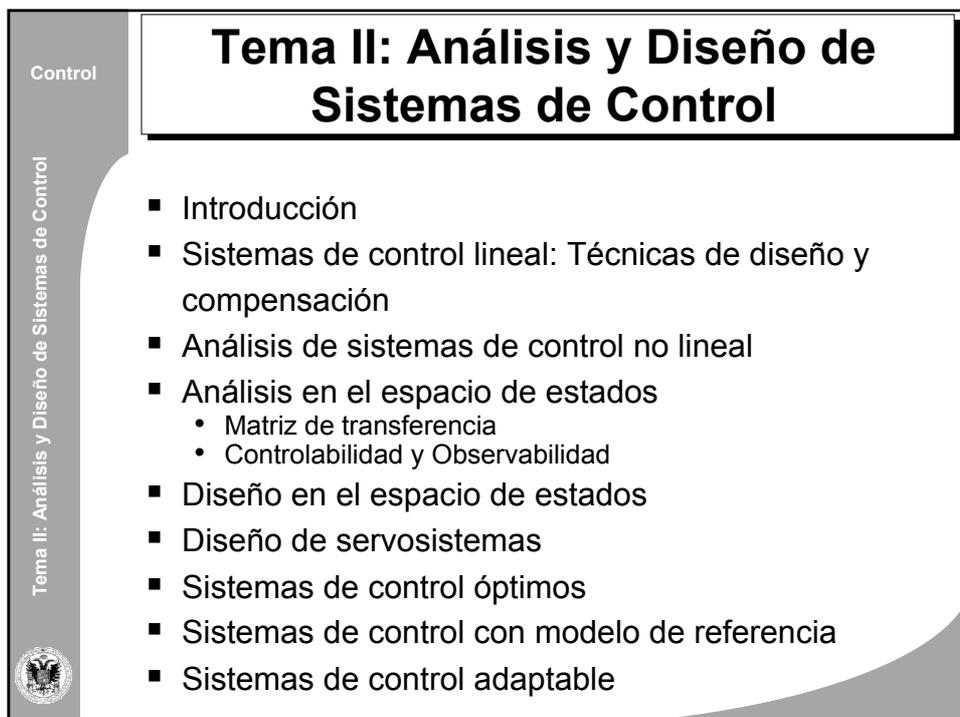




CONTROL

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Profesor: Luis Parrilla Roure



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

- Introducción
- Sistemas de control lineal: Técnicas de diseño y compensación
- Análisis de sistemas de control no lineal
- Análisis en el espacio de estados
 - Matriz de transferencia
 - Controlabilidad y Observabilidad
- Diseño en el espacio de estados
- Diseño de servosistemas
- Sistemas de control óptimos
- Sistemas de control con modelo de referencia
- Sistemas de control adaptable

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

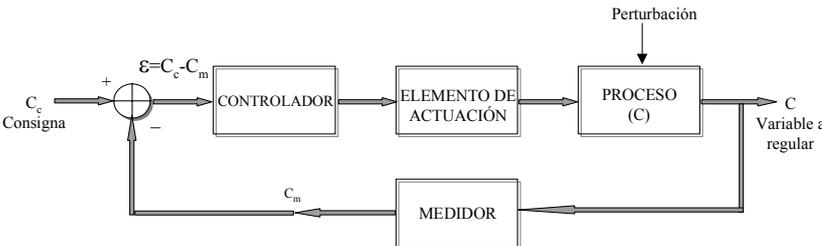
- Introducción
- Sistemas de control lineal: Técnicas de diseño y compensación
- Análisis de sistemas de control no lineal
- Análisis en el espacio de estados
 - Matriz de transferencia
 - Controlabilidad y Observabilidad
- Diseño en el espacio de estados
- Diseño de servosistemas
- Sistemas de control óptimos
- Sistemas de control con modelo de referencia
- Sistemas de control adaptable



Control

Introducción

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control



- **Diseño del controlador**
 - **Sistemas lineales**
 - Función de transferencia
 - Lugar de las raíces
 - **Sistemas no lineales**
 - Función descriptiva
 - Linealización a tramos
 - **Espacio de estados**



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- **Sistemas lineales**
 - **Modelo de la función de transferencia**
 - Lugar de las raíces
 - **Técnicas de compensación**
 - Compensación en adelanto
 - Compensación en atraso
 - Compensación en adelanto y atraso
 - **Espacio de estados**
 - Ubicación arbitraria de polos

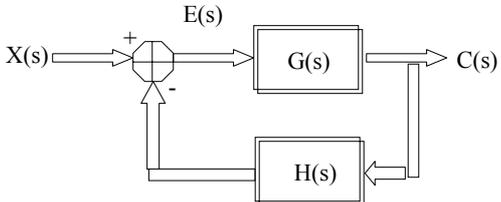


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- **Lugar geométrico de las raíces**
 - Condición de magnitud y fase



$$\frac{C(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

- **Ecuación característica:**

$$1 + G(s)H(s) = 0$$

$$G(s)H(s) = -1$$
 - **Condición de ángulo:** $\angle G(s)H(s) = \pm 180^\circ(2k+1) \quad (k = 0,1,2,\dots)$
 - **Condición de magnitud:** $|G(s)H(s)| = 1$



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Reglas generales para la construcción del lugar de las raíces
 - Ubicar los polos y ceros de $G(s)H(s)$ en el plano s
 - Determinar los lugares geométricos de las raíces sobre el eje real
 - Determinar las asíntotas de los lugares geométricos de las raíces
 - Encontrar los puntos de ruptura
 - Determinar los ángulos de salida y de llegada
 - Encontrar los puntos de corte con el eje imaginario
 - Hallar una serie de puntos de prueba
 - Determinar los polos en lazo cerrado

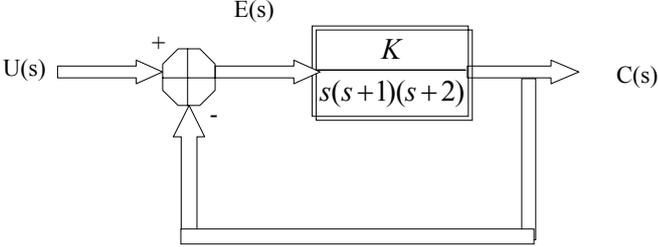


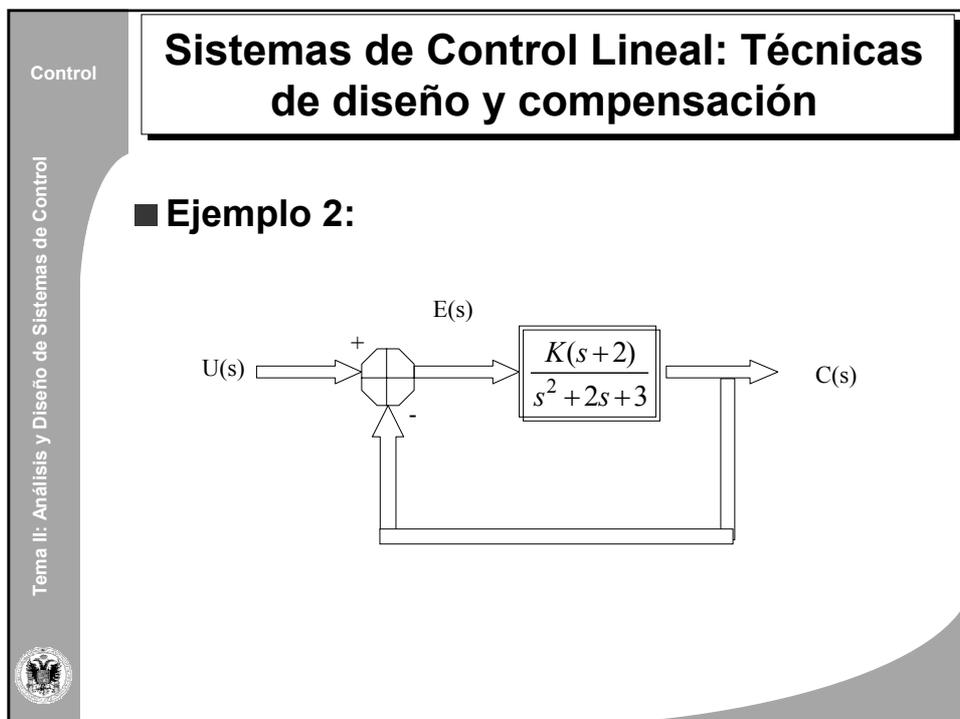
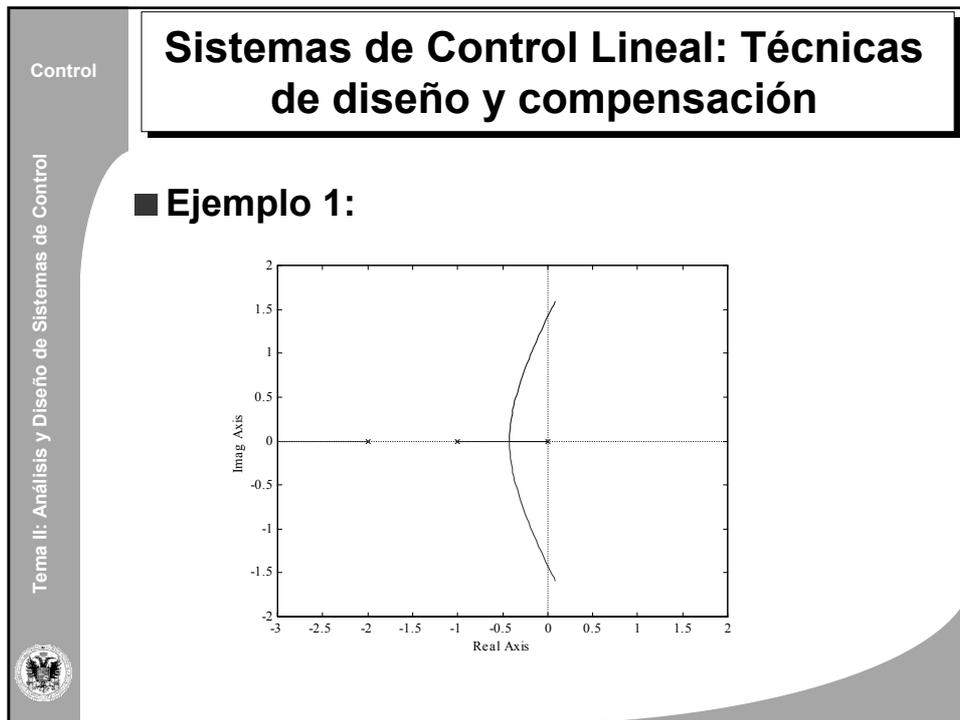
Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Ejemplo 1:



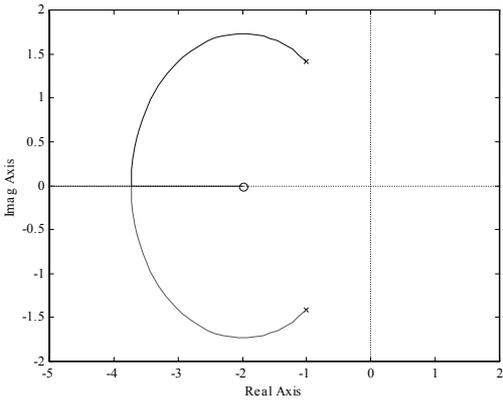


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Ejemplo 2:



A root locus plot in the complex s-plane. The horizontal axis is the Real Axis, ranging from -5 to 2. The vertical axis is the Imag Axis, ranging from -2 to 2. There is a zero at s = -2, marked with a small circle. There are two poles at s = -1 ± 1.5j, marked with 'x'. The root locus branches start at the poles and meet on the real axis at s = -2. From s = -2, one branch goes to the zero at s = -2, and the other branch goes to negative infinity along the real axis.

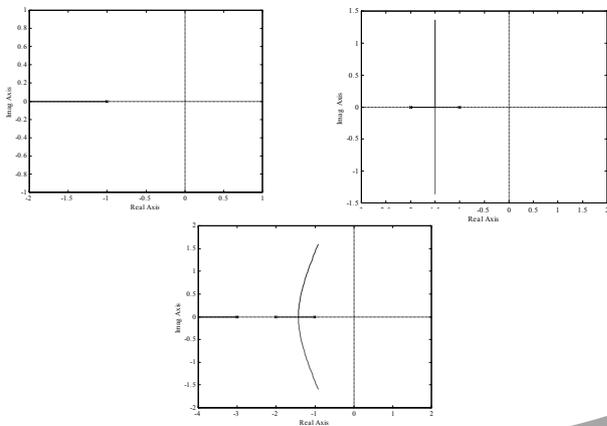
Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Consideraciones preliminares de diseño

- Efectos de la adición de polos



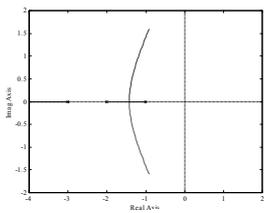
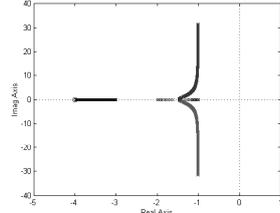
Three root locus plots illustrating the effect of adding poles. The top-left plot shows a root locus with a zero at s = -2 and a pole at s = -1. The top-right plot shows a root locus with a zero at s = -2 and two poles at s = -1 ± 1.5j. The bottom plot shows a root locus with a zero at s = -2 and three poles at s = -1 ± 1.5j and s = -1. The root locus branches in the bottom plot are more spread out compared to the other two plots.

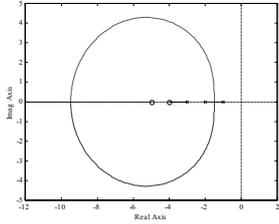
Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Consideraciones preliminares de diseño
 - Efectos de la adición de ceros



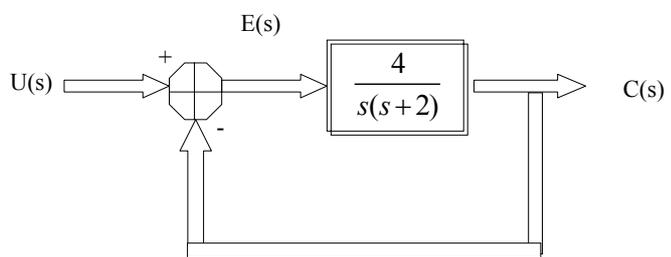
Real Axis

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Compensación en adelanto



- Tiempo de establecimiento ante una entrada escalón: < 1.6s
- Sobredisparo máximo ante un escalón: 16%

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta ante un escalón, sistema sin compensar:

Step Response

Amplitude

Time (sec.)



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Lugar de las raíces:

Imag Axis

Real Axis



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Es necesario modificar el lugar de las raíces
- Compensación en adelanto:
 - Calcular fase de los polos deseados con respecto al lugar de las raíces
 - Calcular diferencia de fase necesaria para que esos polos pertenezcan al lugar de las raíces
 - Ubicar un polo y un cero sobre el eje real separados por esa diferencia de fase (cero a la derecha del polo). Se recomienda utilizar el método de la bisectriz
 - Obtener el valor de K para ubicar los polos en lazo cerrado en el punto deseado, y a partir de ahí el K_c del compensador

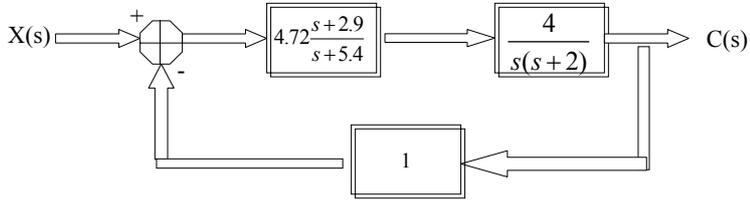


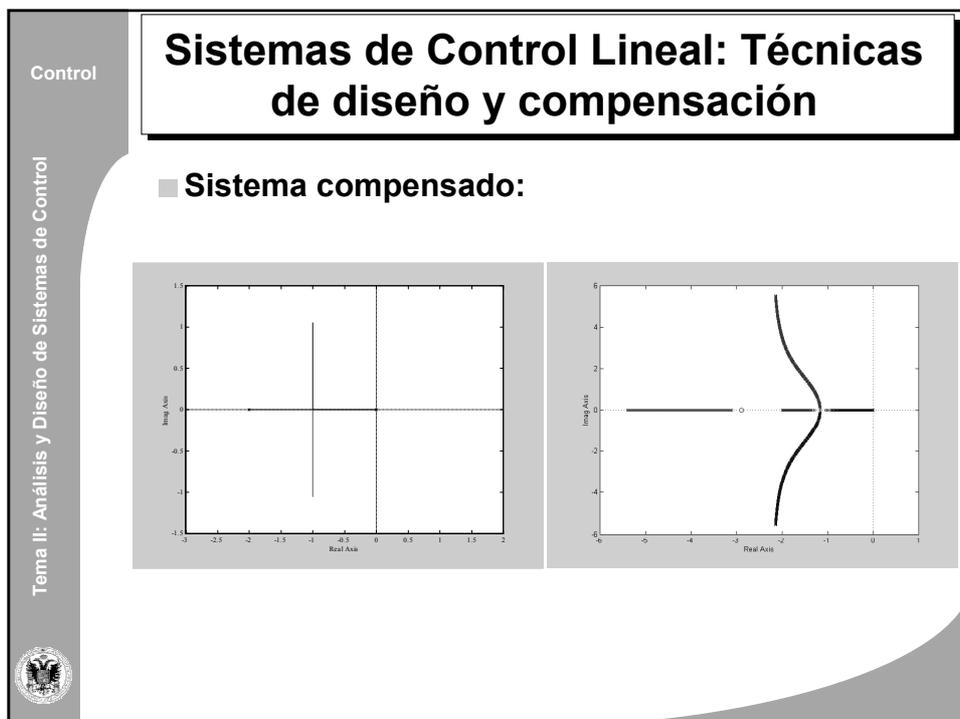
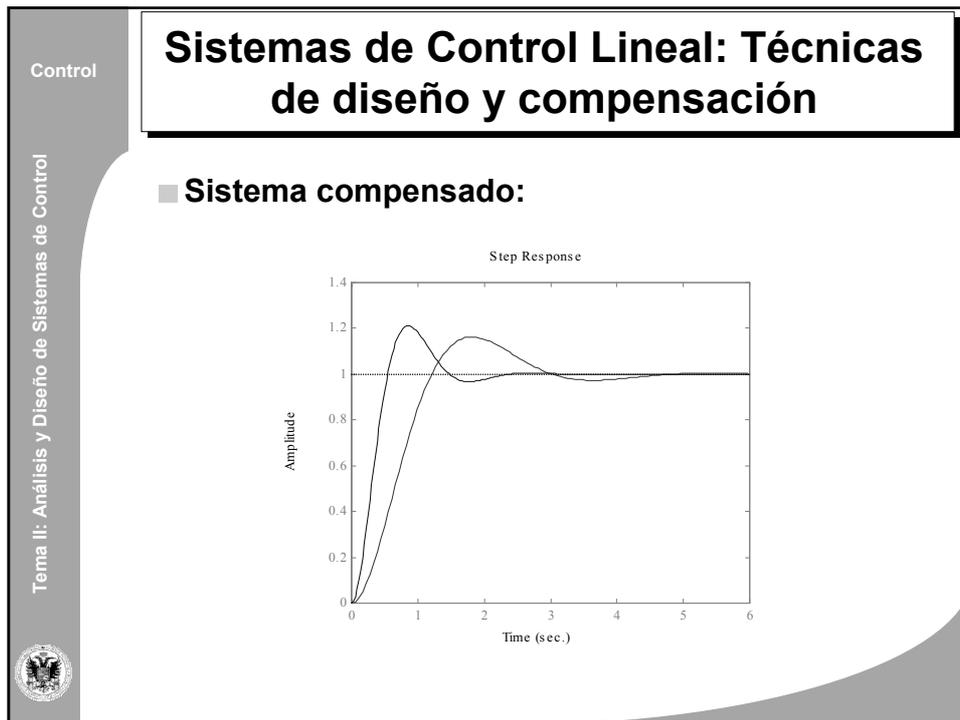
Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Diseño compensador en adelanto:


$$\omega_n = 4 \text{ rad / s}$$
$$\tau = 0.5$$

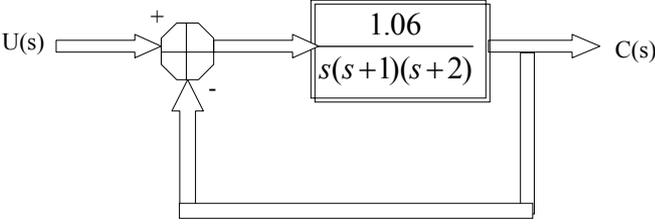



Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

■ Compensación en atraso



- Error en estado estacionario ante una entrada rampa: < 0.2
- Sin modificar respuesta transitoria

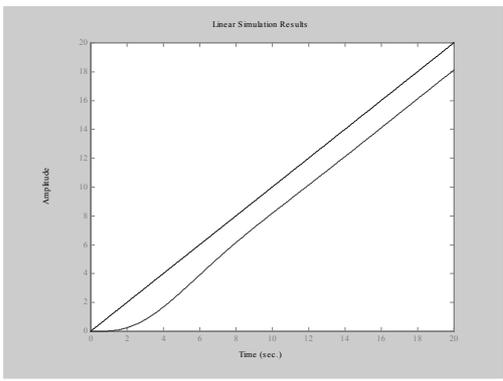


Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

■ Sistema sin compensar ante una rampa:



$e_{ss} \approx 2$



Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Sistema sin compensar ante una rampa:

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Diseño compensador en atraso

$e_{ss} \text{ deseado} < 0.2$

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- **Compensación en atraso:**
 - Determinar la relación numérica entre el polo y el cero para eliminar el error en estado estacionario
 - Situar el polo y el cero (el polo a la derecha del cero) cercanos al origen
 - Comprobar que la diferencia angular introducida es < 5 grados
 - Obtener el valor de K, y a partir de ahí el K_a del compensador. Comprobar que es cercano a 1
 - Comprobar que no se modifica sustancialmente el lugar de las raíces

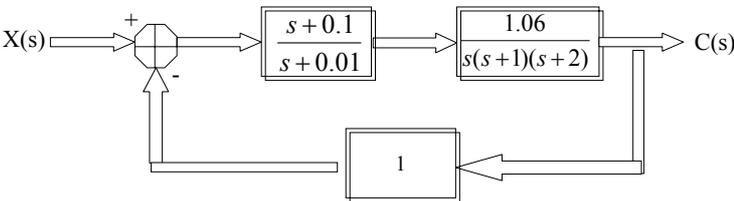


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- **Diseño compensador en atraso**



$e_{ss} \text{ deseado} < 0.2$

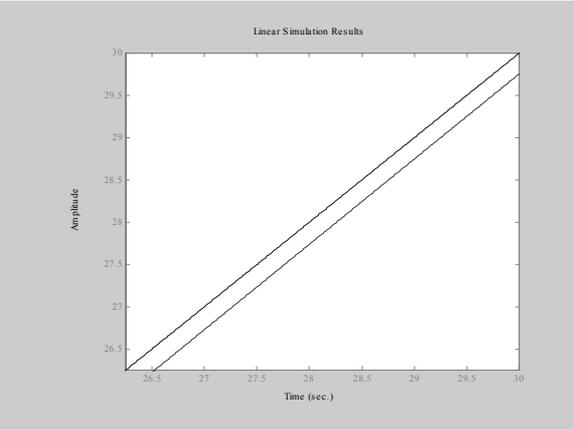


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta ante una rampa del sistema compensado



Amplitude

Time (sec.)

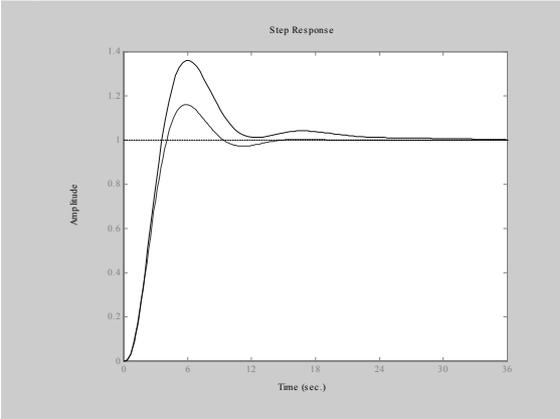
e_{ss} deseado < 0.2

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

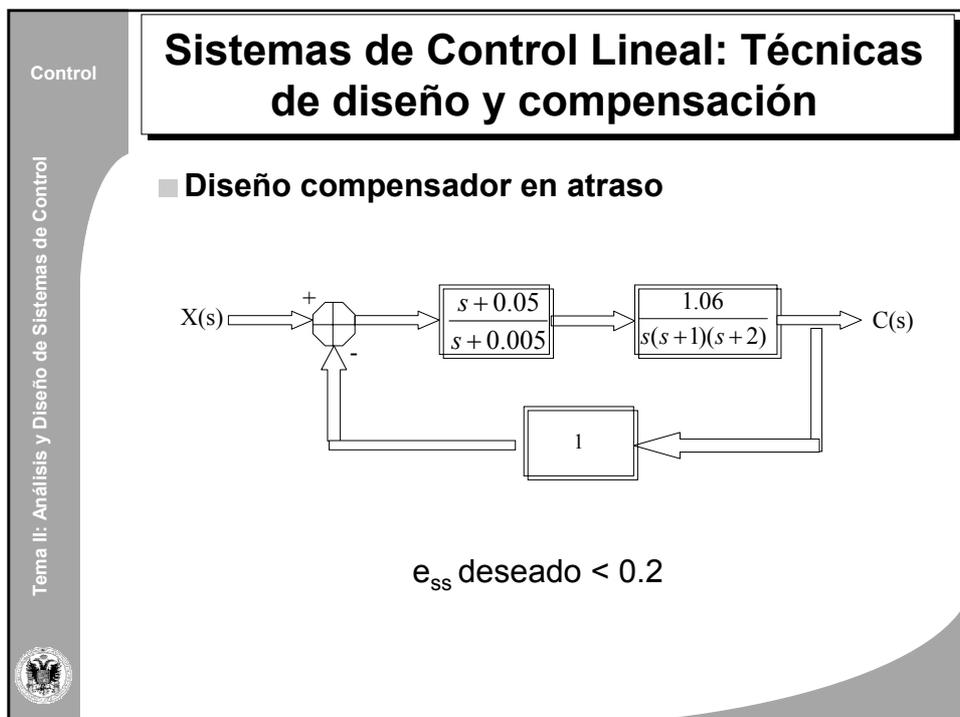
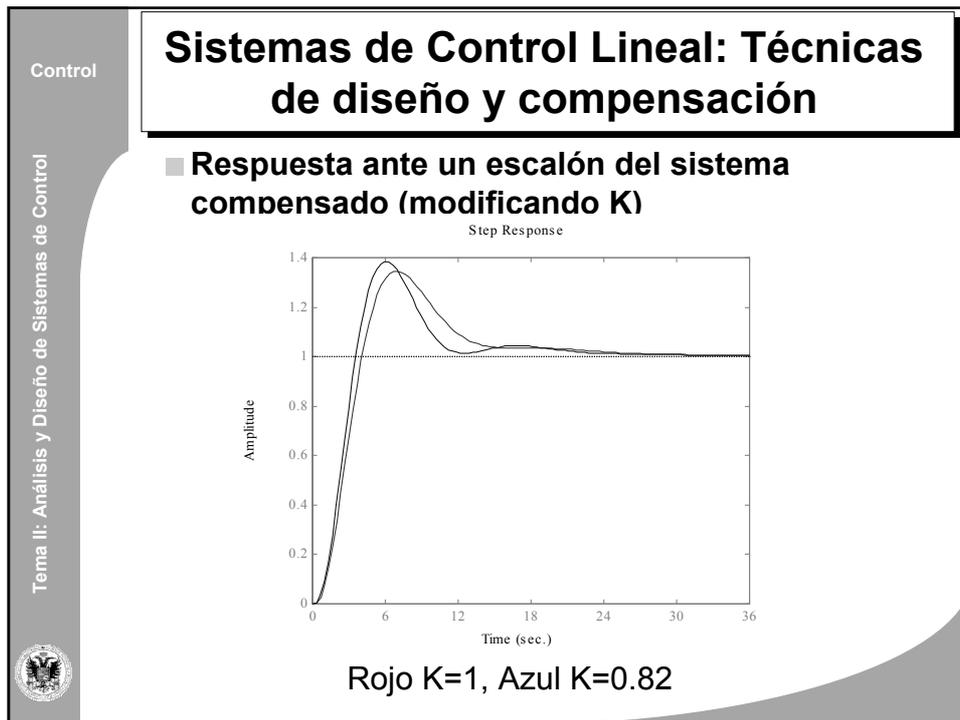
■ Respuesta ante un escalón del sistema compensado



Amplitude

Time (sec.)

Azul: Sistema compensado en atraso

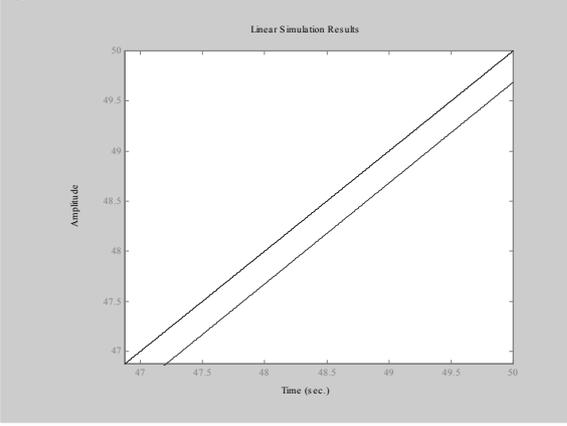


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta ante una rampa del sistema compensado



Linear Simulation Results

Amplitude

Time (sec.)

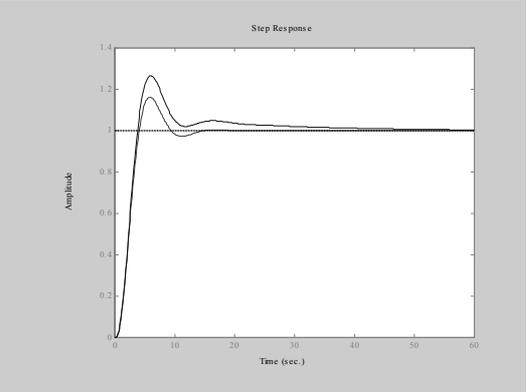
e_{ss} deseado < 0.2

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta ante una rampa del sistema compensado



Step Response

Amplitude

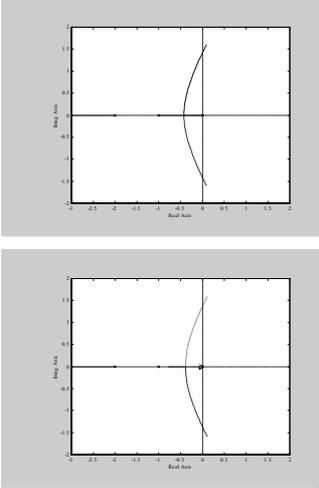
Time (sec.)

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Lugar de las raíces del sistema compensado



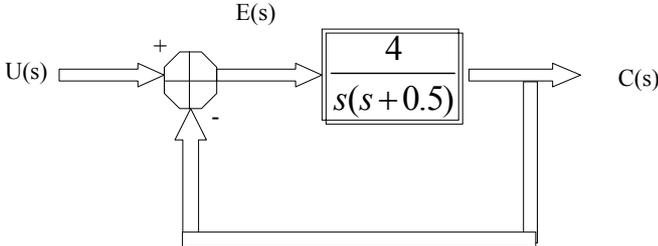
The slide contains two identical root locus plots. Each plot has a horizontal Real Axis ranging from -2 to 2 and a vertical Imag Axis ranging from -2 to 2. The root locus consists of a branch on the real axis between $s = -1$ and $s = 0$, and a branch on the real axis starting at $s = 0$ and extending to the right. There is a breakaway point at $s = -0.5$. The poles are located at $s = -1$ and $s = 0$, and there is a zero at $s = 0$.

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

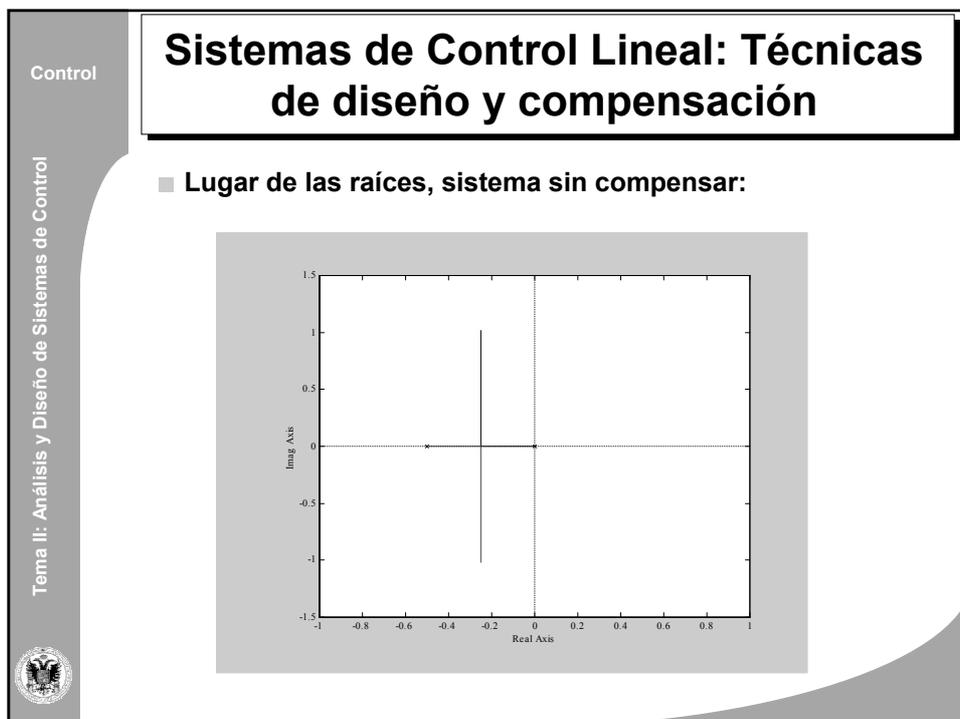
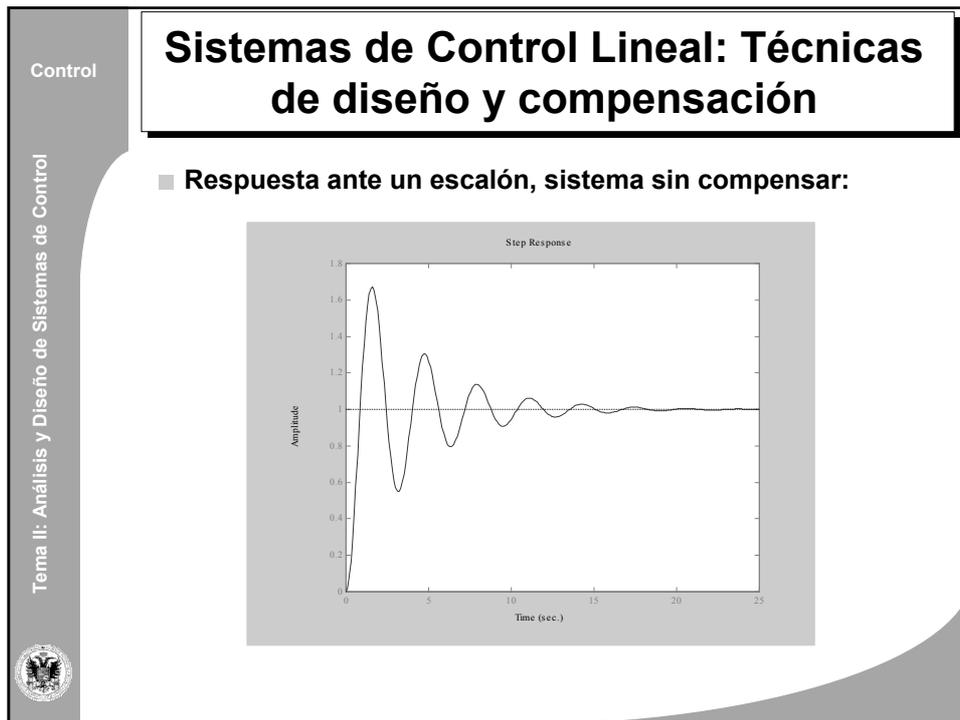
Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Compensación en adelanto y atraso



The block diagram shows a feedback control system. The input $U(s)$ enters a summing junction with a positive sign. The output of the summing junction is $E(s)$, which enters a forward path block with the transfer function $\frac{4}{s(s+0.5)}$. The output of this block is $C(s)$. A feedback path branches off from $C(s)$ and enters the summing junction with a negative sign.

- Tiempo de establecimiento ante una entrada escalón: $< 1.25s$
- Sobredisparo máximo ante un escalón: 16%
- $e_{ss}(\text{rampa}) \approx 0.0125$



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Diseño compensador en adelanto:

$\omega_n = 5 \text{ rad/s}$
 $\tau = 0.5$ → Polos deseados en lazo cerrado: $-2.5 \pm j4.33$

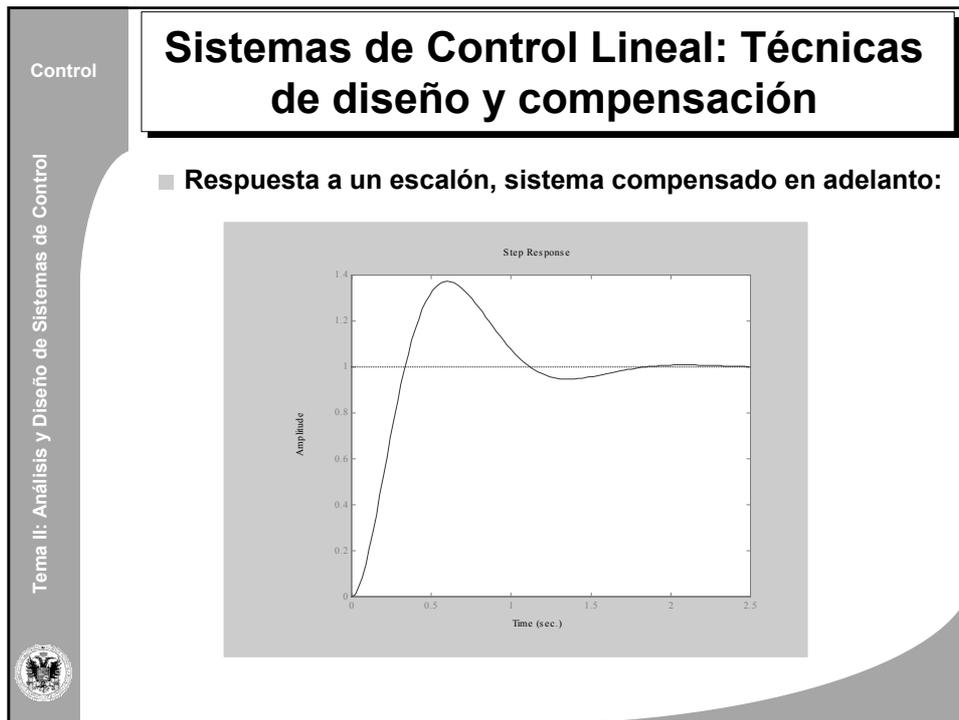
Control

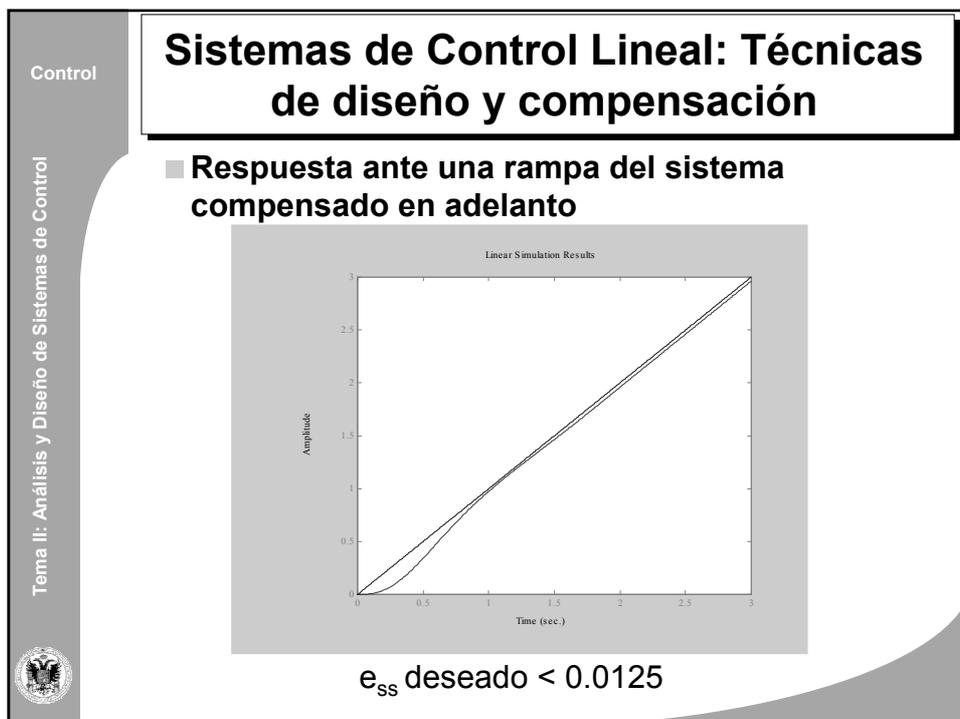
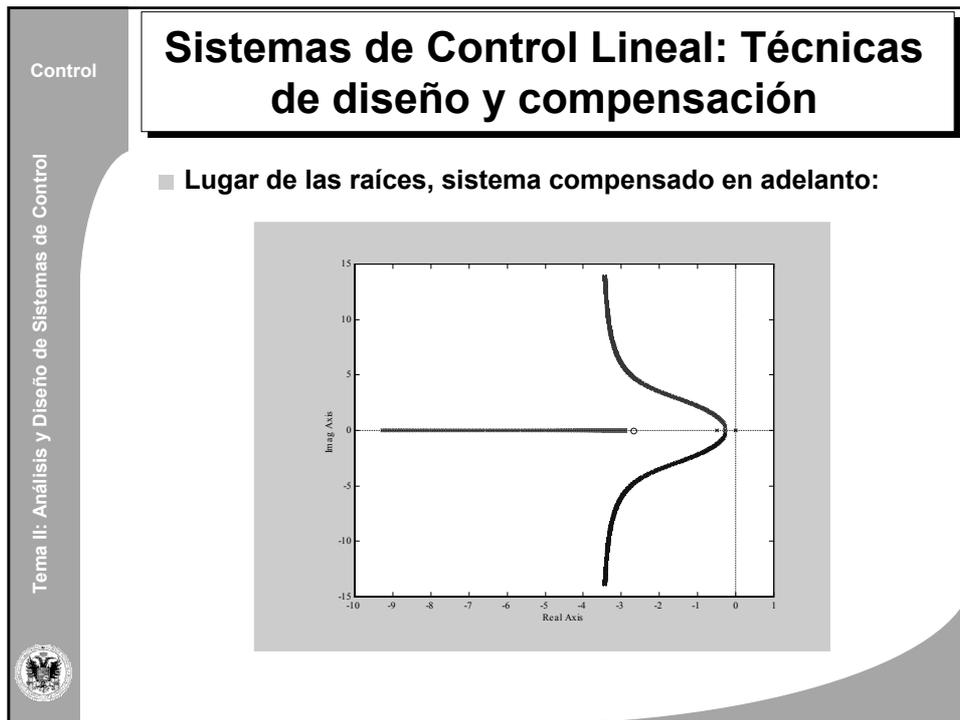
Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Sistema con compensador en adelanto:

$\omega_n = 5 \text{ rad/s}$
 $\tau = 0.5$ → Polos deseados en lazo cerrado: $-2.5 \pm j4.33$



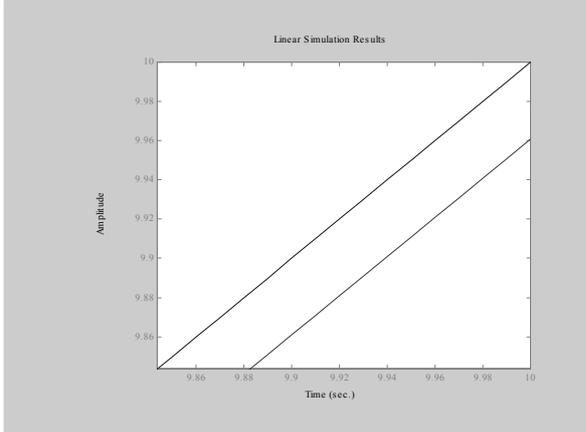


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta ante una rampa del sistema compensado en adelante (detalle)



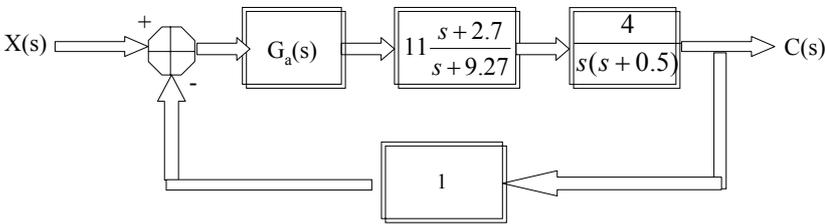
$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Diseño compensador en atraso



$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Diseño compensador en atraso

$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta ante una rampa del sistema compensado en adelanto y atraso (detalle)

$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

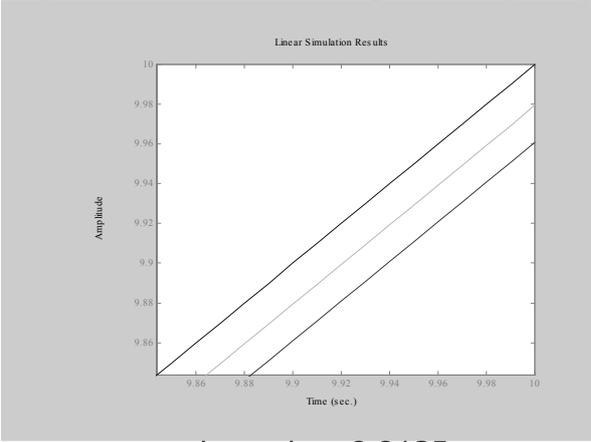


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta ante una rampa del sistema compensado en adelanto y atraso (comparación)



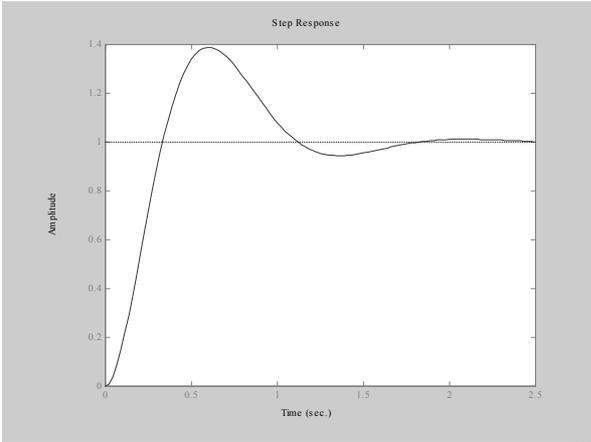
$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta a un escalón del sistema compensado en adelanto y atraso



Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Lugar de las raíces del sistema compensado en adelanto y atraso

Control

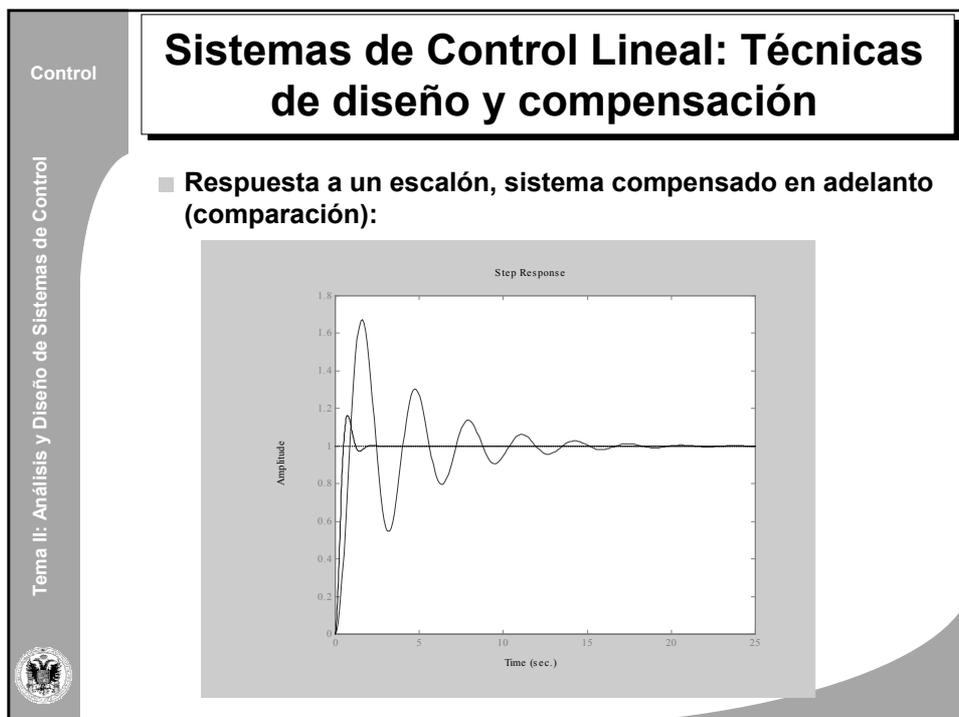
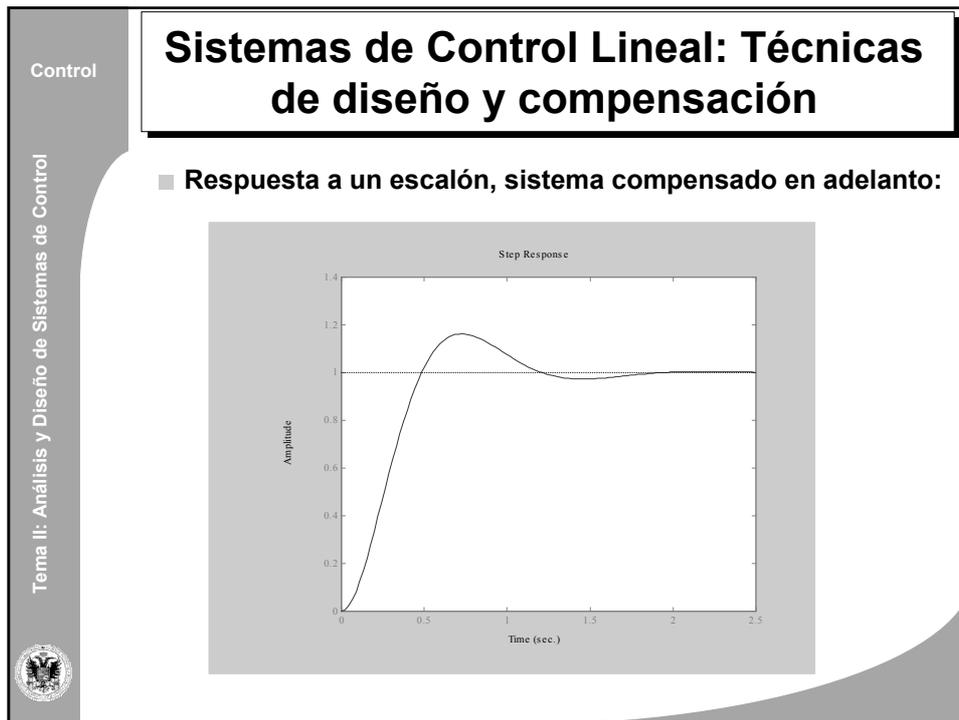
Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Compensación en adelanto eliminando polo:

$\omega_n = 5 \text{ rad/s}$
 $\tau = 0.5$

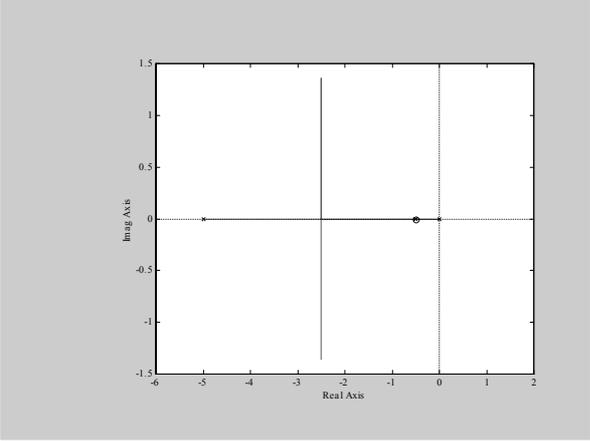
→ Polos deseados en lazo cerrado: $-2.5 \pm j4.33$



Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Lugar de las raíces, sistema compensado en adelanto:



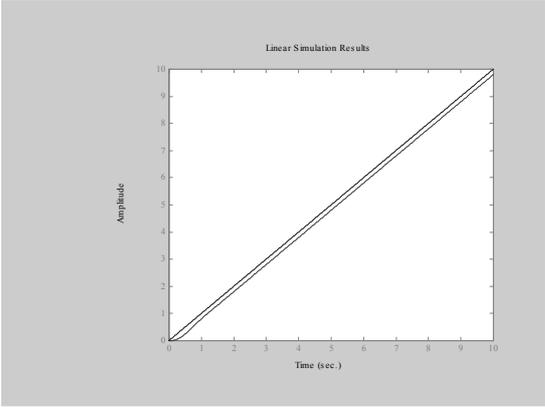
Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control



Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta a una rampa, sistema compensado en adelanto:



Linear Simulation Results

Amplitude

Time (sec.)

$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

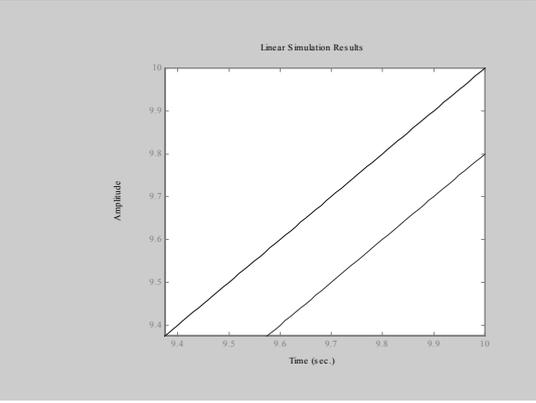


Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Respuesta a una rampa, sistema compensado en adelanto (detalle):



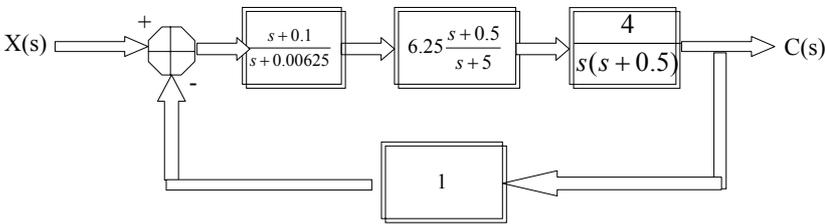
$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

- Diseño compensador en atraso



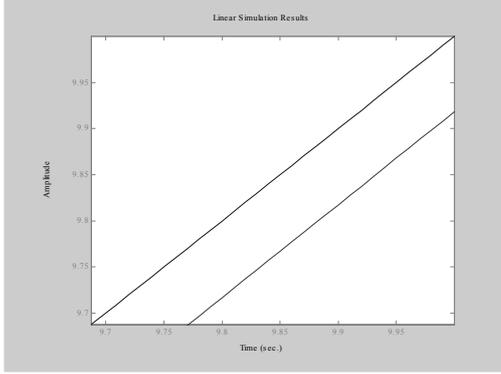
$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta a una rampa, sistema compensado en adelanto y atraso (detalle):



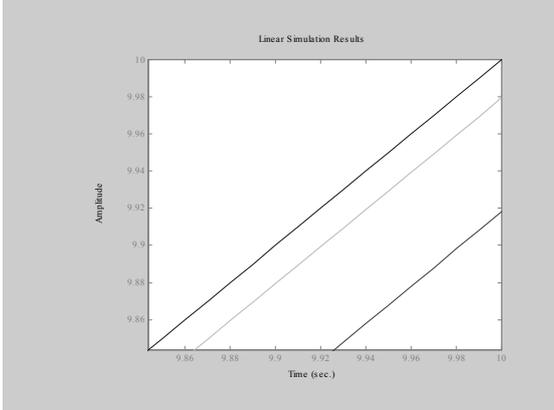
$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$

Control

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

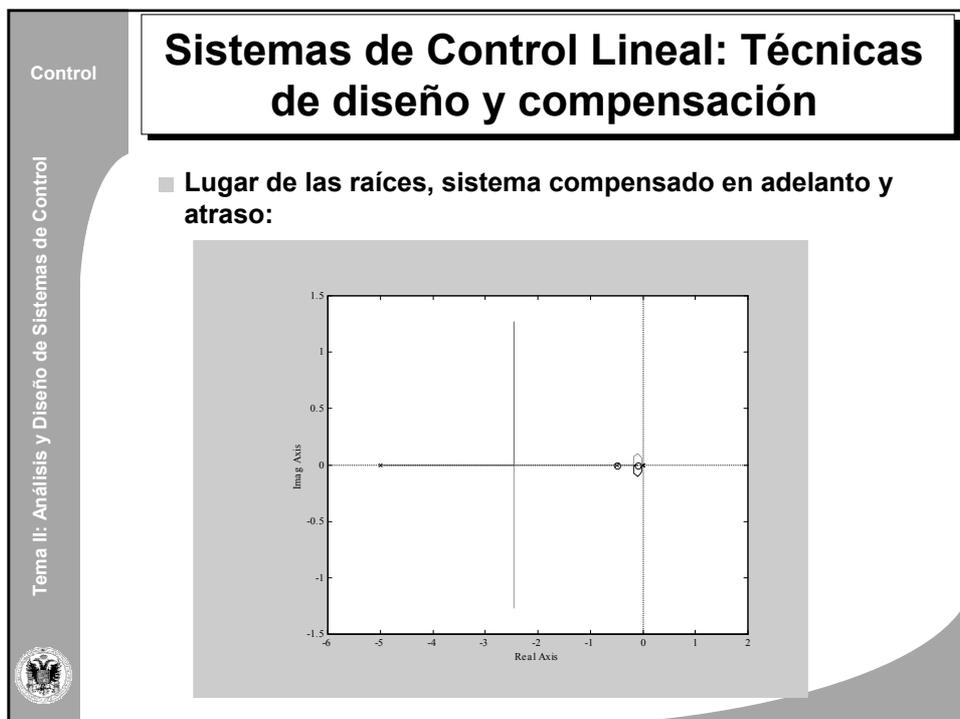
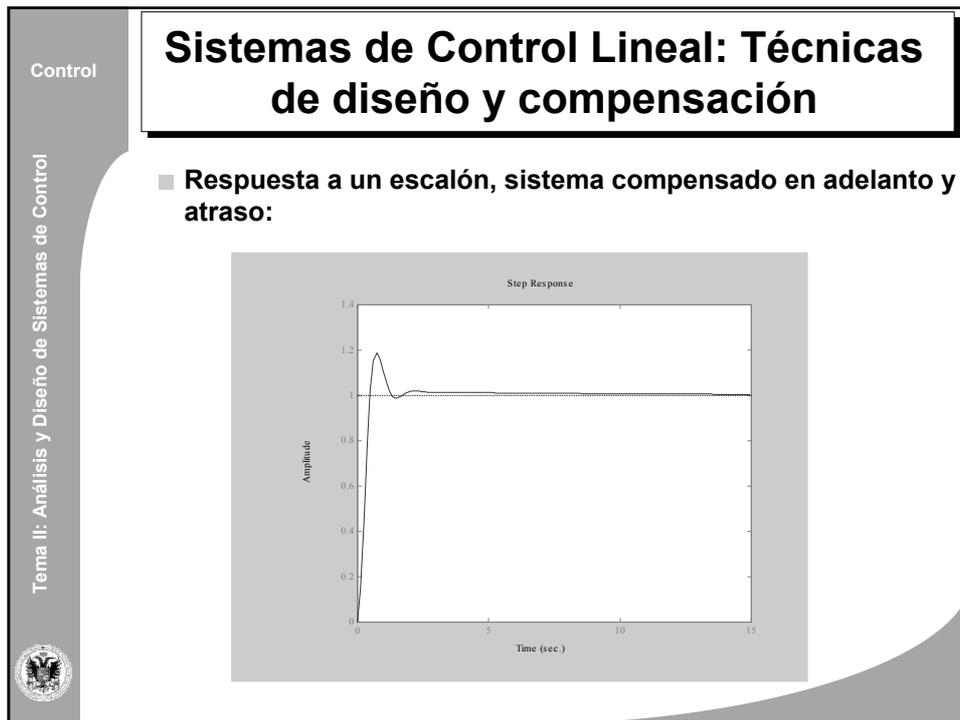
Sistemas de Control Lineal: Técnicas de diseño y compensación

■ Respuesta a una rampa, sistema compensado en adelanto y atraso (comparación):



- Azul: rampa
- Verde: compensación adelanto bisectriz
- Rojo: compensación adelanto eliminando polo

$e_{ss} \text{ deseado} < 0.0125$



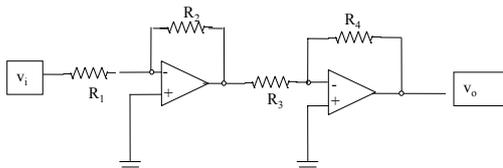
Control

Sistemas de Control Lineal: Realización de controladores

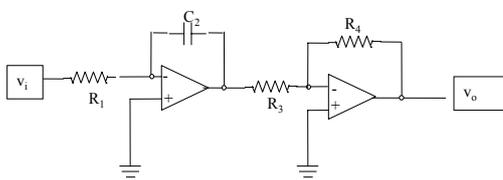
Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

■ **Diseño de controladores Electrónicos:**

- **Controlador proporcional (P):**



- **Controlador integral (I):**



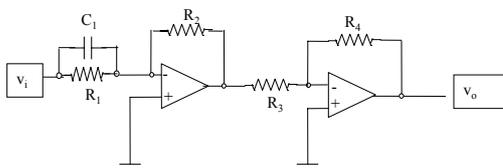
Control

Sistemas de Control Lineal: Realización de controladores

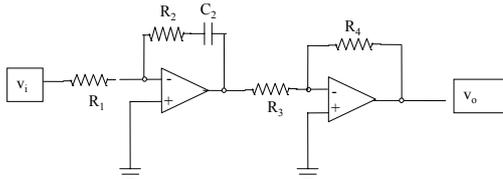
Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

■ **Diseño de controladores Electrónicos:**

- **Controlador proporcional-derivativo (PD):**



- **Controlador proporcional-integral (PI):**



Control

Sistemas de Control Lineal: Realización de controladores

■ **Diseño de controladores Electrónicos:**

- **Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)**

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Control

Sistemas de Control Lineal: Realización de controladores

■ **Diseño de controladores Electrónicos:**

- **Compensador en adelante o atraso:**

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Control

Sistemas de Control Lineal: Realización de controladores

- **Diseño de controladores Electrónicos:**
 - **Compensador en adelante y atraso:**

Tema II: Análisis y Diseño de Sistemas de Control