DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Ingeniería de Ejecución en Electricidad
Mención Sistemas de Energía
Modalidad Vespertina

CONTROL AUTOMÁTICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
CÁTEDRAS 5 & 6

PRIMER SEMESTRE 2018

PROF. MATÍAS DÍAZ

Agenda

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- SOLUCIÓN PRUEBA 1
- ERRORES EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN SISTEMA DE CONTROL
- FUNDAMENTOS DEL LUGAR DE LA RAÍZ
- DISEÑO BÁSICO DE CONTROLADORES
- USO DE RLTOOL EN MATLAB
- CONTROLADORES PID

Agenda

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- Fundamentos del Lugar de la Raíz
- Diseño Básico de Controladores
- Uso de RLTool en Matlab
- Controladores PID

Solución prueba 1

Pauta enviada por LOA.

Dudas, consultas?

Agenda

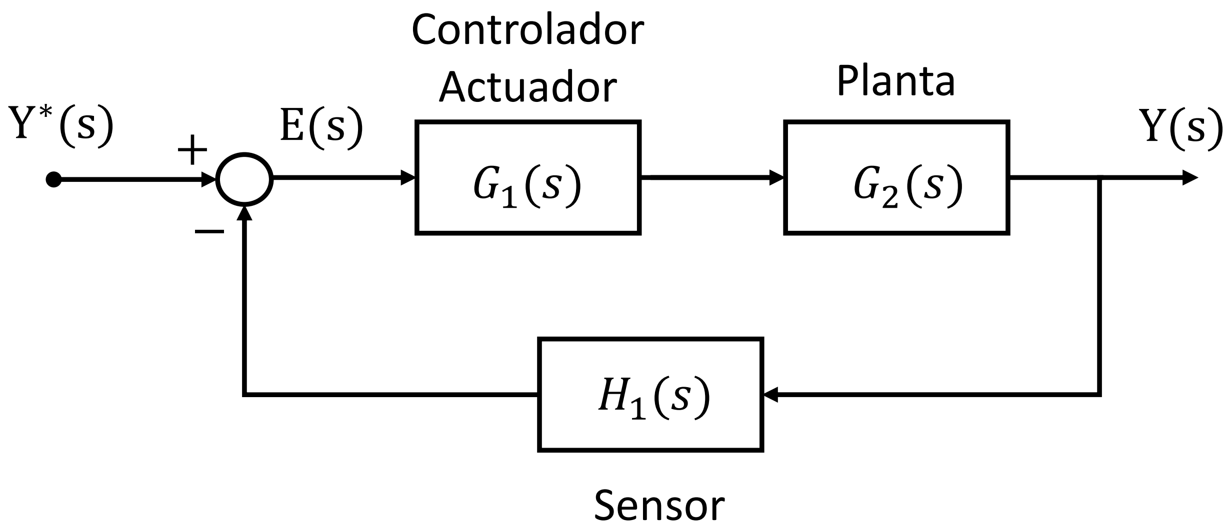
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- Fundamentos del Lugar de la Raíz
- Diseño Básico de Controladores
- Uso de RLTool en Matlab
- Controladores PID

Errores en Estado Permanente de un sistema de control

Al especificar un sistema de control se debe considerar:

- Respuesta en estado estacionario
- Respuesta Dinámica



Errores en Estado Estacionario de un sistema de control

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Al especificar un sistema de control se debe considerar:

- Respuesta en régimen permanente → Error en Estado Estacionario (EEE).
- Respuesta Dinámica → coeficiente de amortiguamiento, velocidad natural, etc.

$$\frac{Y(s)}{Y^*(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \qquad E(s) = Y^*(s)\frac{1}{1 + G(s)H(s)}$$

Usando el teorema del valor final: $lim\ (t \rightarrow\propto) e(t) = lim(s \rightarrow 0)\ sE(s)$

$$lim\ (t \rightarrow\propto) e(t) = lim(s \rightarrow 0)\frac{s\,Y^*(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Errores en Estado Estacionario de un sistema de control

Analizando la ecuación anterior, hay solo dos opciones para que el EEE sea 0:

- Que la referencia (entrada) sea 0
- Que G(s)H(s)→ ∞ cuando s→0

$$G(s)H(s) = \frac{k\prod(s+z_i)}{s^n\prod(s+p_i)}$$

Tabla I. Resumen de errores para algunas entradas.

Tipo de la función $G(s)H(s)$	*Entrada Escalón* $y^*=A/s$	*Entrada rampa* $y^*=A/s^2$	*Entrada parabólica* $y^*=A/s^3$
0	$e_{ss}=\frac{A}{1+K_p}$	$e_{ss}=\infty$	$e_{ss}=\infty$
1	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=\frac{A}{K_v}$	$e_{ss}=\infty$
2	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=\frac{A}{K_a}$
3	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$

Errores en Estado Estacionario de un sistema de control

Tabla I. Resumen de errores para algunas entradas.

Tipo de la función $G(s)H(s)$	*Entrada Escalón* $y^*=A/s$	*Entrada rampa* $y^*=A/s^2$	*Entrada parabólica* $y^*=A/s^3$
0	$e_{ss}=\frac{A}{1+K_p}$	$e_{ss}=\infty$	$e_{ss}=\infty$
1	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=\frac{A}{K_v}$	$e_{ss}=\infty$
2	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=\frac{A}{K_a}$
3	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$	$e_{ss}=0$

El lugar de la raíz es el procedimiento de diseño utilizado en la primera parte de este curso. Se asume que el procedimiento “mecánico” de construcción del lugar de la raíz ya ha sido estudiado previamente. En este curso se hace uso de MATLAB y SIMULINK y por lo tanto no se considera necesario memorizar las doce reglas de construcción del lugar de la raíz. Sin embargo, entender los conceptos relacionados con este método es fundamental para efectuar diseño de controladores.

Agenda

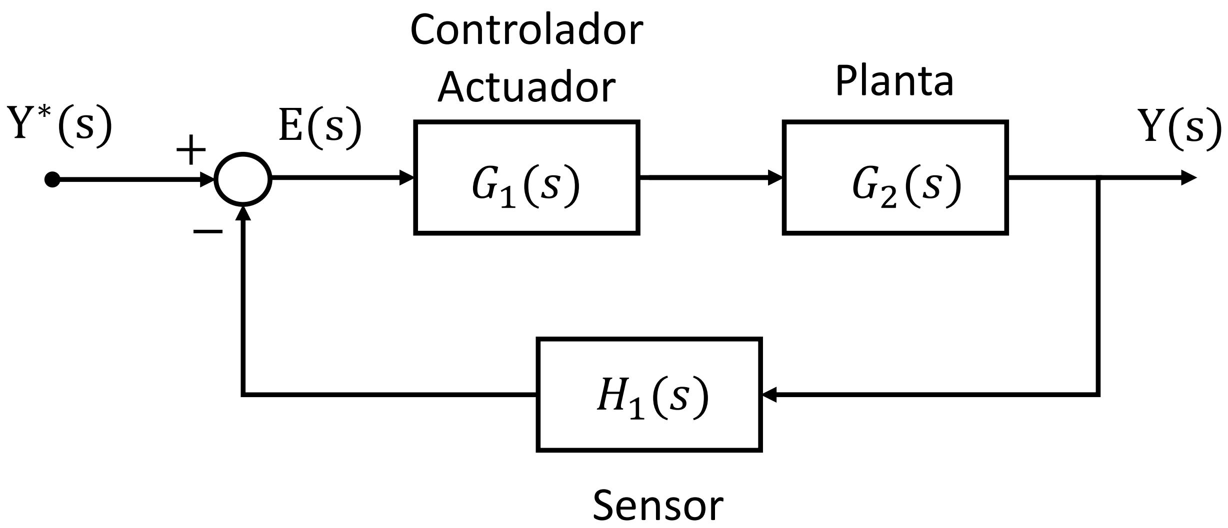
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- **Fundamentos del Lugar de la Raíz**
- Diseño Básico de Controladores

Fundamentos del lugar de la raíz

El lugar de la raíz es un método gráfico de encontrar la posición de los polos de lazo cerrado de la función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{Y^*(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$



Fundamentos del lugar de la raíz

En otras palabras utilizando el lugar de la raíz se encuentra gráficamente las soluciones de la ecuación característica 1+G(s)H(s)=0, que puede escribirse como:

$$\prod(s+p_j)+k\prod(s+z_i)=0$$

Para un conjunto dado de polos y ceros de lazo abierto, pj y zi , la posición de los polos de lazo cerrado depende del valor de la ganancia K. Por simple inspección, se puede concluir que cuando la ganancia es cero o tiene un valor muy pequeño la posición de los polos de lazo cerrado es la misma que los polos de lazo abierto. Cuando la ganancia K→ ∞ los polos de lazo cerrado están en la misma posición que los ceros de lazo abierto. No se debe confundir los polos de lazo abierto con los de lazo cerrado. Los polos de lazo abierto son los que se encuentran en la función de lazo abierto G(s)H(s). Los polos de lazo cerrado son las soluciones de la ecuación característica.

Fundamentos del lugar de la raíz

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Utilizando la ecuación 1+G(s)H(s)=0, se puede demostrar que existe un polo de lazo cerrado, cuando se cumple la condición de módulo y la condición de ángulo. Estas condiciones se expresan en las siguientes ecuaciones:

$$\left|G(s)H(s)\right| = 1$$

$$Angulo\left(G(s)H(s)\right) = 180 \pm k\,360$$

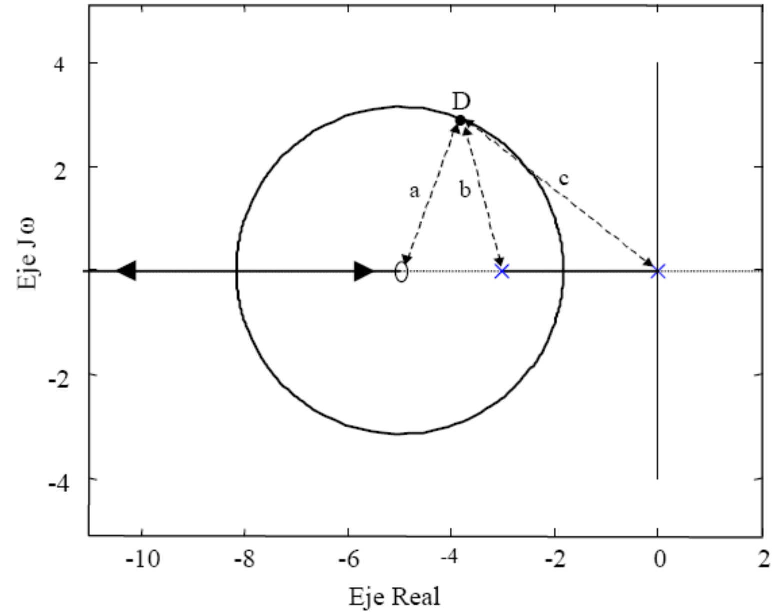
Donde k es un entero. La condición de ángulo es la mas importante ya que la condición de módulo es simple de obtener variando la ganancia del controlador u otros elementos.

$$\left|G(s)H(s)\right| = K\left|\frac{\prod_{1}^{m}(s+z_i)}{s^n \prod_{1}^{l}(s+p_j)}\right|_{s=\sigma \pm j\omega} = 1$$

Fundamentos del lugar de la raíz

Ejemplo $$G(s)H(s)=\frac{K(s+5)}{s(s+3)}$$

Plano Complejo de la FT del ejemplo



Se debe cumplir

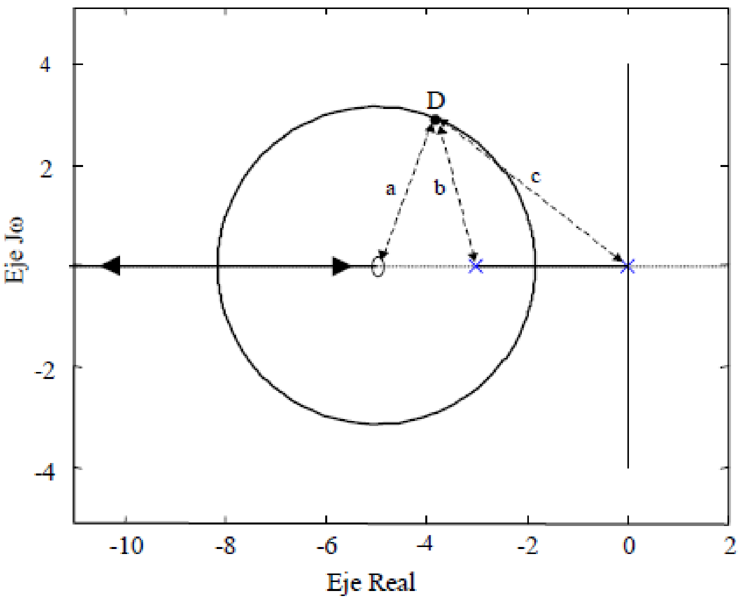
$$|G(s)H(s)|=1$$

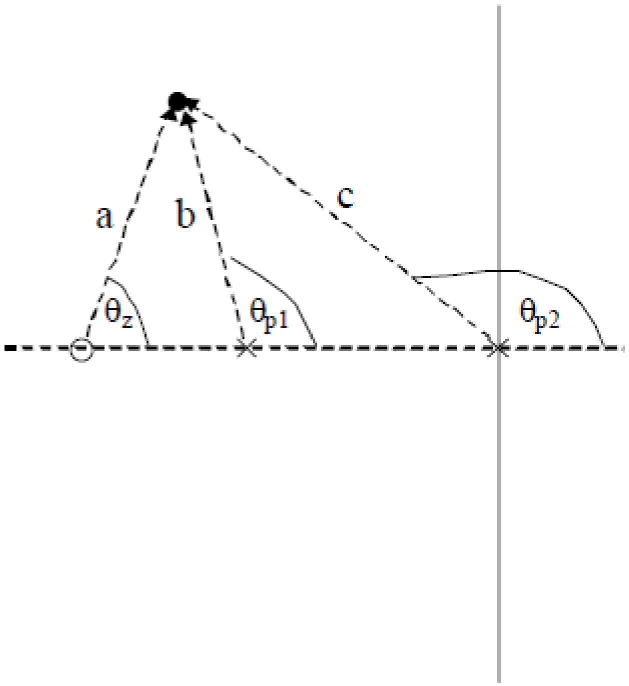
$$Angulo\big(G(s)H(s)\big)=180\pm k\,360$$

Fundamentos del lugar de la raíz

$$K = \frac{\Pi\,(distancia\ del\ punto\ a\ los\ polos)}{\Pi\,(distancia\ del\ punto\ a\ los\ ceros)}$$

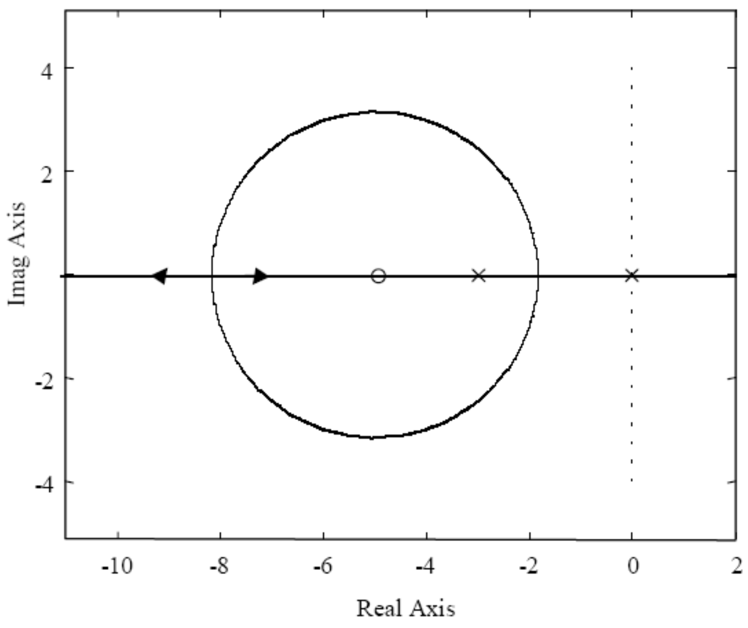
$$\Sigma\,(Angulos\ de\ los\ polos) - \Sigma\,(Angulos\ de\ los\ ceros) = 180 \pm k\,360$$

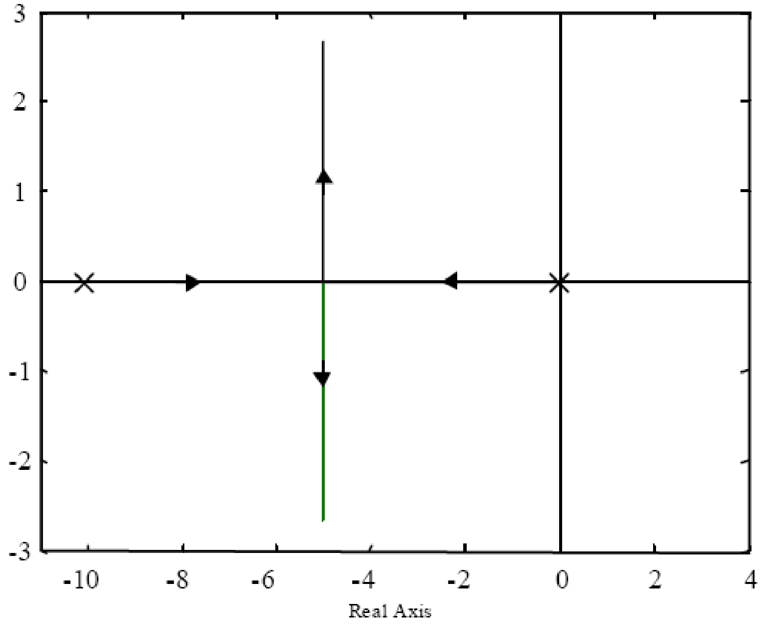




Fundamentos del lugar de la raíz

Lugares de la raíz típicos de sistemas eléctricos





Agenda

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- Fundamentos del Lugar de la Raíz
- **Diseño Básico de Controladores**

Diseño básico de controladores

No existen reglas para el diseño de controladores. Para una planta y especificaciones dadas pueden existir dos o mas controladores que entreguen buen desempeño.
En las siguientes páginas se estudiarán varios enfoques para diseñar un controlador simple para una planta de primer orden.

Diseño básico de controladores

Los enfoques de diseño no son únicos. El estudiante debe recordar que las únicas limitaciones que existen para diseñar un controlador son:

- El controlador debe cumplir con las especificaciones a lazo cerrado.
- El controlador debe ser simple. Las soluciones complicadas pueden ser difíciles de implementar. Recuerde, en ingeniería las soluciones simples son las que funcionan.

Diseño básico de controladores

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

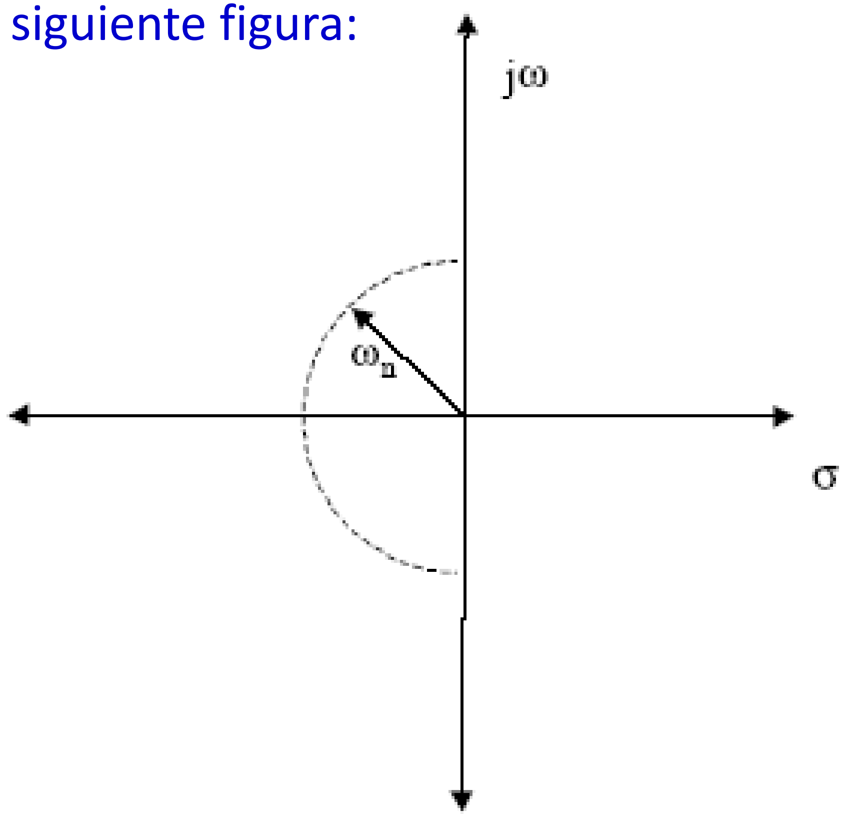
La planta de primer orden es muy común, especialmente en máquinas eléctricas. En las siguientes secciones se estudiarán controladores para cumplir con las siguientes especificaciones a lazo cerrado:

- Cero error a estado estacionario para una entrada escalón.
- Frecuencia natural.
- Coeficiente de amortiguamiento.

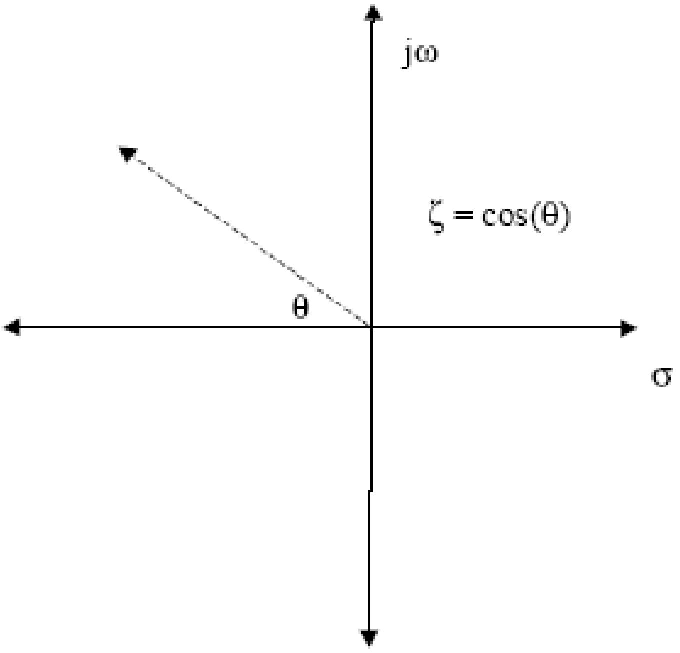
Antes de estudiar cualquier controlador se puede obtener la siguiente información, considerando las especificaciones del sistema:

1) El sistema a lazo abierto debe tener un polo en el origen. Sin este polo no es posible obtener cero error a estado estacionario con entrada escalón.

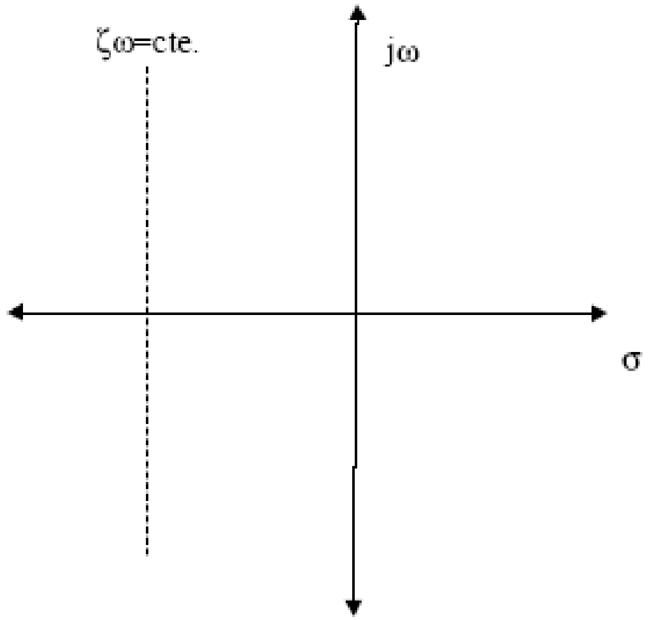
2) Todas las combinaciones posibles de polos a lazo cerrado, que entregan una frecuencia natural ωn forman un semicírculo de radio ωn. Esto se muestra en la siguiente figura:



3) Todas las combinaciones posibles, de polos a lazo cerrado, que entregan un coeficiente de amortiguamiento ζ forman una línea recta. Esto se muestra en la siguiente figura:



4) Todos los polos de lazo cerrado que entregan una respuesta con similar tiempo de establecimiento forman una línea recta perpendicular con el eje real.



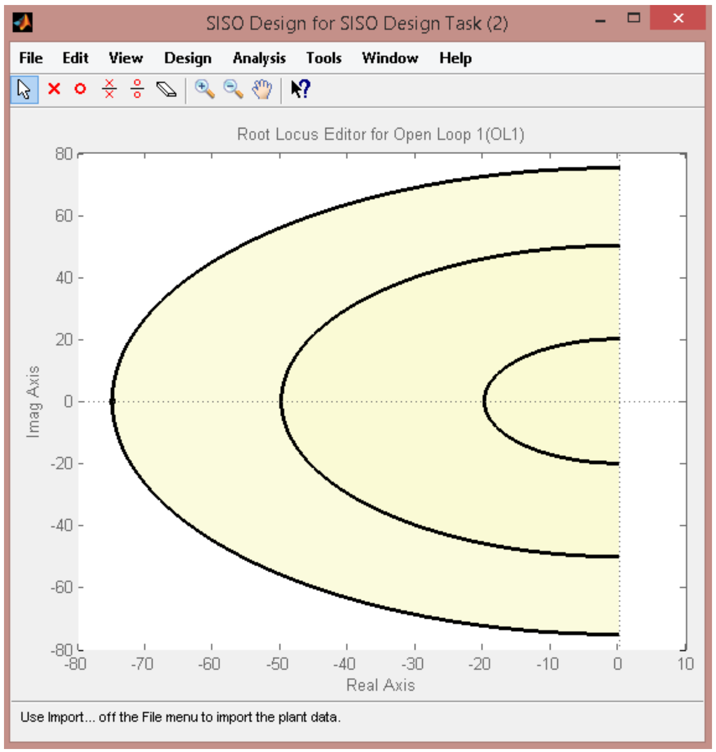
Resumen:

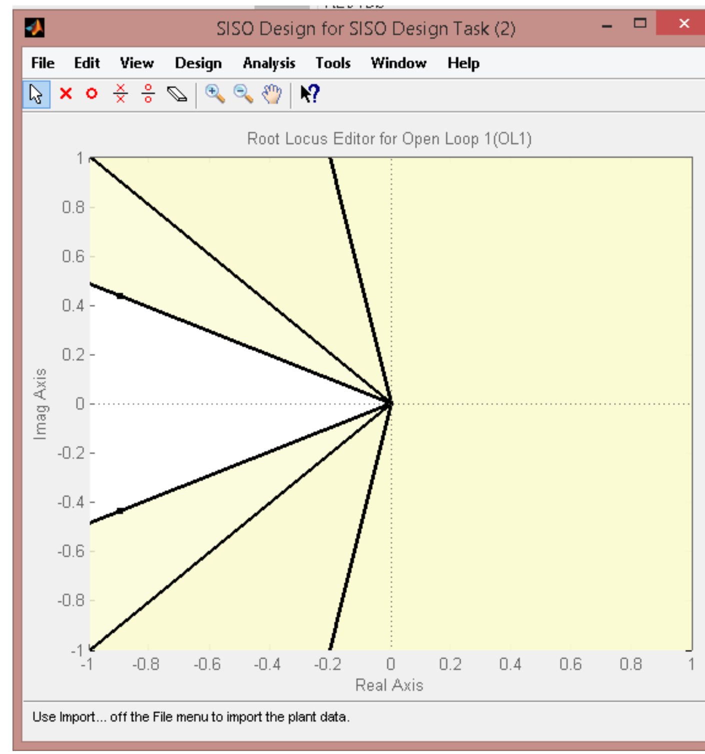
- El controlador debe cumplir con las especificaciones a lazo cerrado.
- El sistema a lazo abierto debe tener un polo en el origen. Sin este polo no es posible obtener cero error a estado estacionario con entrada escalón.
- El controlador debe ser simple. Las soluciones complicadas pueden ser difíciles de implementar. Recuerde, en ingeniería las soluciones simples son las que funcionan.

Respuesta en régimen permanente → Error en Estado Estacionario (EEE).

Respuesta Dinámica → coeficiente de amortiguamiento, velocidad natural, etc

Diseño Básico de Controladores





Todas las combinaciones posibles de polos a lazo cerrado, que entregan una frecuencia natural ωn forman un semicírculo de radio ωn.

Todas las combinaciones posibles, de polos a lazo cerrado, que entregan un coeficiente de amortiguamiento ζ forman una línea recta.

Agenda

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- Fundamentos del Lugar de la Raíz
- Diseño Básico de Controladores
- **Uso de RLTool en Matlab**
- Controladores PID

Uso de RLTool en Matlab

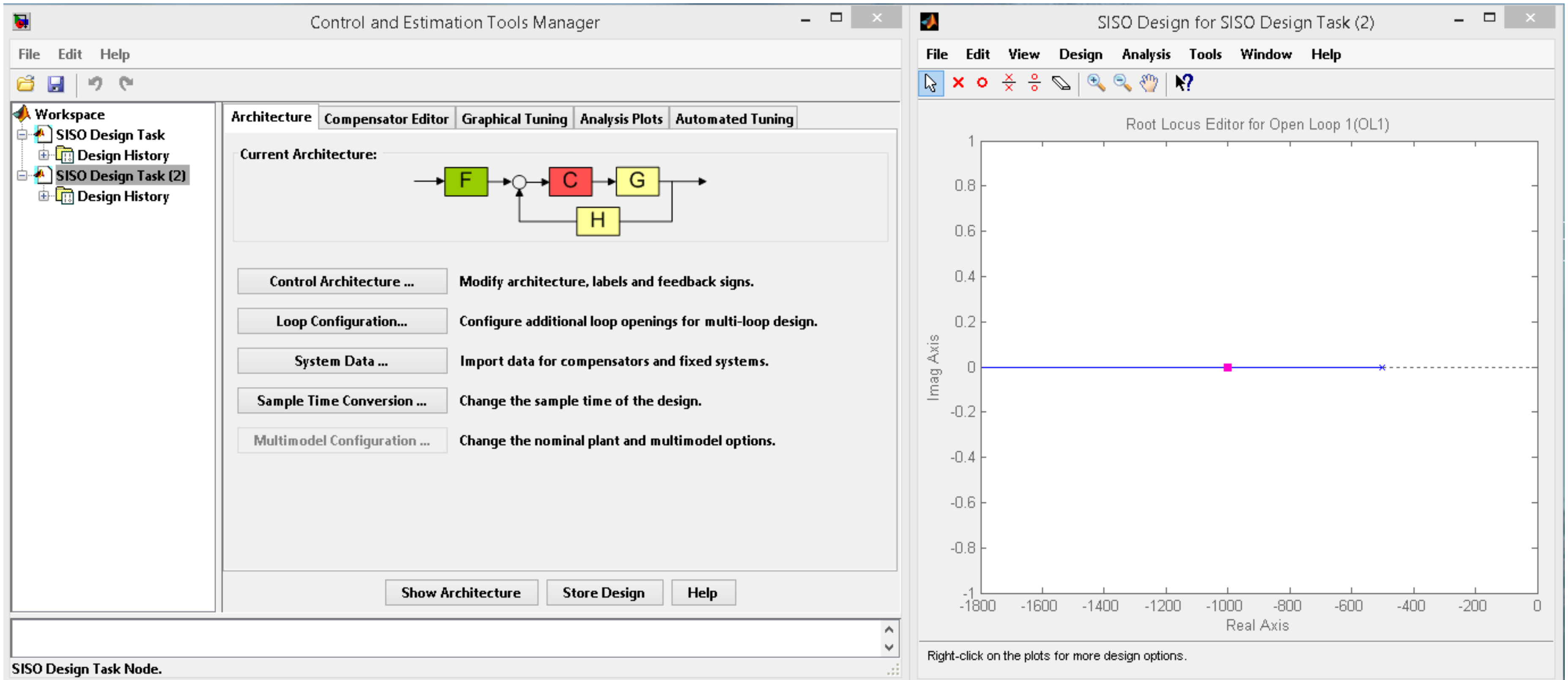
Definición de Planta en Matlab

Command Window

```
>> num=[1]

num =

     1

>> den=[2e-3  1]

den =

                    0.002                        1

>> s1=tf(num,den)

s1 =

       1
  -----------
  0.002 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> rltool(s1)
>> rltool(
```

Uso de RLTool en Matlab

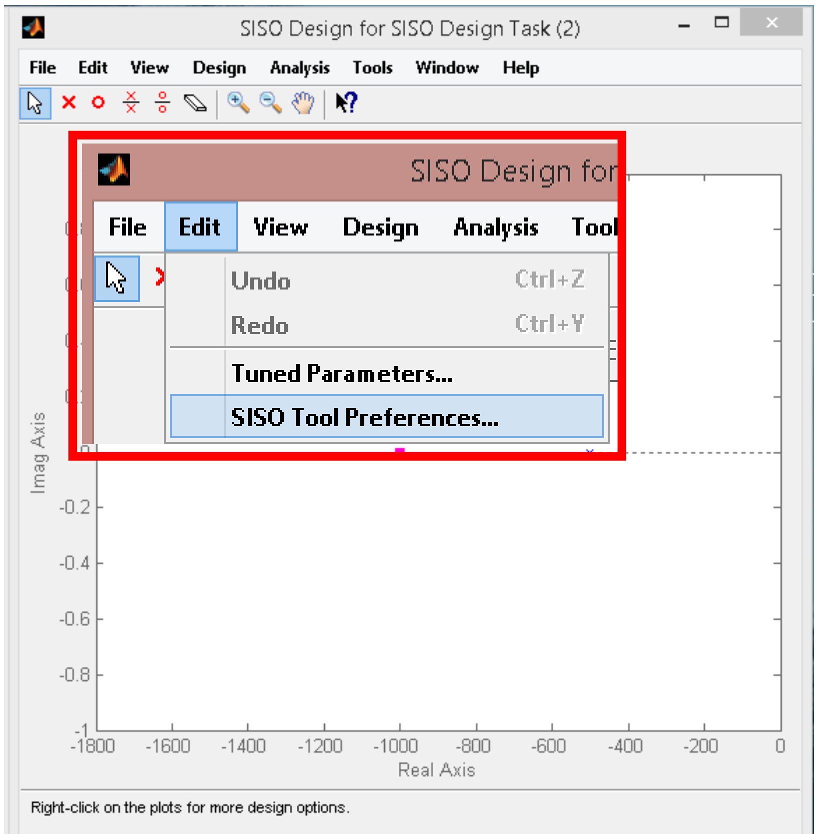
Entorno “RLTool”

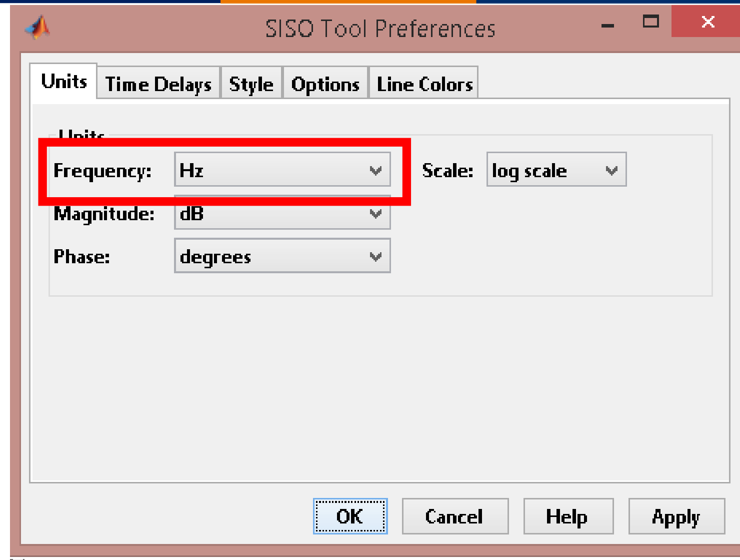


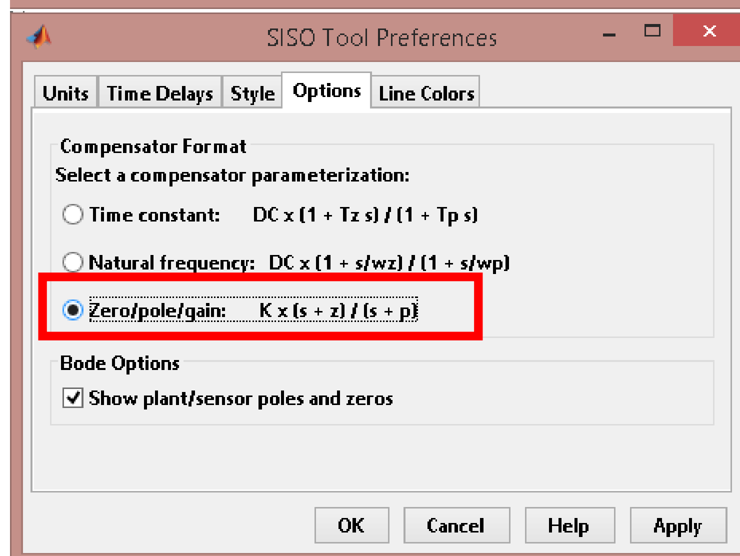
Uso de RLTool en Matlab

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Configuraciones

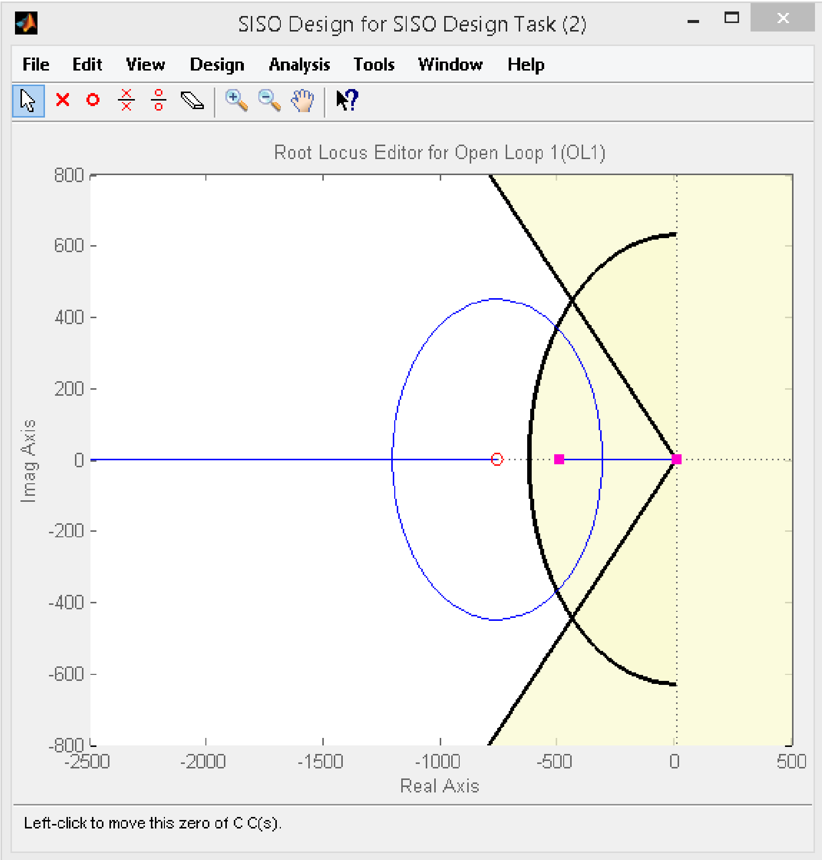






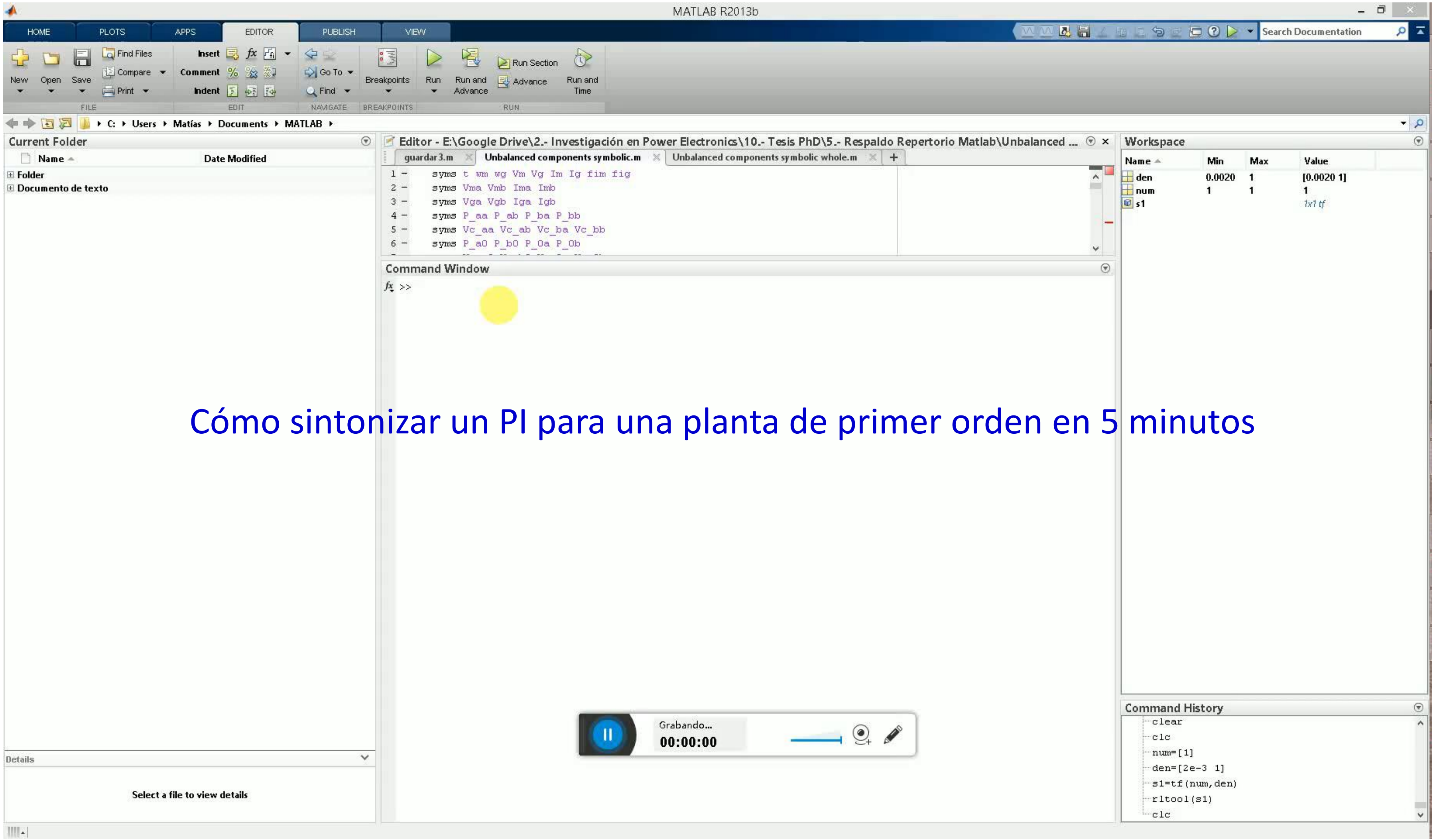
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Aplicando configuraciones de control



Uso de RLTool en Matlab

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



Cómo sintonizar un PI para una planta de primer orden en 5 minutos

Agenda

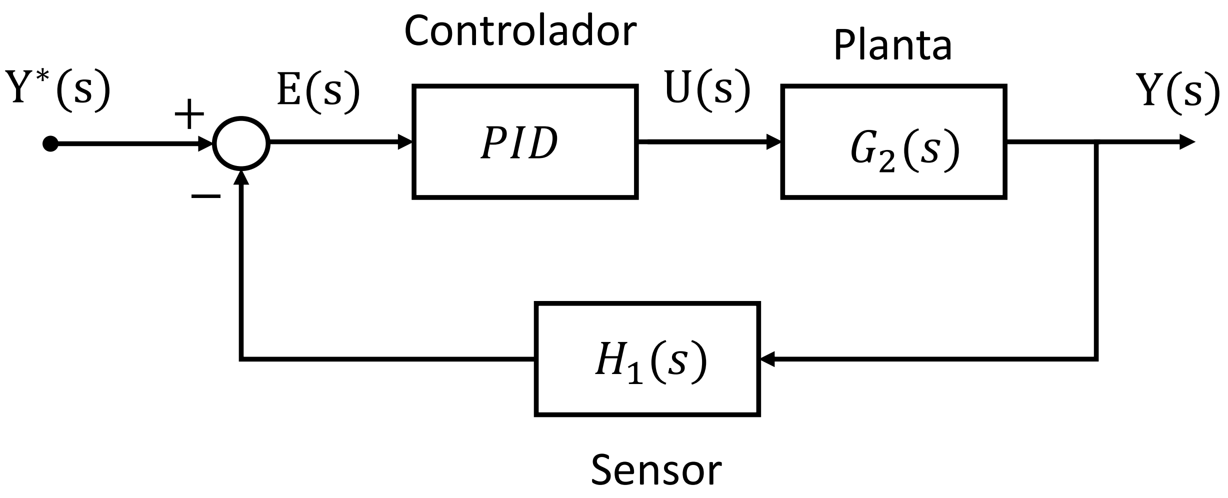
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

- Solución Prueba 1
- Errores en Estado Estacionario de un sistema de control
- Fundamentos del Lugar de la Raíz
- Diseño Básico de Controladores
- Uso de RLTool en Matlab
- **Controladores PID**

Controladores PID

Los controladores más utilizados en aplicaciones industriales son los controladores Proporcionales, Integrales y Derivativos (PID). La ecuación en el dominio de Laplace es:

$$U(s) = [k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s]E(s)$$



Controladores PID

Acción proporcional

La acción proporcional multiplica el error por una “ganancia”.

Acción integral

La acción integral da una respuesta proporcional a la integral del error. Esta acción elimina el error en régimen estacionario. Por contra, se obtiene una respuesta más lenta y oscilatoria.

Acción derivativa

La acción derivativa da una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error). Añadiendo esta acción de control a las anteriores se disminuye el exceso de sobreoscilaciones.

Controladores PID

$$u(s) = K_p e(s)$$

Controlador P

$$u(s) = K_p e(s) + \frac{1}{T_i s} e(s)$$

Controlador PI

$$u(s) = \left(K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) e(s)$$

Controlador PID

Fundamentos del lugar de la raíz

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Ejemplo en Matlab