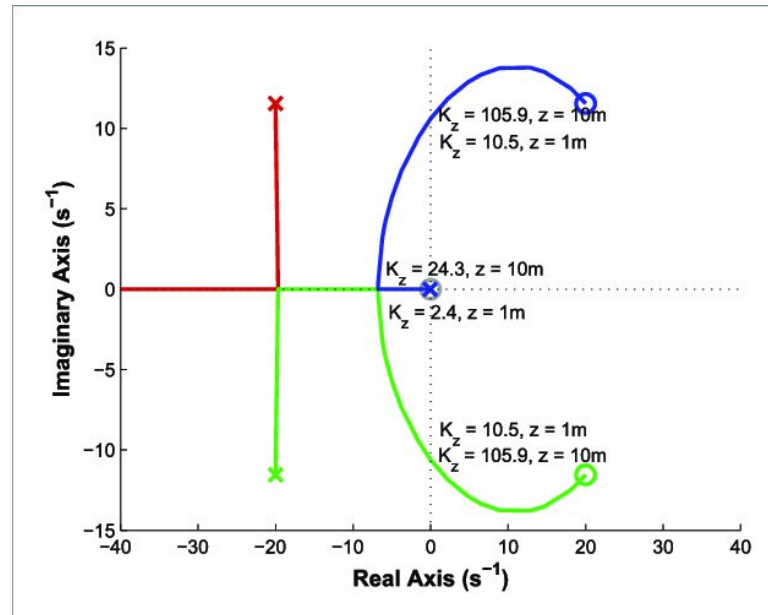


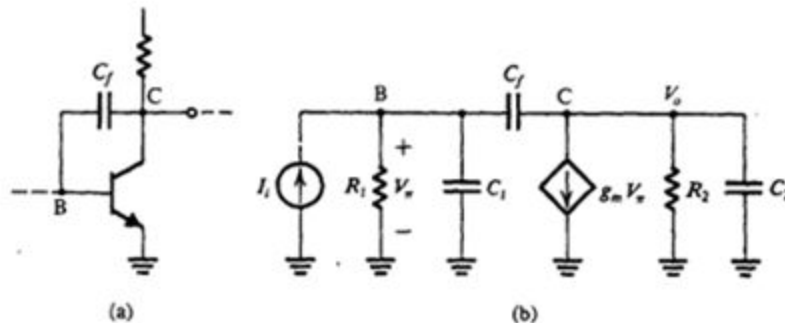


ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 1

Se tiene una etapa amplificadora de tensión con ganancia a lazo abierto de 80 dB, polos en 10^5 y 10^6 Hz. Se va a compensar para ser estable para una realimentación unitaria. Suponer que ese amplificador **esta implementado como en la figura siguiente**, con $C_1 = 150 \text{ pF}$, con $C_2 = 5 \text{ pF}$ y $g_m = 40 \text{ mA/V}$. Además considerar que f_{p1} es causada por el circuito de entrada y que f_{p2} por el circuito de salida **de** este amplificador. Encontrar el valor de la capacitancia de compensación y las nuevas frecuencias de los polos.

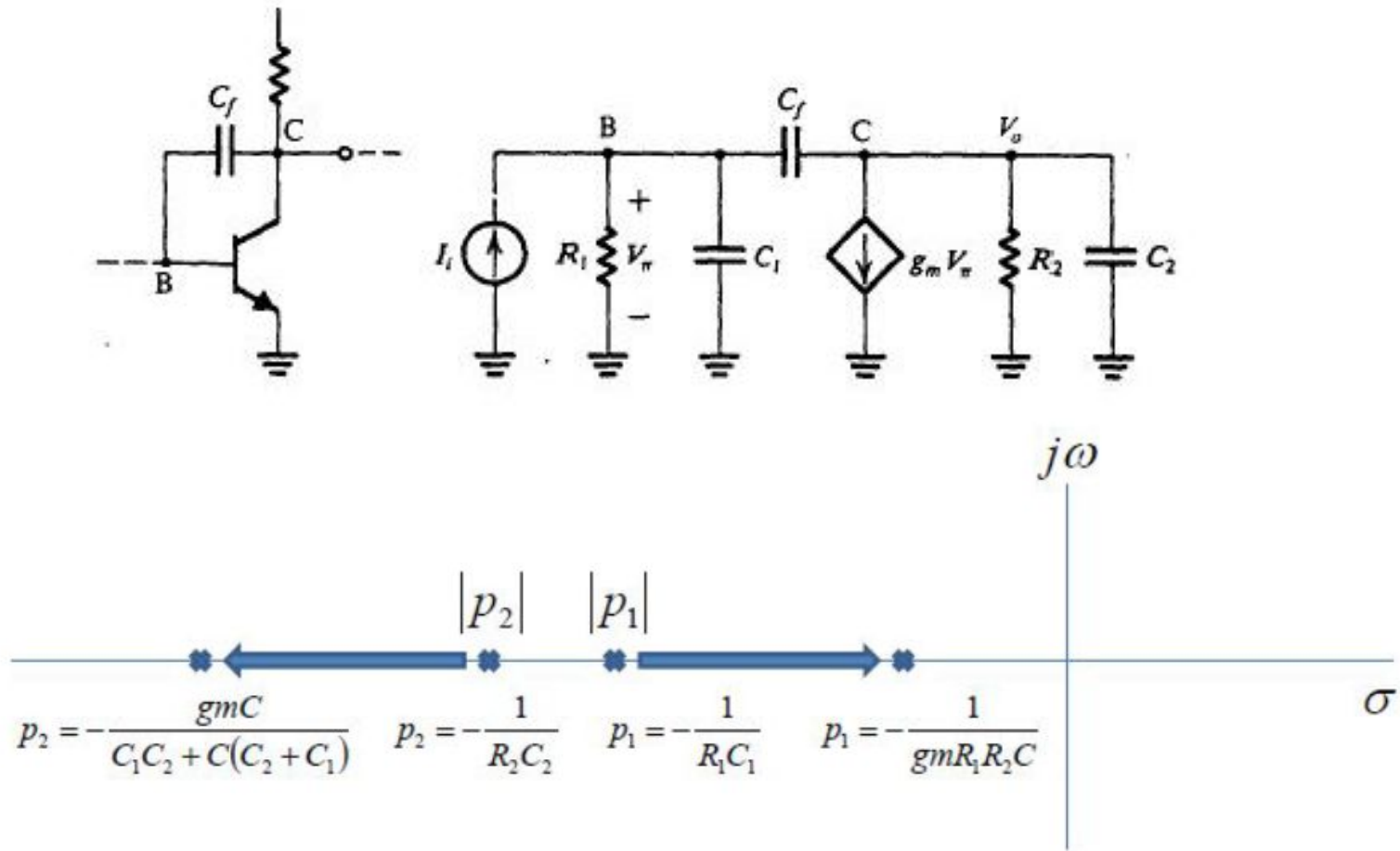


Nota: considerar que se desea que el polo a baja frecuencia no sea mayor a 500hz

Fig. 8.40 (a) Etapa de ganancia en un amplificador de varias etapas con un condensador de compensación conectado en el circuito de retroalimentación, y (b) circuito equivalente.

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 1

Compensación de Miller y división de polo.



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 1

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \rightarrow R_1 = \frac{1}{2\pi f_{p1} C_1} = \frac{1}{2\pi 10^5 \text{Hz} 150 \text{pF}} = 10,6 \text{K}\Omega$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \rightarrow R_2 = \frac{1}{2\pi f_{p2} C_2} = \frac{1}{2\pi 10^6 \text{Hz} 5 \text{pF}} = 31,8 \text{K}\Omega$$

Si se conecta el capacitor C_f en la realimentación

Fijo el polo de baja frecuencia en el valor de 100Hz para cumplir con lo pedido.

$$f'_{p1} = \frac{1}{2\pi g_m R_1 R_2 C_f} = 100 \text{Hz}$$

A partir de ese valor, se calcula el capacitor de compensación

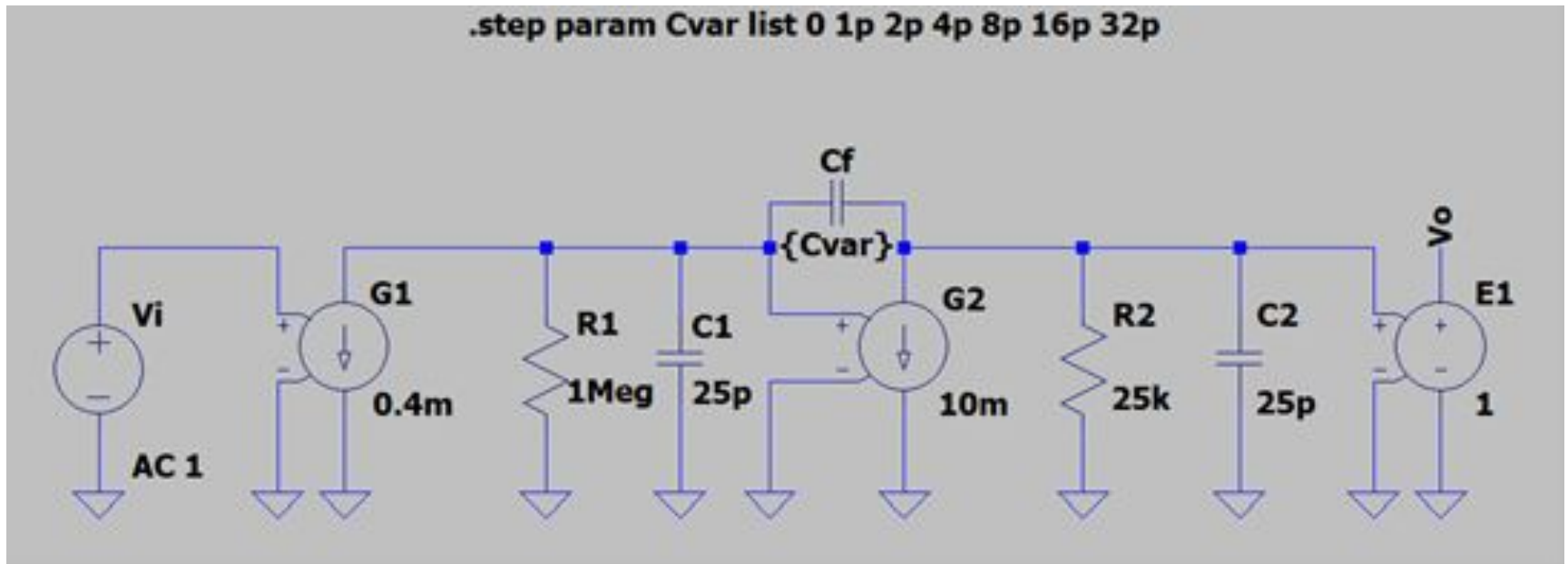
$$C_f = \frac{1}{2\pi g_m R_1 R_2 f'_{p1}} = \frac{1}{2\pi (40 \text{mA/V})(10,6 \text{K}\Omega)(31,8 \text{K}\Omega)(100 \text{Hz})} = 118 \text{pF}$$

$$f'_{p2} = \frac{g_m C_f}{2\pi [C_1 C_2 + C_f (C_1 + C_2)]} \text{ y si } C_f \gg C_2 \text{ podemos aproximar}$$

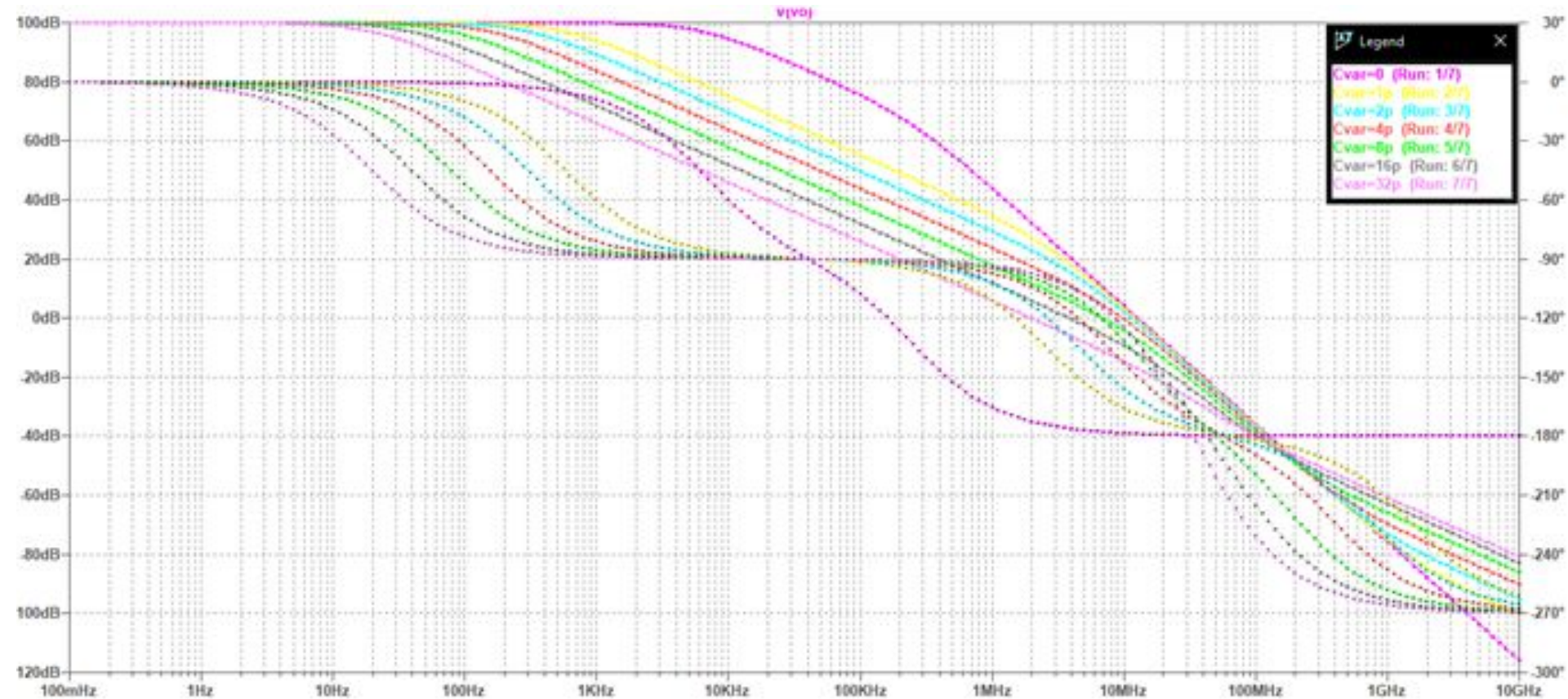
$$f'_{p2} \cong \frac{g_m}{2\pi [C_1 + C_2]} = \frac{40 \text{mA/V}}{2\pi [150 \text{pF} + 5 \text{pF}]} = 41 \text{MHz}$$

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 2

Sobre el siguiente circuito se desea realizar una compensación utilizando la técnica de **pole splitting**. Se realizaron varios ensayos con diferentes valores de capacitancias y se obtuvieron las diferentes curvas de respuesta en frecuencia. Se encontró que utilizando una capacitancia de 8pF, se obtiene un MF = 60° aproximadamente.



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 2



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 2

En función a todo lo expuesto anteriormente, **marcar las afirmaciones correctas**:

- A. La técnica de compensación **pole splitting** agrega un polo de baja frecuencia al sistema.
- B. La técnica de compensación **pole splitting** mejora el margen de fase, ya que este se ve incrementado por el adelanto de fase ocasionado por un cero en el sistema.
- C. La técnica de compensación **pole splitting** desplaza al polo dominante hacia las bajas frecuencias y esto conlleva una mejora en el margen de fase.
- D. En el sistema sin compensación, el polo dominante está ubicado a una frecuencia menor a 7KHz, mientras que el segundo polo está ubicado a una frecuencia mayor a 250KHz.
- E. En el diagrama de Bode, podemos apreciar que aumentando el valor del capacitor de compensación, el polo dominante se desplaza hacia las altas frecuencias mientras que el segundo polo lo hace hacia las bajas frecuencias.
- F. Para calcular la nueva ubicación de los polos, será conveniente utilizar el método de reflexión por Miller al capacitor que está generando una realimentación local.
- G. Los polos en el sistema sin compensación están ubicados exactamente en 20Hz y 200KHz.
- H. Utilizando un capacitor de compensación de 8pF se ha logrado que el polo de baja frecuencia este posicionado a un valor menor a 100Hz, mientras que el polo de alta frecuencia lo este a un valor mayor a 10MHz.
- I. Siempre resulta conveniente utilizar un capacitor de compensación lo más grande posible, de forma tal que se obtenga el mayor margen de fase posible, ya que esto no produce ninguna consecuencia desfavorable.

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 2

Cálculos a realizar para la resolución del de algunos puntos del cuestionario anterior

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi(1M\Omega)25pF} \cong 6,37KHz$$

$$f'_1 = \frac{1}{2\pi R_1 R_2 G_m C_f} = \frac{1}{2\pi(1M\Omega)(25K\Omega)(10 \frac{mA}{V})8pF} \cong 79,58Hz$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2\pi(25K\Omega)25pF} \cong 254,64KHz$$

$$f'_2 = \frac{G_m C_f}{2\pi(C_1 C_2 + C_f(C_1 + C_2))} = \frac{(10 \frac{mA}{V})8pF}{2\pi[(25pF)(25pF) + 8pF(25pF + 25pF)]} \cong 12,42MHz$$

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 2

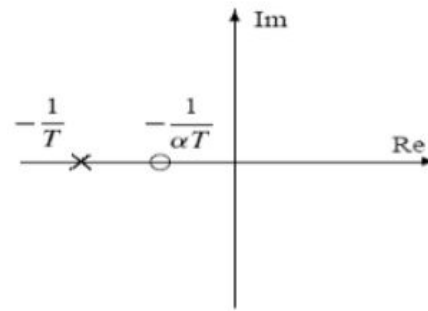
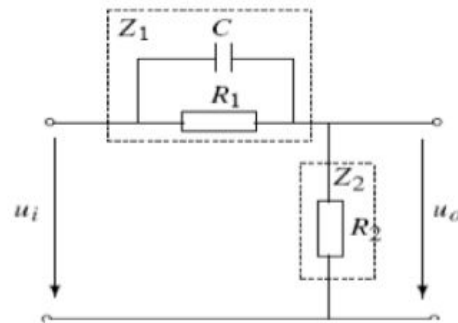
En función a todo lo expuesto anteriormente, **marcar las afirmaciones correctas**:

- A. La técnica de compensación **pole splitting** agrega un polo de baja frecuencia al sistema. **F**
- B. La técnica de compensación **pole splitting** mejora el margen de fase, ya que este se ve incrementado por el adelanto de fase ocasionado por un cero en el sistema. **F**
- C. La técnica de compensación **pole splitting** desplaza al polo dominante hacia las bajas frecuencias y esto conlleva una mejora en el margen de fase. **V**
- D. En el sistema sin compensación, el polo dominante está ubicado a una frecuencia menor a 7KHz, mientras que el segundo polo está ubicado a una frecuencia mayor a 250KHz. **V**
- E. En el diagrama de Bode, podemos apreciar que aumentando el valor del capacitor de compensación, el polo dominante se desplaza hacia las altas frecuencias mientras que el segundo polo lo hace hacia las bajas frecuencias. **F**
- F. Para calcular la nueva ubicación de los polos, será conveniente utilizar el método de reflexión por Miller al capacitor que está generando una realimentación local. **V**
- G. Los polos en el sistema sin compensación están ubicados exactamente en 20Hz y 200KHz. **F**
- H. Utilizando un capacitor de compensación de 8pF se ha logrado que el polo de baja frecuencia este posicionado a un valor menor a 100Hz, mientras que el polo de alta frecuencia lo este a un valor mayor a 10MHz. **V**
- I. Siempre resulta conveniente utilizar un capacitor de compensación lo más grande posible, de forma tal que se obtenga el mayor margen de fase posible, ya que esto no produce ninguna consecuencia desfavorable. **F**

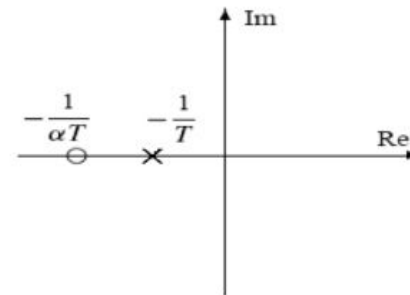
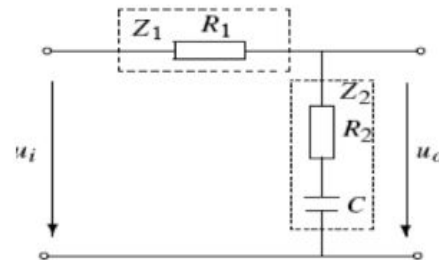
ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 3

Se tiene un amplificador realimentado serie-paralelo, al cual se le realizó un análisis de estabilidad ensayando la respuesta en frecuencia de su ganancia de lazo. Se determinó que resultaba necesario compensarlo.

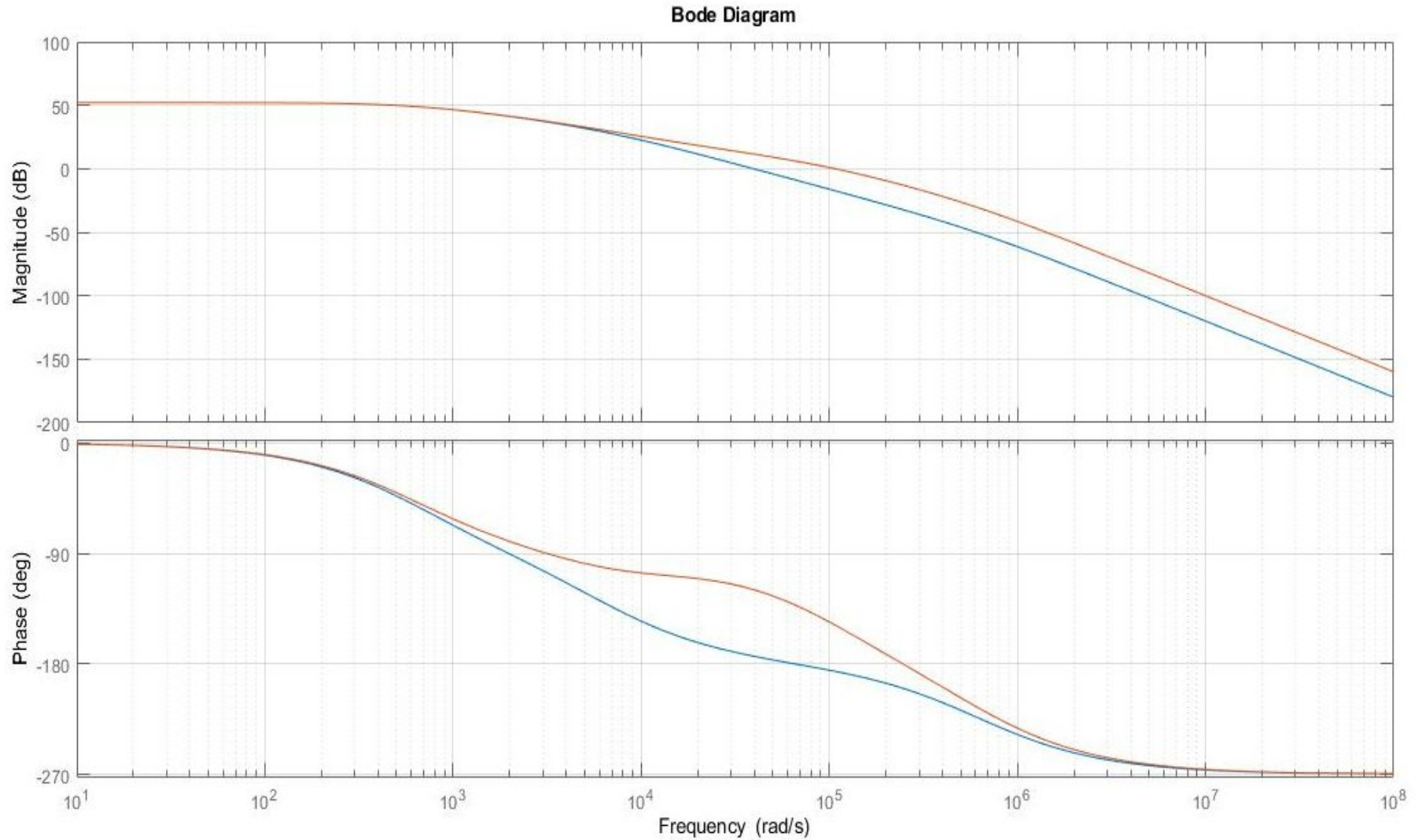
1



2



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 3



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 3

En función de lo expuesto, determinar cuáles afirmaciones son correctas.

- A. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando la técnica de pole splitting.
- B. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando un compensador por adelanto de fase, que se corresponde con la implementación representada en “1” sobre el realimentador del circuito.
- C. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando un compensador por adelanto de fase, que se corresponde con la implementación representada en “2” sobre el realimentador del circuito.
- D. El circuito implementado en “1” representa una red de adelanto de fase, mientras que el implementado en “2” representa una red de atraso de fase.
- E. Se necesita compensar el circuito original, porque puede apreciarse que se tiene un MF muy pequeño y ante cualquier mínima variación en el valor del realimentador del circuito se puede tener inestabilidad.
- F. El circuito implementado en “2” representa una red de adelanto de fase, mientras que el implementado en “1” representa una red de atraso de fase.
- G. Con el agregado de un capacitador en el realimentador, se puede lograr una red de adelanto de fase que incremente la fase en la zona deseada del bode y en consecuencia mejorar el MF.
- H. La curva roja se corresponde con el circuito original sin compensar mientras que la curva azul se corresponde con el circuito compensado con la técnica de pole splitting.
- I. Se ha logrado que el sistema compensado tenga un MF de aproximadamente 30° .
- J. Con el agregado de un capacitador en el realimentador, se puede lograr una red de adelanto de fase, tal como el implementado en el circuito “2”.

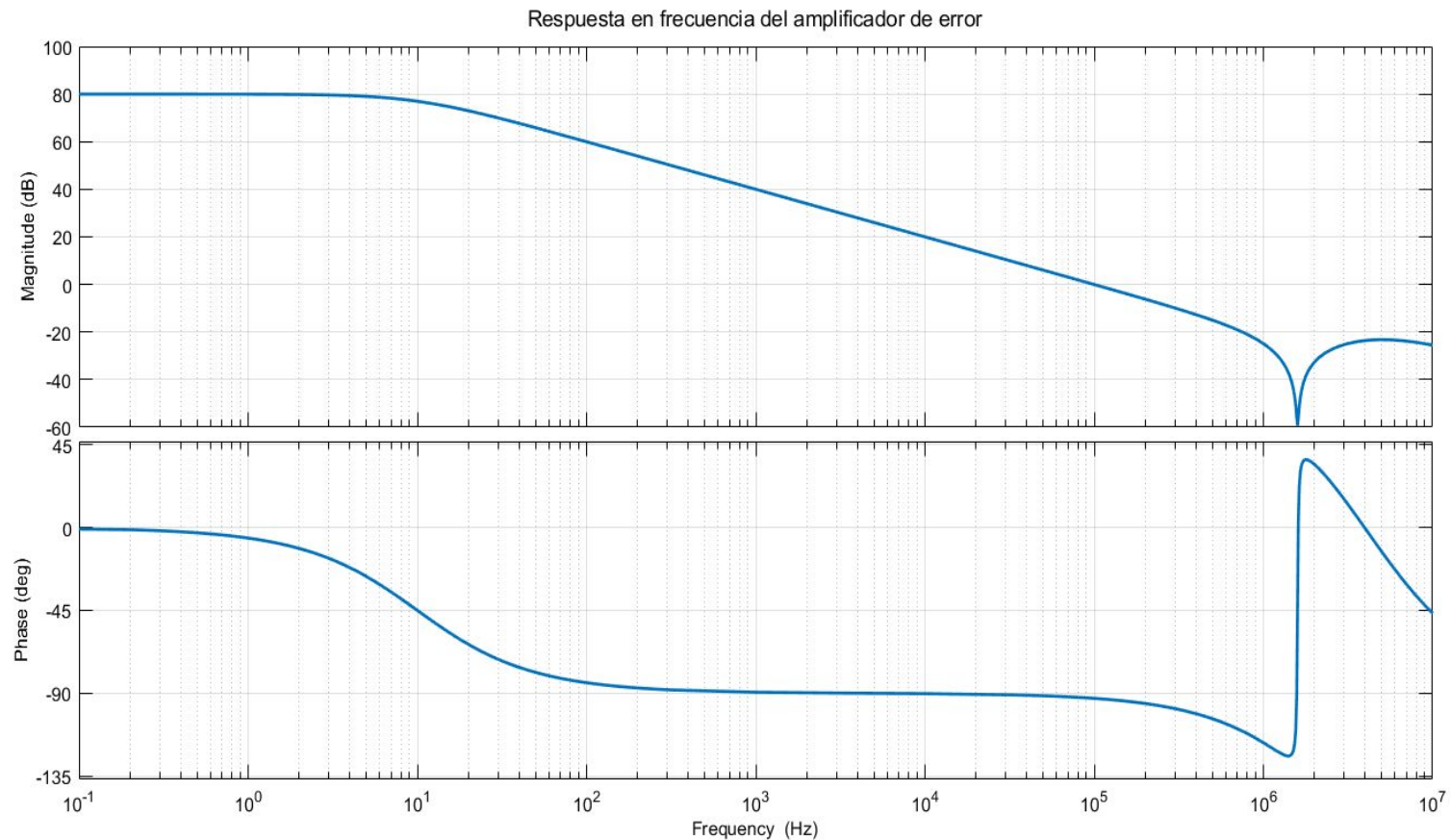
ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 3

En función de lo expuesto, determinar cuáles afirmaciones son correctas.

- A. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando la técnica de pole splitting. **F**
- B. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando un compensador por adelanto de fase, que se corresponde con la implementación representada en “1” sobre el realimentador del circuito. **V**
- C. Sabiendo que la curva azul se corresponde con el sistema original, se verifica que la compensación se realizó utilizando un compensador por adelanto de fase, que se corresponde con la implementación representada en “2” sobre el realimentador del circuito. **F**
- D. El circuito implementado en “1” representa una red de adelanto de fase, mientras que el implementado en “2” representa una red de atraso de fase. **V**
- E. Se necesita compensar el circuito original, porque puede apreciarse que se tiene un MF muy pequeño y ante cualquier mínima variación en el valor del realimentador del circuito se puede tener inestabilidad. **V**
- F. El circuito implementado en “2” representa una red de adelanto de fase, mientras que el implementado en “1” representa una red de atraso de fase. **F**
- G. Con el agregado de un capacitador en el realimentador, se puede lograr una red de adelanto de fase que incremente la fase en la zona deseada del bode y en consecuencia mejorar el MF. **V**
- H. La curva roja se corresponde con el circuito original sin compensar mientras que la curva azul se corresponde con el circuito compensado con la técnica de pole splitting. **F**
- I. Se ha logrado que el sistema compensado tenga un MF de aproximadamente 30° . **V**
- J. Con el agregado de un capacitador en el realimentador, se puede lograr una red de adelanto de fase, tal como el implementado en el circuito “2”. **F**

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 4

Se tiene un amplificador operacional con la respuesta en frecuencia mostrada en la siguiente figura. Se lo quiere utilizar como seguidor, con ganancia a lazo cerrado unitaria.



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 4

Determinar cuál o cuáles de las siguientes afirmaciones es correcta:

- A. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase de 90° .
- B. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase menor a 90° .
- C. El amplificador a lazo cerrado no será estable.
- D. El error en estado estacionario para la respuesta al escalón es $100\mu\text{V}$.
- E. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase aproximado de 45° .
- F. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase aproximado de 30° .
- G. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de ganancia de aproximadamente 30dB .

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 4

Determinar cuál o cuáles de las siguientes afirmaciones es correcta:

A. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase de 90° . **V**

El amplificador a lazo cerrado es estable porque tiene ceros complejos conjugados en el semiplano izquierdo, el margen de fase es positivo y el margen de ganancia sería infinito porque no se llega a rotar 180° .

B. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase menor a 90° . **F**

C. El amplificador a lazo cerrado no será estable. **F**

D. El error en estado estacionario para la respuesta al escalón es $100\mu V$. **V**

$$\Delta V_o = \frac{V_{ref}}{f} \frac{1}{1+af} = \frac{1V}{1^{V/V}} \frac{1}{1+10 \times 10^3 V/V \cdot 1^{V/V}} \cong 100\mu V$$

E. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase aproximado de 45° . **F**

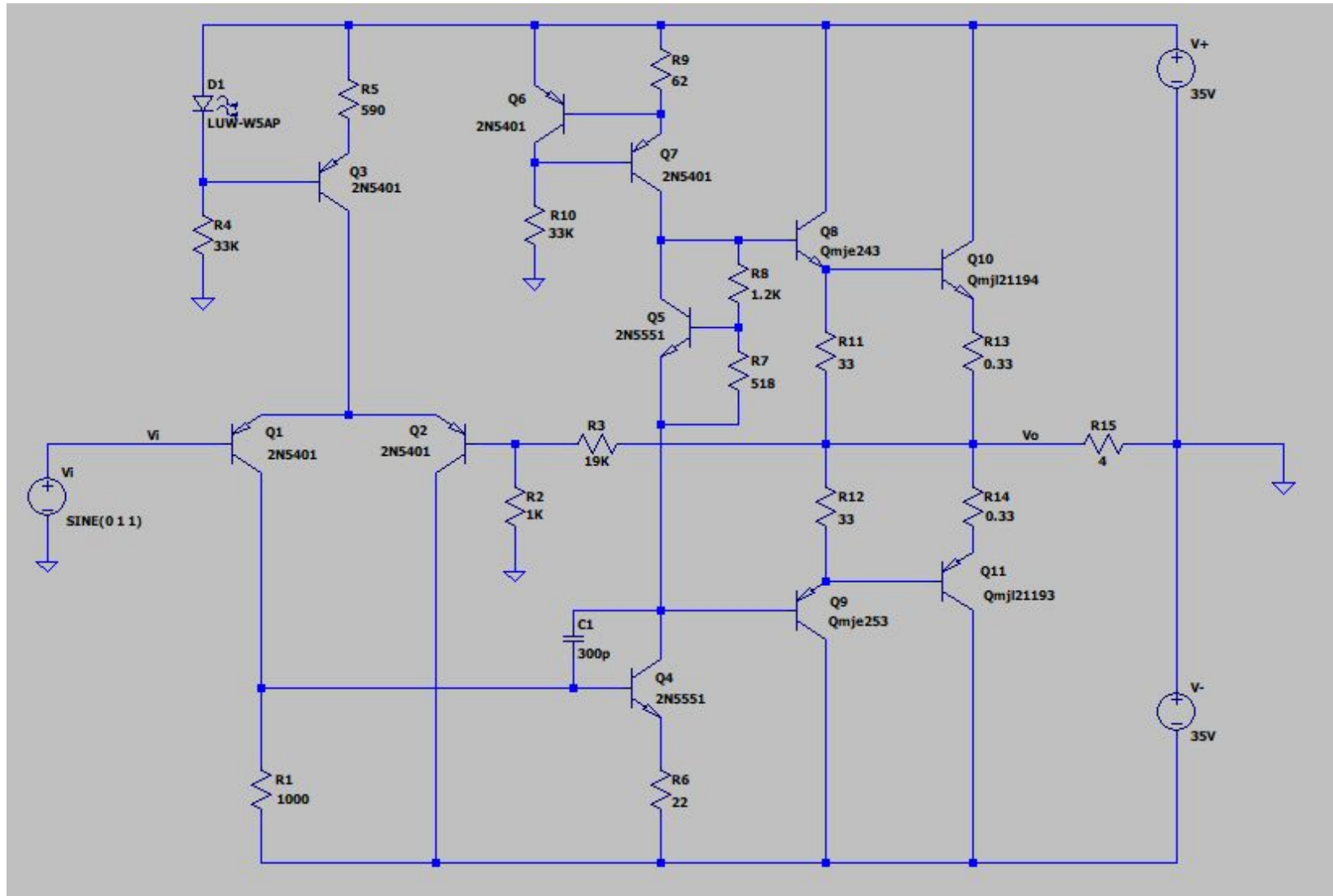
F. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de fase aproximado de 30° . **F**

G. El amplificador a lazo cerrado será estable con un margen de ganancia de aproximadamente 30dB. **F**

El margen de ganancia sería infinito porque no se llega a rotar 180° .

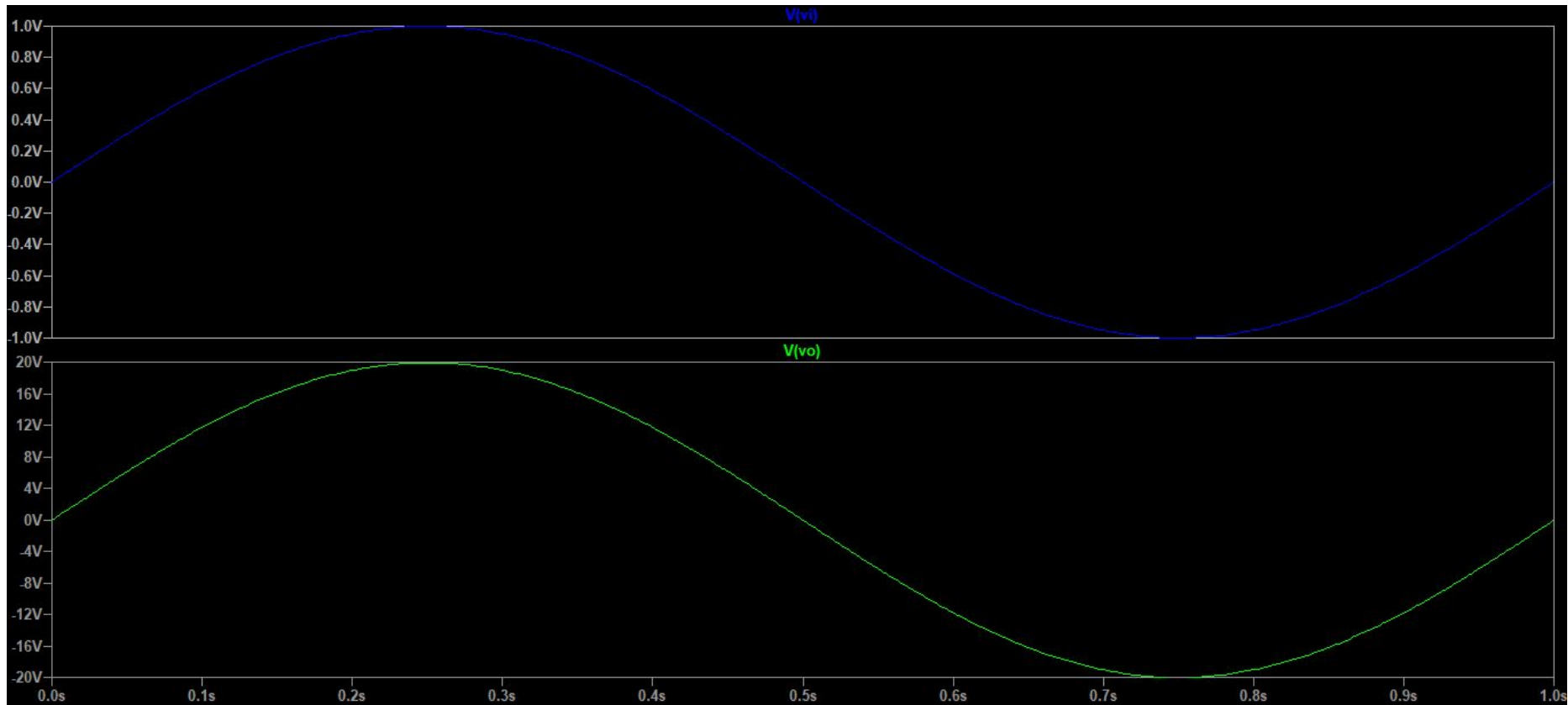
ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 5

Analizar el siguiente circuito identificando las partes



Tensión de entrada vs Tensión de salida

1. Analizamos tipo de realimentación.
2. Calculamos el valor de la ganancia del realimentador “f”.
3. Calculamos la ganancia de lazo cerrado y comparamos con lo obtenido por simulación.



Análisis del circuito sin compensar

1. Analizamos diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T".
2. Graficamos la respuesta del amplificador a un tren de pulsos.

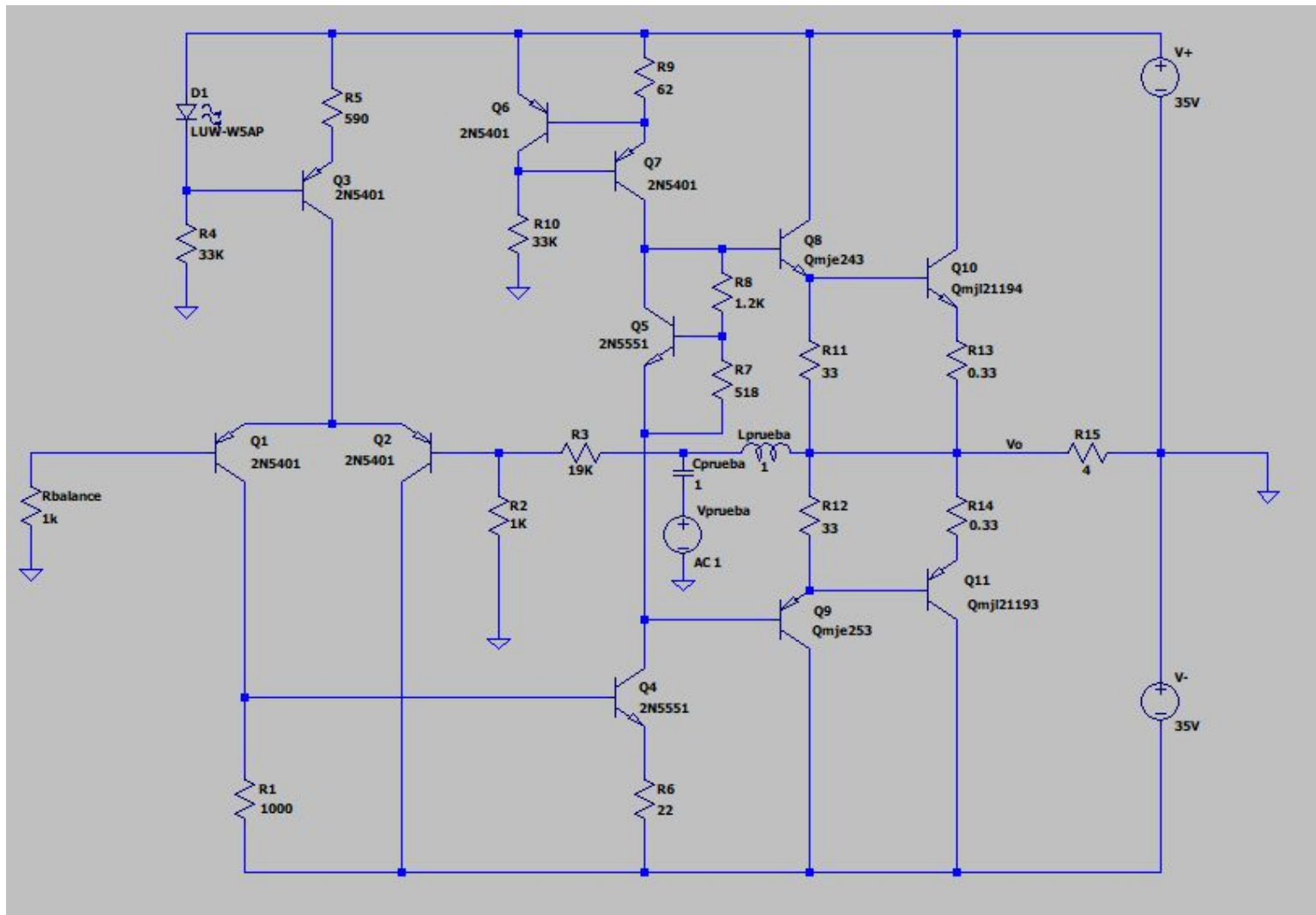
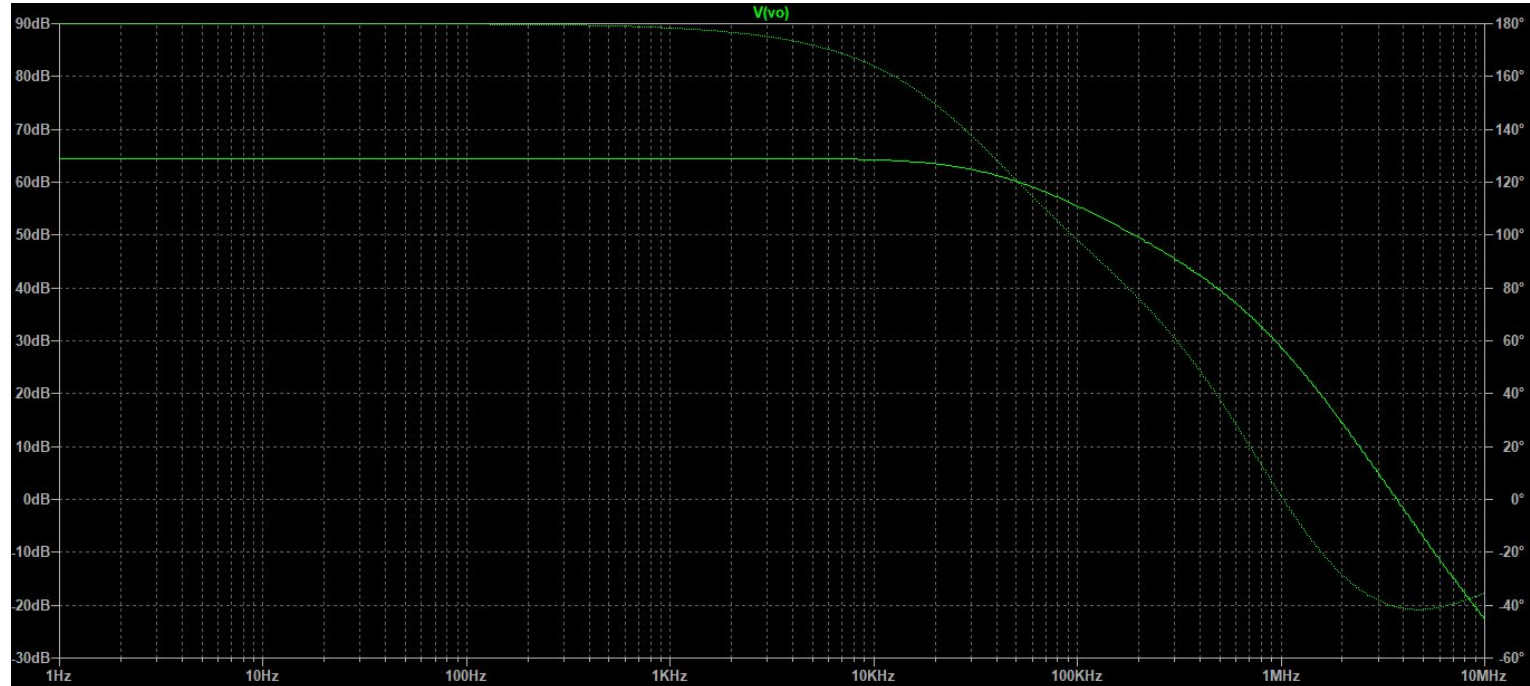
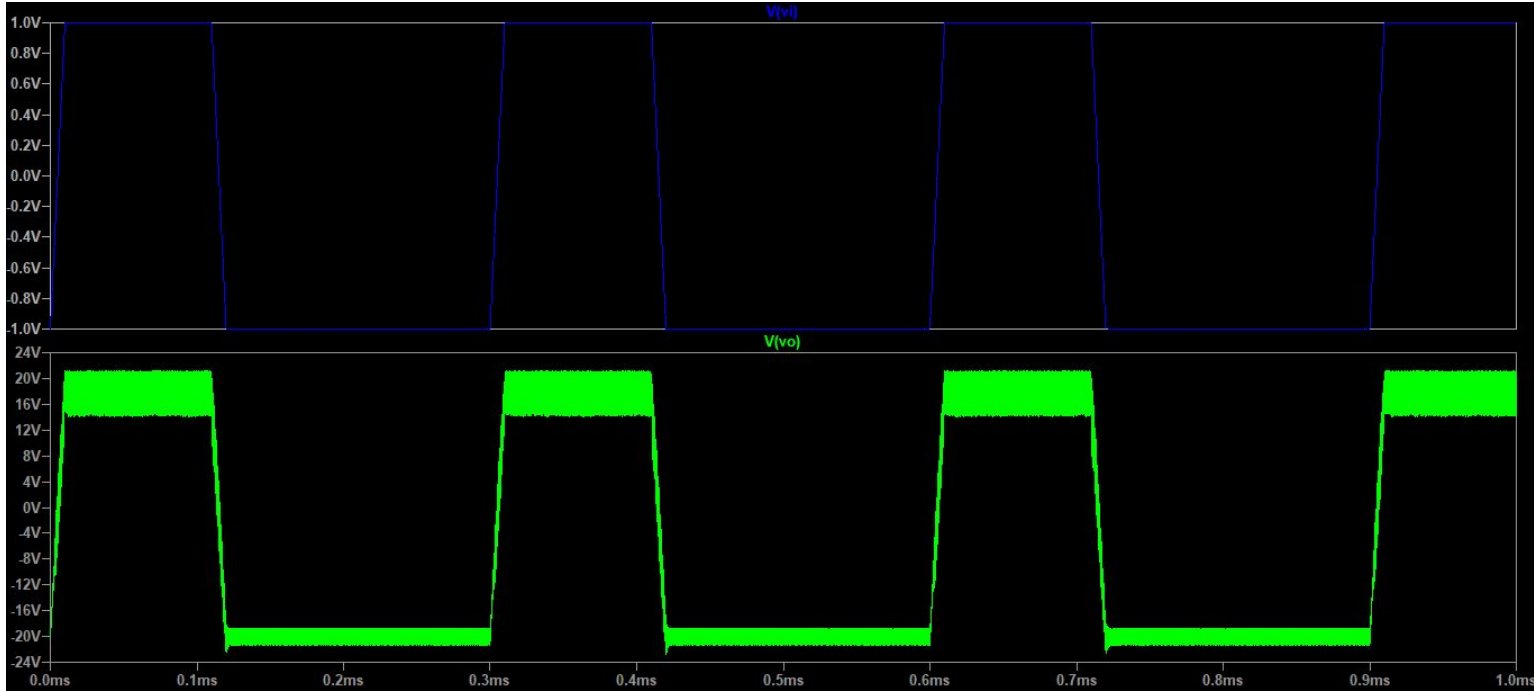


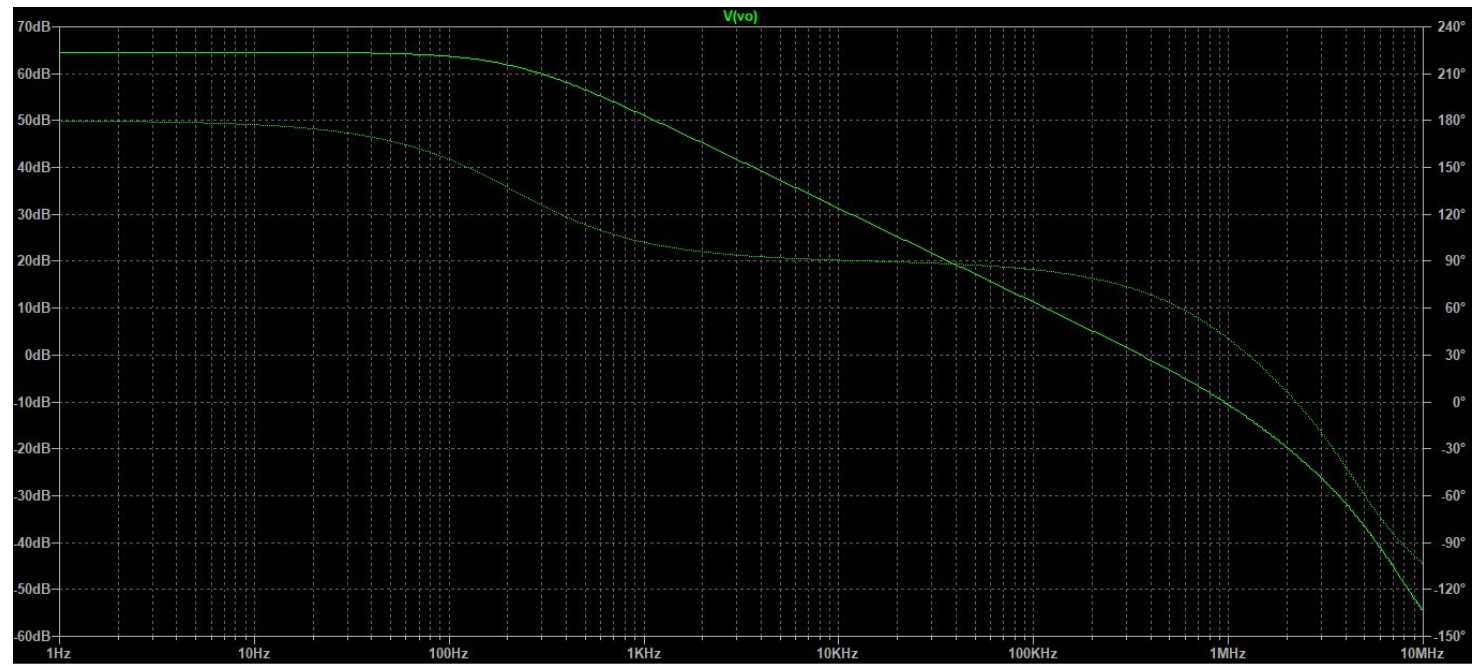
Diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T" del circuito sin compensación



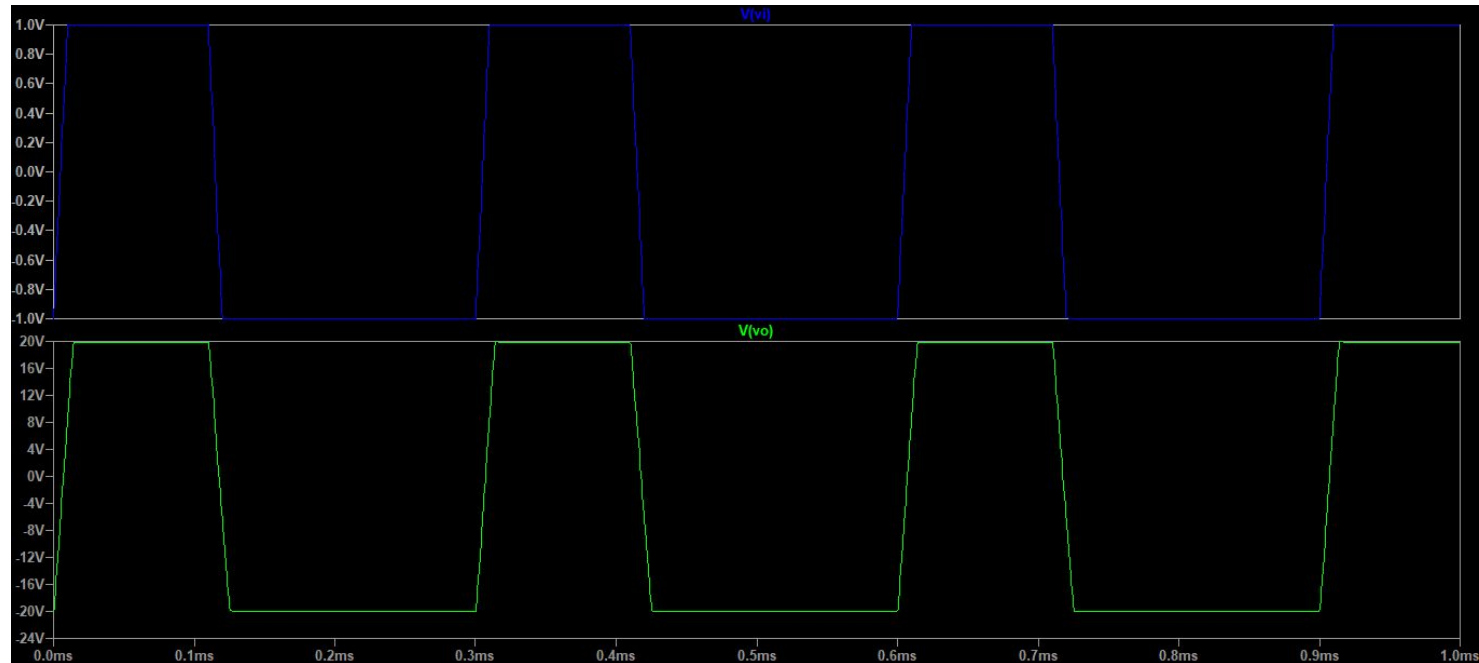
Tensión de entrada vs Tensión de salida del circuito sin compensar



***Diagrama de
Bode de la
ganancia de lazo
"T" del circuito
compensado***

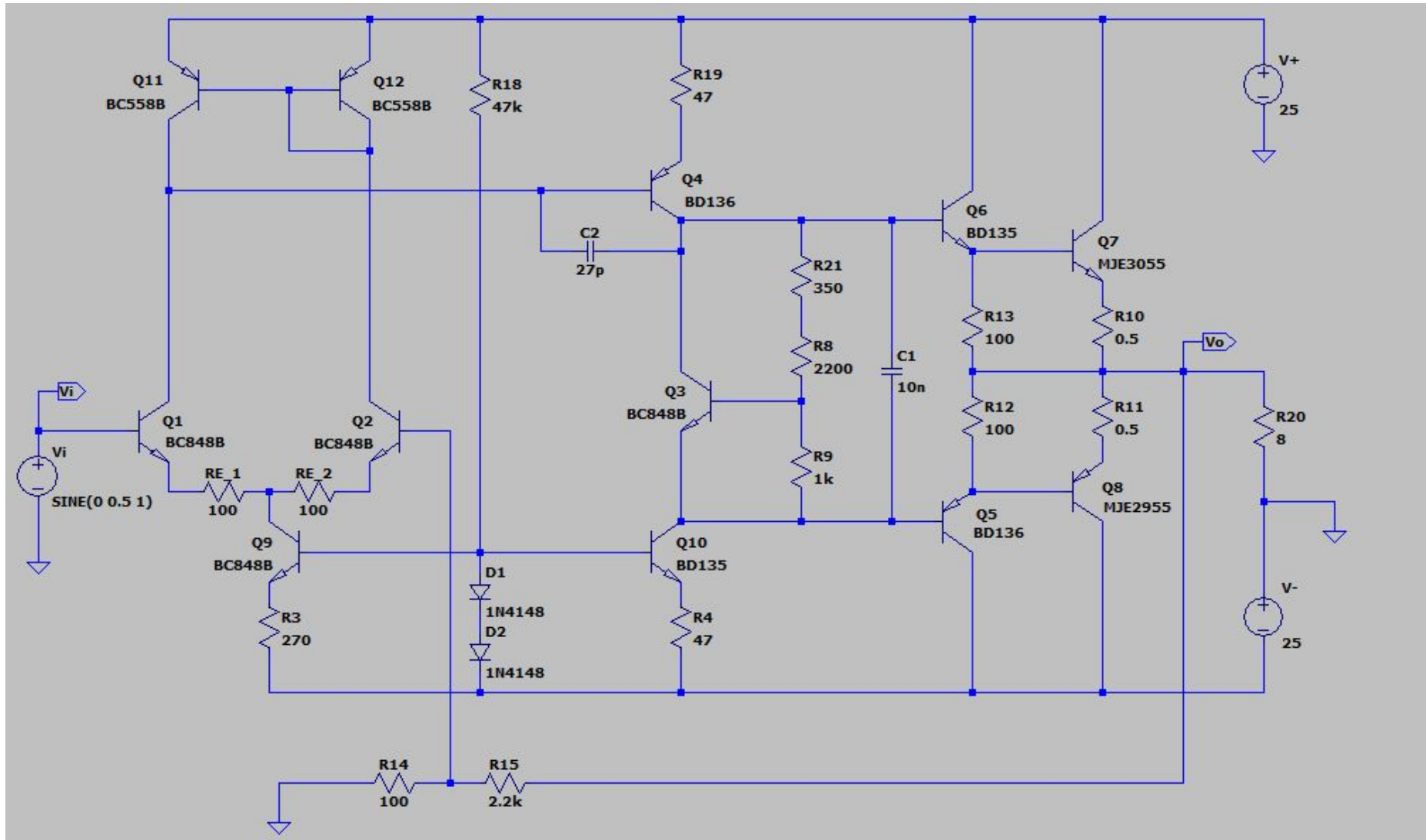


***Tensión de
entrada vs
Tensión de salida
del circuito
compensado***



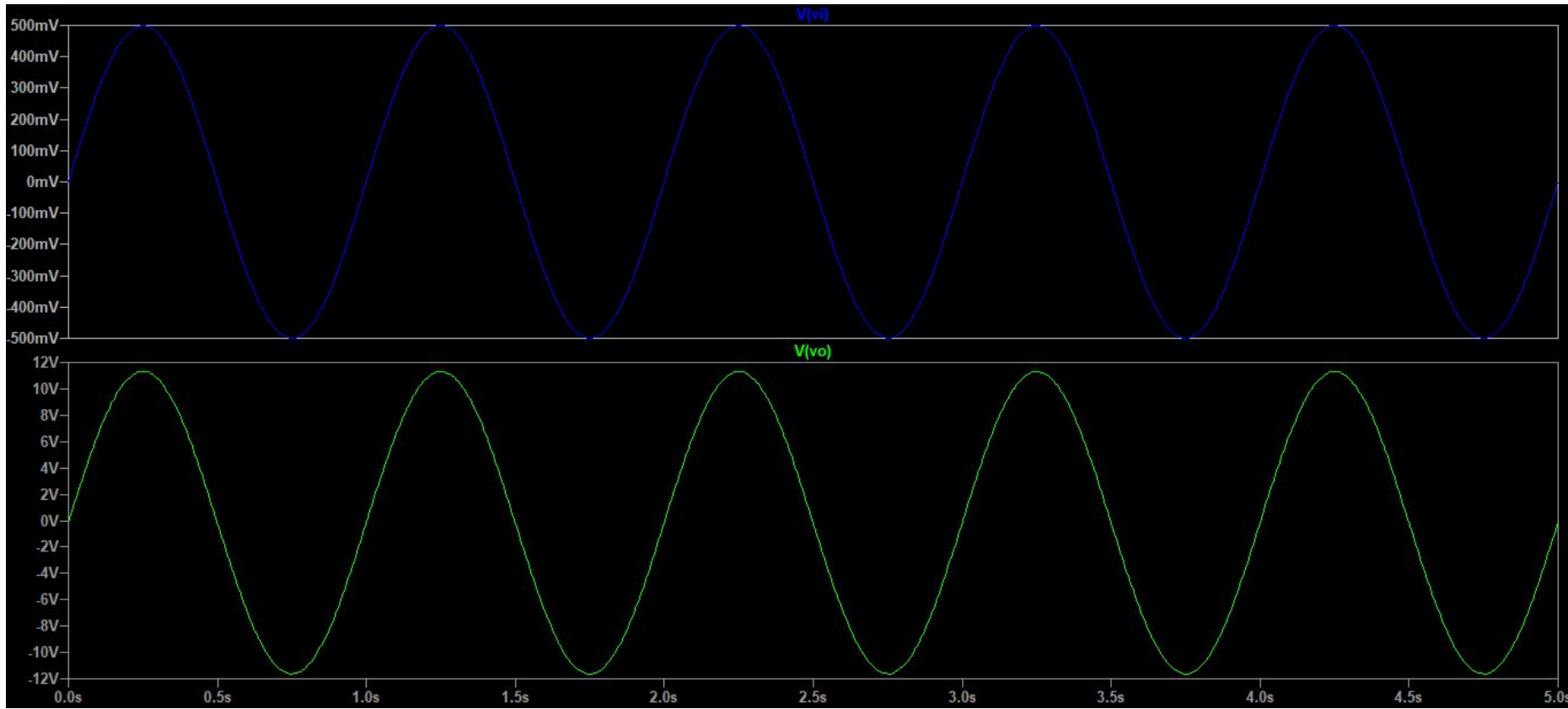
ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 6

Analizar el siguiente circuito identificando las partes



Tensión de entrada vs Tensión de salida

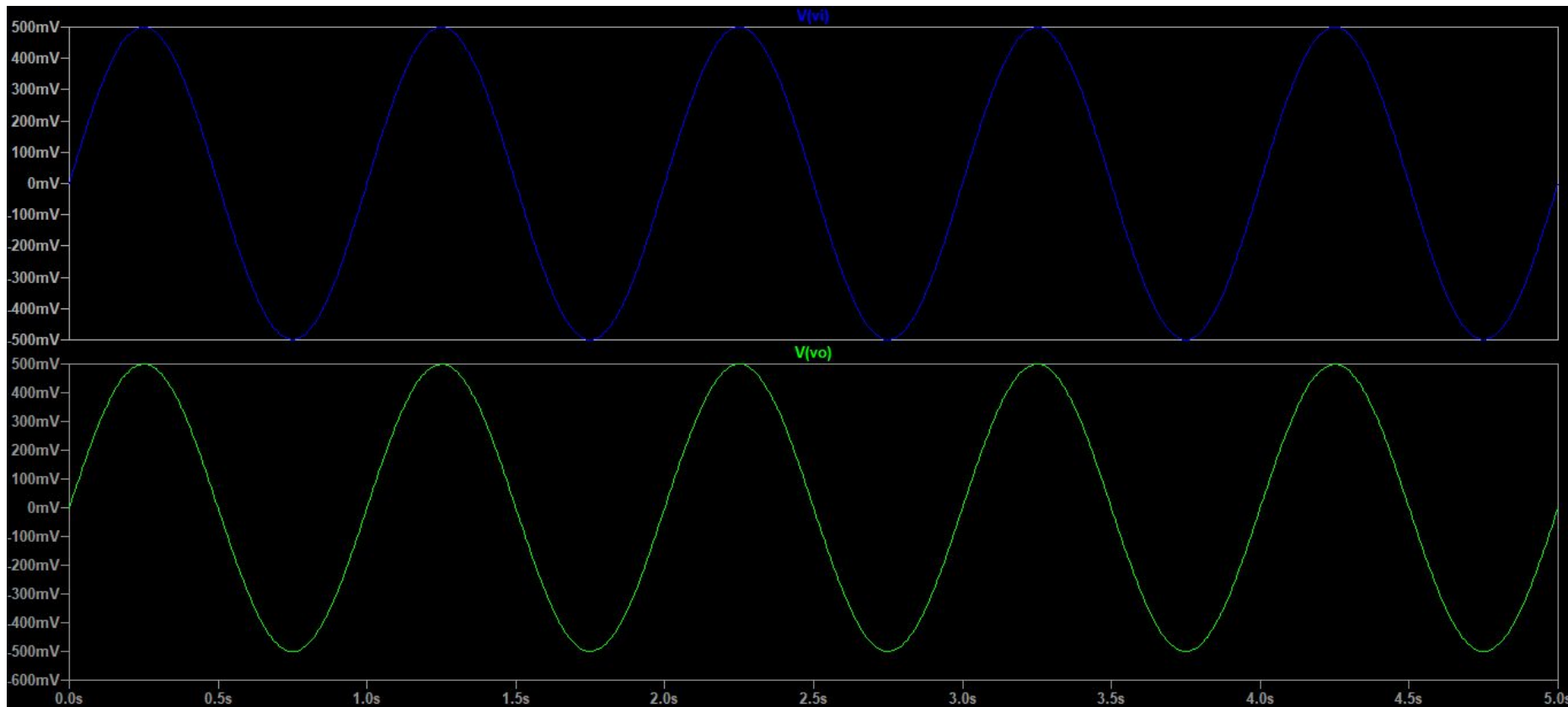
1. Analizamos tipo de realimentación.
2. Calculamos el valor de la ganancia del realimentador “f”.
3. Calculamos la ganancia de lazo cerrado y comparamos con lo obtenido por simulación.



Análisis del circuito compensado

1. ¿Cómo variamos R14 y R15 si quisiéramos ganancia unitaria?
2. Analizamos diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T" utilizando un $C=11\text{pF}$.
3. Analizamos diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T" utilizando un $C=200\text{pF}$.
4. Graficamos la respuesta del amplificador a un tren de pulsos utilizando un $C=11\text{pF}$
5. Graficamos la respuesta del amplificador a un tren de pulsos utilizando un $C=200\text{pF}$.

Con R14 \rightarrow muy grande , R15 \rightarrow 0 ohms



Circuito utilizado para obtener el diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T".

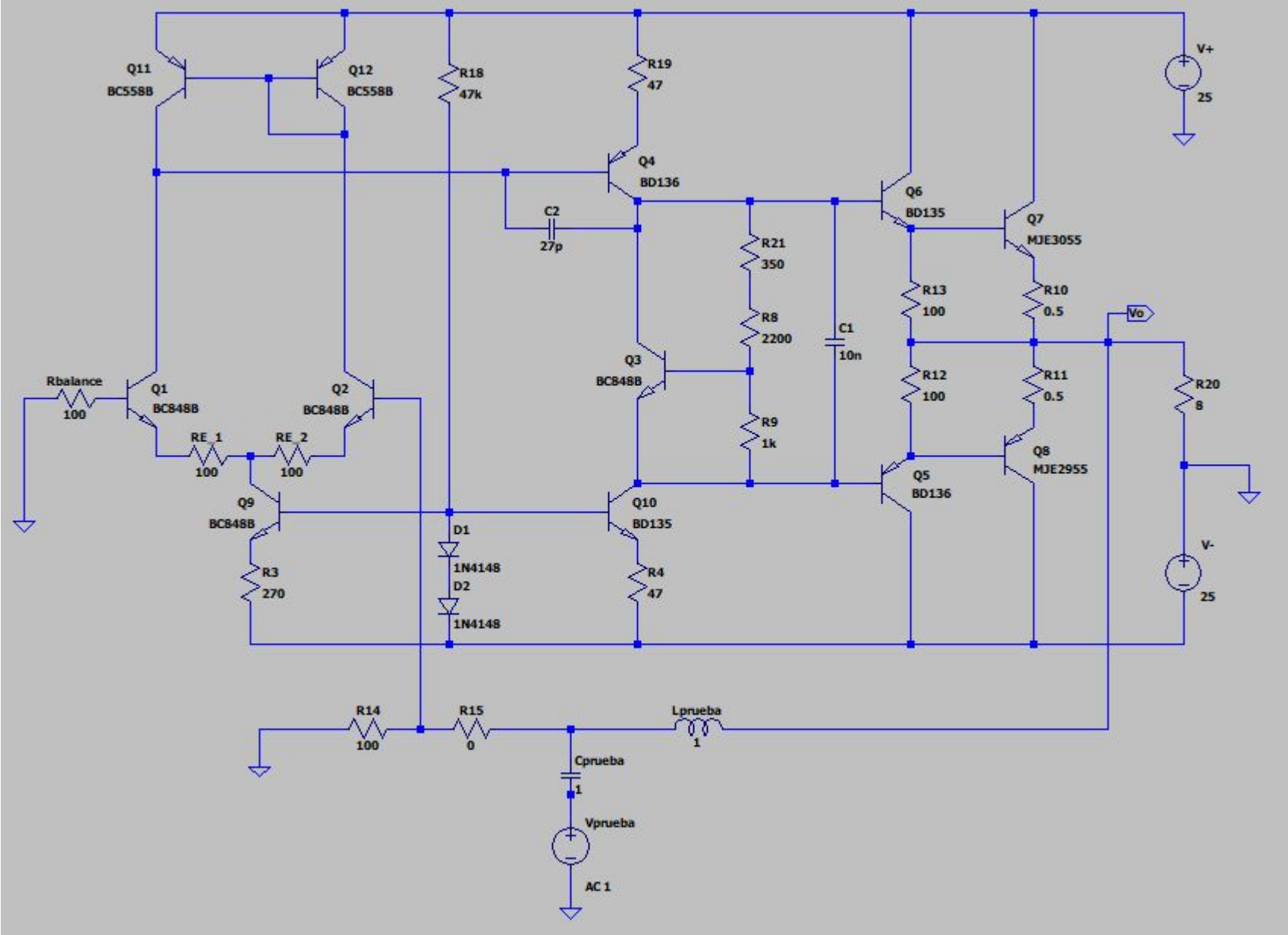


Diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T" del circuito utilizando $C=11\text{pF}$

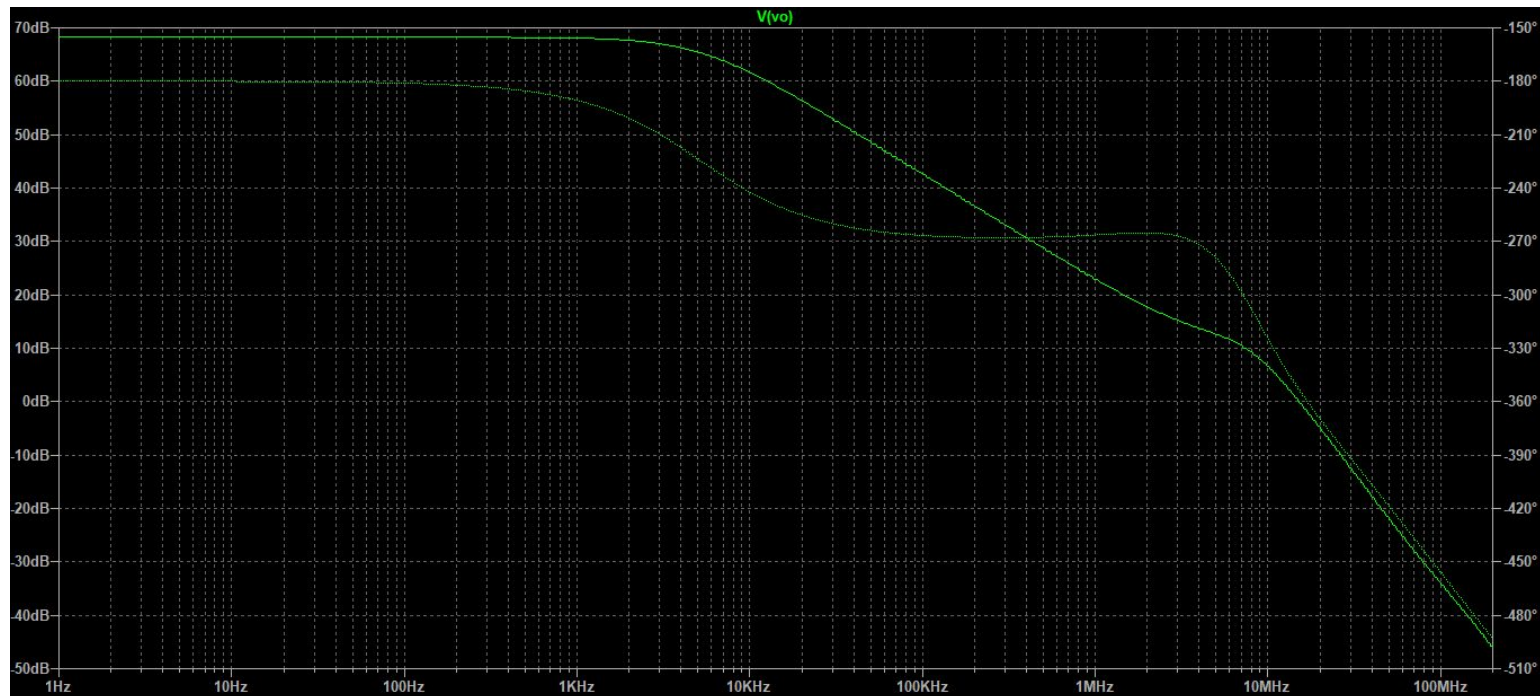
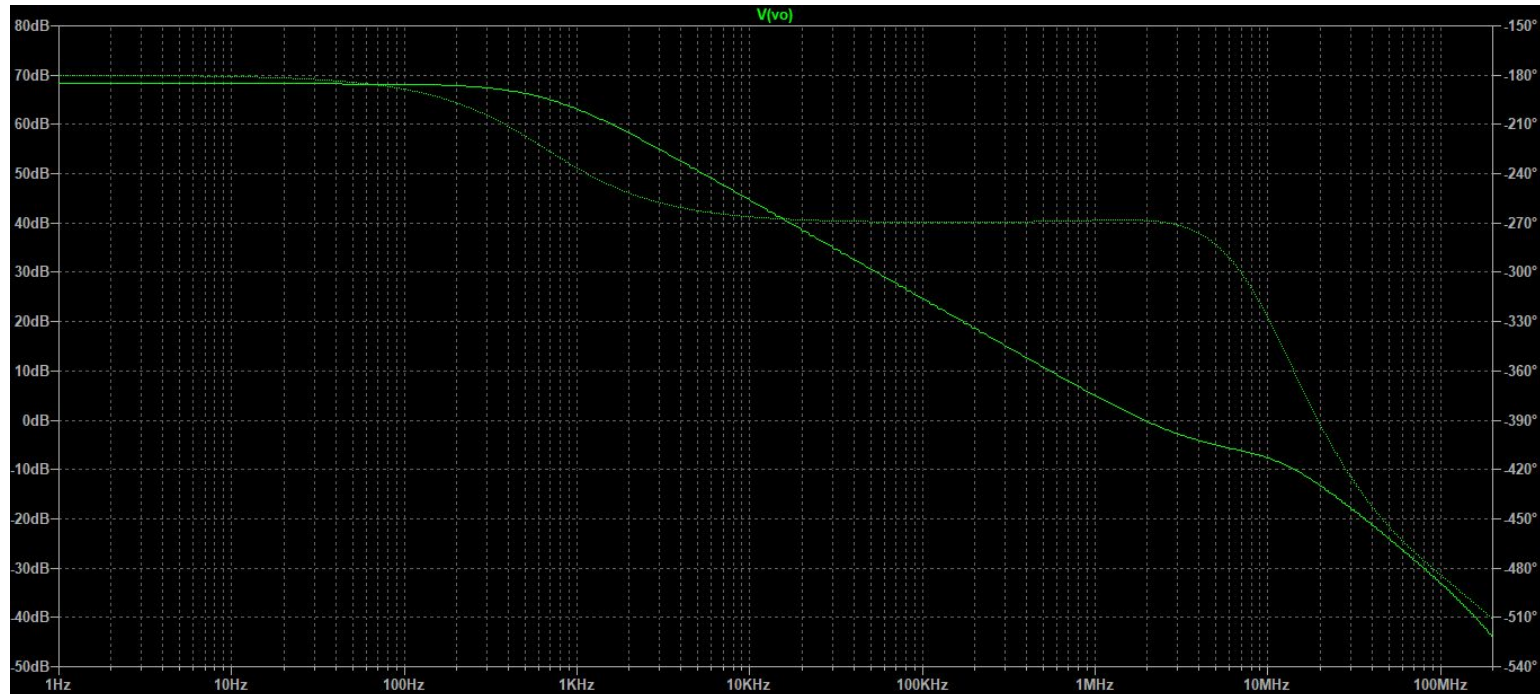
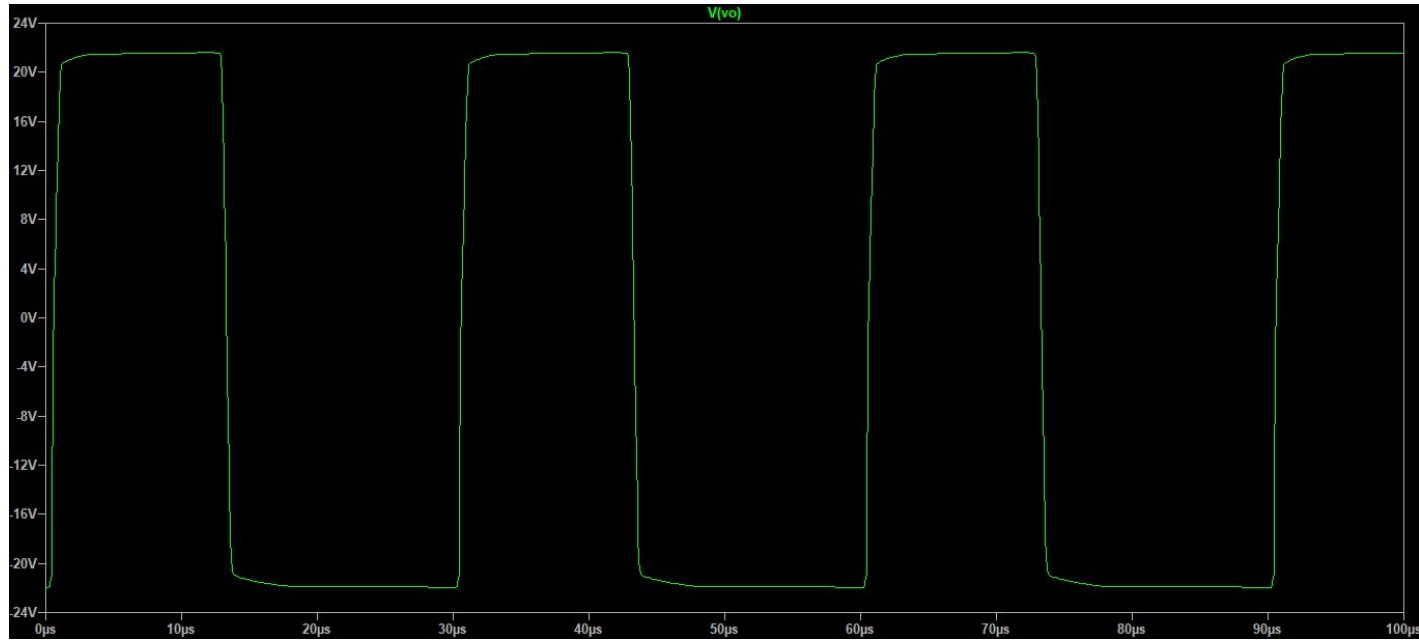


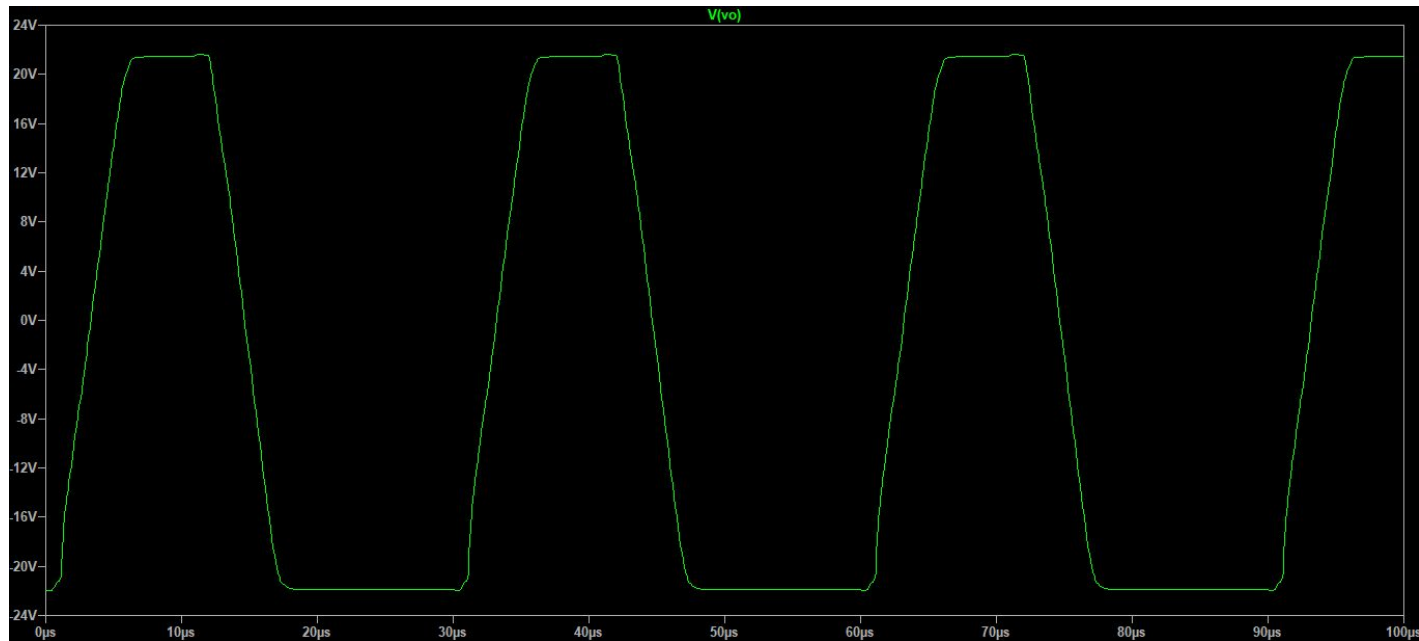
Diagrama de Bode de la ganancia de lazo "T" del circuito utilizando $C=200\text{pF}$



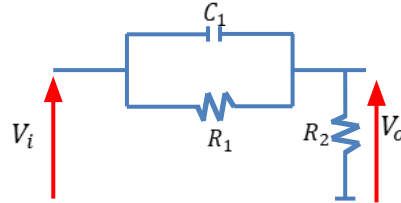
***Tensión de entrada
vs Tensión de salida,
utilizando $C=11\text{pF}$***



***Tensión de entrada
vs Tensión de salida,
utilizando $C=200\text{pF}$***



ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 7

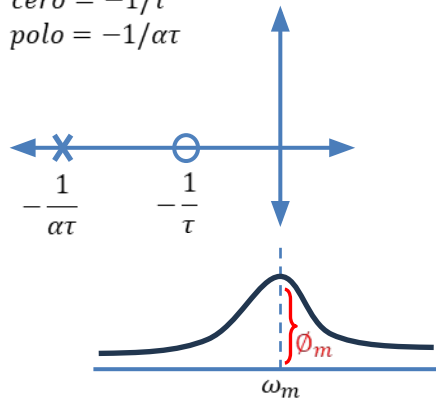


Cálculo de la Función de Transferencia $F(s)$:

$$F(s) = \frac{V_{o(s)}}{V_{i(s)}} = \frac{R_2}{R_2 + \frac{R_1 / sC_1}{R_1 + 1/sC_1}} = \frac{R_2}{R_2 + \frac{R_1}{sC_1 R_1 + 1}} = \frac{R_2(R_1 sC_1 + 1)}{R_2 R_1 C_1 s + R_2 + R_1} = \frac{R_2 R_1 C_1 \left(s + \frac{1}{R_1 C_1}\right)}{R_2 R_1 C_1 \left(s + \frac{R_2 + R_1}{R_2 R_1 C_1}\right)} = \frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{R_2 + R_1}{R_2 R_1 C_1}} = \frac{s + \frac{1}{\tau}}{s + \frac{R_2 + R_1}{R_2 \tau}}$$

Cálculo del Compensador en adelante $C(s)$:

cero = $-1/\tau$
polo = $-1/\alpha\tau$



$$\omega_p = \frac{1}{\alpha\tau} = \frac{1}{\frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} C_1}$$

$$\omega_z = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_1 C_1}$$

$$C(s) = K_c \frac{s + \frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\alpha\tau}} \begin{cases} \tau = R_1 C_1 \\ \alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ con } 0 < \alpha < 1 \\ K_c = 1 \end{cases}$$

Cálculo de ϕ_m :

$$\phi_m = MF_{deseado} - MF_{actual} + \Delta(5\%)$$

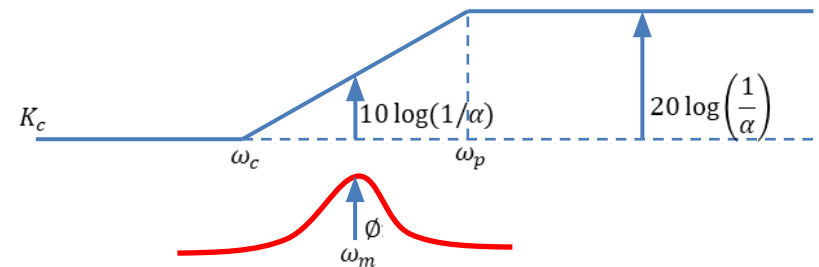
Cálculo de α :

$$\alpha = \frac{1 - \sin \phi_m}{1 + \sin \phi_m} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Cálculo de ω_m :

Buscamos graficamente la frecuencia donde la ganancia de lazo cae $10 \log\left(\frac{1}{\alpha}\right)$

$$\omega_m = \frac{1}{\tau\sqrt{\alpha}} = \frac{1}{R_1 C_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}}$$



Cálculo de C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{R_1 \omega_m \sqrt{\alpha}}$$

Ejemplo de cálculo:

Si $R_1 = 15K$ y $R_2 = 4,8K$

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4,8K}{15K + 4,8K} = 0,24$$

$$\phi_m = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1 - 0,24}{1 + 0,24} \right) \cong 54^\circ$$

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\alpha}\tau} = 2\pi \text{ } 20Khz$$

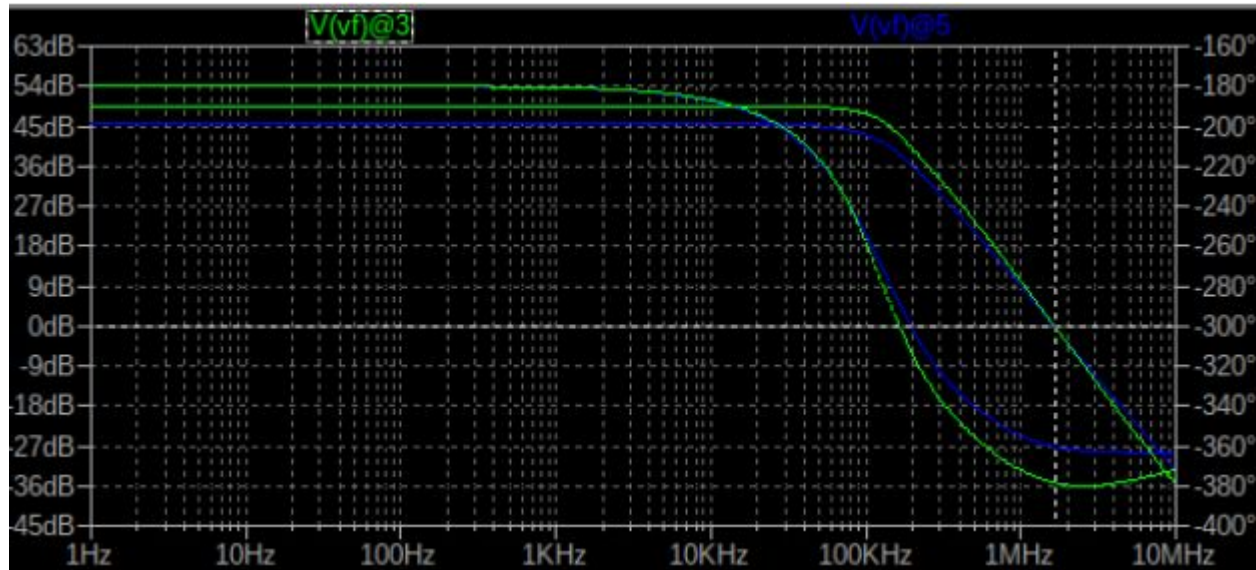
$$C_c = \frac{1}{R_1 \omega_m \sqrt{\alpha}} = \frac{1}{15K (2\pi \text{ } 20Khz) \sqrt{0,24}} = 1nF$$

$$\omega_p = \frac{1}{\alpha\tau} = \frac{1}{\frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} C_1} \rightarrow f_p = 43 Khz$$

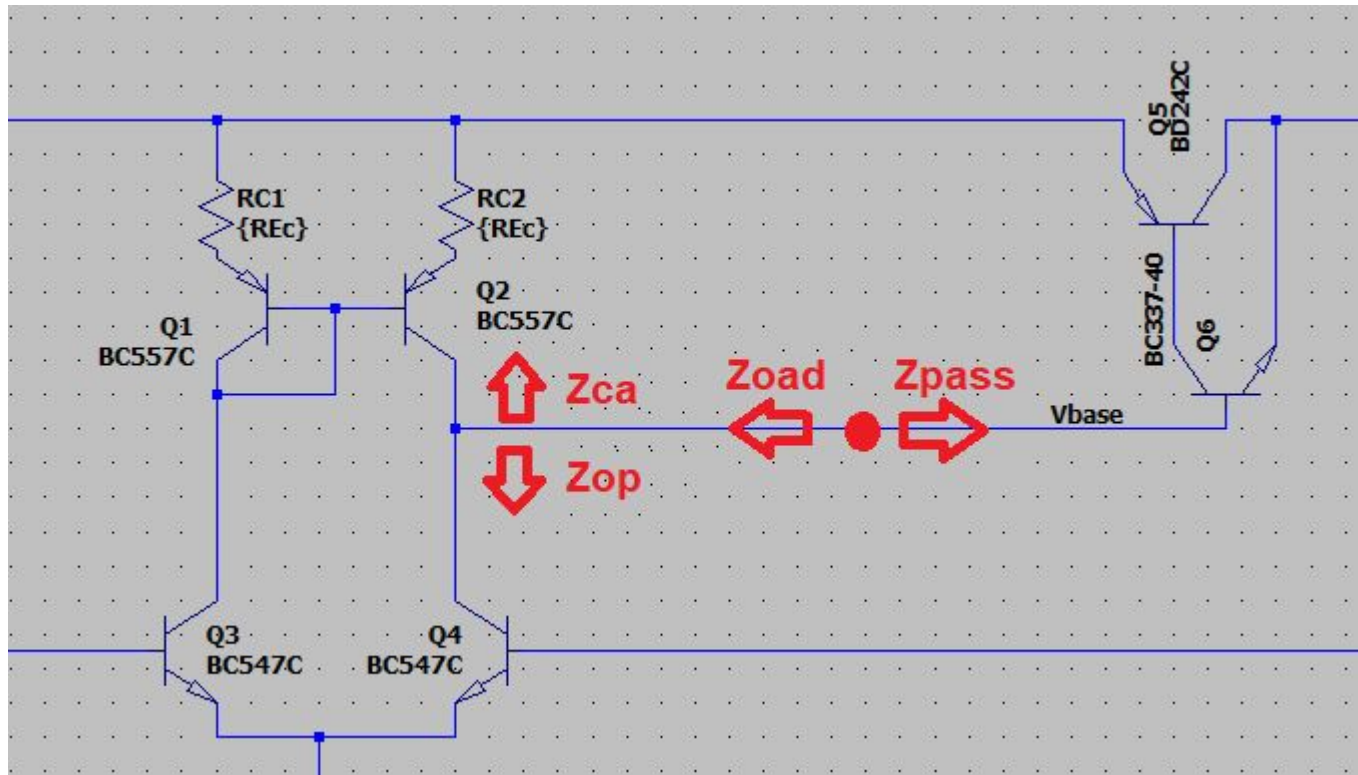
$$\omega_z = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_1 C_1} \rightarrow f_z = 11 Khz$$

ESTABILIDAD Y COMPENSACIÓN: Ejercicio 8

Se traza la respuesta en frecuencia del lazo de tensión de la fuente LDO desarrollada en el proyecto. Teniendo en cuenta el peor caso de combinación de carga RL que inestabiliza al circuito, se tiene:



Se debe elegir uno de los métodos de compensación vista. Se propone inicialmente compensar por polo dominante. Para ello debemos identificar el nodo del circuito que presenta ese polo dominante.

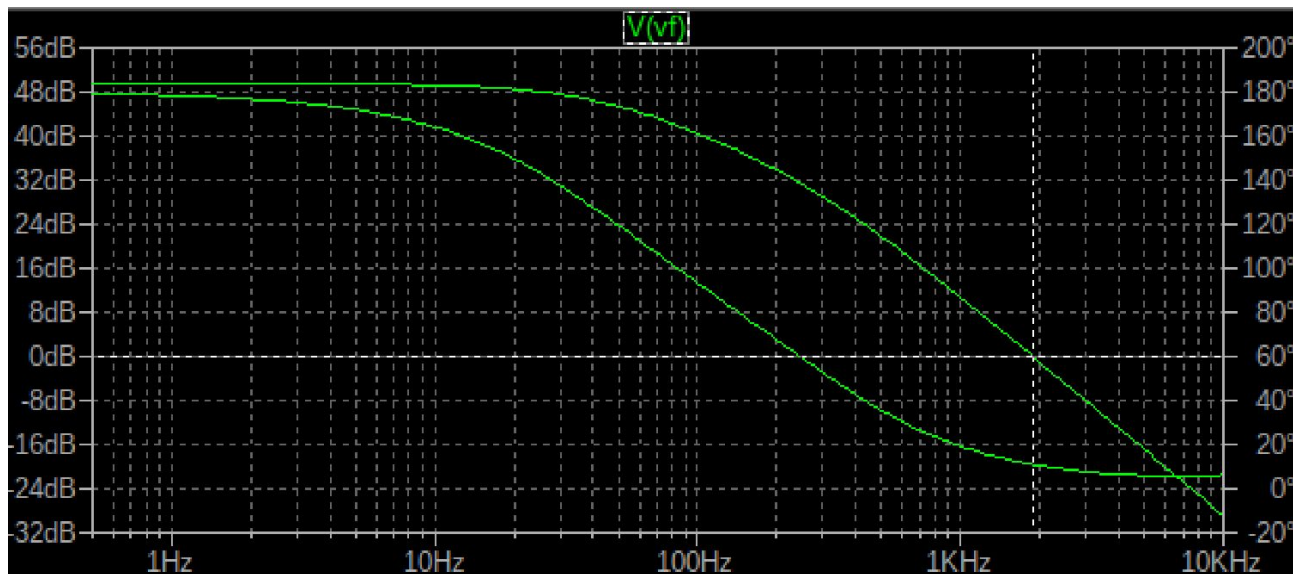


Podemos analizar cual es la impedancia vista del nodo, según se ve en la figura anterior.

Ayuda: *revisar apunte de Análisis de pequeña señal del regulador lineal*

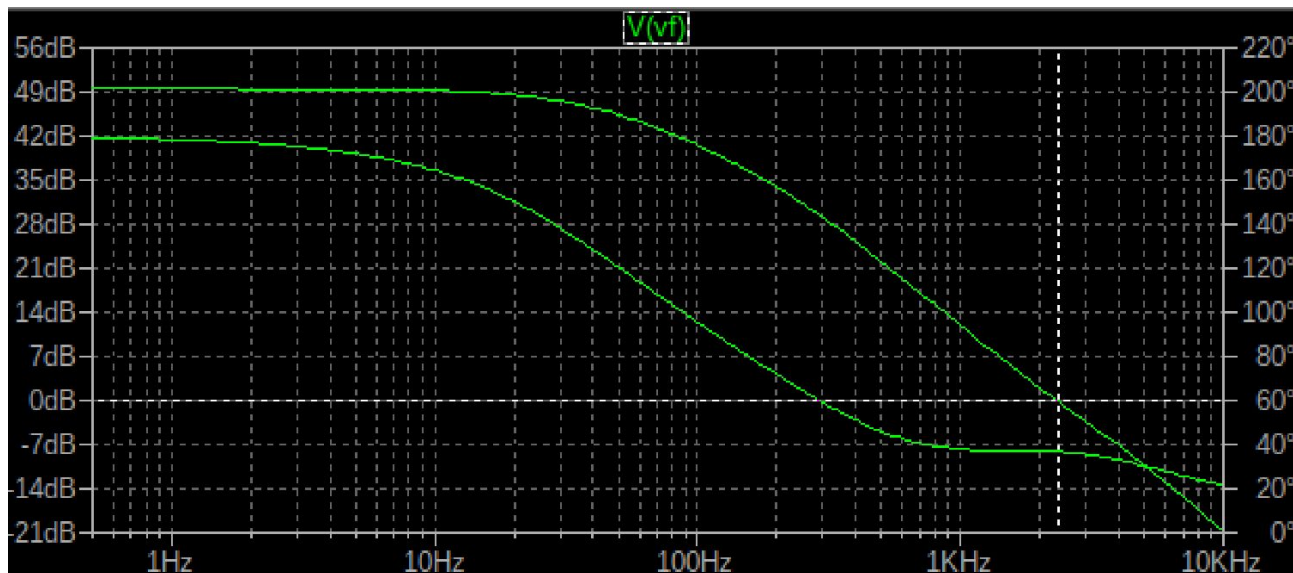
Al realizar el análisis de pequeña señal, se obtendrá que se tiene una amplificación grande, por lo que la resistencia vista por la base del par Sziklai será elevada.

Para este ejemplo en particular, compensando por polo dominante con un capacitor de $C = 220nF$ se consigue ubicar al polo de este nodo en aproximadamente 30Hz. También se logra mejorar el margen de fase, pero aun así utilizando el peor de los casos, se consigue un margen de fase de alrededor de 7° .



Bode de la salida de tensión compensada por polo dominante

Para mejorar el MF, se propone el uso de una red de adelanto centrada en la frecuencia de 3.7KHz. Colocando un capacitor de $C = 22,6nF$ se consigue un margen de fase superior de aproximadamente de 35°.



Bode de la salida de tensión compensada por polo dominante y red de adelanto



¿CONSULTAS?