

Compensadores de atraso en el dominio de la frecuencia

CONTROL AUTOMÁTICO

ESCUELA DE ELECTRÓNICA

I SEMESTRE 2020

ING. LUIS MIGUEL ESQUIVEL SANCHO

Contenido

- Estrategia
- Conceptos
- Corrección del error de estado estacionario
- Corrección del ancho de banda
- Corrección del margen de fase
- Ejemplos y ejercicios

Ya que existe interacción entre los diferentes compensadores, procederemos a escoger una secuencia de cálculo que minimice tal interacción.

- Se corregirá primero el error de estado estacionario procurando que la influencia negativa de esta etapa se mantenga lejos de las frecuencias de interés para el margen de fase
- Se corregirán luego las características dinámicas con un compensador cuya ganancia a baja frecuencia sea unitaria (0dB) para que no afecte el error de estado estacionario previamente compensado

Corrección del error de estado estacionario

Una vez determinada la ganancia de baja frecuencia necesaria para corregir el error de estado estacionario, se tiene la posibilidad de aplicarla de tres formas:

Ganancia estática:

- Usualmente disminuye el margen de fase y aumenta el ancho de banda. También amplifica el ruido de alta frecuencia.

Compensador de atraso:

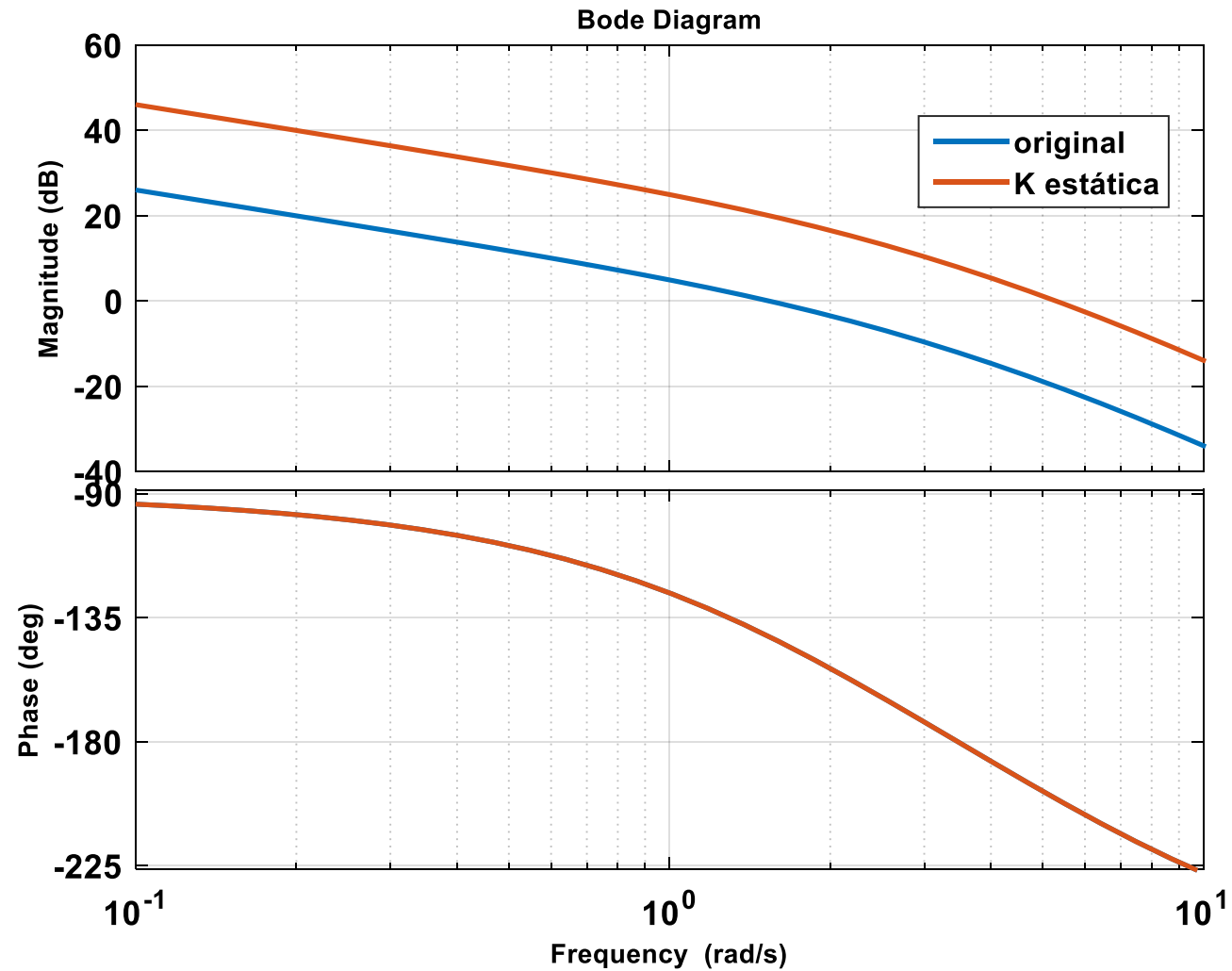
- Se comporta como un filtro pasa-bajas. Su influencia negativa en el margen de fase y ancho de banda puede minimizarse

Compensador de atraso + ganancia estática

Corrección del error de estado estacionario con K estática

- Generalmente es usada cuando se desea corregir el error de estado estacionario y además aumentar el ancho de banda; o no se pueden medir el ancho de banda y el margen de fase (no tenemos cruce ganancia a $0dB$)
 - Como la ganancia afecta todas las frecuencias, la gráfica de magnitud sube (para ganancias mayores que la unidad) o baja, sin afectar su forma o la fase.
 - Se debe de tomar en cuenta que aumentar la ganancia estática usualmente disminuye el margen de fase; así que debemos eventualmente aplicar una corrección a éste.
 - Se aplica la ganancia K sumando su valor en dB ($20 \log_{10} K [dB]$) a la escala de magnitud. Por ejemplo, si K se aumenta en 10, a la escala de magnitud debe sumársele $+20dB$.
 - Obtenemos nuevos valores para el ancho de banda y el margen de fase

Corrección del error de estado estacionario con K estática

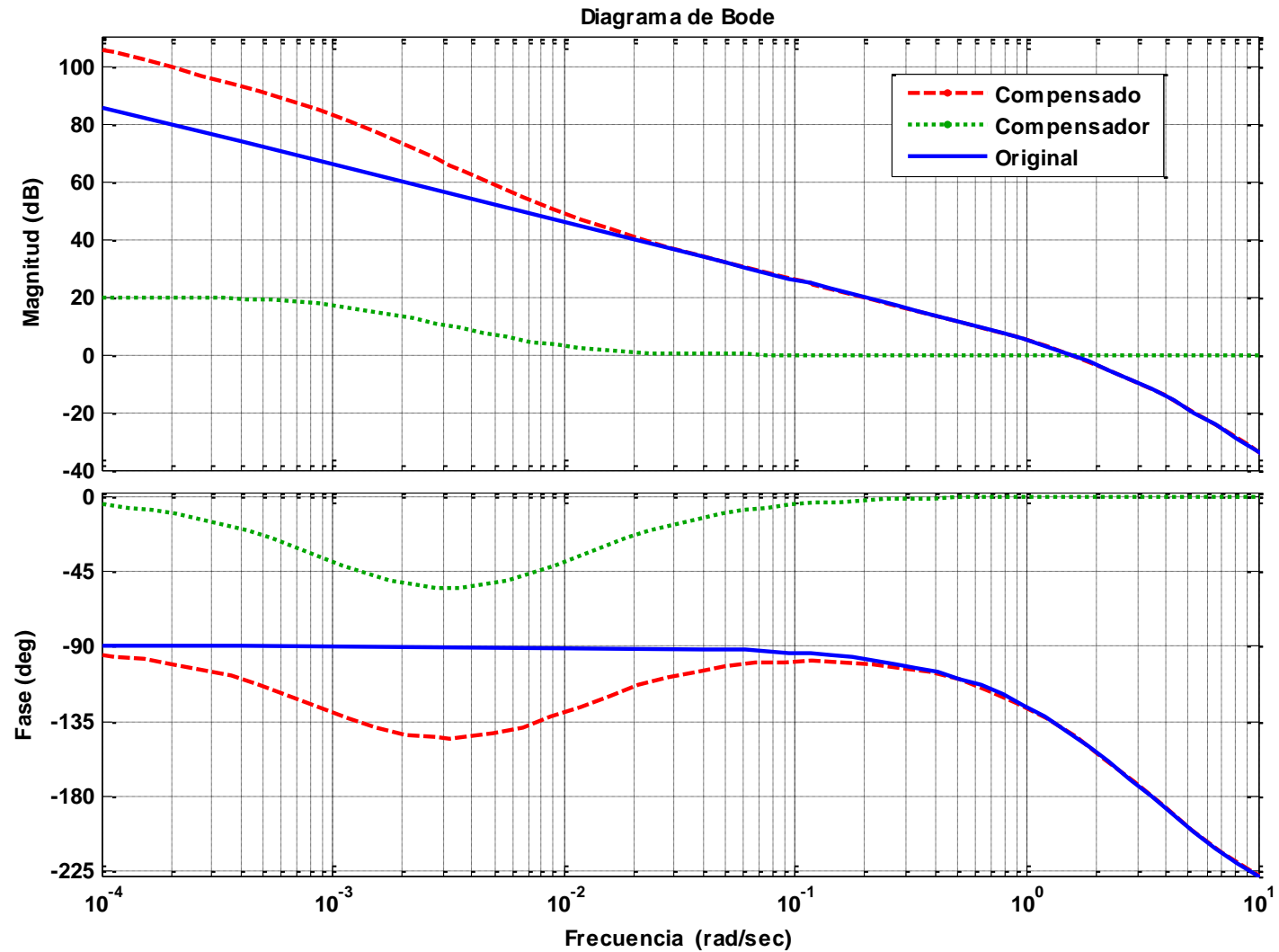


Corrección del e_{ss} con un compensador de atraso

Generalmente se usa cuando no deseamos afectar el ancho de banda o el margen de fase.

- Ubicamos el cero del compensador y luego calculamos el polo a través de la relación $K = z/p$, donde K es la ganancia deseada de esta etapa.
- Para disminuir su influencia negativa el cero se ubica, dependiendo del tipo de sistema:
 - Tipo 0: En un valor menor a la frecuencia en la cual la fase alcanza -45° .
 - Tipo 1 y superior: En un valor muy cercano a frecuencia cero, formando un dipolo con el polo.

Corrección del e_{ss} con un compensador de atraso

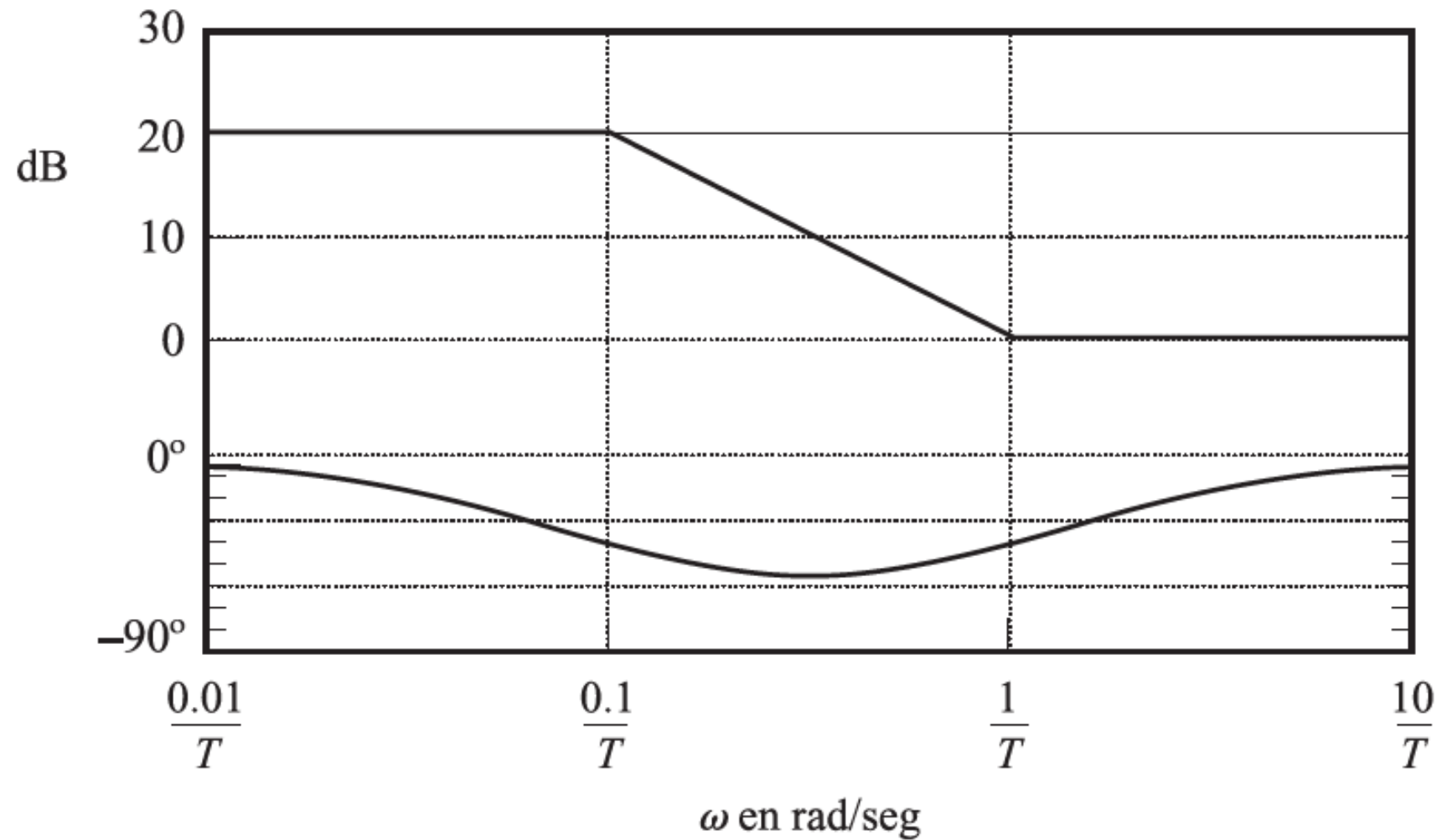


El compensador de Atraso

En el plano complejo, un compensador de retardo tiene un cero en $s = 1/T$ y un polo en $s = 1/(\beta T)$.
El polo está localizado a la derecha del cero.

$$G_c(s) = K_c \beta \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1} = K_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \quad (\beta > 1)$$

El compensador de Atraso Diagrama de Bode



Fórmulas del compensador de atraso

$$K_{LAG}(s) = \frac{(s - z_0)}{(s - p_0)} = \frac{(s + \frac{1}{aT})}{(s + \frac{1}{T})}; a < 1, z_0 = -1/aT, p_0 = -1/T$$

El compensador de atraso tiene ganancia alta a bajas frecuencias.

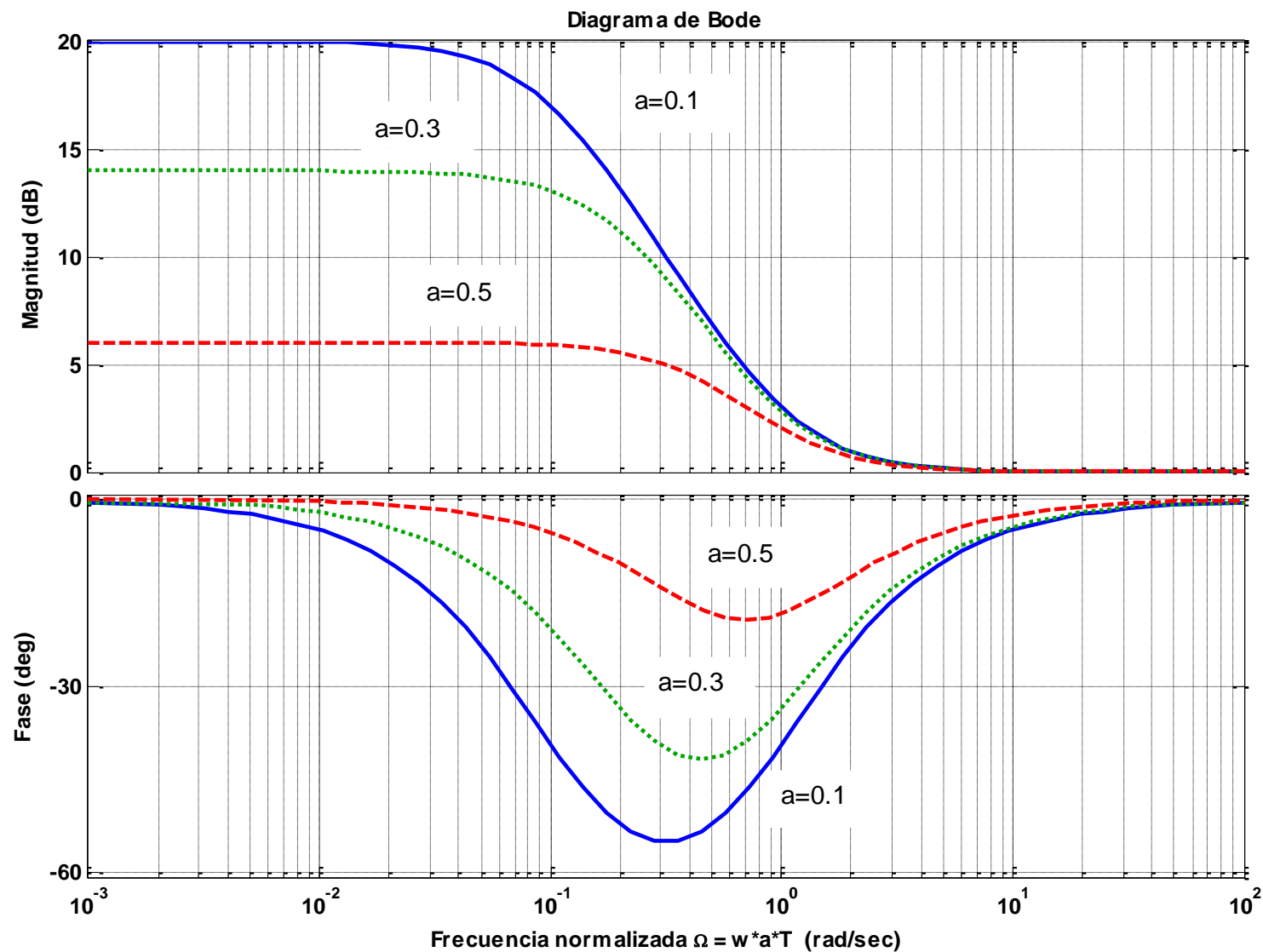
$$K_{LAG}(j\omega) = \frac{1}{a} \cdot \frac{1 + j\omega aT}{1 + j\omega T}; a < 1$$

La ganancia es unitaria en altas frecuencias (las frecuencias de cruce de ganancia)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_{LAG}(t) = \lim_{j\omega \rightarrow 0} K_{LAG}(j\omega) = \frac{1}{a}$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} K_{LAG}(t) = \lim_{j\omega \rightarrow \infty} K_{LAG}(j\omega) = 1$$

Gráficas de Bode del compensador de atraso



Corrección del e_{ss} con una combinación K + comp. atraso

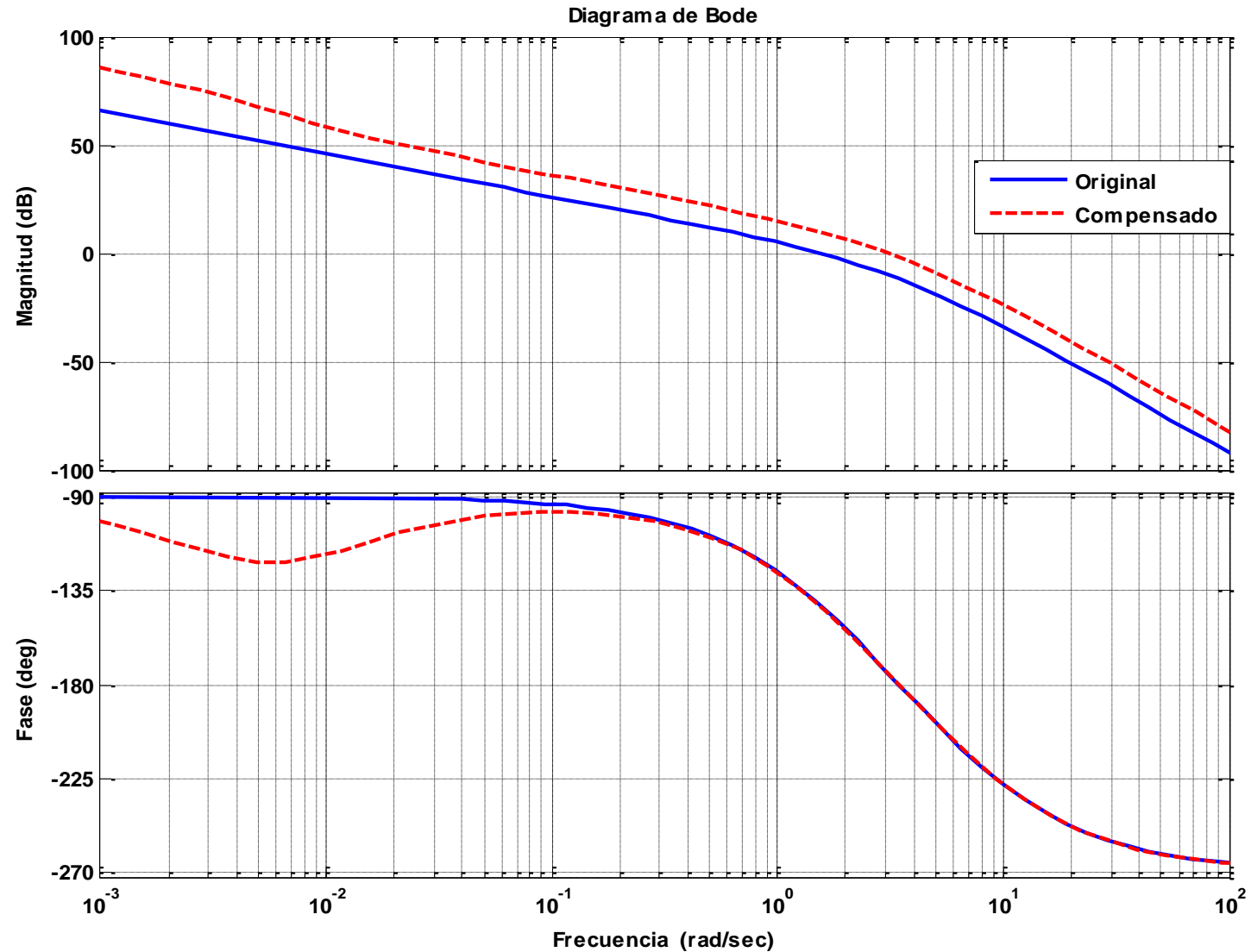
Se usa cuando se requiere aumentar el ancho de banda; pero no afectar demasiado el margen de fase

Se divide la ganancia total en dos partes:

- Una ganancia estática suficiente para ubicar el ancho de banda o margen de fase en el valor deseado
- El resto de la ganancia se aplica como compensador de atraso

Para cada parte se usa la técnica descrita antes

Corrección del e_{ss} con una combinación K + comp. atraso



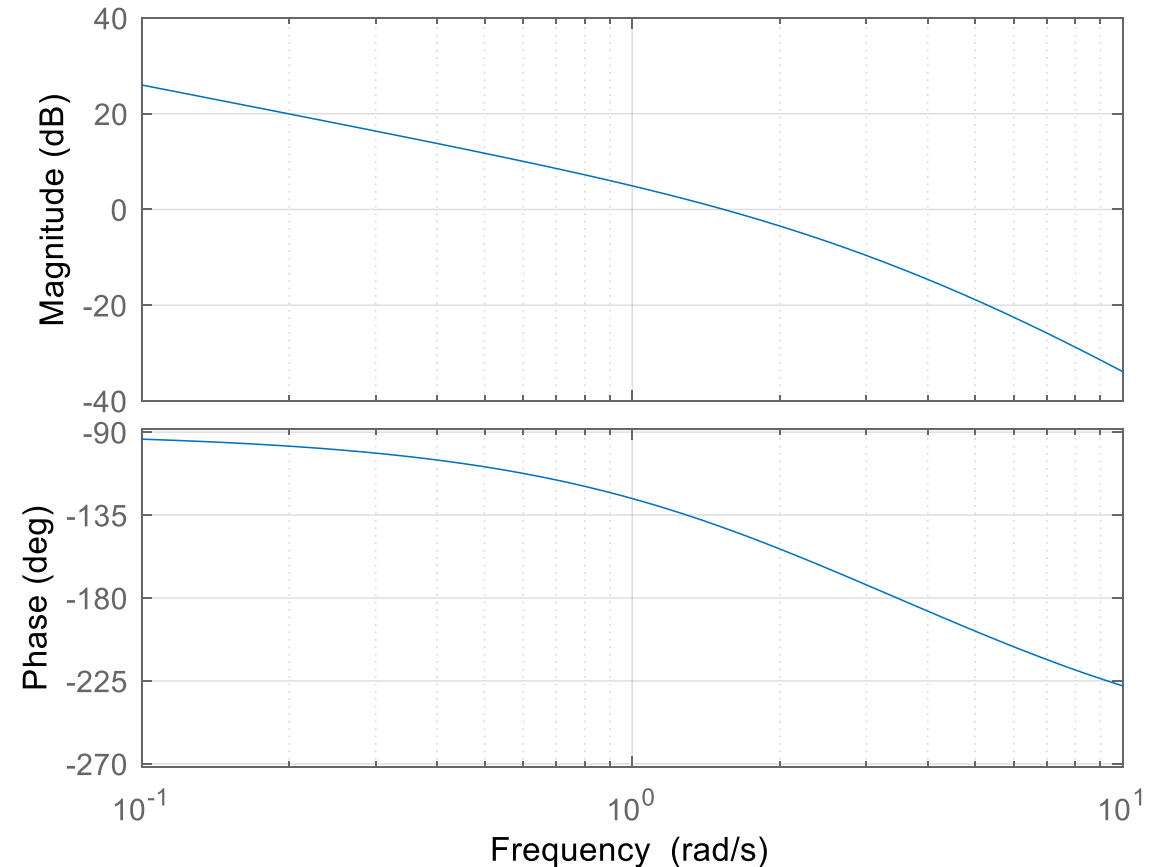
Ejemplo 1. Descripción

Dado el sistema

$$G(s)H(s) = \frac{24}{s(s+2)(s+6)} \quad H(s) = 1$$

- Cuya gráfica de bode se muestra en la siguiente figura.
- El error de estado estacionario debe ser menor que o igual a $\pi/10 \text{ rad/s}$, cuando la entrada es una rampa con pendiente $2\pi \text{ rad/s}$
- Resuelva usando ganancia estática y compensador de atraso. Compare los resultados

Diagrama de Bode: Gm=12dB(en 3.46 rad/s), Pm=38.1deg(en 1.54 rad/s)



Ejemplo 1. Usando K estática

$$K_{v1} = 10^{\left(\frac{+6dB}{20dB}\right)}$$

$$K_{v1} = 2$$

$$K_{v2} \geq \frac{A}{(\pi/10)} = \frac{2\pi}{(\pi/10)}$$

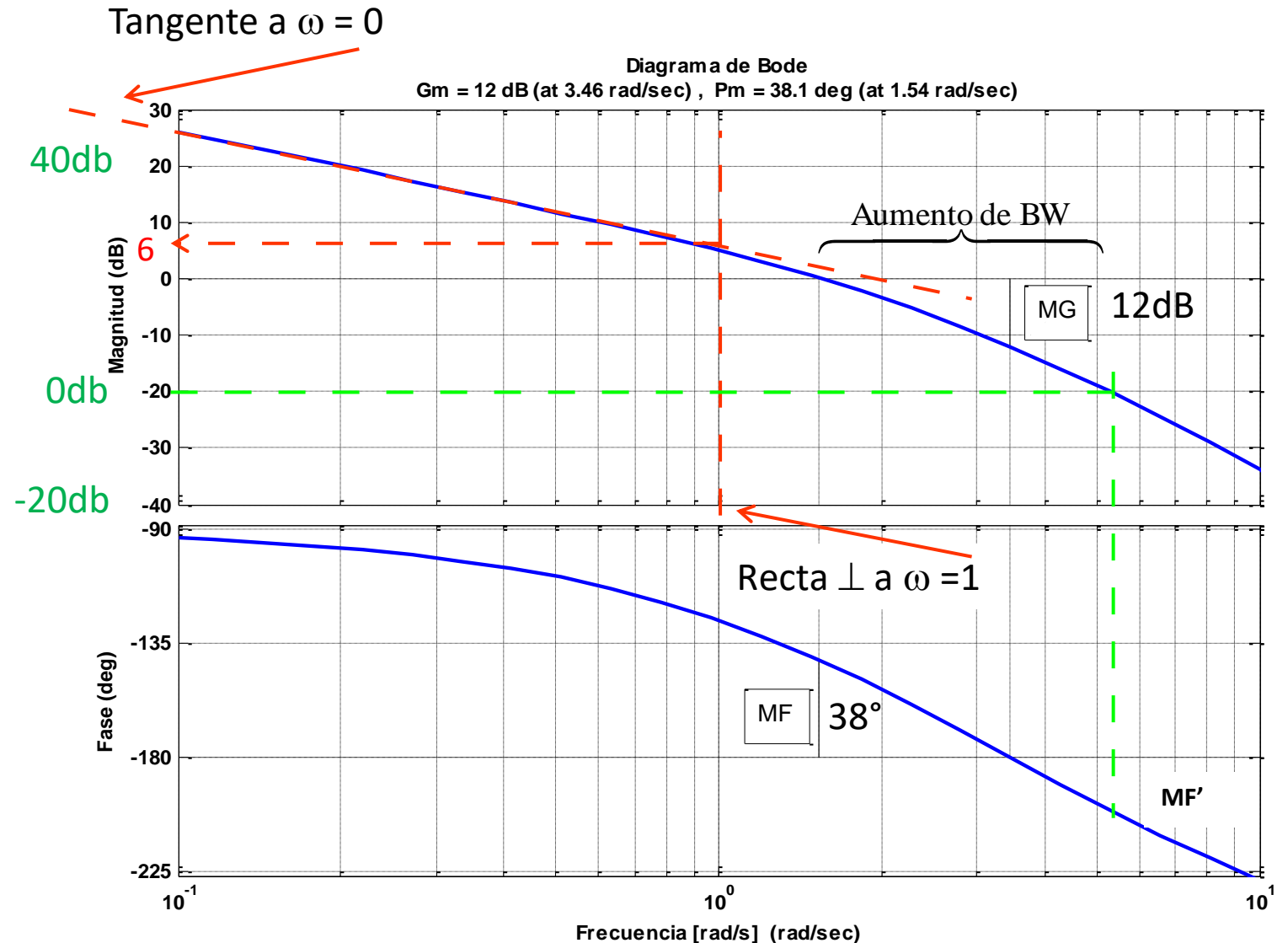
$$K_{v2} \geq 20$$

$$K_c = \frac{K_{v2}}{K_{v1}} = \frac{20}{2} = 10$$

$$K_c[dB] = 20 \text{ dB}$$

$$MF' = -20^\circ$$

El margen de fase será negativo,
por lo que debe mejorarse mucho



Ejemplo 1. Usando compensador de atraso

$$K_{v1} = 10^{\left(\frac{+6dB}{20dB}\right)}$$

$$K_{v1} = 2$$

$$K_{v2} \geq \frac{A}{(\pi/10)} = \frac{2\pi}{(\pi/10)}$$

$$K_{v2} \geq 20$$

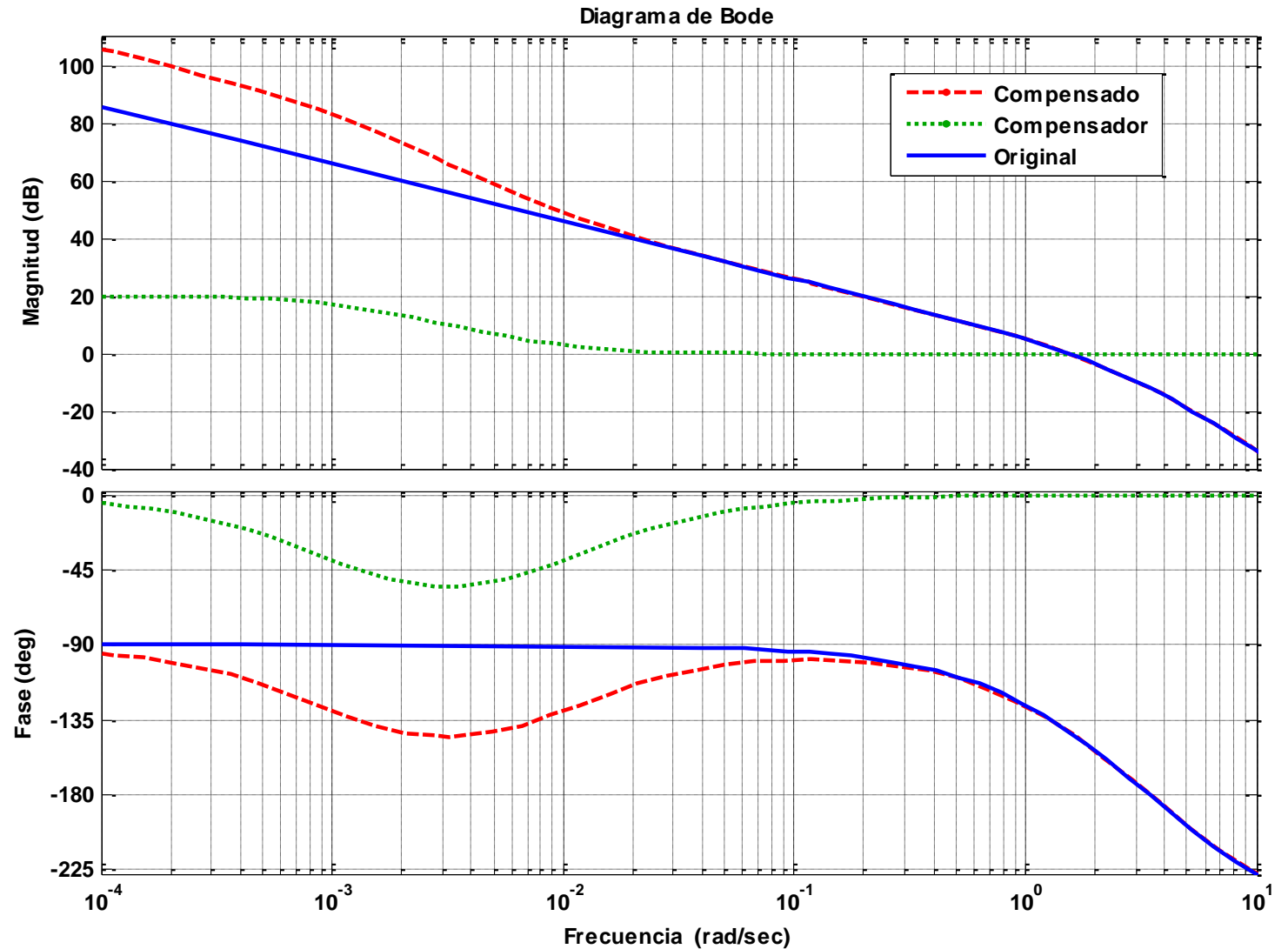
$$K_c = \frac{K'_{v2}}{K_{v1}} = \frac{20}{2} = 10$$

$$K_c = \frac{z}{p} = 10$$

$$z = -0.01 = 10p$$

$$p = -0.001$$

$$K_{lag}(s) = \frac{(s + 0.01)}{(s + 0.001)}$$



Ejemplo 1. Usando $K + K_{lag}(s)$

$$K_T = 20dB$$

$$K_T = K * z/p = 10$$

$$K_c = 3.16 (10dB)$$

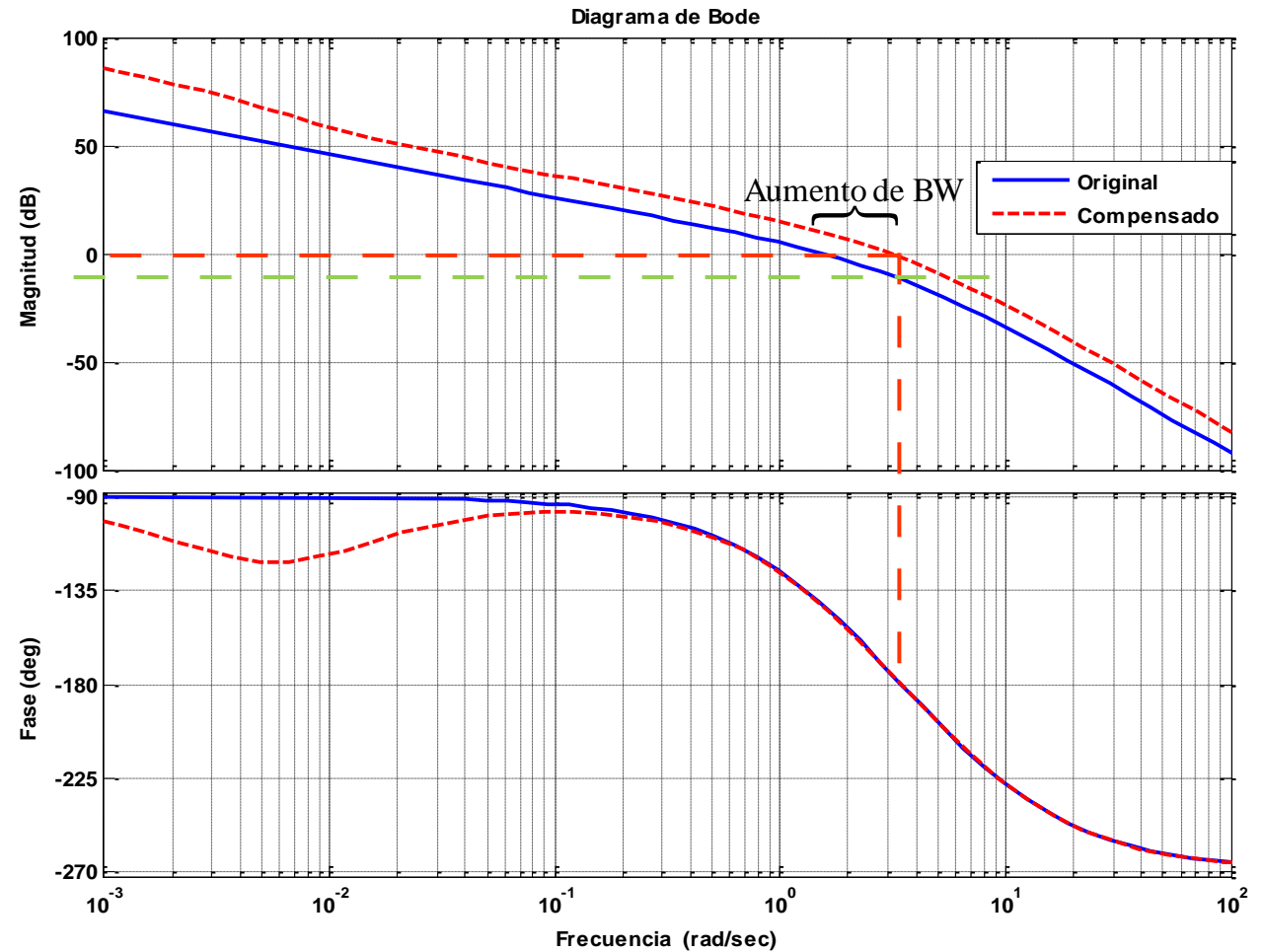
$$z/p = 3.16 (10dB)$$

$$\frac{z}{p} = 3.16$$

$$z = -0.01 = 3.16p$$

$$p = -0.00316$$

$$K_{lag}(s) = \underbrace{3.16 \frac{(s + 0.01)}{(s + 0.00316)}}_{K_C \frac{(s - z_0)}{(s - p_0)}}$$



Ejemplo 1. Análisis de resultados

- Al utilizar solo ganancia estática, el sistema estable, con margen de fase positivo se vuelve inestable ($MF' = -20^\circ$)
- Al utilizar un compensador de atraso, correctamente ajustado, no se afecta ni el ancho de banda ni se afecta el margen de fase. Las frecuencias de cruce de ganancia y fase permanecen invariables
- Escogiendo adecuadamente el dipolo, el atraso de fase introducido discurre en frecuencias muy por debajo de las frecuencias de interés para BW y MF .
- Utilizando una combinación de ganancia y compensador de atraso se pueden evitar muchos de los efectos negativos de la ganancia estática y modificar (aumentar) el ancho de banda

Referencias

- [1] Ogata, Katsuhiko. „**Ingeniería de Control Moderna**“, Pearson, Prentice Hall, 2003, 4ª Ed., Madrid.
- [2] Kuo, Benjamin C.. „**Sistemas de Control Automático**“, Ed. 7, Prentice Hall, 1996, México.
- [3] Dorf, Richard, Bishop Robert. „**Sistemas de control moderno**“, 10ª Ed., Prentice Hall, 2005, España