



Ingeniería Eléctrica

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Fundamentos de control de sistemas (EL4111-1)

Clase auxiliar 2

Prof. Roberto Cardenas Dobson

Prof. Aux. Osvaldo Jimenez - Erik Sáez

Ayudantes. Simon Arenas- Juan Pablo Baez - Francisco Garces
- Sofia Ibarra

1. Teniendo la siguiente planta:

$$G_p(s) = \frac{(1,429 - s)}{(s + 1,429)(s^2 + s + 1)} \quad (1)$$

El diseño de control a lazo cerrado debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Máximo sobrepaso = 4.3254%
2. Frecuencia natural = 0.722
3. Cero error en estado estacionario a entrada escalón.

Se pide lo siguiente:

- (a) Utilizando las condiciones de módulo y ángulo, diseñe un controlador bipropio que cumpla con las especificaciones mencionadas. Utilice cancelación en su diseño si lo considera necesario. (20/50)
- (b) El ingeniero a cargo del proyecto se da cuenta de que debe considerar los límites físicos de la planta para diseñar correctamente el controlador. Modifique su controlador para que incluya anti-windup generalizado (determine el diagrama de control). De no ser posible aplicar este esquema, explique por qué y proponga otro esquema de anti-windup. (10/50)
- (c) Por un error de implementación, la ganancia del controlador diseñado en (a) aumenta en un 100%. ¿Todavía existe cero error de estado estacionario bajo esta nueva condición o ya no es posible lograr este objetivo dado el error de implementación cometido? Fundamente adecuadamente su respuesta. (10/50)
- (d) Suponga que ahora debe rediseñar el controlador propuesto en (a), con el propósito de que se permita alcanzar cero error en estado estacionario a una entrada de la forma $e(t) = A_m t^2 + B_m \sin(\omega_1 t) + C_m \cos(\omega_2 t)$. ¿Cuáles son los elementos mínimos que debe tener la función de transferencia de este controlador para cumplir con estos requerimientos? Proponga una expresión para el controlador que cumpliría con estos requisitos. (10/50)

Solución:

Resolución a)

Utilizando el maximo sobrepaso , es posible obtener el coeficiente de amortiguamiento ξ , el cual vendra dado por:

$$e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} = 0.04321 \quad (1)$$

$$\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \ln(0.04321) \quad (2)$$

$$\xi = 0.707 \quad (3)$$

Una vez obtenido el coeficiente de amortiguamiento y dado que la frecuencia natural es conocida, se tiene que el punto de diseño corresponde:

$$s_{1,2} = -\xi w_n \pm j w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4)$$

$$s_{1,2} = -0.5105 \pm j0.5105 \quad (5)$$

Luego tenemos que el denominador de la planta corresponde a:

$$s^2 + s + 1 = 0 \quad (6)$$

$$s_{1,2} = \frac{-1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

Con lo que la planta vendra dada por

$$G_p(s) = \frac{(1,429 - s)}{(s + 1,429) \left(s + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(s + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)} \quad (8)$$

Luego se debe pronponer un controlador por lo que dado que es posible utilizar cancelacion de polos, se propone un controlador de la forma:

$$G_c(S) = k \frac{\left(s + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(s + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{s(s + a)} \quad (9)$$

De esta manera se tiene que el controlador es bi-propio , produce una cancelacion,cero error a estado estacionario y nos da un grado de libertad para realizar la sintonizacion. De manera visual mediante LGR , se tiene que por condicion de angulo debe cumplirse que:

$$\sum \theta_{polos} - \sum \theta_{ceros} = 0 \quad (10)$$

Es importante notar que consideramos que sea igual a 0, dado que el sistema tiene una ganancia negativa. Por lo tanto:

$$\theta_p + \theta_0 + \theta_a - \theta_z = 0 \quad (11)$$

Luego cada angulo vendra dado por:

$$\theta_o = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{0.5105}{0.5105} \right) = 135^\circ \quad (12)$$

$$\theta_z = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{0.5105}{0.5105 + 1.429} \right) = 165.25^\circ \quad (13)$$

$$\theta_a = \tan^{-1} \left(\frac{0.5105}{a - 0.05105} \right) \quad (14)$$

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{0.5105}{1.429 - 0.5105} \right) = 29.07^\circ \quad (15)$$

Retomando la condicion de angulo se obtiene que:

$$\theta_p + \theta_0 + \theta_a - \theta_z = 0 \quad (16)$$

$$\theta_a = \tan(1.18^\circ) \quad (17)$$

De esta manera se obtiene que el punto a en el eje real, vendra dado por:

$$a = 25.27 \quad (18)$$

Una vez obtenido el punto a, es posible calcular la ganancia la cual viene dada por:

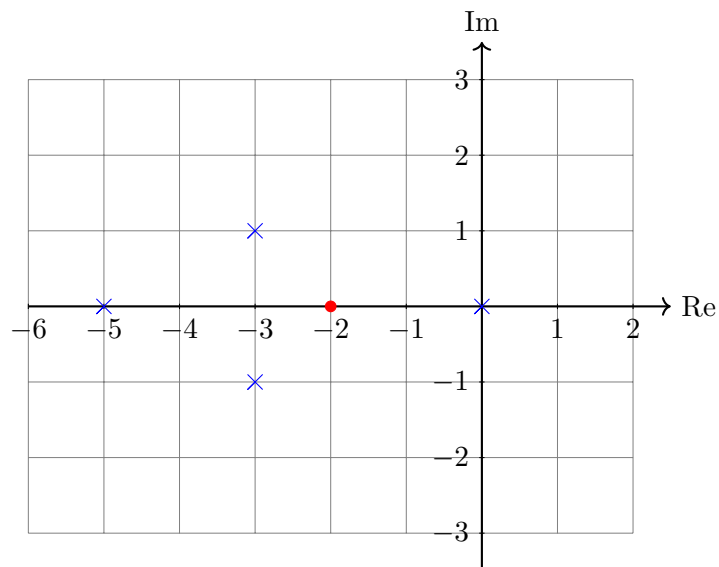
Con lo que finalmente el controlador tendra la forma:

$$1 = 1 \quad (19)$$

b)

Dado que se busca implementar el efecto del anti-Windup

2. Sea el siguiente diagrama:



1. Encuentre la funcion de transferencia del sistema, con esta informacion , obtenga el lugar de la raiz
2. ¿Qué ocurre con el lugar de la raíz si el sistema tiene una ganancia negativa? En este caso, encuentre la ganancia crítica para que el sistema se mantenga estable.

Solución:

Resolucion 2.1

Dada la figura de del enunciado , se observa que se tienen 4 polos y un cero, por lo que se tendra:

- Polos : $p_1 = 0$, $p_2 = -3 \pm j$, $p = -5$.
- Cero : $z_1 = -2$

Con lo que la funcion de transferencia a lazo abierto vendra dada por:

$$H(s)G(s) = \frac{(s+2)}{s(s+3+j)(s+3-j)(s+5)} \quad (20)$$

$$= \frac{(s+2)}{s(s^2+6s+10)(s+5)} \quad (21)$$

$$(22)$$

Luego sera de interes encontrar todas las características suficientes, tal que nos permitan el obtener el LGR. Comenzamos encontrando los cortes con el eje real , para la cual se utiliza la condicion de angulo en base a la siguiente regla:

- Si la cantidad de polos y ceros es **PAR**, luego esa zona no pertenecerá al LGR.
- Si la cantidad de polos y ceros es **IMPAR**, luego esa zona pertenecerá al LGR.

Se debe tener la precaucion con los polos conjugados, se obtiene por tanto:

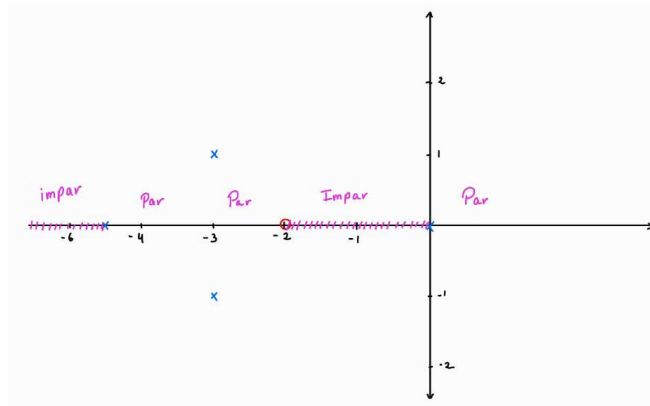


Figura 1: Ubicacion de polos de lazo cerrado en zona real

Se busca el obtener la ubicacion de las asintotas , para lo cual se utiliza la siguiente formula:

$$\sigma_a = \frac{\sum Polos - \sum Ceros}{\#Asintotas} \quad (23)$$

Considerando que la asintotas vienen dadas por $\#Asintotas = \#Polos - \#Ceros = 4 - 1 = 3$ se obtiene:

$$\sigma_a = \frac{0 - 5 - (3+j) - (3-j) - (-2)}{3} = -3 \quad (24)$$

La cual se visualiza en lo siguiente:

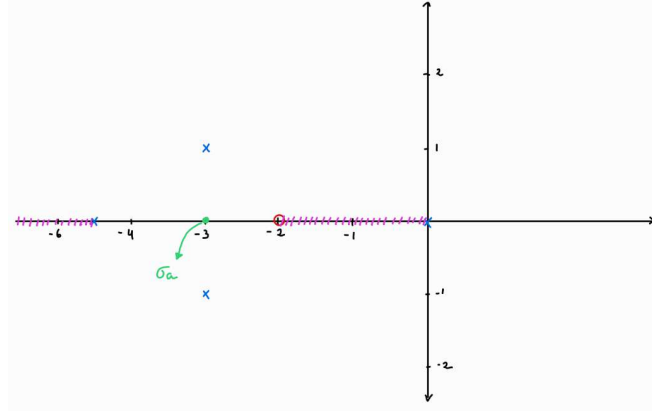


Figura 2: Ubicacion de lugar de la asintota

Para los angulos asociados a las asintotas tenemos que $k \in \{0, \dots, \#Asintotas - 1\}$ con lo que (Para $k > 0$):

$$\theta_k = \frac{(2k + 1)180}{\#Asintotas} \quad (25)$$

Con lo que se obtiene:

$$\theta_0 = \frac{\pi}{3} \Leftrightarrow 60^\circ \quad (26)$$

$$\theta_1 = \pi \Leftrightarrow 180^\circ \quad (27)$$

$$\theta_2 = \frac{5\pi}{3} \Leftrightarrow 300^\circ \quad (28)$$

Con lo cual:

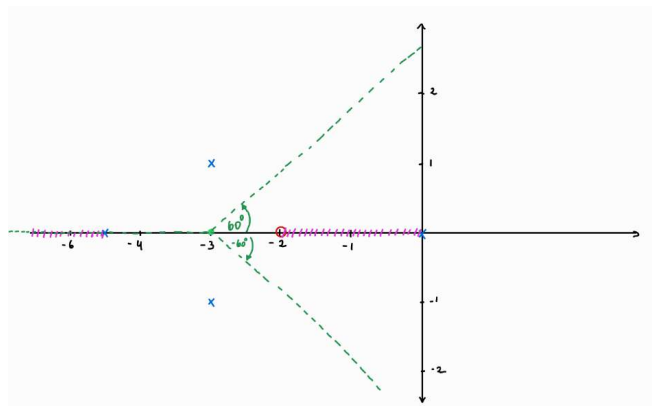


Figura 3: Angulos asociados a las asintotas

Se debe obtener los valores de llegada o salida, para lo cual se utiliza la expresion de lazo cerrado dada por:

$$1 + kG(s)H(s) = 0 \quad (29)$$

$$1 + k \frac{(s+2)}{s(s^2+6s+10)(s+5)} = 0 \quad (30)$$

$$k = \frac{-s(s^2+6s+10)(s+5)}{(s+2)} \quad (31)$$

$$(32)$$

Luego derivamos e igualamos a 0 , con lo que se obtiene que

$$\frac{dK}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\frac{-s(s^2+6s+10)(s+5)}{(s+2)} \right) = 0 \quad (33)$$

Se tiene que $s_{1,2} = -3.7293 \pm 0.29837j$ y $s_{3,4} = -1.2707 \pm 0.8757j$ se observa que ambos son complejos por lo que **no existe corte con el eje real**. Se debe analizar si existe corte con el eje imaginario, por lo tanto:

$$1 + kG(s)H(s) = 0 \quad (34)$$

$$1 + k \frac{(s+2)}{s(s^2+6s+10)(s+5)} = 0 \quad (35)$$

$$s(s^2+6s+10)(s+5) + k(s+2) = 0 \quad (36)$$

Dado que nos interesa analizar el corte con el eje real, se impone que $s = j\omega$ con lo que se obtiene:

$$j\omega((j\omega)^2 + 6(j\omega) + 10)(j\omega + 5) + k(j\omega + 2) = 0 \quad (37)$$

$$j\omega(-\omega^2 + 6j\omega + 10)(j\omega + 5) + k(j\omega + 2) = 0 \quad (38)$$

$$\omega^4 - 40\omega^2 + 2k + j(50\omega + k\omega - 11\omega^3) = 0 \quad (39)$$

Lo anterior sera valido cuando tanto parte real e imaginaria sean nulas, por lo que igualando se obtiene:

$$\omega^4 - 40\omega^2 + 2k = 0 \quad (40)$$

$$50\omega + k\omega - 11\omega^3 = 0 \quad (41)$$

Luego:

$$\omega_{1,2} = \pm 4.7385 \quad k_{1,2} = 196.99 \quad (42)$$

$$\omega_3 = 0 \quad k_3 = 0 \quad (43)$$

Con lo que la solucion factible corresponde a $\omega_{1,2} = \pm 4.7385$ y $k_{1,2} = 196.99$, dado que w_3 es infactible dado que es un valor nulo o trivial (Es super importante destacar que la solucion se obtiene considerando $K > 0$, dado que si no se limita esta cantidad, entregara todo el conjunto de soluciones). Finalmente es posible el graficar el lugar geometrico de la raiz el cual vendra dado por lo siguiente:

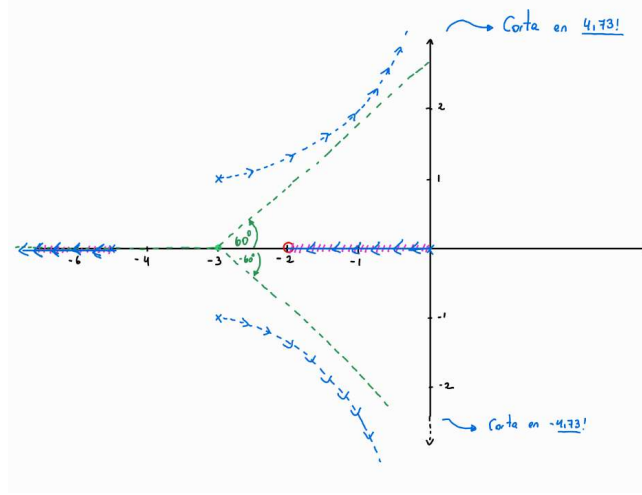


Figura 4: Lugar Geometrico de la Raiz

Resolucion 2.2

Dado que se tiene un sistema con ganancia negativa, se tiene que la funcion de transferencia vendra dada por (Considerando que $k > 0$):

$$1 - kG(s)H(s) = 0 \quad (44)$$

Con lo que la condicion sera:

$$\angle G(s)H(s) = 0 \pm 360^\circ \quad (45)$$

Por lo que notamos que al analizar el corte con el eje real, la condicion que se obtenia antes se invierte, es decir:

- Si la cantidad de polos y ceros es **Impar**, luego esa zona no pertenecerá al LGR.
- Si la cantidad de polos y ceros es **PAR**, luego esa zona pertenecerá al LGR.

Por lo que se obtiene lo opuesto a lo ya visto con anterioridad, es decir:

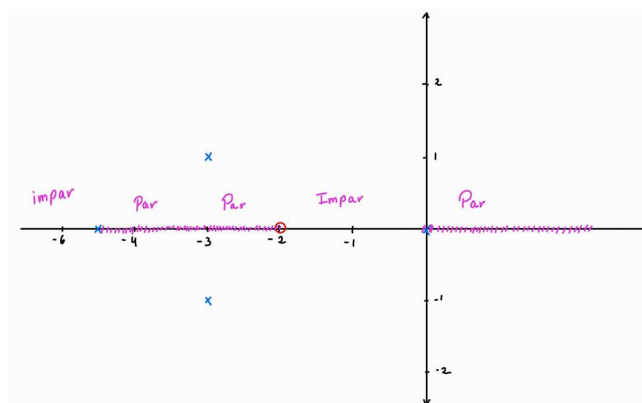


Figura 5: Lugar Geometrico de la Raiz

Luego la posición de las asíntotas no cambiara, pero si los ángulos, estos vendrán asociados a los números pares, es decir:

$$\theta_k = \frac{2k\pi}{\#Asintotas} \quad (46)$$

Con lo que se obtiene que:

$$\theta_0 \Leftrightarrow 0^\circ \quad (47)$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi}{3} \Leftrightarrow 120^\circ \quad (48)$$

$$\theta_2 = \frac{4\pi}{3} \Leftrightarrow 240^\circ \quad (49)$$

De esta manera al ubicarlos:

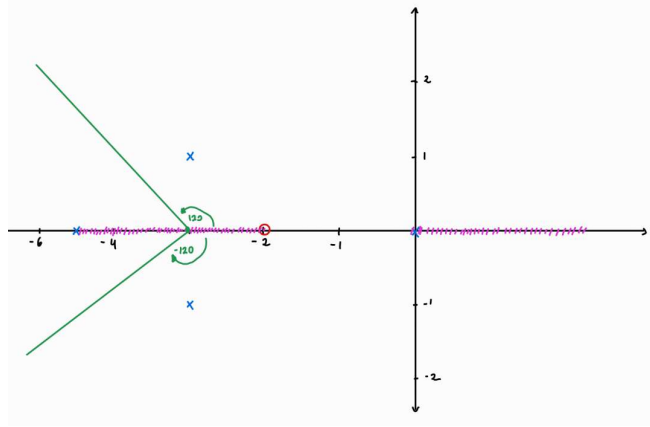


Figura 6: Lugar Geometrico de la Raiz

Notamos que los valores de llegada o salida **no se ven afectados por el signo de la ganancia**, por lo que se concluye de manera directa que nuevamente no habra corte en el eje real. Finalmente queda analizar el corte con el eje imaginario , el cual vendra dado por:

$$1 - kG(s)H(s) = 0 \quad (50)$$

$$1 - k \frac{(s+2)}{s(s^2+6s+10)(s+5)} = 0 \quad (51)$$

$$s(s^2+6s+10)(s+5) - k(s+2) = 0 \quad (52)$$

Reemplazando por $s = j\omega$ se obtiene:

$$\omega^4 - 40\omega^2 - 2k + j(50\omega - k\omega - 11\omega^3) = 0 \quad (53)$$

Que separando parte real e imaginaria se obtiene:

$$\omega^4 - 40\omega^2 - 2k = 0 \quad (54)$$

$$50\omega - k\omega - 11\omega^3 = 0 \quad (55)$$

Finalmente se obtienen los valores de ω y k que son:

$$\omega_{1,2} = \pm 2.110j \quad k_1 = -98.990 \quad (56)$$

Se observa que son infactibles debido a que $w_{1,2}$ es un valor complejo , por lo que no cortara al eje imaginario, de esta manera podemos graficar el LGR el cual vendra dado por lo siguiente:

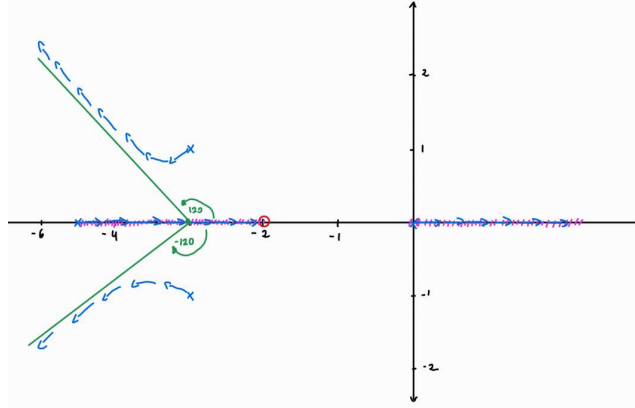


Figura 7: Lugar Geometrico de la Raiz

3. Encuentre los cortes al eje imaginario de la planta:

$$H(s)G(s) = \frac{(s+3)}{s^2 - s - 2} \quad (57)$$

Solución:

Resolucion 3.1 (Forma 1)

Dada la funcion de transferencia de la planta,

$$H(s)G(s) = \frac{(s+3)}{s^2 - s - 2} \quad (58)$$

$$= \frac{(s+3)}{(s-2)(s+1)} \quad (59)$$

Con lo que tenemos que los polos de la planta vendran dados por $p_1 = 2$ y $p_2 = -1$ y el cero $z_1 = -3$. Se debe analizar el corte con el eje imaginario, para lo cual se considera el criterio de Routh-Hurwitz, el cual nos permite analizar los rangos de ganancia que permiten la estabilidad del sistema en base a una tabla y los cambios de signos de la misma. Para esto se debe expresar la funcion de transferencia de lazo cerrado en forma polinomial, con lo que se obtiene:

$$1 + kG(s)H(s) = 0 \quad (60)$$

$$1 + k \frac{(s+3)}{(s-2)(s+1)} = 0 \quad (61)$$

$$(s-2)(s+1) + k(s+3) = 0 \quad (62)$$

$$s^2 - s - 2 + ks + 3k = 0 \quad (63)$$

$$s^2 + (k-1)s - 2 + 3k = 0 \quad (64)$$

Luego utilizamos la tabla tal que:

s^2	1	$-2+3k$
s^1	$k-1$	0
s^0	α_1	α_2

Donde para obtener los valores de α_1 y α_2 se utilizan las formulas asociadas:

$$\alpha_1 = \frac{(3k-2)(k-1) - 0}{k-1} = (3k-2) \quad (65)$$

$$\alpha_2 = 0 \quad (66)$$

(Yo suelo utilizar este ayuda memoria para no olvidarme)

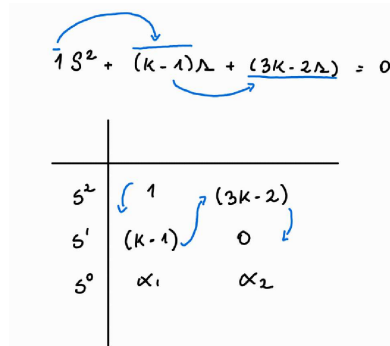


Figura 8: La idea es situar en la columna de la izquierda el mayor de grado hasta el menor grado, posteriormente reconocemos los coeficientes del polinomio y trazamos las flechas azules, desde la esquina superior izquierda bajando y luego subiendo hasta completar todos los coeficientes del polinomio (En caso de no haber se rellena con 0).

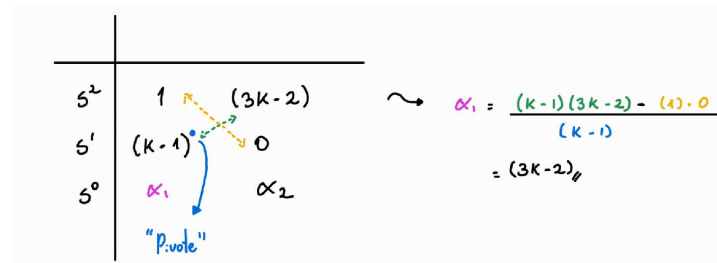


Figura 9: Una vez ubicados los coeficientes se deben calcular los coeficientes, por lo que por ejemplo para calcular α_1 se utiliza el termino superior y se realiza un *Pivote* y luego se realizan las multiplicaciones diagonales y se restan y se dividen por el *Pivote*.

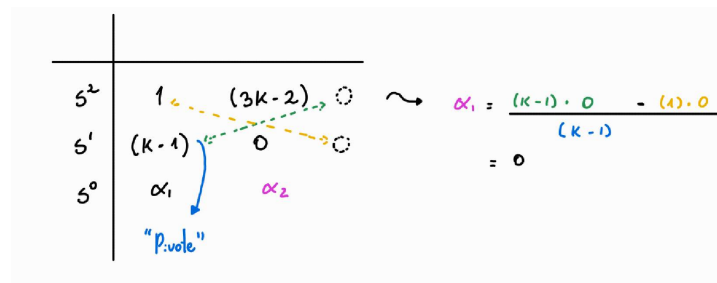


Figura 10: Para α_2 se utiliza el mismo procedimiento

Esta metodología utilizaba para no olvidarme, pero siempre es a criterio personal. Luego tenemos que la matriz vendra dada por:

s^2	1	$3k-2$
s^1	$k-1$	0
s^0	$3k-2$	0

El criterio de Routh-width se basa en analizar la segunda columna, para la cual el cambio de signo es equivalente a entrar a zona donde este sea inestable, o equivalentemente cruce el semiplano derecho, por lo que se debera cumplir que en todo momento la primera columna sea positiva, por lo que se obtiene un intervalo vendra dado por (Es importante destacar que este analisis se realiza considerando que $k > 0$):

$$k - 1 > 0 \quad (67)$$

$$3k - 2 > 0 \quad (68)$$

Con lo que se debe cumplir en simultaneo que $k > 1$ y $k > \frac{2}{3}$, por lo que se obtiene que $k > 1$ cumplira ambas condiciones que permitira la estabilidad . Finalmente se obtiene que el corte con el eje imaginario vendra dado por los momentos en que existe cambio de signo, por lo que estos correponden a $k_1 = \frac{2}{3}$ y $k_2 = 1$, con lo que reemplazando sobre la funcion de transferencia de los polos de lazo cerrado se obtiene que:

Caso 1: $K = \frac{2}{3}$

$$s^2 + (k - 1)s - 2 + 3k = 0 \quad (69)$$

$$(jw)^2 + (k - 1)jw - 2 + 3 \cdot \left| \frac{2}{3} \right| = 0 \quad (70)$$

$$-w^2 + jw \frac{-1}{3} + 0 = 0 \quad (71)$$

$$(72)$$

Luego igualamos separamos parte real e imaginaria y obtenemos que:

$$-w^2 = 0 \quad (73)$$

$$-\frac{1}{3}w = 0 \quad (74)$$

Con lo que se obtiene que $s = 0$, por lo que el corte se obtiene en el origen.

Caso 2: $K=1$

Analogamente tenemos que:

$$s^2 + (k - 1)s - 2 + 3k = 0 \quad (75)$$

$$(jw)^2 + (k - 1)jw - 2 + 3 \cdot 1 = 0 \quad (76)$$

$$-w^2 + jw(1 - 1) - 2 + 3 = 0 \quad (77)$$

$$(78)$$

Luego tenemos solo parte real,:

$$w^2 = \pm 1 \quad (79)$$

De esta manera tenemos que los cortes se cumplen para $s = \pm j$.

Resolucion 3.2 (Forma 2)

Otra condicion que se utilizara con mucha mas frecuencia es a la condicion de angulo , la cual vendra dada por:

$$\angle \sum \Theta_{polos} - \sum \Theta_{ceros} = \pm 180^\circ + n360^\circ \quad (80)$$

De esta manera tenemos que encontrar los angulos asociados a los polos y ceros deberan cumplir tal condicion, pero ademas deberemos considerar que $s=j\omega$, dado nos interesa el corte en el eje real que cumpla dicha condicion de angulo. Retomando la funcion de transferencia:

$$H(s)G(s) = \frac{(s+3)}{s^2 - s - 2} \quad (81)$$

$$= \frac{(s+3)}{(s-2)(s+1)} \quad (82)$$

Tenemos luego que existe $p_1 = -1, p_2 = 2$ y $z_1 = -3$, con lo que luego tenemos que se debe cumplir que:

$$\theta_{z_1} - (\theta_{p_1} + \theta_{p_2}) = 180 \quad (83)$$

Que graficamente correspondera a lo siguiente (Debemos recordar siempre como es la apertura de los angulos):

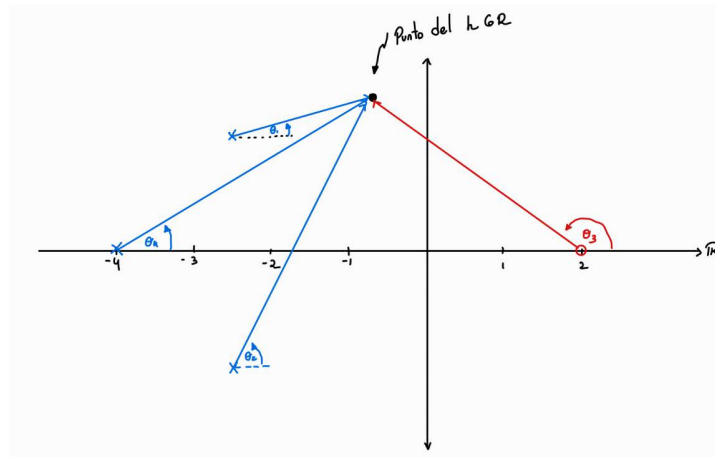


Figura 11: Recordatorio de como se miden los angulos para algun punto que pertenece al LGR

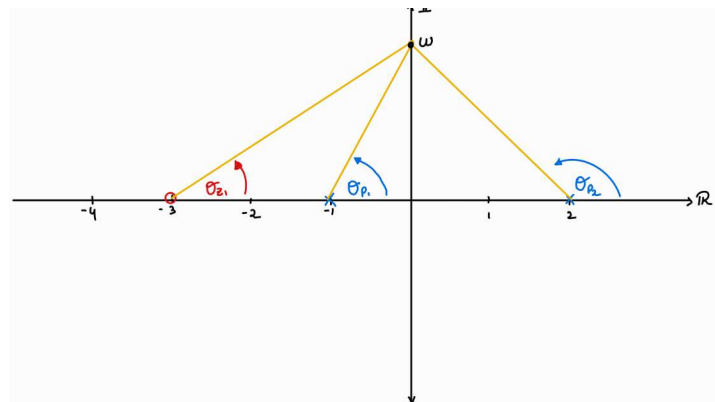


Figura 12: Angulos para la funcion de transferencia vista con anterioridad

$$\tan(\theta_{p_1}) = \frac{w}{1} \quad (84)$$

$$\tan(\theta_{p_2}) = \frac{w}{2} \quad (85)$$

$$\tan(\theta_{z_1}) = \frac{w}{3} \quad (86)$$

Con lo que sus respectivos angulos corresponderan a:

$$\theta_{p_1} = \text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) \quad (87)$$

$$\theta_{p_2} = 180 - \text{atan}\left(\frac{w}{2}\right) \quad (88)$$

$$\theta_{z_1} = \text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) \quad (89)$$

Con lo que reemplazando en la condicion de angulo se obtiene que:

$$\text{atan}\left(\frac{w}{3}\right) - (\text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) + 180 - \text{atan}\left(\frac{w}{2}\right)) = 180 \quad (90)$$

$$\text{atan}\left(\frac{w}{3}\right) - \text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) - 180 + \text{atan}\left(\frac{w}{2}\right) = 180 \quad (91)$$

$$\text{atan}\left(\frac{w}{3}\right) - \text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) + \text{atan}\left(\frac{w}{2}\right) = 360 \quad (92)$$

Donde ademas sabemos que 360 es equivalente a 0, por lo que se obtiene que:

$$\text{atan}\left(\frac{w}{3}\right) - \text{atan}\left(\frac{w}{1}\right) + \text{atan}\left(\frac{w}{2}\right) = 0 \quad (93)$$

Luego queda por resolver la ecuacion , la cual entrega tres soluciones:

$$w_1 = 0 \quad (94)$$

$$w_2 = +j \quad (95)$$

$$w_3 = -j \quad (96)$$

Mismas obtenidas con anterioridad.