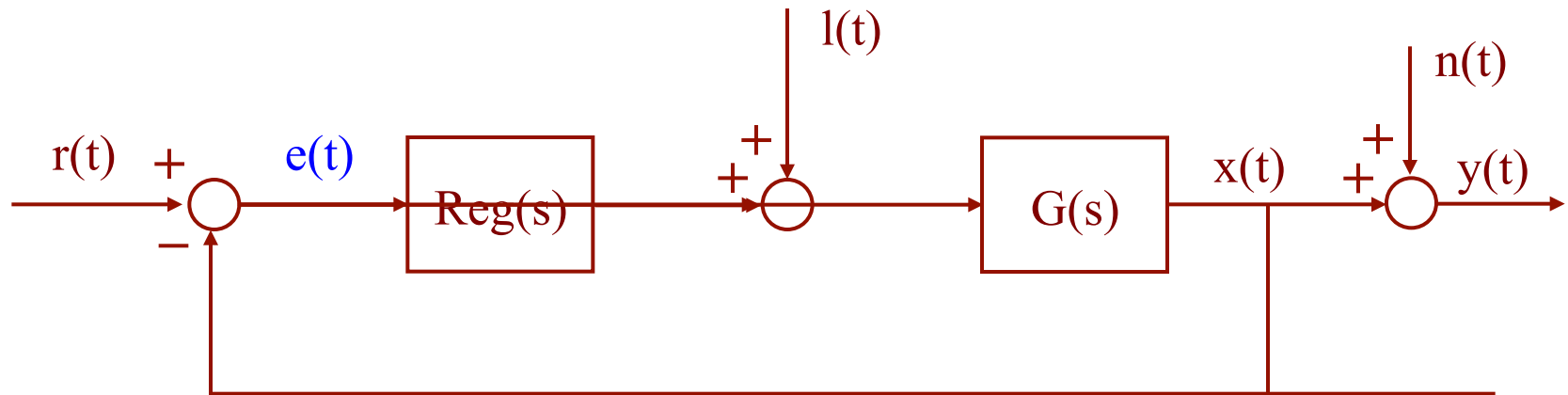


Reguladores y Redes de Compensación



$l(t)$: perturbación de carga

$n(t)$: perturbación en la medida

$$R(s) = K \frac{\prod (s + z_i)}{\prod (s + p_i)}$$

Cartagena99

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

➤ Eliminar las posibles perturbaciones: $l(t)$

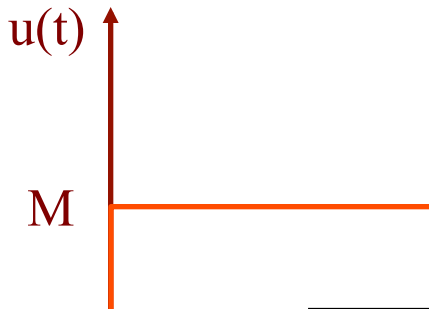
Reguladores y Redes de Compensación

Control on-off (todo o nada)

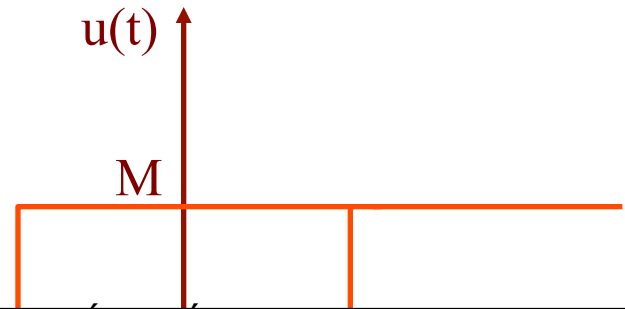
Es la forma más sencilla de controlar

Eficiente para señales de evolución lenta

Sin histéresis



Con histéresis



Cartagena99

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

u

$e(t)$

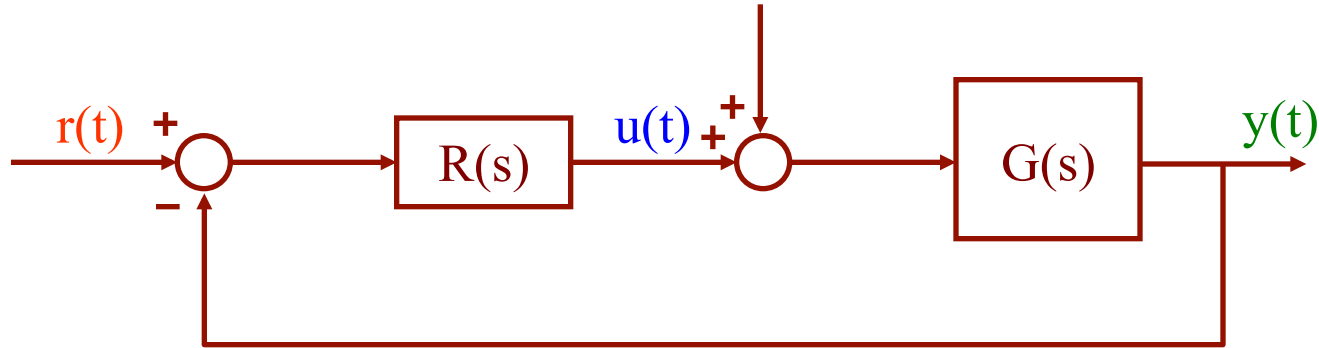
-0

0

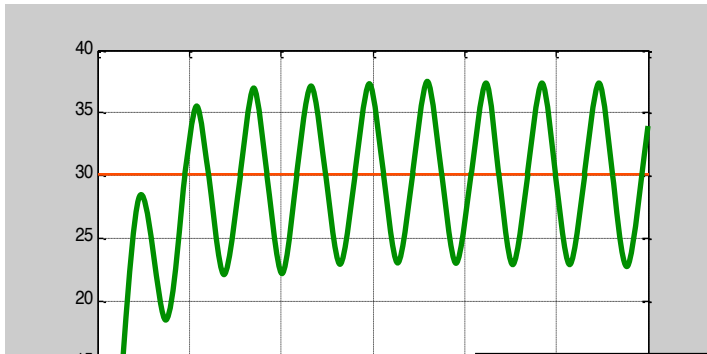
0

$e(t)$

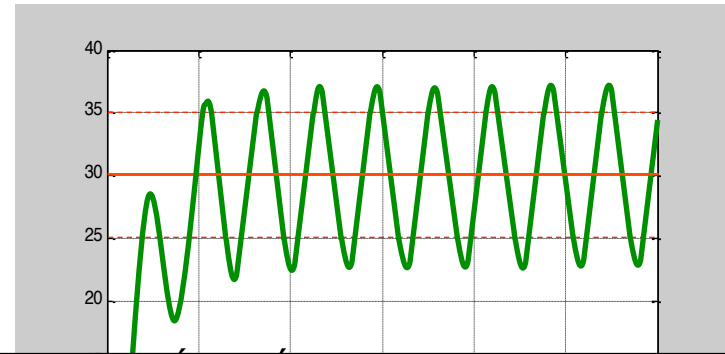
Reguladores y Redes de Compensación



Sin histéresis ($M = 15$)



Con histéresis: ($M = 15; \delta = 5$)



Cartagena99

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

Reguladores y Redes de Compensación

Redes de Adelanto y/o Atraso de Fase

- ✓ Son dispositivos físicos (eléctricos, mecánicos, ...) que actúan como compensadores
- ✓ Dan lugar a funciones de transferencia físicamente realizables
- ✓ Se diseñan según un conjunto de especificaciones:
 - Régimen transitorio: t_r , t_s , t_p , M_p , ω_n , ω_d , ξ , ...
 - Régimen permanente (precisión): e_p , e_v , e_a
- ✓ Una Red de Adelanto es aquella que ante una señal senoidal de entrada da como salida otra señal senoidal de igual frecuencia y fase adelantada. Se usa para

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

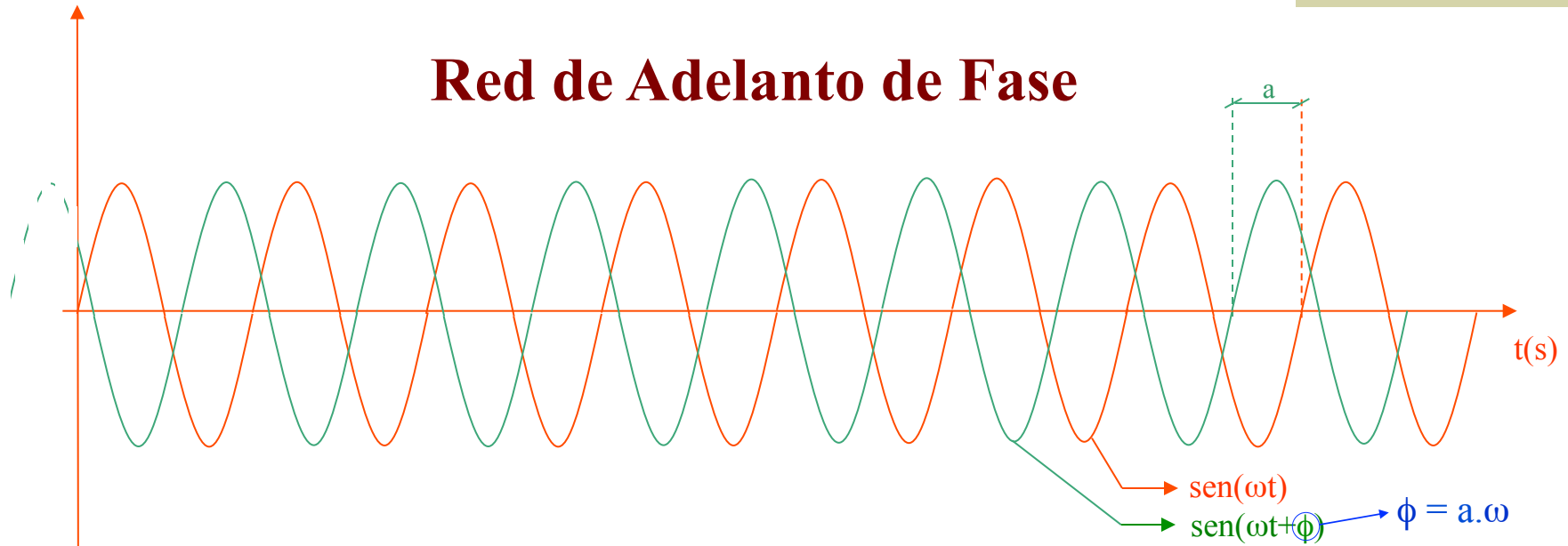
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

de igual frecuencia y fase adelantada. Se usa para el ajuste

del error en régimen permanente.

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Adelanto de Fase



Red de Adelanto de Fase $\Rightarrow R(s) = K \frac{1 + T_d s}{1 + T_N s} \quad (T_d > T_N) \Rightarrow$

$$\frac{KT_d}{T_N} \uparrow$$

Cartagena99

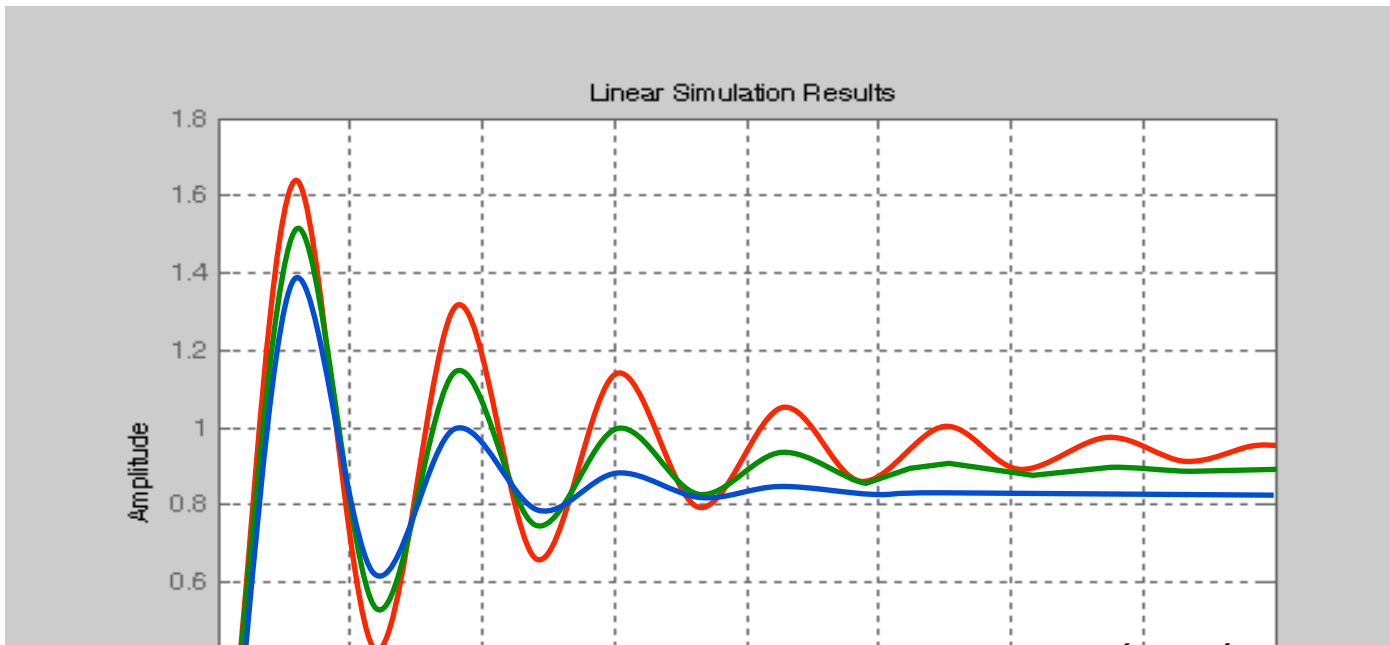
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$$s + \frac{1}{\alpha T}$$

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Adelanto de Fase



$$R(s) = 100$$

$$R(s) = 100 \frac{s + 1}{s + \frac{1}{0.5}}$$

$$R(s) = 100 \frac{s + 1}{s + \frac{1}{0.3}}$$

Cartagena99

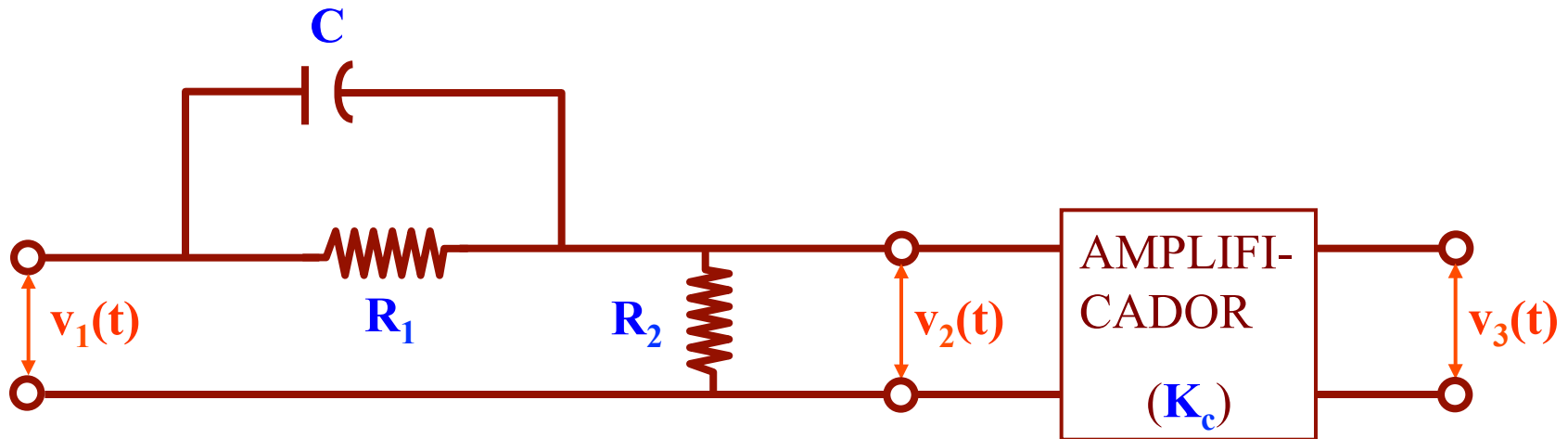
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Time (sec)

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Adelanto de Fase



$$s + \frac{1}{T}$$

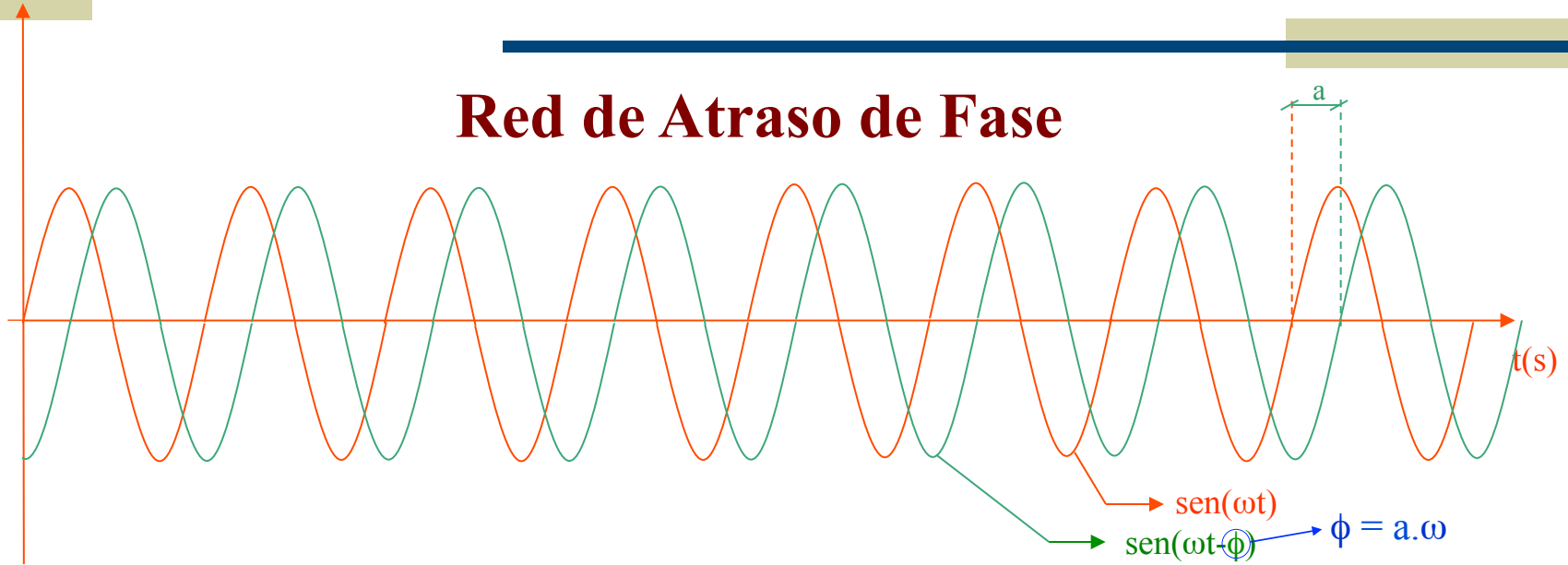
Cartagena99

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

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Atraso de Fase



Red de Atraso de Fase



$$R(s) = K \frac{1 + T_i s}{1 + T_N s} \quad (T_i \gg T_N)$$



Cartagena99

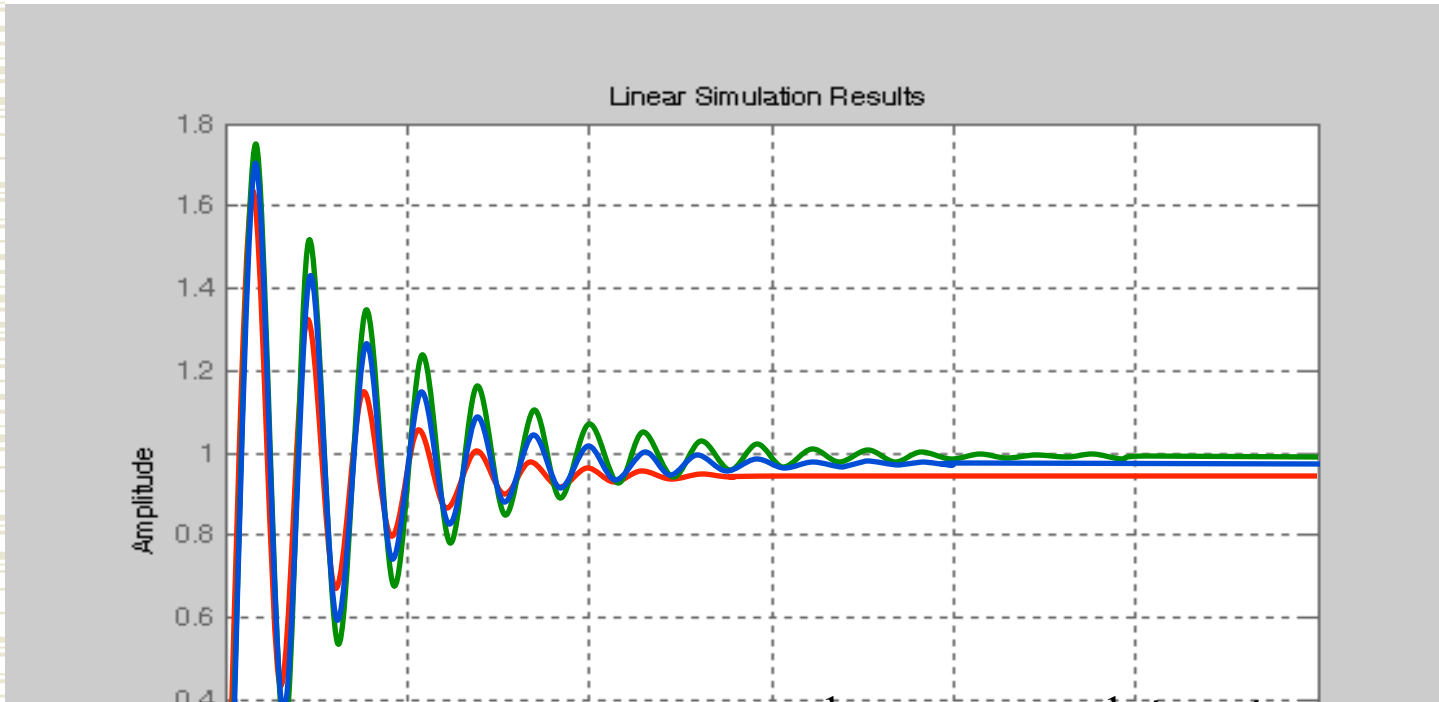
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

βT

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Atraso de Fase



$$R(s) = 100$$

$$R(s) = 100 \frac{s+1}{s+\frac{1}{2}}$$

$$R(s) = 100 \frac{s+1}{s+\frac{1}{5}}$$

Cartagena99

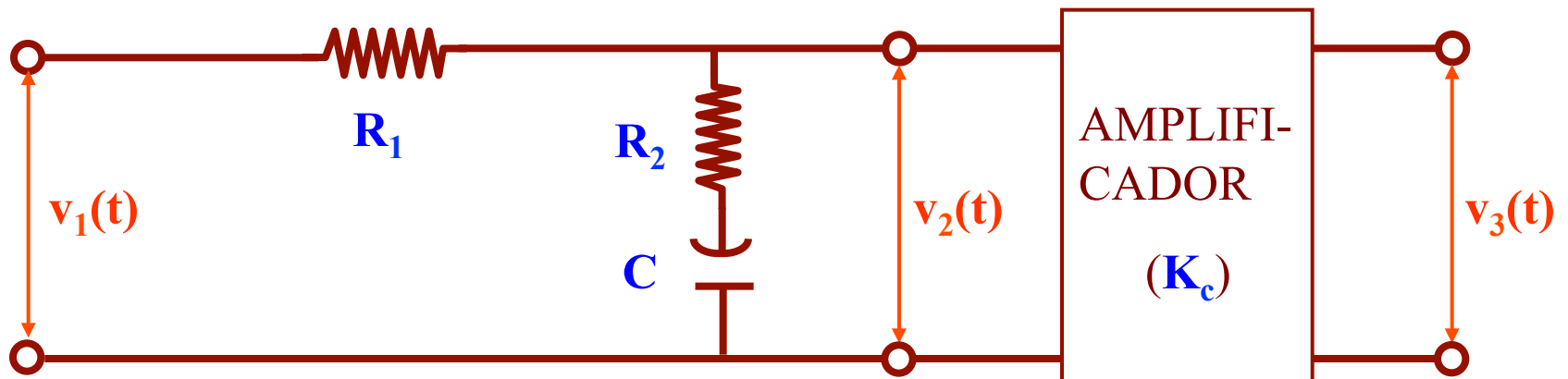
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Time (sec)

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Atraso de Fase



$$s + \frac{1}{RC}$$

Cartagena99

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

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Atraso-Adelanto de Fase

Compromiso entre régimen transitorio y permanente

Red de Atraso-Adelanto de Fase

$$R(s) = K_c \left(\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{1}{\alpha T_1}} \right) \left(\frac{s + \frac{1}{T_2}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \right) \quad (\alpha < 1, \beta > 1)$$

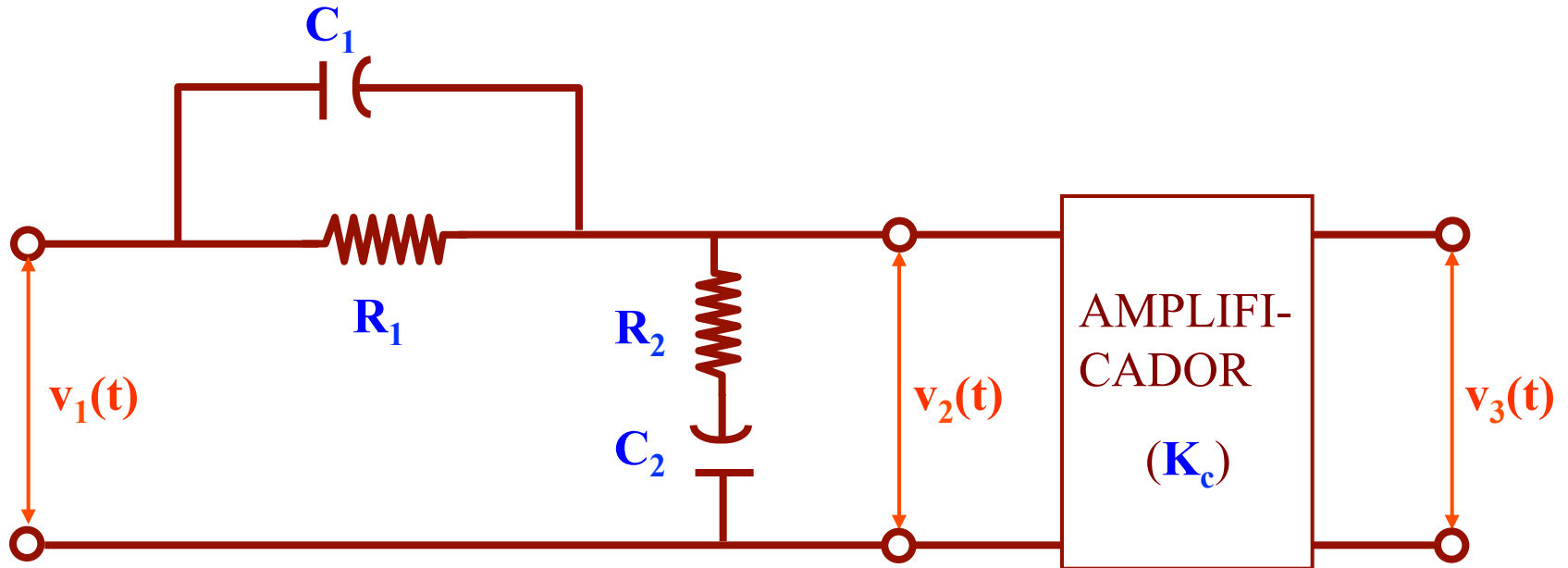
Cartagena99

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

Reguladores y Redes de Compensación

Red de Atraso-Adelanto de Fase



Cartagena99

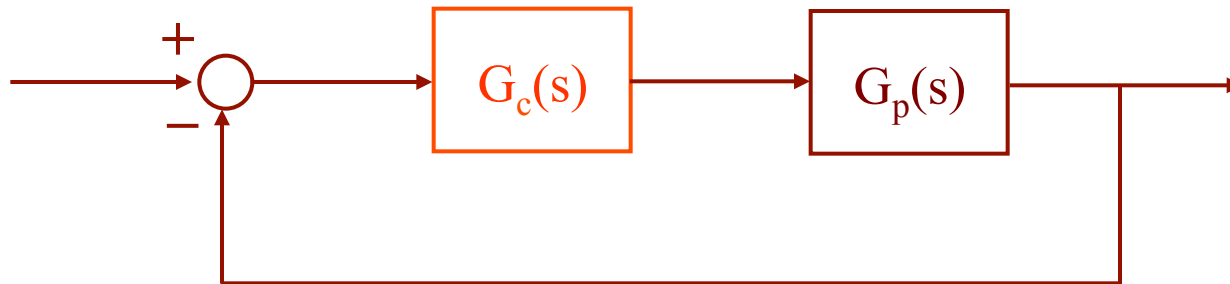
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$R_1 R_2 C_1 C_2$

$R_1 R_2 C_1 C_2$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)



- 1) Situar los polos para cumplir el régimen transitorio: M_p , t_p , t_s , t_r , ...
- 2) Dibujar el $\mathcal{L}\mathcal{R}$ y ver si pasa por los puntos especificados
- 3) Si pasa $\Rightarrow G_c(s) = K_c \Rightarrow$ Criterio del módulo
- 4) Si no pasa \Rightarrow PD o Red de Adelanto de Fase

Cartagena99

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

DT

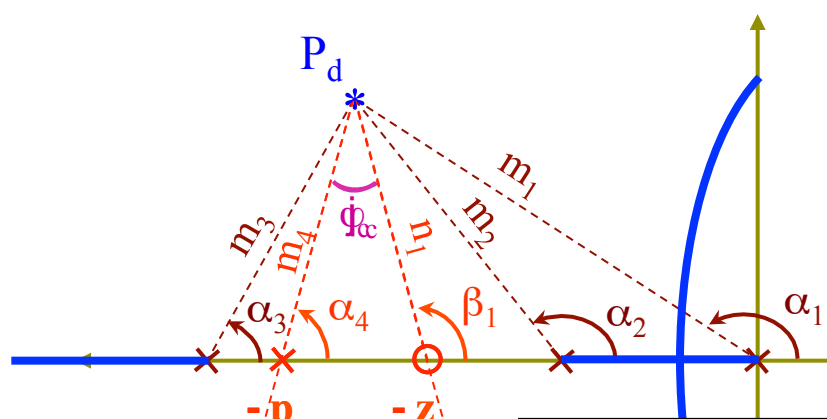
DT

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

4) Diseño de la Red de Adelanto de Fase $\Rightarrow G_c(s) = K_c \frac{s+z}{s+p}$

El cero y el polo con el criterio del argumento

La ganancia con el criterio del módulo



$$\sum_1^m \theta_z - \sum_1^n \theta_p = (2q+1)\pi \Rightarrow$$

$$\beta_1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) = \pi$$

$$\beta_1 - \alpha_4 = \pi + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$$

φ_c

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

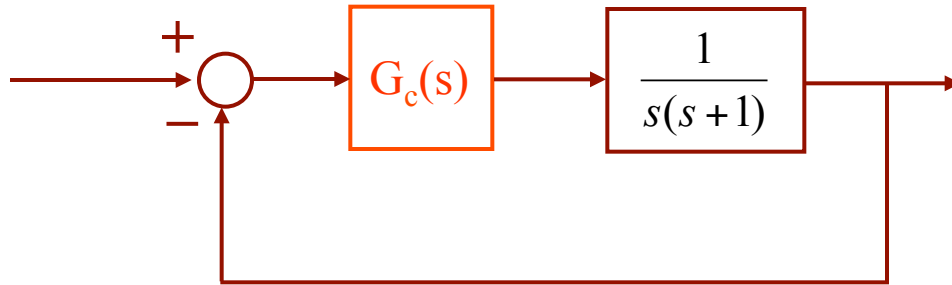
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

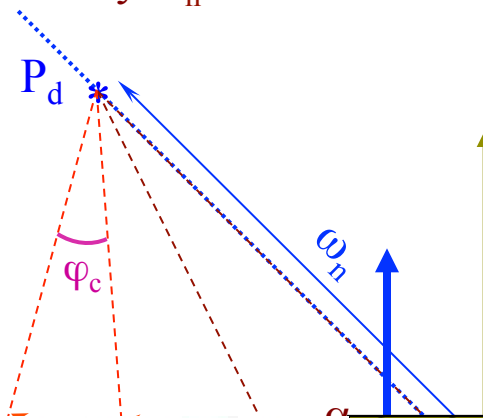
n_1

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Ejemplo:



Datos: $\xi = 0.7$ y $\omega_n = 2$ rad/s $\Rightarrow \xi = \cos(\theta) \Rightarrow \theta \approx \pi/4 = 45^\circ$



$$P_d = -2 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + 2 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)j = -1.414 + 1.414j$$

$$\alpha_1 = \pi - \frac{\pi}{4} = \frac{3\pi}{4} \text{ rad} = 135^\circ$$

Cartagena99

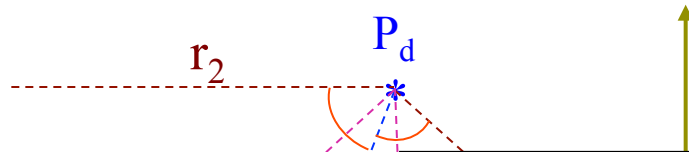
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Métodos para situar el cero y el polo del regulador

- Situar el cero del regulador coincidente con el 2º polo más significativo (el que está más cerca del eje imaginario) de $G_p(s)$.
- Situar el cero del regulador en el punto de corte de la vertical que pasa por el polo dominante P_d y el eje real. Si existiese un polo real de $G_p(s)$ cerca del punto de corte se sitúa el cero a la izquierda de éste.
- Situar el cero y el polo del regulador de la siguiente manera:



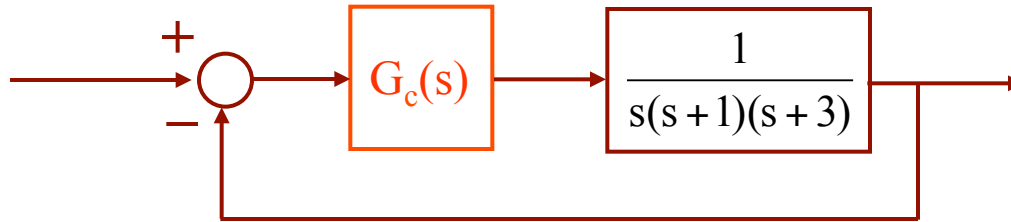
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

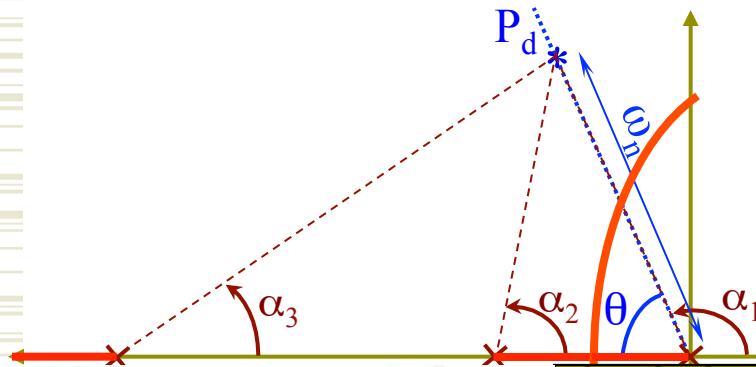
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Ejemplo:



Datos: $\xi = 0'4$ y $\omega_n = 1'4$ rad/s $\Rightarrow \xi = \cos(\theta) \Rightarrow \theta \approx 1'16$ rad = $66'5^\circ$



$$P_d = -1'4 \cos(1'16) + 1'4 \operatorname{sen}(1'16)j = -0'56 + 1'3j$$

$$\alpha_1 = \pi - \operatorname{arctg}\left(\frac{1'3}{0'56}\right) = 1'97 \text{ rad} = 113'3^\circ$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{1'3}{1-0'56}\right) = 1'24 \text{ rad} = 71'3^\circ$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

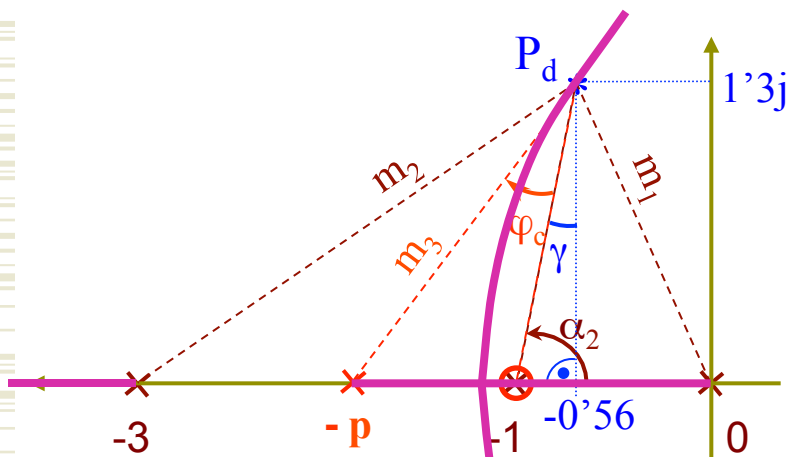
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$$\alpha_3 = \pi + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 392'6^\circ = 32'6^\circ$$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Primer método para situar el cero y el polo del regulador

Situar el cero del regulador coincidente con el 2º polo más significativo (el que está más cerca del eje imaginario) de $G_p(s)$.



$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi_c + \gamma) &= \frac{p - 0'56}{1'3} \\ \gamma &= 180^\circ - 90^\circ - \alpha_2 = 18'7^\circ \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{p = 2'2}$$

$$\Rightarrow G_c(s) = K_c \frac{s + 1}{s + 2'2}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

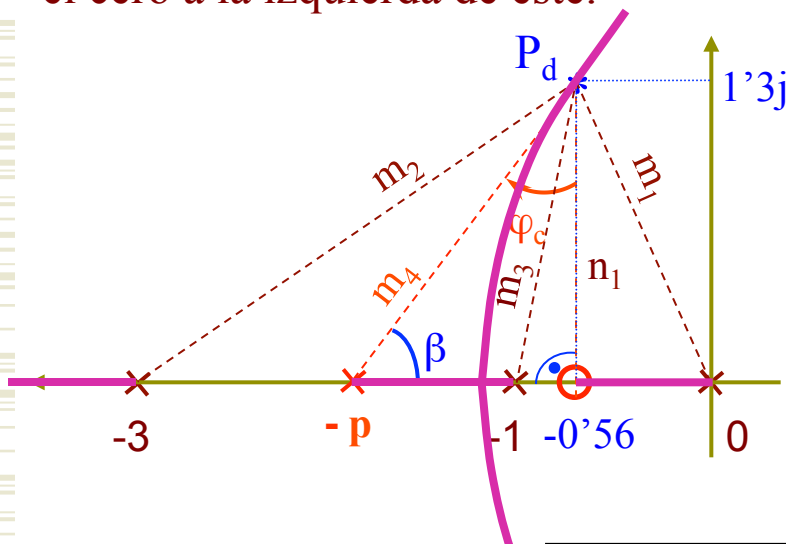
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$s + 2'2$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Segundo método para situar el cero y el polo del regulador

Situar el cero del regulador en el punto de corte de la vertical que pasa por el polo dominante P_d y el eje real. Si existiese un polo real de $G_p(s)$ cerca del punto de corte se sitúa el cero a la izquierda de éste.



$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{1.3}{p - 0.56}$$

$$p = 1.4$$

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \varphi_c \approx 57^\circ$$

$$G_c(s) = K_c \frac{s + 0.56}{s + 1.4}$$

$$K_c = \frac{m_1 m_2 m_3 m_4}{n_1}$$

$$K = 6.4$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

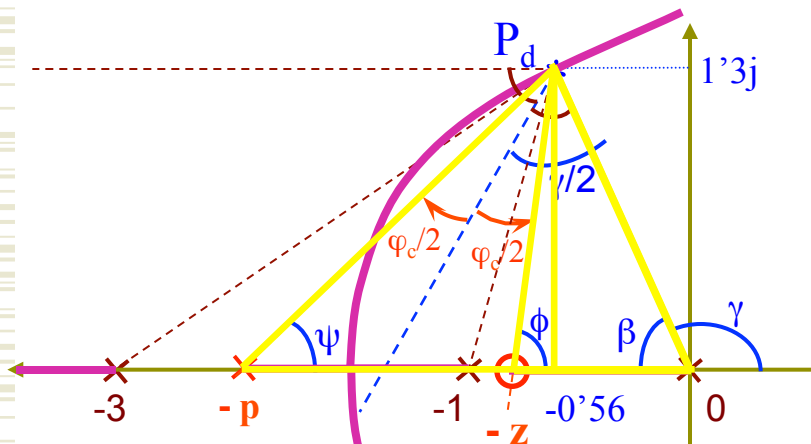
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

$$s + 1.4$$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Tercer método para situar el cero y el polo del regulador



$$\beta = \arctg\left(\frac{1'3}{0'56}\right) = 66'7^\circ \quad \Rightarrow \quad \gamma = 180 - \beta = 113'3^\circ$$

$$\phi = 180 - \beta - \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{\varphi_c}{2}\right) = 73^\circ \quad \Rightarrow$$

$$\operatorname{tg}(\phi) = \frac{1'3}{z - 0'56} \quad \Rightarrow \quad \boxed{z = 0'96}$$

$$\psi = 180 - \beta - \left(\frac{\gamma}{2} + \frac{\varphi_c}{2}\right) = 40'3^\circ \quad \Rightarrow \quad \operatorname{tg}(\psi) = \frac{1'3}{p - 0'56} \quad \Rightarrow \quad \boxed{p = 2'1}$$

Cartagena99

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

$K_c = \dots$

$K_c = 7'9$

$s + 2'1$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

5) Si se cumple el transitorio pero no el permanente

→ PI o Red de Atraso de Fase: $G_c(s) = K_c \frac{s+z}{s+p}$

$\frac{1}{T}$

$\frac{1}{\beta T} \quad (\beta > 1)$

$G_c(s) = K_c \frac{s+z}{s}$

- Colocar el polo en el origen o muy cerca de él para ajustar el error permitido.
- El cero muy cerca del polo para que el transitorio no

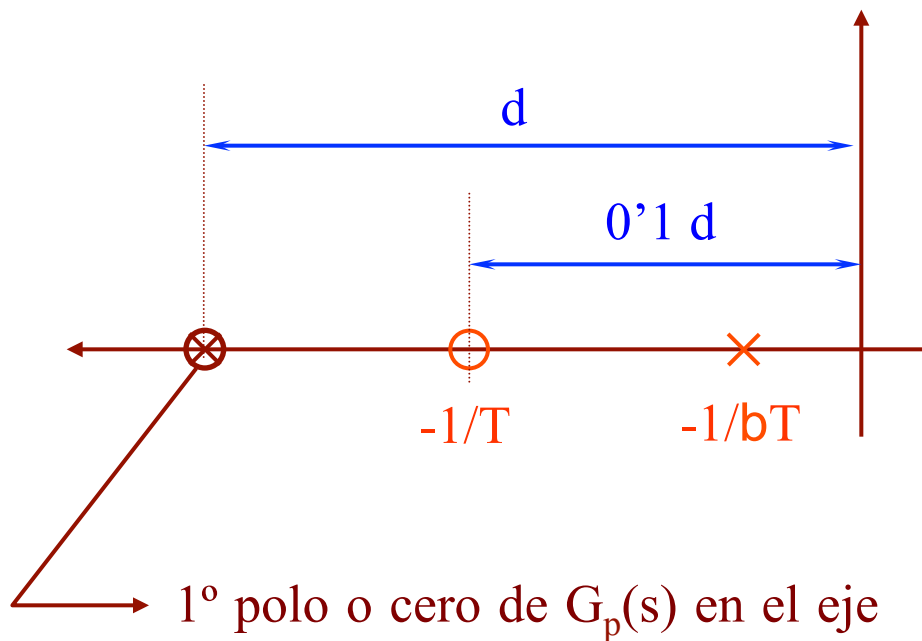
Cartagena99

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

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Primer método para situar el cero y el polo del regulador



Cartagena99

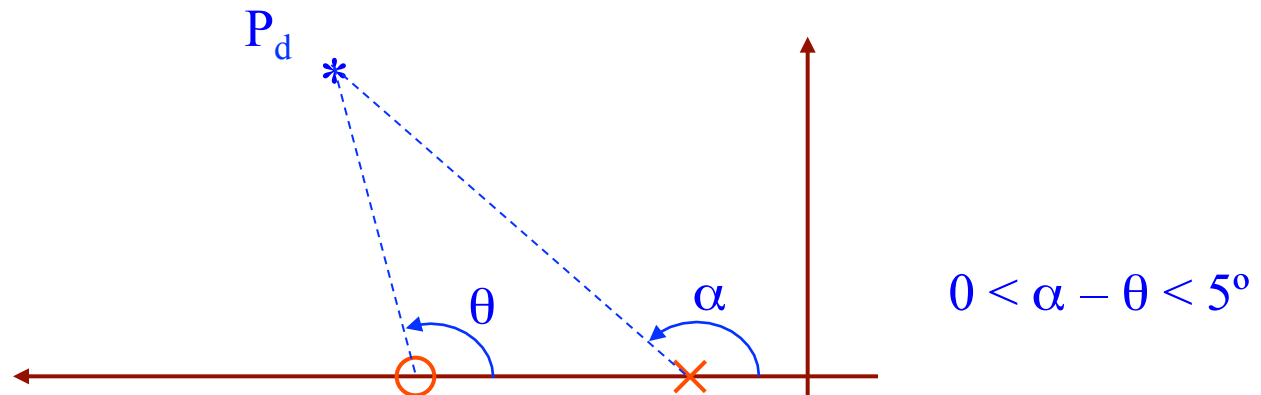
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Segundo método para situar el cero y el polo del regulador

Situarse el polo y el cero del compensador cerca del origen de forma que la diferencia entre el ángulo del polo y el del cero, al unirlos con P_d , sea menor que 5° .



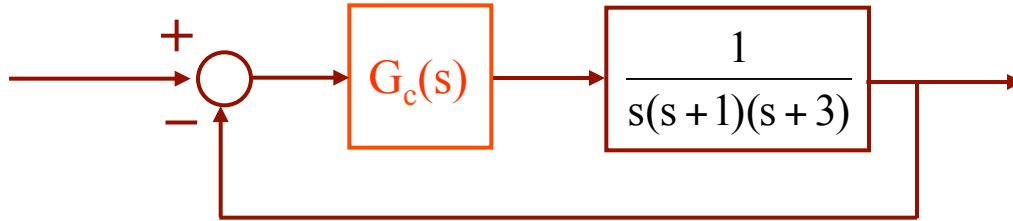
Cartagena99

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

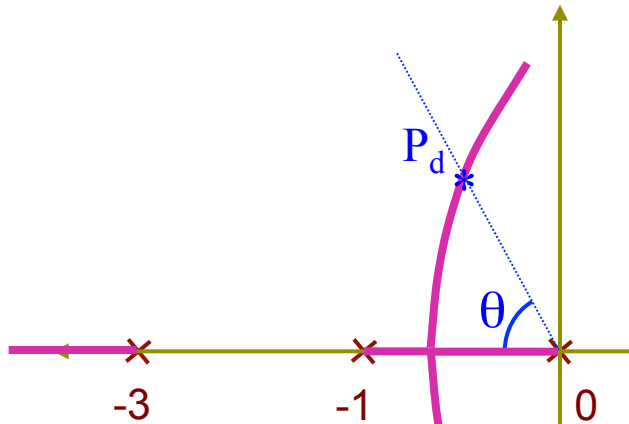
Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Ejemplo:



Datos: $\xi = 0'4$ y $e_v \leq 0'4$ s $\Rightarrow \xi = \cos(\theta) \Rightarrow \theta \approx 1'05$ rad = 60°

$\Rightarrow P_d = -0'37 + 0'64j \Rightarrow G_c(s) = K = 1'81$



Cálculo del error:

$$e_v = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s(s+1)(s+3)}} \Rightarrow e_v = 1'65 > 0'4$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

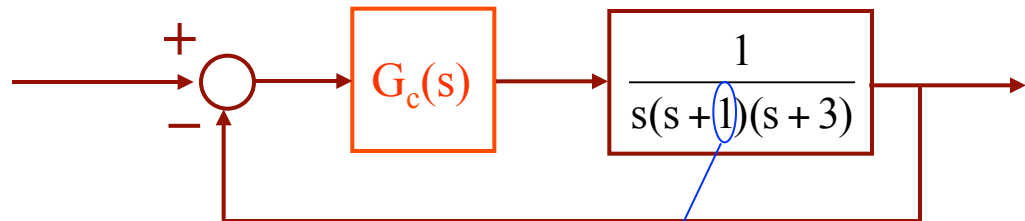
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Red de Atraso de fase:

$$G_c(s) = K_c \frac{1}{s+p}$$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Primer método:



Cálculo de β :

$$e_v \leq 0'4 \text{ s} \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s(s+1)(s+3)} \frac{s+1/T}{s+1/\beta T} \leq 0'4 \Rightarrow \beta \geq 4'1 \Rightarrow \beta = 5$$

El cero se sitúa en $z = 0'1$ $\Rightarrow z = 1/T = 0'1 \Rightarrow T = 10$

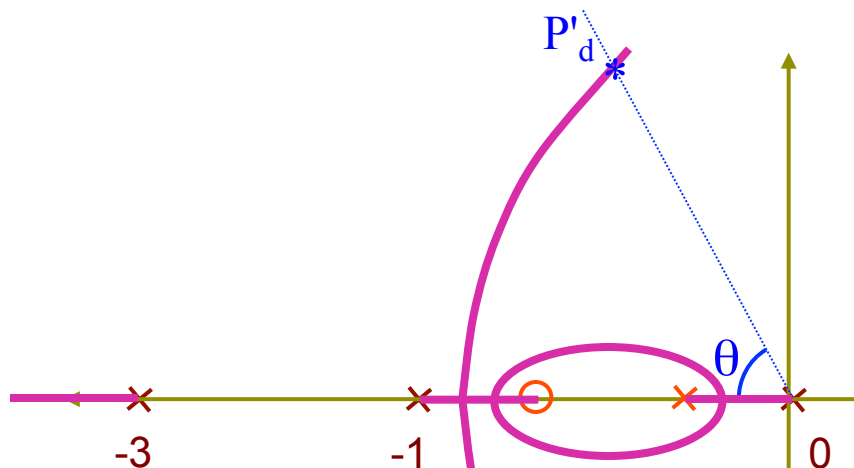
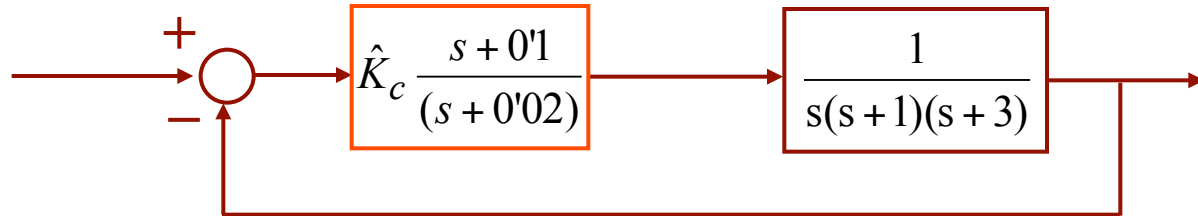
Cartagena99

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

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Cálculo de \hat{K}_c :



$$P'_d = -0.34 + 0.58j \Rightarrow \hat{K}_c = 1.71$$

$$G_c(s) = 1.71 \frac{s + 0.1}{s + 0.02}$$

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

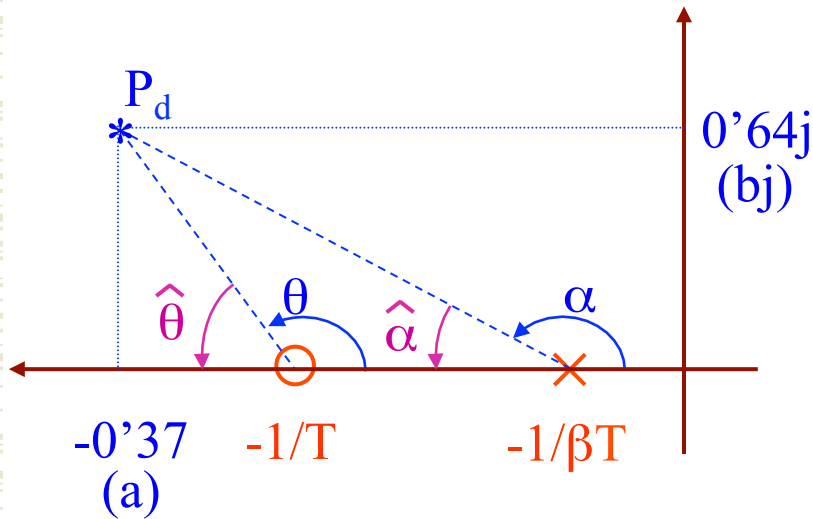
Cartagena99

$$e_v = 0.55 < 0.45$$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Segundo método:

Cálculo de β : \Rightarrow Igual que antes $\Rightarrow \beta \geq 4'1 \Rightarrow \beta = 5$



Por ejemplo $\alpha - \theta = 4^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha} &= 180 - \alpha \\ \hat{\theta} &= 180 - \theta \end{aligned} \right\} \Rightarrow \hat{\theta} - \hat{\alpha} = \alpha - \theta = 4 \Rightarrow$$

$$tg(\hat{\theta} - \hat{\alpha}) = \frac{tg(\hat{\theta}) - tg(\hat{\alpha})}{1 + tg(\hat{\theta})tg(\hat{\alpha})} = tg(4^\circ)$$

$$\left. \begin{aligned} tg(\hat{\theta}) &= \frac{b}{a - 1/T} \\ tg(\hat{\alpha}) &= \frac{b}{a - 1/\beta T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

Polo y cero muy alejados

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

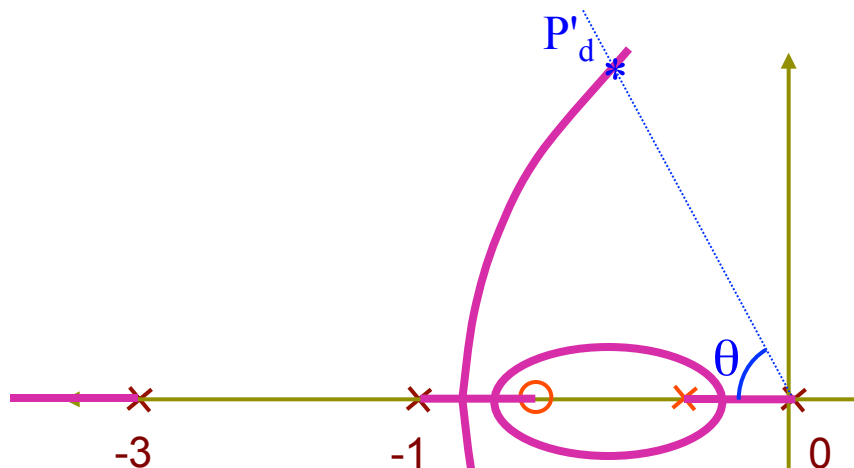
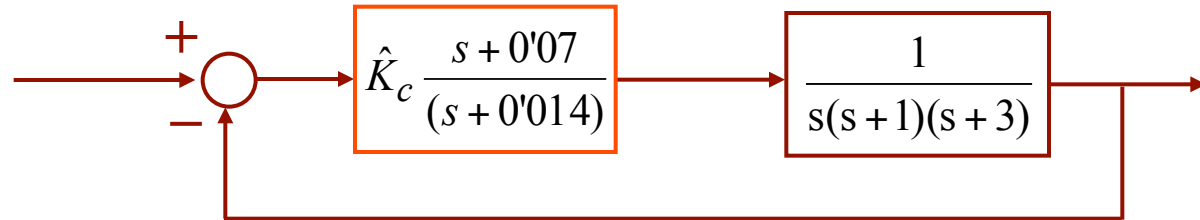
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

$G_c(s) = K_c \frac{s + 0'014}{s + 0'014}$

Diseño de Reguladores (Lugar de las Raíces)

Cálculo de \hat{K}_c :



$$P'_d = -0.34 + 0.58j \Rightarrow \hat{K}_c = 1.71$$

$$G_c(s) = 1.71 \frac{s + 0.07}{s + 0.014}$$

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

Cartagena99

$$\zeta_v = 0.55 < 0.45$$

Reguladores y Redes de Compensación

Reguladores PID

Son los más usados en toda clase de industrias ya que dan prestaciones suficientemente buenas para la mayoría de los sistemas de control

Pueden usarse de forma individual (*stand-alone*) o en control distribuido

Se usan en lazo cerrado

Eliminan los errores en el estacionario

Se anticipan al futuro con la acción derivativa

Cartagena99

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

Reguladores PID

Acción de control (si aumentamos...)	Tiempo de subida	Sobrepico	Error estacionario
K_p	Disminuye	Aumenta	Disminuye
K_p/T_i	Disminuye	Aumenta	Eliminado
$K_p * T_d$	Cambia poco	Disminuye	Cambia poco

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

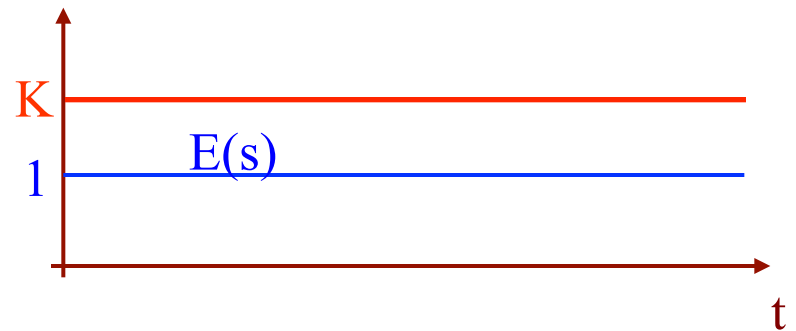
Reguladores PID

Reguladores de tipo P

Tipo P



$$R(s) = K_p$$



Compensación rápida pero poco precisa

Tipo P con filtrado



$$R(s) = \frac{K_p}{T_N s + 1}$$

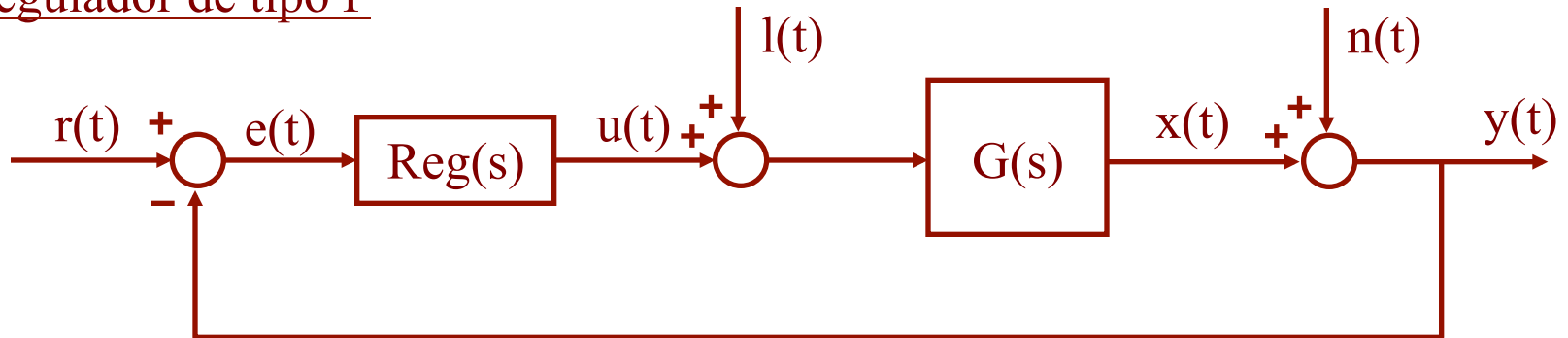
Cartagena99

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

Reguladores PID

Regulador de tipo P



$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

$$y = x + n$$

$$x = K_{planta} \cdot (u + l)$$

$$u = K_p \cdot (r - y)$$

$$\Rightarrow x = \frac{K_p \cdot K_{planta}}{1 + K_p \cdot K_{planta}} (r - n) + \frac{K_p}{1 + K_p \cdot K_{planta}} l$$

$x(t)$ tiende a $r(t)$

Cartagena99

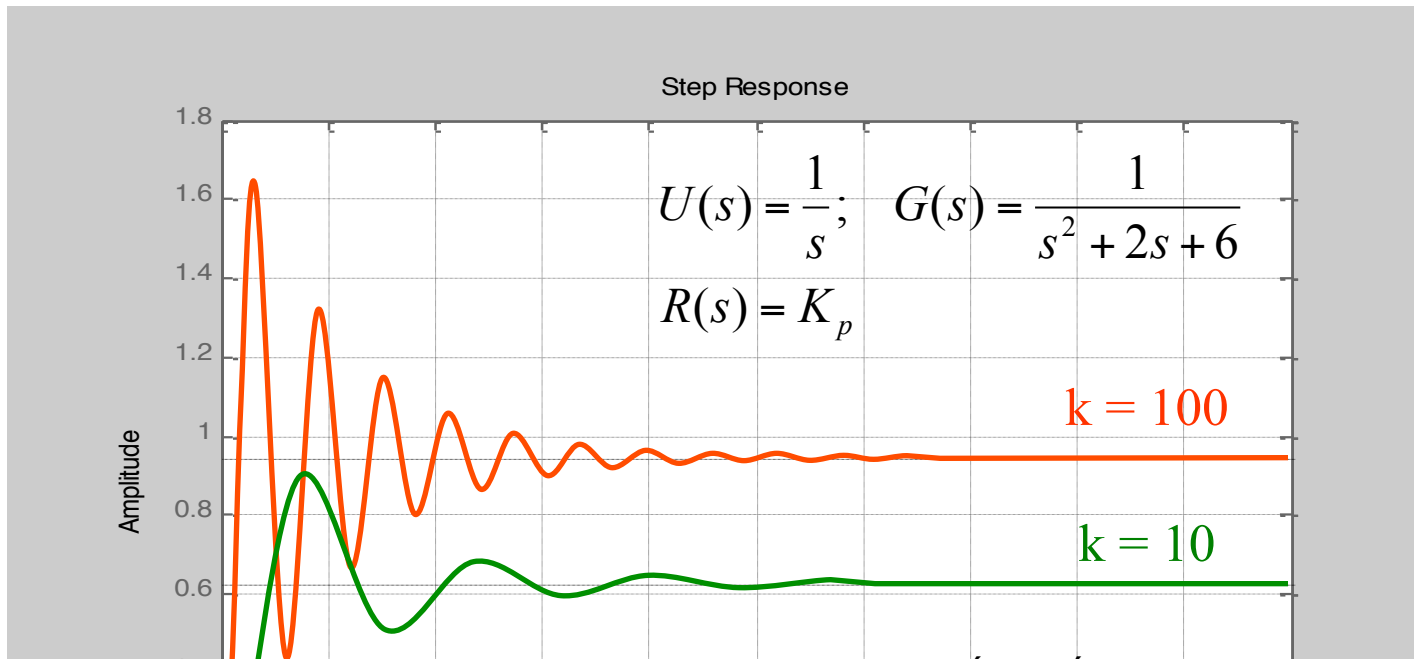
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Se disminuye el error en estacionario

Reguladores PID

Reguladores de tipo P



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

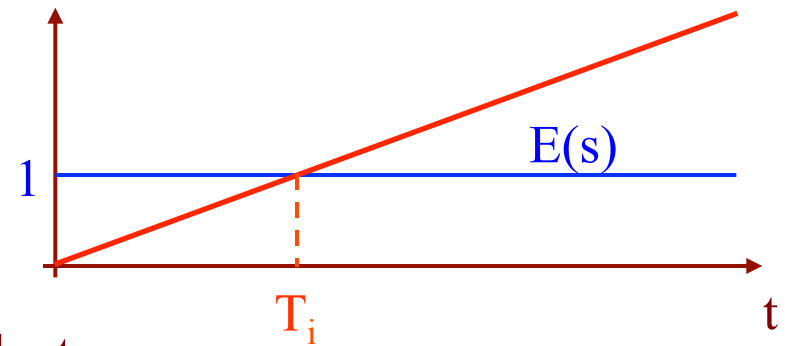
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Time (sec)

Reguladores PID

Reguladores de tipo I

Tipo I $\Rightarrow R(s) = \frac{K}{s} = \frac{1}{T_i s}$ \Rightarrow



Error de posición nulo pero compensación lenta

Tipo I filtrado $\Rightarrow R(s) = \frac{1}{T_i s (T_N s + 1)}$

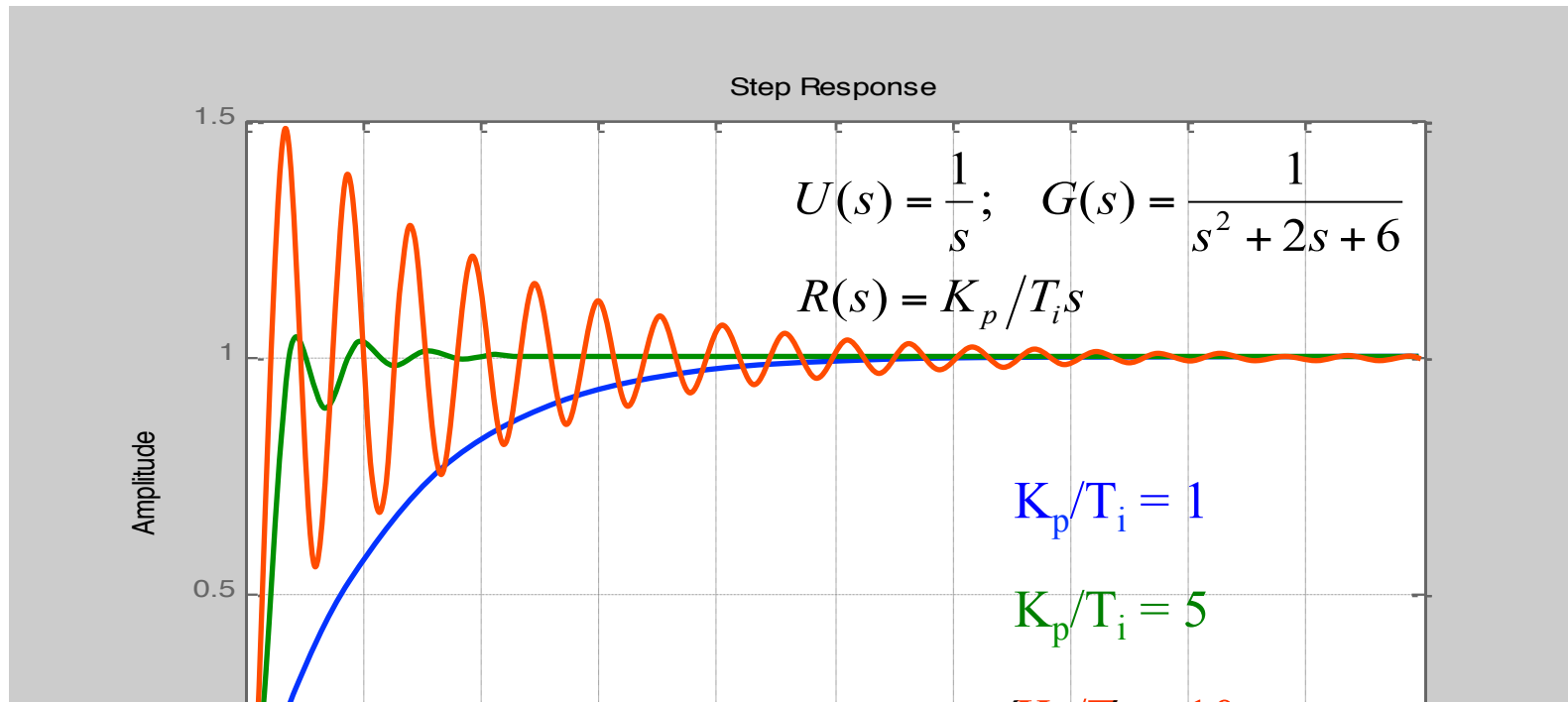
Cartagena99

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

Reguladores PID

Reguladores de tipo I



Cartagena99

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

Reguladores PID

Reguladores de tipo PD

Tipo PD \longrightarrow $R(s) = K_p(1 + T_d s)$ \longrightarrow Regulador ideal

Atenúa las sobreoscilaciones (acción anticipativa)

Permite ajustar condiciones de la respuesta transitoria

Puede resultar problemático ante la presencia de ruido con altas frecuencias

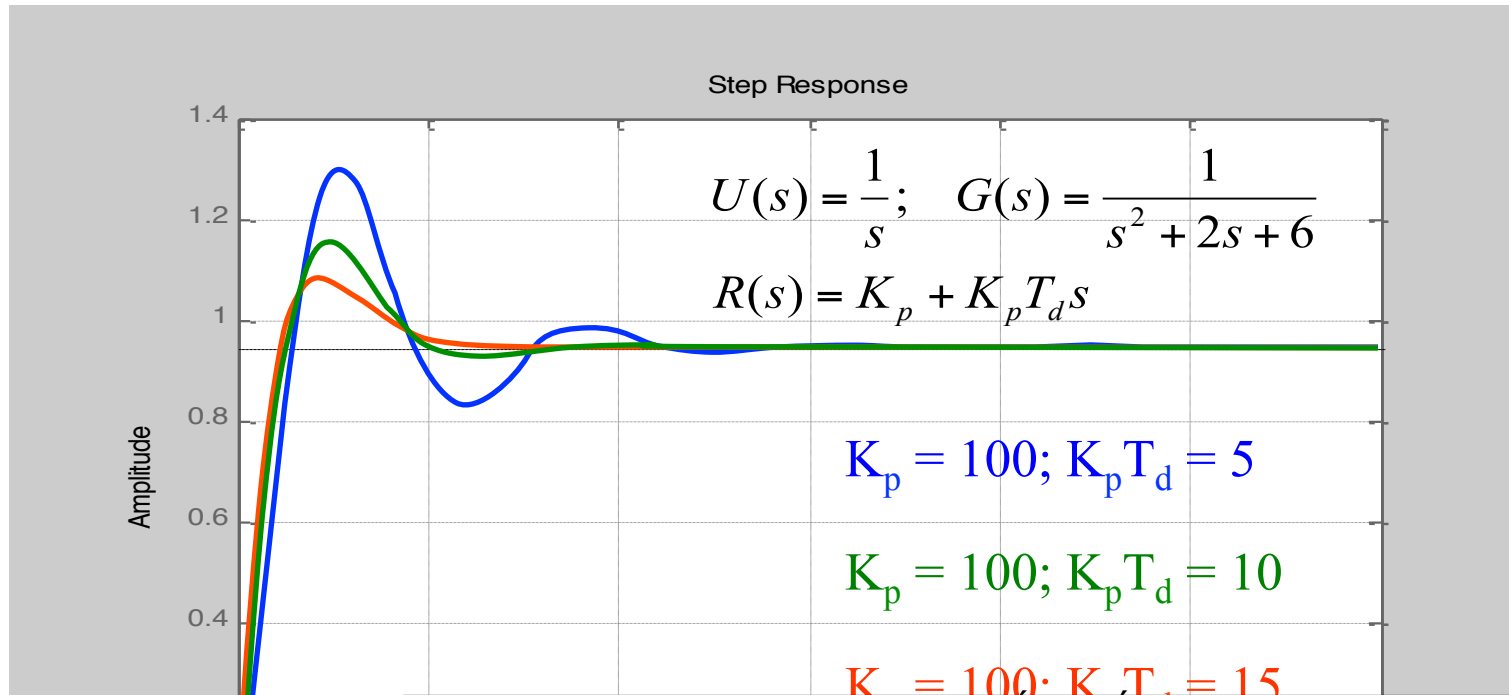
Cartagena99

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

Reguladores PID

Reguladores de tipo PD



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Reguladores PID

Reguladores de tipo PI

Tipo PI \longrightarrow
$$R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p \frac{s + \frac{1}{T_i}}{s}$$

Compensación rápida y precisa

Si T_i es grande \longrightarrow El cero del regulador muy cerca de su polo \longrightarrow Casi no se modifica el transitorio

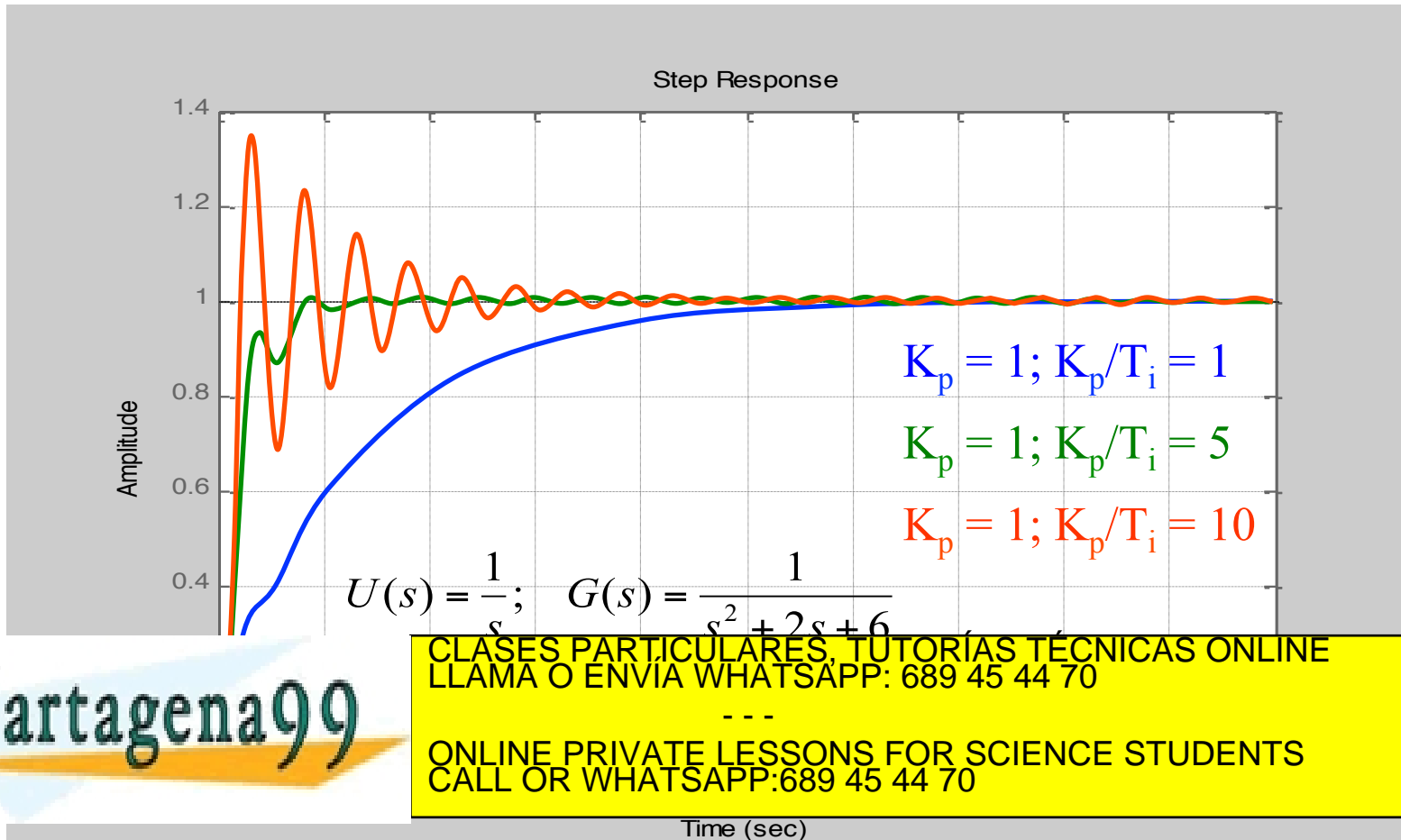
Cartagena99

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

Reguladores PID

Reguladores de tipo PI



Cartagena99

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

Time (sec)

Reguladores PID

Reguladores de tipo PID

Tipo PID \longrightarrow $R(s) = K \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$ \longrightarrow Regulador ideal

Compromiso entre régimen transitorio y permanente

Cartagena99

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

Reguladores PID

Problemas en la implantación de PID

- ✓ Efecto Windup
- ✓ Señales de control bruscas en los saltos de consigna
- ✓ Amplificación del ruido en la parte derivativa
- ✓ ...

Cartagena99

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

Reguladores PID

Efecto Windup

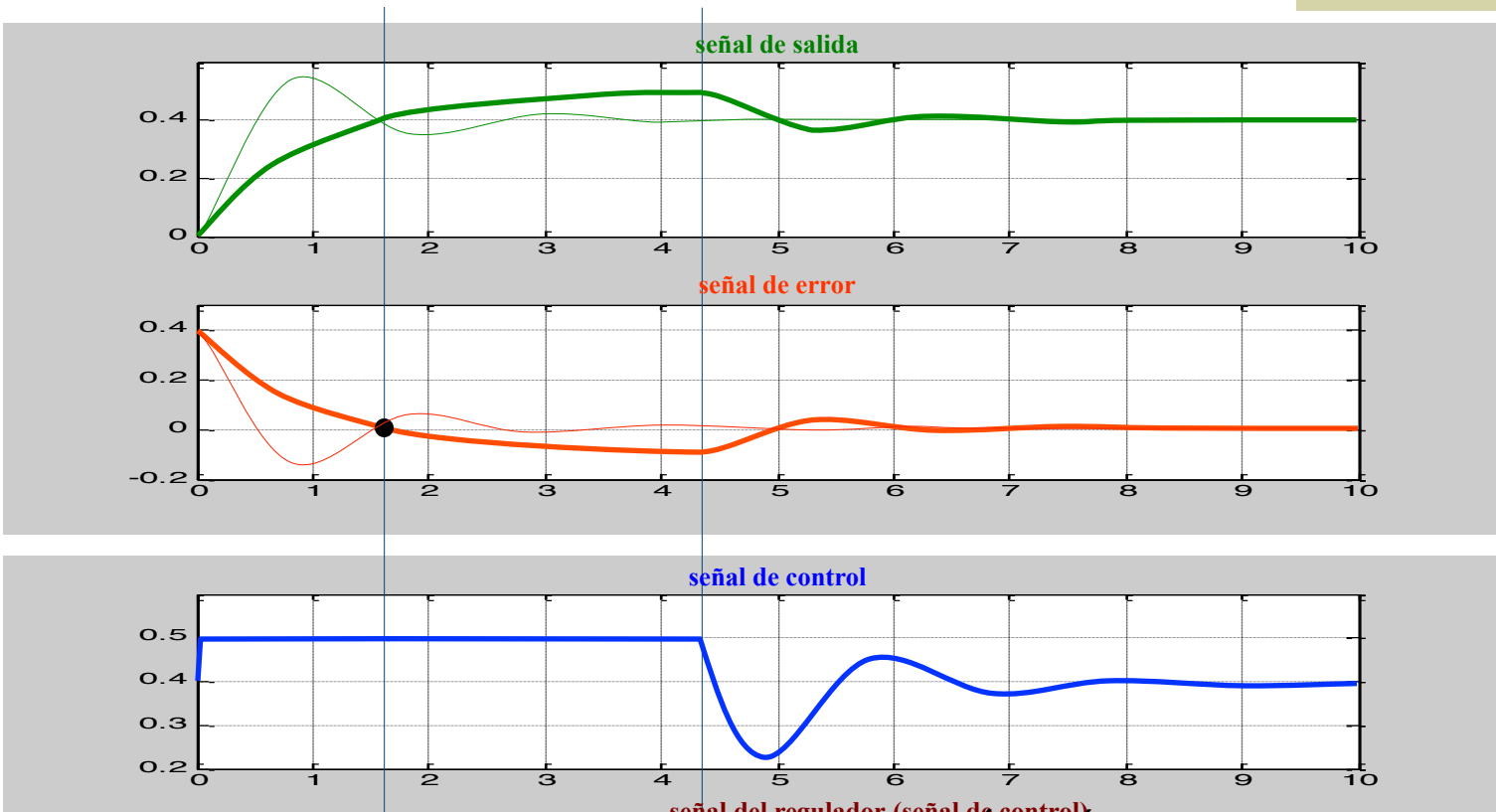
- En sistemas con acción de control integral y saturación del actuador.
- Al saturarse la señal de control, el integrador sigue actuando sin efecto en la respuesta del sistema.
- Entre que cambia de signo la señal de error y se “desatura” la señal de control pasa un cierto intervalo de tiempo → El sistema tarda en responder.
- Para evitar el windup se puede diseñar un circuito de forma que active un lazo de realimentación en torno al integrador durante el tiempo que dura la saturación.

Cartagena99

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

Reguladores PID



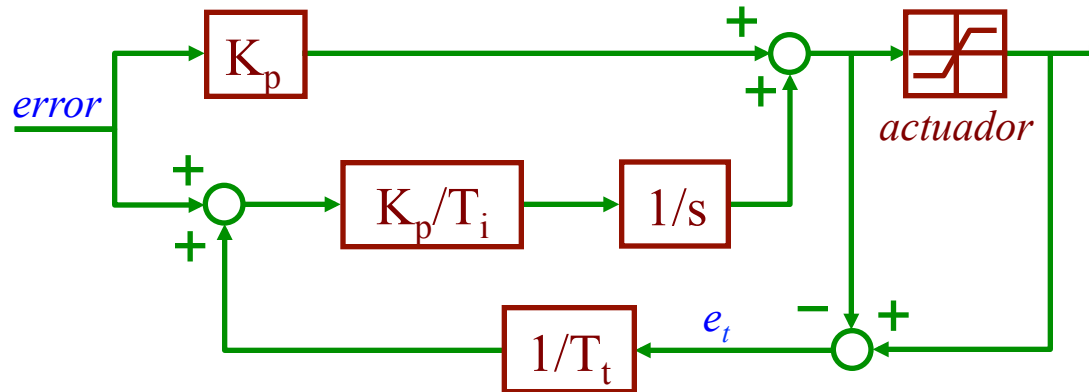
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Reguladores PID

Ejemplo de solución anti Windup:



Si el actuador está saturado $e_t \neq 0$. Esta señal se realimenta a través del

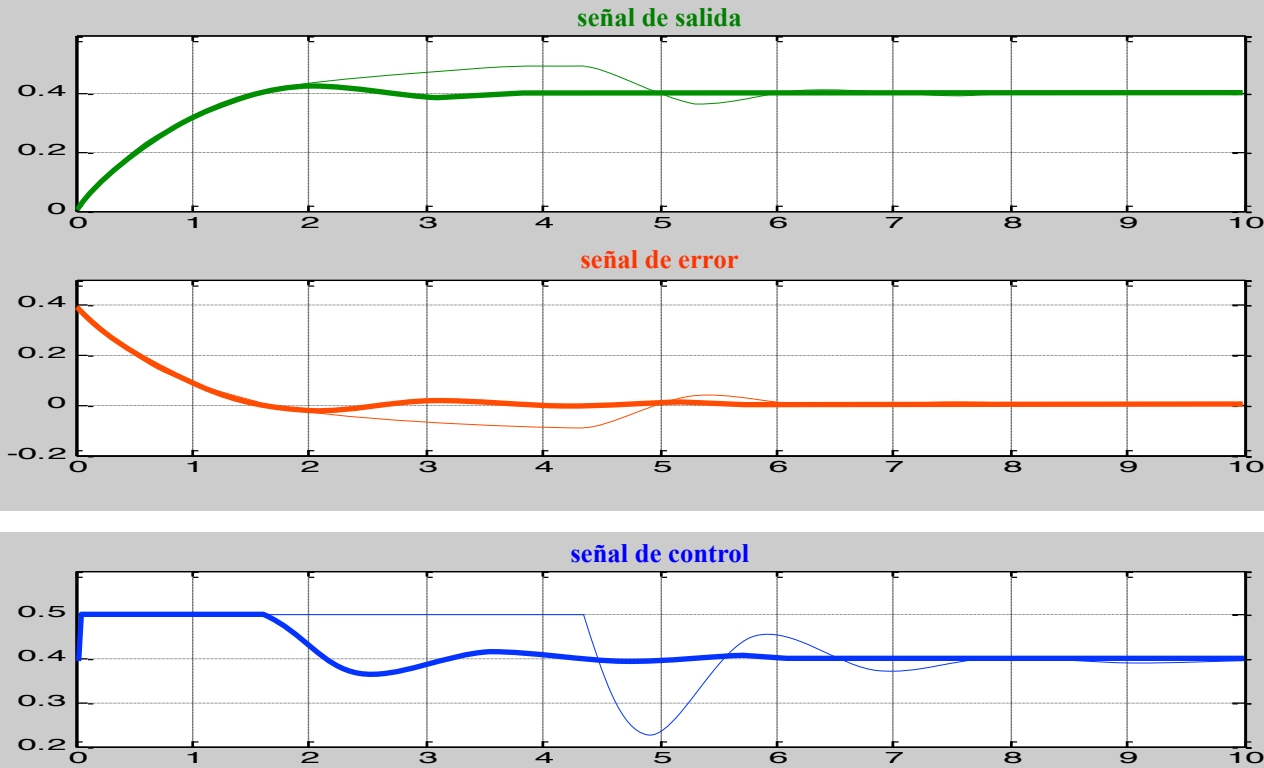
Cartagena99

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

Reguladores PID

$$T_t = 1$$



señal del regulador (señal de control)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Sintonía experimental de PID

- ✓ Útiles para plantas de las que se desconoce su modelo
- ✓ Son métodos experimentales
- ✓ Dan una estimación razonable de los parámetros del PID
- ✓ Se requiere posteriormente una sintonía fina

$$K_p T_d \frac{s^2 + \frac{1}{T_d} s + \frac{1}{T_i T_d}}{s}$$

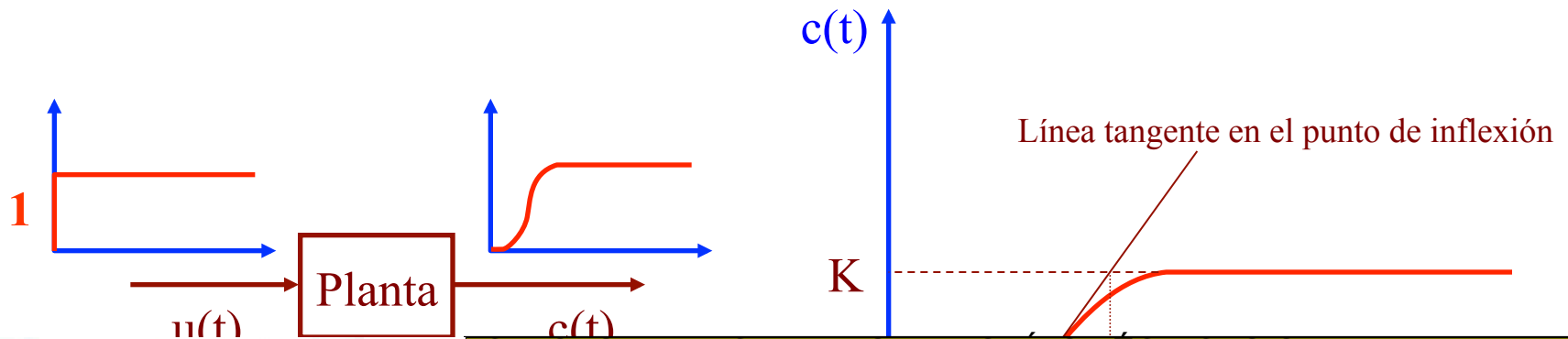
Cartagena99

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

Sintonía experimental de PID (1º método de Ziegler-Nichols)

- ✓ Se aplica a la planta un escalón unitario
- ✓ Se buscan respuestas en forma de S.
- ✓ Da reguladores que provocan que el sistema tengan de media $M_p < 25\%$



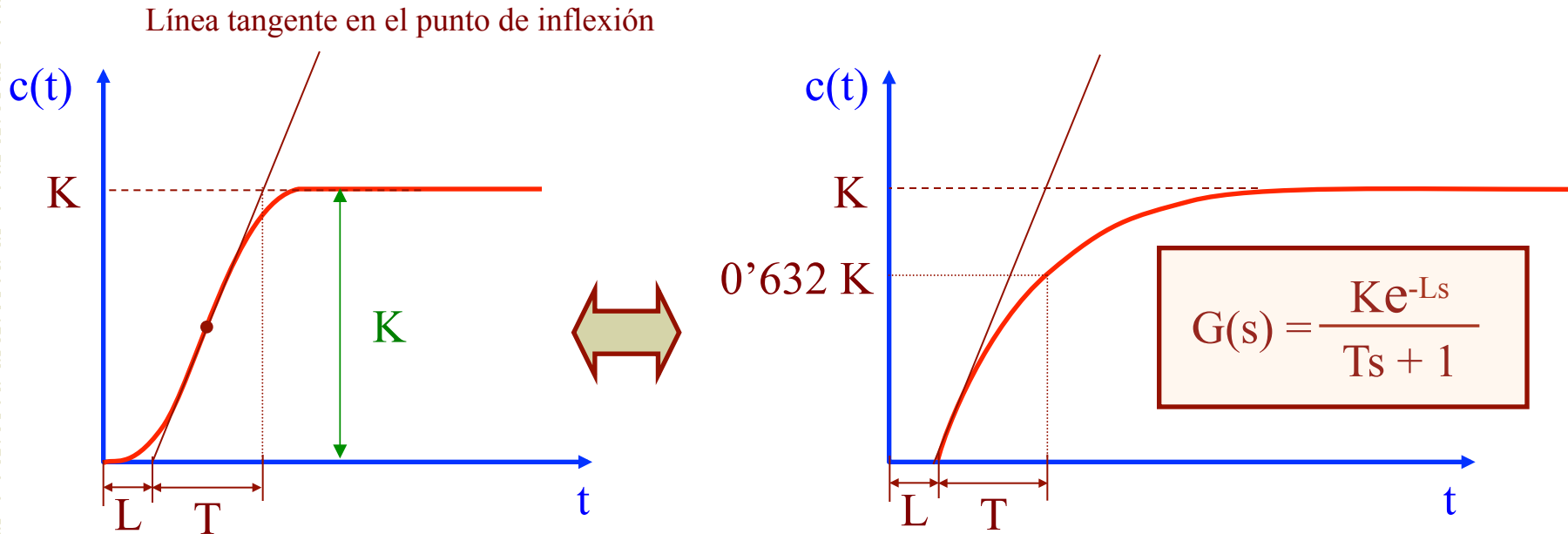
Cartagena99

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

L T

Sintonía experimental de PID (1º método de Ziegler-Nichols)



Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
---------------------	-------	-------	-------

(1) ²

Cartagena99

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

Sintonía experimental de PID (2º método de Ziegler-Nichols)

- ✓ Se aplica un regulador proporcional K_p y se cierra el lazo
- ✓ Se aumenta K_p hasta un K_{cr} que inestabilice el sistema →
- Aparición de polos imaginarios puros
- ✓ Se lee el periodo de oscilación de la señal de salida

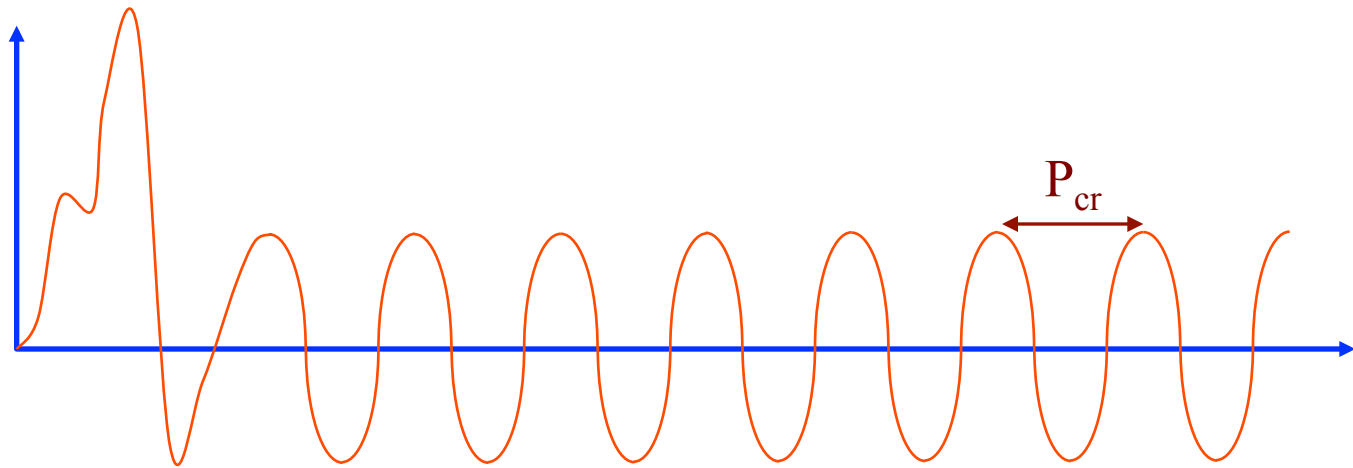


Cartagena99

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

Sintonía experimental de PID (2º método de Ziegler-Nichols)



Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0

$$\left(s + \frac{4}{P_{cr}}\right)^2$$

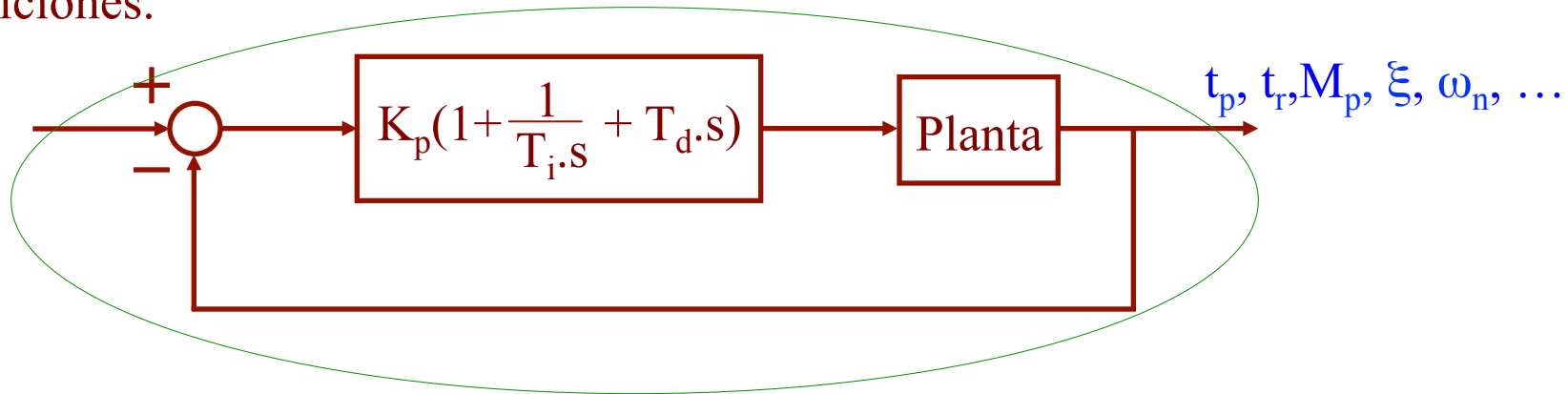
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Sintonía analítica de PID (asignación de polos)

Se basa en ajustar los polos del sistema para que su respuesta cumpla ciertas condiciones.



$$M(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \longrightarrow D(s) = f(K_p, T_i, T_d)$$

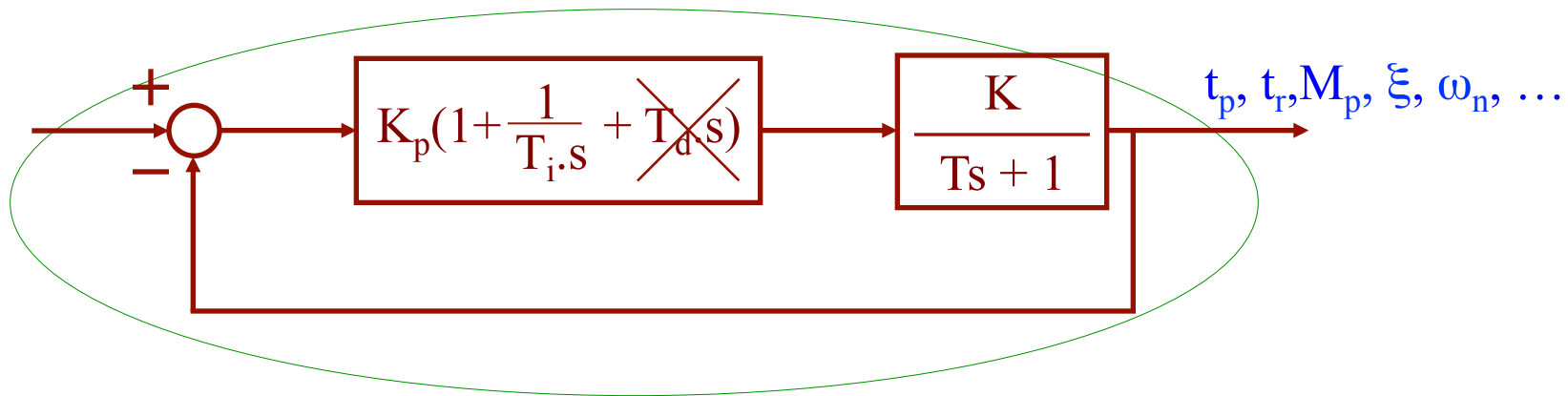
Cartagena99

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

Sintonía analítica de PID (asignación de polos)

Ejemplo: Sistemas de primer orden \longrightarrow suficiente con un PI (ajustar a un 2º orden)



$$M(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \longrightarrow D(s) = s^2 + \left(\frac{1 + K \cdot K_p}{T} \right) s + \frac{K \cdot K_p}{T \cdot T_i} \quad \longrightarrow \quad \text{operando}$$

Cartagena99

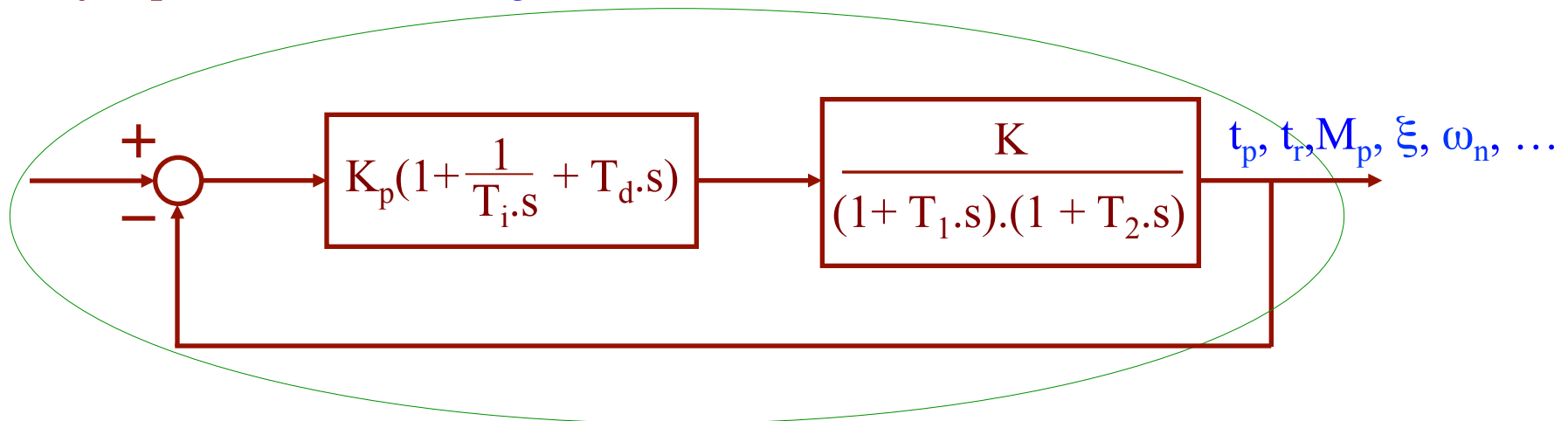
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

P K T T_i ω_n

Sintonía analítica de PID (asignación de polos)

Ejemplo: Sistemas de segundo orden \longrightarrow se necesita un PID



$$D(s) = s^3 + \left(\frac{T_1 + T_2 + K.K_p.T_d}{T_1.T_2} \right) s^2 + \left(\frac{1 + K.K_p}{T_1.T_2} \right) s + \frac{K.K_p}{T_1.T_2.T_i}$$

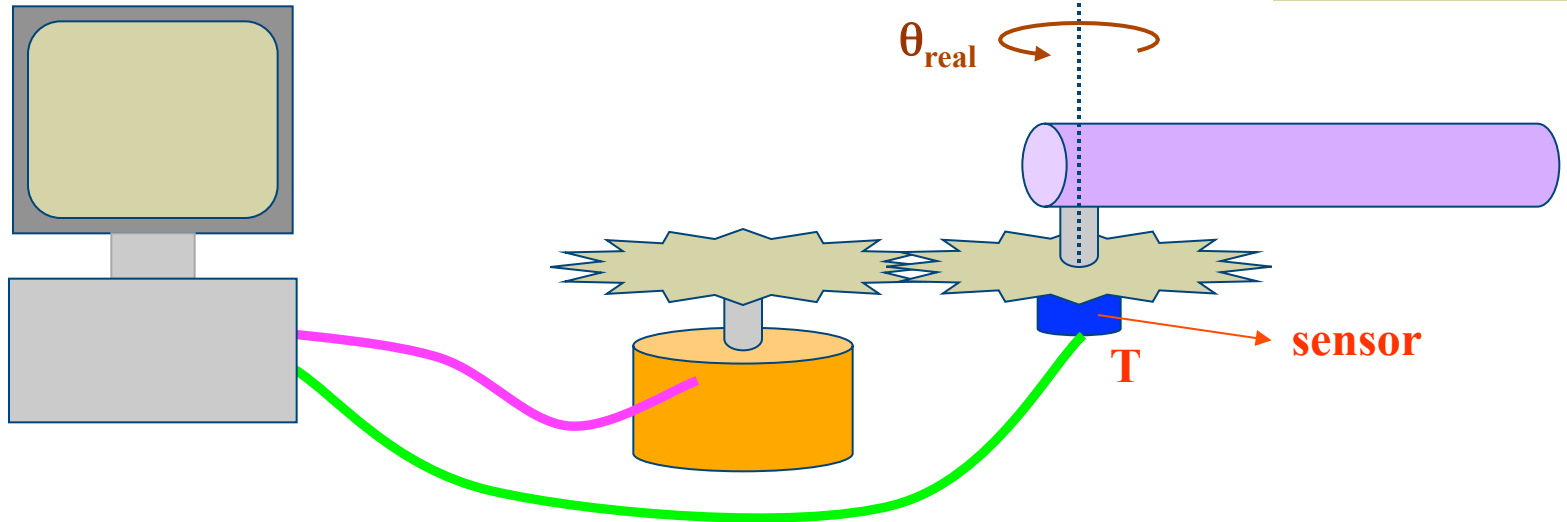
$$D(s) = (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s + \alpha.\omega_n)$$

Cartagena99

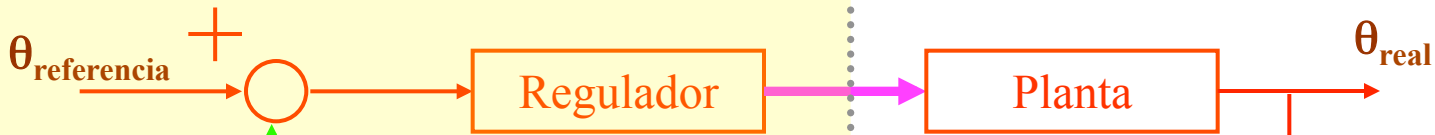
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Discretización (introducción)



COMPUTADORA



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Discretización (muestreo)



$$w(k.T) = w_k = \{w_0, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, \dots\}$$

Cartagena99

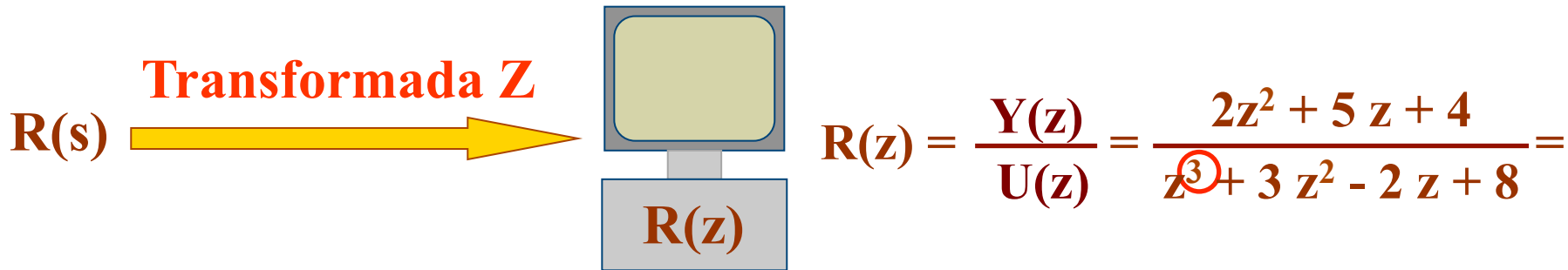
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

n n K-1 K-2 K-1 K-2

Discretización (ecuación en diferencias)

Es la ecuación que controla la planta \longrightarrow R(s)



$$= \frac{2z^{-1} + 5z^{-2} + 4z^{-3}}{1 + 3z^{-1} - 2z^{-2} + 8z^{-3}} \longrightarrow \text{Ecuación en diferencias}$$

Cartagena99

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

Discretización (transformada Z)

Transformada Z ($G(s) \longrightarrow G(z)$)

Existen varios métodos

- Aproximación del operador derivada:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x_k - x_{k-1}}{T} \longrightarrow s = \frac{z - 1}{T}$$

- Método trapezoidal o método de Tustin:

Cartagena99

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