Haider Santiago Calderon Rodriguez 20211005075

Ejemplo 9,3

Diseño de un compensador ideal derivativo

De acuerdo a la figura 9,17 encontrar un 16 % de overshoot y reducir el tiempo de establecimiento 3 veces.

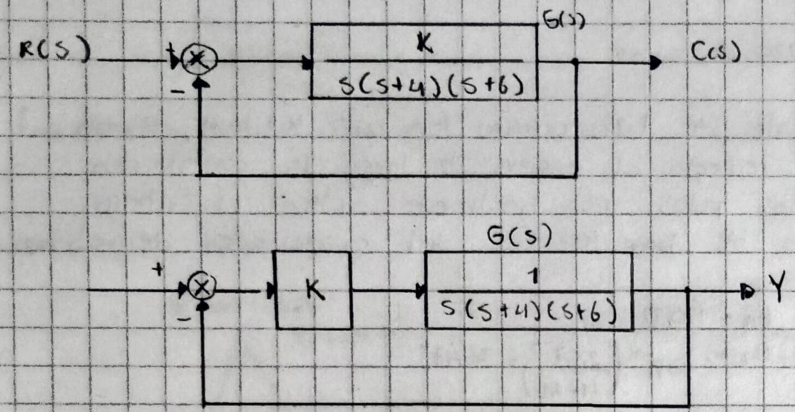


Fig 9,17

malla abierta $= \dfrac{1}{s^3 + 10s^2 + 24s}$ Polos de G(s) : 0, -4, -6

Para realizar el diseño debemos ver el mapa del lugar de las raices (usamos r-locus) y variamos K hasta que veamos que en la respuesta al escalon el overshoot es de 16%, en este caso esto se cumple cuando K es igual a 43,4, tambien observamos que el tiempo de establecimiento es de 3,47s.

$T_s = 3,47\ s$ (usando rlocus)

$T_s = \dfrac{4}{\zeta \omega_n} = \dfrac{4}{\sigma} = \dfrac{4}{1,2} = 3,32\ s$

} Son cercanos pero distintos

Como debemos reducir este tiempo 3 veces : $T_s = 1,11\ s$

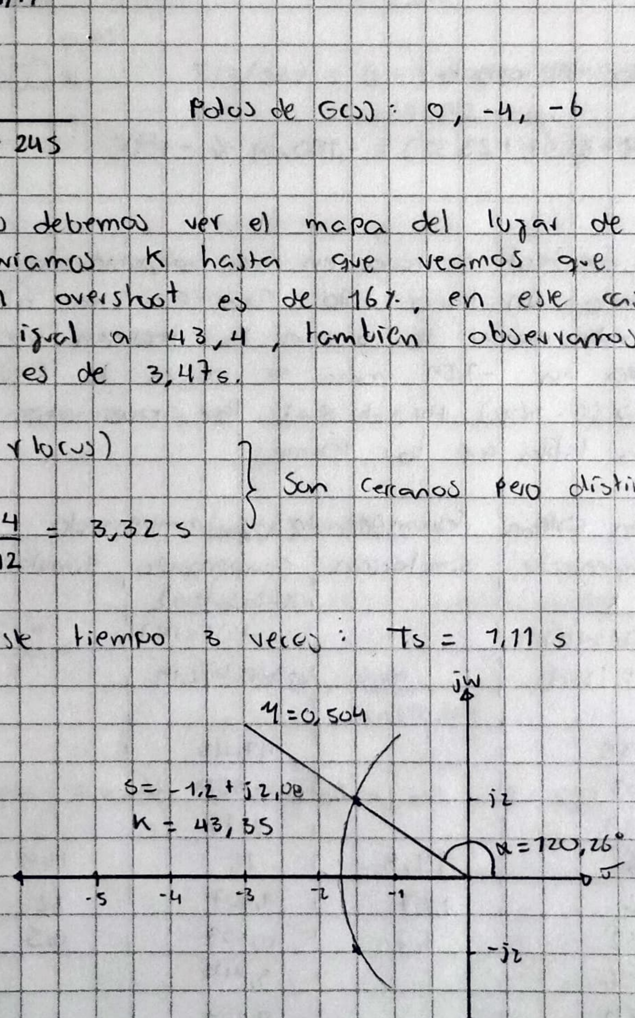


Fig 9,18

$s = \sigma + j\omega_d$

$\sigma = \zeta\omega_n$

$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

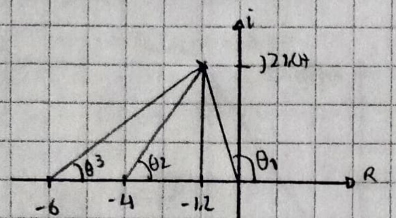
$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_d}{\sigma}\right)$

$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{2,06}{1,2}\right) = 54,77°$

$\zeta = \cos(\beta) \rightarrow \beta = \cos^{-1}(\zeta)$

$\alpha = 180° - \beta \rightarrow 180° - 54,77° = 120,22$

Ahora buscamos el polo dominante de lazo cerrado con un $K = 43,4$, seguido a ello hallaremos su angulo con respecto al origen y luego la contribucion angular desde cada uno de los polos, para finalmete aplicar el criterio del angulo y hallar la funcion de transferencia del compensador derivativo.



$\theta_1 = 120,22$

$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2,07}{4-1,2}\right) = 36,47°$

$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{2,07}{6-1,2}\right) = 23,32°$

Aplicando el criterio del angulo

$$\frac{\sum \angle Z}{\sum \angle P} = 0 - (120,22 + 36,47 + 23,32) = -180,01 \approx -180°$$

La evaluacion del overshoot se basa en una aproximacion de segundo orden, se verifica encontrando un tercer polo, como esta mas alla de -6, debe ahora encontrarse en un valor mayor de 6 veces la posicion de los polos dominantes. El polo se encuentra en $-7,59$ como se ve en la figura anterior y se cumple que $-7,59 > (6 \cdot 1,205)$ por lo cual la aproximacion es valida, a continuacion una tabla que lo resume:

Caracteristicas des un sistema descompensado y compensado

	Descompensado	simulacion	Compensado	Simulacion
• Planta y compensador	$\frac{K}{s(s+6)(s+4)}$		$\frac{K(s+3,006)}{s(s+6)(s+4)}$	
• Polos dominantes	$-1,205 \pm j2,07$		$-3,613 \pm j6,19$	
• K	43,35		47,45	
• ζ	0,507		0,507	
• ω_n	2,34		7,17	
• %OS	16	14,8	16	11,8
• T_s	3,6	1,107	1,107	1,2
• T_p	1,52	1,7	0,507	0,5
• t_r	1,806		5,42	
• $e(\infty)$	0,580		0,168	
• Tercer polo	-7,547		-2,775	

Una vez verificado la aproximación, compensaremos el sistema. Primero hallamos la localización de los polos dominantes

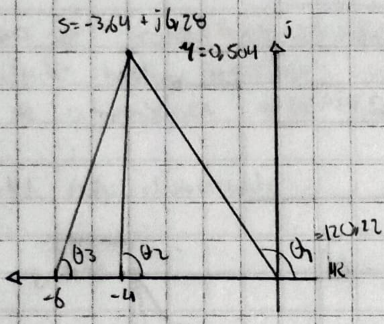
$t_{sn} = 1{,}11\ s$ $\qquad$ $\sigma = \dfrac{4}{t_s} = \dfrac{4}{1{,}11} = 3{,}6°$

$T_s = 27/\sigma$

Para el valor del eje imaginario aun tenemos un $\zeta = 504$ así que:

$$\tan\beta = Y/x \rightarrow \tan(54{,}77) = \frac{y}{3{,}604} \rightarrow y = 3{,}64 \tan(54{,}77) = 6{,}28$$

Contribuciones angulares



$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{6{,}2}{4 - 3{,}613}\right) = 86{,}428°$$

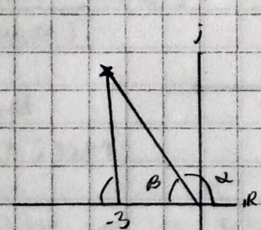
$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{6{,}2}{6 - 3{,}613}\right) = 68{,}443°$$

$$\Sigma\angle Z/\Sigma\angle P = 0 - (120{,}22 + 86{,}428 + 68{,}443)$$
$$= -276{,}22 \quad \neq 180$$

$$-276{,}22° + \alpha = -180$$
$$\alpha = -180° + 276{,}22° = 96{,}22°$$

$$\beta = 180 - \alpha = 180 - 96{,}22 = 83{,}78°$$

Hallamos la distancia para hallar el valor de θ que vamos a poner

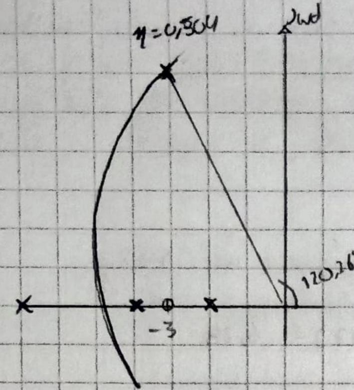


$$\tan(\beta) = Y/x$$

$$\tan(83{,}78) = 6{,}28/3{,}64 - \sigma$$

$$\sigma = 3{,}64 - \frac{6{,}24}{\tan(83{,}78)} = 2{,}96$$

Ahora sabemos que el polo deseado se encuentra en $s - 3j$, en el lugar de las raíces se vería algo así:



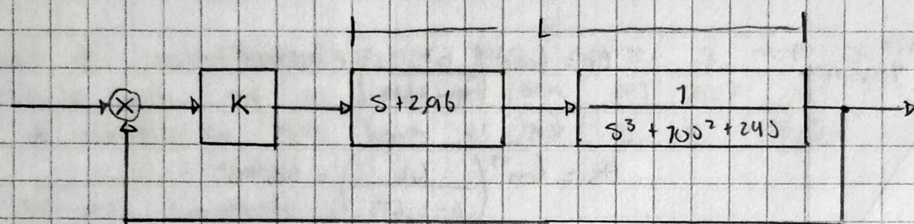
Criterio del angulo:

$\theta_1 = 125,91$
$\theta_2 = 86,72$
$\theta_3 = 64,11$

$\left.\begin{matrix}\theta_1 = 125,91 \\ \theta_2 = 86,72 \\ \theta_3 = 64,11\end{matrix}\right\} \Sigma\angle\theta = 276,72$

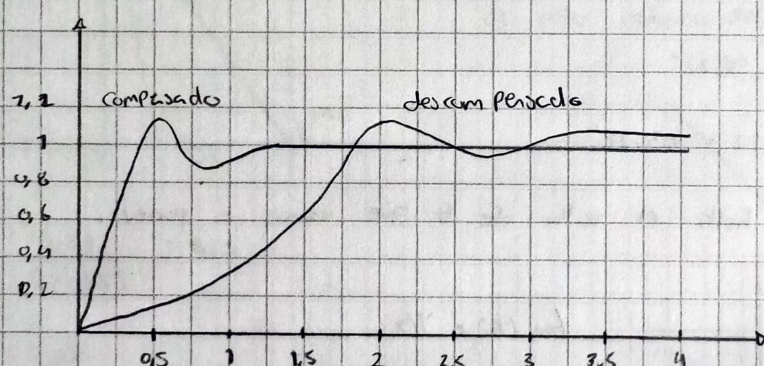
$96,22 - 276,72 = -180°$ ✓

Derivador = s + 2,96, entonces el sistema es el siguiente:

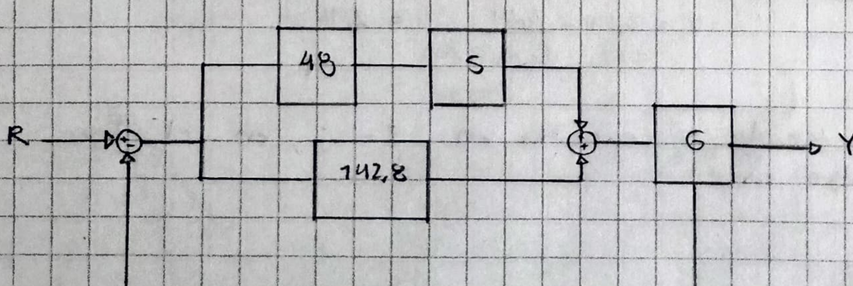


K = 48

Finalmente veremos la grafica del sistema compensado y descompensado.



Sistema final

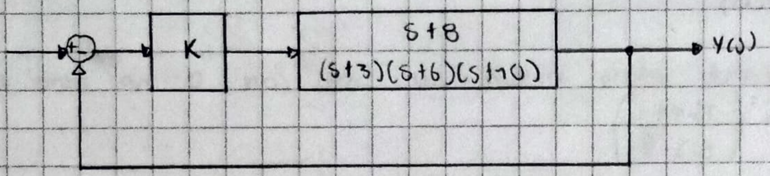


$48(s + 2,96) = 48s + 142,8$

Haider Santiago Calderón Rodriguez 20211005075

Controlador PID

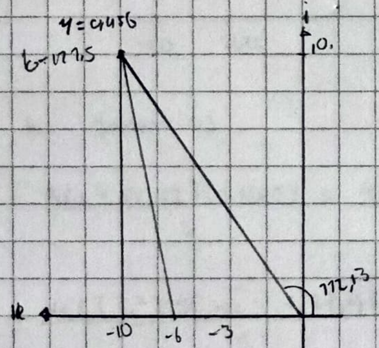
Para la planta considerando lazo cerrado, hay que encontrar un K que genere un 20% de overshoot, en la respuesta al paso escalon unitario, hay que reducir el tiempo de pico 2/3 partes.



Polos : -3, -6, -10

Haremos uso de controlSystemDesigner para graficar y mover los polos o variar la constate hasta que el overshoot sea del 20%, en este caso la constate de compensacion que logra el 20% es de 416,5.

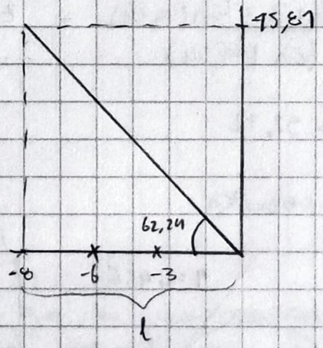
Grafica del polo dominante:



$W_d = \pi / t_p$

$W_{dn} = \pi / (2/3)\, 0,298 = 15,81$

El polo deberia ser reubicado a 15,81

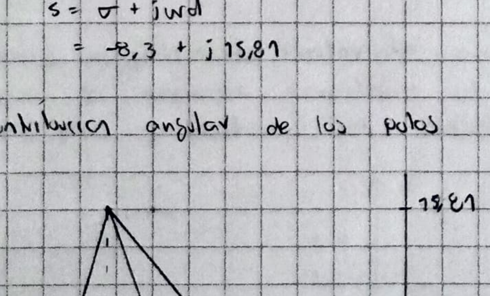


$$l = \frac{15,81}{\tan(62,29)} = 8,3$$

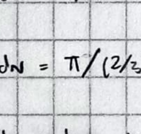
$s = \sigma + j w_d$

$= -8,3 + j\,15,81$

contribucion angular de los polos



$\theta_1 =$



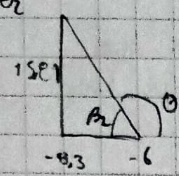
$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{15,81}{8,3-3}\right)$$

$\beta = 71,470$

$\theta_1 = 180 - \beta$

$\theta_1 = 108,53$

θ_2



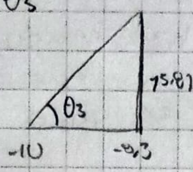
$\beta_2 = \tan^{-1}\left(\dfrac{15,81}{8,3-6}\right)$

$\beta_2 = 81,72$

$\theta_2 = 180 - 81,72$

$\theta_2 = 98,28°$

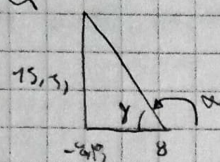
θ_3



$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\dfrac{15,81}{10-8,3}\right)$

$\theta_3 = 83,86$

α



$\gamma = \tan^{-1}\left(\dfrac{15,81}{8,3-8}\right)$

$\gamma = 88,91°$

$\alpha = 180° - \gamma$

$\alpha = 91,09°$

Criterio del angulo : $\alpha + \theta_2 + \theta_3 = -199,54° \neq 180°$

$\angle Zc = -180 + 199,54°$

$\angle Zc = 19,59°$

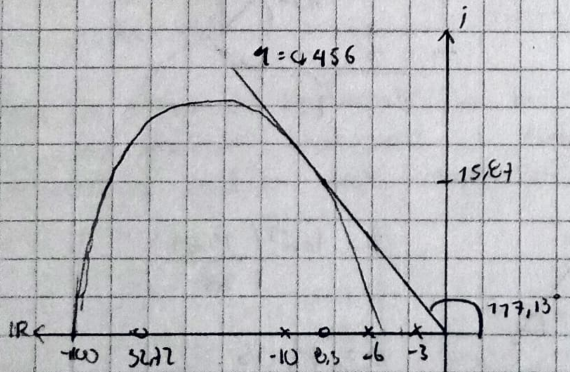
$\dfrac{15,81}{Zc-8,3} = \tan(19,59)$

$15,81 = \tan(19,59)(Z_c - 8,3)$

$\dfrac{15,81 + 8,3\tan(19,54)}{\tan(19,54)} = Zc$

$Zc = 52,72$

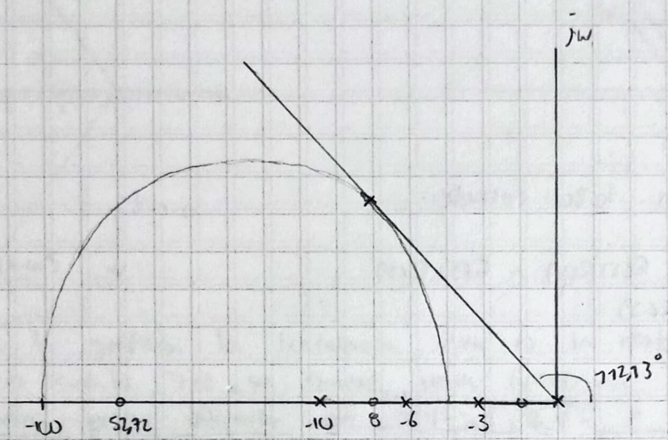
Grafica compensada:



Después de diseñar el controlador PD diseñamos el compensador integral para reducir el error de estado estacionario para el escalón, el cero se debe colocar cerca del origen.

$$I = \frac{s+0{,}5}{s}$$

Al poner un polo en 0, nos dará un nuevo polo dominante:



Obtenemos las ganancias

$$G_{PID} = \frac{k(s+52{,}72)(s+0{,}5)}{s} = \frac{4{,}6(s+52{,}72)(s+0{,}5)}{s}$$

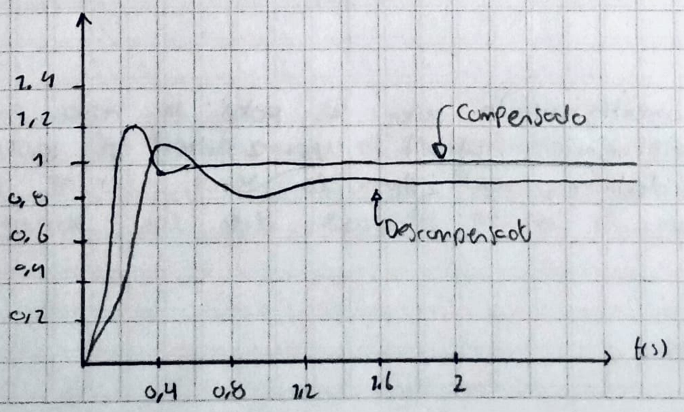
$$= \frac{4{,}6(s^2+56{,}42s+27{,}96)}{s}$$

$k_1 = 254{,}3$

$k_2 = 124{,}6$

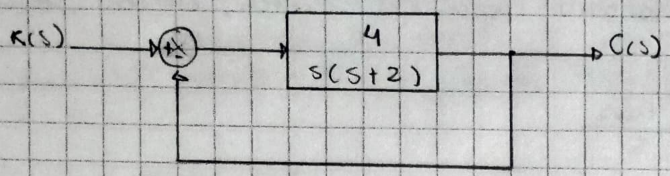
$k_3 = 4{,}6$

Podemos ver plasmado finalmente en la siguiente figura que la compensación mejora la respuesta transitoria al disminuir el tiempo requerido para alcanzar el primer pico y produce cierta mejora en el error de estado estacionario.



Haidel Santiago Calderon Rodriguez 20211005075

Ejemplo 7-1 Compensador ideal



Segun este sistema, la funcion de transferencia en lazo abierto queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{4}{s(s+2)}$$

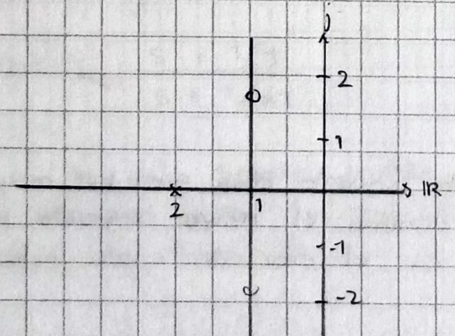
Entonces su funcion en lazo cerrado:

$$C(s) = G(s)[R(s) - C(s)] = G(s)R(s) - G(s)C(s)$$
$$C(s) + G(s)C(s) = G(s)R(s)$$
$$C(s)[1 + G(s)] = G(s)R(s)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{\frac{4}{s(s+2)}}{1+\frac{4}{s(s+2)}} = \frac{4}{s(s+2)+4} = \frac{4}{s^2+2s+4} = \frac{4}{(s+1+j\sqrt{3})(s+1-j\sqrt{3})}$$

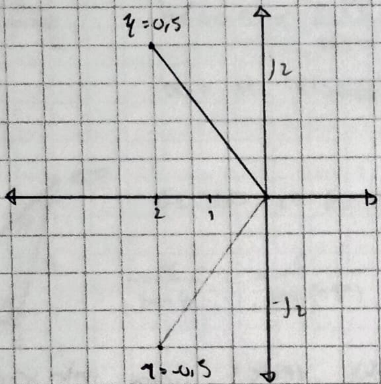
Polos: $p_1 = -1 + j\sqrt{3}$
$p_2 = -1 - j\sqrt{3}$

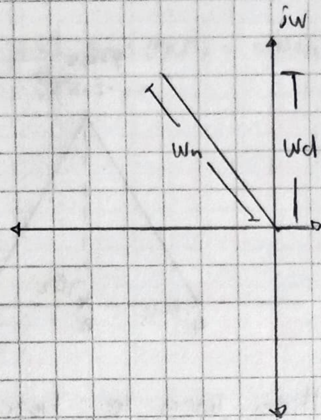
Graficando el mapa del lugar de las raices:



El coeficiente de amortiguamiento para los polos de modo que $\eta = 0{,}5$ en lazo cerrado, la frecuencia natural $\omega_n = 2$ rad/s y la constante estatica de error de velocidad es de 2Hz.

Se desea modificar los polos de manera que se obtenga una frecuencia natural $W_n = 4$ rad/s sin cambiar el factor de amortiguamiento debido a la relación del angulo de los polos y el factor de amortiguamiento $\sin(\theta) = \xi$, se puede garantizar el factor de amortiguamiento $\sin\theta = \xi$.





Como se ve en la grafica, la frecuencia W_n es la distancia del origen al polo teniendo en cuenta que se quiere una frecuencia natural de 4Hz el nuevo polo deberia estar ubicado en $s = -2 \pm j2\sqrt{3}$

Usando pitagoras $\sqrt{2^2 + (2\sqrt{3})^2} = 4$ se comprueba que es la posicion correcta para la frecuencia deseada.

La nueva funcion de transferencia agregando el compensador es:

$$C(s) = G(s)\underbrace{G_c(s)}_{\text{Funcion del compensador}}$$

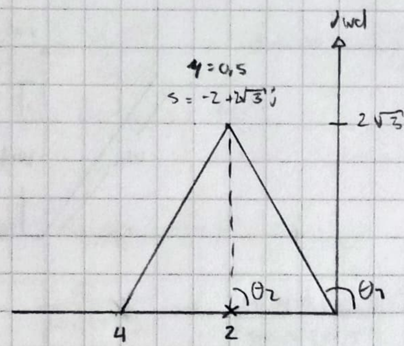
$$G_c(s) = K_c \frac{s + 1/T}{s + 1/\alpha T}$$

Donde α se buscara lo más grande posible de modo que la constante estatica de error de velocidad sea lo mas grande posible de modo que se reduzca el error a la rampa ess.

$$e_{ss\,ramp} = \frac{1}{K_v}$$

Con la nueva funcion de transferencia el compensador indica que se debe agregar un polo y un cero donde el cero deberia estar lo más cerca posible por la izquierda del polo escogido segun el comportamiento deseado.

Para hallar tanto el polo como el zero se escoge un punto de referencia para trazar una recta auxiliar, este punto debe ser a lo largo del eje x y se busca que no este muy retirado del origen. Por ejemplo se selecciona -4.

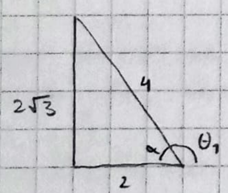


A partir de la ultima linea se trazan otras dos rectas cuya interseccion con el eje x sera el polo o el cero deseados, para saber como trazar las rectas se requiere del criterio del angulo.

$$\frac{\Sigma \angle z}{\Sigma \angle p} = \pm 180(2k-1)$$

Para el ejemplo: $\frac{4}{s(s+2)}$

$$\frac{\Sigma \angle z}{\Sigma \angle p} = 0 - \theta_1 - \theta_2 = 0 - 90° - 120° = -210° \neq 180°$$

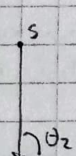


$\theta_1 = 180 - \alpha$

$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2\sqrt{3}}{2}\right)$

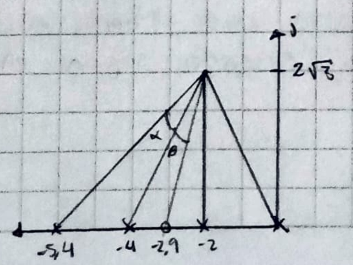
$\alpha = 60°$

$\theta_1 = 180° - 60° = 120°$



$\theta_2 = 90°$

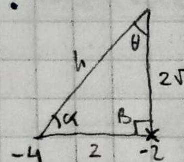
Para cumplir con el criterio del angulo debemos sumar 30°, este sera un angulo auxiliar utilizado para trazar rectas $\phi = 30°$. Trazaremos una recta en $\phi/2$ despues de la recta auxiliar y la otra recta $\phi/2$ antes ($\phi/2 = 15°$)



$\alpha = \phi/2$

$\beta = -\phi/2$

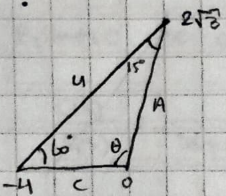
Para conocer la posición de los polos y ceros añadidos se usa trigonometría.

- 

$$h = \sqrt{(2\sqrt{3})^2 + (2)^2} = 4$$

$$h/\operatorname{sen}B = \frac{2\sqrt{3}}{\operatorname{sen}\alpha} \rightarrow \operatorname{sen}\alpha = \frac{2\sqrt{3}}{4}\operatorname{sen}(90°) = 0{,}866$$

$$\alpha = \operatorname{sen}^{-1}(0{,}866) = 60°$$

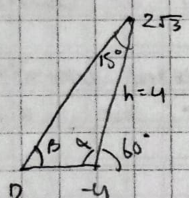
- 

$$\theta = 180 - 15 - 60 = 10{,}5°$$

$$\frac{4}{\operatorname{sen}\theta} = \frac{c}{\operatorname{sen}(15°)} \rightarrow \frac{4\operatorname{sen}(15°)}{\operatorname{sen}(105°)} = c = 1{,}07$$

la distancia del cero y el origen es $-4 + 1{,}07 = -2{,}928$

$$Z = (0, -2{,}928)$$

- 

$$\alpha = 180° - 60° = 120°$$

$$B = 180° - \alpha - 15° = 180° - 15° - 120° = 48°$$

$$\frac{D}{\operatorname{sen}(15)} = \frac{h}{\operatorname{sen}(B)} \rightarrow D = \frac{h\operatorname{sen}(15)}{\operatorname{sen}(B)} = \frac{4\operatorname{sen}(15)}{\operatorname{sen}(45)} = 1{,}464$$

la distancia del polo y el origen es $-4 - 1{,}464 = -5{,}46$

$$P = (0, -5{,}46)$$

Ya con los puntos hallados, para la compensación es necesario hallar la ganancia K, para ello se expresa la nueva función de transferencia.

$$C(s) = G(s)G_c(s) = \left(\frac{4}{s(s+2)}\right)\left(\frac{K_c(s+2{,}4)}{(s+5{,}4)}\right) = \frac{K(s+2{,}4)}{s(s+2)(s+5{,}4)}$$

$$K = 4K_c$$

Para hallar la ganancia K se aplica el criterio de magnitud:

$$\left|\frac{K(s+2{,}4)}{s(s+2)(s+5{,}4)}\right|_{s=-2+2\sqrt{3}j} = 1 \rightarrow |K| = \left|\frac{s(s+2)(s+5{,}4)}{(s+2{,}4)}\right|_{s=-2+2\sqrt{3}j}$$

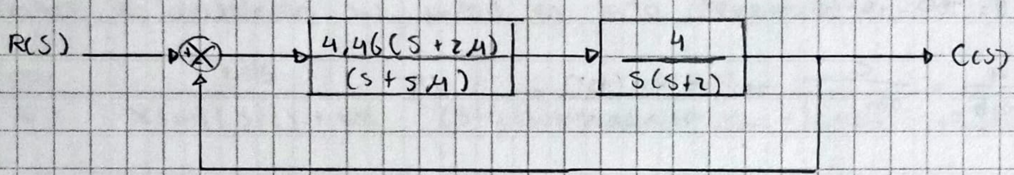
$$|K| = 18{,}79 \rightarrow K_c = K/4 = 18{,}79/4 = 4{,}697$$

Como se diseño con a elevado se analiza el error de entrada a la rampa para verificar el diseño.

$$K_v = \lim_{s \to 0} s\,C(s) = \lim_{s \to 0} G(s)C(s) = \lim_{s \to 0} \frac{18,79\,(s+2,4)}{(s+2)(s+5,4)}$$

$$= \frac{18,79\,(2,4)}{2 \cdot 5,4} = 5,02 \text{ Hz}$$

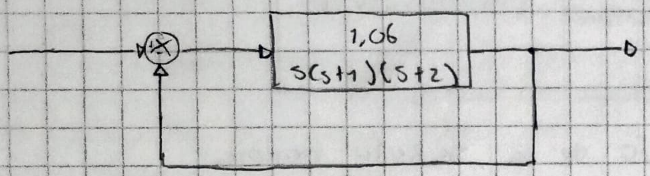
El sistema final con adelanto de fase compensado corresponde a:



Haider Santiago Calderón Rodríguez 20211005075

Ejemplo 7,2

Considerando el siguiente sistema:



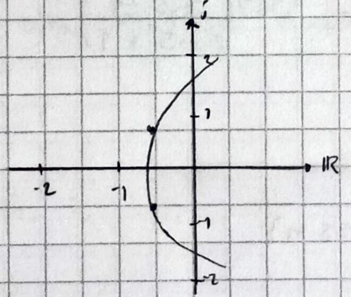
Primero se consideran sus polos en lazo cerrado:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1,06}{s(s+1)(s+2)+1,06} = \frac{1,06}{(s+0,3307-j0,5864)(s+0,3307+j0,5864)(s+2,3385)}$$

sus polos dominantes son: $s = -0,3307 \pm j0,5864$

El factor de amortiguamiento de sus polos es $\zeta = 0,491$, su frecuencia a lazo cerrado es 0,673 rad/s y su constante de velocidad es de 0,53 seg^{-1}

Debemos incrementar la velocidad k_v hasta 5 seg^{-1} sin modificar sus polos, así que insertaremos un compensador en atraso.



Polos en lazo cerrado

Seleccionamos un $\beta = 10$ y colocamos un cero y un polo del compensador en atraso en $s = -0,05$, la función ahora es:

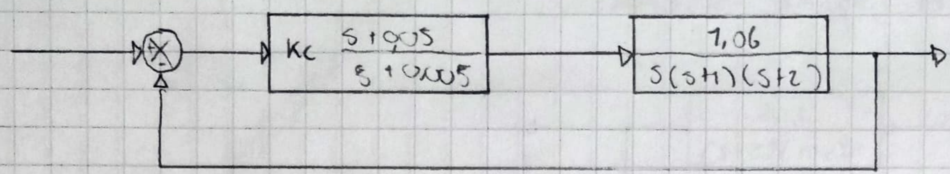
$$G_c(s) = \hat{K_c}\frac{s+0,05}{s+0,005}$$

El angulo en atraso cerca de un polo dominante en lazo cerrado es de 9° por lo que no habrá un cambio muy significativo,

$$G_c(s)G(s) = K_c(s)\frac{(s+0,05)\,1,06}{s+0,005\,s\,(s+1)(s+2)}$$

$$K = 1,06\,\hat{K_c}$$

Entonces el sistema compensado se verá de la siguiente manera:



La ganancia en lazo abierto se calcula de la siguiente manera

$$K = \left| \frac{s(s+0{,}005)(s+1)(s+2)}{s+0{,}005} \right|_{s=-0{,}31+j0{,}55}$$

$K = 1{,}0235$

Entonces el compensador será:

$$\hat{K}_c = \frac{K}{1{,}06} = \frac{1{,}0235}{1{,}06} = 0{,}9656$$

La función de transferencia del compensador en atraso es:

$$G_c(s) = (0{,}9656)\left(\frac{s+0{,}05}{s+0{,}005}\right) = (9{,}565)\left(\frac{20s+1}{200s+1}\right)$$

y en lazo abierto:

$$G_c(s) = \frac{5{,}12\,(20s+1)}{s(200s+1)(s+1)(0{,}5s+1)}$$

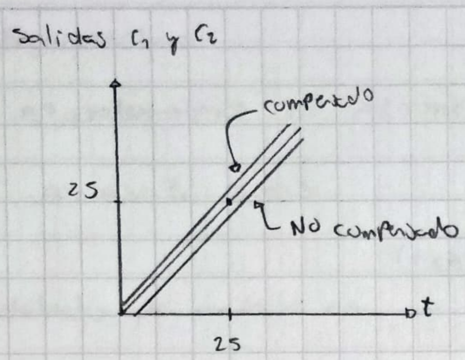
$K_v = \lim s\, G_c(s) = 5{,}12 \text{ seg}^{-1}$

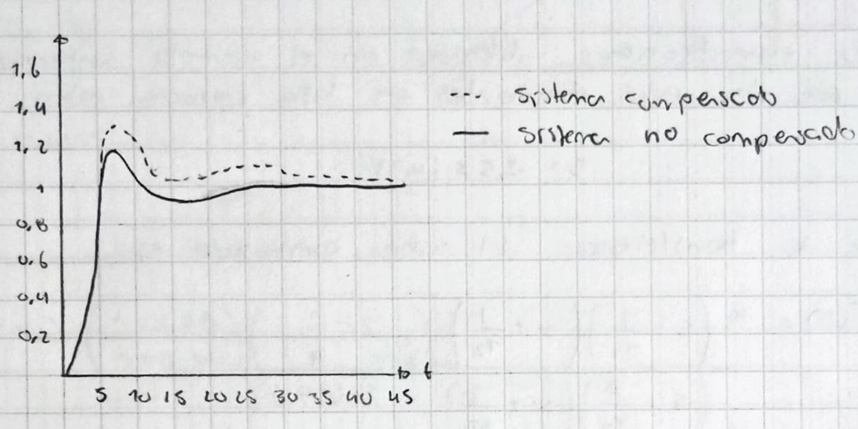
El sistema compensado ha logrado incrementar la constante de error estático de velocidad a $5{,}12 \text{ seg}^{-1}$ que equivale a 9,66 veces su valor original, esto reduce el error de estado estable al 10% del valor original.

Sus otros dos polos son: $s_3 = -2{,}326$
$s_4 = -0{,}0590$

Sus polos dominantes son: $s = -0{,}312 \pm j0{,}55$

La frecuencia natural del sistema compensado es de 0,631 rad/s, un 6% menor a la del sistema no compensado, lo que hace que la respuesta transitoria sea más lenta y el sobrepeso máximo aumente.





El sistema compensado en atraso exhibe un sobrepaso maximo y una respuesta mas lenta que el sistema no compensado. El polo -0,0549 y el cero s = -0,05 generan una cola larga de amplitud pequeña en respuesta transitoria.

Haider Santiago Calderon Rodriguez 20211005075

Ejemplo 7,4

considere el siguiente sistema, suponga un compensador en atraso-adelanto.

$$G_c(s) = K_c \frac{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{T_2}\right)}{\left(s + \frac{\beta}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{\beta T_2}\right)} \quad (\beta > 1)$$

Suponiendo especificaciones obtenidas en el ejemplo anterior. Las ubicaciones deseadas para los polos dominantes en lazo cerrado estan en:

$$s = -2,5 \pm j4,33$$

La funcion de transferencia del sistema compensado es

$$G_c(s)\,G(s) = K_c \frac{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{T_2}\right)}{\left(s + \frac{\beta}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{\beta T_2}\right)} \cdot \frac{4}{s(s+0,5)}$$

Para su constante de error estatico de velocidad K_v es de 80 seg^{-1}

$$K_c = \lim_{s \to 0} s\, G_c(s)\, G(s) = \lim_{s \to 0} K_c \frac{2}{0,5} = 8 K_c = 80$$

$$K_c = 10$$

T_1 y β se calculan a partir de:

$$\left| \frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\beta}{T_1}} \right| \left| \frac{40}{s(s+0,5)} \right|_{s = -2,5 + j4,33} = \left| \frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\beta}{T_1}} \right| \frac{8}{4,77} = 1$$

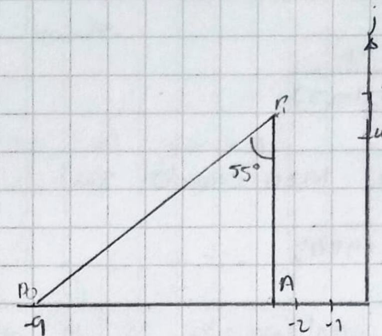
$$\left| \frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\beta}{T_1}} \right|_{s = -2,5 + j4,33} = 55^\circ$$

$$\frac{\overline{PA}}{\overline{PB}} = \frac{4,77}{8}$$

Usando grafica trigonometrica

$\bar{AO} = 2,38 \quad \bar{BO} = 8,34$

$T_1 = \frac{1}{2,38} = 0,42 \qquad \beta = 8,34\,T_1 = 3,503$



La parte de adelanto se convierte en

$$10\left(\frac{s+2,38}{s+8,34}\right) \qquad T_2 = 10$$

$$\frac{1}{\beta T_2} = \frac{1}{(3,503)(10)} = 0,0285$$

Por lo tanto el compensador queda:

$$G_c(s) = (10)\left(\frac{s+2,38}{s+8,34}\right)\left(\frac{s+1}{s+0,0238}\right)$$

Y el sistema compensado queda con la siguiente funcion de transferencia:

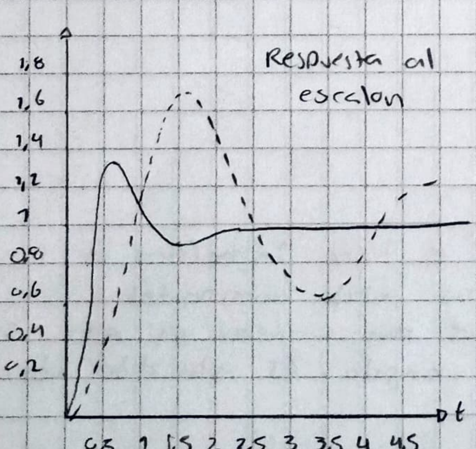
$$G_c(s)G(s) = \frac{40(s+2,38)(s+0,1)}{(s+8,34)(s+0,0285)(s+0,15)s}$$

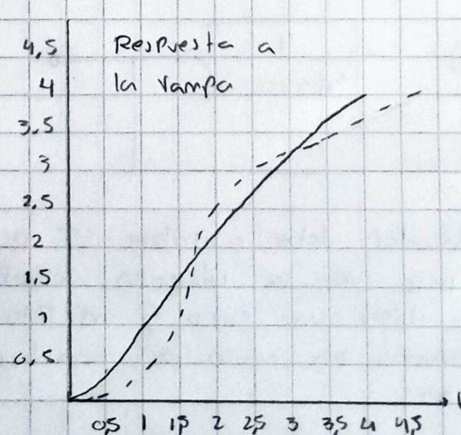
El sistema compensado es de 4° orden, los polos dominantes en lazo cerrado se ubican en:

$$s = -2,4539 \pm j4,3099$$

Los otros 2 polos son: $s_3 = -0,1003 \qquad s_4 = -3,8604$

- - - No compensado — Compensado





Haider Santiago Calderón Rodríguez 20211005075

Ejemplo 7.3

Considere el siguiente sistema:

$$G(s) = \frac{4}{s(s+0{,}5)}$$

Sus polos en lazo cerrado son:

$$s = -0{,}25 \pm j1{,}9843$$

El factor de amortiguamiento es de 0,125, la frecuencia natural no amortiguada es de 2 rad/s y la constante de error estático de velocidad es de 8 seg^{-1}. Se busca que el factor de amortiguamiento de los polos dominantes en lazo cerrado sea 0,5 y la constante de error estático de velocidad sea de 80 seg^{-1} con frecuencia de 5 rad/s.

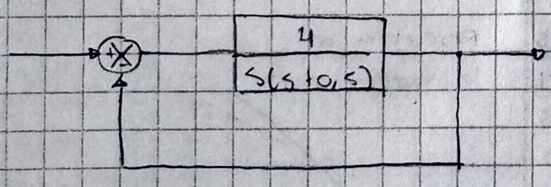
Supongamos la siguiente función de transferencia:

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

Entonces los polos dominantes deben estar en: $s = -2{,}5 \pm j4{,}33$ dado que:

$$\left.\frac{4}{s(s+0{,}5)}\right|_{s=-2{,}5+j4{,}33} = -235^{\circ}$$

El sistema de control es el siguiente:



El compensador debe contribuir 55° para que el lugar geométrico de las raíces pase por la ubicación deseada de los polos dominantes. Debemos ubicar un cero y un polo, s = 0,5 para cancelar en polo s = 0,5. Los ubicamos en modo de contribución del ángulo. El polo debe ubicarse en s = -5,021.

$$K_c = \frac{s+\frac{1}{T_1}}{s+\frac{\gamma}{T_1}} = K_c\,\frac{s+0,5}{s+0,5021} \qquad T_1 = 2 \qquad \gamma = \frac{5,021}{0,5} = 10,04$$

Determinamos K_c a partir de la condición de magnitud

$$K_c = \left|\frac{(s+5,021)\,s}{4}\right|_{s=-2,5+j4,33} = 6,26$$

Para el atraso β debe satisfacer la velocidad

$$K_v = \lim_{s\to 0} s(6,26)\cdot\frac{\beta}{10,04}\cdot\frac{4}{s(s+0,5)} = 4,988\,\beta = 80$$

$\beta = 16,04$

Elegimos un valor de T_2 grande

$$\left.\begin{aligned} -5'' < \left|\frac{s+\frac{1}{T_2}}{s+\frac{1}{16,04\,T_2}}\right|_{s=-2,5+j4,33} < 0^\circ \end{aligned}\right\} \; T_2 = 5$$

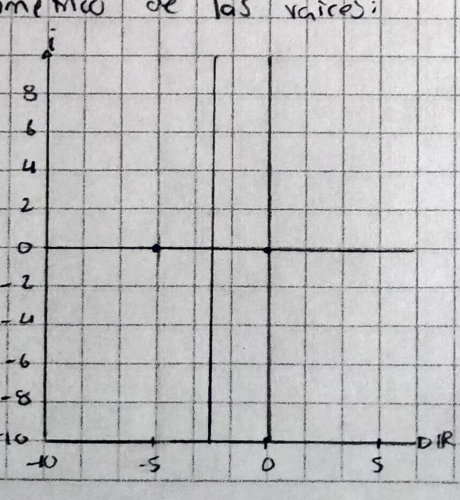
La función de transferencia que tenemos es la siguiente:

$$G(s) = \frac{10(2s+1)(5s+1)}{(0,1992s+1)(80,19s+1)}$$

En lazo abierto:

$$G(s)\,G_c(s) = \frac{25,04(s+0,2)}{s(s+5,02)(s+0,01247)}$$

Lugar geométrico de las raíces:

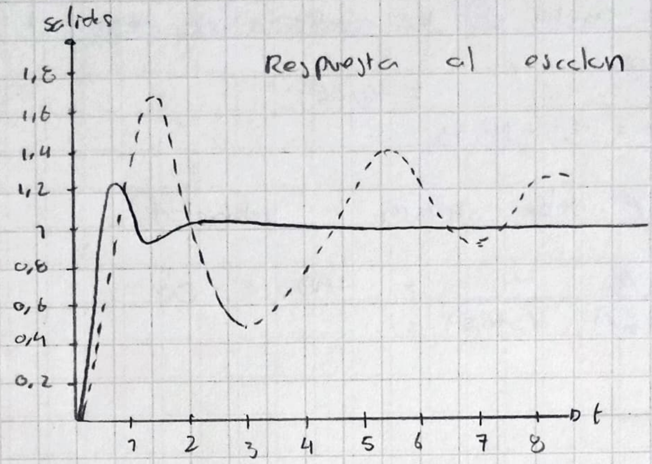


los nuevos polos estan en $s = -2{,}4133 \pm j4{,}2756$ y $Y = 0{,}0191$, el tercer polo se ubica en $s = -0{,}2078$ cerca del cero $s = -0{,}2$

Curvas de respuesta al escalon y a la rampa

--- No compensado

— Compensado



Respuesta a la rampa