

INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL CONTROL

INTRODUCCION AL CONTROL DE PROCESOS

Dpto.: Arquitectura de Computadores y Automática
Autor: Matilde Santos

M. Santos, UCM

CONTROL DE PROCESOS

- INTRODUCCIÓN
- MODELOS
- CONTROL DE PROCESOS

M. Santos, UCM

Introducción al Control de Procesos

- *El control de procesos abarca:*

- ◆ *el estudio de las plantas a controlar*
- ◆ *las técnicas empleadas para tal fin*



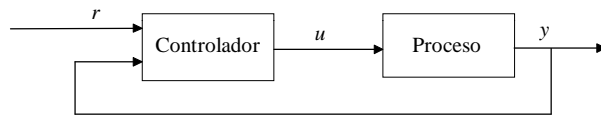
M. Santos, UCM

Introducción al Control de Procesos

- modelado e identificación
 - análisis
- estrategias de control
 - síntesis

M. Santos, UCM

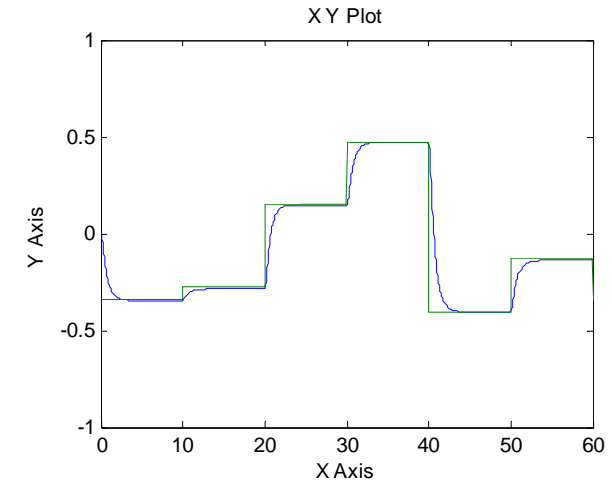
■ El controlador es el encargado de mantener el punto de consigna a la salida ante posibles perturbaciones externas (*carga*) o cambios en la referencia (*consigna*), mediante su acción u



Ejemplo: tanque de agua
Controlador: tipo y ajuste

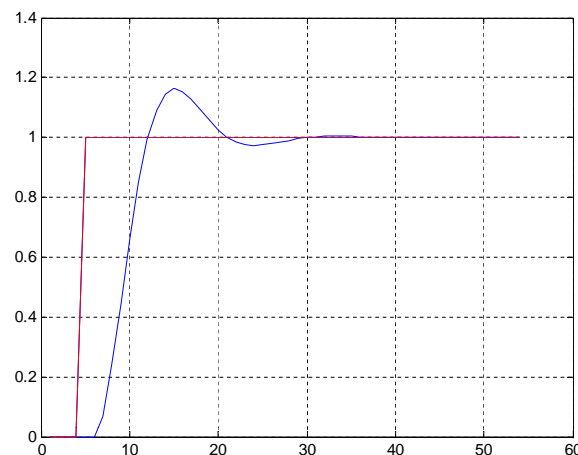
M. Santos, UCM

EJEMPLO:



M. Santos, UCM

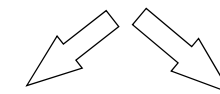
RESPUESTA DE UN SISTEMA



M. Santos, UCM

Control Inteligente

La obtención del algoritmo de control puede abordarse desde distintas perspectivas:



Enfoque Convencional

Inteligencia Artificial



Control Inteligente

M. Santos, UCM

PROCESOS

Los procesos a controlar describen plantas reales de cualquier ámbito:

- industrial, nuclear, comunicaciones
- químicos, biológicos, médicos,
- desarrollos económicos, predicciones



M. Santos, UCM

- **Discretos:** sus variables de estado cambian solo en determinados instantes de tiempo, y no de forma continua

- ♦ *una estación de peaje en una autopista, a la que llegan coches de forma aleatoria*

- **Procesos continuos:** las variables de estado evolucionan continuamente a lo largo del tiempo tomando un conjunto continuo de valores

- ♦ *la temperatura de una habitación a lo largo del día*

M. Santos, UCM

MODELADO DE SISTEMAS

El modelo de un sistema es cualquier tipo de descripción abstracta que refleja convenientemente sus características relevantes

- se basa siempre en aproximaciones e hipótesis (representa parcialmente la realidad)
- se construye para un fin específico, y debe formularse de modo que sea útil para tal fin
- compromiso entre la sencillez (manejable) y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema

M. Santos, UCM

TIPOS DE MODELOS

- **modelos matemáticos**
conjunto de relaciones matemáticas entre las variables del sistema tales que las soluciones al conjunto de ecuaciones, para los mismos estímulos del sistema real, tengan valores similares

- **otros modelos**
(según el tipo de información)
 - lingüísticos (verbal),
 - prototipos a escala,
 - símiles eléctricos,
 - modelo mental,
 - cualitativo
 - etc.

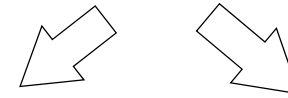
M. Santos, UCM

Tipos de Modelos Matemáticos

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">■ Estáticos: aquellos en los que las variables no evolucionan con el tiempo- Se usan preferentemente en estudios de optimización, dimensionamiento, diseño de unidades, cálculo de balances, etc.. | <ul style="list-style-type: none">■ Dinámicos: las variables evolucionan a medida que transcurre el tiempo- Se usan para el estudio de transitorios, predicción, sistemas de control, ... |
|--|---|

M. Santos, UCM

OBTENCIÓN DE MODELOS



MODELADO

IDENTIFICACIÓN

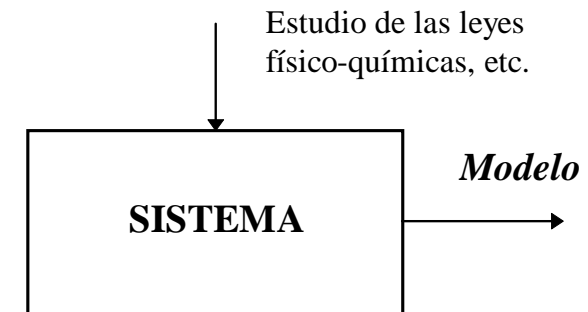
M. Santos, UCM

MODELADO

- Los métodos de modelado generan conjuntos de ecuaciones diferenciales y algebraicas, normalmente no lineales:
 - › hipótesis sobre el mismo
 - › leyes de comportamiento físico-químicas, u otras particulares para el tipo de sistema, o expresiones deducidas de datos experimentales

M. Santos, UCM

Modelado

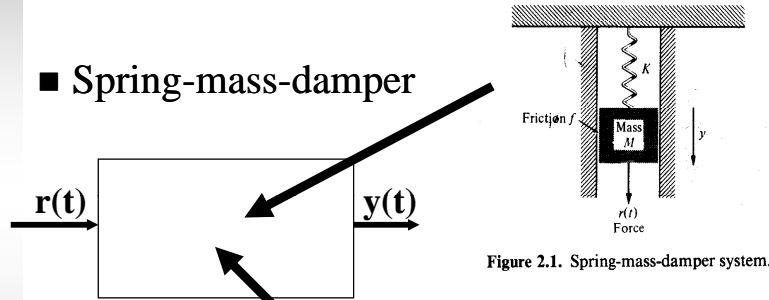


- amplio rango de validez,
- una tarea larga: requiere experiencia y conocimiento del sistema

M. Santos, UCM

MODELIZACIÓN

■ Spring-mass-damper



$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = r(t)$$

M. Santos, UCM

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

■ Spring-mass-damper

◆ Condiciones iniciales nulas (reposo)

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = r(t)$$

T. L

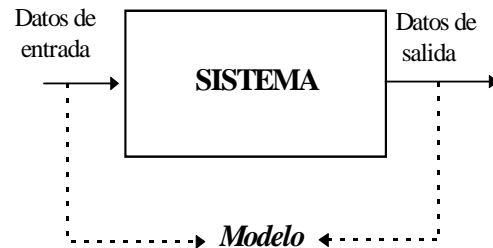
$$Ms^2 Y(s) + fs Y(s) + KY(s) = R(s)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ms^2 + fs + K} = G(s)$$

M. Santos, UCM

IDENTIFICACIÓN

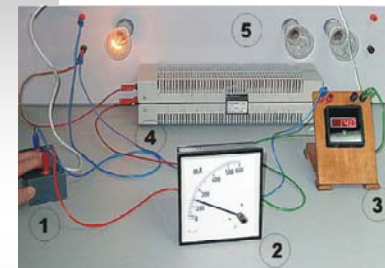
Generan ecuaciones lineales, sin hacer hipótesis ni tener en cuenta los mecanismos internos de funcionamiento: se basan exclusivamente en el uso de datos experimentales de entrada y salida (caja negra)



NO INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LOS PARÁMETROS

M. Santos, UCM

Ejemplo de identificación

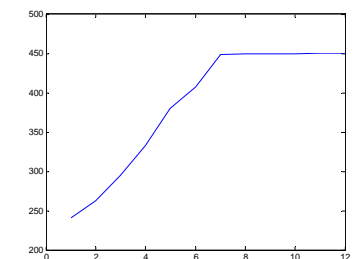


- (1) Pulsador
- (2) Amperímetro
- (3) Voltímetro
- (4) Resistencia variable (reóstato)
- (5) Lámparas de filamento de carbono
- (6) Lámpara de filamento metálico

$$V(t) = a I(t) + b I^2(t)$$

M. Santos, UCM

Tensión (V)	Intensidad (A)	Resistencia (R)
135	0.149	906.04
140	0.150	927.15
150	0.165	909
160	0.180	888.89
170	0.190	894.73
185	0.210	880.95
200	0.230	869.56



La metodología que se sigue en las técnicas de identificación consiste en:

- ◆ Postular una clase de modelos para el sistema

Polinómico

- ◆ Realizar experimentos adecuados y tomar un conjunto de datos de entrada y salida del proceso

Input/output

- ◆ Escoger un tipo de modelo y estimar sus parámetros por algún método numérico

Polinomio de 2º grado

M. Santos, UCM

IDENTIFICACIÓN

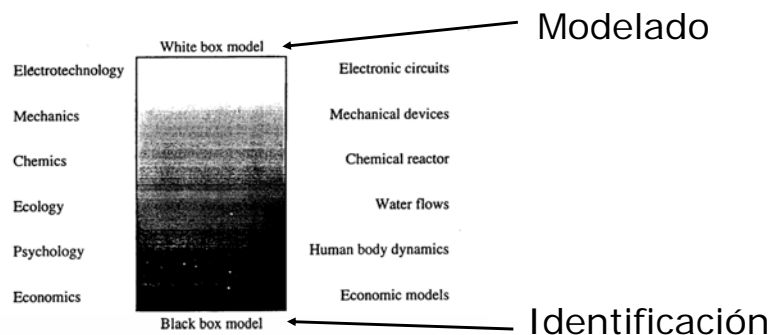
- ✓ modelos lineales orientados a control
- ✓ entorno de validez más restringido
- ✓ suelen ser más sencillos de deducir

Sirven para refinar o calcular los valores de un modelo obtenido por modelado

M. Santos, UCM

OBTENCIÓN DEL MODELO SEGÚN LA INFORMACIÓN

GRADO DE DETALLE



La complejidad va a depender del sistema que intentemos modelar y simular

M. Santos, UCM

TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN

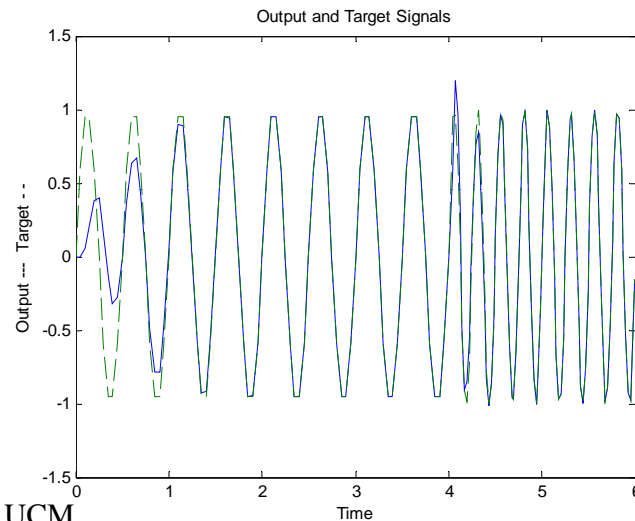
MÉTODOS RECURSIVOS

Se aplican algoritmos recursivos a los datos de entrada-salida para obtener el modelo del sistema

- ✓ suelen dar modelos lineales discretos
- ✓ la entrada puede ser cualquier valor, normalmente señales aleatorias
- ✓ dominio del tiempo y de la frecuencia

M. Santos, UCM

EJEMPLO: Adaptación



M. Santos, UCM

TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN

MÉTODOS BASADOS EN ENTRADAS ESPECIALES

Se aplica al sistema un estímulo conocido (salto, rampa, ...), y de la respuesta se deduce el modelo

- ✓ modelos lineales
- ✓ generan funciones de transferencia
- ✓ se aplican en ambientes no estocásticos
- ✓ dominio del tiempo y de la frecuencia

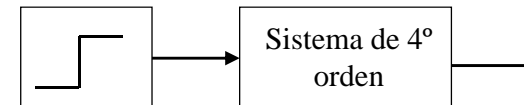
M. Santos, UCM

EJEMPLO 1: IDENTIFICACIÓN EN EL DOMINIO TEMPORAL

RESPUESTA DE UN SISTEMA A UNA SEÑAL DETERMINÍSTICA

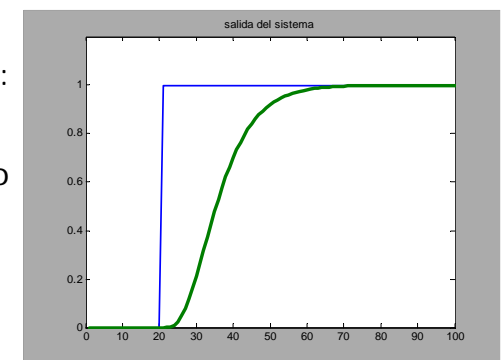
La mayoría de los procesos industriales producen una respuesta estable monótona creciente a una entrada escalón, similar a la de un sistema de primer orden con retardo

M. Santos, UCM



• Características en el dominio temporal:

- la ganancia o valor estacionario
- Tiempo de subida
- el retardo

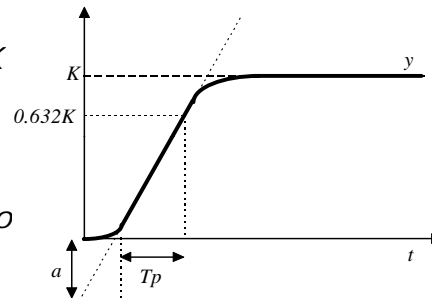


M. Santos, UCM

MODELO DE PRIMER ORDEN CON RETARDO

• Características en el dominio temporal:

- la ganancia estática K
- la constante de tiempo dominante T_p
- el retardo aparente T_o



M. Santos, UCM

EJEMPLO 2

Modelos en el dominio de la frecuencia

Un sistema lineal estable con función de transferencia G ; se introduce una entrada sinusoidal, la salida también es periódica

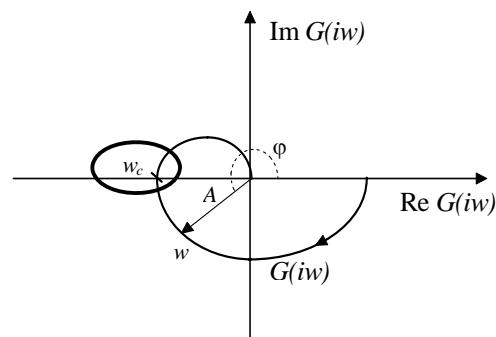
$$G(i\omega) = A(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)}$$

Su representación en el plano complejo da una descripción completa del sistema

- sólo unos pocos puntos son relevantes

M. Santos, UCM

Las características típicas en el dominio de la frecuencia:
margen de ganancia, margen de fase, la ganancia crítica, el periodo crítico, etc.



Curva de Nyquist del sistema G

Frecuencia crítica o de cruce w_c

M. Santos, UCM

PUNTOS RELEVANTES DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

• la **ganancia crítica K_u** :

- ganancia de un controlador proporcional a partir de la cual el sistema en lazo cerrado deja de ser estable

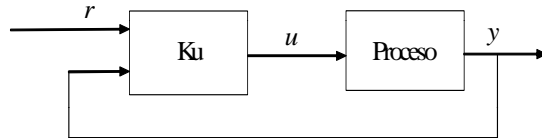
• el **periodo de oscilación mantenida T_u** :

- periodo de la oscilación que se consigue con ese valor de ganancia

M. Santos, UCM

MÉTODOS EXPERIMENTALES para la determinación indirecta de parámetros en el dominio de la frecuencia

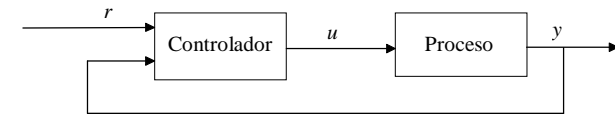
- el método de la oscilación mantenida



- forzando la oscilación de la variable controlada mediante un sistema del tipo relé (sistema on-off)

M. Santos, UCM

OBTENCIÓN DEL MODELO DE LA PLANTA



MODELADO \Rightarrow Ecuación en t \rightarrow TL \rightarrow Función de transferencia

IDENTIFICACIÓN \Rightarrow Métodos recursivos (mínimos cuadrados, regresión)

IDENTIFICACIÓN \Rightarrow Métodos basados en entradas especiales $\left\{ \begin{array}{l} \text{Dominio temporal (K, To, Tp)} \\ \text{Dominio frecuencial (Ku, Tu)} \end{array} \right.$

M. Santos, UCM

CONTROL DE PROCESOS

El diseño de un controlador:

\Rightarrow **requerimientos del sistema a controlar**

\Rightarrow **características del regulador**
 \Rightarrow **SINTONÍA**

M. Santos, UCM

CONTROL DE PROCESOS

- En la mayoría de los procesos industriales, los controladores convencionales dan resultados aceptables
- La aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial permite:
 - ampliar el rango de aplicación de los controladores convencionales
 - facilitar el diseño de controladores no lineales que incorporan conocimiento de los operadores

M. Santos, UCM

Controladores Convencionales

- robustez y simplicidad inherentes,
- facilidades tanto de funcionamiento como de ajuste,
- sencillo, rápido, fácil de realizar,
- generalmente, fácil de sintonizar,
- estructura bien conocida y aceptada en el mundo industrial

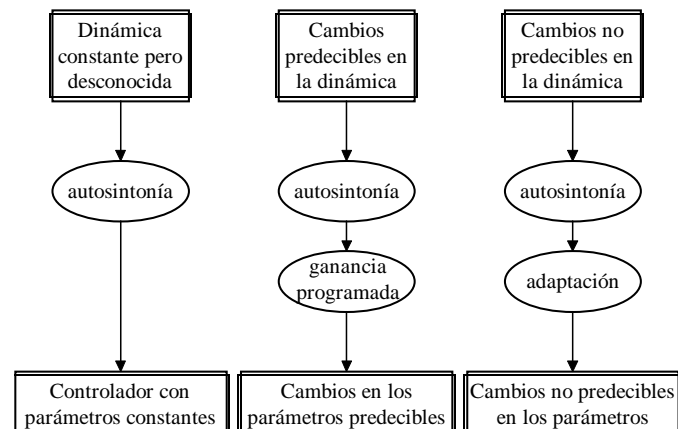
- ✓ los operarios de planta: conocimiento bastante generalizado de los diferentes parámetros del regulador, de su sintonía, y sus consecuencias
- ✓ se encuentren cómodos trabajando en ese entorno

M. Santos, UCM

ESTRATEGIAS DE CONTROL

- **Autosintonía**: sintonía automática del controlador a petición del usuario
- **Ganancia Programada**: los parámetros del controlador cambian dependiendo de unas 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

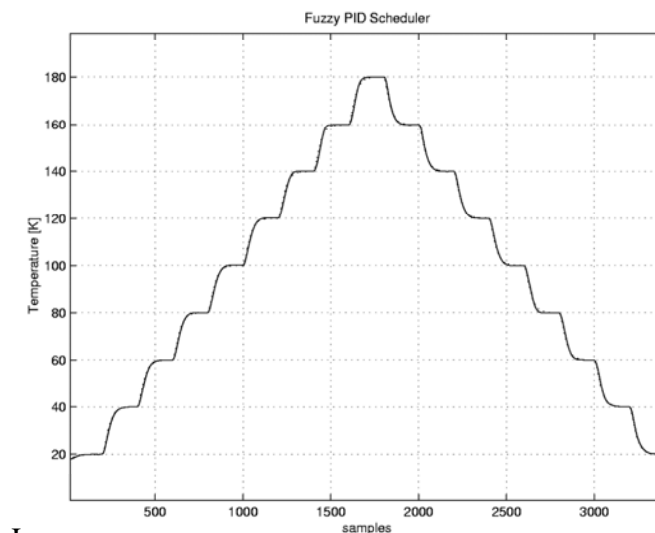
M. Santos, UCM



Estrategias de control

M. Santos, UCM

GANANCIA PROGRAMADA



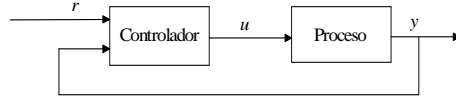
M. Santos, UCM

CONTROLADOR

Controlador PID convencional: su algoritmo de control viene dado por la ecuación (ISA):

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

donde $u(t)$ es la señal de control o variable manipulada en el instante t ,
 $e(t) = r(t) - y(t)$ es la 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 $y(t)$



M. Santos, UCM

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

$$u_p(t) = Kp \cdot e(t)$$

◆ **Acción de control integral (u_i):** proporcional al tiempo que la salida del proceso ha sido diferente del punto de consigna. Tiene en cuenta la historia pasada de la señal del error

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

◆ **Acción de control derivativa (u_d):** proporcional a la velocidad con la que la salida del proceso está cambiando respecto al punto de consigna. Predice los cambios en la señal del error

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

M. Santos, UCM

Parámetros de ajuste del controlador PID

- **Ganancias proporcional (Kp), integral ($Ki = Kp/Ti$) y derivativa ($Kd = Kp \cdot Td$)**
- **Constante de tiempo integral (Ti):** tiempo que debe transcurrir para que la acción integral alcance (iguale o repita) a la proporcional
- **Constante de tiempo derivativa (Td):** intervalo de tiempo en el que la acción derivativa adelanta a la acción proporcional

M. Santos, UCM

CONTROLADOR

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

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

M. Santos, UCM

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)

Existen diversas formas de llevar a cabo la sintonía de los controladores:

- ➞ métodos directos: se basan en la respuesta del sistema
- ➞ métodos indirectos: se basan en un modelo del sistema

M. Santos, UCM

METODOS DIRECTOS: Sintonía cualitativa

Simple prescripciones sobre qué parámetros del PID tienen que cambiar y cómo, para conseguir unas determinadas especificaciones, en base al conocimiento de sus efectos sobre el sistema en lazo cerrado

Este conocimiento empírico ha sido condensado en tablas de sintonía (respuesta del sistema para diferentes valores de los parámetros) y reglas heurísticas que cambian los parámetros del controlador para conseguir las especificaciones

M. Santos, UCM

Efectos cualitativos de la variación de los parámetros

- *Ganancia proporcional K_p* : aumentarla hace al sistema más rápido, reduciendo el tiempo de subida (mejora el transitorio); es más sensible a perturbaciones y el sistema es menos estable
- *Tiempo integral T_i* : elimina el error en estado estacionario, siempre que el sistema siga siendo estable. Disminuirlo — aumentar K_i — tiene un efecto desestabilizador; aumenta la acción integral, alargando el transitorio
- *Tiempo derivativo T_d* : generalmente mejora la estabilidad, lo que permite valores más elevados de K_p . No es recomendable cuando hay ruido ya que lo amplifica

M. Santos, UCM

MÉTODOS INDIRECTOS: Sintonía cuantitativa

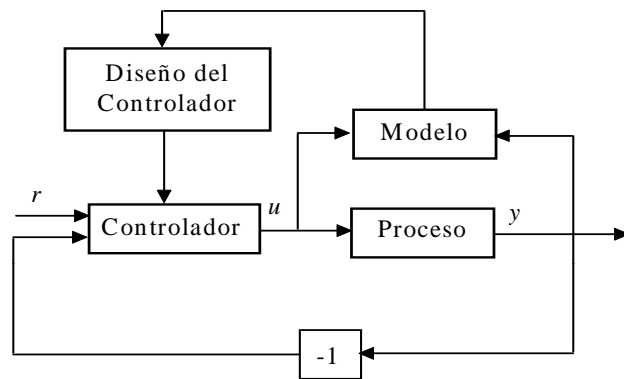
El diseño indirecto calcula los parámetros del controlador en función de los parámetros de un modelo

1 Estimación de ciertas características de la dinámica del proceso (en lazo abierto o en lazo cerrado de la respuesta temporal o frecuencial)

2 Cálculo de los parámetros del controlador aplicando fórmulas de sintonía (relaciones empíricas)

Estos métodos proporcionan sólo valores aproximados para los parámetros del controlador (ajuste fino, cualitativo)

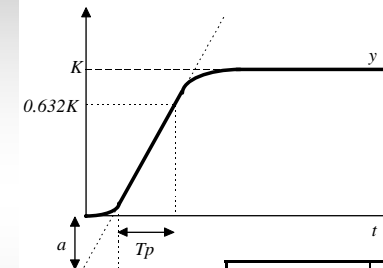
M. Santos, UCM



Método indirecto de sintonía

M. Santos, UCM

Método de Ziegler-Nichols

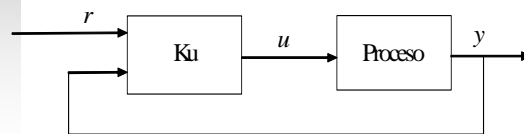


Basado en la respuesta temporal

	K_p	T_i	T_d
P	T_p/KT_o		
PI	$0.9T_p/KT_o$	$T_o/0.3$	
PID	$1.2T_p/KT_o$	$2T_o$	$T_o/2$

M. Santos, UCM

Método de Ziegler-Nichols



Basado en la respuesta en frecuencia

	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_u$		
PI	$0,45K_u$	$T_u/1,2$	
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

M. Santos, UCM

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.

M. Santos, UCM