e(t)$$



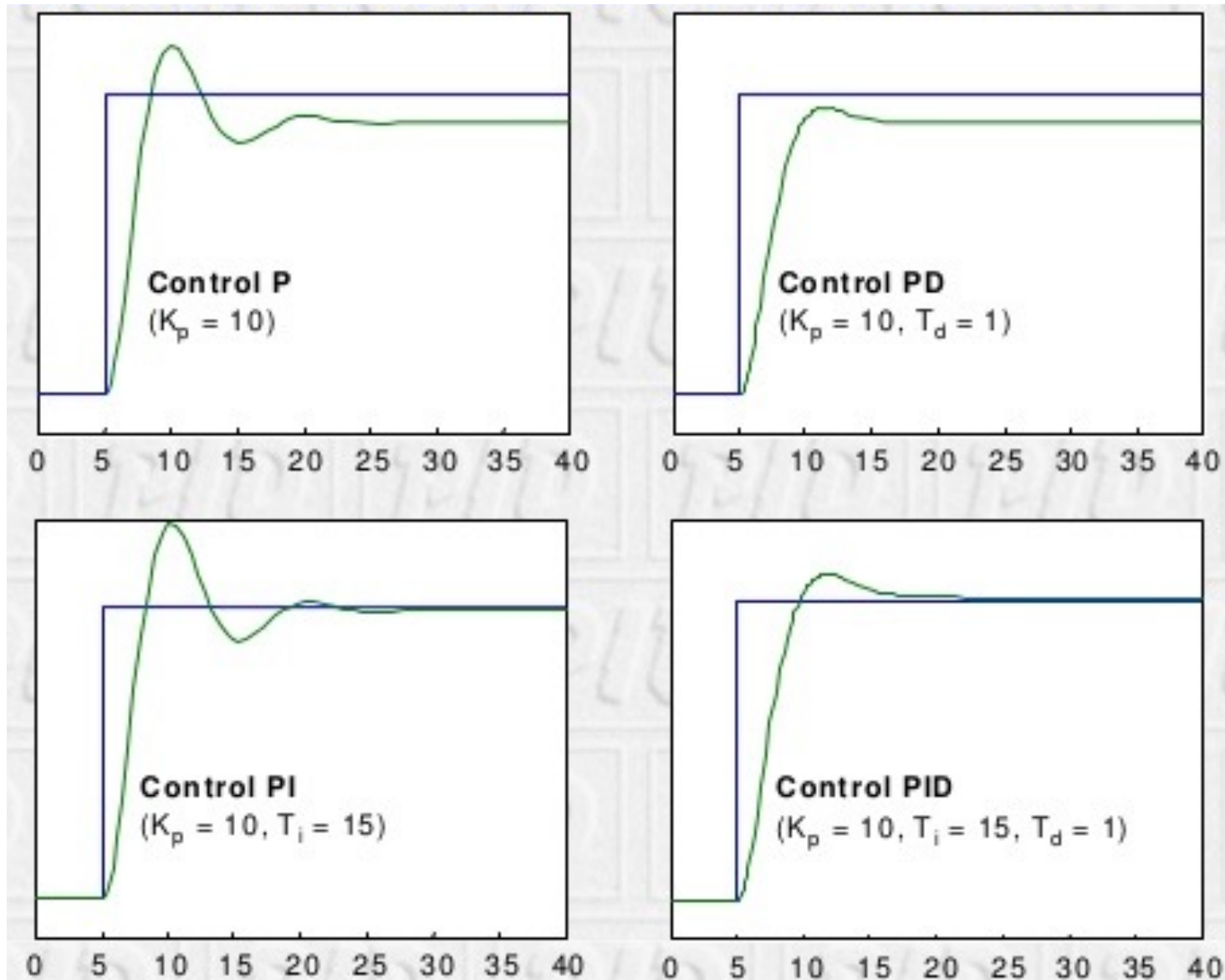
PI
$$u(t) = Kp \cdot \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau \right]$$



PD
$$u(t) = Kp \cdot \left[e(t) + Td \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]$$



¿P, PI, PD o PID?





SINTONÍA

- Seleccionar un controlador es importante
- Sintonizar el controlador es importante



MÉTODOS DE SINTONÍA

- Una vez elegido el **tipo de controlador** hay que **ajustar sus parámetros** (**sintonía**) para que cumpla unas determinadas especificaciones (características de la respuesta)
 - **Métodos directos**: se basan en la misma **respuesta** del sistema
 - **Métodos indirectos**: se basan en un **modelo** del sistema



METODOS DIRECTOS:

Sintonía cualitativa

- Simples prescripciones sobre qué parámetros del PID cambiar y cómo (aumentar o disminuir), para conseguir determinadas especificaciones
 - conocimiento de sus efectos sobre el sistema en lazo cerrado

- Conocimiento empírico
 - tablas de sintonía (respuesta del sistema para diferentes valores de los parámetros) y reglas heurísticas

PARÁMETROS DE AJUSTE DEL PID

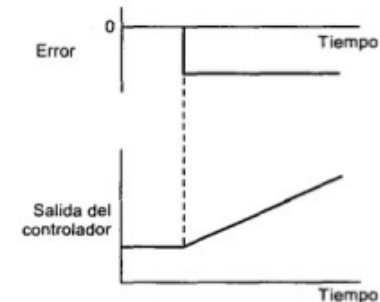
- *Ganancia proporcional K_p*

- *Ganancia integral: $K_i = K_p/T_i$*

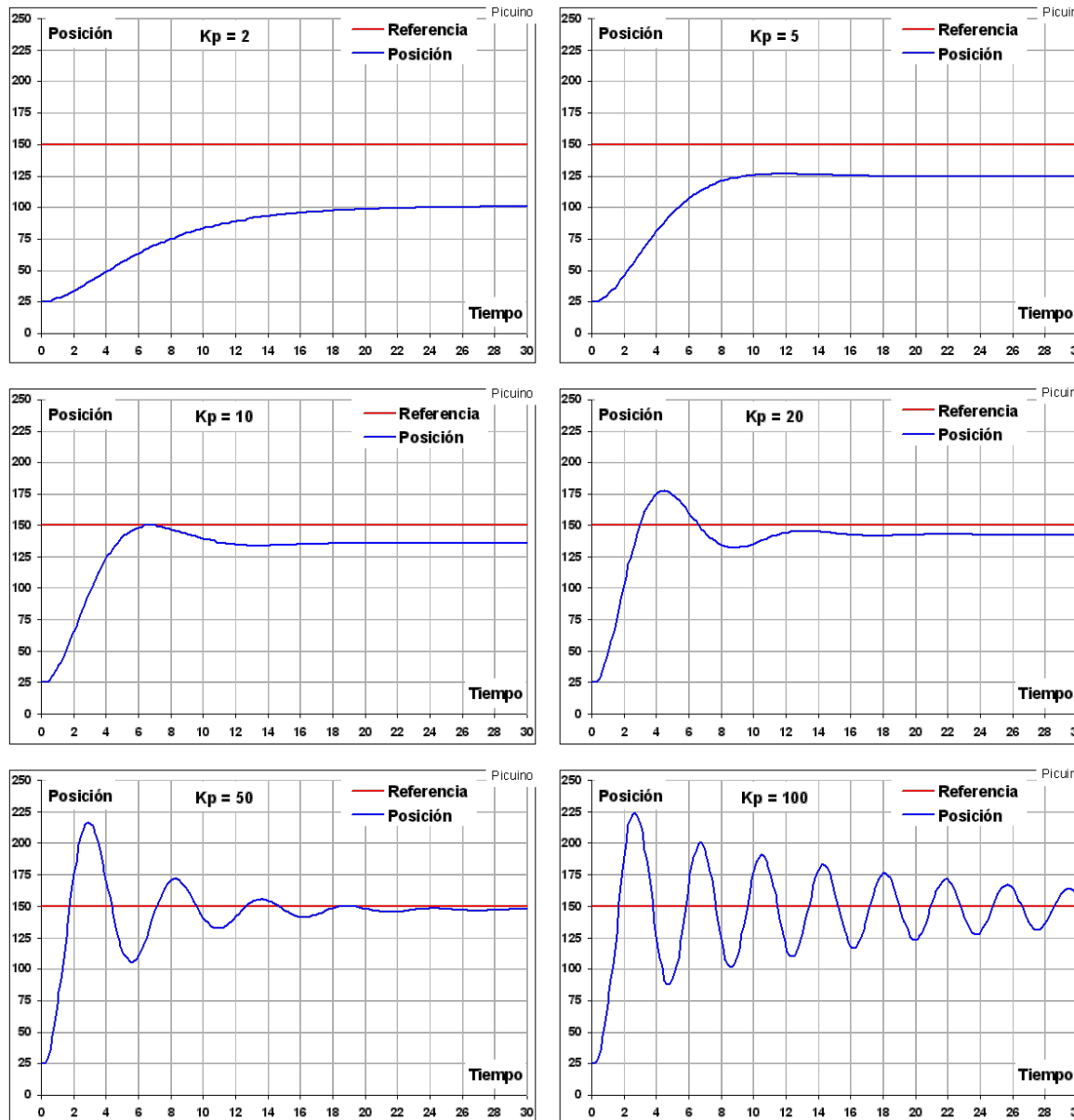
- *Constante de tiempo integral (T_i): tiempo requerido para que la acción integral contribuya a la salida $u(t)$ en una cantidad igual a la acción proporcional*

- *Ganancia derivativa: $K_d = K_p.T_d$*

- *Constante de tiempo derivativa (T_d): tiempo requerido para que la acción derivativa adelante a la acción proporcional*

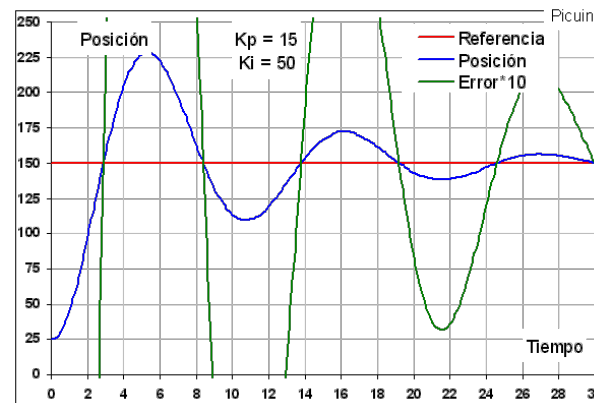
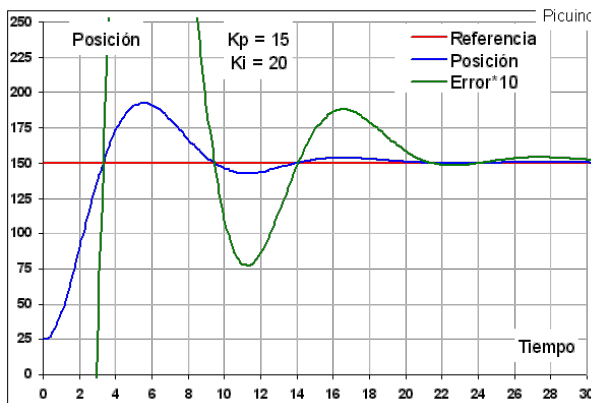
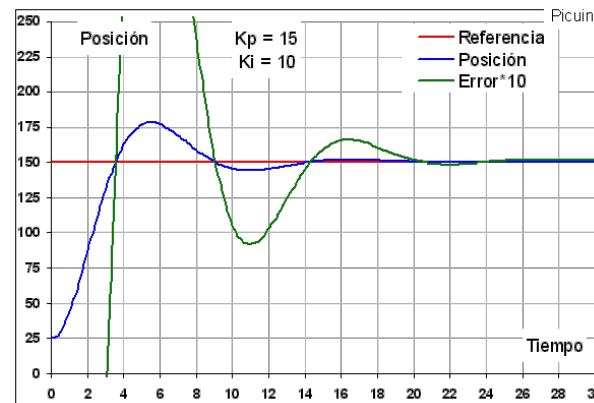
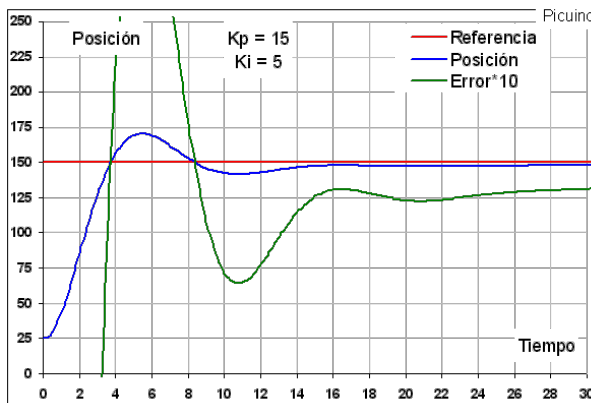
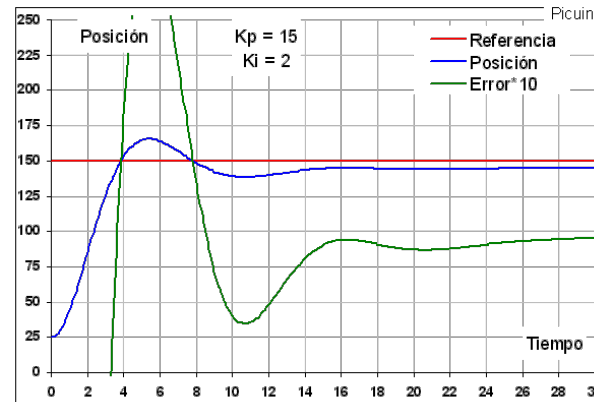
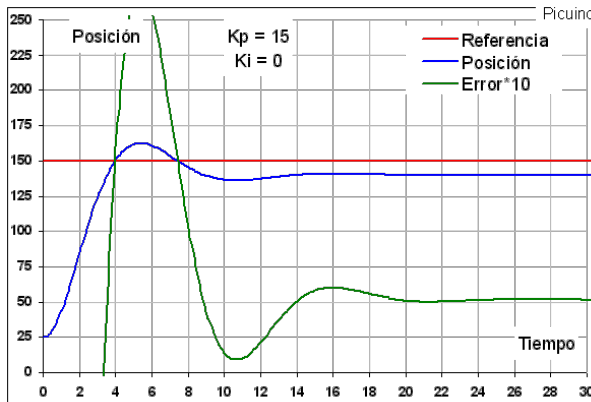


VARIACIÓN CUALITATIVA K_p



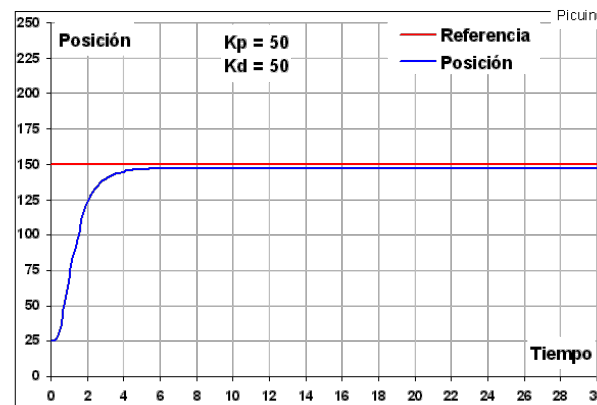
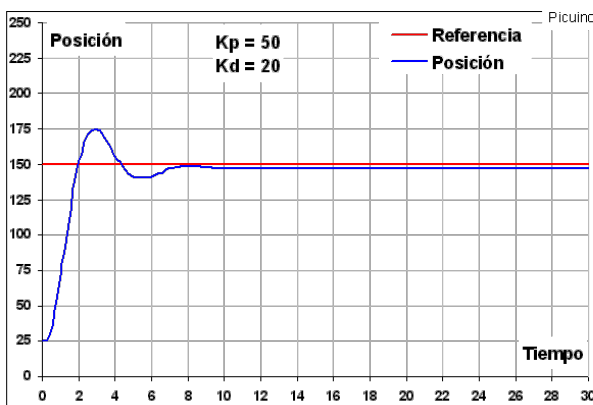
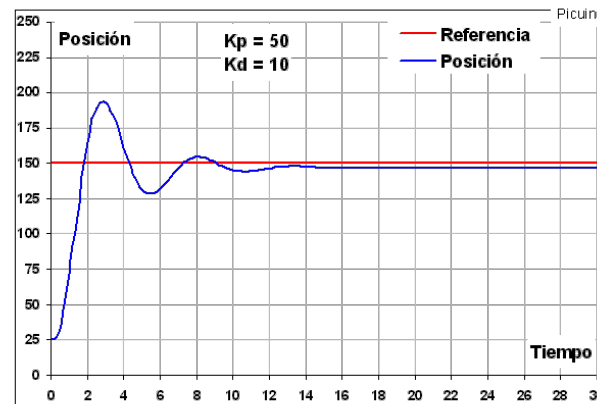
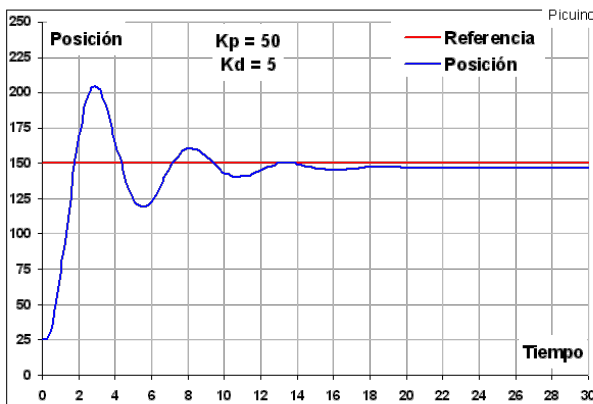
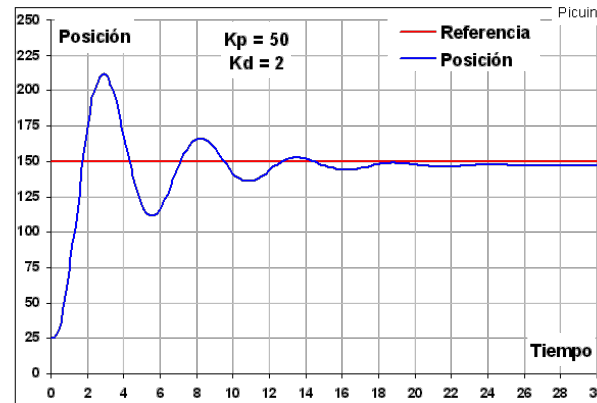
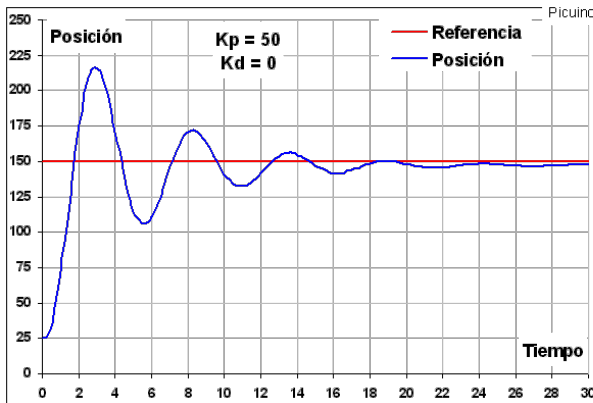
- Aumenta la velocidad de respuesta
 - Sistema más rápido
 - Menor tiempo de subida
 - Mejora el transitorio
- Disminuye el error en régimen permanente
- Menos estable
 - Más sensible a perturbaciones

VARIACIÓN CUALITATIVA K_i



- Elimina el error en estado estacionario
- Aumenta la inestabilidad
- Alarga el transitorio
- Aumenta un poco la velocidad del sistema
- Señal de error ampliada (verde), para apreciar cómo se reduce el error a medida que aumenta la acción integral.

VARIACIÓN CUALITATIVA K_d



- Mejora la estabilidad
 - Permite valores más elevados de K_p
- Disminuye un poco la velocidad del sistema
 - Más lento
- El error en régimen permanente permanece igual
- Amplifica las señales que varían rápidamente
 - Ruido de alta frecuencia

SINTONÍA CUALITATIVA

	K_p aumenta	T_i disminuye	T_d aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área de error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce
Perturbación control	Aumenta bruscamente	Aumenta gradualmente	Aumenta muy bruscamente
Frecuencia lazo	No afecta hasta cierto punto	Disminuye	Aumenta

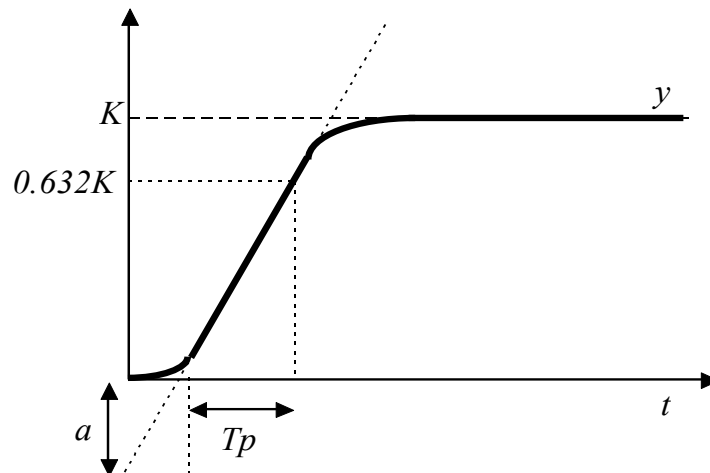


MÉTODOS INDIRECTOS:

Sintonía cuantitativa

- Calcula las ganancias del controlador en función de los parámetros de un modelo
- Estimación de ciertas características del proceso (en lazo abierto o en lazo cerrado, de la respuesta temporal o frecuencial)
- Fórmulas de sintonía (relaciones empíricas)
 - Valores aproximados para los parámetros del controlador (ajuste fino, cualitativo)

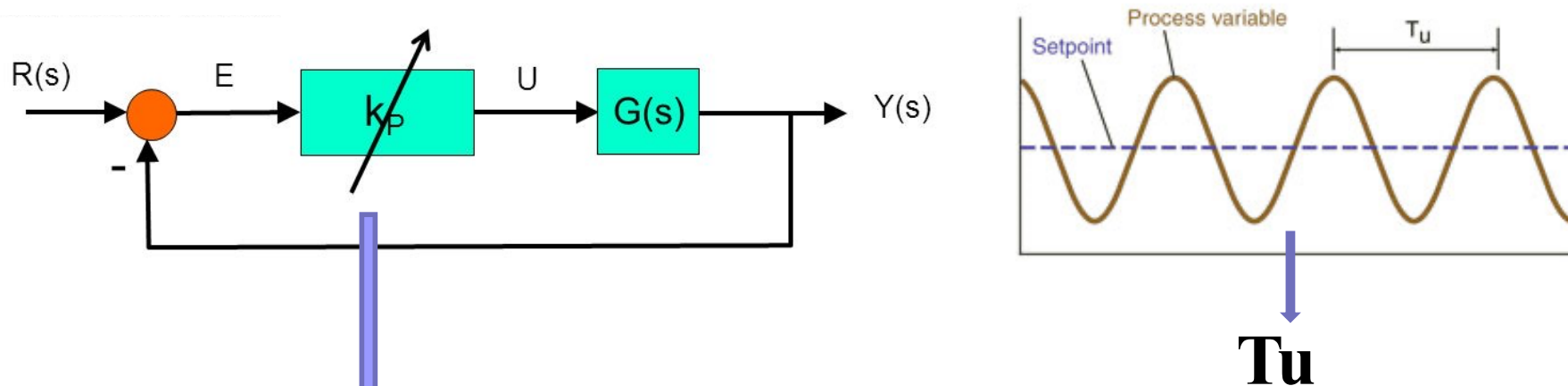
MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (LAZO ABIERTO)



Basado en la respuesta
temporal

	Kp	Ti	Td
P	$T_p/(K \cdot T_o)$		
PI	$0.9T_p/(K \cdot T_o)$	$3.33T_o$	
PID	$1.2T_p/(K \cdot T_o)$	$2T_o$	$0.5T_o$

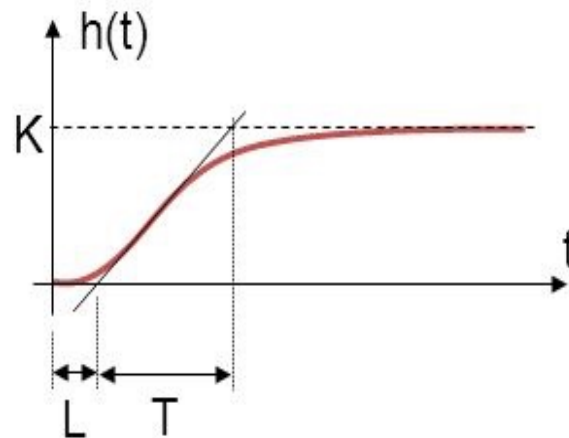
MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (LAZO CERRADO)



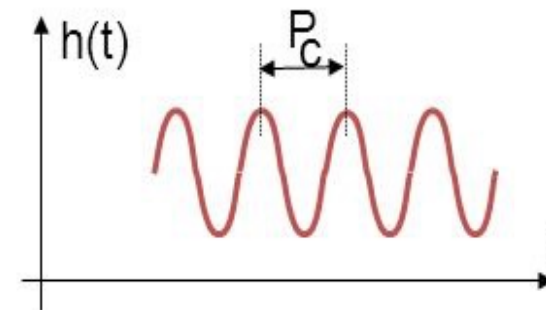
K_u →

	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

OTRAS TABLAS Z-N

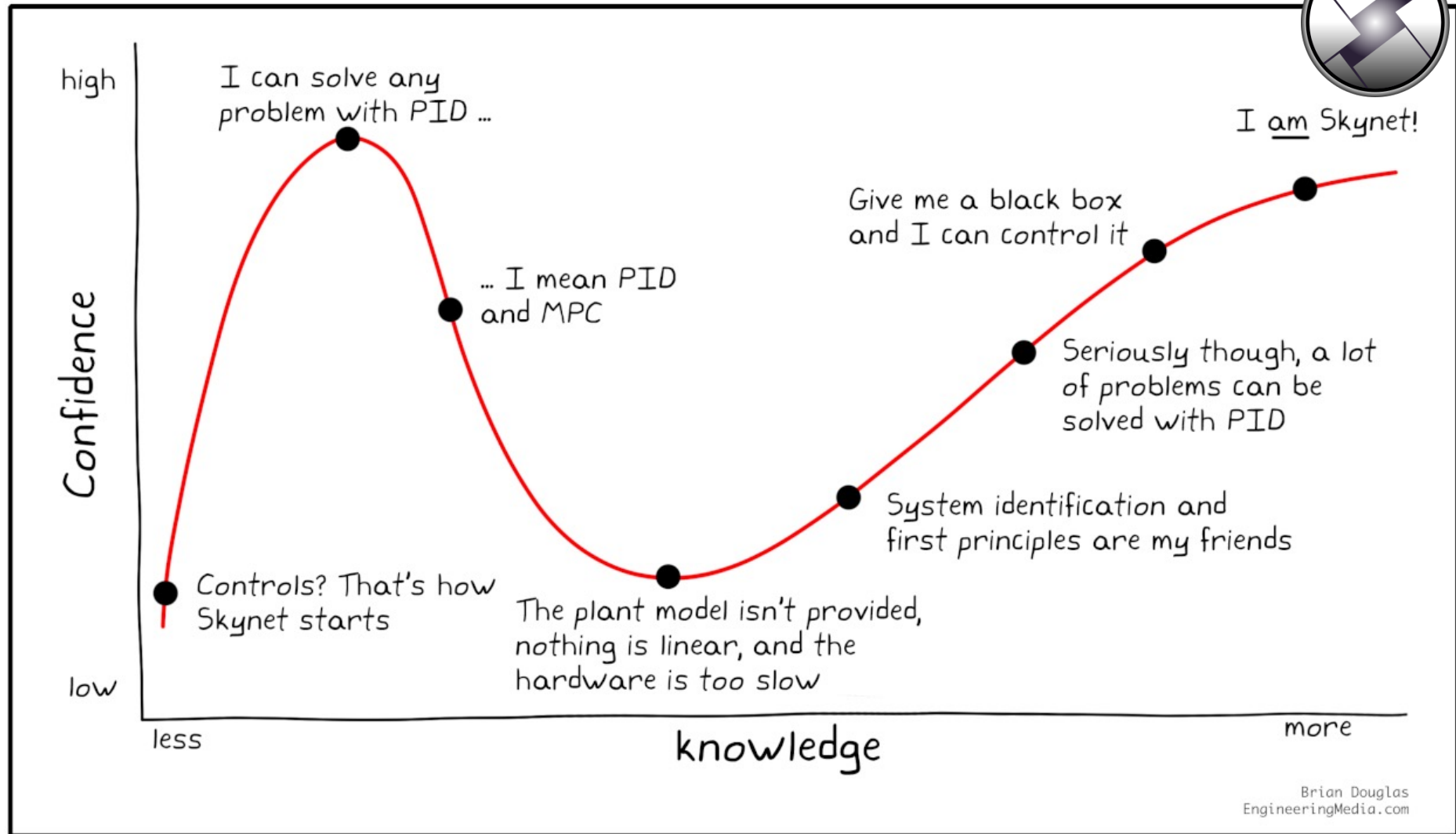


	K_P	K_I	K_D
P	T/L	0	0
PI	$0.9 T/L$	$0.3/L$	0
PID	$1.2 T/L$	$0.5/L$	$0.5L$



	K_P	K_I	K_D
P	$0.5 K_c$	0	0
PI	$0.45 K_c$	$1.2/P_c$	0
PID	$0.6 K_c$	$2/P_c$	$0.125 P_c$

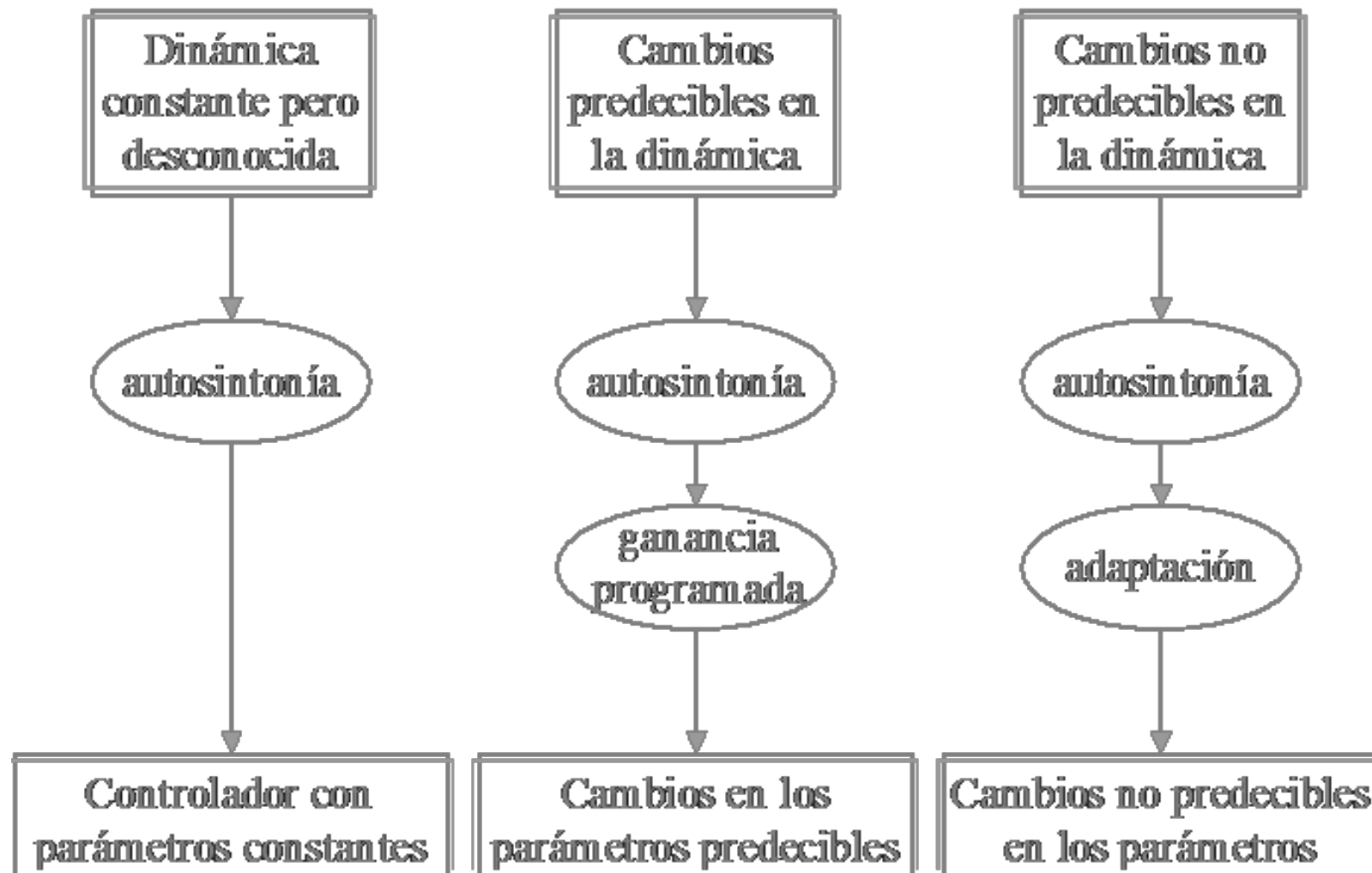
Dunning-Kruger effect for control engineers





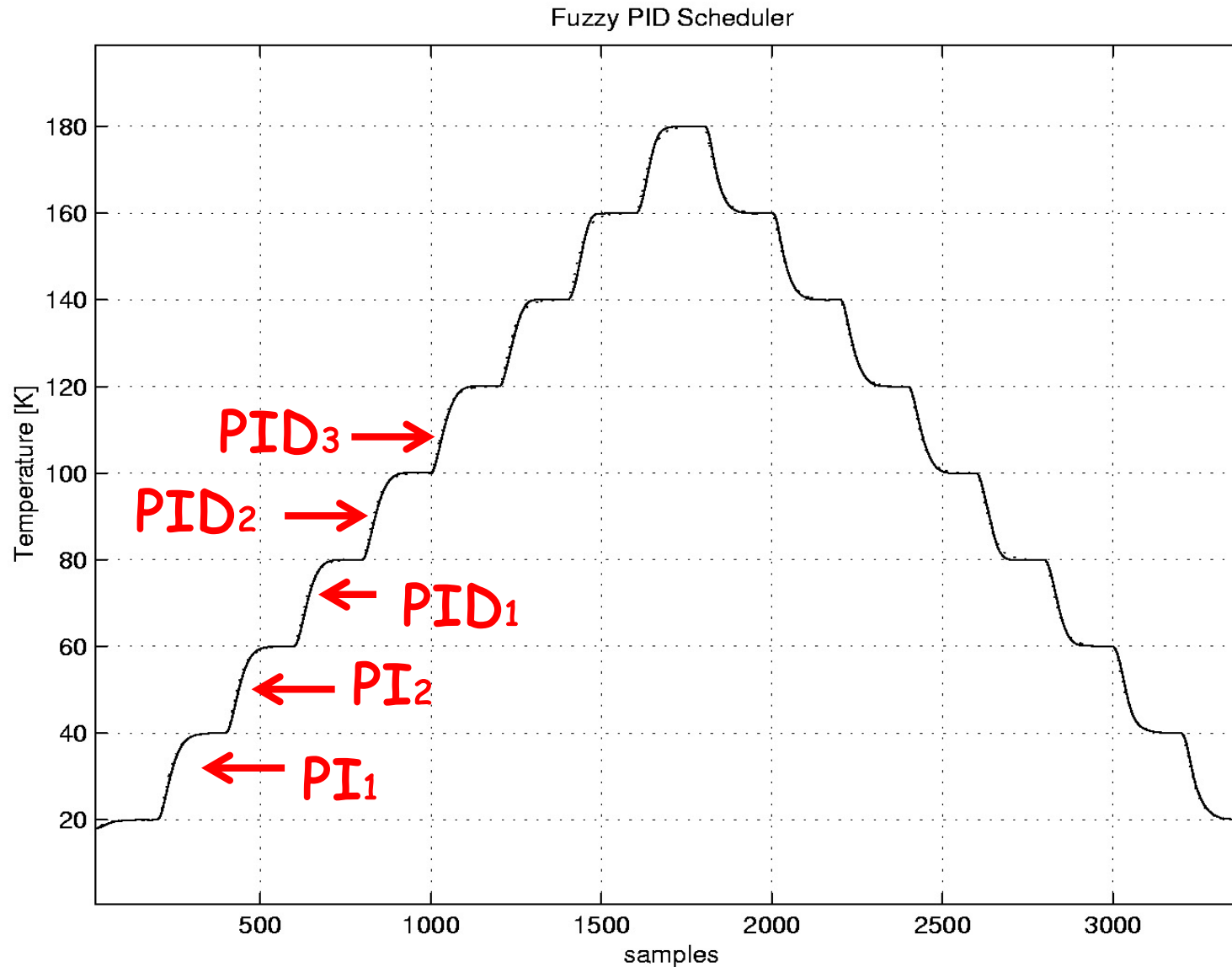
ESTRATEGIAS DE CONTROL

- **Autosintonía**: sintonía automática del controlador a petición del usuario
- **Ganancia Programada**: los parámetros del controlador cambian dependiendo de variables auxiliares medidas, con las que se relacionan las variaciones en la respuesta
- **Control Adaptativo**: los parámetros del controlador están continuamente ajustándose para acomodarse a los cambios en la dinámica del proceso y a las perturbaciones

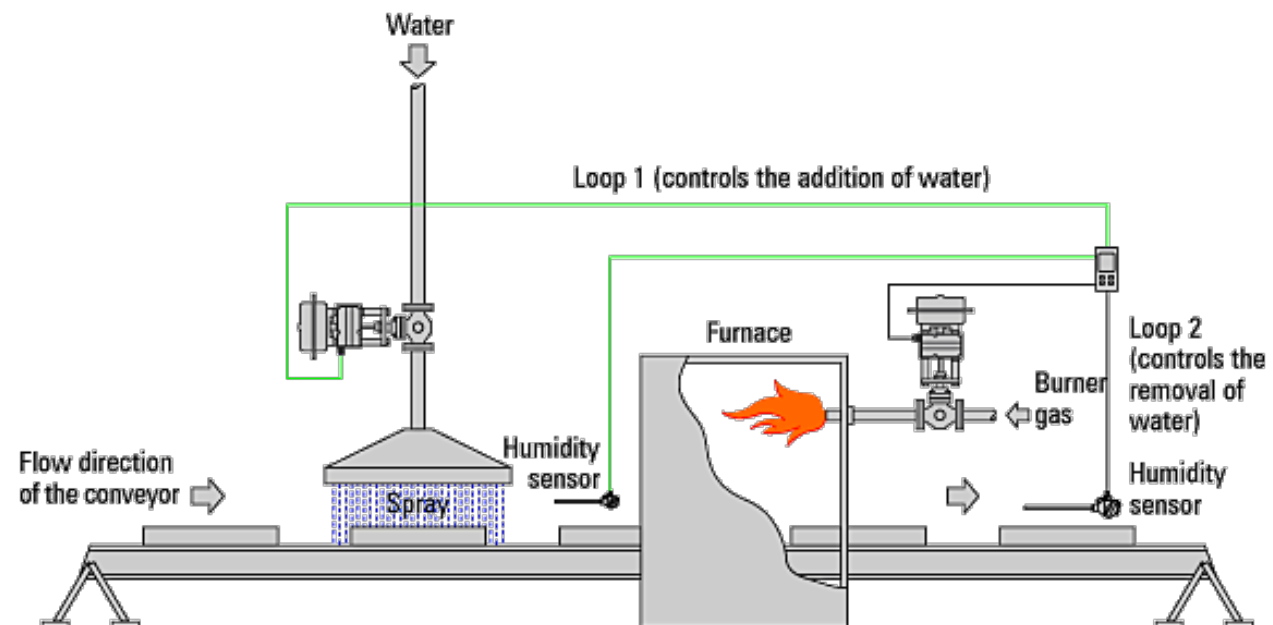
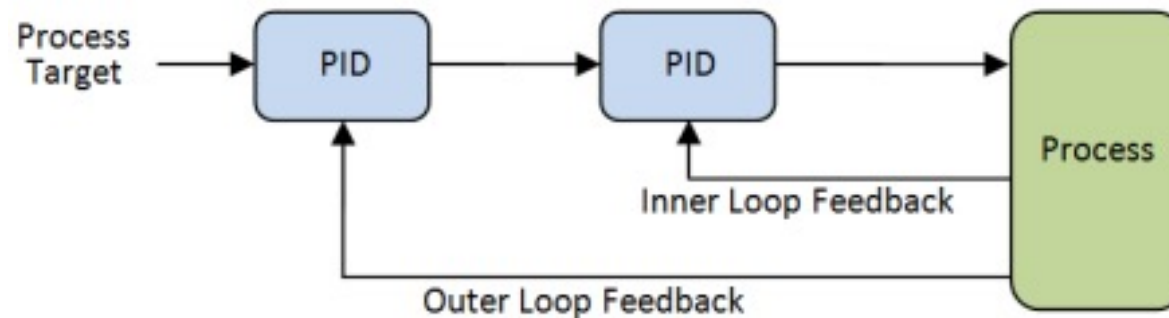


Estrategias de control

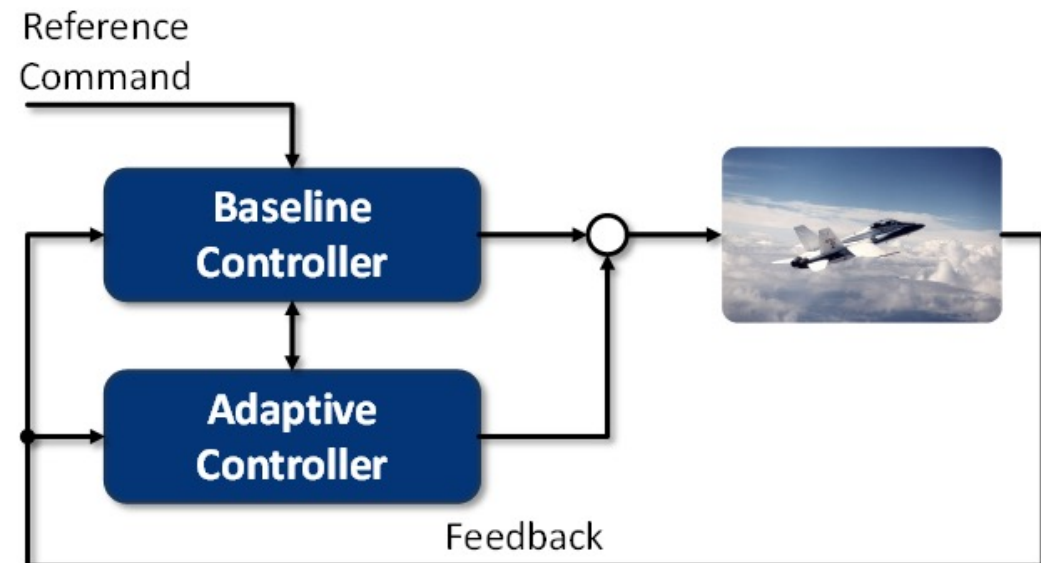
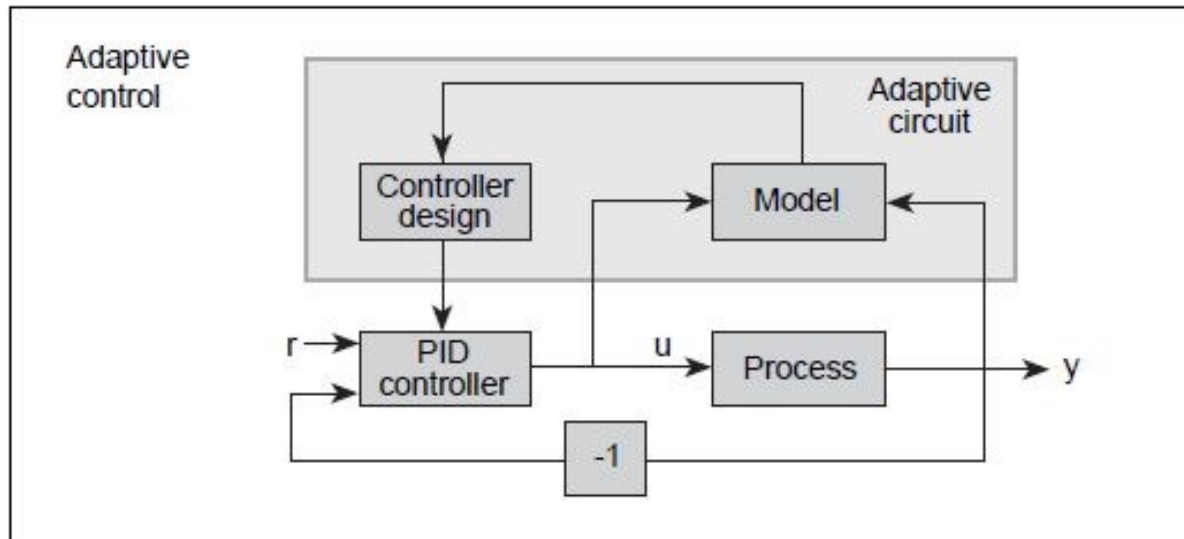
GANANCIA PROGRAMADA

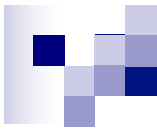


CONTROL EN CASCADA



CONTROL ADAPTATIVO





Por lo tanto, el desarrollo de un sistema de control abarca diversos pasos: desde el estudio y descripción del proceso a controlar -eligiendo la forma que más se adecue a los requerimientos de la aplicación- hasta el diseño, ajuste y funcionamiento del controlador elegido

