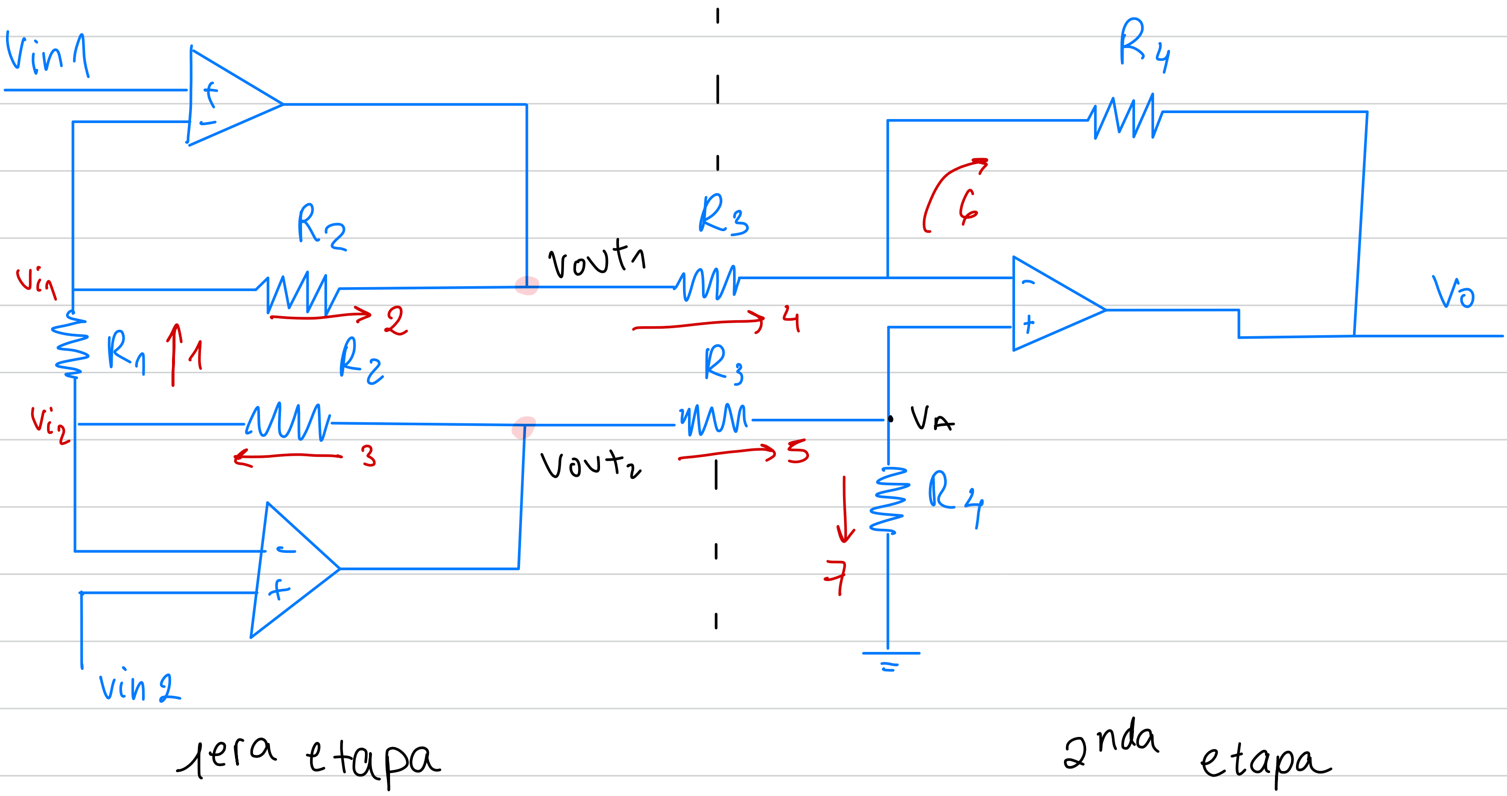
1. Ganancia en tensión en modo común, ganancia en tensión modo diferencial y factor de rechazo de la salida de la primera etapa. Calcular la tensión de salida (Vo) y factor de rechazo del modo común total. AOI y resistencias apareadas.

$V_{in_1} = 2{,}5\,V$; $V_{in_2} = 2{,}25\,V$; $R_1 = 30\,k\Omega = R_4$; $R_2 = 150\,k\Omega$;
$R_3 = 15\,k\Omega$



AOI ⇒ c.c. virtual $V_+ = V_-$

$i_1 = i_2 \rightarrow \dfrac{V_{i2} - V_{i1}}{R_1} = \dfrac{V_{i1} - V_{out1}}{R_2}$

$\hookrightarrow V_{out1} = R_2 \left[\dfrac{V_{i1}}{R_2} + \dfrac{V_{i1}}{R_1} - \dfrac{V_{i2}}{R_1} \right]$

$$i_3 = i_1 \Rightarrow \frac{V_{out_2} - V_{in2}}{R_2} = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_1}$$

$$V_{out_1} = V_{i1}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} V_{i2}$$

$$\hookrightarrow V_{out_2} = R_2\left[V_{i2}\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}\right) - \frac{V_{i1}}{R_1}\right] \Rightarrow V_{out_2} = V_{i2}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} V_{i1}$$

$$V_{out} = A_d V_d + A_{CM} V_{CM} \quad \begin{cases} \cdot\ V_d = V_{i2} - V_{i1} \\ \cdot\ V_{CM} = (V_{i2} + V_{i1})\frac{1}{2} \end{cases}$$

Modo diferencial

$$V_{out_2} - V_{out_1} = V_{i2}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} V_{i1} - V_{i1}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{R_2}{R_1} V_{i2}$$

$$V_{out_2} - V_{out_1} = (V_{i2} - V_{i1})\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow A_{d1} = 1 + 2\frac{R_2}{R_1} = 1 + 2 \cdot 5 = 11$$

$$\boxed{A_{d1} = 11 \text{ V/V}}$$

Modo común

$$\frac{V_{out_2} + V_{out_1}}{2} = \frac{1}{2}\left(V_{i1}\left(1 + \cancel{\frac{R_2}{R_1}}\right) - \underbrace{\frac{R_2}{R_1} V_{i2}} + V_{i2}\left(1 + \underbrace{\frac{R_2}{R_1}}\right) - \cancel{\frac{R_2}{R_1}} V_{i1}\right)$$

$$\frac{V_{out_2} + V_{out_1}}{2} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \cdot 1 \longrightarrow \boxed{A_{CML} = 1 \text{ V/V}}$$

$$CMRR_1 = 20 \log_{10} \frac{A_{d1}}{A_{CML}} = 20 \log_{10} 11 \Rightarrow \boxed{CMRR_1 \simeq 20{,}83 \text{ dB}}$$

Ganancias y CMRR segunda etapa

$i_4 = i_6 \Rightarrow \dfrac{V_{out_1} - V_A}{R_3} = \dfrac{V_A - V_0}{R_4}$

$i_5 = i_7 \Rightarrow \dfrac{V_{out_2} - V_A}{R_3} = \dfrac{V_A - 0}{R_4} \Rightarrow V_A\left(\dfrac{1}{R_4} + \dfrac{1}{R_3}\right) = \dfrac{V_{out_2}}{R_3}$

$V_A = V_{out_2} \dfrac{R_4}{R_3 + R_4}$

$$\frac{V_{out}}{R_4} = V_A\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3}\right) - \frac{V_{out_1}}{R_3} = V_{out_2}\frac{\cancel{R_4}}{\cancel{R_3+R_4}}\left(\frac{\cancel{R_3+R_4}}{R_3\cancel{R_4}}\right) - \frac{V_{out_1}}{R_3} =$$

$$= (V_{out_2} - V_{out_1})\frac{1}{R_3}$$

$V_{out} = (V_{out_2} - V_{out_1})\dfrac{R_4}{R_3} \rightarrow A_{CM_2} = 0$ $\quad Ad_2 = \dfrac{R_4}{R_3} = 2\ V/V$

$$\left(V_{out} = A_{CM_2}\left(\frac{V_{out_2} + V_{out_1}}{2}\right) + Ad_2\,(V_{out_2} - V_{out_1})\right)$$

$CMRR_2 = \infty$

→ ¿Tensión de salida y CMRR, Ad, A_{CM} totales?

$$V_{out} = (V_{out_2} - V_{out_1})\frac{R_4}{R_3} = \left[(V_{i_2} - V_{i_1})\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)\right]\frac{R_4}{R_3}$$

$A_{CM} = 0$

$Ad = \left(1 + 2\dfrac{R_2}{R_1}\right)\dfrac{R_4}{R_3} = (1 + 2\cdot 5)\cdot 2$

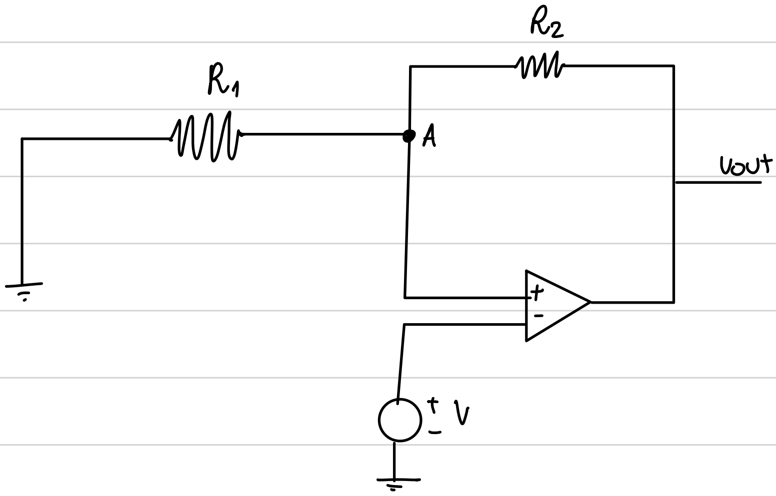
$Ad = 22\ V/V$

$V_{out} = 22\ V/V\,(2{,}25\ V - 2{,}5\ V)$ $\quad \Rightarrow CMRR = 20\log_{10}\left(\dfrac{22}{0}\right) \to \infty$

$V_{out} = -5{,}5\ V$ $\qquad CMRR = \infty$

2. Amplificador operacional alimentado a $\pm 15V$ (conf. no inversora) con ganancia $10\ V/V$. Asumamos que posee un ancho de banda de ganancia unidad $f_T = 1{,}5\ MHz$, una velocidad de respuesta de $S = 0{,}8\ V/\mu s$ y la saturación aparece para tensiones de salida de $\pm 14V$.

a) Entrada sinusoidal con amplitud $V_{in} = 0{,}6V$. ¿Frecuencia antes de que se distorsione la salida?



(A) $i_{R_1} = i_{R_2}$

$$\frac{0 - V}{R_1} = \frac{V - V_{out}}{R_2}$$

$$V_{out} = V \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

SR → máxima pendiente del cambio posible para la salida

$$SR = \left. \frac{dV_{out}}{dt} \right|_{max} = V_{max} \cdot \omega$$

→ ancho de banda en potencia

Ancho de banda ⇒ $BW = f_T\, \beta$

$$\beta = \frac{1}{\text{ganancia ideal}}$$

$$\beta = \frac{1}{10} \Rightarrow BW = 1{,}5 \cdot 10^6 \cdot 1/10 = 150{,}0\ kHz$$

$V_{out} = A_v \cdot V_{in} = 10 \cdot 0'6 = 6\,V$ $\boxed{V_{out} = 6\,V}$

$V_{out} < V_{out\,max} \Rightarrow$ No supera la tensión de saturación

$SR = \omega V_{max} = V_{max} \cdot 2\pi f \Rightarrow f = \dfrac{SR}{2\pi V_{max}}$

$$f = \frac{0{,}8 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 6} = 21{,}22\ kHz$$

$f < BW \Rightarrow$ No supera el ancho de banda (aún no se distorsiona la salida)

b) Frecuencia de la señal es $f = 10\,kHz$ ¿Valor máximo de Vin antes de que se distorsione?

$$f = \frac{SR}{2\pi V_{max}} \Rightarrow V_{max} = \frac{SR}{f \cdot 2\pi} = \frac{0'8 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot 2\pi} = 1{,}273\ V$$

$V_{max} = 1{,}273\,V < V_{out\,max}$

$\downarrow$

valor máx de V_{out} $\Rightarrow V_{in_{max}} = \dfrac{1{,}273}{10}\ V$

c) $V_{in} = 50\,mV$ ¿Rango útil de frecuencia de operación?

$V_{out} = 10 \cdot V_{in} = 10 \cdot 0{,}05 = \frac{1}{2}\,V < V_{out}$

$$f = \frac{SR}{2\pi V_{max}} = \frac{0{,}8 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 1/2} = 254{,}647 \text{ KHz}$$

$f = 254{,}647$ kHz $>$ BW $\Rightarrow$ Mayor que el ancho de banda

BW es el rango útil

d) $f = 5$ KHz ¿Rango de amplitud de operación para la señal de entrada?

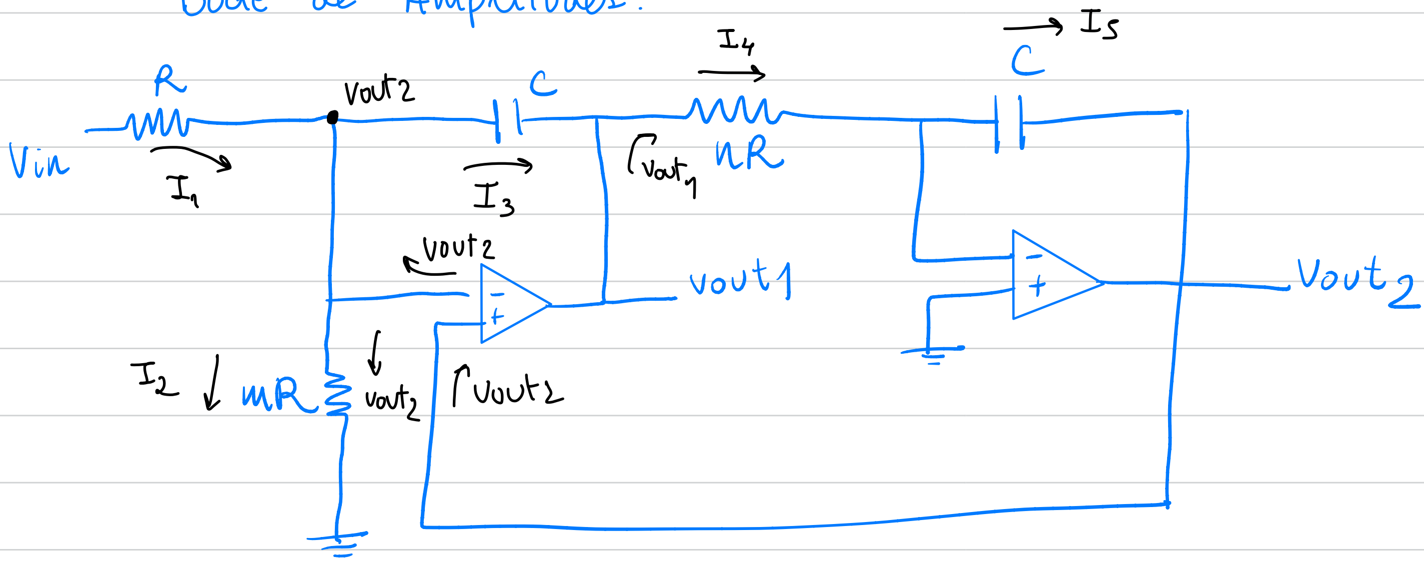
$$V_{max} = \frac{SR}{2\pi f} = \frac{0{,}8 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3} = 25 \text{ V} > V_{max}$$

$$\left.\begin{array}{l} V_{out} = \pm 15 \text{ V} \\ V_{in} = \dfrac{15}{10} = 1{,}5 \text{ V} \end{array}\right\} \text{Rango útil} \Rightarrow 0 \rightarrow 1{,}5 \text{ V}$$

3. Circuito finito de variable de estado

a) Obtener la función de transferencia en cada salida.

b) Valores $m = \infty$; $n = 100$, $C = 1$nF; $R = 7{,}957$ kΩ. Diagrama de Bode de Amplitudes.



$$\boxed{I_1 = I_2 + I_3} \Rightarrow \frac{V_{in} - V_{out2}}{R} = \frac{V_{out2} - 0}{mR} + \frac{V_{out2} - V_{out1}}{1/CS} \quad (1)$$

$$\boxed{I_4 = I_5} \Rightarrow \frac{V_{out1} - 0}{nR} = \frac{0 - V_{out2}}{1/CS} \Rightarrow V_{out1} = -V_{out2} \cdot nRCS \quad (2)$$

$$V_{out2} = \frac{-V_{out1}}{nRCS} \quad (3)$$

Sustituyo en (2) y (1)

$$\frac{V_{in} - V_{out2}}{R} = \frac{V_{out2}}{mR} + \frac{V_{out2} + V_{out2}\, nRcs}{1/cs}$$

$$\frac{V_{in}}{\cancel{R}} \cdot m\cancel{R} - \frac{V_{out2}\, m\cancel{R}}{\cancel{R}} = V_{out2} + mRV_{out2}\,cs + mnR^2C^2s^2\, V_{out2}$$

$$V_{in}\, m = V_{out} \left(1 + m + mRCS + mnR^2C^2S^2 \right)$$

$$\frac{V_{out2}}{V_{in}} = \frac{m}{1 + m + mRCS + mnR^2C^2S^2} \Rightarrow G_2(s) = \underbrace{\frac{1/nR^2C^2}{S^2 + S \cdot \frac{1}{nRC} + \frac{1+m}{mnR^2C^2}}}_{\text{FILTRO PASA BAJA}}$$

Para V_{out1}, tengo en cuenta (3)

$$\frac{V_{out2}}{V_{in}} = \frac{-V_{out1}/nRcs}{V_{in}} = G_2(s) \Rightarrow G_1(s) = -G_2(s) \cdot nRcs$$

$$G_1(s) = \frac{(1/\cancel{n}R^{\cancel{2}}C^{\cancel{2}})(-\cancel{n}\cancel{R}\cancel{C}s)}{S^2 + s \cdot 1/nRC + 1+m/mnR^2C^2}$$

$$G_1(s) = \frac{-\frac{1}{RC}s}{S^2 + s\; 1/nRC + 1+m/mnR^2C^2} \quad \Bigg\} \text{ FILTRO PASA BANDA}$$

→ Vamos a sacar los diagramas de Bode y los parámetros

- Para $G_1(s)$ ⇒ FILTRO PASA BANDA ⇒ $G(s) = \dfrac{H_0 w_0 / Q \, s}{s^2 + \frac{w_0}{Q} s + w_0^2}$

Entonces ⇒ $w_0 = \sqrt{\dfrac{m+1}{m n R^2 c^2}} = 12567 \text{ Hz}$ ⇒ $\boxed{w_0 = 12567 \text{ Hz}}$

$f_0 = \dfrac{w_0}{2\pi} = \dfrac{12567}{2\pi} = 2000 \text{ Hz}$ ⇒ $\boxed{f_0 = 2000 \text{ Hz}}$

$\dfrac{w_0}{Q} = \dfrac{1}{nRC}$ ⇒ $Q = nRC \cdot \dfrac{1}{RC} \dfrac{1}{\sqrt{n}} = 10$ $\boxed{Q=0}$

$\dfrac{H_0 w_0}{Q} = \dfrac{1}{RC}$ ⇒ $H_0 w_0 = \dfrac{\sqrt{n}}{RC}$ ⇒ $\boxed{H_0 = 100}$

→ Para obtener el diagrama de Bode calculo f_1 y f_2

$BW = \dfrac{f_0}{Q} = f_2 - f_1 = 200$

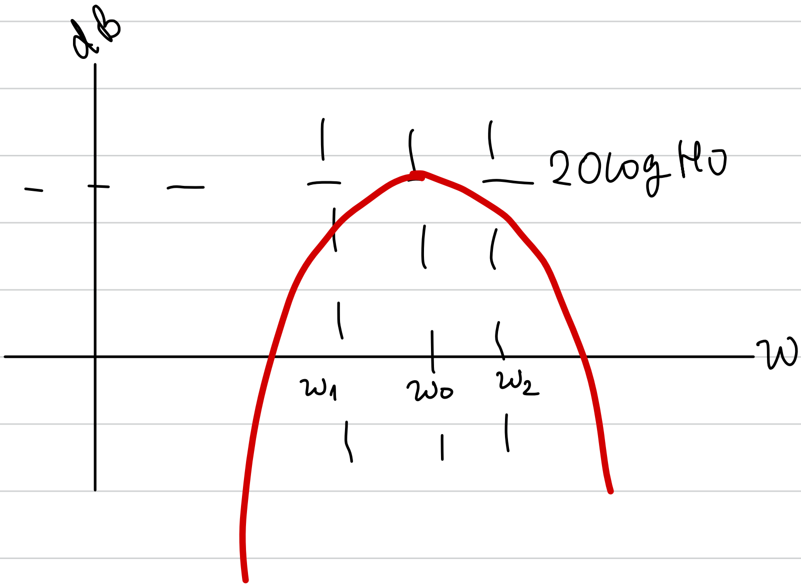
$f_1 f_2 = f_0^2$ ⇒ $f_2 = f_0^2 / f_1$

$\dfrac{f_0^2}{f_1} - f_1 = 200$

$f_0^2 - f_1^2 = 200 f_1$

Tenemos $f_1^2 - 200 f_1 - f_0^2 = 0$ ⇒ $f_1 = 1902 \text{ Hz}$

$f_2 = f_0^2 / f_1 = 2103 \text{ Hz}$ $f_2 = 2103 \text{ Hz}$



FILTRO PASA BANDA

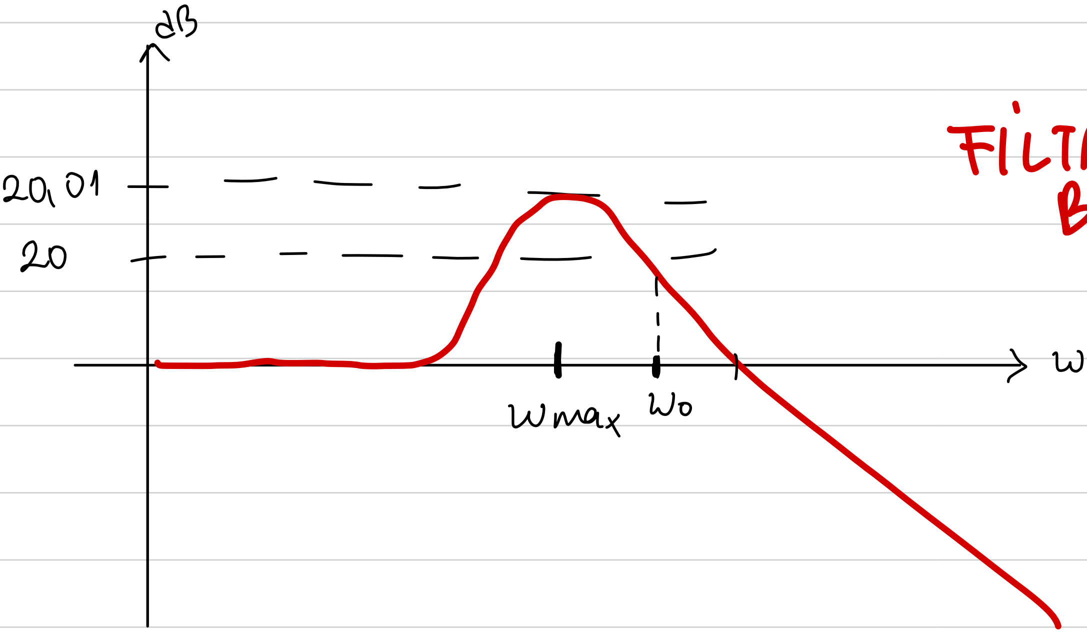
• Para $G_2(s) \Rightarrow$ $$G(s) = \frac{H_0 w_0^2}{s^2 + \frac{w_0}{Q}s + w_0^2}$$

w_0, f_0 y Q iguales ; $H_0 w_0^2 = \dfrac{1}{nR^2C^2} \Rightarrow H_0 = \dfrac{nR^2C^2}{nR^2C^2} = 1$ $\boxed{H_0 = 1}$

$$w_{max} = w_0 \sqrt{1 - \frac{\ }{2Q^2}} = 12535\ Hz \qquad \boxed{w_{max} = 12535\ Hz}$$

Punto máximo $\Rightarrow$ $$20\log_{10}|G(w_{max})| = 20\log_{10}\left(\frac{Q H_0}{\sqrt{1 - 1/4Q^2}}\right) = 20{,}01\ dB$$

$$20\log_{10}|G(w_0)| = 20\log_{10}(H_0 Q) = 20\ dB$$



FILTRO PASA BAJA

4. Convertidor D.A de 3 bits VFSR = 8V se secuencia para todos los códigos 000 hasta 111 y se encuentran valores de salida $V_o = \{0'05, 1'05, 2'03, 2'94, 3'95, 5'04, 6'00, 6'95\}$ V
Encontrar el error de cero (offset), el error de ganancia, el DNLE y INLE en fracciones 1 LSB.

$$V_{LSB} = \frac{V_{FSR}}{2^n} = \frac{8}{2^3} = 1\ V$$

① Error de offset

$$E_{off} = \frac{V_o|_{000}}{V_{LSB}} = 0{,}05\ LSB \qquad \boxed{E_{off} = 0{,}05\ LSB}$$

② Error de ganancia :

$$E_g = \left(\frac{V_o}{V_{LSB}}\Big|_{111} - \frac{V_o}{V_{LSB}}\Big|_{000} \right) - (2^n - LSB)$$

$$E_g = (6{,}95 - 0{,}05) - (8-1) = -0{,}1 \qquad \boxed{E_g = -0{,}1}$$

Compensamos los errores para calcular DNLE y INLE

$$V_{out}\Big|_{compensado} = \frac{V_{out}}{V_{LSB}} - E_{off} - \frac{i\,E_g}{2^n - 1}$$

los valores están mal calculados... Me olvidé de multiplicar por la i, $i = 0,1,2...6$

$$V_{out}\Big|_{compensado} = \{0'1,\ 1'1,\ 2'08,\ 2'99,\ 4,\ 5'09,\ 6'05,\ 7\}\ V$$

$$DNLE_j = \frac{V_{j+1} - V_j - V_{LSB}}{V_{LSB}}$$

$$DNLE = \{0,\ -0{,}02,\ -0{,}09,\ 0{,}01,\ 0{,}09,\ -0{,}04,\ -0{,}05\}\ LSB$$

$$INLE_j = \sum_{K=0}^{j} DNLE_K$$

$$INLE = \{0,\ -0{,}02,\ -0{,}11,\ -0{,}1,\ -0{,}01,\ -0{,}05,\ -0{,}1\}\ LSB$$