

## EJERCICIO 1

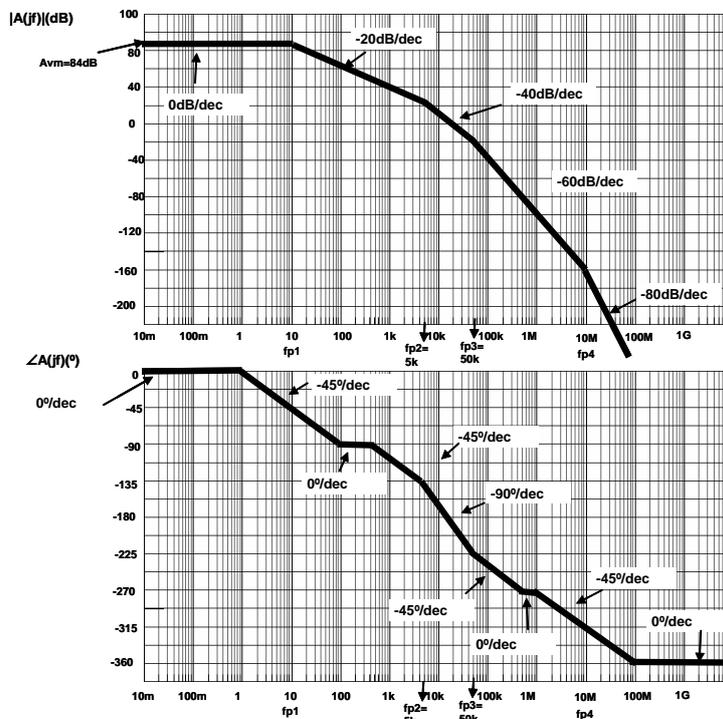
La función de transferencia de un amplificador de tensión con entrada diferencial, en lazo abierto es:

$$A(jf) = \frac{16 \cdot 10^3}{(1 + jf10^{-1})(1 + jf210^{-4})(1 + jf210^{-5})(1 + jf10^{-7})} \text{ con } f \text{ en Hz.}$$

1. Represente el diagrama asintótico de Bode (módulo y fase) del amplificador.
2. Determine si este amplificador es estable cuando se realimenta como seguidor de tensión. Razone su respuesta.
3. Si se realimenta el amplificador con una configuración no inversora, ¿Cuál es el valor mínimo de la ganancia en lazo cerrado para el que el amplificador es estable con un margen de fase de  $45^\circ$ ?
4. Represente el esquemático del amplificador realimentado y calcule los valores de las resistencias de la red  $\beta$  para el valor de ganancia mínima calculado en el apartado anterior.

### SOLUCIÓN:

1. Represente el diagrama asintótico de Bode (módulo y fase) del amplificador.



2. Determine si este amplificador es estable cuando se realimenta como seguidor de tensión. Razone su respuesta.

Si se realimenta el amplificador como seguidor de tensión se tiene:

$$A_{lc} = \frac{A_{vm}}{1 + A_{vm}\beta} = 1 \Rightarrow \beta = \frac{A_{vm} - 1}{A_{vm}} = \frac{16 \cdot 10^3 - 1}{16 \cdot 10^3} \cong 1$$

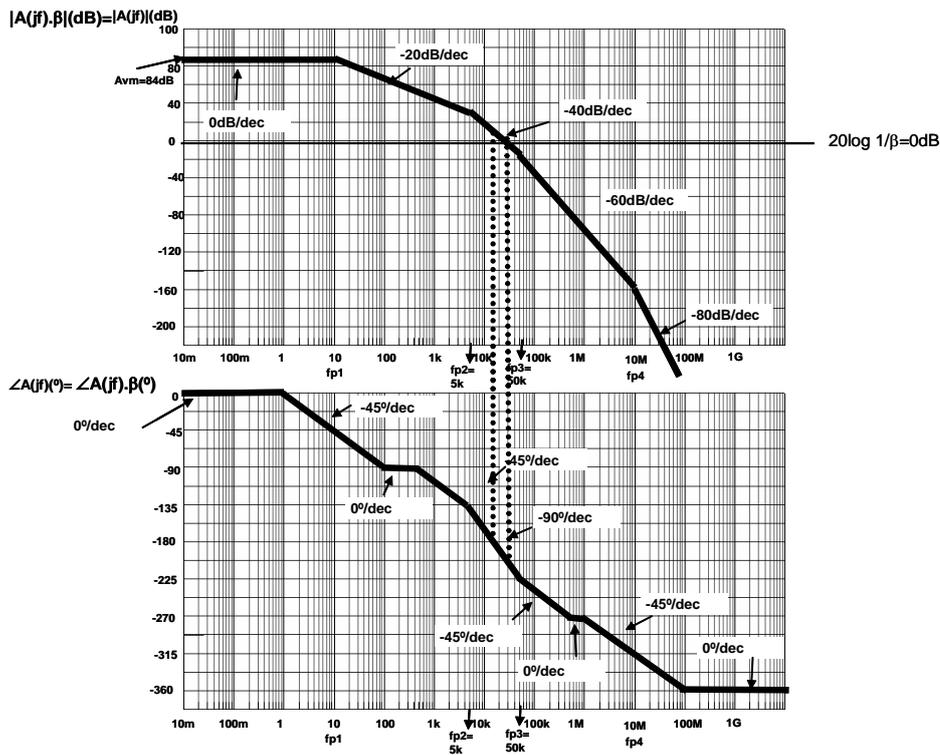
Por lo que el Diagrama de Bode de la ganancia de lazo  $A.\beta$  es el mismo que el del amplificador  $A$ .

Para que el amplificador sea estable  $|A.\beta|_{f_{180^\circ}} < 0\text{dB}$  (ó  $|\angle A_T.\beta|_{f_{0\text{dB}}} < 180^\circ$ ).

En el Diagrama de Bode se obtiene, en este caso:

$|A.\beta|_{f_{180^\circ}} > 0\text{dB} \Rightarrow$  El amplificador es inestable.

También puede obtenerse con  $|\angle A_T.\beta|_{f_{0\text{dB}}} > 180^\circ \Rightarrow$  El amplificador es inestable.



3. Si se realimenta el amplificador con una configuración no inversora, ¿Cuál es el valor mínimo de la ganancia en lazo cerrado para el que el amplificador es estable con un margen de fase de 45°?

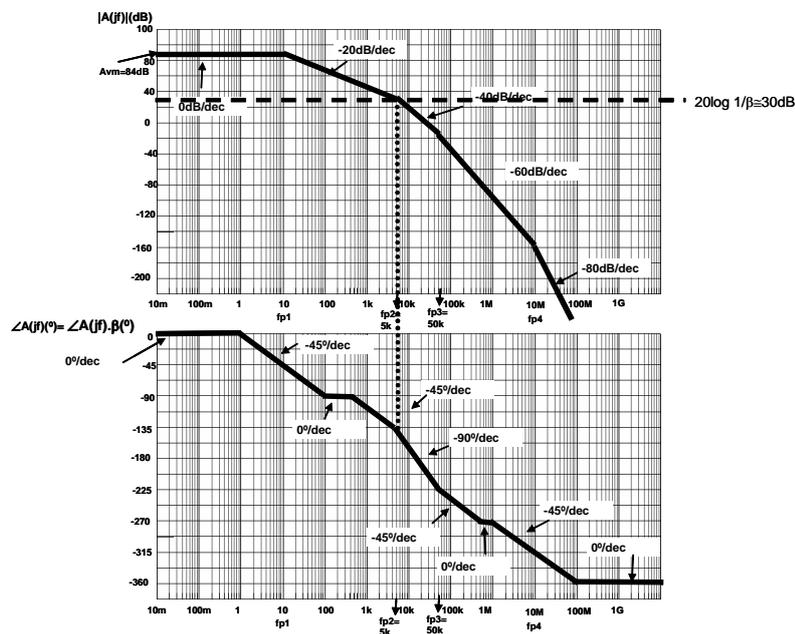
Asumiendo que la ganancia de lazo del amplificador total realimentado es  $\gg 1$ , la ganancia total del amplificador realimentado ( $A_{lc}$ ) será en este caso:

$$A_{lc} \cong \frac{1}{\beta}$$

Para que el amplificador sea estable con un margen de fase de 45° tiene que cumplirse:

$$MF = 45^\circ \Rightarrow 180^\circ + \angle A\beta|_{f_{0dB}} = 45^\circ \Rightarrow \angle A\beta|_{f_{0dB}} = -135^\circ$$

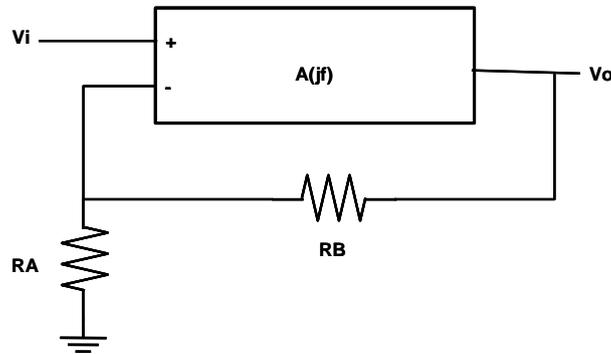
Imponiendo esta condición en el Diagrama de Bode se tiene que  $20 \log \frac{1}{\beta} \cong 30dB \Rightarrow \frac{1}{\beta} \cong 32$ . (Se puede comprobar que para este valor de  $\beta$ , la ganancia de lazo ( $A\beta$ ) es  $\gg 1$  como hemos supuesto inicialmente).



Luego, la ganancia de lazo mínima para que el amplificador total realimentado sea estable con un margen de fase de  $45^\circ$  es 32.

4. Represente el esquemático del amplificador realimentado y calcule los valores de las resistencias de la red  $\beta$  para el valor de ganancia mínima calculado en el apartado anterior.

El esquema del amplificador total realimentado con una configuración no inversora será:



Como la ganancia de lazo del amplificador total realimentado es  $\gg 1$ , la ganancia total del amplificador realimentado ( $A_{lc}$ ) será en este caso:

$$A_{lc} \cong \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_B}{R_A} = 32 \Rightarrow R_B = 31R_A$$

Puede tomarse, eligiendo resistencias normalizadas, por ejemplo  $R_A=1k\Omega$  y  $R_B=33k\Omega$ .

## EJERCICIO 2

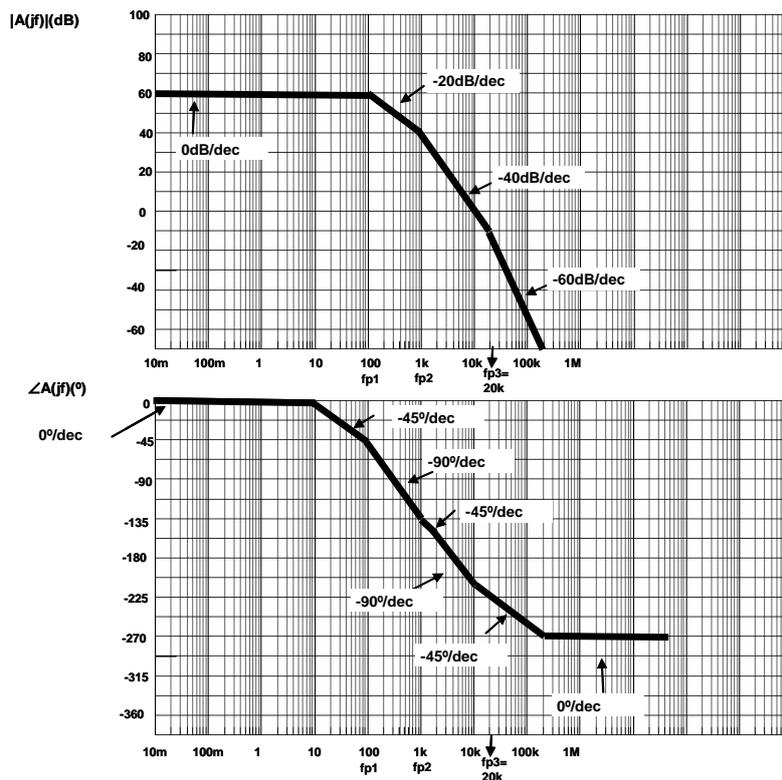
La función de transferencia de un amplificador de tensión con entrada diferencial, en lazo abierto es:

$$A(jf) = \frac{10^3}{\left(1 + j \frac{f}{100}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^3}\right) \left(1 + j \frac{f}{2 \cdot 10^4}\right)} \text{ con } f \text{ en Hz}$$

- Dibuje el diagrama asintótico de Bode, módulo y fase, del amplificador de la Figura, para frecuencias entre 10mHz y 1MHz ,en la hoja que se adjunta a este enunciado. Indique claramente los puntos más significativos y las pendientes de cada tramo.
- Determine, a partir del diagrama de Bode anterior si el amplificador de la Figura es estable si se realimenta como seguidor de tensión. Justifique su respuesta.
- ¿ A qué frecuencia habría que desplazar el primer polo del amplificador para que el circuito de la Figura realimentado como seguidor de tensión sea estable con un margen de fase de 45°?. Justifique su respuesta.

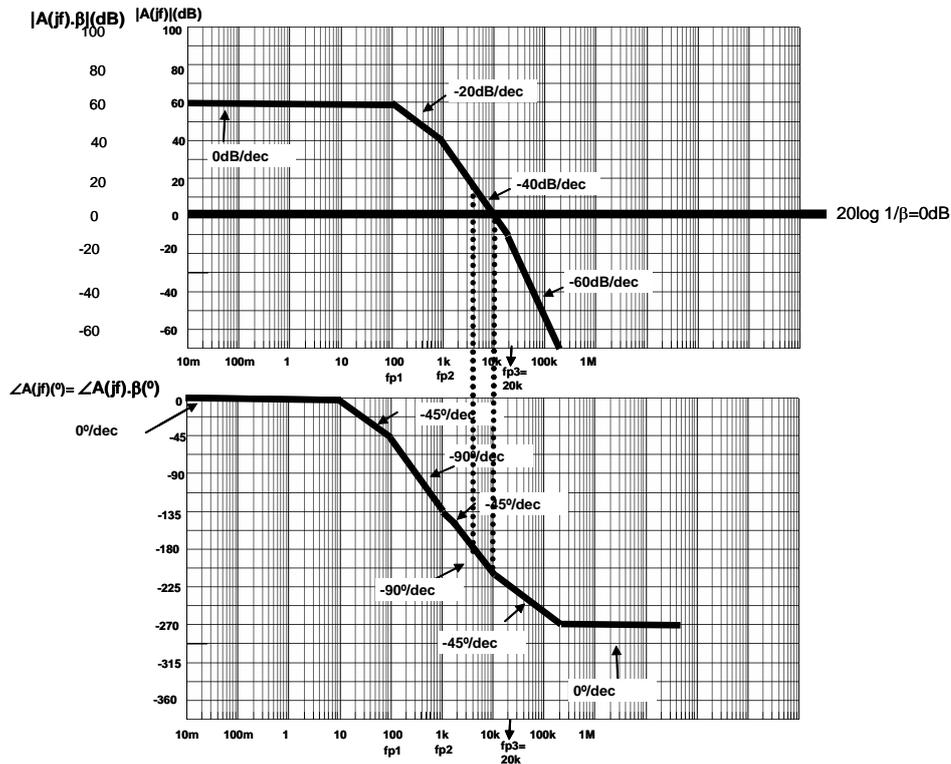
### SOLUCIÓN:

- Dibuje el diagrama asintótico de Bode, módulo y fase, del amplificador de la Figura, para frecuencias entre 10mHz y 1MHz ,en la hoja que se adjunta a este enunciado. Indique claramente los puntos más significativos y las pendientes de cada tramo.



- Determine, a partir del diagrama de Bode anterior si el amplificador de la Figura es estable si se realimenta como seguidor de tensión. Justifique su respuesta.

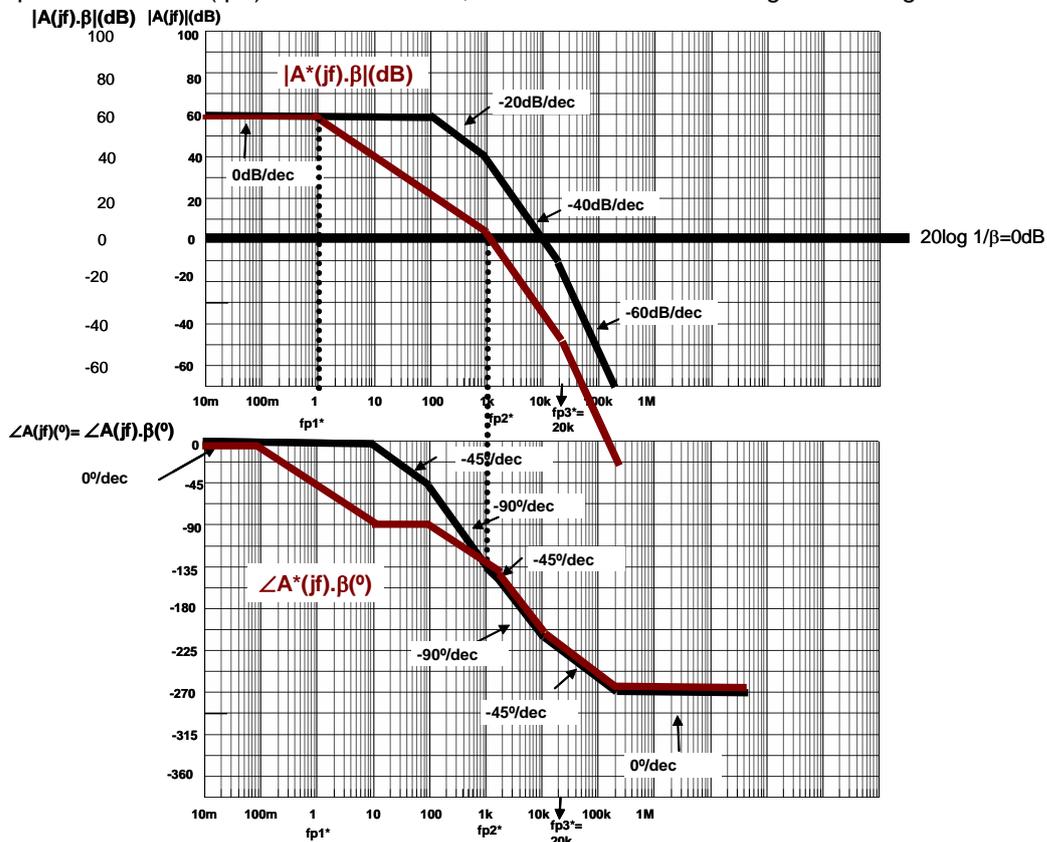
Para que el amplificador realimentado sea estable:  $|A \cdot \beta|_{f=180^\circ} < 0\text{dB}$  (ó  $|\angle A \cdot \beta|_{180^\circ} < 180^\circ$ )



En este caso  $A.\beta|_{f_{180^\circ}} \cong 15\text{dB} \Rightarrow$  El amplificador es inestable.  
También puede obtenerse con  $\angle A.\beta|_{f_{0\text{dB}}} \cong -202.5^\circ$  El amplificador es inestable.

c) ¿A qué frecuencia habría que desplazar el primer polo del amplificador para que el circuito de la Figura realimentado como seguidor de tensión sea estable con un margen de fase de  $45^\circ$ ?. Justifique su respuesta.

Para que el amplificador realimentado sea estable como seguidor de tensión con un margen de fase de  $45^\circ$ , hay que desplazar el polo dominante ( $f_{p1}$ ) de  $100\text{Hz}$  a  $1\text{Hz}$ , como se obtiene en el siguiente Diagrama de Bode.



### EJERCICIO 3

La función de transferencia de un amplificador multietapa con entrada diferencial es la siguiente:

$$A(jf) = \frac{10^3}{\left(1 + j \frac{f}{10^5}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^3}\right) \left(1 + j \frac{f}{10^4}\right)}$$

con f en Hz

**Se pide:**

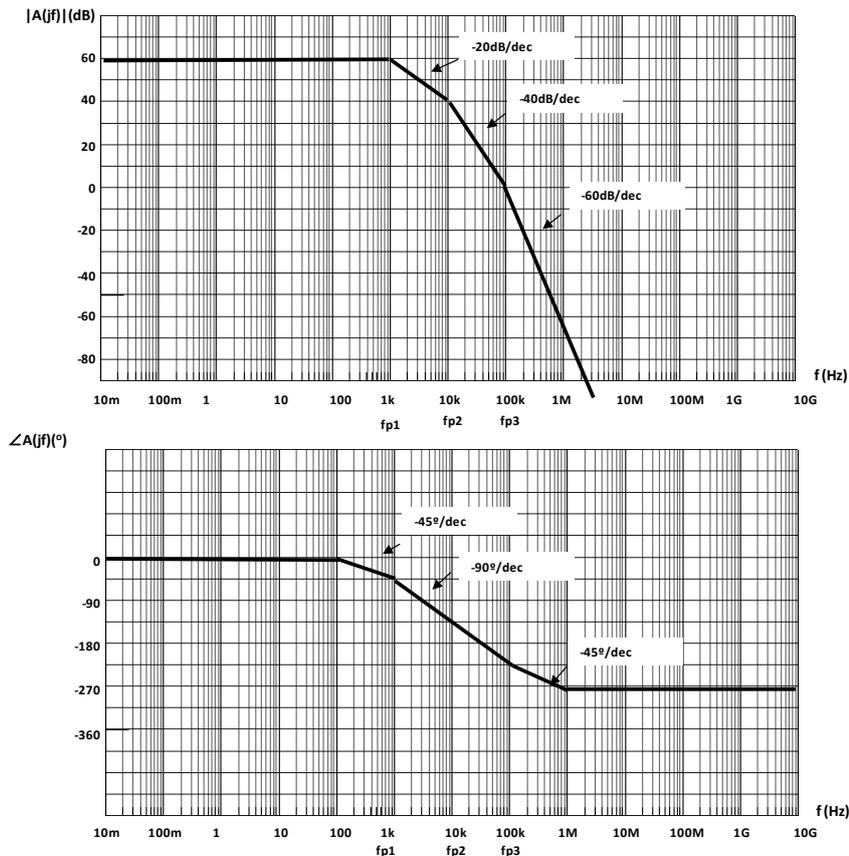
1. Represente el diagrama asintótico de Bode de la respuesta en frecuencia (módulo y fase) del amplificador. ¿Es estable dicho amplificador? Razone la respuesta.

Se desea utilizar dicho amplificador, realimentándolo, como seguidor de tensión. En este caso:

2. Valor de  $\beta$  a utilizar en la red de realimentación. ¿Es estable dicho amplificador realimentado como seguidor? Razone la respuesta.
3. En el supuesto de que el amplificador realimentado como seguidor de tensión sea inestable, proceda a compensarlo mediante polo dominante de forma que el sistema compensado tenga un margen de fase, MF = 45°.

**SOLUCIÓN:**

1. Represente el diagrama asintótico de Bode de la respuesta en frecuencia (módulo y fase) del amplificador. ¿Es estable dicho amplificador? Razone la respuesta.



El amplificador es estable (tiene todos sus polos en el semiplano izquierdo de Laplace)

**Se desea utilizar dicho amplificador, realimentándolo, como seguidor de tensión. En este caso:**

2. Valor de  $\beta$  a utilizar en la red de realimentación. ¿Es estable dicho amplificador realimentado como seguidor? Razone la respuesta.

Si se realimenta el amplificador como seguidor de tensión se tiene:

$$A_{f_m} = \frac{A_{vm}}{1 + A_{vm}\beta} = 1 \Rightarrow \beta = \frac{A_{vm} - 1}{A_{vm}} = \frac{10^3 - 1}{10^3} \cong 1$$

Por lo que el Diagrama de Bode de la ganancia de lazo  $A\beta$  es el mismo que el del amplificador  $A$ .

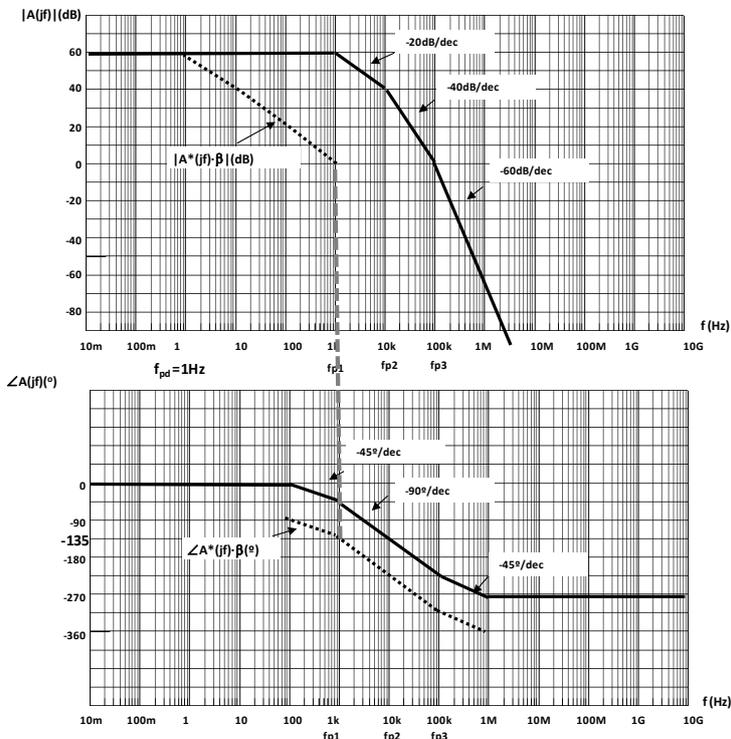
Para que el amplificador sea estable  $|A\beta|_{f_{180^\circ}} < 0\text{dB}$  En el Diagrama de Bode se obtiene, en este caso:  $|A\beta|_{f_{180^\circ}(30\text{kHz})} > 0\text{dB} (\cong 20\text{dB}) \Rightarrow$  El amplificador es inestable.

**3. En el supuesto de que el amplificador realimentado como seguidor de tensión sea inestable, proceda a compensarlo mediante polo dominante de forma que el sistema compensado tenga un margen de fase, MF = 45°.**

Para compensar el amplificador introduciendo un polo dominante, para que sea estable con un margen de fase de 45° tiene que cumplirse:

$$MF = 45^\circ \Rightarrow 180^\circ + \angle A^* \cdot \beta|_{f_{0\text{dB}}} = 45^\circ \Rightarrow \angle A^* \cdot \beta|_{f_{0\text{dB}}} = -135^\circ$$

Imponiendo esta condición en el Diagrama de Bode de la ganancia de lazo ( $A^* \cdot \beta$ ) del amplificador compensado, nos queda que debemos introducir un polo dominante a una frecuencia de 1Hz.



## EJERCICIO 4

En la figura 1 se representa el diagrama asintótico de Bode de un amplificador de tensión con entrada diferencial en lazo abierto,

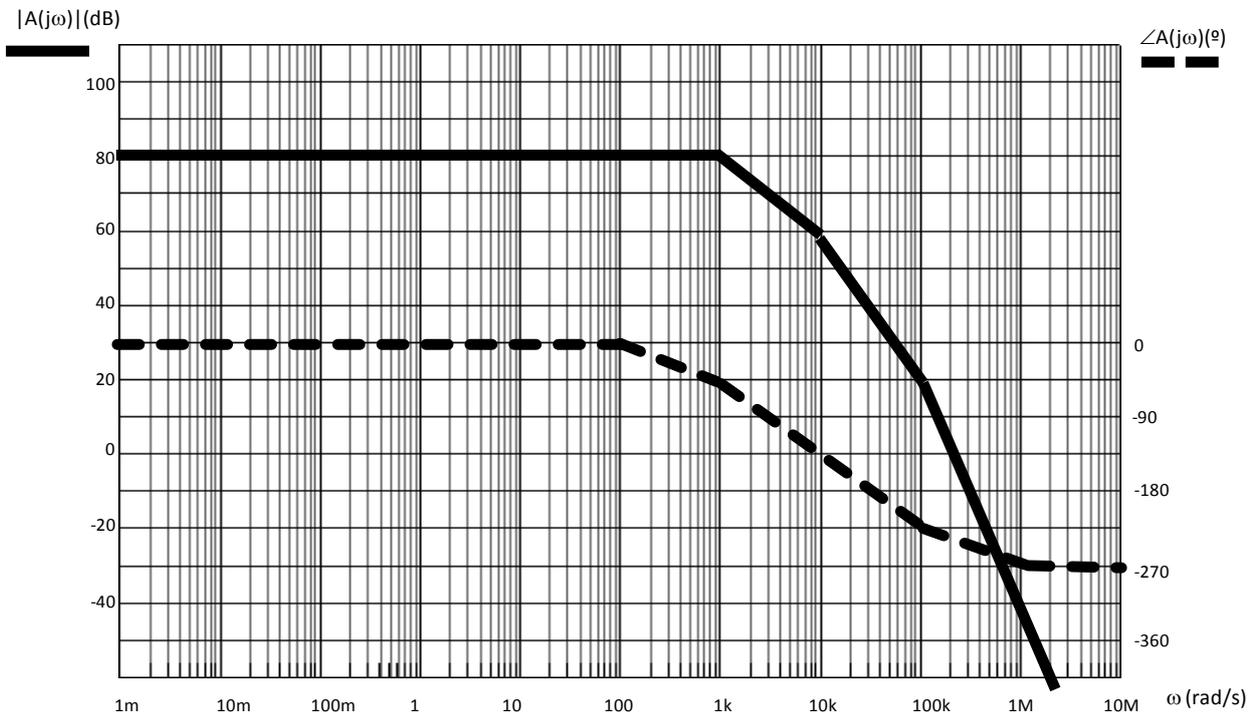


Figura 1

Se pide:

- Determine las frecuencias de los polos y ceros del amplificador, y su ganancia a frecuencias medias. Razone la respuesta.

Se desea utilizar dicho amplificador, realimentándolo, como se muestra en la figura 2

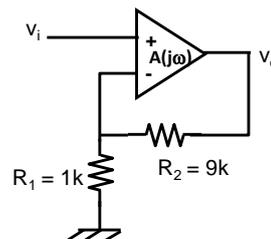


Figura 2

- ¿Es estable el amplificador realimentado de la figura 2? Razone la respuesta.
- En el supuesto de que el amplificador realimentado de la figura 2 sea inestable, proceda a compensarlo mediante polo dominante de forma que el sistema compensado tenga un margen de ganancia,  $MG = 20\text{dB}$ .

**SOLUCIÓN:**

- Determine las frecuencias de los polos y ceros del amplificador, y su ganancia a frecuencias medias. Razone la respuesta.

Polos:  $\omega_{p1} = 1\text{krad/s}$  (caída de  $-20\text{dB/dec}$ ),  $\omega_{p2} = 10\text{krad/s}$  ( $-40\text{dB/dec}$ );  $\omega_{p3} = 100\text{krad/s}$  ( $-60\text{dB/dec}$ )

Ceros:  $\omega_{z1}, \omega_{z2}, \omega_{z3} \rightarrow \infty$

Ganancia a frecuencias medias:  $|A_{vm}| = 80\text{dB}$ ,  $\angle A_{vm} = 0^\circ \Rightarrow A_{vm} = 10^4 \text{ V/V}$

Se desea utilizar dicho amplificador, realimentándolo, como se muestra en la figura 2

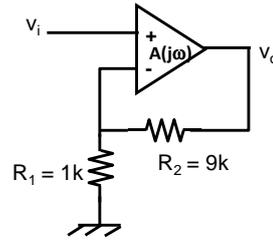


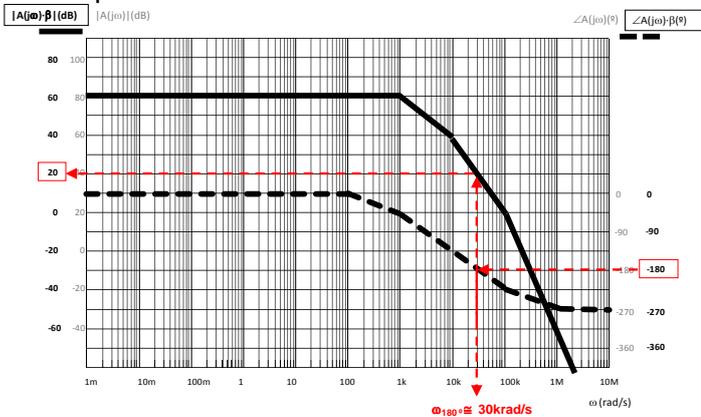
Figura 2

2. ¿Es estable el amplificador realimentado de la figura 2? Razone la respuesta.

El amplificador realimentado de la figura 2 presenta una topología serie- paralelo, donde

$$\beta = \beta_V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.1$$

Una vez determinado el valor de la ganancia de la red de realimentación,  $\beta$ , para estudiar la estabilidad del amplificador realimentado de la figura 2 dibujamos el diagrama de Bode la ganancia de lazo  $A \cdot \beta$  y vemos si se cumple el criterio de estabilidad:



Para que el amplificador realimentado sea estable:

$$|A \cdot \beta|_{\omega_{180^\circ}} < 0 \text{ dB}$$

En el Diagrama de Bode se obtiene, en este caso:

$$|A \cdot \beta|_{\omega_{180^\circ} (\approx 30 \text{ krad/s})} > 0 \text{ dB} (\approx 20 \text{ dB})$$

⇒ El amplificador realimentado de la figura 2 es inestable.

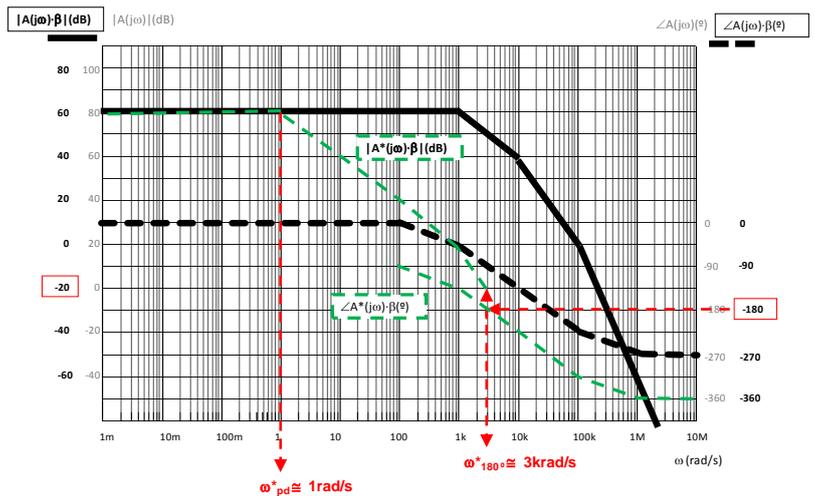
3. En el supuesto de que el amplificador realimentado de la figura 2 sea inestable, proceda a compensarlo mediante polo dominante de forma que el sistema compensado tenga un margen de ganancia,  $MG = 20 \text{ dB}$ .

Para compensar el amplificador realimentado mediante polo dominante, para que sea estable con un margen de ganancia de 20dB tiene que cumplirse:

$$MG = 20 \text{ dB} \Rightarrow 0 \text{ dB} - |A^* \cdot \beta|_{\omega_{180^\circ}} = 20 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow |A^* \cdot \beta|_{\omega_{180^\circ}} = -20 \text{ dB}$$

Imponiendo esta condición en el Diagrama de Bode de la ganancia de lazo ( $A^* \cdot \beta$ ) del amplificador compensado, nos queda que debemos introducir un polo dominante a una frecuencia de 1rad/s.



### EJERCICIO 5

La función de transferencia de un amplificador de tensión con entrada diferencial es:

$$A_v(jf) = \frac{500}{\left(1 + j \frac{f}{1\text{kHz}}\right) \cdot \left(1 + j \frac{f}{1\text{kHz}}\right) \cdot \left(1 + j \frac{f}{10\text{kHz}}\right)}$$

1. Represente el Diagrama asintótico de Bode (módulo y fase) del amplificador,  $A_v(jf)$ . ¿Es estable este amplificador? Justifique su respuesta.
2. Se realimenta este amplificador como seguidor de tensión, tal como se muestra en la Figura 2.

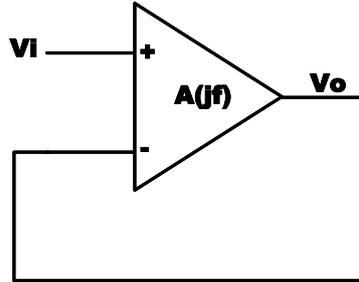


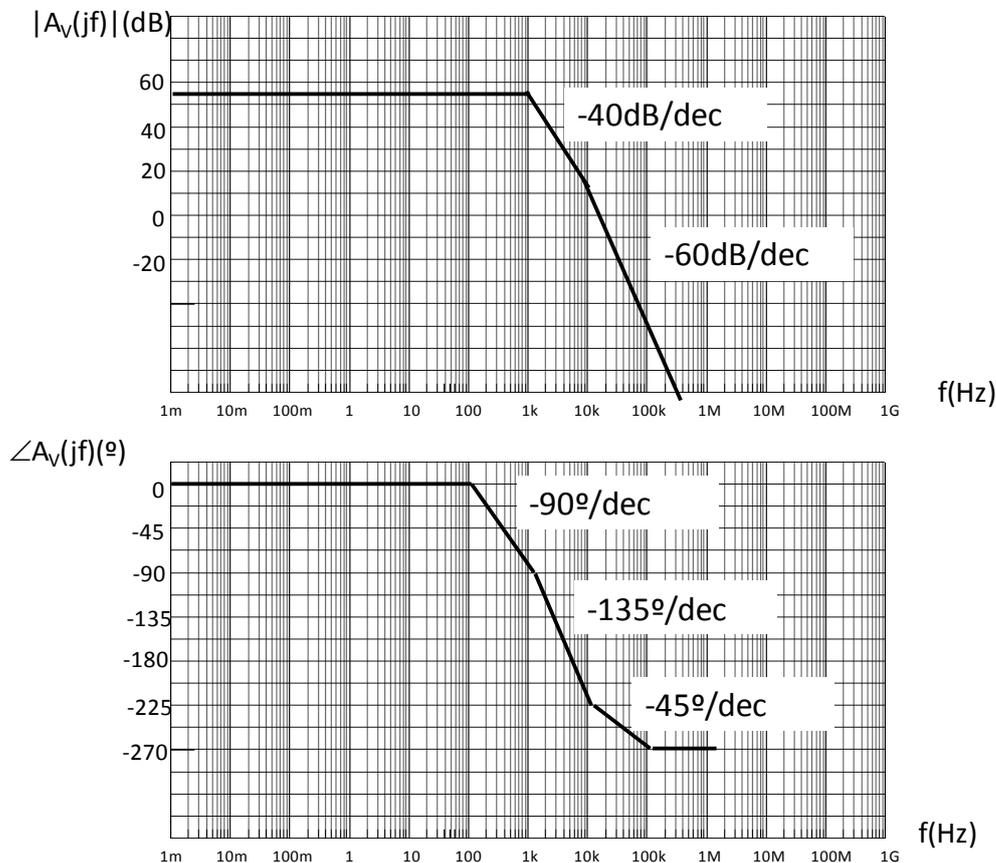
Figura 2

¿Es estable dicho amplificador realimentado como seguidor de tensión? Justifique su respuesta.

3. ¿A qué frecuencia habría que introducir un polo dominante en el amplificador para que sea estable realimentado como seguidor de tensión con un margen de ganancia de 20dB? Justifique su respuesta.

#### SOLUCIÓN:

1. Represente el Diagrama asintótico de Bode (módulo y fase) del amplificador,  $A(jf)$ . ¿Es estable este amplificador? Justifique su respuesta.



El amplificador sin realimentar es estable ya que todos sus polos se encuentran en el semiplano izquierdo del Plano de Laplace.

2. Se realimenta este amplificador como seguidor de tensión, tal como se muestra en la Figura 2.

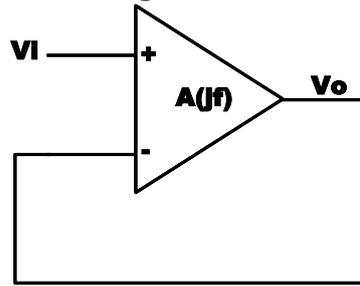
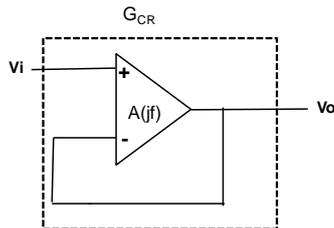


Figura 2

¿Es estable dicho amplificador realimentado como seguidor de tensión? Justifique su respuesta.

Realimentado como seguidor de tensión se tiene (realimentación serie-paralelo ⇒ Amplificador de tensión):



$$G_{CRm} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_{Vm}}{1 + A_{Vm} \cdot \beta_V} = 1$$

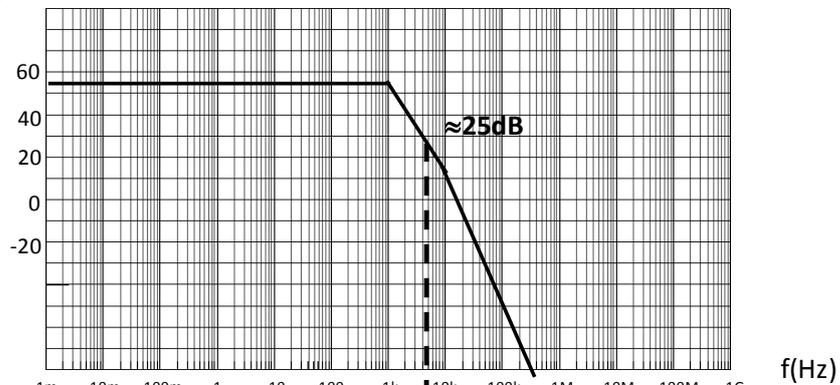
$$A_{Vm} = 500 \quad \Rightarrow \beta_V \cong 1 \Rightarrow |A_V \cdot \beta_V(jf)| = |A_V(jf)|$$

Comprobando el criterio de estabilidad de Nyquist en el Diagrama de Bode de la ganancia de lazo ( $A \cdot \beta$ ) se tiene:

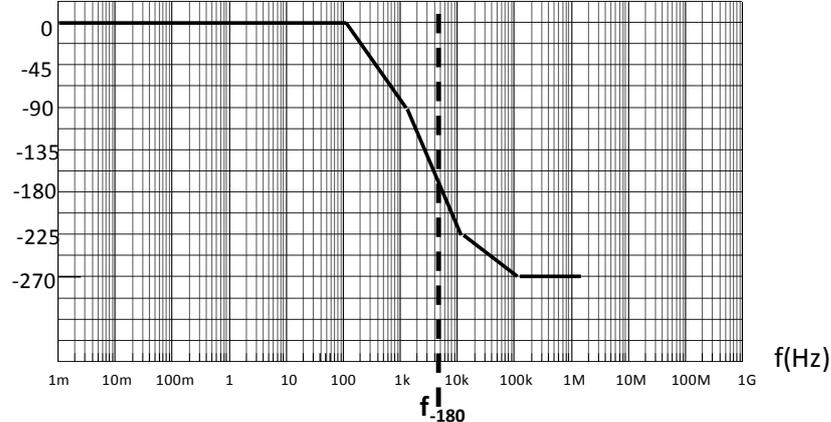
$$|A_V \cdot \beta_V(jf_{-180})| \cong 25dB > 0dB$$

Por lo tanto, este amplificador es inestable realimentado como seguidor de tensión.

$$|A_V(jf) \cdot \beta|(dB) = |A_V(jf)|(dB)$$



$$\angle A_V(jf) \cdot \beta(\circ) = \angle A_V(jf)(\circ)$$



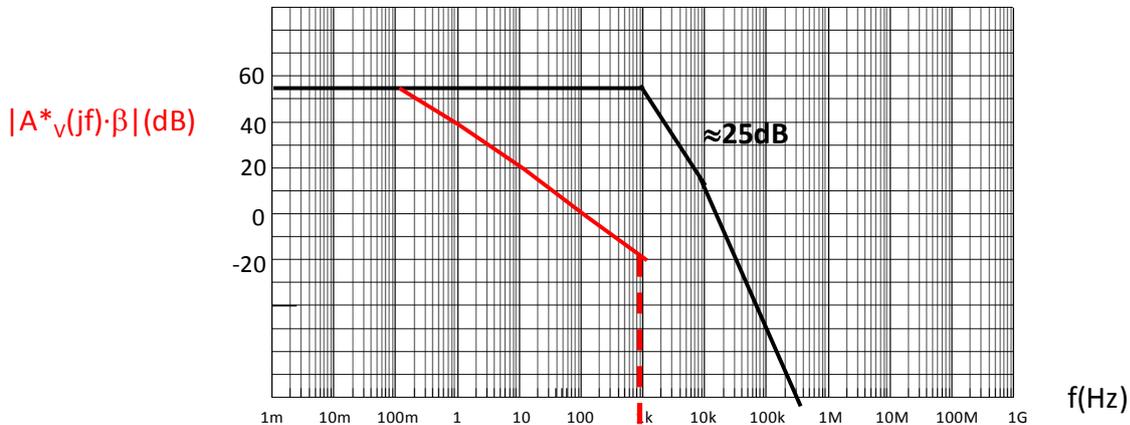
6. ¿A qué frecuencia habría que introducir un polo dominante en el amplificador para que sea estable realimentado como seguidor de tensión con un margen de ganancia de 20dB? Justifique su respuesta y represente el esquema del amplificador compensado.

$$MG = 20dB = 0dB - |A^* \cdot \beta(jf_{180^\circ})| \Rightarrow |A^* \cdot \beta(jf_{180^\circ})| = -20dB$$

$A^* \equiv$  Amplificador compensado

Imponiendo esta condición en el Diagrama de Bode se tiene, en este caso,  $f_{pd} \approx 100\text{mHz}$ :

$$|A_v^*(jf) \cdot \beta|(dB) = |A_v(jf)|(dB)$$



$$\angle A_v(jf) \cdot \beta(^{\circ}) = \angle A_v(jf)^{\circ}$$

