

The logo for Cartagena99, featuring the word 'Cartagena99' in a stylized, green, cursive font. The text is set against a background of a blue and orange abstract shape that resembles a stylized 'C' or a flame.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Universitaria de  
Ingeniería Técnica Industrial

DE CONTROLADORES

DR. BASIL M. AL-HADITHI

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
-- --  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

## Diseño de controladores

- Definir objetivos de control sobre el sistema:
  - seguimiento de consigna.
  - buen comportamiento ante perturbaciones.
- Importante conocer:
  - perturbaciones del sistema.
  - existencia de no linealidades.
  - dinámica del proceso.
- Especificaciones de diseño:
  - minimizar efectos producidos por cambios de carga.
  - sensibilidad al ruido de la señal.
  - robustez ante incertidumbres del sistema.
  - seguimiento de consigna.

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

## is ante cambios de carga

más importante diseñar para un buen comportamiento ue para cambios de consigna (generalmente los cambios uentes en un sistema pero si los cambios de carga).

a cambios de carga:  
de funcionamiento del sistema.  
mente, con señales tipo escalón.  
ncia.  
modelo del sistema en cualquier punto (entrada o salida).

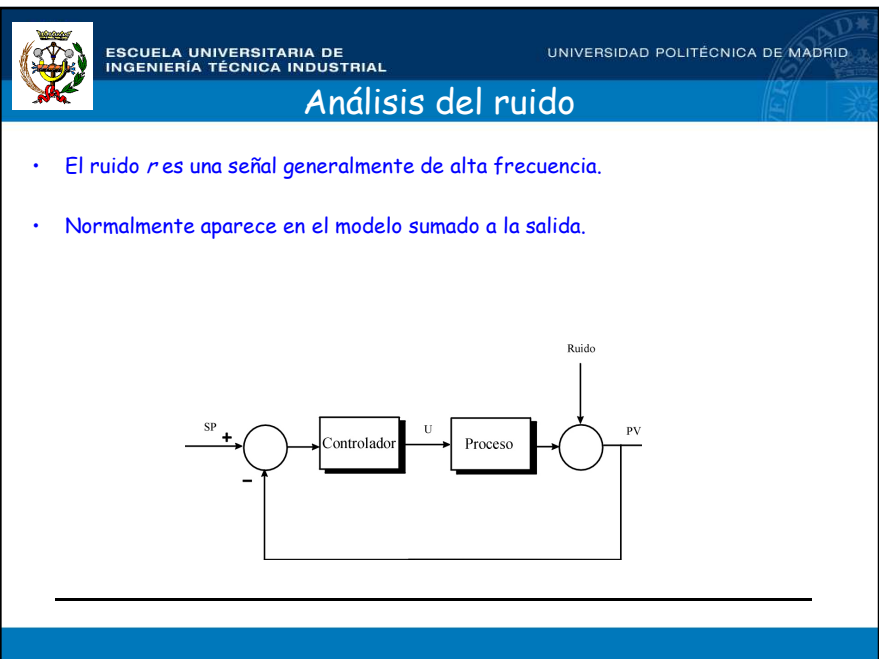
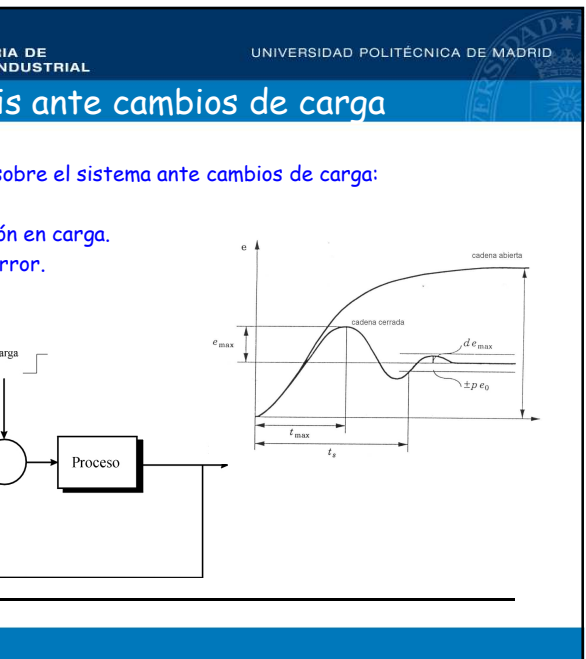
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

## Análisis ante cambios de carga

- Especificaciones de diseño:
  - Índices de error: parámetros de análisis del error debido a los cambios de carga sobre el sistema.
$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$
$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$
  - Integral del error
  - Integral del error absoluto
  - Integral del error cuadrático
- Inconvenientes:
  - Requiere mucho cálculo y simulación
  - Posteriormente diseñar, generalmente con criterios de optimización

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
--  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Análisis del ruido

Definición:  
 - Ruido sobre el proceso PV.  
 - Ruido en el control u.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Análisis del ruido

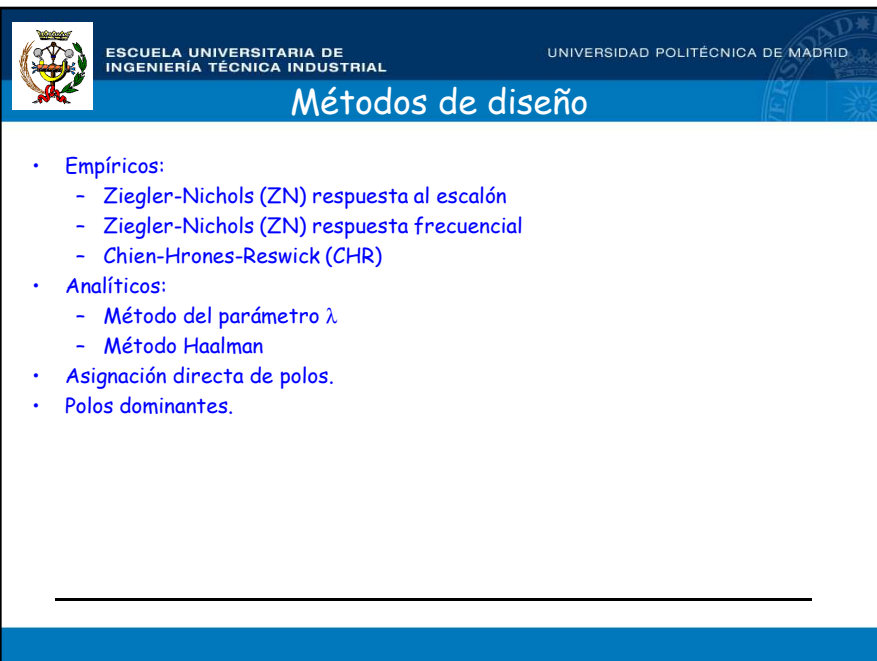
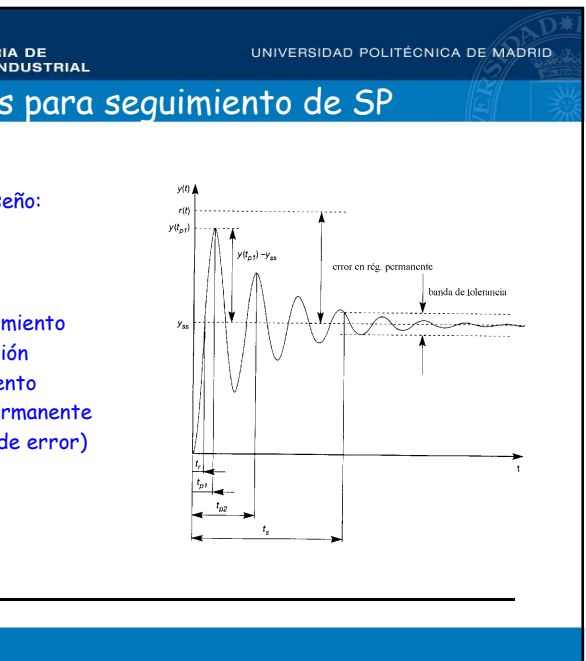
- Función sensibilidad  $S$ , es la función de transferencia PV/r:

$$S = \frac{pv}{r} = \frac{1}{1 + G_c G_p}$$

- A altas frecuencias  $G_p G_c$  es generalmente bajo, lo que implica que la amplificación o atenuación del ruido depende de la  $K$  que se ajuste en el controlador.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Métodos ZN

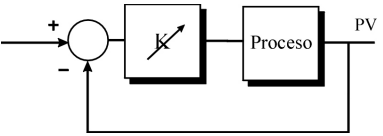
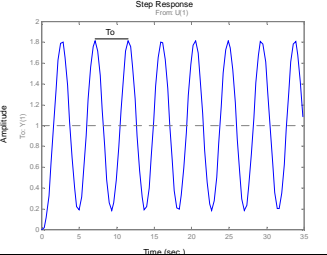
Condición: (no necesario modelo previo)  
 Ensayo en cadena abierta ante entrada escalón.  
 Se mide el retardo  $L$  y constante de tiempo  $T$   
 Los parámetros de la tabla

Controlador	K	Ti	Td
P	$1/a$	-	-
PI	$0.9/a$	$3L$	-
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Métodos ZN

- ZN - respuesta frecuencial:
  - Se basan en el ensayo en cadena cerrada con controlador P.
  - Variar K hasta mantener oscilación en la salida.
  - Medir periodo de oscilación  $T_o$  y ganancia  $K_o$ .

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

## Métodos ZN

s de la tabla

for	K	Ti	Td
	0.5K <sub>o</sub>	-	-
	0.4K <sub>o</sub>	0.8T <sub>o</sub>	-
	0.6K <sub>o</sub>	0.5T <sub>o</sub>	0.125T <sub>o</sub>

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

## Métodos ZN

- Los métodos de ZN proporcionan buena respuesta ante cambios de carga.
- Criterio de diseño: consiguen una razón de decrecimiento de 1/4, lo que da un  $\zeta = 0.22$  (muy subamortiguado).
- Ante cambios de consigna la salida puede no responder de forma óptima, generalmente de pobre amortiguación.
- Si no cumple los requisitos, REAJUSTAR.
- La ganancia obtenida del primer método (escalón) es mayor que la del segundo (frecuencia).

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Método Chien-Hrones-Reswick

El método de Chien-Hrones-Reswick se basa en el uso de un controlador ZN.

Se recomienda un tiempo de integración  $T_i$  en 20% de sobreoscilación.  
 Se recomienda un tiempo de derivación  $T_d$  en 0% de sobreoscilación.

Se recomienda valores distintos para cambios de carga o cambios de SP.

Se recomienda el uso de parámetros  $a$  y  $L$ .

Se recomienda el uso de parámetros  $a$ ,  $L$  y  $T$ .

Se recomienda la sobreoscilación disminuyendo el valor de  $K$  y  $T_d$  y aumentando el tiempo de integración al método de ZN.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Método Chien-Hrones-Reswick

Parámetros controlador para situaciones de cambio de carga

Sobreoscilación	0%			20%		
	K	Ti	Td	K	Ti	Td
P	0.3/a	-	-	0.7/a	-	-
PI	0.6/a	4L	-	0.7/a	2.3L	-
PID	0.95/a	2.4L	0.42L	1.2/a	2L	0.42L

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Controlador Chien-Hrones-Reswick

Controlador para situaciones de cambio de SP

	0%		20%		
	Ti	Td	K	Ti	Td
1/a	-	-	0.7/a	-	-
2/a	1.2T	-	0.6/a	T	-
3/a	T	0.5L	0.95/a	1.4T	0.47L

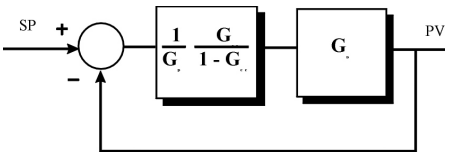
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Métodos analíticos

- Cálculo directo de la FDT del controlador  $G_c$ .
- Se parte del conocimiento de la FDT del proceso  $G_p$ .
- Es dato de diseño la FDT del conjunto en cadena cerrada  $G_{cc}$ :

requerimientos de funcionamiento del sistema

$$G_{cc} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p}$$

$$G_c = \frac{1 - G_{cc}}{G_p (1 - G_{cc})}$$


- $G_c$  cancela todos los polos y ceros del proceso  $G_p$ .

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Método del parámetro $\lambda$

...dos retrasos (L grandes).  
 ...ra "predictiva" mejor que la acción D.  
 ...sultados que con el PID estándar.

...odelo del proceso

... "comportamiento deseado en cadena cerrada"

...de tiempo de  $G_{cc}$  y  $G_p$  iguales  
 ...n c.cerrada más lenta que en c.abierta  
 ...n c.cerrada más rápida que en c.abierta

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Método del parámetro $\lambda$

- FDT del controlador,

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{G_{cc}}{1 - G_{cc}} = \frac{1 + Ts}{Kp(1 + \lambda Ts - e^{-sL})}$$

Con L=0 se tiene un PI estándar

- Controlador PI con efecto predictivo, basado en los valores pasados de la variable de control  $u$ :

$$U(s) = \frac{1}{\lambda Kp} \left( 1 + \frac{1}{Ts} \right) E(s) - \frac{1}{\lambda Ts} (1 - e^{-sL}) U(s)$$

↑

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

### Método Haalman

Función ideal para la cadena directa  $G_i$ .  
 Controlador de la forma:  $G_c = G_i/G_p$ .  
 Los  $G_i$  y  $G_p$  se obtienen controladores PI y PID.  
 Criterios de selección de  $G_i$ .  
 (para modelos con retardo)  $G_i = \frac{2}{3Ls} e^{-sL}$

$$\left. \begin{aligned} G_p = \frac{e^{-sL}}{1+T_1s} &\Rightarrow PI: \begin{cases} K = \frac{2T}{3L} \\ T_i = T \end{cases} \\ G_p = \frac{e^{-sL}}{(1+T_1s)(1+T_2s)} &\Rightarrow PID: \begin{cases} K = \frac{2}{3L}(T_1+T_2) \\ T_i = T_1+T_2 \\ T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1+T_2} \end{cases} \end{aligned} \right\}$$

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

### Inconvenientes Métodos Analíticos

- El controlador cancela TODOS los polos y ceros del sistema.
- Mal comportamiento ante variaciones de carga en el sistema.
- Pobre respuesta si se cancelan polos lentos ( $T \uparrow$ , cerca de 0).
- Pobre respuesta si se cancelan polos muy oscilatorios ( $\zeta \downarrow$ ).
- Criterios de elección de  $G_{cc}$ ,  $G_i$ .
- Si el retardo (L) es dominante frente a la constante de tiempo (T), no existe inconveniente en la cancelación de polos y ceros.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Asignación directa de polos

proceso  $G_p$ .  
 a partir de la posición deseada de TODOS los polos del

$n \rightarrow$  PI  
 $n \rightarrow$  PID  
 prior  $\rightarrow$  aproximar a 1<sup>er</sup> o 2<sup>o</sup> orden

proceso a controlar es complejo se  
 res complejos.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Asignación directa de polos

- Ejemplo diseño PI  
 posición polos en c.cerrada determinada por  $\zeta$  y  $\omega_n$

igualando ecuaciones características:

$$G_p = \frac{Kp}{1+Ts}$$

$$G_c = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$G_{cc} = \frac{G_c G_p}{1+G_c G_p}$$

$$1 + G_c G_p = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$$

$\left\{ \begin{array}{l} K = \frac{2\zeta\omega_n T - 1}{Kp} \\ T_i = \frac{2\zeta\omega_n T - 1}{\omega_n^2 T} \end{array} \right.$

- Para K positiva  $2\zeta\omega_n T > 1 \Rightarrow \omega_n > 1/(2\zeta T)$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Asignación directa de polos

Posición polos dominantes determinada por  $\zeta$  y  $\omega_n$ , en  $-\alpha \omega_n$

igualando ecuaciones características:

$$1 + G_c G_p = (s + \alpha \omega_n)(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)$$



$$K = \frac{T_1 T_2 \omega_n^2 (1 + 2\alpha \zeta) - 1}{K_p}$$

$$T_i = \frac{T_1 T_2 \omega_n^2 (1 + 2\alpha \zeta) - 1}{T_1 T_2 \alpha \omega_n^3}$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2 \omega (\alpha + 2\zeta) - T_1 - T_2}{T_1 T_2 \omega^2 (1 + 2\alpha \zeta) - 1}$$

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Asignación directa de polos

- **NOTA:** si se implementa estructura de SP ponderado, esta estructura posiciona un cero en  $s = -1/(bT_i)$
- **Caso PI:** ajustar  $b$  para que el cero quede a la izquierda del polo dominante, ejemplo  
 $s = -\omega_n \Rightarrow b = 1/\omega_n T_i$
- **Caso PID:** ajustar  $b$  para que el cero cancele el polo en  $-\alpha \omega_n$ , luego,  
 $b = 1/\alpha \omega_n T_i$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Aproximación a 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> orden

orden superior  $\Rightarrow$  APROXIMAR  
 con  $P_d$  en  $\zeta$  y  $\omega_n$   
 con  $P_d$  en  $\zeta$ ,  $\omega_n$  más polo real

$$\frac{1}{1 + T_3 s} \approx \frac{1}{1 + (T_1 + T_2 + T_3)s} \cdot \frac{1}{(1 + T_3 s)(1 + (T_1 + T_2)s)}$$

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Polos dominantes

- Se conoce la FDT del proceso  $G_p$ .
- Determinación del controlador a partir de la posición deseada de SÓLO algunos polos del sistema en cadena cerrada.
- Se pueden obtener controladores sencillos para sistemas complejos.
- Inconveniente: mucho cálculo.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

**P.Dominantes: método Cohen-Coon**

Para sistemas con retardos del tipo:

$$G_p = \frac{Kp}{1+Ts} \cdot e^{-sL}$$

Se busca un buen comportamiento ante variaciones de carga.  
 Razón de decremento  $d = 0.25$   
 $T$  para ajuste del controlador.  
 Se consiguen elevadas  $K_i$ .  
 Se consiguen elevadas  $K_d$ .  
 Este método toma en cuenta  $L$  y  $T$  ( $\tau$  en la tabla) para la acción I y D.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

**P.Dominantes: método Cohen-Coon**

Controlador	K	Ti	Td
P	$\frac{1}{a} \left( 1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau} \right)$	-	-
PI	$\frac{0.9}{a} \left( 1 + \frac{0.92\tau}{1-\tau} \right)$	$\left( \frac{3.3-3\tau}{1+1.2\tau} \right) L$	-
PD	$\frac{1.24}{a} \left( 1 + \frac{0.13\tau}{1-\tau} \right)$	-	$\left( \frac{0.27-0.36\tau}{1-0.87\tau} \right) L$
PID	$\frac{1.35}{a} \left( 1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau} \right)$	$\left( \frac{2.5-2\tau}{1-0.39\tau} \right) L$	$\left( \frac{0.37-0.37\tau}{1-0.81\tau} \right) L$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70