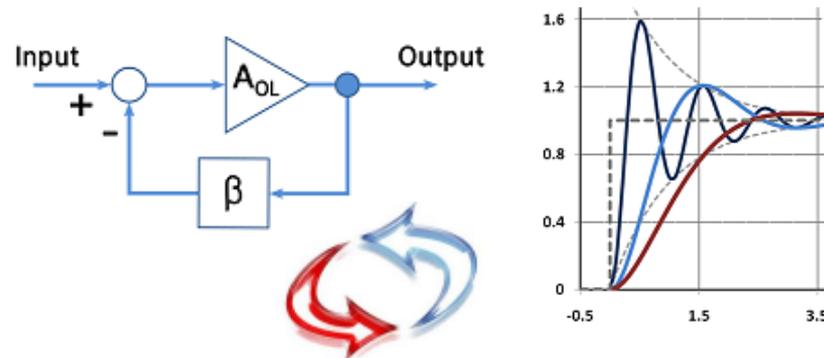




Tecnología Electrónica

Tema 2: **Realimentación y estabilidad.**

Estabilidad y compensación. (y 3)



1. Introducción.
2. Teoría básica de realimentación
 1. Fundamentos y definiciones
 2. Ventajas de la realimentación negativa
 3. Topologías de realimentación
3. Realimentación con efectos de carga
 1. Efectos de carga.
 2. Métodos de resolución de circuitos realimentados
- 4. Estabilidad en circuitos realimentados**
 - 1. Análisis de la estabilidad.**
 - 2. Métodos de compensación**



4. Estabilidad y compensación

4.1 Estabilidad en amplificadores realimentados

4.1.1. Dependencia con la frecuencia de A y β

4.1.2. Criterio de estabilidad de Nyquist

4.2 Estabilidad y respuesta temporal

4.3 Análisis de la estabilidad usando diagramas de Bode

4.3.1 Márgenes de ganancia y de fase

4.3.2. Análisis de estabilidad con β constante

4.4. Condiciones de estabilidad

Estabilidad en función del número de polos de $A(\omega)$

4.5. Métodos de compensación

4.5.1. Por desplazamiento de polo

4.5.2. Por adición de polo

4.5.3. Compensación Miller

□ Objetivo

- Identificar las causas y efectos de la inestabilidad de amplificadores realimentados.
- Conocer la relación existente entre la respuesta en frecuencia y la estabilidad de un amplificador.
- Analizar los márgenes de estabilidad de un amplificador dado.
- Determinar la compensación necesaria para ajustar las características de un amplificador al margen de estabilidad definido

□ Conocimientos previos

■ Asignaturas previas:

- *Amplificador operacional. Subsistemas básicos basados en el AO ideal. Comportamiento básico en frecuencia. Efectos no ideales. Filtros básicos basados en AO.*

- *Análisis de circuitos: análisis de cuadripolos*

■ Tema de respuesta en frecuencia:

- *Polos y ceros. Diagramas de bode*
- *Concepto de polo dominante*

■ Tema de realimentación negativa:

- *Teoría de realimentación en circuitos ideales*
- *Teoría de realimentación en circuitos reales*

❑ Material de estudio:

■ Malik,

- *capítulo 9, sección 9.6. Teoría y ejercicios.*

→ **Presentación animada** (formato *.pps), disponible en el Aula Virtual:

- *importante para visualizar mejor las técnicas gráficas empleadas.*

❑ Material complementario

■ Sedra-Smith

- *capítulo 8, secciones 8.9 y 8.10. Estabilidad y ubicación de polos.*

■ Hambley,

- *capítulo 9, secciones 9.7 a 9.9. Ubicación de polos y compensación*

❑ Otros:

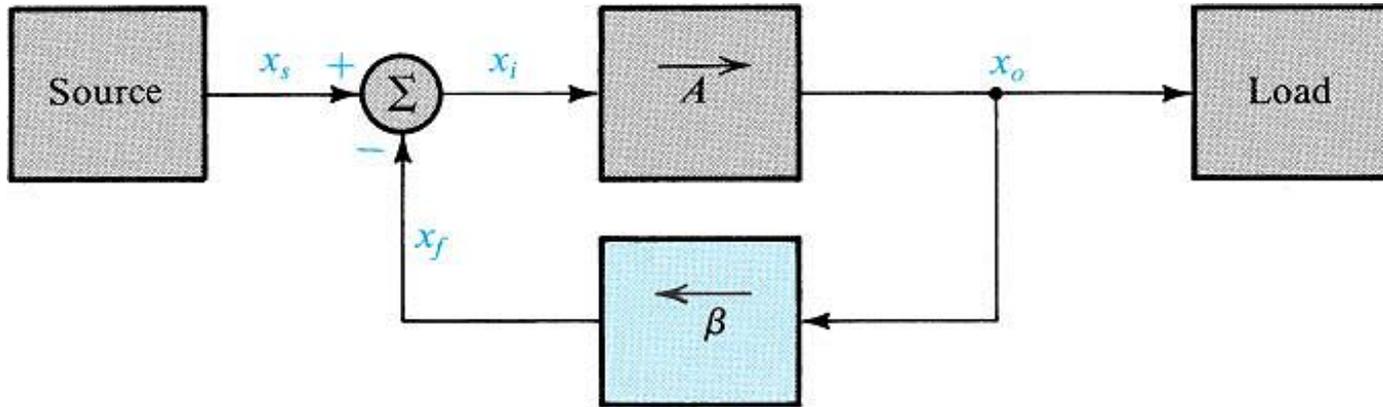
■ Gráficas extraídas de los textos detallados.

■ Trabajos de documentación y elaboración de materiales:

- *Profesores del Dpto. de Electrónica de la UAH (en colaboración con profesores del CEAN de la UPM)*



4.1.1. Dependencias con la frecuencia en A_f



- En general, tanto A como β pueden depender de ω
 - Esto es: tendrán módulo y fase, cambiantes con la frecuencia...

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta(s)}$$

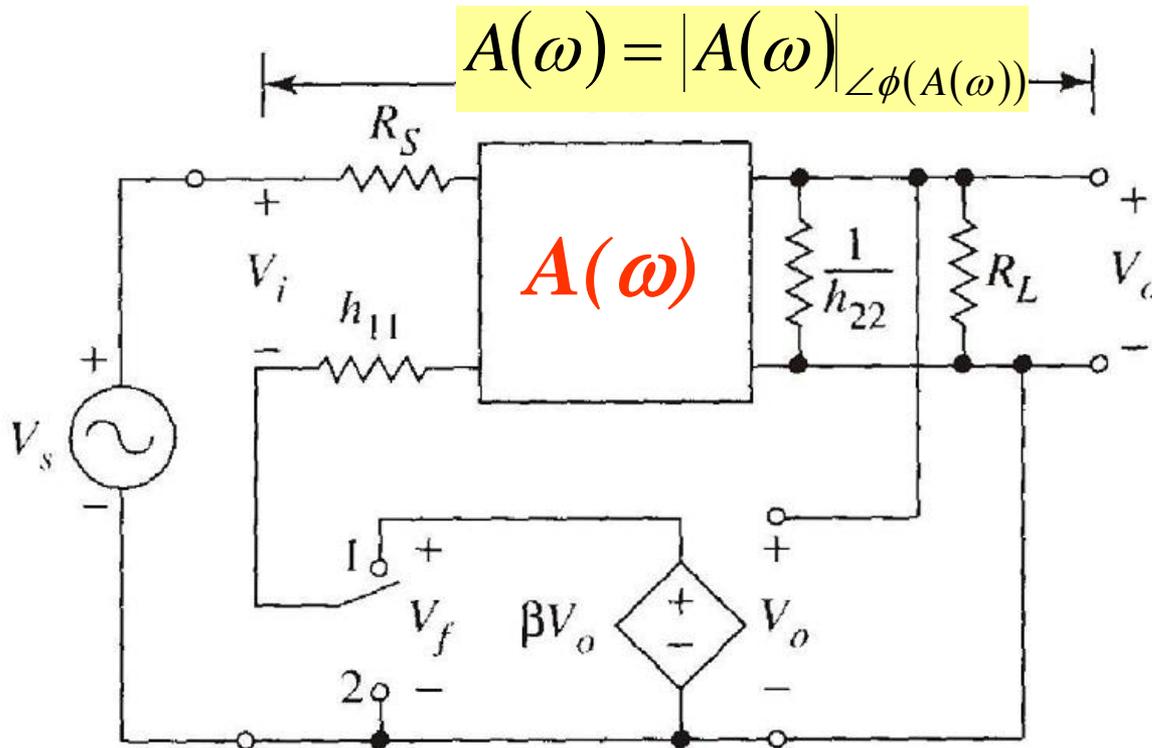
- El denominador de A_f depende de la ganancia de lazo $L=A\beta$
 - Podrá haber alguna frecuencia en que: $L(\omega) = A\beta(\omega) < 0$
 - Si $L(\omega)$ se hace negativa equivale a un *cambio de signo* en el restador, **entonces** la realimentación pasa a ser **positiva**



4.1.1. De realimentación negativa a positiva



- ❑ Interpretación de la ganancia de lazo, $L=A\beta$
 - Equivale a “abrir” la conexión de realimentación (*switch en 2*)
 - Al recorrer el lazo ¿cómo sería la señal V_f respecto a V_s y V_i ?



$$A(\omega) = |A(\omega)| \angle \phi(A(\omega))$$

$$V_i = V_s$$

$$V_o = A(\omega) \cdot V_s$$

$$V_f = \beta \cdot V_o = A(\omega)\beta \cdot V_s$$

$$V_i = V_s + V_f = V_s \text{ ¿ } \pm ? kV_s$$



4.1.2. Criterio de estabilidad



- ❑ Criterio de estabilidad de Nyquist:
 - Sobre la ganancia de lazo $L(\omega)$
 - Inestabilidad \rightarrow respuesta **creciente** *si la realimentación es positiva*
 - Condición necesaria y suficiente para inestabilidad:

$$A_f(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 + L(\omega)}$$

$$\exists \omega_0 \rightarrow |L(\omega_0)| \geq 1 \quad \text{con} \quad \phi(L(\omega_0)) = \pm 180^\circ$$

- ❑ Se establecen dos condiciones simultáneas
 - Condición de ganancia (módulo)
 - Condición de fase
- ❑ Sobre la ganancia de lazo, L
 - Depende de A y de la **cantidad de realimentación**: β

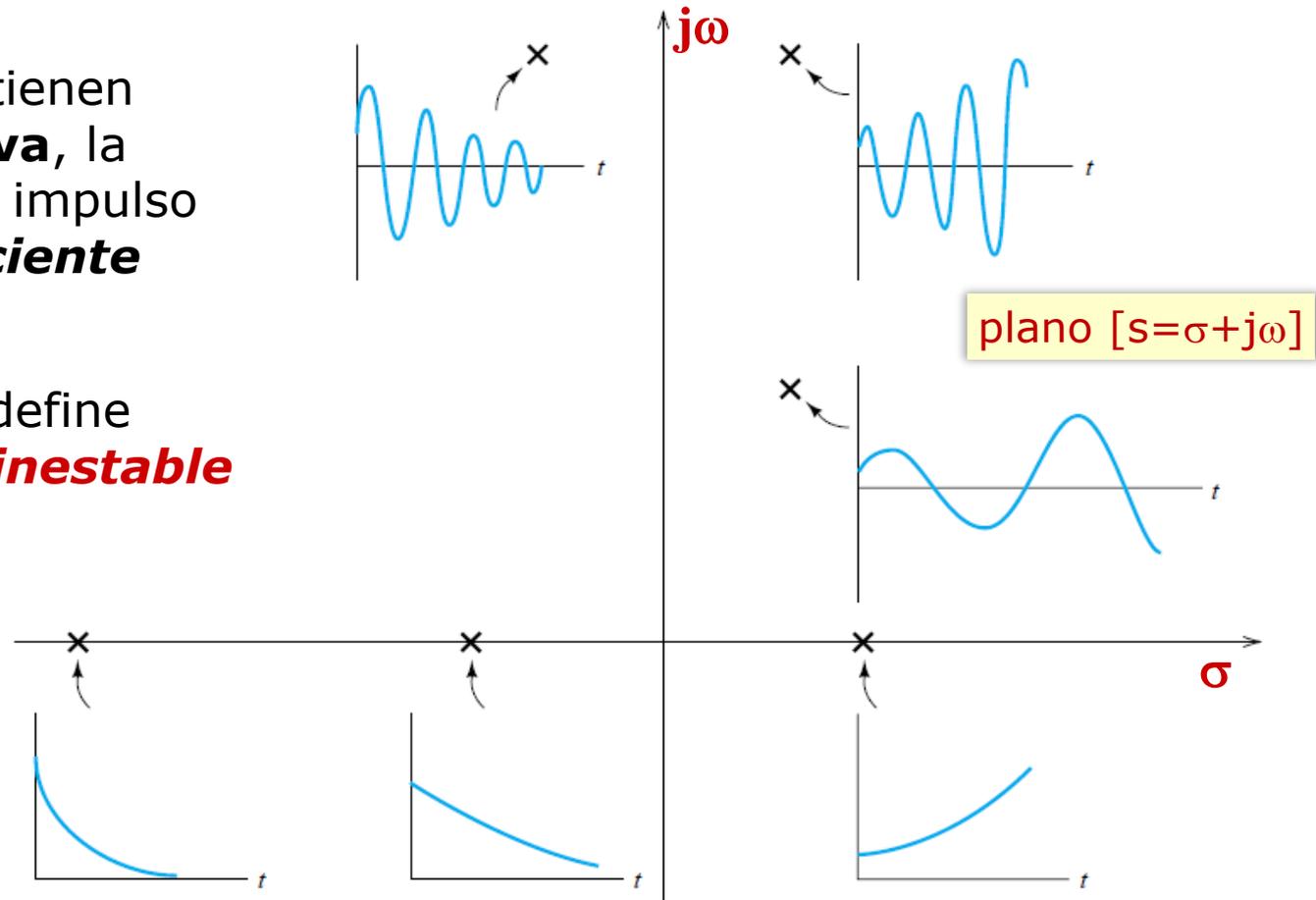


4.2. Estabilidad y respuesta temporal



- La respuesta temporal depende de los polos de A_f
 - En concreto de su posición respecto del eje $j\omega$

- Si los polos de A_f tienen **parte real positiva**, la respuesta ante un impulso transitorio es **creciente con el tiempo**.
- Esto es lo que se define como **respuesta inestable**





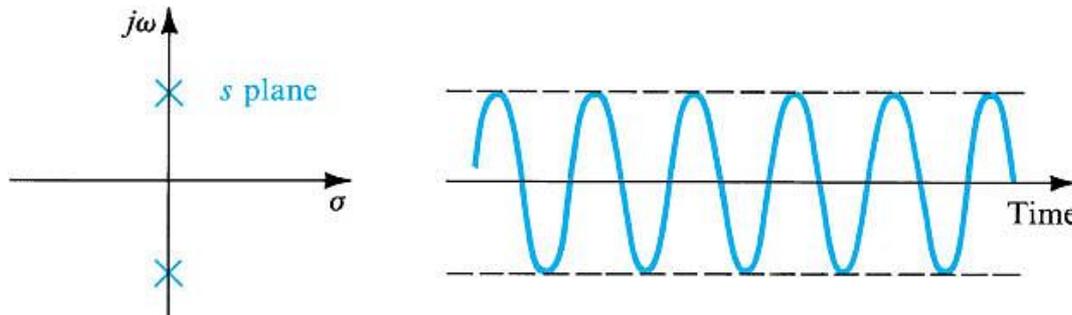
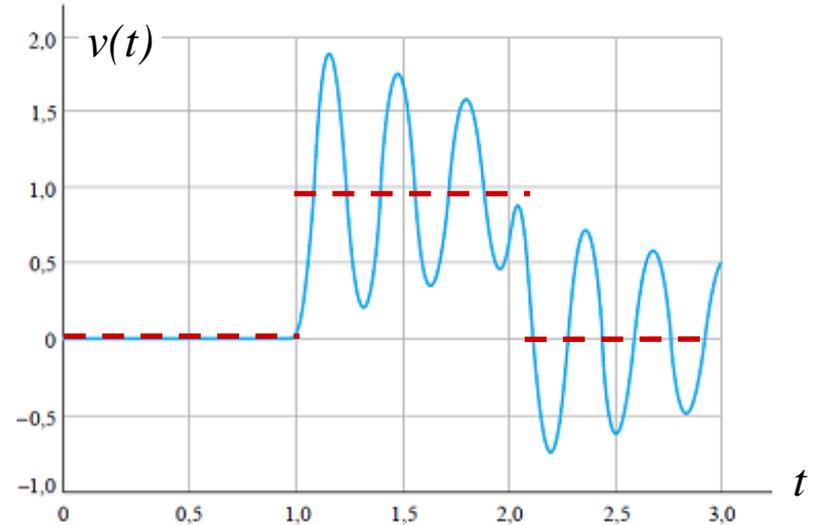
4.2. Estabilidad y respuesta temporal



- ❑ ¿Es *buena* o *mala* la inestabilidad?
 - ¡Depende del objetivo final del amplificador realimentado!

- ❑ En amplificación
 - Es indeseable
 - Incluso siendo estable, el amplificador puede ser ***insuficientemente estable*** (tiene sobre-oscilaciones)

- ❑ En generadores de señal
 - Efecto buscado en ***osciladores senoidales*** (genera una señal a ω_0)





4.3. Análisis de la estabilidad



- En un determinado amplificador, queremos saber:
 - Si será **inestable** o no.
 - Caso de ser estable, si será **suficientemente estable**
 - *Criterio relacionado con su respuesta temporal como amplificador*
- Datos disponibles:
 - Ganancia del amplificador **A**
 - Cantidad de realimentación **β**
 - O alguna relación entre las anteriores (**L** , **A_f**)
- Análisis mediante diagramas de Bode:
 - Grado de (in)estabilidad: respecto al **criterio de Nyquist**

$$|L(\omega_0)| \geq 1 \quad \text{con} \quad \phi(L(\omega_0)) = \pm 180^\circ$$

- Medidas:

- **Margen de ganancia (MG)**

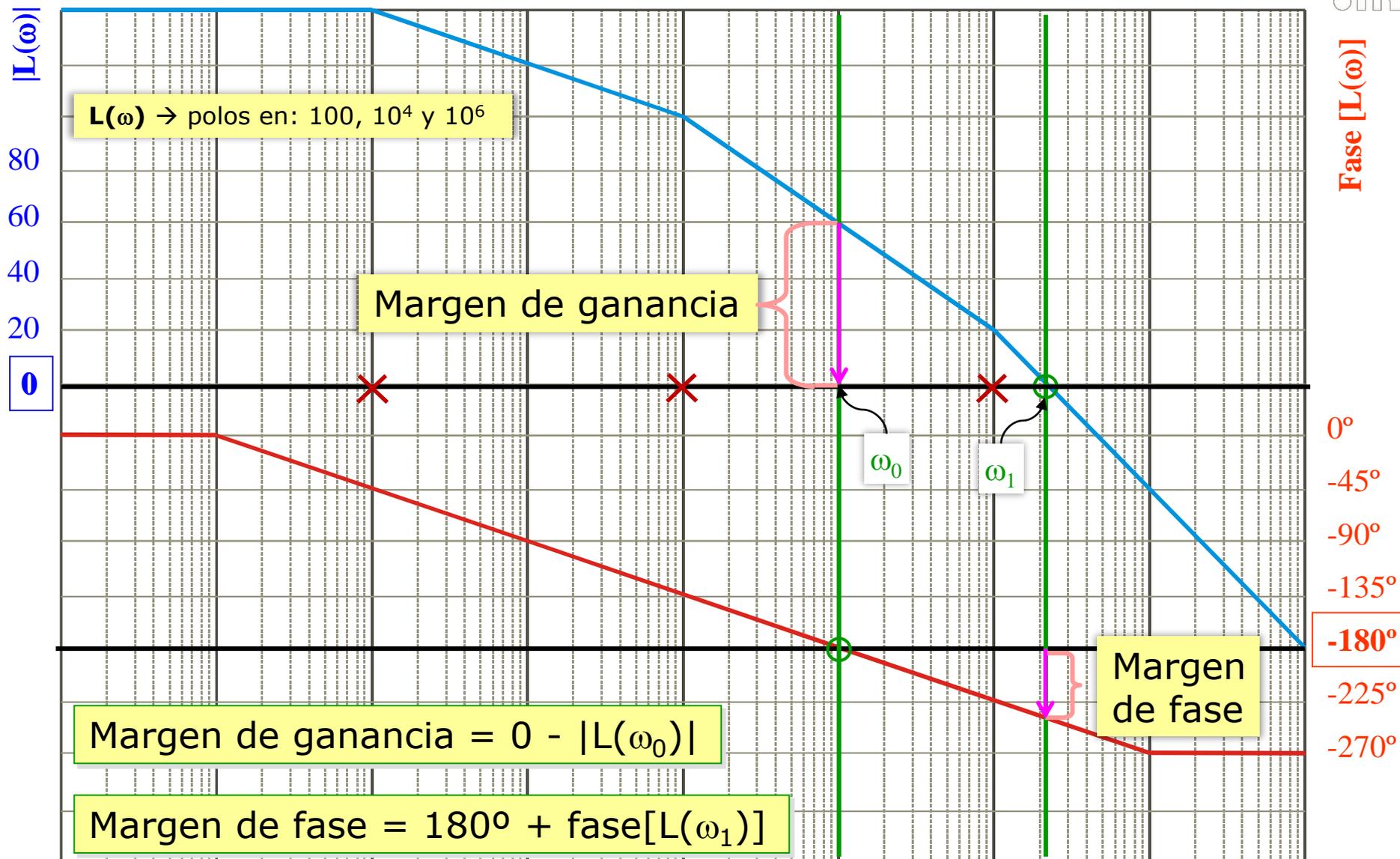
$$MG = 0 - |L(\omega_0)| \quad \leftarrow \quad \varphi_L(\omega_0) = 180^\circ$$

- **Margen de fase (MF)**

$$MF = 180^\circ + \varphi(\omega_1) \quad \leftarrow \quad L(\omega_1) = 0\text{dB}$$



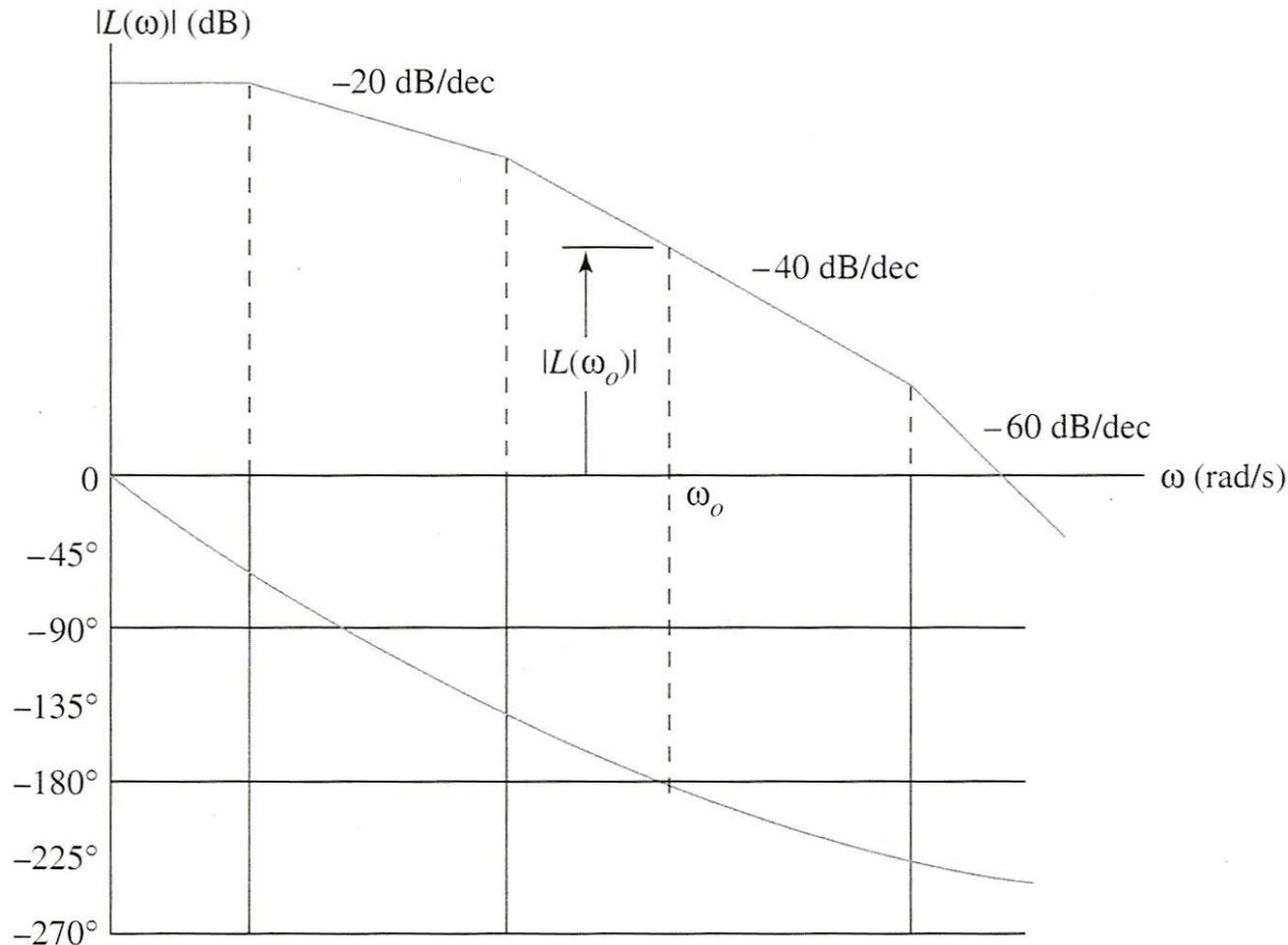
4.3.1. Márgenes de ganancia y fase: en $L(\omega)$



4.3.1. Criterio: la ganancia de lazo $L(\omega)$



- Ejercicio 1: justifique si este amplificador es estable

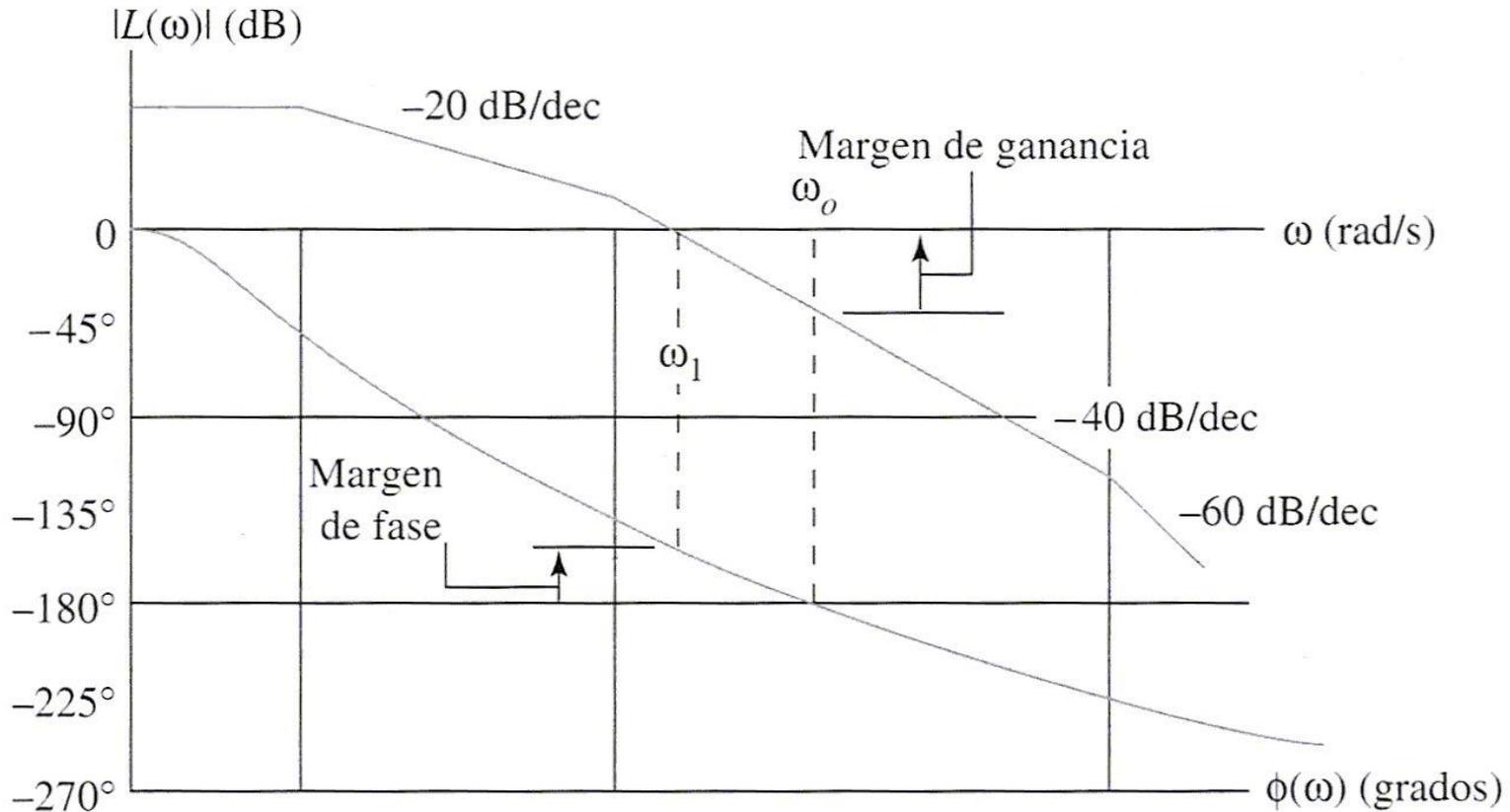


(a)

4.3.1. Criterio: la ganancia de lazo $L(\omega)$



- Ejercicio 2: justifique si este amplificador es estable



(b)

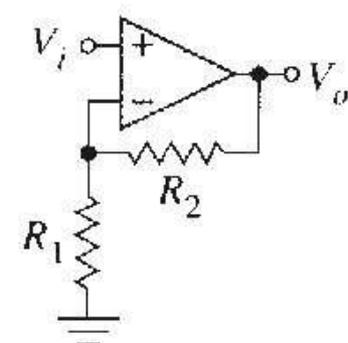
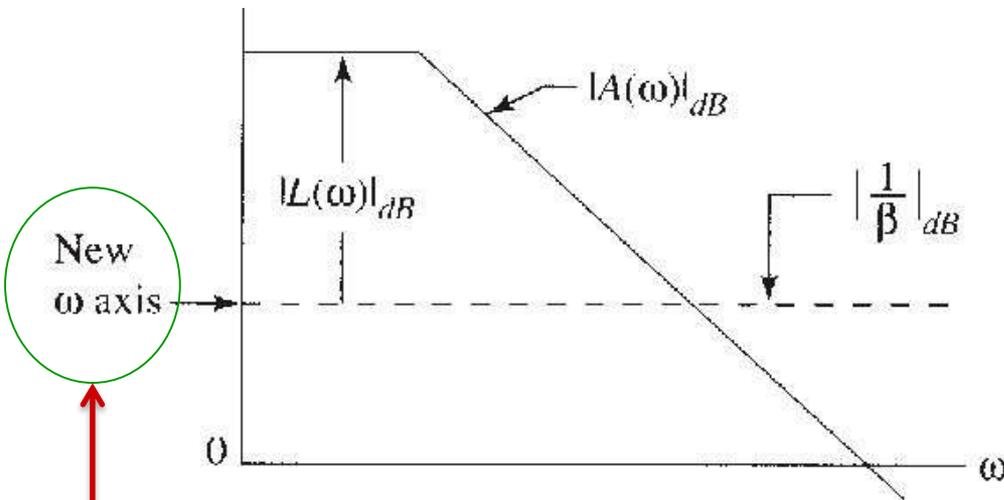


4.3.2. Análisis con β constante

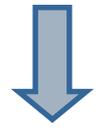


- En muchos casos, la red β es constante (resistores)
 - Se puede conocer $L(\omega)$ directamente con $A(\omega)$ y la $A_{f, mid}$ objetivo

$$L(\omega) = A(\omega)\beta \Rightarrow L(\omega)|_{dB} = A(\omega)|_{dB} + \beta|_{dB} = A(\omega)|_{dB} - \frac{1}{\beta}|_{dB}$$



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$A_{f, mid}|_{A\beta \gg 1} \approx \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

- Con β constante, $L(\omega)$ sólo se diferencia de $A(\omega)$ en la posición del eje a 0dB.
- Conclusión \rightarrow *isólo cambiamos el eje 0dB!*



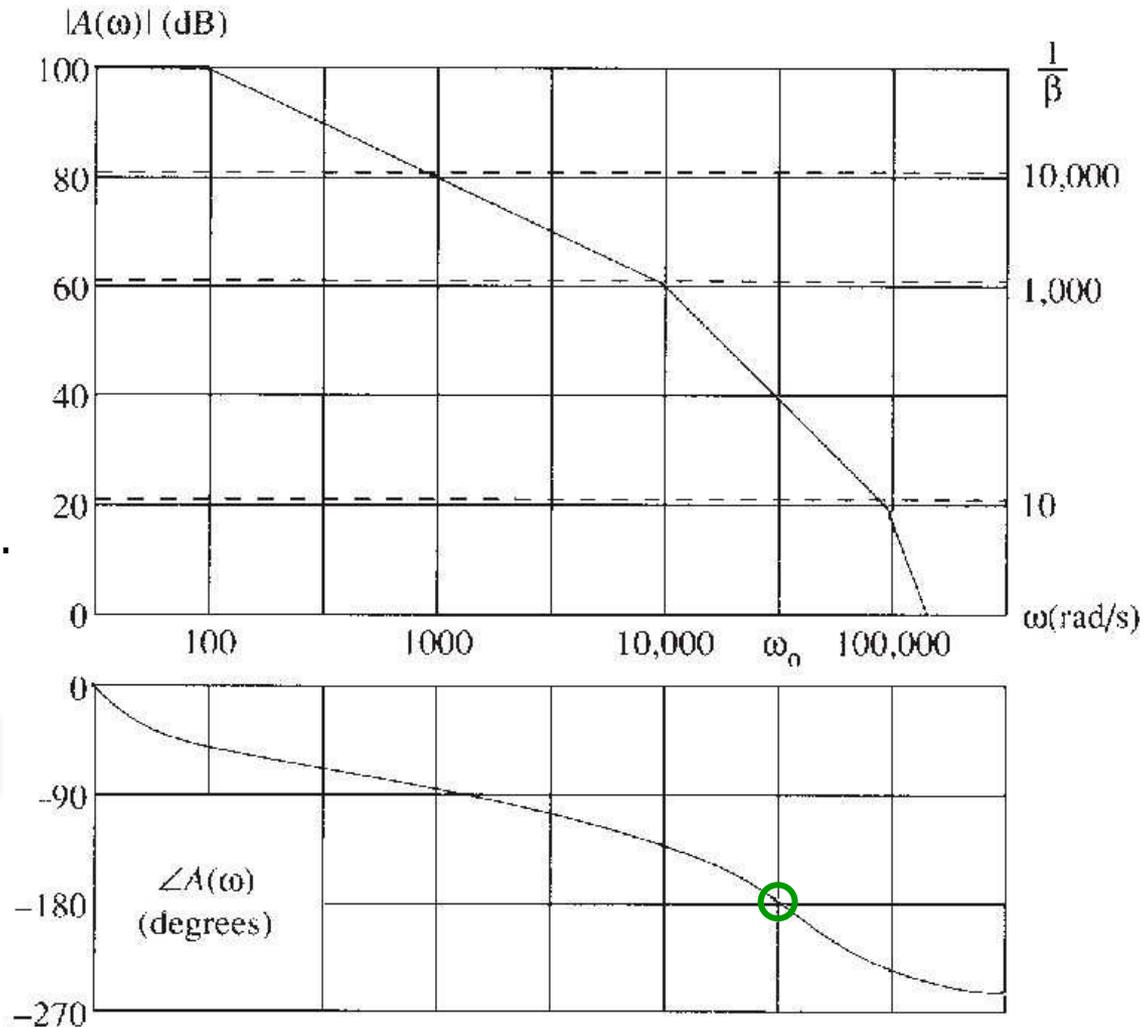
4.3.2. Análisis con β constante



Ejemplo 9.11

- ❑ Queremos saber el grado de estabilidad de un amplificador en función del valor de β .
- ❑ Observaremos el *Margen de Ganancia*.

Fase = 180°



Inestabilidad. ¿peor caso para ganancias A_f grandes o pequeñas?



4.3.2. Análisis con β constante

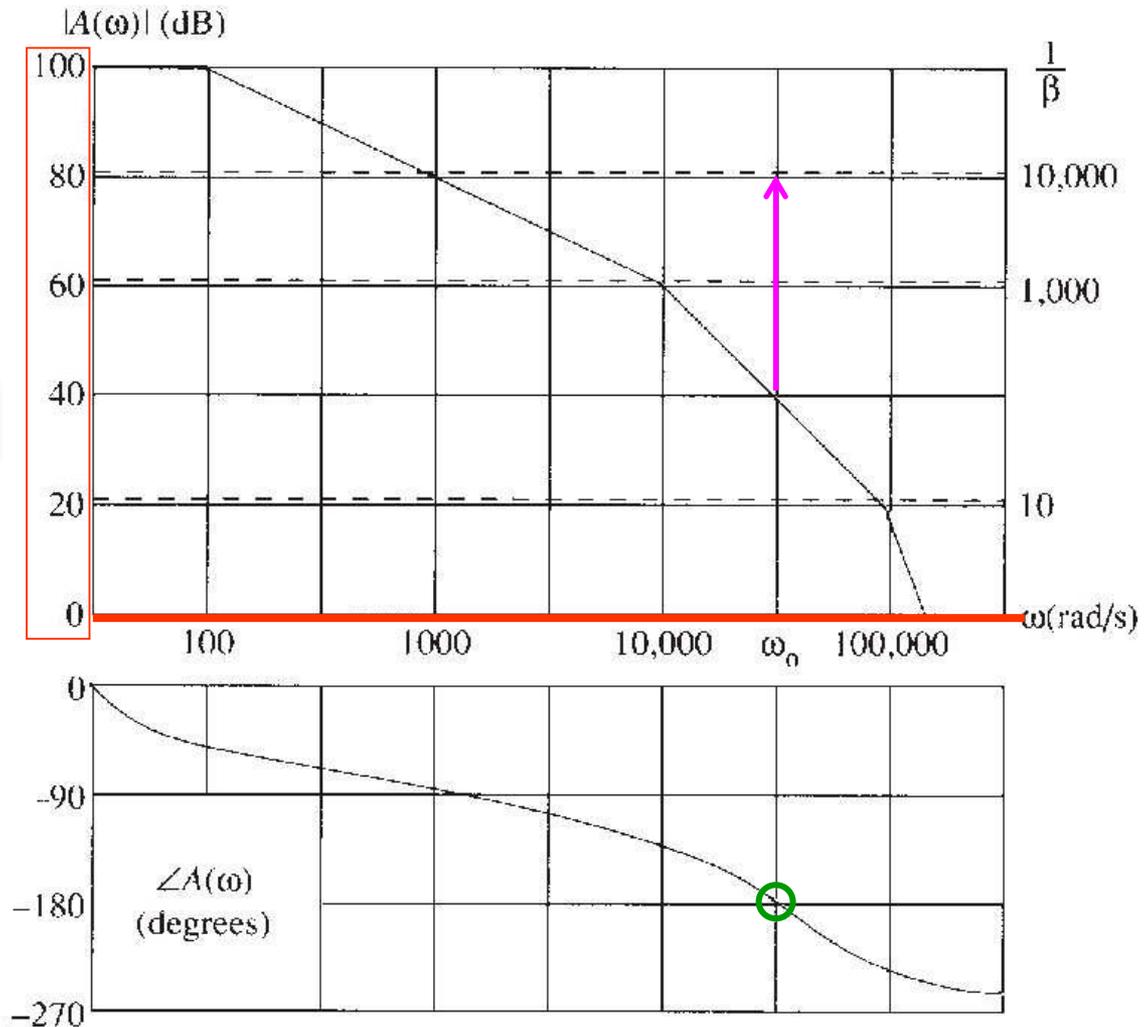


Ejemplo 9.11

$$A_f = 10.000 \approx \frac{1}{\beta}$$



MG = +40dB → OK



Inestabilidad. ¿peor caso para ganancias A_f grandes o pequeñas?



4.3.2. Análisis con β constante

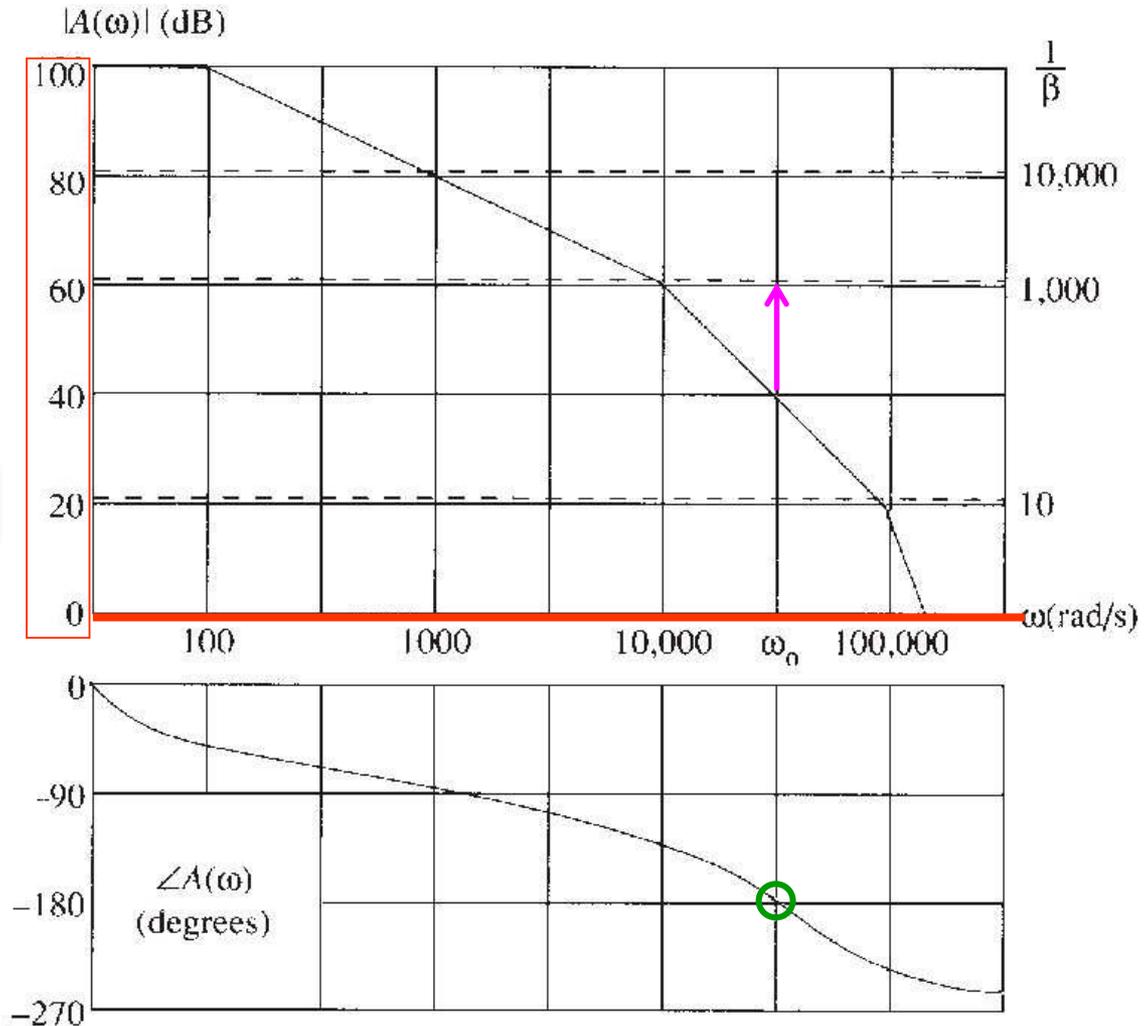


Ejemplo 9.11

$$A_f = 1.000 \approx \frac{1}{\beta}$$



MG = +20dB → OK



Inestabilidad. ¿peor caso para ganancias A_f grandes o pequeñas?



4.3.2. Análisis con β constante

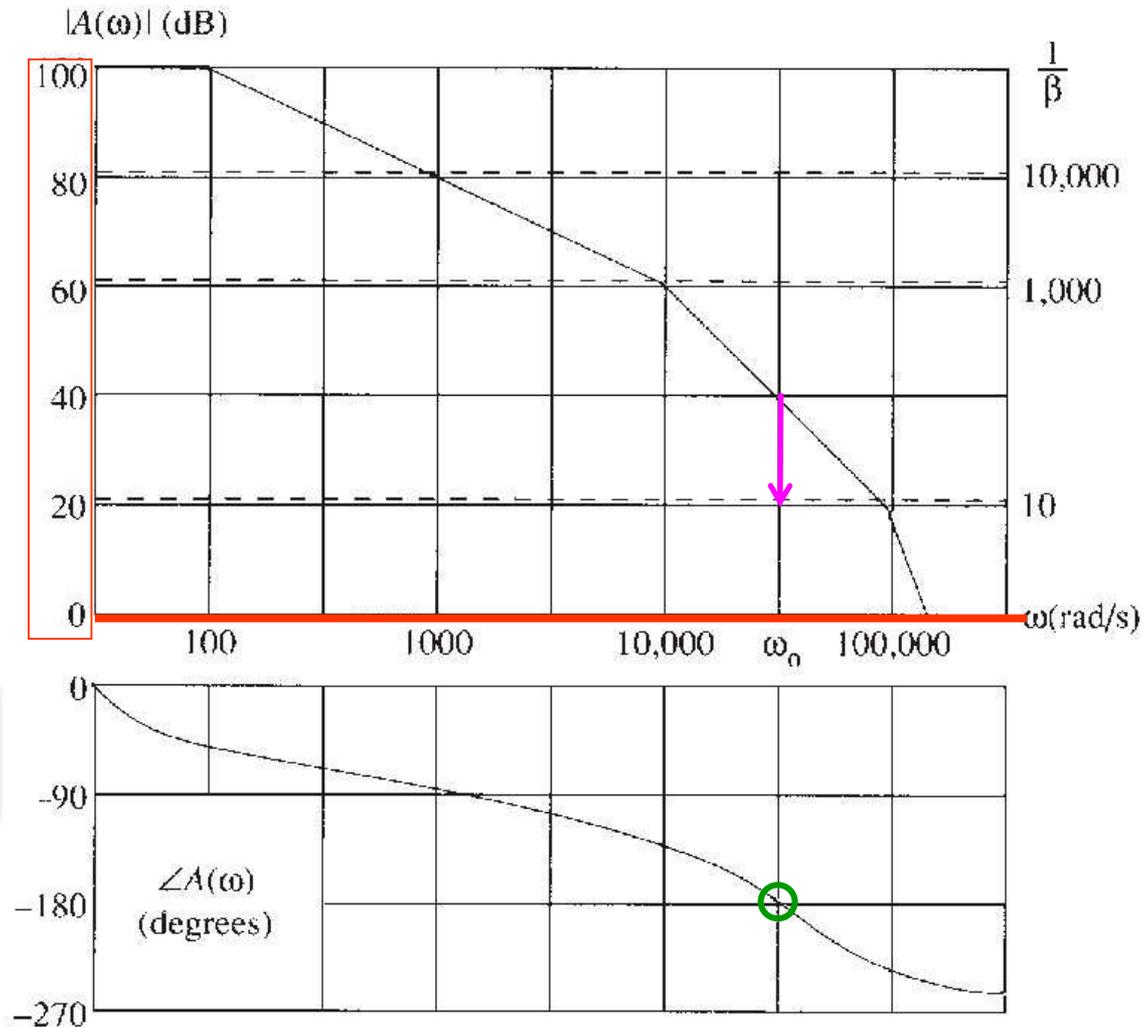


Ejemplo 9.11

$$A_f = 10 \approx \frac{1}{\beta}$$



MG = **-20dB**
→ **iInestable!**



Inestabilidad. ¿peor caso para ganancias A_f grandes o pequeñas?



4.3.2. Análisis con β constante

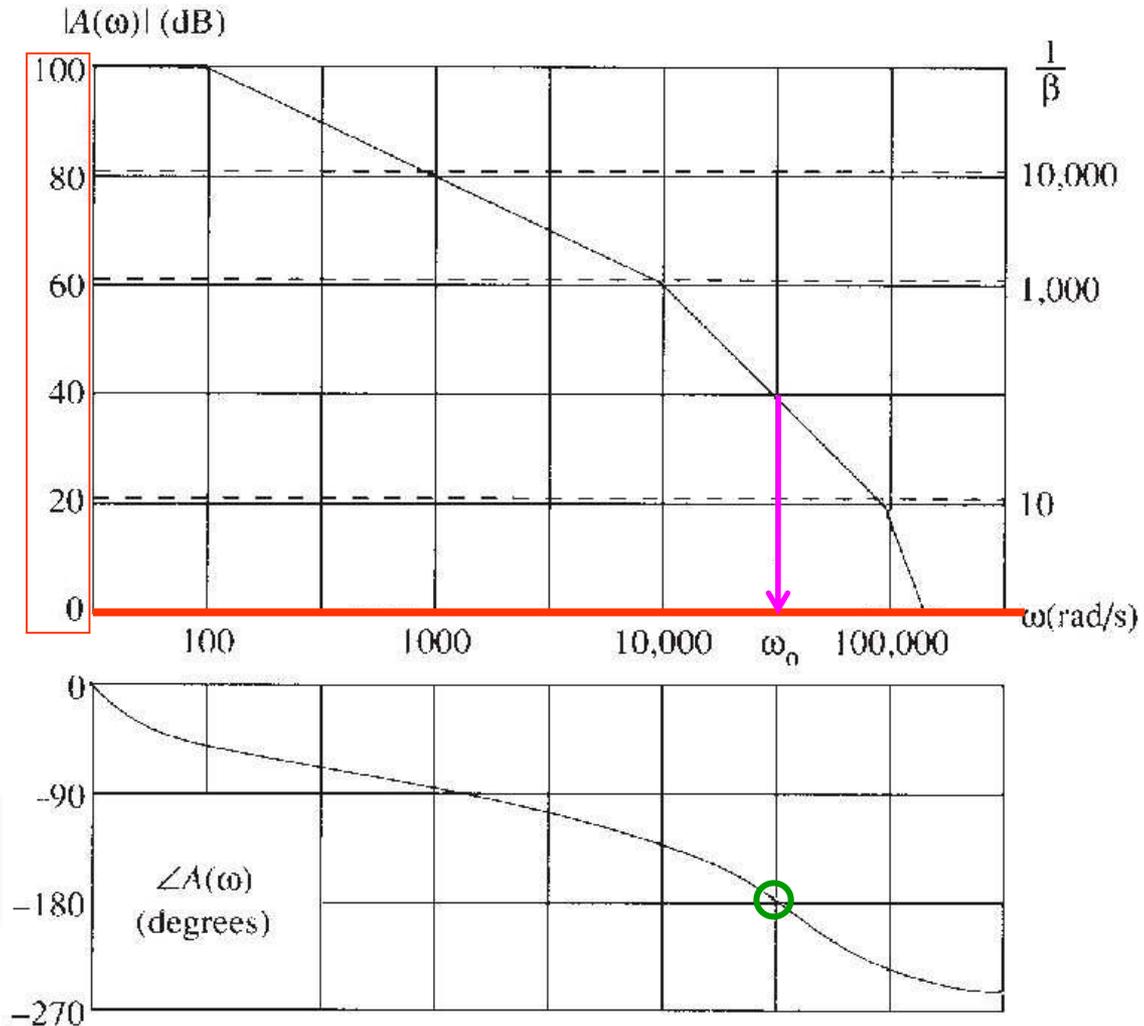


Ejemplo 9.11

$$A_f = 1 \approx \frac{1}{\beta}$$



MG = -40dB
→ ¡Inestable!



Inestabilidad. ¿peor caso para ganancias A_f grandes o pequeñas?



4.4. Condiciones de estabilidad



□ En general, la estabilidad de un amplificador depende de β :

■ β = cantidad de realim.

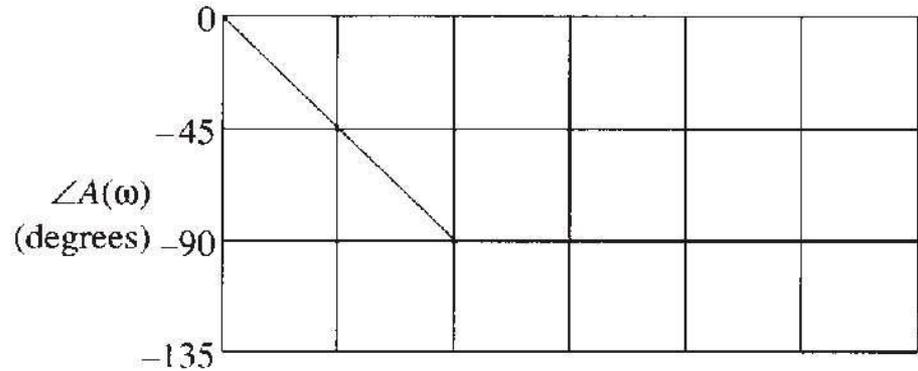
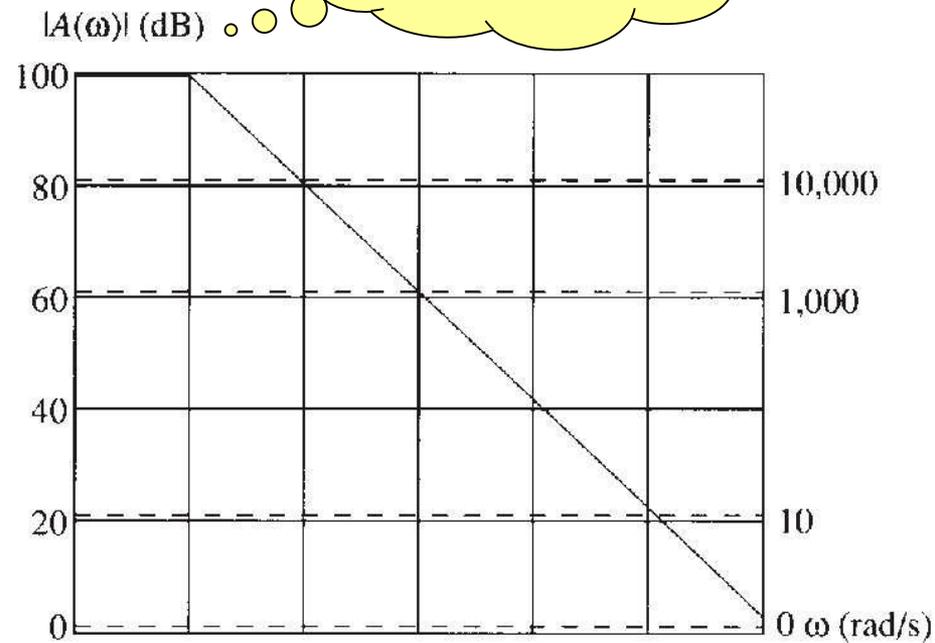
□ Amplificador incondicionalmente estable:

- ¡Para cualquier β !
- Un único polo dominante
 - ...o al menos hasta $A=0\text{dB}$

■ Problema:

- Reducimos el ancho de banda
- Pero contamos con... ¡conservación GBW!

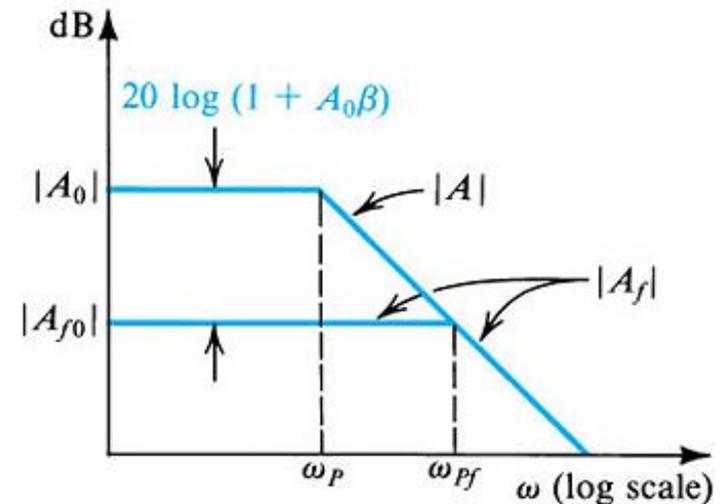
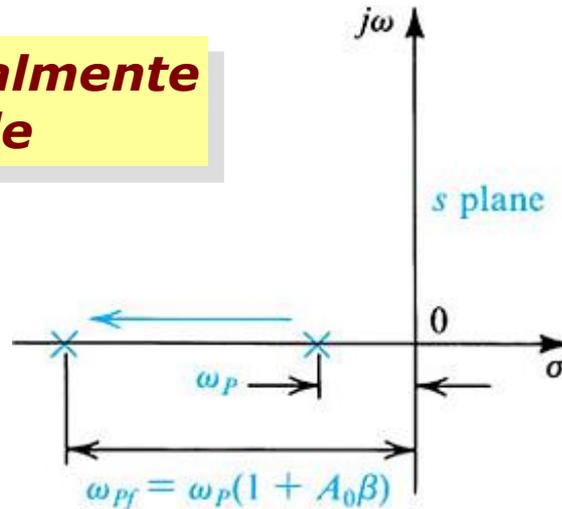
Ganancia en lazo abierto



4.4.1. Condiciones de estabilidad: 1 polo

- ❑ Los polos de A_f determinan la respuesta del amplificador
 - Si alguno tiene parte real positiva ($\sigma \geq 0$), es inestable
- ❑ Los polos de A_f dependen de los de A y de la cantidad de realimentación β
 - Basta estudiar la evolución de los polos de A en función de β
- ❑ Casos tipo: amplificador A de un solo polo...

incondicionalmente estable



4.4.2. Condiciones de estabilidad: 2 polos



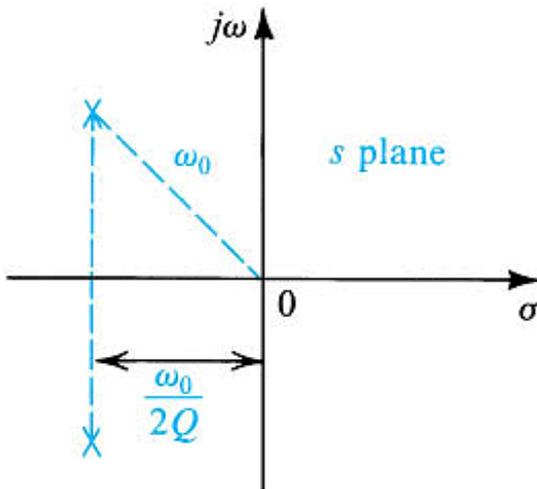
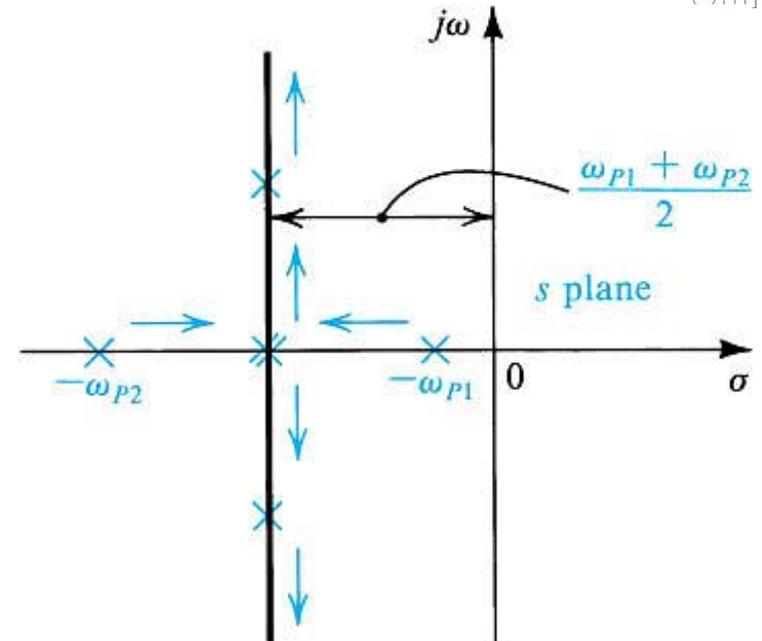
□ Amplificador A de dos polos reales

- Al realimentar, los polos pueden hacerse complejos...

- ...pero nunca pasan a la "parte derecha" ($\sigma \geq 0$)

□ A_f es siempre estable, pero...

- ...puede no serlo **suficientemente** si los polos tienen "demasiada" parte compleja

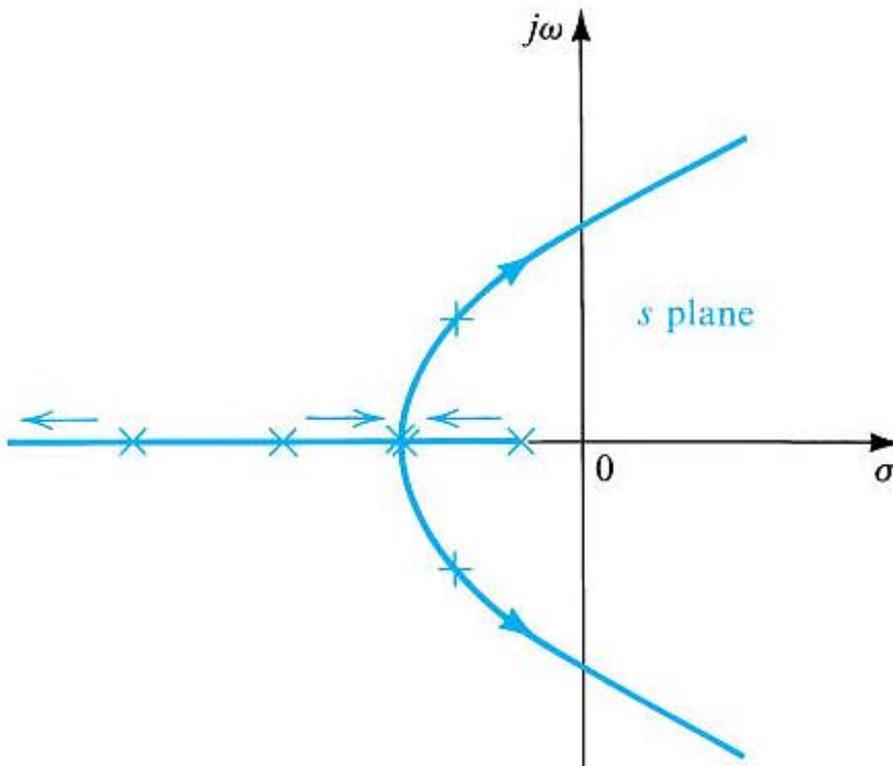


□ ¿Criterio de **estabilidad**?

- Respuesta temporal sin sobreimpulsos
- Se corresponde con un **Q ≈ 0,7...**
- ...o un **Margen de Fase de 45°**

4.4.3. Condiciones de estabilidad: +3 polos

- ❑ Amplificador A con tres (o más) polos reales
 - Según sube la cantidad de realimentación, β , los polos...
 - *Convergen, pasan a ser complejos e incluso pasan al semiplano derecho*
 - El amplificador A_f podrá ser inestable



Ha de ser objeto de un estudio de su estabilidad en función de β

- Ver anexo: estudio de la estabilidad de un amplificador con Matlab y PSpice

4.5. Compensación



- ❑ Problema:
 - Ganancia *excesiva* cuando fase es 180°
- ❑ Soluciones:
 - Hacer que módulo de L caiga *más deprisa*
- ❑ ¿Cómo?
 - Bajando ganancia A
 - *Por ejemplo con atenuador resistivo en red A*
 - **Añadiendo un polo dominante** en red A
 - *Ojo que esto implicará cambios adicionales ...*
 - ¿Qué pasa con la fase?...
 - ¿Qué pasa con el ancho de banda?...
 - **Desplazando un polo en red A** a más baja frecuencia (compensación polo-cero)

Perdemos ganancia...

¿Cuál será mejor?

4.5. Compensación



- ❑ Criterio:
 - Imponiendo un cierto margen de fase
 - Imponiendo un cierto margen de ganancia
- ❑ Dificultad del diseño de una **compensación**
 - Al añadir o desplazar polos (o ceros) la respuesta en frecuencia cambia
 - *Hay que estimar este cambio antes de realizarlo, si es posible...*
- ❑ Ejemplo 1: compensación por **desplazamiento** de polo.
 - Disponemos de un Amp. de ganancia en lazo abierto $A_{mid} = 75\text{dB}$
 - *Tres polos, en 10^3 , 10^4 y $5 \cdot 10^4$ Hz.*
 - Ganancia del amplificador realimentado: $A_f = 40\text{dB}$
 - Compensar con margen de fase **45°**
 - *Criterio **adecuado** desde el punto de vista de la respuesta temporal*
 - *Fácil de identificar: **fase exacta de 45° en un polo aislado***
 - Técnica usada \rightarrow **desplazamiento de polo.**

4.5.1. Ejemplo: desplazamiento de polo (1)



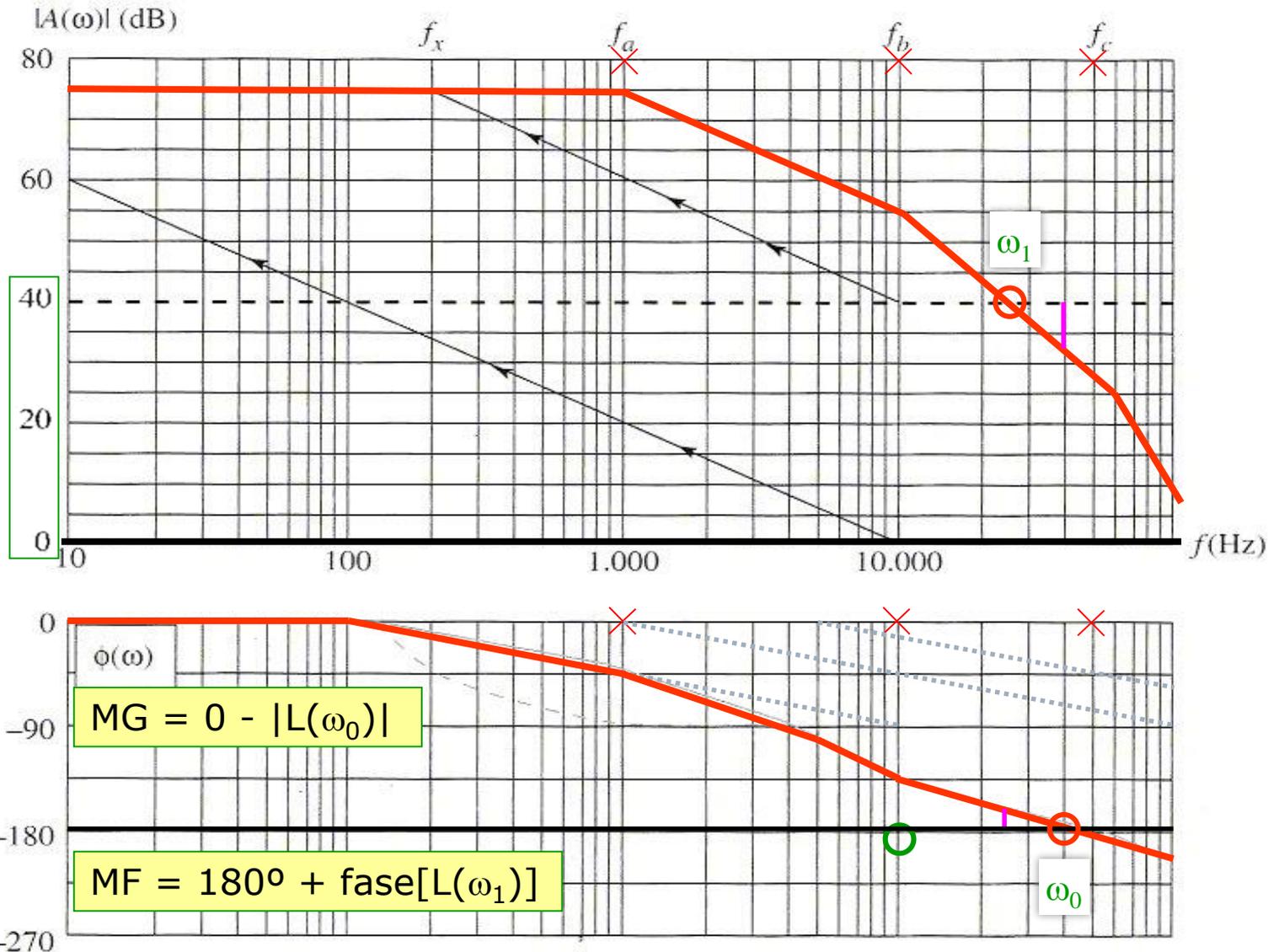
Respuesta Original (no compensada)

$$A_f = 40\text{dB} \approx \frac{1}{\beta} \Big|_{\text{dB}}$$

MG \approx 8dB
Estable...

MF \approx 20°
Insuficiente

Objetivo:
MF = 45°



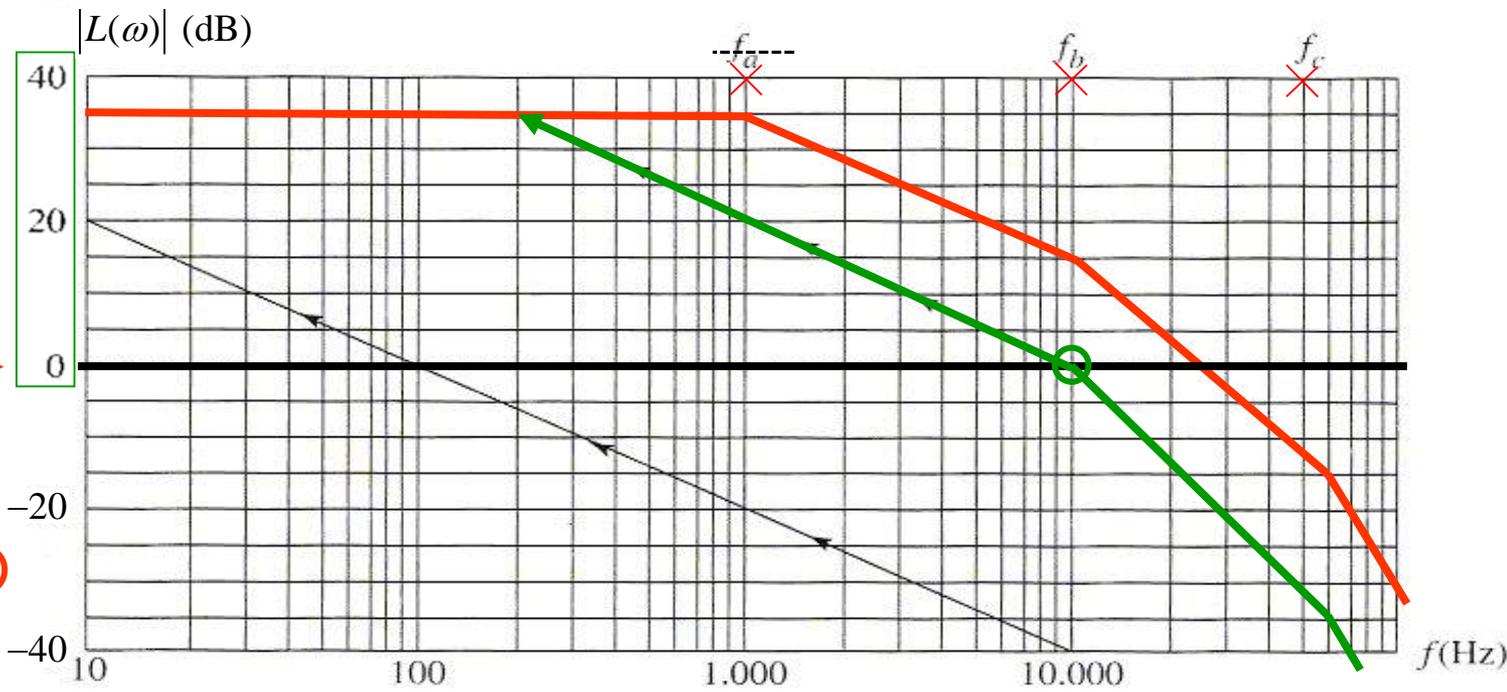
4.5.1. Ejemplo: desplazamiento de polo (2)



Objetivo:
MF = 45°

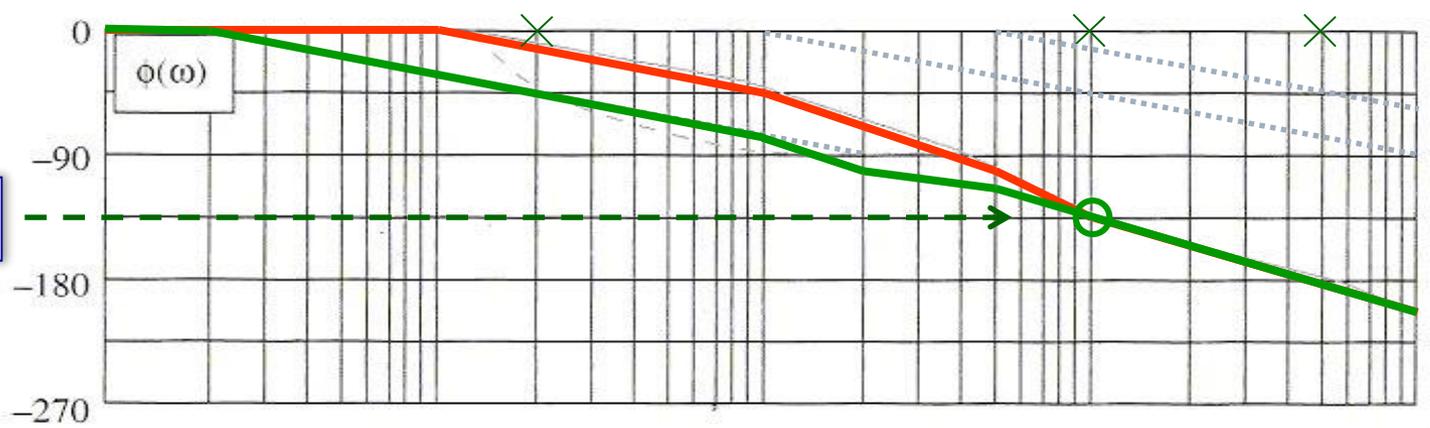
$$A_f = 40dB \approx \frac{1}{\beta} \Big|_{dB}$$

Respuesta Original (no compensada)



Compensada

MF ≈ 45°



4.5.1. Ejemplo: desplazamiento de polo (3)



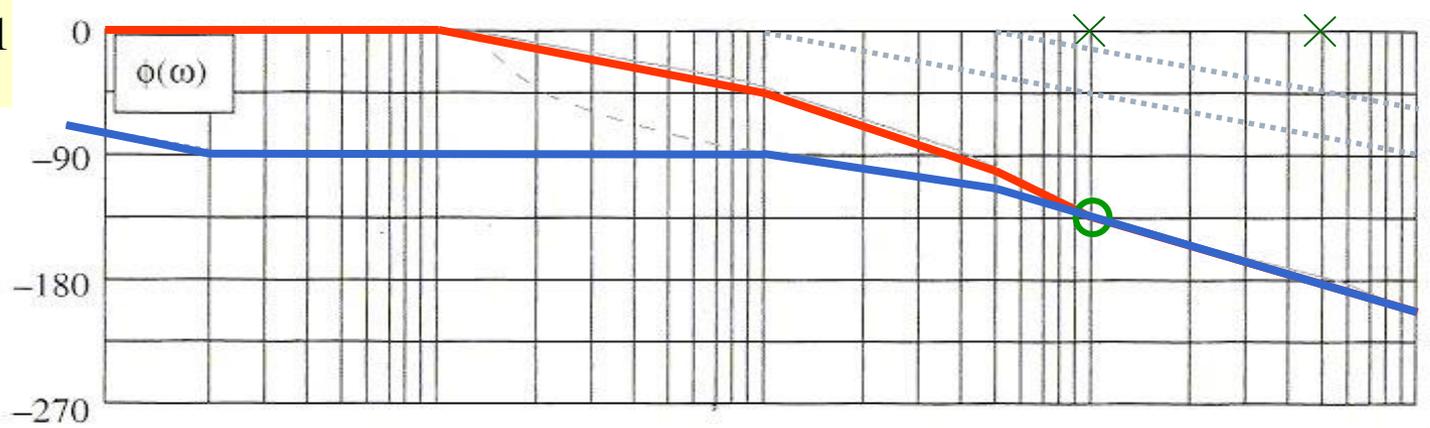
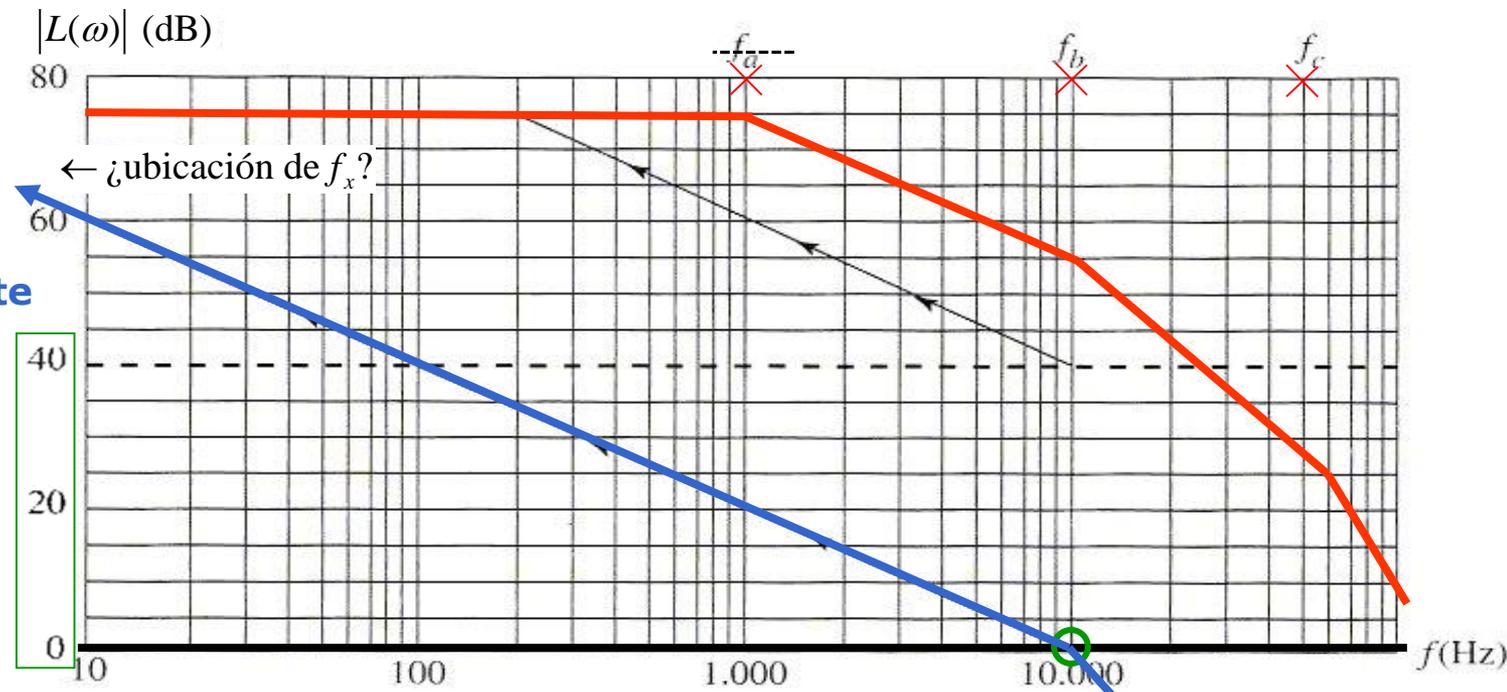
Objetivo:
MF = 45°

Compensada
incondicionalmente

Para cualquier
valor de β .
Peor caso:

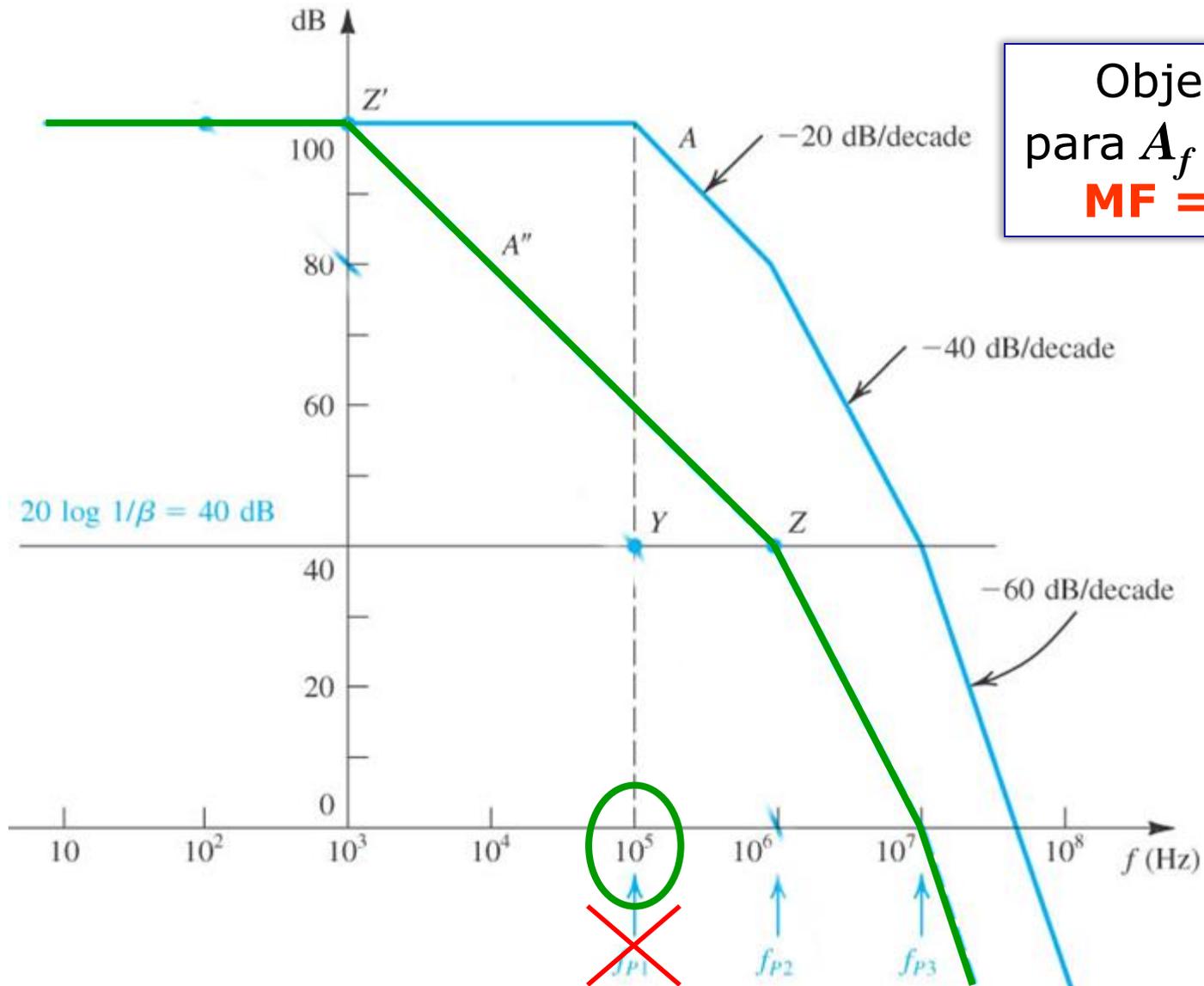
$$\left. \frac{1}{\beta} \right|_{dB} = 0 \Rightarrow \beta = 1$$

$$f_x \approx 1,8Hz$$





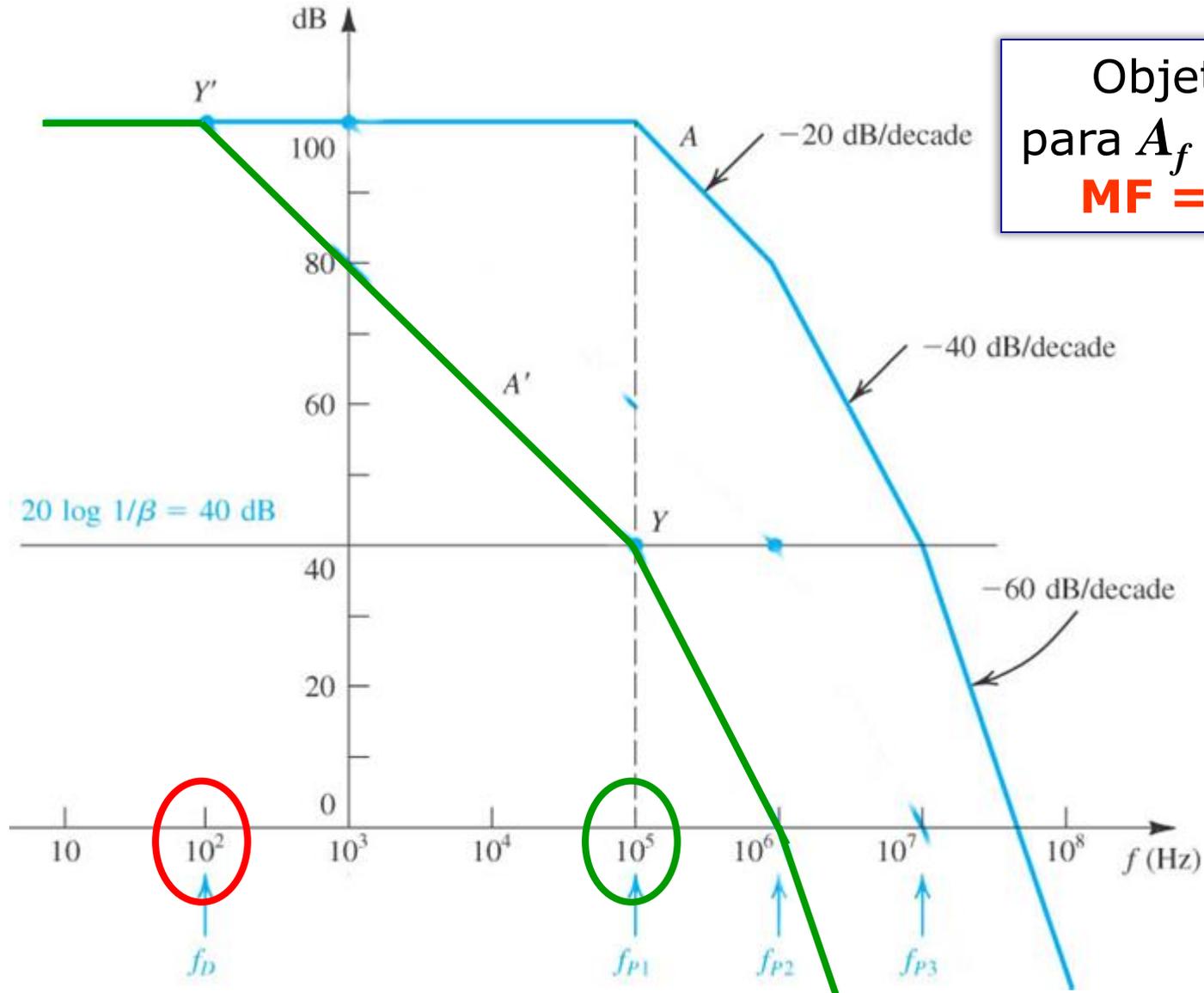
4.5.1. Ejemplo 2: desplazamiento de polo



Objetivo:
para $A_f = 40\text{dB}$
MF = 45°



4.5.2. Compensación por adición de polo



Objetivo:
para $A_f = 40\text{dB}$
MF = 45°



Ejercicio (1/4)



- **PROBLEMA 12.-** Un cierto amplificador operacional tiene una $A_o = 80\text{dB}$ y polos en 1, 10 y 200kHz.
- Represente en el diagrama de Bode adjunto sus curvas aproximadas de ganancia y fase. ¿Cuál es su producto Ganancia-Ancho de Banda en lazo abierto?
 - Con este operacional se construye un amplificador no-inversor. ¿Qué ganancia del mismo correspondería a un margen de fase de cero grados?
 - Se pretende construir un amplificador no-inversor con ganancia de 50dB en lazo cerrado. Éste se compensa mediante desplazamiento de polos. ¿A qué frecuencia se debe encontrar el polo desplazado para que el margen de fase sea de 45° ? ¿Qué producto Ganancia-Ancho de Banda se obtiene en este caso?



Ejercicio (2/4)



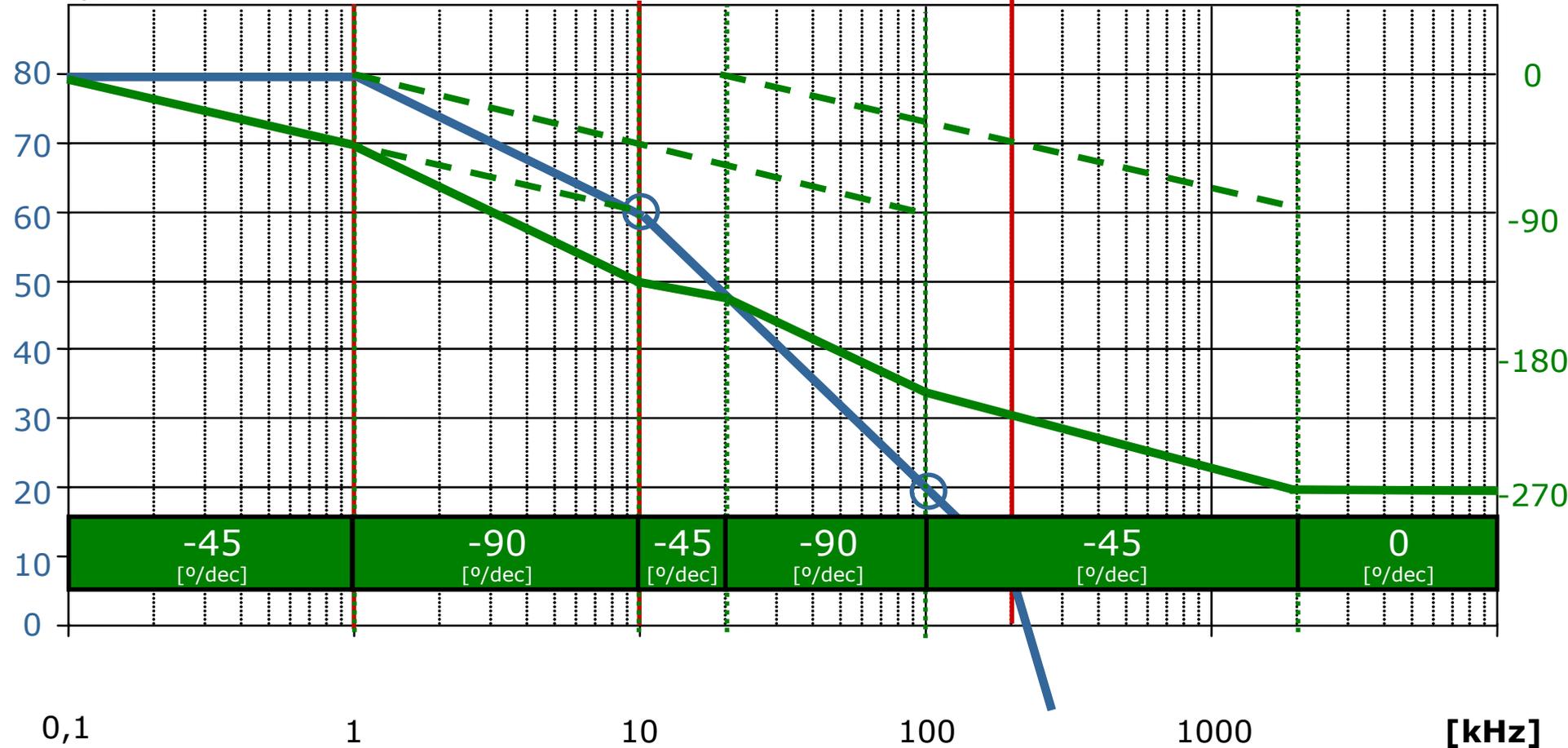
■ a) Representación del diagrama de Bode

$f_a: 1\text{kHz}$ $f_b: 10\text{kHz}$ $f_c: 200\text{kHz}$

$|A_0| = 80\text{dB}$

$|A|_{\text{dB}}$

$\Phi_A [^\circ]$

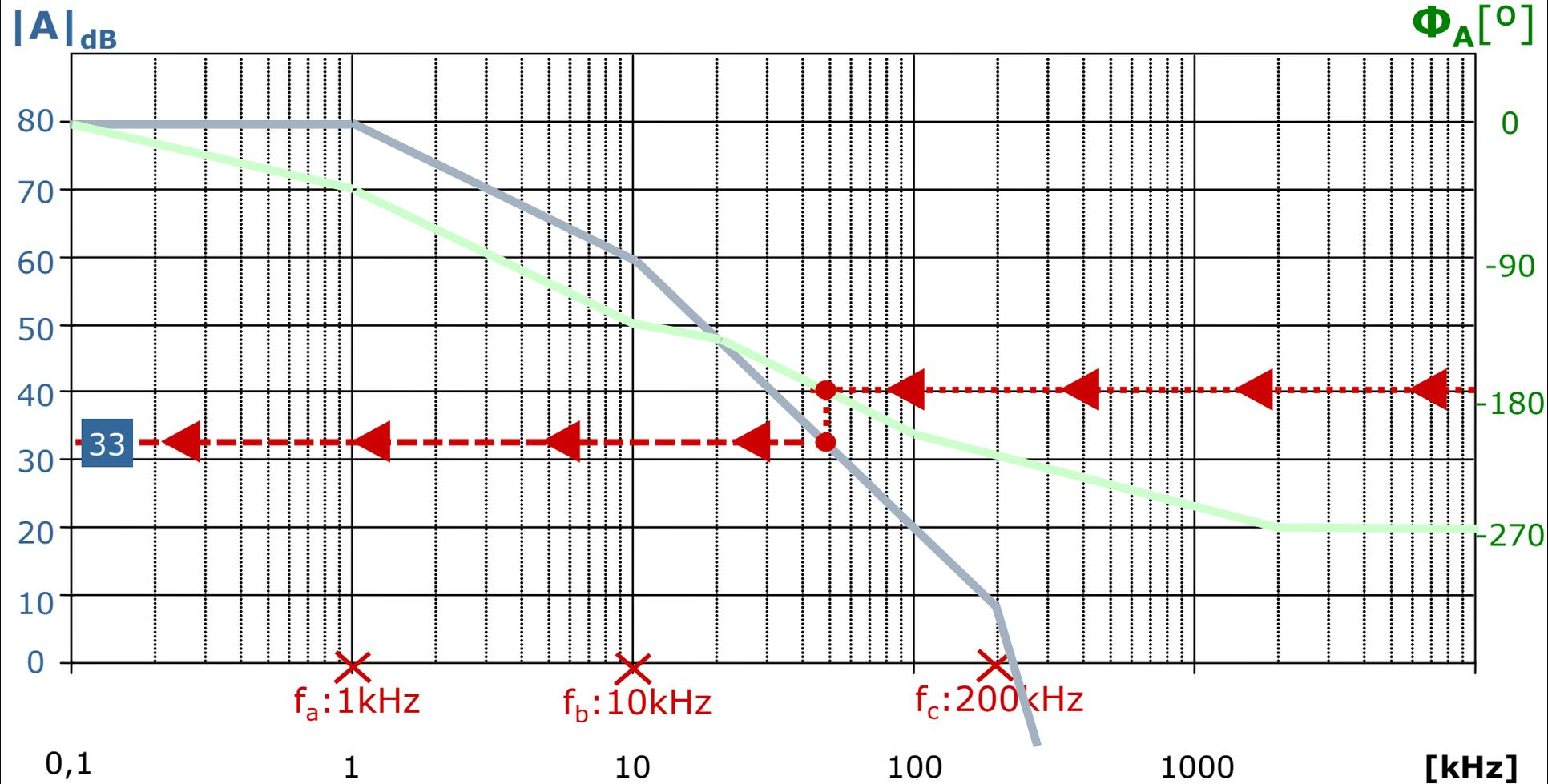




Ejercicio (3/4)



■ b)

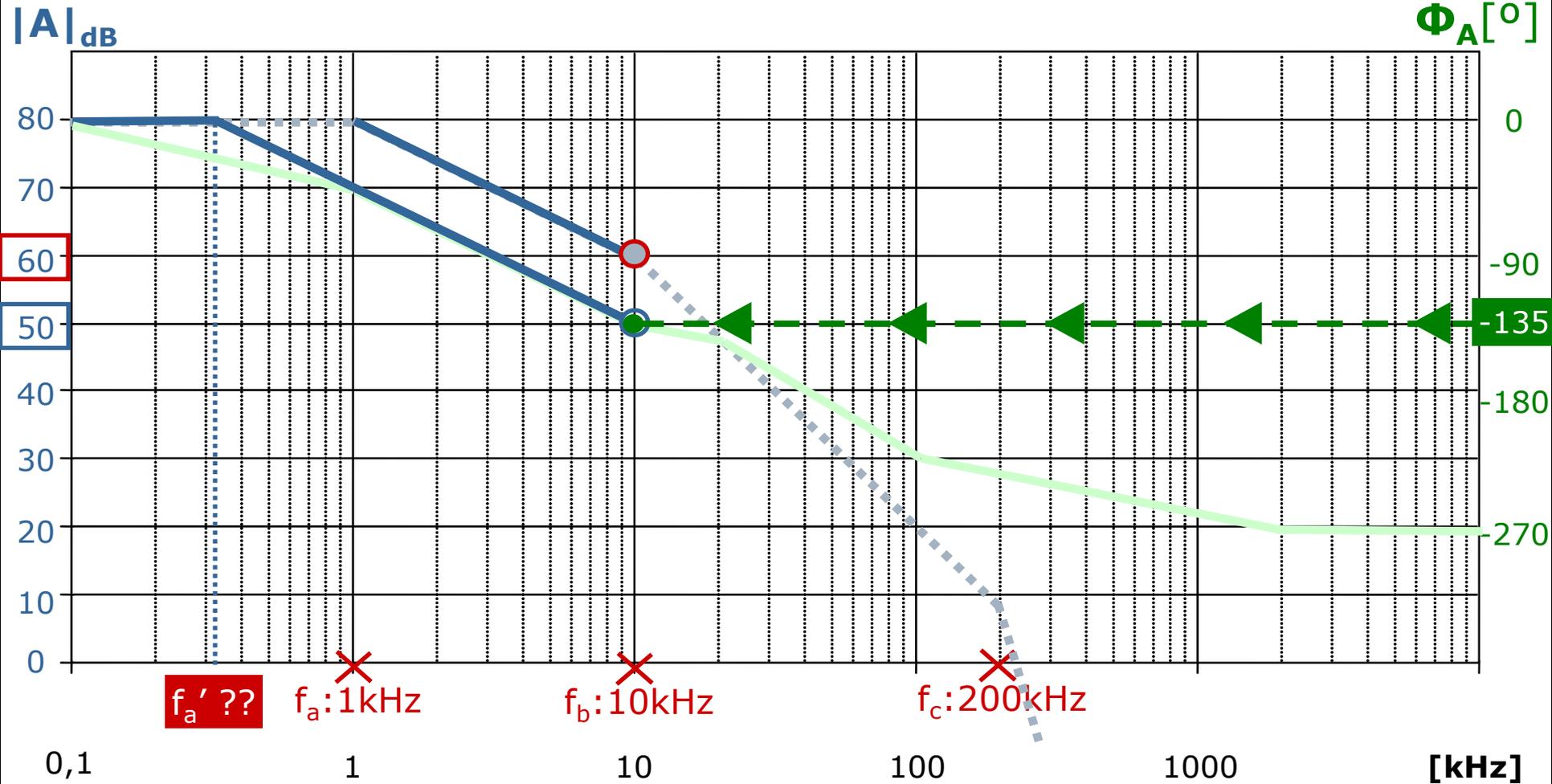




Ejercicio (4/4)



■ c)





4.5.2. Compensación: otros criterios



- Si el criterio es el Margen de Ganancia:
 - Buscar frecuencia a la que la fase es 180° :
 - *Si adición de polo, donde antes hay 90°*
 - *Si desplazamiento de polo, misma frecuencia*
 - Aplicar margen de ganancia
 - Reconstruir pendientes

- Una estimación gráfica de la respuesta no es imprescindible, pero sí recomendable para la comprobación del resultado de la compensación.



4.5.3. Compensación Miller. Ejemplo: A.O.



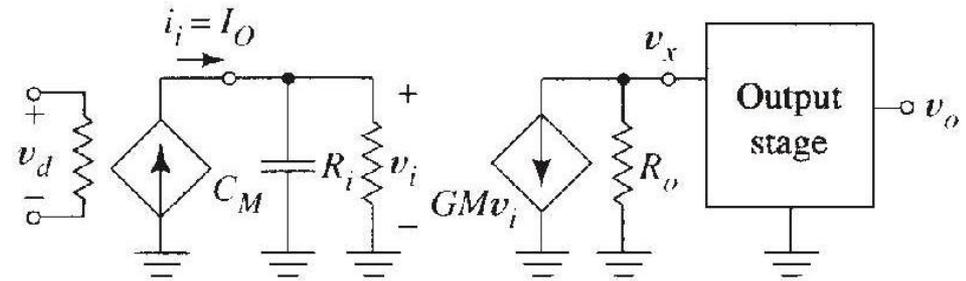
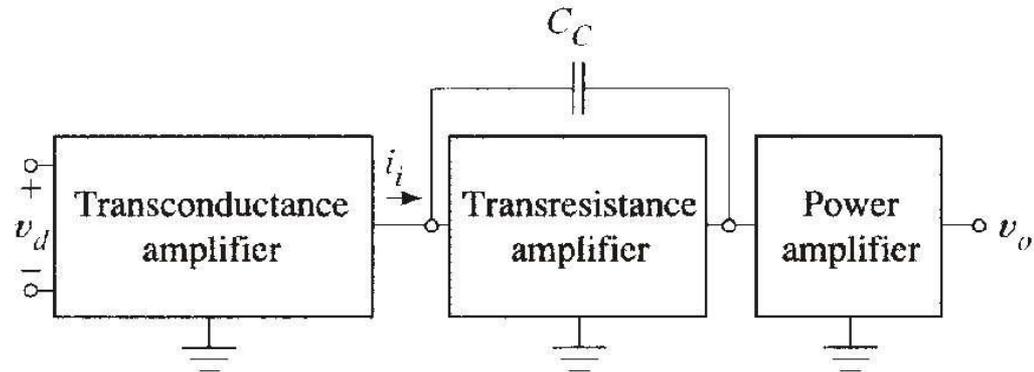
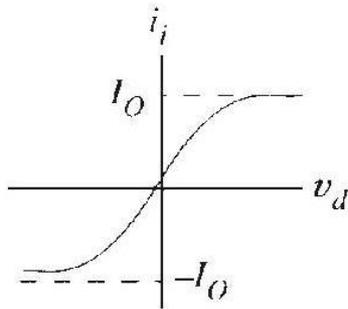
□ AO típico:

- Estructura interna
- Aprovecha efecto Miller

$$C_M = C_C (1 + G_M R_o)$$

□ Relación entre SR y C_M

- Si v_d cambia muy rápido, el diferencial se satura...



$$SR = \frac{dv_o}{dt} \approx \frac{I_o}{C_M}$$

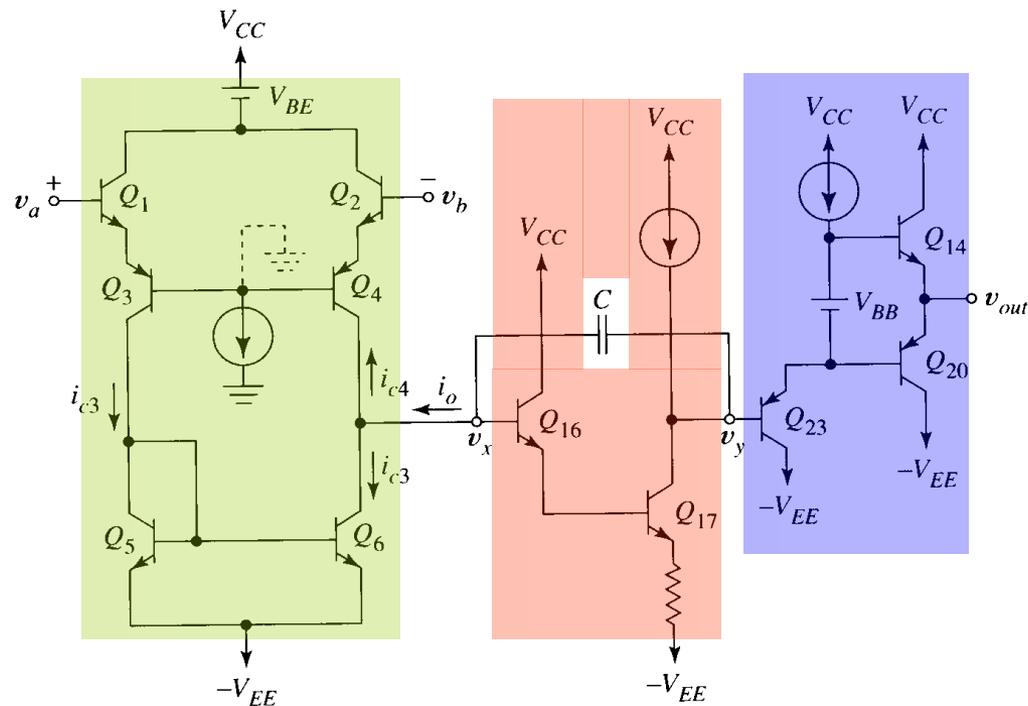
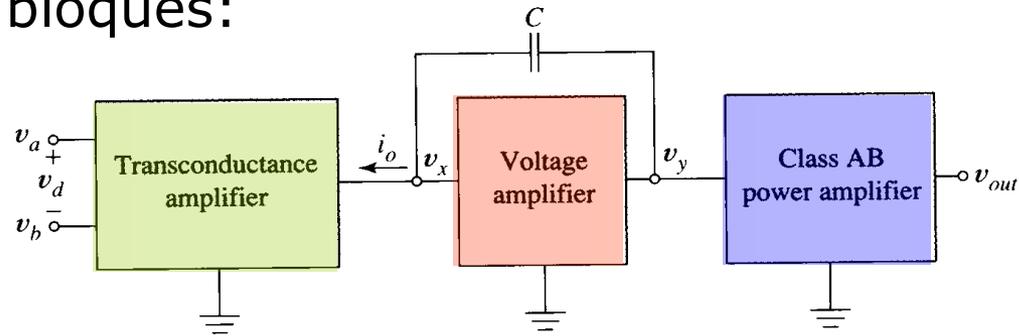
$$I_C = C_M \frac{dv_i}{dt} = I_o - \frac{v_i}{R_i} \approx I_o$$

$$SR \approx 2\pi G_M R_i R_o I_o \omega_H$$

Apéndice: el 741, un AO compensado.



Diagrama de bloques:



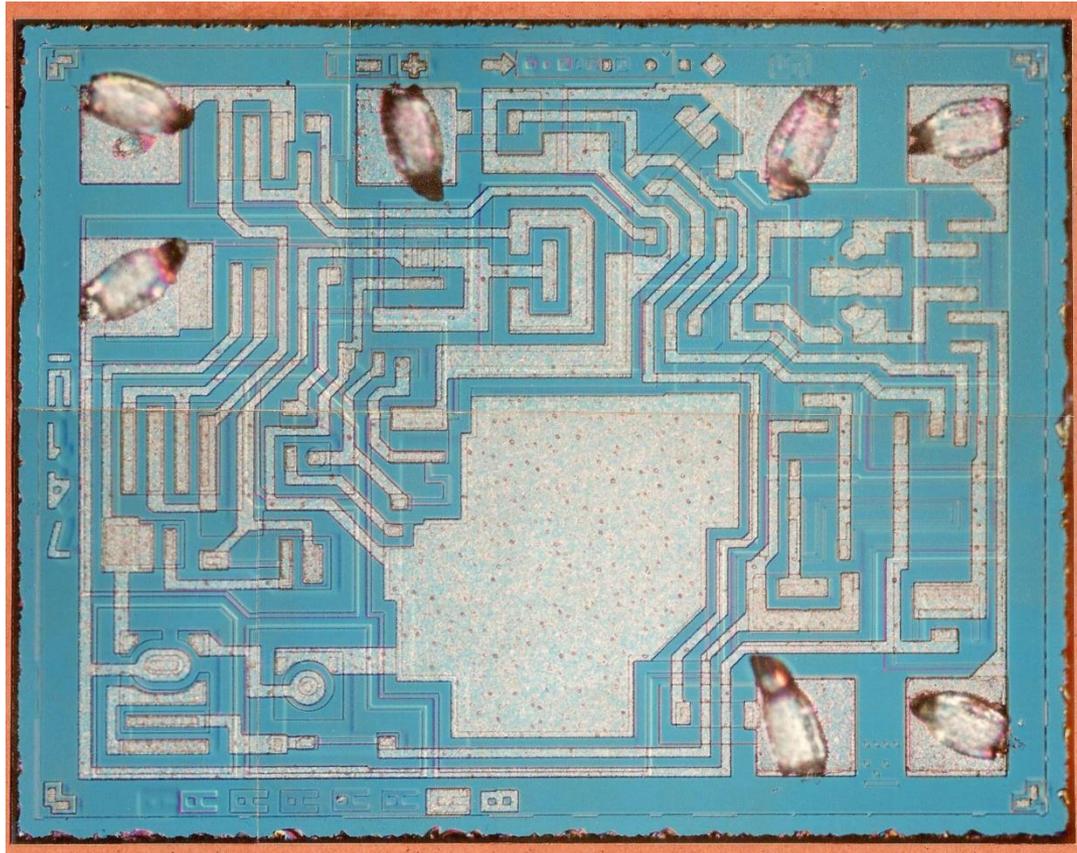


Apéndice: el 741, un AO compensado.



- Vista del circuito integrado:
 - Note el gran tamaño del C de compensación

30pF



Apéndice: el 741, un AO compensado.



- Hojas de características:
 - Incondicionalmente estable

 *National Semiconductor*

August 2000

LM741 Operational Amplifier

General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C is identical to the LM741/LM741A except that the LM741C has their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

LM741 Operational Amplifier

Apéndice: el 741, un AO compensado.



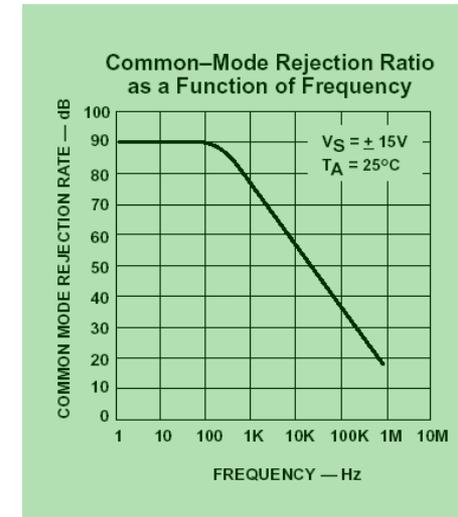
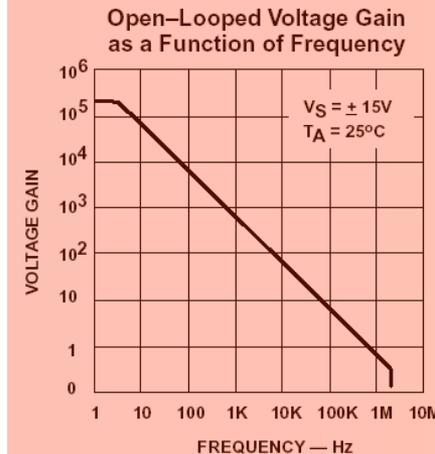
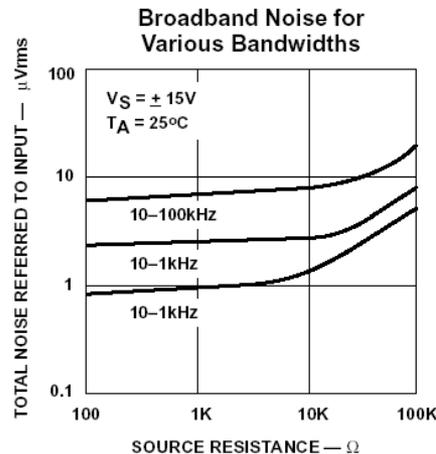
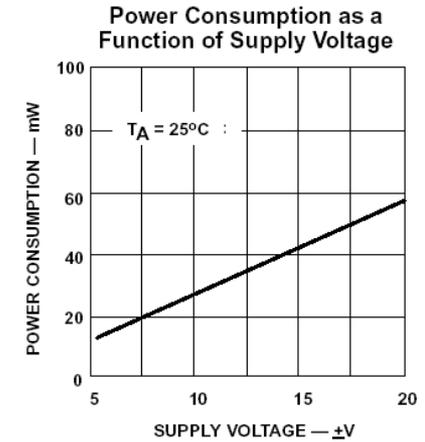
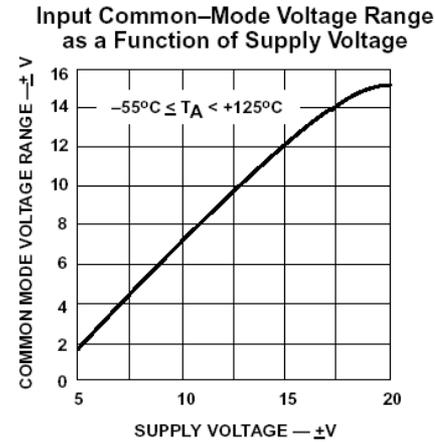
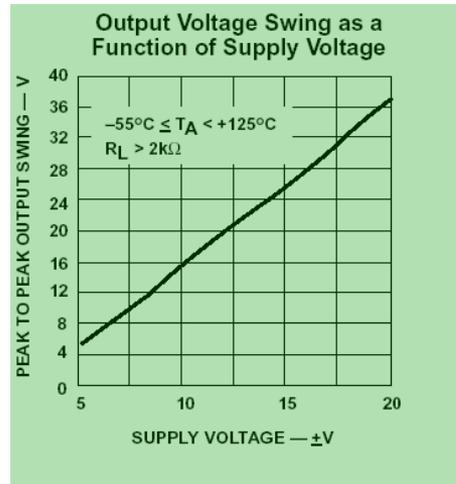
□ Hojas de características:

Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96								dB
					77	96		77	96		dB
Transient Response	$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain										
Rise Time			0.25	0.8		0.3			0.3		μs
Overshoot			6.0	20		5			5		%
Bandwidth (Note 6)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$, Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ μs
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$										
LM741A	$V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150							mW
	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165							mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60	100				mW
						45	75				mW



□ Hojas de características:

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS





Control de revisiones



- 2015-03-12: versión inicial.