Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
IEE2413 – Electrónica

Interrogación 1 - Total 45 Puntos
The Alan Brito Show[1]

Escriba sus respuestas en expresiones de baja entropía. Si para responder alguna de las preguntas necesita el resultado de una pregunta anterior que no ha podido responder, asuma una respuesta genérica (e.g., V en el caso de un voltaje, R en el caso de una resistencia, etc.). **Sólo se aceptarán preguntas de enunciado a viva voz y rige tanto el Código de Honor UC como las reglas de entrega del curso.**

- **WARNING 0: Póngale nombre a todas sus hojas de desarrollo.**
- **WARNING 1: Respalde sus respuestas con los cálculos o conceptos que correspondan; de no hacerlo o haber respuestas mágicas, no tendrá todo el puntaje tras la corrección de los ayudantes.**
- **WARNING 2: Preocúpese de que la letra de la interrogación sea legible para la postcorrección. Un ayudante que corrige contento, corrige mejor, y en otro caso habrá descuento de nota.**
- **WARNING 3: No se pegue en los problemas... si se ve atascad@, cámbiese de problema y ello probablemente le ayude a despejarse!.**
- **WARNING 4: Si se pide un Diagrama de Bode, se espera uno de tipo asintótico... punto a punto lo hace un computador.**
- **WARNING 5: Los nodos (puntos negros) en un circuito indican conexiones entre cables que se cruzan... si un cable cruza a otro y no hay punto negro, no hay conexión entre ellos.**
- **WARNING 6: Sólo puede usar formulario de elaboración propia y calculadora científica. Está estrictamente prohibido el uso de celulares, Solvers y cualquier otra herramienta no autorizada explícitamente para resolver problemas.**

[1] Si usted no ha visto The Truman Show, le recomendamos verla y reflexionar sobre qué critica la película.

P1: El Clásico (10 puntos)

Considere el siguiente circuito:

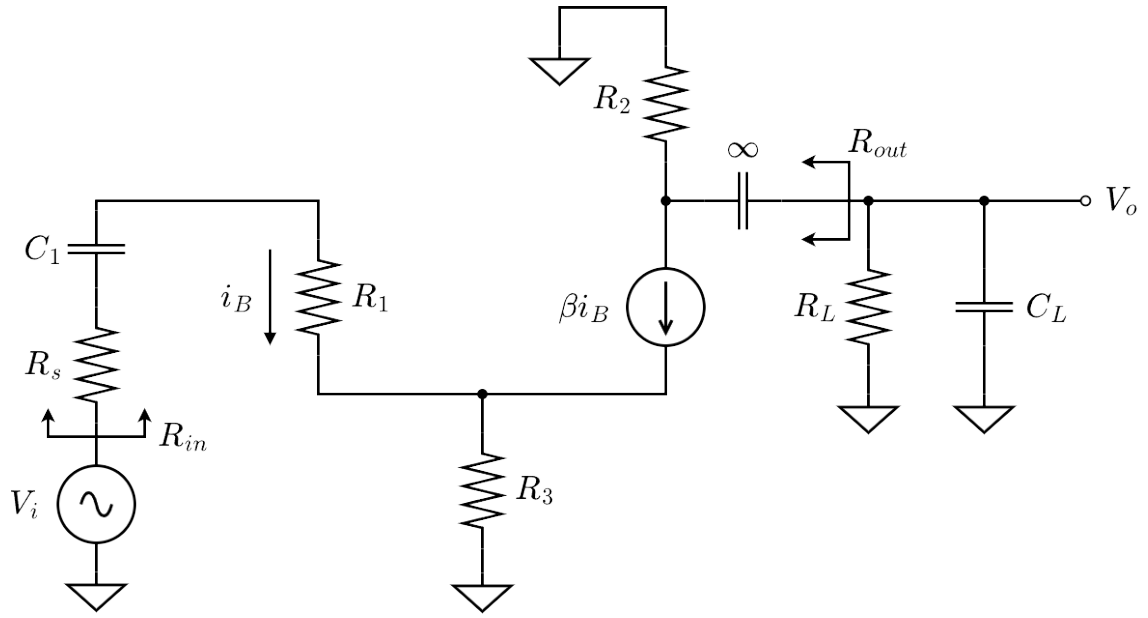


Figura 1: Circuito del Problema 1.

En este circuito, se sabe que:

- La fuente de voltaje V_i tiene una resistencia de salida $R_s = 50\,[\Omega]$
- $R_1 = 50\,[k\Omega]$, $R_2 = 4.7\,[k\Omega]$ y $R_3 = 100\,[\Omega]$
- $C_1 = 100\,[pF]$
- La carga se compone de $C_L = 2.2\,[pF]$ y $R_L = 100\,[k\Omega]$
- $\beta = 100\,[\frac{A}{A}]$.

A continuación:

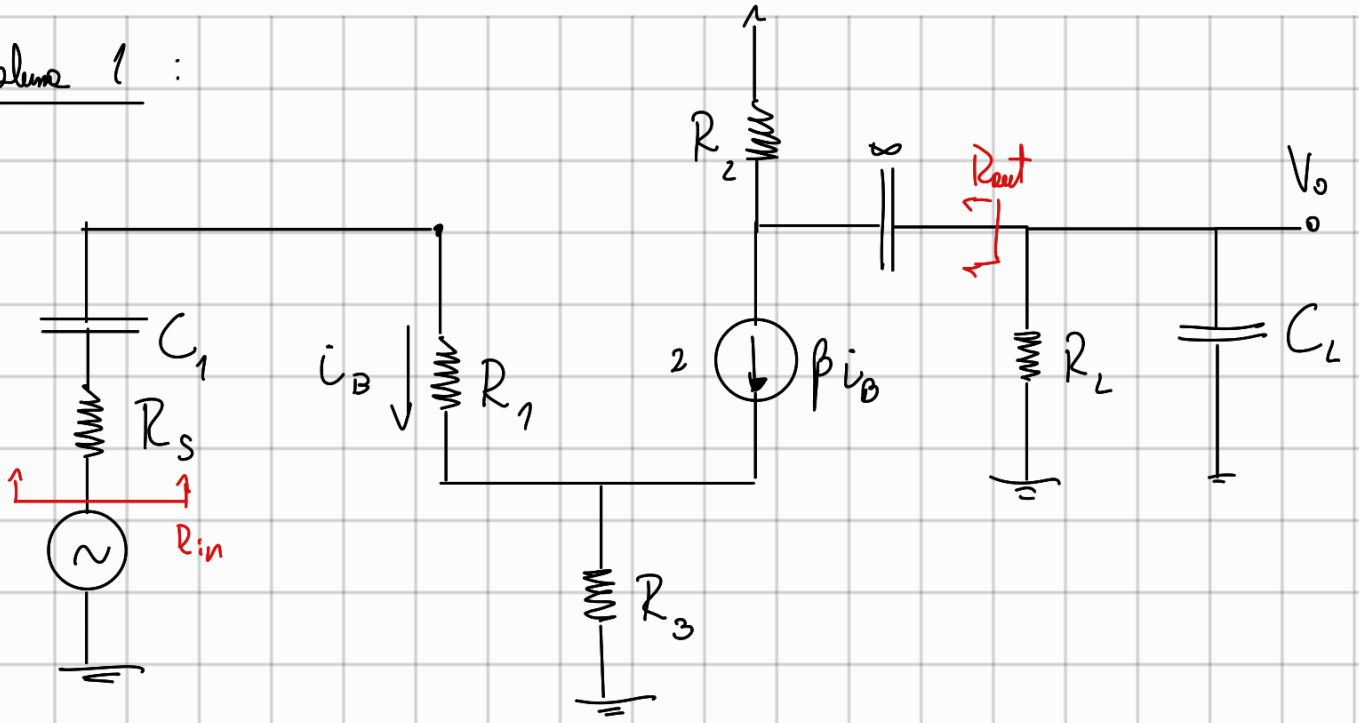
a) (1 pt.) - Analice intuitivamente el circuito, **sin realizar cálculos**, y determine cuál es su función en términos de la frecuencia de operación explicitando el estado de los capacitores en la banda pasante. Explique su análisis y los argumentos que sustentan su respuesta.

b) (3 pt.) - Determine R_{in} vista desde V_i hacia el amplificador, R_{out} vista desde R_L hacia el amplificador y la ganancia $\frac{V_o}{V_i}$, todas en banda pasante.

c) (3 pt.) - Determine la función de transferencia definida como $T(s) = \frac{V_o}{V_i}$

d) (3 pt.) - Dibuje el diagrama de Bode - magnitud [dB] y fase [°], respecto a la frecuencia en [Hz] - de $T(s)$, incluyendo todos los puntos y pendientes relevantes.

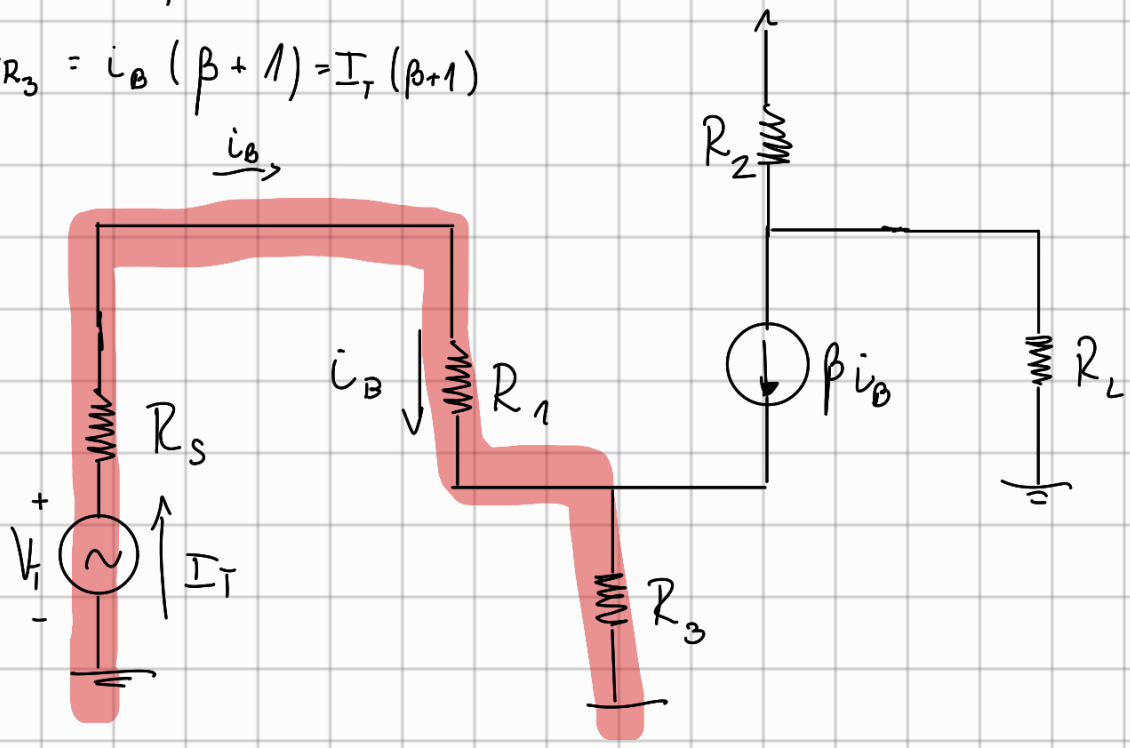
Problema 1 :



a) Para frecuencias muy altas $V_o \to 0$, al igual que para frecuencias muy bajas (debido a C_1), por lo tanto implementa un amplificador con filtro pasabanda. En la banda pasante C_1 está en c.c y C_2 en c.a

b) R_{in}: Tenemos que la corriente por R_3 es:

$$i_{R_3} = i_B(\beta+1) = I_T(\beta+1)$$

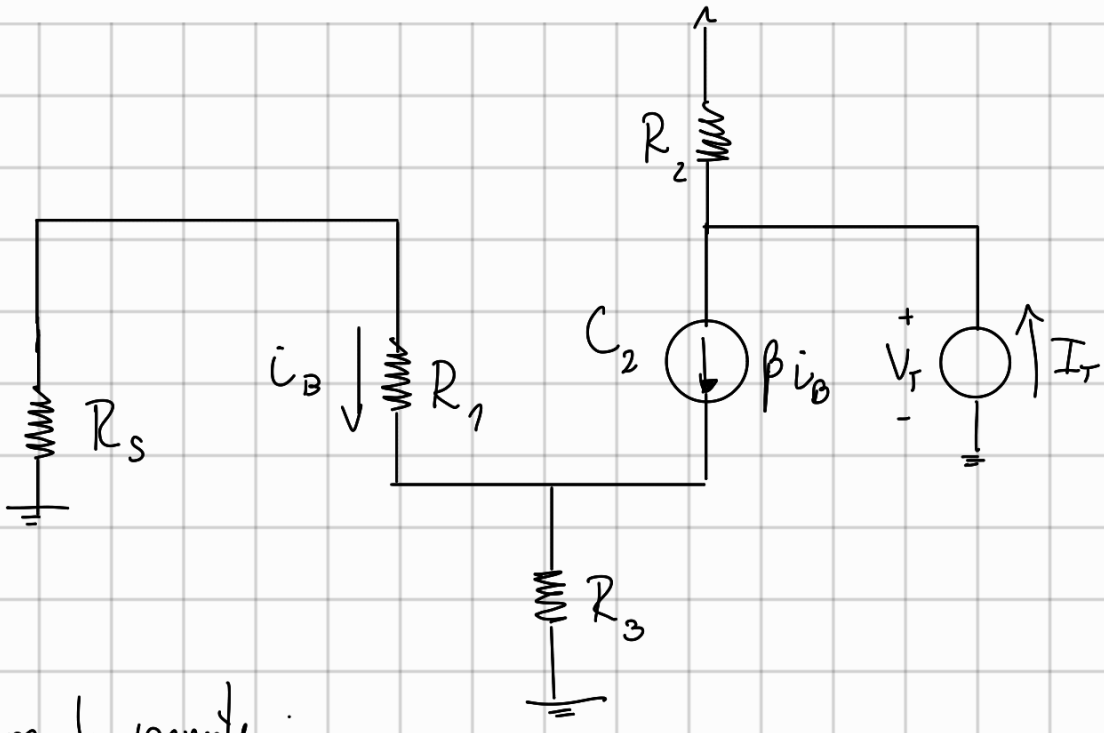


Así:

$$V_T = I_T(R_S + R_1 + R_3(\beta+1)) \longrightarrow R_{in} = \frac{V_T}{I_T} = R_S + R_1 + R_3(\beta+1)$$

$$R_{in} = 60.15\,K\Omega$$

Rout:



Por división de corriente:

$$i_B = -\beta i_B \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3 + R_S} \quad , \therefore \; i_B = 0$$

Luego, $R_{out} = R_2 = 4.7K\Omega$

V_o/V_i: $V_S = i_B(R_S + R_1 + R_3(\beta+1)) \rightarrow i_B = \dfrac{V_S}{R_S + R_1 + R_3(\beta+1)}$

A_L':

$$\frac{V_o}{V_S} = -\beta \frac{1}{R_S + R_1 + R_3(\beta+1)} \cdot \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

$$\frac{V_o}{V_S} = -7.46 \longrightarrow 17.46\,dB$$

c) Realizando un procedimiento similar que en R_{in}:

$$V_S = i_B\left(R_S + R_1 + \frac{1}{sC_1} + R_3(1+\beta)\right) \rightarrow i_B = \frac{V_s \cdot sC_1}{1 + sC_1(R_S + R_1 + R_3(1+\beta))}$$

A_L':

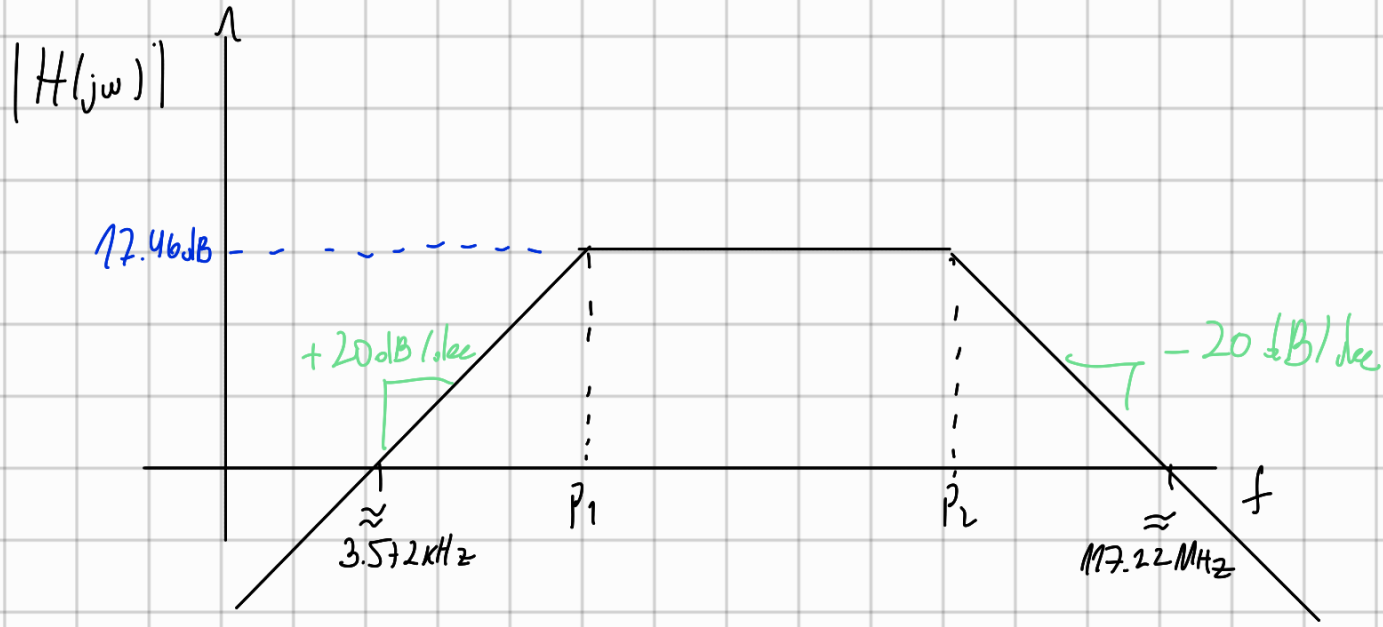
$$V_o = -\beta i_B \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_L} + sC_L\right)^{-1} = -\beta i_B \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L + sC_L R_2 R_L}$$

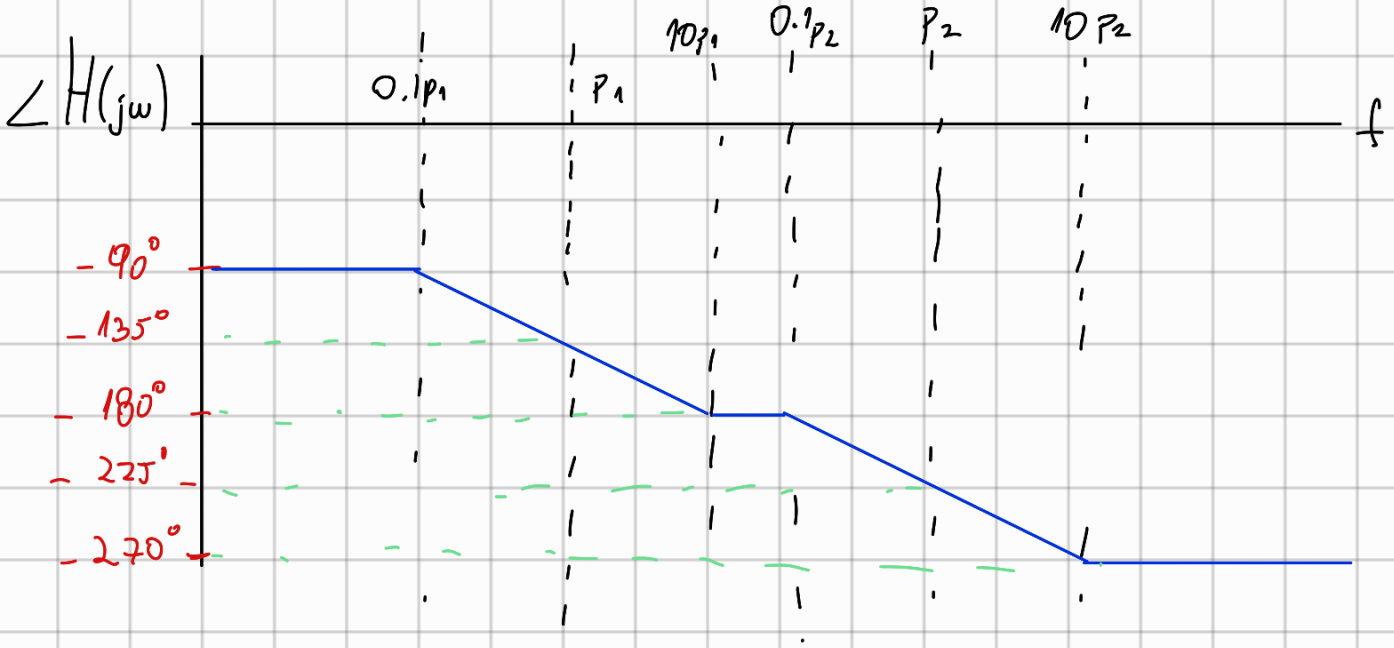
$$\frac{V_o(s)}{V_s(s)} = -\beta \frac{sC_1}{1+sC_1(R_s+R_1+R_3(1+\beta))} \cdot \frac{R_2 R_L}{R_2+R_L+sC_L R_2 R_L}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_s(s)} = -\frac{2s}{2\cdot10^8+1203s} \cdot \frac{4.54\cdot10^{11}}{1.012\cdot10^8+s}$$

$$= -7.55\cdot10^8 \frac{1}{1.6834\cdot10^{13}+1.014\cdot10^8 s+s^2}$$

d) Tramos, un cero en $z=0$ y dos polos $p_1 = -26.46\,kHz$ y $p_2 = -16.11\,MHz$.
Además, en la banda pasante hay una ganancia de 17.46 dB





P2-A: Dividir para Amplificar (5 puntos)

Considere el siguiente circuito, donde los resistores $R_1 \cdot k$ y $R_1 \cdot (1-k)$ con $0 \leq k \leq 1$, modelan un divisor resistivo ajustable por un potenciómetro y el OpAmp es ideal:

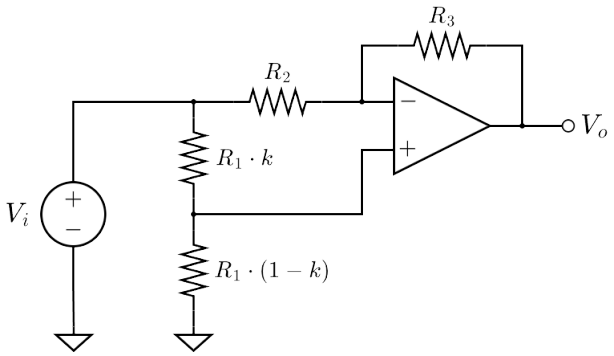


Figura 2: Circuito del Problema 2-A.

a) (3 pt.) - Determine el rango de valores de ganancia dentro del cual la entrada V_i puede ser amplificada cuando se ajusta el potenciómetro entre su valor mínimo y valor máximo, en función de los parámetros que corresponda.

b) (2 pt.) - ¿Cuáles son los valores extremos del rango anterior si $R_1 = R_2 = R_3 = 11\,k\Omega$?

P2-B: ¿Y cuál era al final? (5 puntos)

Considere el siguiente circuito:

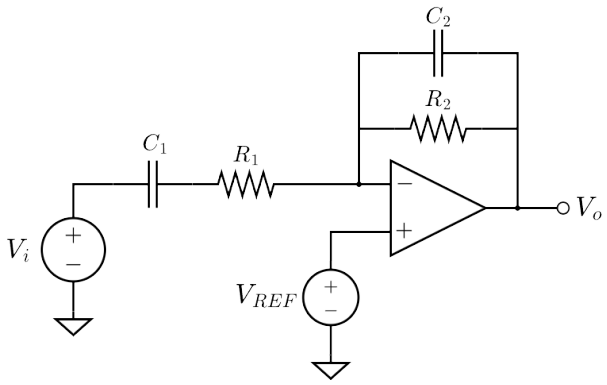


Figura 3: Circuito del Problema 2-B.

El OpAmp es ideal y los valores de resistencias y capacitores están configurados de tal forma que la función de transferencia del circuito genera un diagrama de bode de filtro pasabanda con ganancia 20 [dB], y frecuencias de corte 1 [Hz] y 1.5 [kHz]. Asimismo, la fuente $V_{ref} = 5\,[V]$.

Si la entrada V_i del circuito es: $V_i = 2 \cdot sin(2 \cdot \pi \cdot 15 \cdot 10^5 \cdot t) + 2\,[V]$

¿Qué se obtiene a la salida del circuito? Justifique. **Puede hacer alguna aproximación razonable.**

P2-A

Para este circuito se cumple que:

$$V_+ = \frac{V_i}{kR_1 + (1-k)R_1} \cdot (1-k)R_1 = V_i(1-k) \quad \text{y} \quad V_+ = V_-$$

$$\Rightarrow \frac{V_- - V_+}{R_2} = \frac{V_+ - V_o}{R_3} \Rightarrow \frac{V_i}{R_2} - \frac{V_+}{R_2} - \frac{V_+}{R_3} = -\frac{V_o}{R_3} \Rightarrow \frac{R_3}{R_2}\left(V_i(1-k)\right) + V_i(1-k) - V_i\frac{R_3}{R_2} = V_o$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_3}{R_2}k + (1-k)}$$

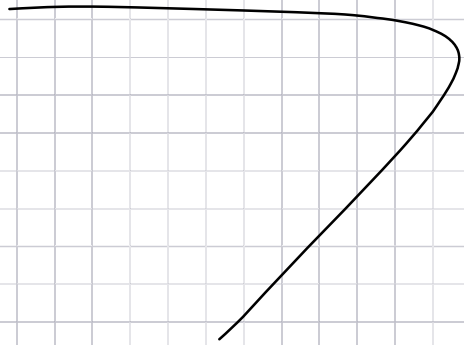
a) Para $k = 1$ (V_+ a tierra directo) $\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_3}{R_2}$ (inversor clásico)

Para $k = 0$ (V_+ a V_i) $\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 1$ (buffer)

Rango de Ganancia $\Rightarrow A_V \in \left[-\frac{R_3}{R_2}, 1\right]$

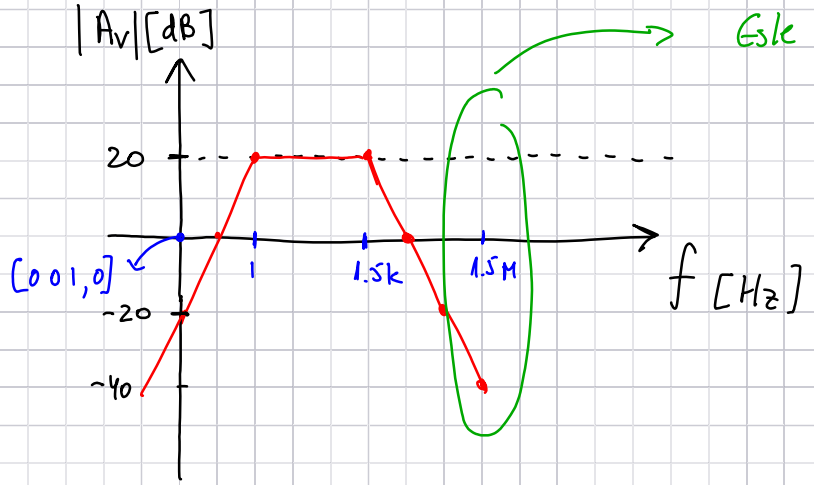
b) Si $R_1 = R_2 = R_3 = 11k\Omega$

Rango de Ganancia $\Rightarrow A_V \in [-1, 1]$



P2 B)

Dibujemos el Pasabanda con un bode de magnitud (solo aplica en AC)



* En 1.5 MHz $Av|_{dB} = -40 \rightarrow A_v|_{V/V} = 0.01 \Rightarrow V_o|_{AC} = 20 \cdot \sin(2\pi \cdot 1.5 \cdot 10^6 t)$ [mV]

  ≈ 0 (aproximación razonable)

* En paralelo, 1.5 MHz está 3 décadas fuera de la banda

  ↳ $Av|_{1.5M} = 20\ dB_{\text{en banda}} - 20\ dB/dec \cdot 3 = -40\ dB$ en la frecuencia de operación

  $= 1/100\ V/V$

  se aplica a la entrada en AC.

En DC, C_1 y C_2 están abiertos, sigue existiendo realimentación negativa y el circuito

↳ No deja pasar $V_{i_{DC}}$ a la salida

↳ Actúa como buffer sobre V_{REF} que es DC

$$\Rightarrow \boxed{V_o = V_o|_{DC} + V_o|_{AC} = V_{REF} + Av|_{1.5M} \cdot V_{i_{AC}} \approx 5[V]}$$

↳ Si consideramos V_i no nulo → $V_o = 5[V] \pm 20 \cdot \sin(\omega t)$

$V_o \in [4.98, 5.02]$ [V]

P3: Alan Brito y su Cerrito (10 puntos)

En sus tiempos mozos Alan Brito Delgado, al estudiar, buscaba circuitos extraños que hicieran funciones especiales o bien dieran respuestas en frecuencia extrañas. Uno de los circuitos con los que estudió fue el siguiente:

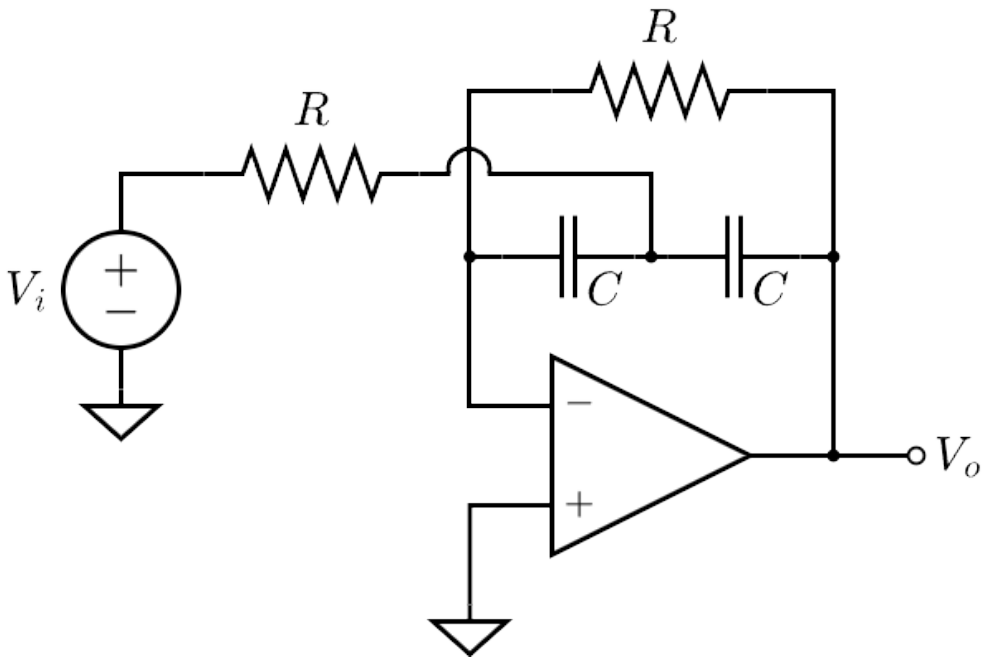


Figura 4: Circuito del Problema 2.

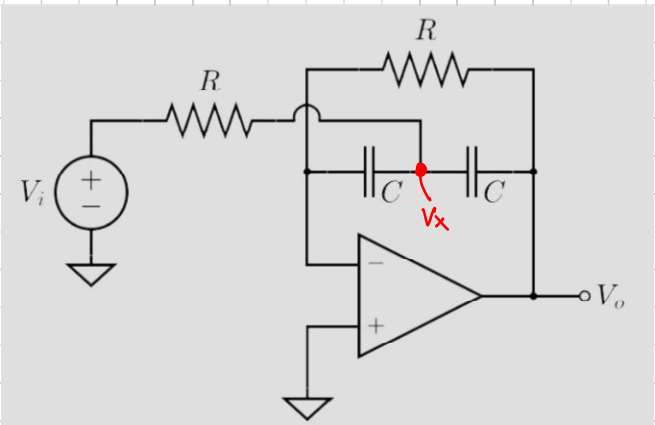
En este circuito todos los componentes son ideales. A continuación:

a) (4 pt.) - Determine la función de transferencia del circuito definida como $T(s) = \frac{V_o}{V_i}$

b) (2 pt.) - Determine el valor máximo de la magnitud [dB] de la función de transferencia $T(s)$ y la frecuencia [Hz] a la que ocurre.

c) (4 pt.) - Dibuje el diagrama de Bode - magnitud [dB] y fase [°], respecto a la frecuencia en [Hz] - de $T(s)$, incluyendo todos los puntos y pendientes relevantes.

P3 | Resolvemos el circuito



a) Las ecuaciones que definen su comportamiento son:

(1) $$\frac{V_i - V_x}{R} + \frac{V_o - V_x}{1/sC} = \frac{V_x}{1/sC}$$

(En V_x se suman las corrientes de V_i por R y V_o por C)

(2) $$\frac{V_o}{R} + \frac{V_x}{1/sC} = 0$$

(En V_- se suman las corrientes de V_x por C y V_o por R)

$\Rightarrow$ De (1): $$\frac{V_i}{R} = \frac{V_x}{R} + sCV_x + sCV_x - sCV_o$$

$$\boxed{V_i = V_x + 2sRCV_x - sRCV_o}$$

De (2): $$\boxed{V_x = -\frac{V_o}{sRC}}$$

Así: $$V_i = -\frac{V_o}{sRC} + 2sRC\left(-\frac{V_o}{sRC}\right) - sRCV_o \quad / \cdot sRC$$

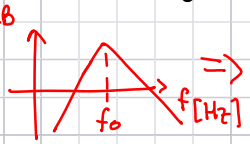
$$sRCV_i = -V_o - 2sRCV_o - (sRC)^2 V_o$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = -\frac{sRC}{(sRC)^2 + 2sRC + 1} = -\frac{sRC}{(1+sRC)^2}}$$

b) Se puede obtener por derivación o por inspección:

1) Inspección: 1 cero en origen y 2 polos en la misma frecuencia

↳ $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|_{dB}$



$\Rightarrow$ $f_{max} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}\ [Hz]$ / $\omega_{max} = \frac{1}{RC}\ \left[\frac{rad}{seg}\right]$

↳ El valor máximo de FT es:

$$|T(s=j\frac{1}{RC})|_{dB_{max}} = 20\log\left(\left|\frac{j}{(1+j)^2}\right|\right) = 20\log\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\boxed{|T(s)|_{dB_{max}} = -6\ dB}$$

b) Derivando:

$$|T(s=jw)| = \frac{wk}{1+(wk)^2} \quad / \frac{\partial}{\partial w} \qquad (k = RC)$$

Regla de la cadena!

$f(x) = g(x) \cdot h(x)$

$f'(x) = g'(x) \cdot h(x) + g(x) \cdot h'(x)$

$$\frac{d|T(s=jw)|}{dw} = \frac{k}{1+(wk)^2} - \frac{wk}{(1+(wk)^2)^2} \cdot 2(wk)\cdot k = 0$$

↳

$$\frac{k\cdot(1+(wk)^2)}{(1+(wk)^2)^2} - \frac{2k(wk)^2}{(1+(wk)^2)^2} = 0 \qquad (1+(wk)^2 \neq 0)$$

$$k + k(wk)^2 - 2k(wk)^2 = 0$$

$$k - k(wk)^2 = 0$$

$$k\left(1-(wk)^2\right) = 0$$

$$w_{max} = \frac{1}{k} = \frac{1}{RC}$$

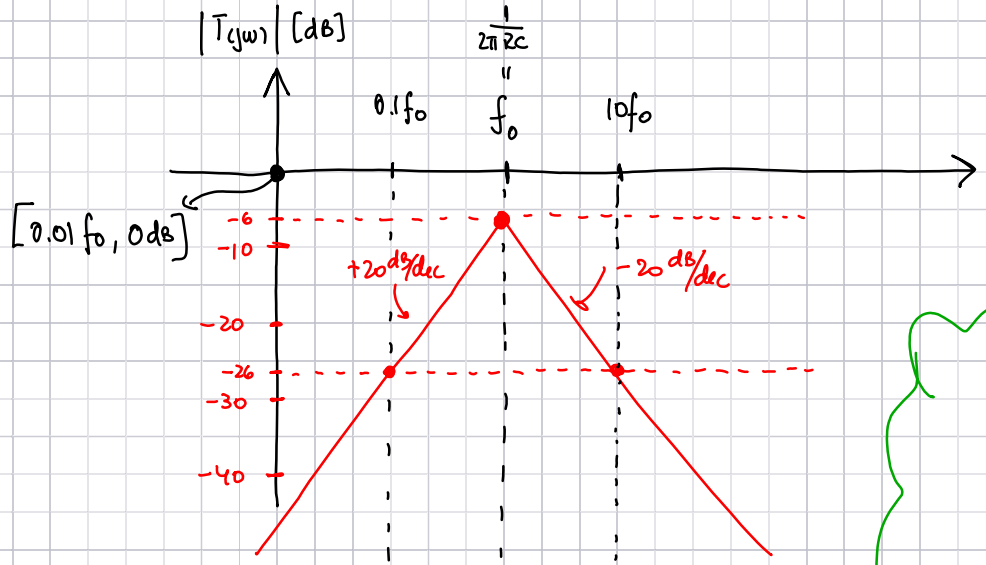
$$\boxed{f_{max} = \frac{1}{2\pi RC}}$$

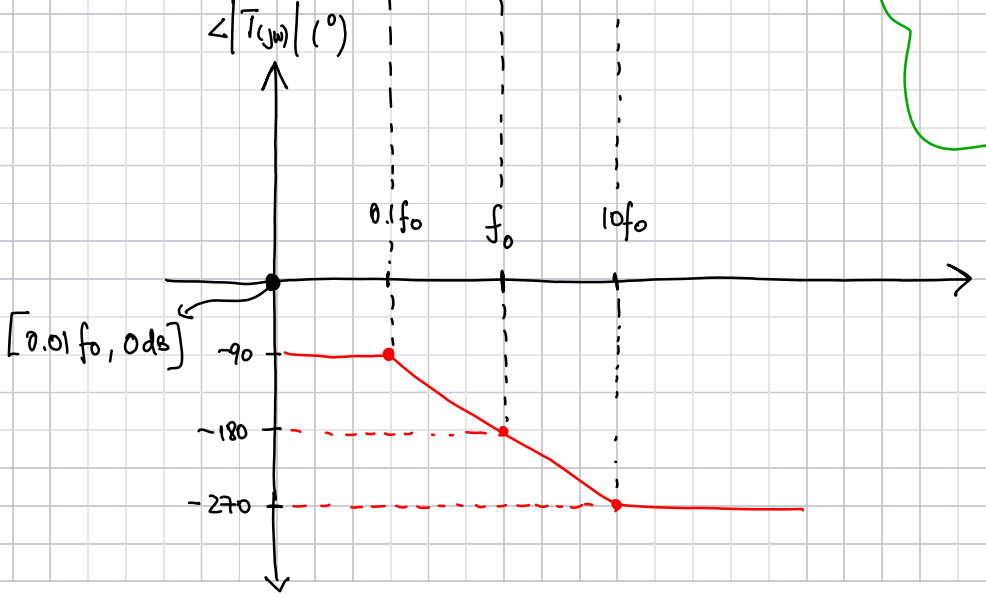
Evaluando $|T(w=\frac{1}{RC})| = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$

$$\hookrightarrow \boxed{20\log\left(|T(w=\tfrac{1}{RC})|\right) = -6\ [dB].}$$

Esto calza con la expectativa del Bode.

c) Se pide el Bode Magnitud (dB) y fase (°) respecto a la frecuencia (Hz):





También podían determinar el punto máximo haciendo el Bode, pero debían poder explicitar su frecuencia, valor y método de cálculo + cálculo básico

P4: Alan Brito el Diseñador... Strikes Back (15 puntos)

Para cierta aplicación, Alan Brito Delgado es requerido para diseñar un amplificador utilizando OpAmps, considerando el siguiente *set* de especificaciones:

- Voltaje de Entrada tipo sinusoidal puro con amplitud fija de 50 [mV], pero frecuencia variable entre 5 [kHz] y 25 [kHz].
- Ganancia 300 $\left[\frac{V}{V}\right]$ **usando uno o más amplificadores no inversores**. En caso de usar más de uno, acumular la mayor ganancia posible en la primera etapa.
- Todos los OpAmps utilizados en el circuito operarán con los mismos rieles bipolares, para no abultar costos.
- La resistencia de realimentación usada con los OpAmps, debe ser 200 [$k\Omega$]

El cliente le indica a Alan, que sólo tiene disponible un OpAmp, cuyas características relevantes se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor Típico	Unidad
GBW	3	[MHz]
SR	20	$[\frac{V}{\mu s}]$
Distancia al Riel	1	[V]
Corriente de Polarización I_B	100	[nA]

La idea es que usted le ayude a definir algunas cosas y confirme la correcta operación del circuito final considerando los parámetros reales. A continuación:

a) (2 pt.) - Indique cuántas etapas de amplificadores en cascada serán necesarias para cumplir con la ganancia dado el rango de frecuencias de operación. Si es más de una, indique la ganancia requerida en cada una.

b) (2 pt.) - Para su propuesta anterior, ahora analice si los OpAmp cumplen con la condición de SlewRate dada la entrada y el rango de frecuencias de operación. Si alguno no cumple con el SR, acote el rango de frecuencias de entrada estableciendo el máximo factible para reportarlo al cliente.

c) (2 pt.) - Indique el voltaje mínimo requerido en los rieles para cumplir con el requisito de voltaje de salida sin saturar.

d) (1 pt.) - Dibuje el circuito completo del amplificador solicitado, estableciendo las resistencias que permiten cumplir con GBW y SR requeridos.

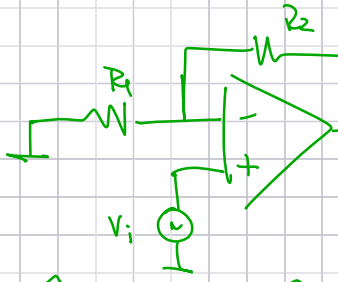
e) (3 pt.) - Las corrientes de polarización de entrada de un OpAmp se modelan como dos fuentes de corriente, una entre el pin no inversor y tierra y otra entre el pin inversor y tierra, ambas de igual valor I_B. Determine la componente de voltaje que aparece en la salida del circuito debido a las corrientes de polarización del OpAmp utilizado.

f) (3 pt.) - El efecto de las corrientes de polarización se puede anular si se antepone en serie al pin no inversor una resistencia de un valor específico. Determine para un amplificador no inversor genérico, con corrientes de polarización I_B y resistencias R_1 y R_2, el valor de esta resistencia R_x.

g) (2 pt.) - Extienda el resultado obtenido en el inciso anterior a su circuito añadiendo la resistencia de anulación de offet, con el valor que corresponda, a cada etapa empleada y dibujando el circuito final que cumple con todo lo requerido.

P4

Acá la topología clara es la del amplificador no inversor:



$$\Rightarrow \quad \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

a) Se pide determinar el N° de etapas de amplificación necesaria para el rango de frecuencias establecido:

1 etapa $\Rightarrow$ Ganancia $300 \frac{V}{V}$ $\Rightarrow$ ¿Max frecuencia de operación con OpAmp? $\frac{GBW}{300} = \frac{3M}{300} = 10[kHz]$

V_i — [A_1] — V_o

10 kHz < 25 kHz por lo que no se puede hacer el amplificador con una sola etapa. ojo: GBW = producto Ganancia-AnchoB.

2 etapas $\Rightarrow$ Se debe maximizar la ganancia en la primera etapa a la máxima frecuencia de operación:

V_i — [A_1] — [A_2] — V_o

↳ $GBW = A_1 \cdot 25k \Rightarrow \boxed{A_1 = 120[V/V]}$

La segunda etapa debe complementar a la primera para lograr $300[V/V]$

↳ $A_1 \cdot A_2 = 300[V/V] \Rightarrow \boxed{A_2 = 2.5[V/V]}$

b) Considerando la topología de 2 etapas, es previsible que el opamp de la etapa 2 es el que tiene que generar la mayor derivada para generar la salida final total.

↳

V_i — [A_1] — [A_2] — V_o

$120 V_i$ (salida de A_1) ; $300 V_i$ (salida de A_2)

Como el Slew Rate es la máxima derivada que puede generar un opamp a su salida

En el caso de la etapa 2, el opamp debe generar:

$$V_o = 300 \cdot V_i = 300 \cdot 50m \cdot \sin(\omega t)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = 300 \cdot 50m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

$$\boxed{\left|\frac{dV_o}{dt}\right|_{max} = 300 \cdot 50m \cdot \omega_{max}} \quad \text{con } \omega \text{ en la frecuencia de operación.}$$

$\Rightarrow$ La máxima frecuencia de operación maximiza la derivada máxima requerida por lo tanto

$$\left|\frac{dV_o}{dt}\right|_{max} = 300 \cdot 50m \cdot 2\pi \cdot 25k \left[\frac{V}{seg}\right] = 2356194.49 \left[\frac{V}{seg}\right] = 2.35 \frac{V}{\mu seg} < 20 \frac{V}{\mu seg}$$

Por lo tanto el opamp provisto por el circuito se puede usar en la topología definida en 2 no inversores en cascada.

c) El voltaje mínimo requerido en los rieles depende:

* Del tipo de onda a amplificar ⇒ Sinusoidal pura ⇒ Rieles Bipolares
* De si el opamp utilizado es o no riel a riel ⇒ No es Riel a Riel!
* La salida fue dada generarse ⇒ $V_o = 300 \cdot 50m \cdot \sin(\omega t) = 15 \cdot \sin(\omega t)$

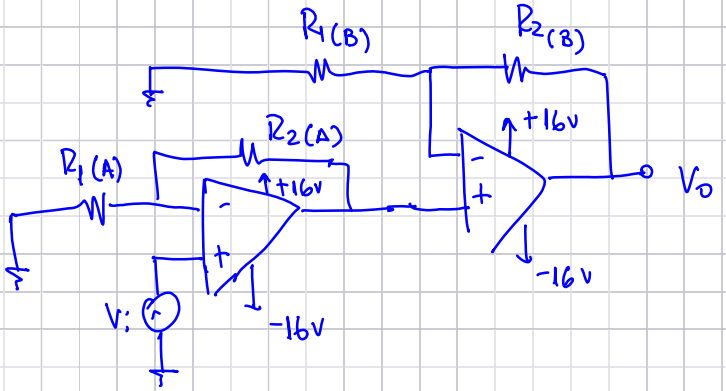
Así se requiere:

$$Riel+ = V_{o_{MAX}} + 1V = 15 + 1 = 16[V]$$

$$Riel- = V_{o_{MIN}} - 1V = -15 - 1 = -16[V]$$

↑ distancia al riel, requerido por el Opamp (tax)

d) El circuito está quedando:



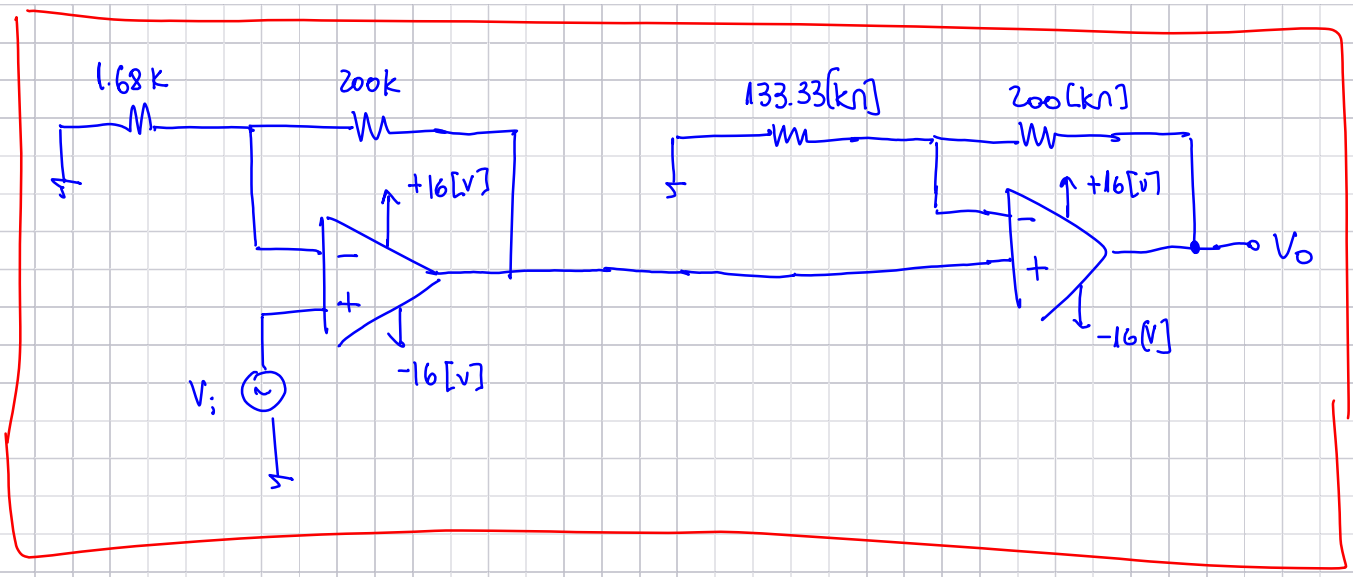
Por emular las resistencias de realimentación con non de 200[kΩ]

↳ $R_{2(A)} = R_{2(B)} = 200k\Omega$

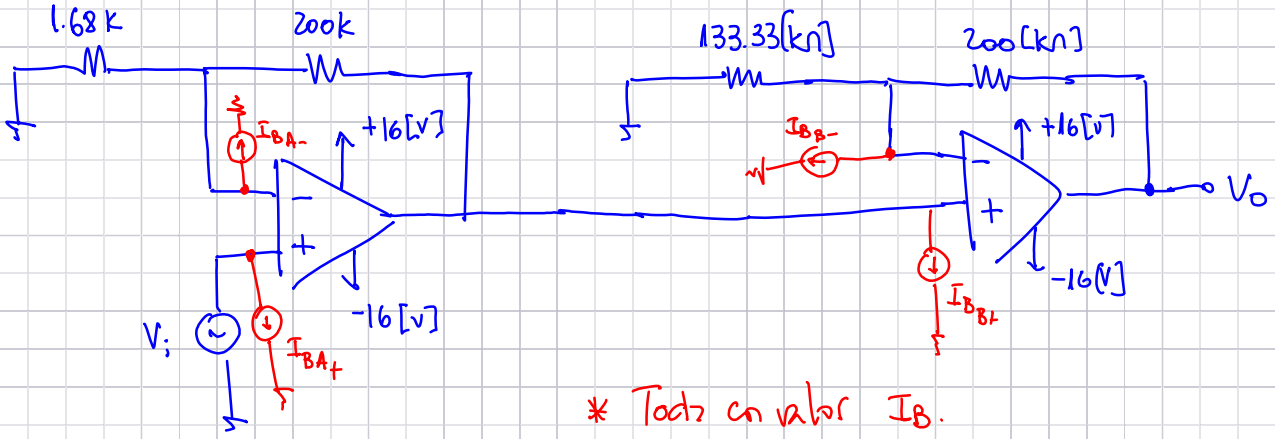
Nos faltan las resistencias $R_{1(A)}$ y $R_{1(B)}$ para lograr las ganancias:

ETAPA 1: $1 + \frac{R_{2(A)}}{R_{1(A)}} = 120 \Rightarrow R_{1(A)} = 1.68[k\Omega]$

ETAPA 2: $1 + \frac{R_{2(B)}}{R_{1(B)}} = 2.5 \Rightarrow R_{1(B)} = 133.33[k\Omega]$



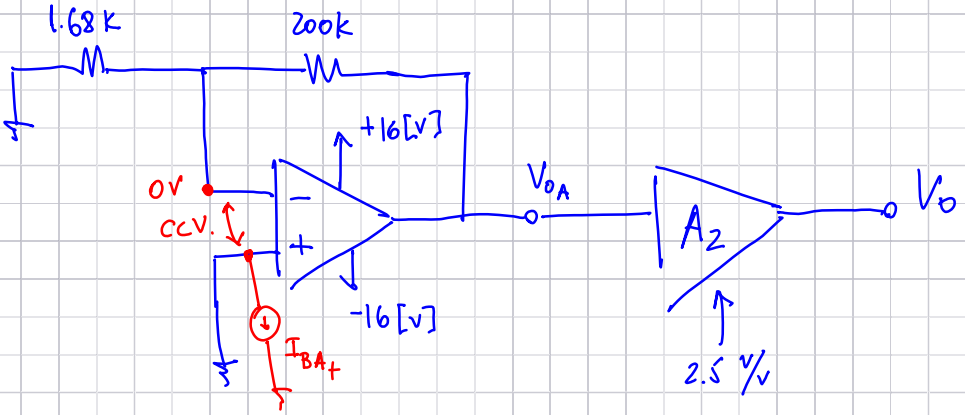
e) Dibujen el circuito con las fuentes de corte de polarización:



* Todas con valor I_B.

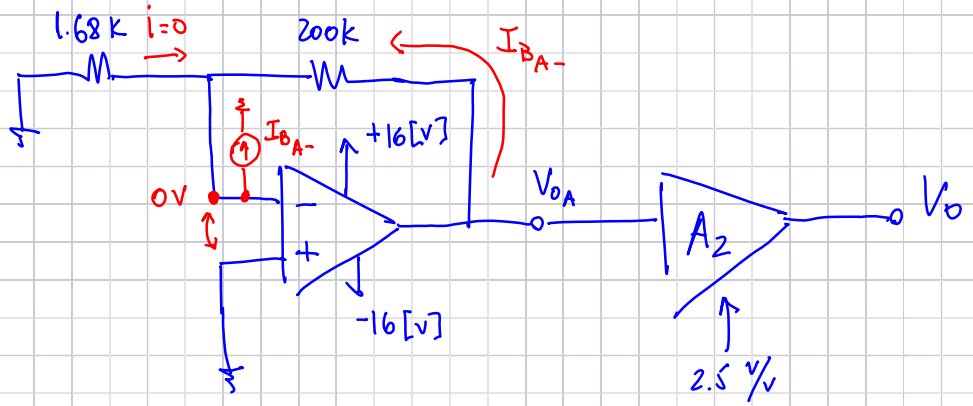
Podemos analizar su efecto por superposición, apagando V_i y analizando una a una las fuentes:

$I_{B_{A+}}$:



$$V_{o_A}\Big|_{I_{B_{A+}}} = 0$$

$I_{B_{A-}}$:

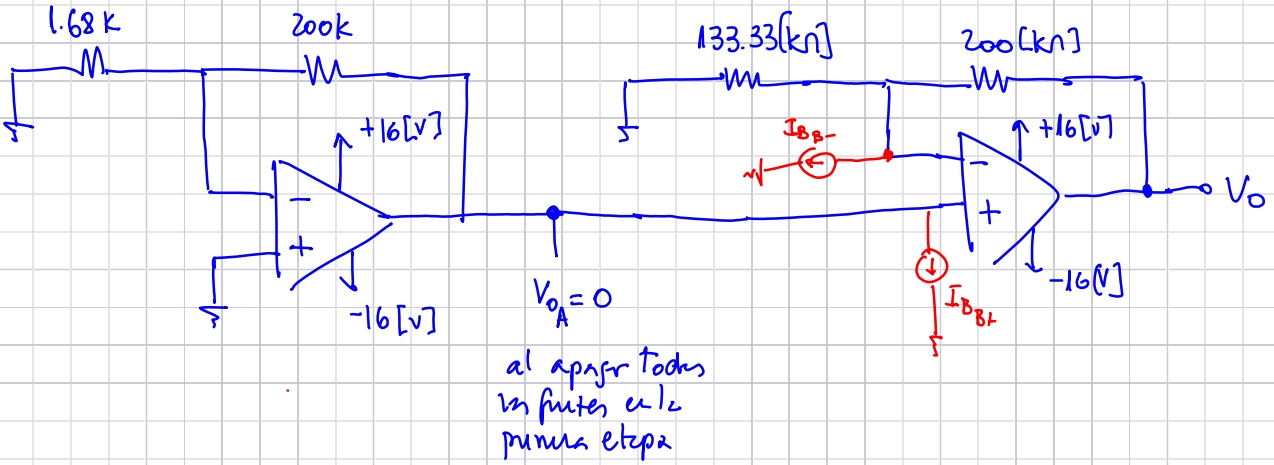


$$V_{O_A}\Big|_{I_{B_{A-}}} = 200k \cdot I_{B_{A-}} \simeq 200k \cdot I_B = 200k \cdot 100nA = 20\,mV.$$

$$V_O\Big|_{I_{B_{A+A-}}} = \left[V_{O_A}\Big|_{I_{B_{A+}}} + V_{O_A}\Big|_{I_{B_{A-}}}\right] \cdot 2.5 = [0 + 20mV] \cdot 2.5 = 50\,[mV]$$

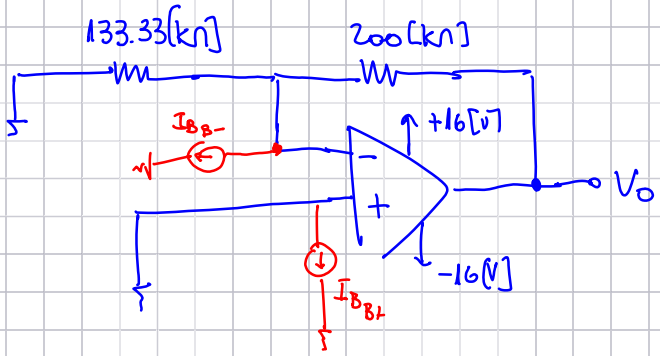
↳ Salida debido a las fuentes de polarización en la primera etapa de amplificación.

Analizamos ahora el efecto en la segunda etapa apagando todas las fuentes de la primera etapa.



al apagar todas las fuentes en la primera etapa

⇒ El circuito a analizar se simplifica a:



$$V_o\Big|_{I_{B_{B+}}} = 0 \Rightarrow \text{Dirección del cálculo realizado en la 1ª etapa.}$$

$$V_o\Big|_{I_{B_{B-}}} = 200\,k \cdot I_{B_{B-}} = 200k \cdot I_B = 200k \cdot 100nA = 20\,mV$$

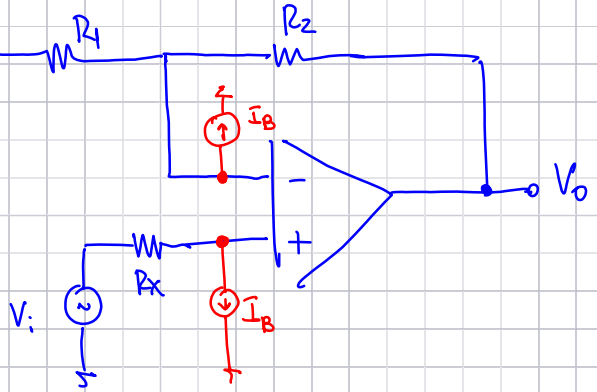
$$V_o\Big|_{I_{B_{B+B-}}} = V_o\Big|_{I_{B_{B+}}} + V_o\Big|_{I_{B_{B-}}} = 0 + 20\,mV = 20[mV].$$

$$\Rightarrow \boxed{V_o\Big|_{\substack{\text{Polarización} \\ \text{de opamps}}} = V_{o_A}\Big|_{I_{B_{A+A-}}} + V_o\Big|_{I_{B_{B+B-}}} = 50\,mV + 20\,mV = 70[mV]}$$

↳ Note que el offset en la salida tiene el mismo orden de magnitud que el voltaje de entrada

f) Se puede analizar la anulación de offset en un amplificador no inversor genérico agregando una resistencia en serie al pin no inversor.

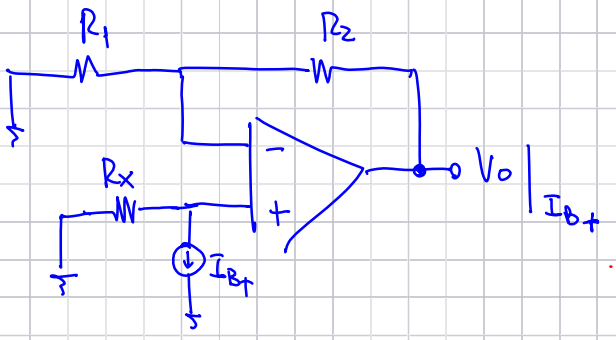
↳



Las fuentes de polarización son del opamp, no una circuitería externa.
por eso se "welgan" de los pines del mismo.

Para el análisis de offset no usamos V_i, por lo que esta fuente se apaga y hacemos superposición con las fuentes de sesgo:

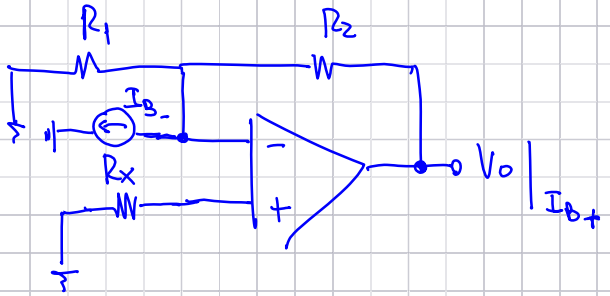
* $V_o\big|_{I_{B+}}$



$$V_+ = -R_x \cdot I_{B+} \quad , \quad V_- = V_+$$

$$\Rightarrow \quad V_o\Big|_{I_{B+}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(-R_x \cdot I_B\right)$$

* $V_o\big|_{I_{B-}}$



$$V_+ = 0 \quad , \quad V_- = V_+$$

$$\Rightarrow I_{R_1} = 0 \quad \text{lo que nos deja:}$$

$$V_o\Big|_{I_{B-}} = R_2 \cdot I_{B-}$$

Finalmente, con $I_{B+} = I_{B-} = I_B$

$$V_{o_{offset}} = V_o\Big|_{I_{B+}} + V_o\Big|_{I_{B-}} = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_x I_B + R_2 \cdot I_B$$

Y queremos que $V_{o_{offset}} = 0$

$$\Rightarrow \quad 0 = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_x + R_2 \qquad \left(I_B \neq 0\right)$$

$$\boxed{R_x = \frac{R_2 R_1}{R_1 + R_2} = R_2 /\!/ R_1}$$

g) La resistencia de anulación de offset requerida en cada etapa es:

↳ $R_{x_1} = 200\,k \,//\, 1.68\,k = 1.66\ k\Omega$

↳ $R_{x_2} = 200k \,//\, 133.33\,k = 79.99\ k\Omega \approx 80\ k\Omega$

Y el circuito completo queda:

