

Laboratorio 6: Control mediante compensadores de la posición de una masa.

Galvis, David. López, Daniel.

{u1802584,u1802530}@unimilitar.edu.co

Universidad Militar Nueva Granada

Resumen--- En esta práctica de laboratorio se diseña un compensador con el fin de controlar la posición de una masa ante ciertos parámetros de diseño de control, la masa se encuentra en un sistema polipasto el cual la fuerza la ejerce un motor. Los compensadores permiten realizar el control de un sistema a través del análisis en frecuencia, margen de ganancia, fase , asignación de polos y ceros, totalmente distinto al PID donde el control se realiza partiendo desde el tiempo.

Abstract--- In this laboratory practice a compensator is designed in order to control the position of a mass before certain parameters of control design, the mass is in a system hoist which the force exerts on a motor. The compensators allow the control of a system through the analysis in frequency, gain margin, phase, poles and zeros assignment, totally different to the PID where the control is made starting from the time.

Palabras clave--- Compensador , atraso , margen de ganancia, margen de fase, lugar geométrico de las raíces

Objetivo General--- Implementar un control de posición de una masa, basado en técnicas de compensadores.

Objetivos específicos--

* Graficar el diagrama de Bode de las funciones de transferencia.

* Identificar las ganancias y fases que debe tener un sistema para cumplir el diseño deseado

del control.

* Diseñar reguladores desde el dominio de la frecuencia - Compensadores.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversos métodos para controlar un sistema, uno de ellos es basado en la respuesta en frecuencia del sistema y compensación de fase o ganancia, para cumplir los requerimientos de diseño (redes de adelanto y/o atraso + combinación de ellas). Esto se realiza mediante el análisis del margen de ganancia y de fase del sistema implementando ciertos parámetros que se explicarán más adelante.

Marco teórico:

Tanto el margen de fase como el de ganancia se obtienen de los diagramas de Bode del sistema, donde el margen de fase se define como el ángulo faltante para que en la frecuencia donde se da una ganancia de 0 dB se dé una fase de -180° , y el margen de ganancia es la ganancia faltante para que en la frecuencia donde se da una fase de -180° se den 0 dB. Los métodos usados en el diseño de compensadores, se basan en adicionar fase o ganancia para cumplir los objetivos deseados. Generalmente para la determinación de lo que se debe compensar, se tiene como requisito cumplir error de posición, velocidad o aceleración, y/o respuesta temporal, reflejada a través del ancho de banda y pico de resonancia del sistema controlado, que, a su vez, se puede relacionar con el margen de fase.

Una manera de escribir la ecuación del

compensador es $H_c = K Ts + 1 \alpha Ts + 1$, donde K es la ganancia o atenuación que aporta el compensador, T determina la posición del polo o cero (relaciona la frecuencia de corte) y α es un factor que multiplica el coeficiente que acompaña el término s , encargado de fijar el compensador en configuración de atraso ($0 < \alpha < 1$) o de adelanto ($\alpha > 1$). Para el diseño, la literatura presenta diversas maneras de afrontar el procedimiento. Ver [1][2][3][4].

2. MATERIALES

* Software: MATLAB ®

* Bata blanca.

* Planta (Motor DC, Soporte, poleas, cuerda, masa, potenciómetro lineal).

* Circuito del compensador (resistencias, protoboard y jumpers , condensadores y trimers, amplificadores operacionales).

3. PROCEDIMIENTO

Solución del **cuestionario**:

* **¿Cómo es el diseño de reguladores por compensadores (redes de atraso, adelanto y combinación de ellas)? Ilustre con ejemplos.**

* Se debe tener presente que el compensador modifica solo la respuesta transitoria, no el error de estado estable (ess) y si se quiere modificar este, se debe asegurar antes de realizar el siguiente paso implementando integradores a la planta, y sobre este conjunto se trabaja..

* Determinar la ganancia K que asegure el error de posición, velocidad o aceleración.

* Integrando la ganancia calculada a la función de transferencia del sistema, se traza el diagrama de Bode y se determina el margen de fase y ganancia, de modo que se identifique lo que le falta para cumplir los márgenes solicitados por el diseño.

Adelanto: se calcula el ángulo de fase necesario $\phi_{faltante} = \phi_{deseado} - \phi_{hallado}$

de la gráfica.

Atraso: se evalúa el ángulo faltante $\phi_{faltante} = -180 + \phi_{hallado}$ de la gráfica, y en la frecuencia donde sucede - ω a encontrar, se determina la magnitud $|H(j\omega)|$.

* Ahora para ver donde se ubicará el polo o cero del compensador:

Adelanto: se determina el factor de atenuación α ($K = Kc\alpha$), de $\sin(\phi_{faltante}) = 1 - \alpha / 1 + \alpha$. Luego se encuentra la frecuencia (ω), donde el gráfico de ganancia tiene el valor $|H(j\omega)| = -20\log 1 / \sqrt{\alpha}$. La frecuencia que se halle es $\omega = 1 / T\sqrt{\alpha}$.

Atraso: se determina el factor de atenuación α ($K = Kc\alpha$), de $|H(j\omega)| = 20\log (\alpha)$. Ahora, se halla el valor de T , tal que, ωa encontrar $10 \leq \omega cero \leq \omega a$ encontrar 2 , y $\omega polo = \omega cero \alpha$.

* Se ajusta la ganancia del compensador Kc *($s+1/T / s+1/\alpha T$), y se verifica si se cumple con lo requerido por el diseño. Si no se cumple, se debe realizar desde el punto 2 nuevamente los cálculos, ajustando coeficientes que se crean hasta cumplir con los objetivos de diseño.

EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN COMPENSADOR EN ADELANTO.

Diseñe un compensador para que el sistema con

$$GH(s) = \frac{4}{s(0.5 \cdot s + 1)(0.02 \cdot s + 1)}$$

cumpla con las siguientes especificaciones:

- $K_v \geq 40 \text{ seg}^{-1}$,

- $MF \geq 45^\circ$,

- MG tal que $W \geq 15 \text{ rad/seg}$. (W es la frecuencia que corresponde a una magnitud de -3 db en el diagrama de Bode de lazo abierto).

PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN:

a) Determine la ganancia necesaria para cumplir el requisito de coeficiente de error.

$Kc' = 10$ para que $K_v = 40 \Rightarrow$

$$K_c' \cdot GH(s) = \frac{40}{s(0.5 \cdot s + 1)(0.02 \cdot s + 1)}$$

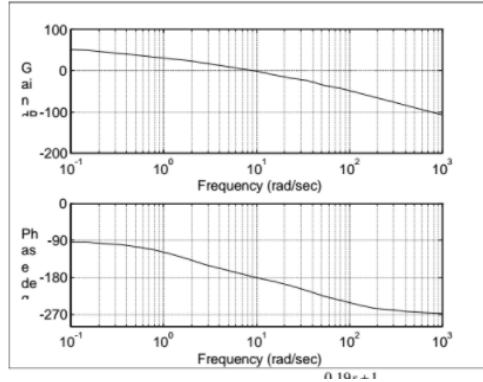
b) Trace el diagrama de Bode del sistema de lazo abierto, con la ganancia hallada en (a), y encuentre los actuales MF, MG, y W.

$$(MF \approx 5^\circ, W \approx 10 \text{ rad/seg.})$$

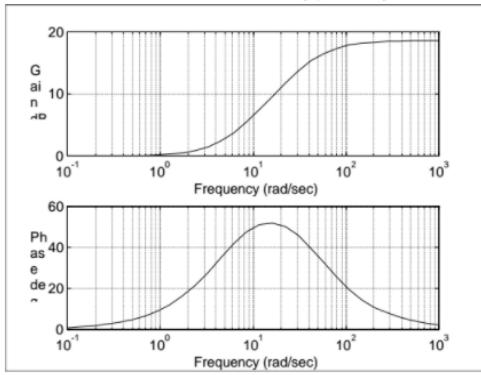
c) Determine el adelanto de fase necesario que debe ser agregado al sistema:

$$\phi = (45^\circ \cdot 5^\circ) + 12^\circ = 52^\circ$$

Sistema sin Compensar con $K=40$ $G(s) = \frac{40}{s(0.5s+1)(0.02s+1)}$



Bode del compensador en adelanto diseñado: $G(s) = \frac{0.19s+1}{(0.02242s+1)}$



d) Halle α , sabiendo que: $\text{sen } \phi = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \Rightarrow \alpha = 0.118$

e) Determine la frecuencia a la cual el sistema no compensado tiene una magnitud igual a $-20 \log\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}}\right) = 10 \log \alpha = -9.28 \text{ db}$; esta frecuencia es $W=15 \text{ rad/seg}$.

Fije esta W , que es la frecuencia media W_m del compensador, como la nueva frecuencia de transición de la ganancia, (en esta frecuencia se produce precisamente el ϕ_m que aporta el compensador).

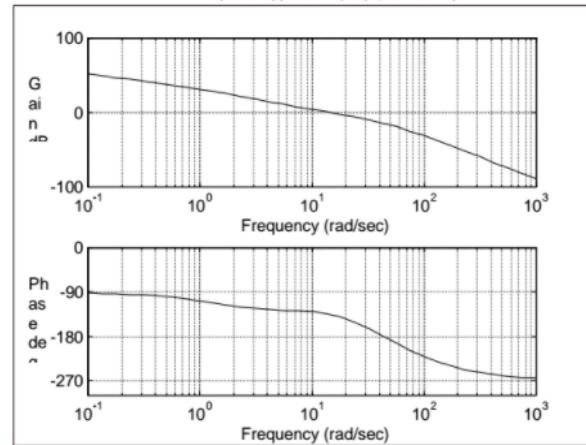
f) Determine el cero y el polo de la red de adelanto como se muestra ya que:

$$W_m = -15 = \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha} \cdot T}\right) \Rightarrow T = 0.19 \Rightarrow \frac{1}{T} = 5.15 \text{ rad / seg} \quad y \quad \frac{1}{\alpha \cdot T} = 43.66 \text{ rad / seg}$$

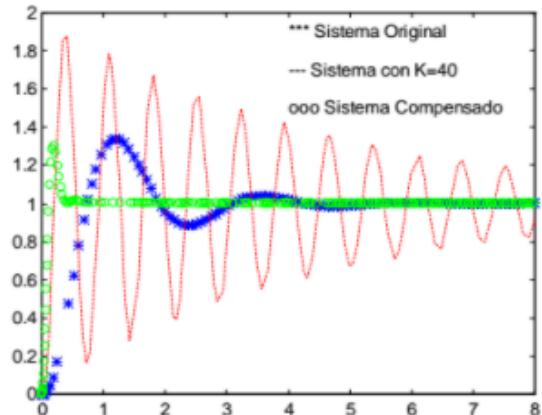
g) Determine la "ganancia" de la red de adelanto: $K_c = K_c/\alpha = 10/0.118 = 84.75$.

h) Compruebe en el diagrama de Bode del sistema compensado, que se cumplan las especificaciones requeridas ($MF \approx 45^\circ$; $W \approx 20 \text{ rad/seg}$).

Sistema Compensado $G(s) = \frac{40}{s(0.5s+1)(0.02s+1)} * \frac{0.19s+1}{(0.02242s+1)}$



Compensador en adelanto Respuesta transitoria ante una entrada escalón unitaria



EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN COMPENSADOR EN ATRASO.

Un sistema tiene la siguiente función de transferencia de lazo abierto:

$$GH(s) = \frac{2}{(1 + 0.25 \cdot s)(1 + 0.1 \cdot s)s}$$

Diseñar un compensador en atraso tal que el sistema tenga:

.- $K_v \geq 4 \text{ seg}^{-1}$.

.- $MF \geq 40^\circ$

.- $MG \geq 12 \text{ db}$.

PROCEDIMIENTO DE RESOLUCION:

- a) Determinar la ganancia de lazo abierto tal que se satisfaga el requerimiento de coeficiente de error:

$$K_v \text{ (actual)} = 2 \Rightarrow K=2K_v=4 \Rightarrow K_c \cdot GH(s) = \frac{4}{(1+0.25 \cdot s)(1+0.1 \cdot s)}$$

- b) Con la ganancia así determinada, trazar el diagrama de Bode (de lazo abierto) del sistema no compensado, y determinar MF y MG. Si son insuficientes, proceder con los otros pasos.

(Condiciones actuales del sistema: MG ≈ 7db ; MF ≈ 24°)

- c) Hallar el valor de la frecuencia que corresponde a un margen de fase igual al margen de fase requerido más un agregado entre 5 y 12° (que se añaden para compensar el retardo de fase que produce la red de atraso). Se elige esta frecuencia como la nueva frecuencia de transición de la ganancia: W_T'
 $\Rightarrow W_T'$ (corresponde a MF= 40°+5°=45°=2.4rad/seg.)

- d) Se elige $1/T$ una década por debajo de $W_T' \Rightarrow 1/T=0.24\text{rad/seg}$. (para asegurar T suficientemente grande y que la curva de fases no se vea afectada en la zona de transición de la ganancia).

- e) Determinar la atenuación necesaria para reducir la curva de amplitud a 0 db en W_T' , atenuación que corresponde a $-20 \log \alpha$.

En el diagrama de bode: W_T' corresponde a 4.2db $\Rightarrow -20 \log \alpha = -4.2\text{db}$.

$$\Rightarrow \alpha = 1.62 \Rightarrow 1/\alpha \cdot T = 0.15\text{rad/seg.}$$

(Este último punto: el polo de la red de atraso, también puede determinarse como el punto de corte en la recta de 0 db, de una línea recta de pendiente -20db/dec que parte del punto correspondiente al cero de la red, en la atenuación deseada).

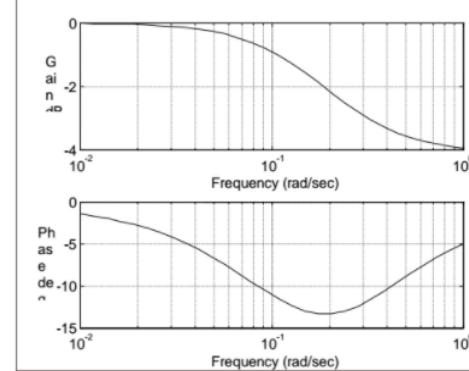
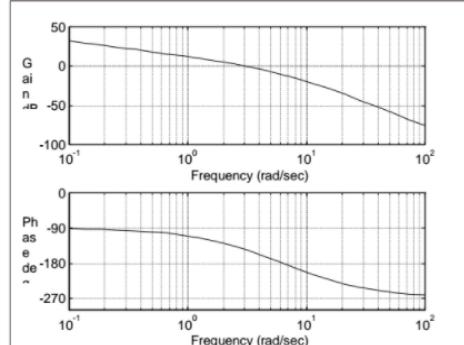
- f) Finalmente, se obtiene el diagrama de Bode del sistema compensado, y se comprueban las especificaciones.

(MF ≈ 43°; MG ≈ 13db).

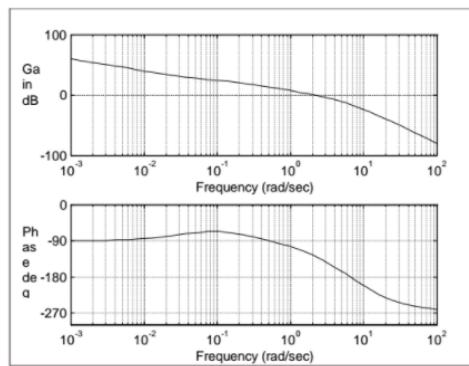
Función de transferencia del sistema compensado:

$$G_c \cdot GH(s) = \frac{1}{1.62} \frac{s+0.24}{s+0.15} \frac{4}{(1+0.25 \cdot s)(1+0.1 \cdot s)}$$

$$\text{Sistema sin Compensar : } G(s) = \frac{4}{s(0.25s+1)(0.1s+1)}$$

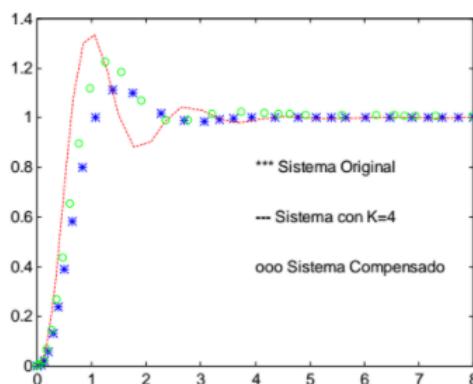


$$\text{Sistema Compensado: } G(s) = \frac{4}{s(0.25s+1)(0.1s+1)} * \frac{1}{1.62} * \frac{s+0.24}{(s+0.15)}$$



Compensador en atraso

Respuesta transitoria ante una entrada escalón unitaria



EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN COMPENSADOR EN ADELANTO-ATRASO.

Un sistema tiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K}{s(1+0.25 \cdot s)(1+0.1 \cdot s)}$$

Se quiere que el sistema de lazo cerrado con retroalimentación unitaria tenga:

1.- Coeficiente de error de velocidad: $K_v = 15$.

2.- MF $\geq 50^\circ$.

3.- MG $\geq 10 \text{ db}$.

Del requisito de coeficiente de velocidad

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{(1+0.25 \cdot s)(1+0.1 \cdot s)} = 15$$

Se dibuja el diagrama de Bode del sistema.

Margen de fase = -15°.

Margen de ganancia = -6db.

El próximo paso en el diseño de un compensador Adelanto-Atraso es la elección de la nueva frecuencia de transición de ganancia.

De la curva de ángulo de fase de $G(j\omega)$ vemos que $\angle G(j\omega) \approx -180^\circ$ es en $\omega_c = 6\text{rad/seg}$.

Es conveniente elegir la nueva frecuencia de transición en 6rad/seg para que el ángulo de fase requerido en $W = 6\text{rad/seg}$ sea más o menos 50°.

* ¿Cómo se puede relacionar el margen de ganancia M_g y margen de fase M_ϕ con los coeficientes temporales (t_s y ξ) propios de una respuesta de un sistema de segundo orden?

Margen de Fase: Sabemos que a mayor coeficiente de amortiguamiento mayor margen de fase ($MF \propto \xi$). Por otro lado, sabemos que la sobreelongación máxima está inversamente relacionada con el coeficiente de amortiguamiento, por lo que $MF \propto 1/M_p$.

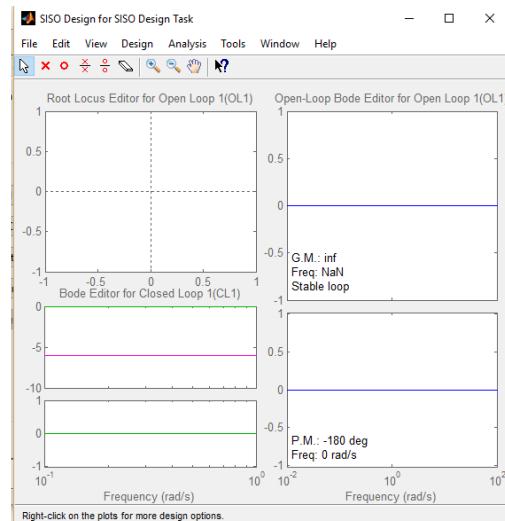
Margen de Ganancia: Si incrementamos el Margen de Ganancia, el sistema será más lento, pues estamos reduciendo la ganancia del sistema en lazo cerrado. Por lo tanto el tiempo de subida es directamente proporcional al Margen de Ganancia ($MG \propto t_r$).

* ¿Para qué sirven las herramientas sisotool, rltool , ident ? Ilustrar con ejemplos:

sisotool:

Esta herramienta permite diseñar controladores para sistemas realimentados ya modelados en Matlab o en Simulink, de única entrada y única salida, como sus siglas en inglés SISO que viene de Single-Input, Single-Output.

Se pueden diseñar controladores utilizando el diagrama de Bode, lugar de las raíces, y método gráfico de Nichols para añadir o eliminar polos, ceros y ganancias. Además de PID automatizado, análisis de control tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.



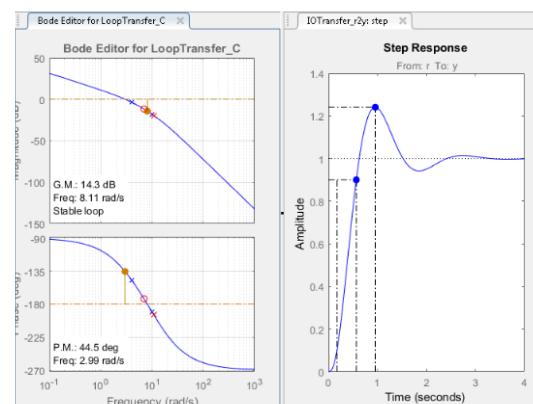
Un ejemplo del uso de esta herramienta es que para una función de transferencia (como en este caso, la de un motor DC).

$$G = \frac{1.5}{s^2 + 14s + 40.02}$$

Esta es la función de transferencia de la planta y esta se le quiere realizar un control que cumpla los siguientes requerimientos.

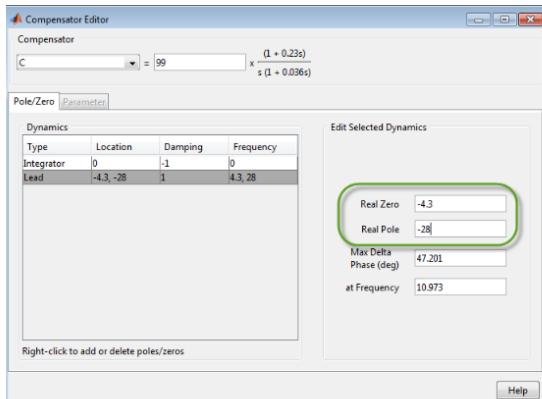
- Rise time of less than 0.5 seconds
- Steady-state error of less than 5%
- Overshoot of less than 10%
- Gain margin greater than 20 dB
- Phase margin greater than 40 degrees

Teniendo la respuesta del sistema en frecuencia y luego añadiendo los parámetros, se hace el respectivo ajuste de magnitud y fase.

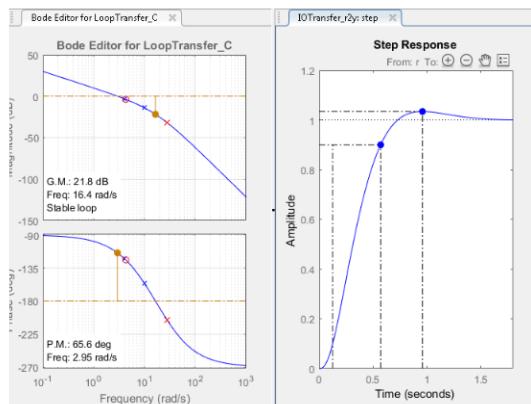


Luego el software indica donde deberán estar ubicados el polo y el cero para que se cumplan

los parámetros de diseño. Siendo esto para el caso donde se quiere realizar un control por compensadores de adelanto o atraso de fase.

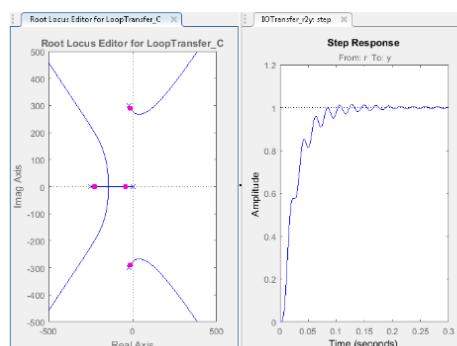


Hasta que finalmente, añadiendo el compensador se llega al control esperado.

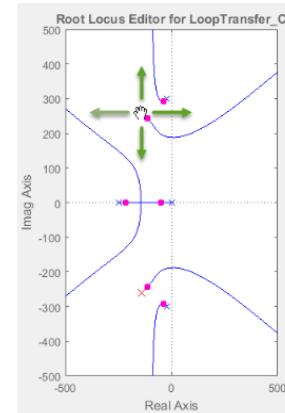


rltool:

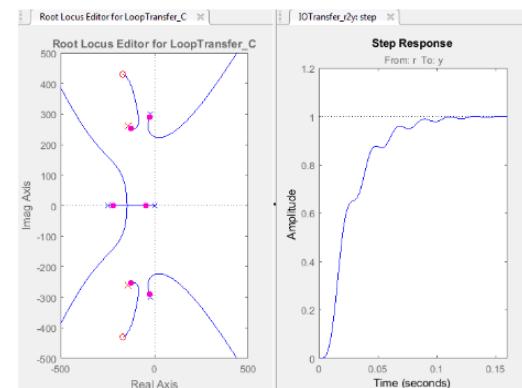
Esta herramienta permite el diseño de control por el lugar de las raíces, una técnica básica de control donde se diseña la ganancia de un compensador, y la ubicación de los polos y los zeros partiendo desde el diagrama del lugar de las raíces.



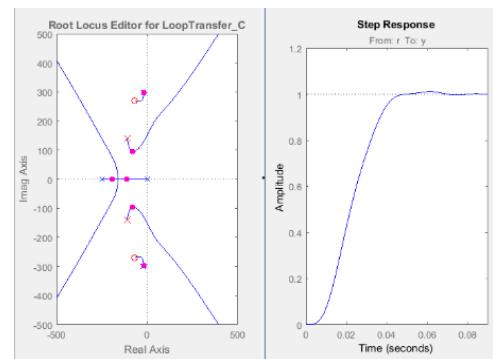
El diagrama muestra primero la respuesta del sistema original y sin control, con sus respectivos polos y ceros ubicados en el lugar de las raíces.



Y que permite también desplazar en el plano, e ir observando el cambio que esta acción realiza en la respuesta del sistema.

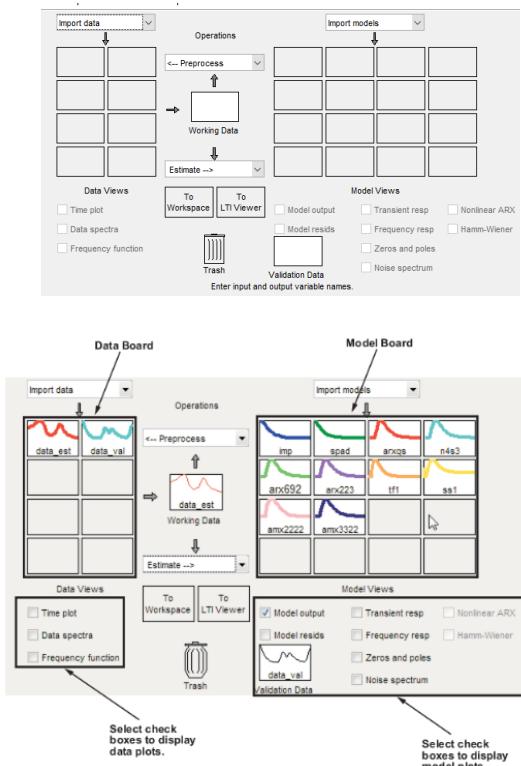


Y poder pasar de una respuesta muy oscilatoria, a una respuesta común de un sistema controlado y que cumple los parámetros establecidos en el diseño.



ident:

La herramienta ident de Matlab permite obtener información e identificar diferentes sistemas reales mediante su respuesta, con la respuesta del sistema se pueden conocer los parámetros que lo caracterizan y hasta la función de transferencia del mismo.

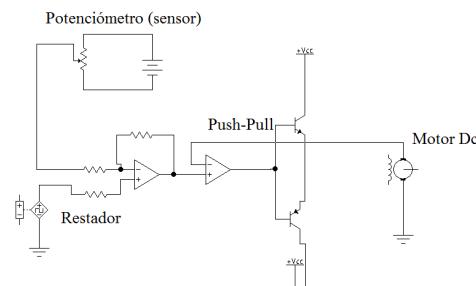


Por ejemplo, se puede hallar la función de transferencia de un sistema a través de la respuesta obtenida del osciloscopio, por ejemplo para el

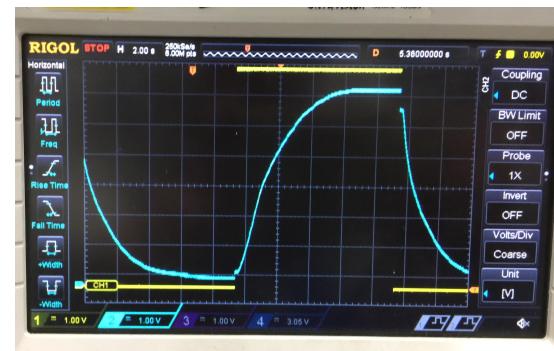
caso en el que tenemos los valores en excel de tiempo y nivel de una señal del osciloscopio, que al ingresar en el ident se puede obtener su función de transferencia, orden y tipo, y otros parámetros como los son tiempo de subida, Wn , tiempo de establecimiento entre otros.

Práctica

Se tiene entonces la gráfica de la planta realimentada con el sensor (potenciómetro) :



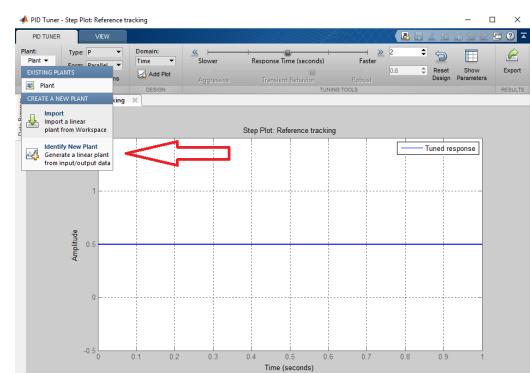
Circuito de la planta con la realimentación



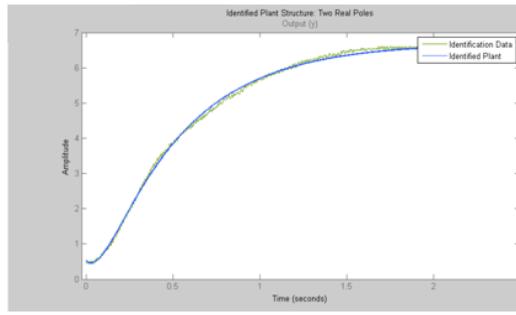
Respuesta en lazo cerrado del sistema

Se procede a copiar los valores mostrados en el osciloscopio a una usb, para luego en Microsoft Excel, hacer los respectivos ajustes debido a que el osciloscopio solo tiene 1 columna de salida donde se separan los valores de los 2 canales con una coma. Se deben separar para el análisis en Matlab.

Luego se realiza la aproximación de la gráfica utilizando la opción “identify new plant” de la herramienta “pidtool” del software de matlab.



Teniendo la siguiente respuesta, que se asemeja a la presentada en el osciloscopio.



Y luego se obtiene la ecuación de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado:

$$\frac{0.9277}{s^2 + 13.15s + 23.15}$$

Ecuación 1

Pero esta función de transferencia es la de la planta realimentada con el sensor (potenciómetro), por lo tanto se debe deshacer esa realimentación, y se presenta más adelante en la ecuación 2.

Se tienen los siguientes criterios de diseño:

*Tiempo de establecimiento 85% del lazo abierto.

*Overshoot del 25%.

*Error en estado estables ess=0.

Con estos parámetros podemos conocer el polo deseado, con el que se diseñará el compensador. El polo debe ser de segundo orden para poder controlar el máximo sobre impulso (overshoot) y el tiempo de establecimiento.

Entonces primero se debe conocer el coeficiente de amortiguamiento ξ , entonces cómo debe ser del 25% y utilizando la siguiente ecuación.

$$M_p = e^{-\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)\pi}$$

Donde M_p es 0.25 para que sea 25%, y despejando ξ el valor que queda es:

$$\xi = 0.404$$

Ya teniendo el coeficiente de amortiguamiento se halla ahora el tiempo de establecimiento, que es del 85% y son 1,6745s y usando el criterio del 5%.

$$5\% \Rightarrow \frac{3}{\xi W_n} = 1,67s$$

Y luego, despejando W_n , la frecuencia natural tiene un valor de 4.446rad/s.

Entonces ya se tiene el polinomio deseado que es:

$$s^2 + (2 * 0.404 * 4.446)s + 4.446^2$$

Y factorizando, queda el polo deseado de la siguiente manera:

$$s = -1.795 + 4.06i$$

Con lo cual se debe reemplazar en la función de transferencia de la planta.

Características de la función de transferencia de la planta:

$$\frac{0.9277}{s^2 + 13.16s + 22.22}$$

Ecuación 2

De la ecuación 2, se puede simplificar el denominador factorizando los términos, quedando de la siguiente manera:

$$\frac{0.9277}{(s+11.5)(s+2)}$$

Y ahora reemplazando el polo:

$$\frac{0.9277}{(-1.795+4.06i+11.5)(-1.795+4.06i+2)}$$

$$\frac{0.9277}{(9.355+4.06i)(0.205+4.06i)}$$

$$\frac{0.9277}{(M1<23.46^\circ)(M2<87.1^\circ)}$$

$$\frac{0.9277}{M1M2<110.57^\circ}$$

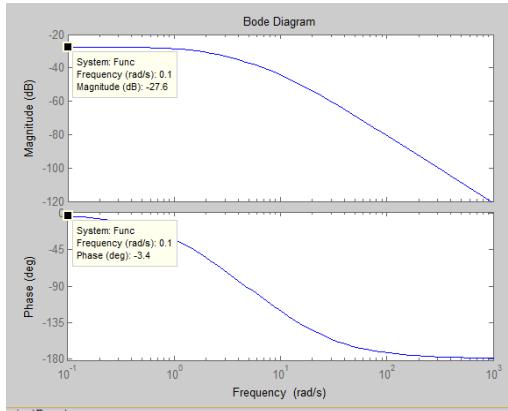
$$\frac{0.9277<-110.57^\circ}{M1M2}$$

$$\varphi = -180 - (-110.57) = -70^\circ$$

Debido a que el ángulo resultó de -70° se debe añadir un compensador de atraso.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Primero se realiza un análisis del diagrama de Bode de la función de transferencia de la planta.



Se observa del diagrama anterior de Bode que el sistema es inestable debido a que el margen de ganancia nunca llega a ser positivo, y se observa en la gráfica de la ganancia que nunca pasa por cero,

```
>> [mag,phase,w] = bode (Func, 4)

mag =
0.0175

phase =
-82.2436

w =
4
```

Para volver el sistema estable primero se le añade la ganancia que falta, que se puede hallar con la siguiente ecuación.

$$20 * \log(mag) = dB$$

Entonces, ya que mag es 0.0175, se reemplaza en la ecuación anterior.

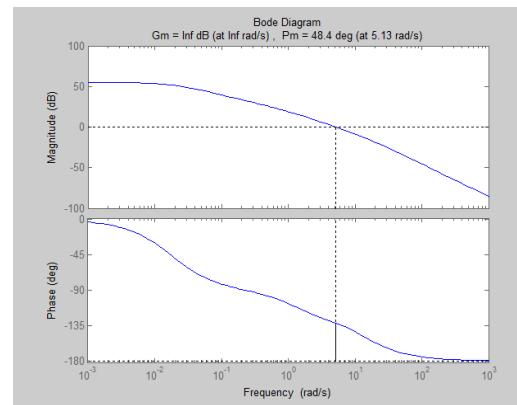
$$20 * \log(0.0175) = -35dB$$

Significa que se deben añadir 35dB para que el

sistema sea estable, se pueden añadir mediante una ganancia proporcional, esta ganancia se halla de la siguiente manera:

$$1/mag = 1/0.0175 = 57.14$$

La ganancia proporcional que se añade será de 57.14, y ahora el diagrama de Bode del sistema ante solo esta ganancia es:



Y se observa en el diagrama de Bode que el sistema es estable.

Ahora viene la asignación del polo y del cero.

Cuando la compensación es en atraso, primero se puede asignar un valor al zero que se encuentre en la región del lugar geométrico de las raíces, para este caso se asigna -4.06 como zero de

La ecuación del compensador es:

$$C(s) = 57.14 * \frac{s + 4.06}{s + 0.0175}$$

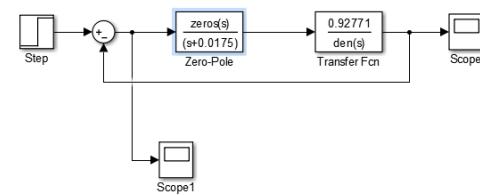
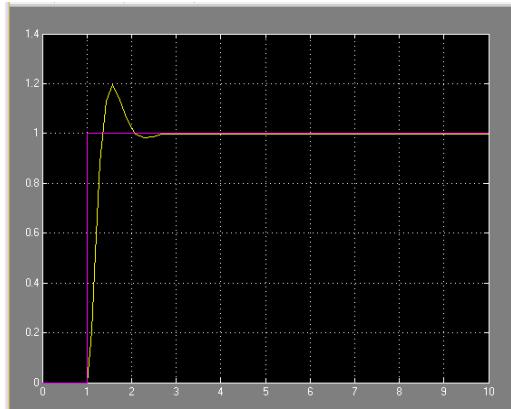
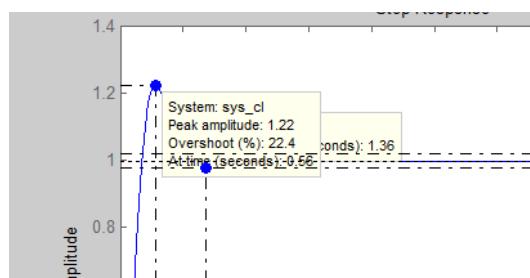
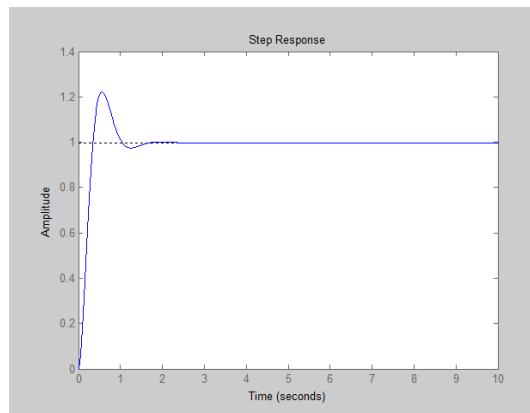


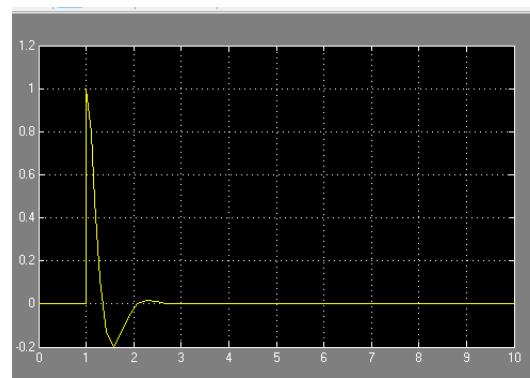
Diagrama de bloques del sistema.



Donde la señal de salida es la de color amarillo, y la entrada es la de color magenta.



Donde se observa un overshoot cercano al 25% pedido en la práctica

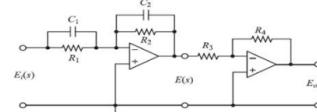


Y la señal de control del sistema, donde se observa que llega hasta la amplitud máxima que tiene el escalón.

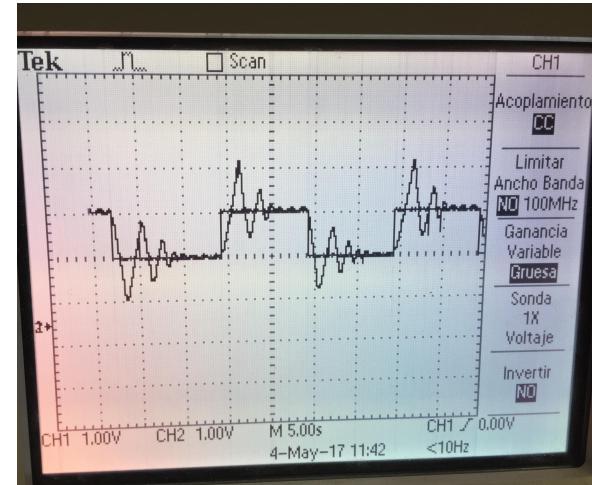
El circuito electrónico de un compensador se observa en la siguiente imagen con una breve descripción que lo presenta.

IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DE UN COMPENSADOR EN ADELANTO Ó ATRASO

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_2 C_2 s + 1} = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_2} \frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} = K_c \frac{\frac{T s + 1}{T}}{\frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{T}}} = K_c \frac{T s + 1}{s + \frac{1}{T}}$$



Circuito electrónico que consiste en una red de adelanto si $R_1 C_1 > R_2 C_2$
una red de atraso si $R_1 C_1 < R_2 C_2$



En la anterior imagen se observa la respuesta del sistema ante una entrada cuadrada con amplitud de 1Vpp, un offset de 2Vdc a una frecuencia de 50mHz. Se asegura el tiempo de establecimiento del 85% y además el overshoot menor a 25%.

Observación:

El sistema compensado cumple con los parámetros de tiempo de establecimiento y del overshoot, respecto al error en estado estable, al utilizar una ganancia del compensador muy grande este error tiende a ser aproximadamente cero, más no igual a cero, esto se da, debido a

que existe una pauta en el procedimiento que indica que antes de calcular cualquier variable, se asegura un error en estado estable igual a 0 implementando integradores a la planta, y a partir de este conjunto es que se analizan los diagramas de Bode y se realizan los cálculos.

5. CONCLUSIONES

*La regulación por compensadores, aunque un poco más extensa en sus cálculos, presenta una mayor simplicidad en su implementación física.

*Aunque se pueda asegurar un error en estado estable próximo a cero utilizando una ganancia del compensador muy grande (Posible inestabilidad), es mejor asegurar el error en estado estable antes de realizar el cálculo del compensador a partir del uso de integradores puros.

6. REFERENCIAS

- [1] C. Chen, Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, state-space and algebraic methods, Saunders College, 1993.
- [2] R. Dorf, Modern Control Systems: International version plus Matlab and Simulink student version 2011 aR, Pearson, 2011.
- [3] B. C. Kuo, Automatic control systems, Thomson, 2010.
- [4] K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall International, 2009.