



Microtecnología y
Sistemas Embebidos

Instituto Politécnico Nacional

Centro de Investigación en Computación

VLSI avanzado

Tarea 2 - Diseño de un amplificador
operacional tipo *cascade* y *folded cascade*
de una etapa

PROFESOR:

DR. HERÓN MOLINA LOZANO

POR:

ING. RICARDO ALDAIR TIRADO TORRES

CIUDAD DE MÉXICO, 24 DE JUNIO DE 2024

Tabla de contenido

1. Objetivos	2
2. Cálculo de parámetros $\frac{W}{L}$ del amplificador tipo <i>cascode</i>	3
3. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos del amplificador tipo <i>cascode</i>	7
4. Cálculo de parámetros $\frac{W}{L}$ del amplificador tipo <i>folded cascode</i>	12
5. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos del amplificador tipo <i>folded cascode</i>	16
6. Anexos	21
6.1. Anexo I: Programas utilizados para el cálculo de parámetros de los diseños .	21

1. Objetivos

- Diseñar un amplificador operacional tipo *cascode* de una etapa, realizando el calculo de las corrientes y de las proporciones $\frac{W}{L}$ con el método propuesto por [1]. Se deben emplear los transistores CMOS del nodo tecnológico SKY130.
- Diseñar un amplificador operacional tipo *folded cascode* de una etapa, realizando el calculo de las corrientes y de las proporciones $\frac{W}{L}$ con el método propuesto por [1]. Se deben emplear los transistores CMOS del nodo tecnológico SKY130.
- Simular los circuitos con la herramienta de Xschem y NGSPICE para comprobar que los diseños cumplen con las especificaciones requeridas.

2. Cálculo de parámetros $\frac{W}{L}$ del amplificador tipo *cascode*

Actividad 1

Emplear la siguiente metodología, propuesta por [1] para diseñar el amplificador *cascode* de una etapa (Ver Figura 1).

Step	Design Equations	Comments
1	$I_9 = SR \times C_L$	SR and C_L specified
2	$g_m = g_{m1} = g_{m2} = GB \times C_L, \frac{W_1}{L_1} = \frac{W_2}{L_2} = \frac{g_m^2}{K'_1 I_5}$	GB is in rads/sec, $M1 = M2$
3	$W_3/L_3 = W_4/L_4 = W_1/L_1 = W_2/L_2$	Simplifies design
4	Use Design Procedure BV1 to design W_{10}/L_{10} and I_{10}	Pick I_{10} considering P_{diss}
5	$W_{11}/L_{11} = (I_{10}/4I_1)(W_1/L_1) = (I_{10}/4I_2)(W_2/L_2)$	$M1$ & $M2$ at $V_{DS}(\text{sat})$
6	$\frac{W_7}{L_7} = \frac{W_8}{L_8} = \frac{2I_1}{K'_7[V_{DD} - ICMR^+ - V_{T7} - V_{DS3}(\text{sat}) + V_{T1}]^2}$	$ICMR^+ = V_{in}(\text{max})$ specified, $M7 = M8$
7	$W_5/L_5 = W_6/L_6 = W_7/L_7 = W_8/L_8$	Design V_{BP2} to put $M7$ and $M8$ at $V_{DS}(\text{sat})$
Alternatively, one can use the low frequency gain to design W_1/L_1 and W_2/L_2		
2'	$A_o = g_m R_{out} \rightarrow \frac{W_1}{L_1} = \frac{W_2}{L_2} = \frac{A_o^2}{2K'_1 I_1 R_{out}^2}$	A_o specified, $M1 = M2$, $R_{out} \approx (r_{ds8} g_{m6} r_{ds6}) (r_{ds2} g_{m4} r_{ds4})$
8	$\frac{W_9}{L_9} = \frac{2I_9}{K'_N(ICMR^- - V_{GS1})^2}, V_{GS1} = \sqrt{i_9/K'_N(\frac{W_1}{L_1})} + V_{T1}$	Note that $ICMR^-$ must be greater than V_{GS1}

Figura 1: Procedimiento de diseño del amplificador *cascode*.

$$\begin{aligned}
V_{DD} &= 1.8V \\
V_{SS} &= 0V \\
L_{min} &= 150.0nm \\
0.8V &\leq ICMR \leq 1.7V \\
K'_N &= 151.37604 \frac{\mu A}{V^2} \\
K'_P &= 57.013889 \frac{\mu A}{V^2} \\
V_{TN} &= 0.769432V \\
V_{TP} &= 0.624345V \\
\lambda_N &= 0.088964V^{-1} \\
\lambda_P &= 0.068964V^{-1} \\
C_L &= 10.0pF
\end{aligned}$$

Características deseadas

$$\begin{aligned}
A_V &= 3000 \frac{V}{V} \\
P_{diss} &\leq 1.0mW \\
GB &= 10.0MHz \\
SR &\geq 10 \frac{V}{\mu s} \\
0.3V &\leq V_{OUT} \leq 1.5V
\end{aligned}$$

Paso 1

$$\begin{aligned}
I_9 &= SR \times C_L = 10 \times 1e-11 \\
I_9 &= 100.0\mu A
\end{aligned}$$

Paso 2

$$\begin{aligned}
g_m &= g_{m1} = g_{m2} = 2\pi \times GB \times C_L = 2\pi \times 10000000.0 \times 1e-11 \\
g_m &= 628.318531\mu S \\
I_5 &= \frac{I_9}{2} = \frac{0.0001}{2} \\
I_5 &= 50.0\mu A \\
\frac{W_1}{L_1} &= \frac{gm^2}{K'_N \times I_5} = \frac{0.000628^2}{0.000151 \times 5e-05} \\
\frac{W_1}{L_1} &= 52.159401 \\
W_1 &= \frac{W_1}{L_1} \times L_{min} = 52.159401 \times 1.5e-07 \\
W_1 &= W_2 = 7.82391\mu m
\end{aligned}$$

Paso 3

$$W_4 = W_3 = W_1 = 7.82391\mu m$$

Paso 4

Se escoge $aI_{10} = 12.0\mu A$

Se escoge $a\frac{W_{10}}{L_{10}} = 50$

$$W_{10} = \frac{W_{10}}{L_{10}} \times L_{min} = 50 \times 1.5e - 07$$

$$W_{10} = 7.5\mu m$$

Paso 5

$$I_1 = I_2 = \frac{I_9}{2} = \frac{0.0001}{2}$$

$$I_1 = 50.0\mu A$$

$$\frac{W_{11}}{L_{11}} = \frac{I_{10}}{4 \times I_1} \times \frac{W_1}{L_1} = \frac{1.2e-05}{4 \times 5e-05} \times 52.159401$$

$$\frac{W_{11}}{L_{11}} = 3.129564$$

$$W_{11} = \frac{W_{11}}{L_{11}} \times L_{min} = 3.129564 \times 1.5e - 07$$

$$W_{11} = 0.469435\mu m$$

Paso 6

$$V_{DS3}(sat) = \sqrt{\frac{2 \times I_1}{K'_N \times \frac{W_1}{L_1}}} = \sqrt{\frac{2 \times 5e-05}{0.000151 \times 52.159401}}$$

$$V_{DS3}(sat) = 0.11254V$$

$$\frac{W_7}{L_7} = \frac{2 \times I_1}{K'_P \times (V_{DD} - ICMR^+ - |V_{TP}| - V_{DS3}(sat) + V_{TN})^2} = \frac{2 \times 5e-05}{5.7e-05 \times (1.8 - 1.7 - 0.624345 - 0.11254 + 0.769432)^2}$$

$$\frac{W_7}{L_7} = 99.833549$$

$$W_7 = \frac{W_7}{L_7} \times L_{min} = 99.833549 \times 1.5e - 07$$

$$W_7 = W_8 = 14.975032\mu m$$

Paso 7

$$W_5 = W_6 = W_7 = 14.975032\mu m$$

Paso 8

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{I_9}{K'_N \times \frac{W_1}{L_1}}} + V_{TN} = \sqrt{\frac{0.0001}{0.000151 \times 52.159401}} + 0.769432$$

$$V_{GS1} = 0.881972V$$

$$\frac{W_9}{L_9} = \frac{2 \times I_9}{K'_N \times (ICMR^- - V_{GS1})^2} = \frac{2 \times 0.0001}{0.000151 \times (0.8 - 0.881972)^2}$$

$$\frac{W_9}{L_9} = 196.628593$$

$$W_9 = \frac{W_9}{L_9} \times L_{min} = 196.628593 \times 1.5e - 07$$

$$W_9 = 29.494289\mu m$$

Paso 9

$$r_{ds2} = r_{ds4} = \frac{1}{\lambda_N \times I_2} = \frac{1}{0.088964 \times 5e-05}$$

$$r_{ds2} = 224.810711 K\Omega$$

$$r_{ds6} = r_{ds8} = \frac{1}{\lambda_P \times I_2} = \frac{1}{0.068964 \times 5e-05}$$

$$r_{ds6} = 290.007504 K\Omega$$

$$g_{m4} = \sqrt{2 \times K'_N \times \frac{W_4}{L_4} \times I_2} = \sqrt{2 \times 0.000151 \times 52.159401 \times 5e-05}$$

$$g_{m4} = 888.576588 \mu S$$

$$g_{m6} = \sqrt{2 \times K'_P \times \frac{W_6}{L_6} \times I_2} = \sqrt{2 \times 5.7e-05 \times 99.833549 \times 5e-05}$$

$$g_{m6} = 754.446744 \mu S$$

$$R_{OUT} \approx (r_{ds2} \times g_{m4} \times r_{ds4}) || (r_{ds6} \times g_{m6} \times r_{ds8})$$

$$R_{OUT} \approx (224810.711 \times 0.001 \times 224810.711) || (290007.504 \times 0.001 \times 290007.504)$$

$$R_{OUT} \approx 26.296853 M\Omega$$

$$A_0 = g_m \times R_{OUT} = 0.000628 \times 26296852.534171$$

$$A_0 = 16522.799747 = 84.361673 db$$

Paso 10

$$V_{DS8}(sat) = \sqrt{\frac{2 \times I_2}{K'_N \times \frac{W_8}{L_8}}} = \sqrt{\frac{2 \times 5e-05}{0.000151 \times 99.833549}}$$

$$V_{DS8}(sat) = 0.081345 V$$

$$V_{DS9}(sat) = \sqrt{\frac{2 \times I_9}{K'_N \times \frac{W_9}{L_9}}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.0001}{0.000151 \times 196.628593}}$$

$$V_{DS9}(sat) = 0.081972 V$$

$$V_{OUT}(max) = V_{DD} - 2 \times V_{DS8}(sat) = 1.8 - 2 \times 0.081345$$

$$V_{OUT}(max) = 1.637309 V$$

$$V_{OUT}(min) = 2 \times V_{DS3}(sat) + V_{DS9}(sat) = 2 \times 0.11254 + 0.081972$$

$$V_{OUT}(min) = 0.307051 V$$

Parámetros calculados

$$W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = 7.824 \mu m$$

$$W_5 = W_6 = W_7 = W_8 = 14.975 \mu m$$

$$W_9 = 29.494 \mu m$$

$$W_{10} = 7.5 \mu m$$

$$W_{11} = 0.469 \mu m$$

$$L_1 - L_{11} = 0.15 \mu m$$

3. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos del amplificador tipo *cascode*

Actividad 2

Utilizando el simulador NGSPICE en la herramienta de Xschem, simular el amplificador operacional *cascode* con las razones $\frac{W}{L}$ calculadas previamente.

Resultados obtenidos de la simulación

$$A_V = \frac{A_V(0)}{R \times C} = \frac{20.208314}{100000.0 \times 1.2e-08}$$

$$A_V = 16840.261667$$

$$P_{diss} = V_{DD} \times (I_9 + I_{10}) = 1.8 \times (0.0001 + 1.2e-05)$$

$$P_{diss} = 0.2016mW$$

$$GB = 311.817097KHz$$

$$SlewRate = 12.760688 \frac{V}{\mu s}$$

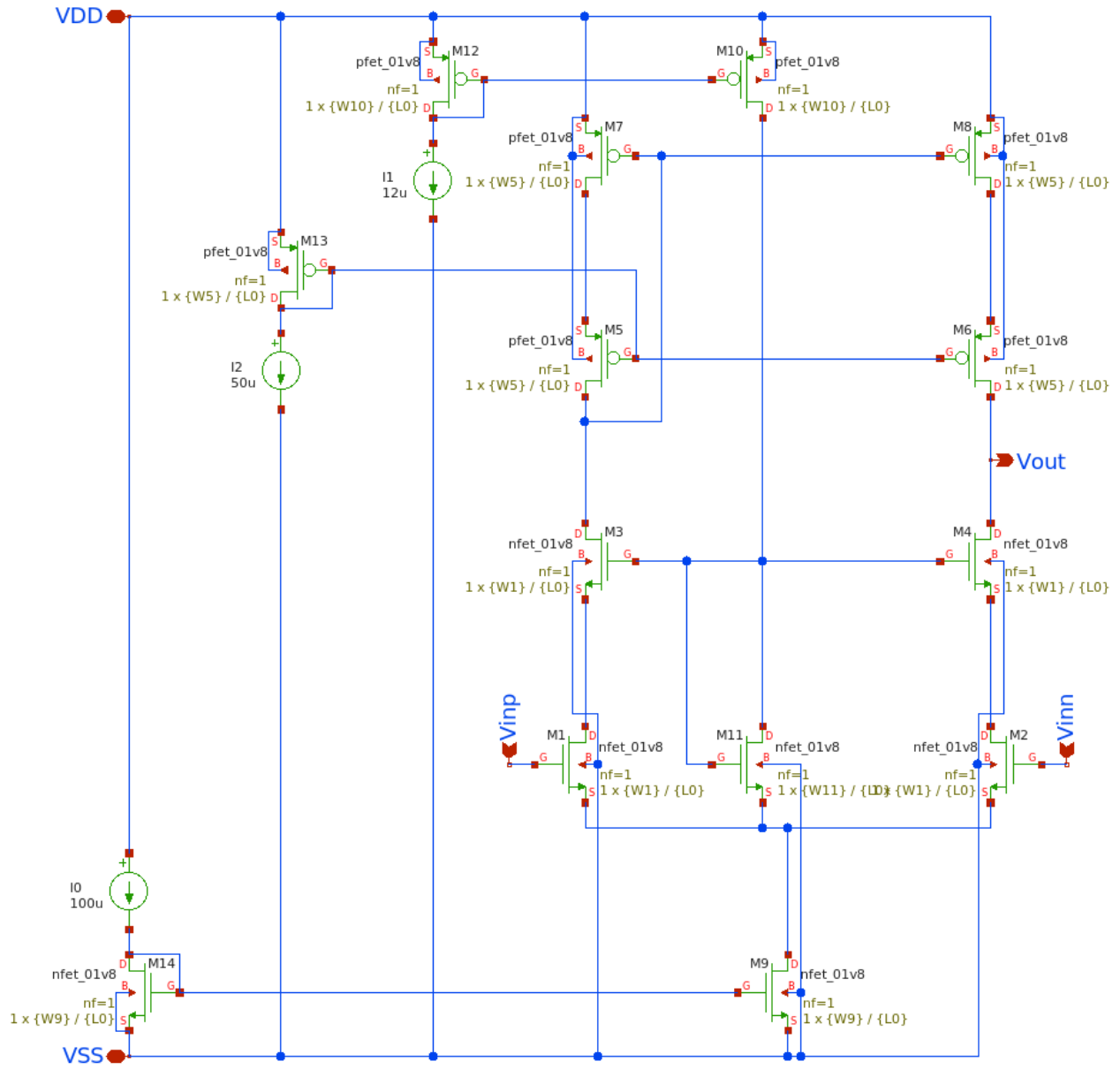


Figura 2: Diagrama esquemático del amplificador operacional *cascode* de una etapa.

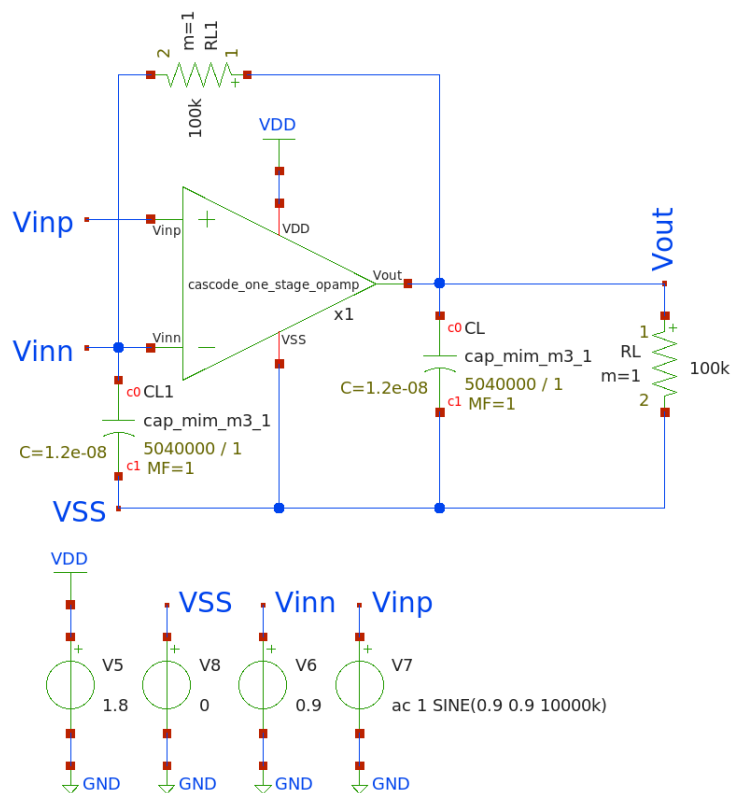


Figura 3: Circuito utilizado para obtener la ganancia del amplificador operacional *cascode* de una etapa.

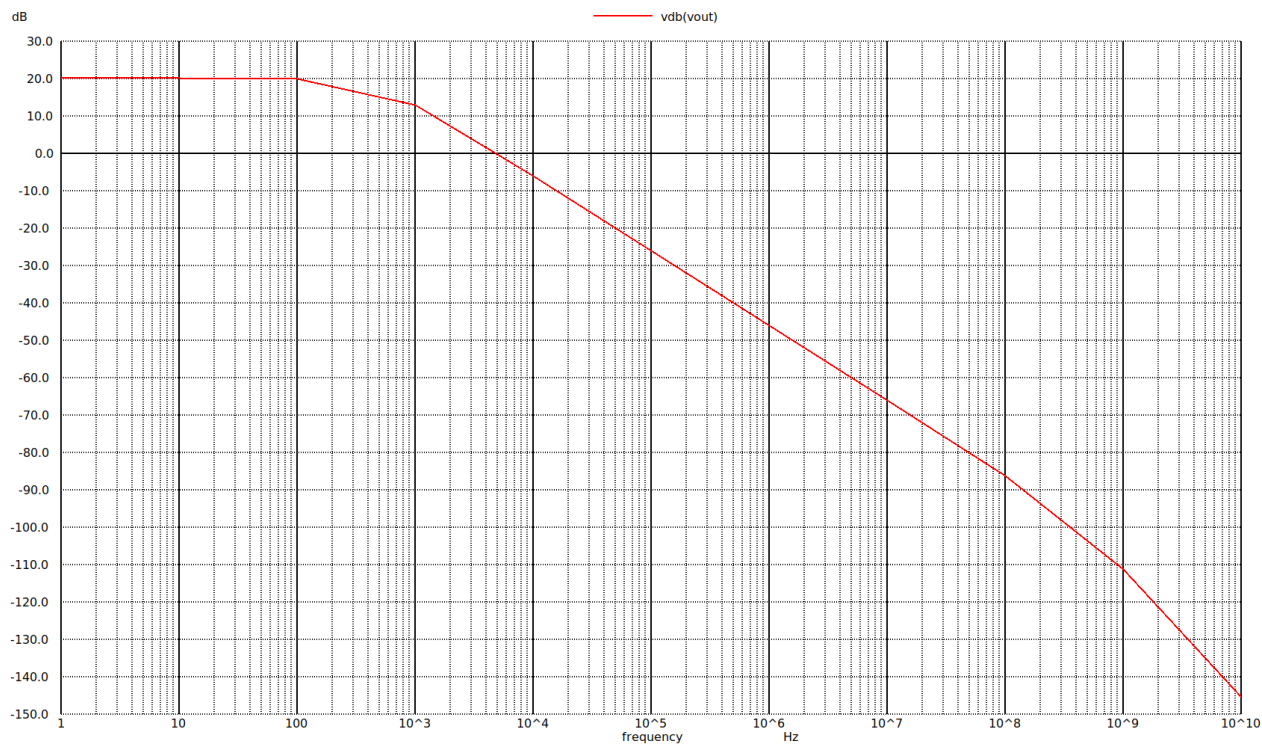


Figura 4: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 3.

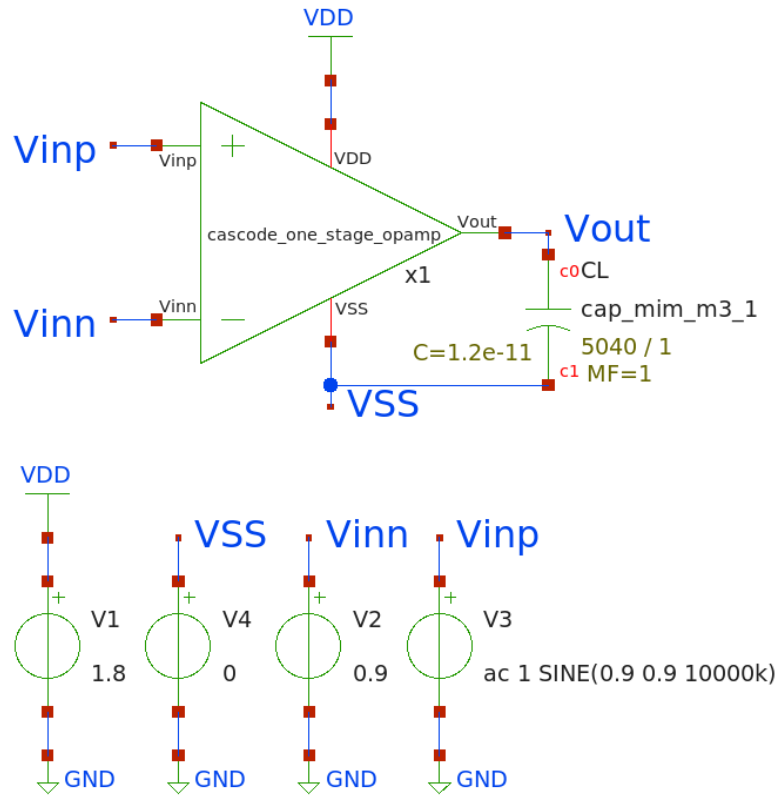


Figura 5: Circuito utilizado para obtener la ganancia en ancho de banda (*Gain Bandwidth*) del amplificador operacional *cascode* de una etapa.

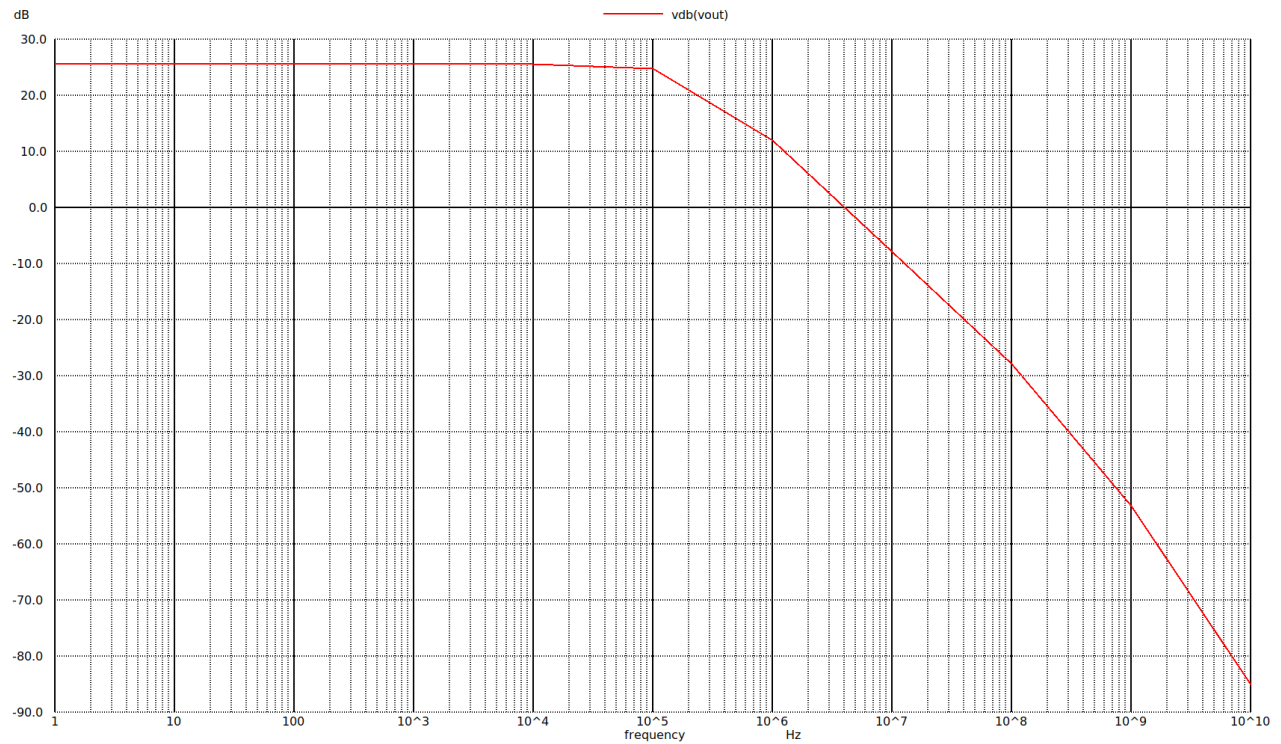


Figura 6: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 5.

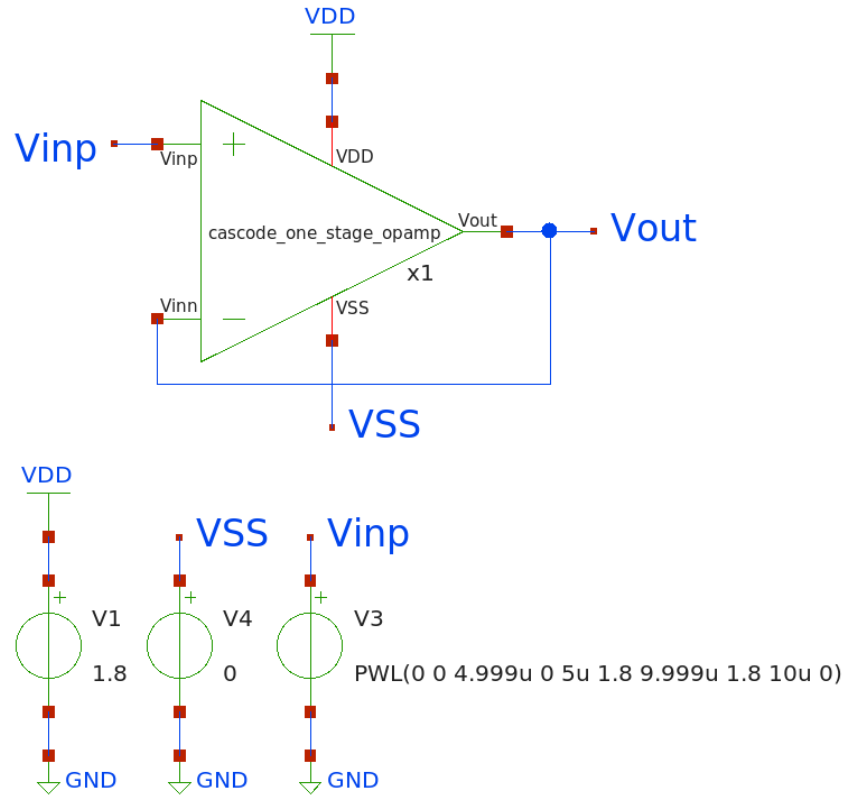


Figura 7: Circuito utilizado para evaluar obtener el *Slew Rate* del amplificador operacional *cascode* de una etapa (seguidor de voltaje).

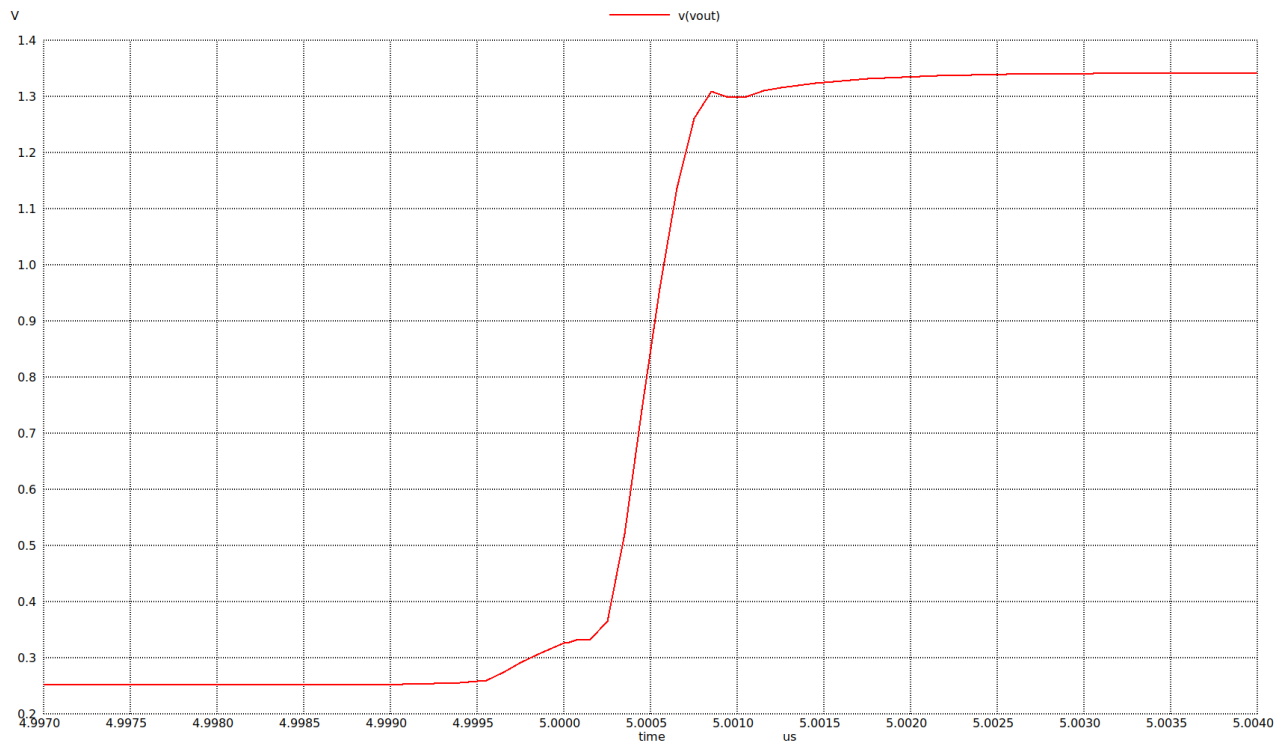


Figura 8: Gráfica del voltaje de salida obtenido de la Figura 7.

4. Cálculo de parámetros $\frac{W}{L}$ del amplificador tipo *folded cascode*

Actividad 2

Emplear la siguiente metodología, propuesta por [1] para diseñar el amplificador *folded cascode* de una etapa (Ver Figura 9).

Step	Design Equations	Comments
1	$I_3 \geq SR \cdot C_L$	Defines minimum current
2	$I_4 = I_5 = 1.1I_3$ to $1.5I_3$	Avoids zero current in cascodes
3	$W_4/L_4 = W_5/L_5 = 2I_4/[K'_p V_{SD4}(sat)^2]$	$V_{SD4}(sat)=0.5[V_{DD}-V_{out}(max)]$
4	$W_6/L_6 = W_7/L_7 = 2I_6/[K'_p V_{SD6}(sat)^2]$	$V_{SD6}(sat)=0.5[V_{DD}-V_{out}(max)]$
5	$\frac{W_8}{L_8} = \frac{W_9}{L_9} = \frac{W_{10}}{L_{10}} = \frac{W_{11}}{L_{11}} = \frac{2I_6}{K'_N V_{DS8}(sat)^2}$	$V_{DS8}(sat)=0.5[V_{out}(min)-V_{SS}]$
6	$g_{m1}=GB \times C_L \rightarrow W_1/L_1 = W_2/L_2 = GB^2 C_L^2 / (K'_N I_3)$	GB is in rads/sec
7	$\frac{W_3}{L_3} = \frac{2I_3}{K'_N (ICMR^- - V_{GS1})^2}, V_{GS1} = \sqrt{i_9/K'_N (\frac{W_1}{L_1})} + V_{T1}$	Note that $ICMR^-$ must be greater than V_{GS1}
8	$\frac{W_4}{L_4} = \frac{W_5}{L_5} = \frac{2I_4}{K'_p (V_{DD} - ICMR^+ + V_{T1})^2}$	Max. input CM. W_4/L_4 and W_5/L_5 must exceed the values in step 3
9	Check gain and power dissipation and iterate if necessary $A_o = g_{m1}R_{out}$ and $P_{diss} = (V_{DD}-V_{SS})(I_4 + I_5)$	

Figura 9: Procedimiento de diseño del amplificador *folded cascode*.

Parametros conocidos

$$V_{DD} = 1.8V$$

$$V_{SS} = 0V$$

$$L_{min} = 450.0nm$$

$$0.8V \leq ICMR \leq 1.8V$$

$$K'_N = 151.37604 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$K'_P = 57.013889 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$V_{TN} = 0.769432V$$

$$V_{TP} = 0.624345V$$

$$\lambda_N = 0.088964V^{-1}$$

$$\lambda_P = 0.068964V^{-1}$$

$$C_L = 15.0pF$$

Características deseadas

$$A_V = 3000 \frac{V}{V}$$

$$P_{diss} \leq 1.0mW$$

$$GB = 10.0MHz$$

$$SR \geq 5 \frac{V}{\mu s}$$

$$0.3V \leq V_{OUT} \leq 1.4V$$

Paso 1

$$I_3 = SR \times C_L = 10 \times 1.5e - 11$$

$$I_3 = 150.0\mu A$$

$$I_1 = \frac{I_3}{2} = \frac{0.00015}{2}$$

$$I_1 = I_2 = 75.0\mu A$$

Paso 2

$$I_4 = 1.1 \times I_3 = 1.1 \times 150.0$$

$$I_4 = I_5 = 165.0\mu A$$

Paso 3

$$V_{SD4}(sat) = 0.5 \times [V_{DD} - V_{OUT}(max)] = 0.5 \times [1.8 - 1.4]$$

$$V_{SD4} = V_{SD5} = 0.2V$$

$$\frac{W_4}{L_4} = \frac{2 \times I_4}{K'_P \times V_{SD4}(sat)^2} = \frac{2 \times 0.000165}{5.7e-05 \times (0.2)^2}$$

$$\frac{W_4}{L_4} = 144.701583$$

$$W_4 = \frac{W_4}{L_4} \times L_{min} = 144.701583 \times 4.5e - 07$$

$$W_4 = W_5 = 65.115712\mu m$$

Paso 4

Se asume que $I_7 = I_6 = I_4 = 165.0\mu A$

Por lo tanto $\frac{W_7}{L_7} = \frac{W_6}{L_6} = \frac{W_4}{L_4} = 144.701583$

$$W_7 = W_6 = W_5 = W_4 = 65.115712\mu m$$

Paso 5

Se asume que $I_8 = I_4 = 165.0\mu A$

$$V_{DS8}(sat) = 0.5 \times [V_{OUT}(min) - V_{SS}] = 0.5 \times [0.3 - 0]$$

$$V_{DS8}(sat) = 0.15V$$

$$\frac{W_8}{L_8} = \frac{2 \times I_8}{K'_N \times V_{DS8}(sat)^2} = \frac{2 \times 0.000165}{0.000151 \times (0.15)^2}$$

$$\frac{W_8}{L_8} = 96.888957$$

$$W_8 = \frac{W_8}{L_8} \times L_{min} = 96.888957 \times 4.5e - 07$$

$$W_8 = W_9 = W_{10} = W_{11} = 43.600031\mu m$$

Paso 6

$$\frac{W_1}{L_1} = \frac{(GB^2 \times C_L^2)}{K'_N \times I_3} = \frac{(10000000.0^2 \times 1.5e - 11^2)}{0.000151 \times 0.00015}$$

$$\frac{W_1}{L_1} = 0.99091$$

$$W_1 = \frac{W_1}{L_1} \times L_{min} = 0.99091 \times 4.5e - 07$$

$$W_1 = W_2 = 0.445909\mu m$$

Paso 7

$$V_{DS3}(sat) = \sqrt{\frac{I_3}{K'_N \times \frac{W_1}{L_1}}} - V_{TN} = \sqrt{\frac{0.00015}{0.000151 \times 0.99091}} - 0.769432$$

$$V_{DS3}(sat) = 0.230568V$$

$$\frac{W_3}{L_3} = \frac{2 \times I_3}{K'_N \times V_{DS3}(sat)^2} = \frac{2 \times 0.00015}{0.000151 \times (0.230568)^2}$$

$$\frac{W_3}{L_3} = 37.279154$$

$$W_3 = \frac{W_3}{L_3} \times L_{min} = 37.279154 \times 4.5e - 07$$

$$W_3 = 16.775619\mu m$$

Paso 8

$$\frac{W_4}{L_4 \text{ spec}} = \frac{2 \times I_4}{K'_P \times (V_{DD} - ICMR^+ + V_{TN})^2} = \frac{2 \times 0.000165}{5.7e - 05 \times (1.8 - 1.8 + 0.769432)^2}$$

$$\frac{W_4}{L_4 \text{ spec}} = 9.776711$$

Se observa que $\frac{W_4}{L_4} \geq \frac{W_4}{L_4 \text{ spec}}$ por lo que la relación $\frac{W_4}{L_4}$ esta bien calculada.

Paso 9

$$I_T = I_4 + I_5 = 0.000165 + 0.000165$$

$$I_T = 330.0\mu A$$

$$P_{diss} = (V_{DD} - V_{SS}) \times I_T = (1.8 - 0) \times 0.00033$$

$$P_{diss} = 0.594mW$$

$$g_{m1} = \sqrt{2 \times I_1 \times K'_N \times \frac{W_1}{L_1}} = \sqrt{2 \times 7.5e-05 \times 0.000151 \times 0.99091}$$

$$g_{m1} = 150.0\mu S$$

$$g_{m4} = \sqrt{2 \times I_4 \times K'_P \times \frac{W_4}{L_4}} = \sqrt{2 \times 0.000165 \times 5.7e-05 \times 144.701583}$$

$$g_{m4} = 1650.0\mu S$$

$$g_{m6} = \sqrt{2 \times \left(\frac{I_T - I_3}{2}\right) \times K'_P \times \frac{W_4}{L_4}} = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.00033 - 0.00015}{2}\right) \times 5.7e-05 \times 144.701583}$$

$$g_{m6} = 1218.605761\mu S$$

$$g_{m8} = \sqrt{2 \times \left(\frac{I_T - I_3}{2}\right) \times K'_N \times \frac{W_8}{L_8}} = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.00033 - 0.00015}{2}\right) \times 0.000151 \times 96.888957}$$

$$g_{m8} = 1624.807681\mu S$$

$$r_{ds1} = \frac{1}{\lambda_N \times I_1} = \frac{1}{0.088964 \times 7.5e-05}$$

$$r_{ds1} = 149.873807K\Omega$$

$$r_{ds4} = \frac{1}{\lambda_P \times I_4} = \frac{1}{0.068964 \times 0.000165}$$

$$r_{ds4} = 87.881062K\Omega$$

$$r_{ds6} = \frac{1}{\lambda_P \times \left(\frac{I_T - I_3}{2}\right)} = \frac{1}{0.068964 \times \left(\frac{0.00033 - 0.00015}{2}\right)}$$

$$r_{ds6} = 161.11528K\Omega$$

$$r_{ds8} = \frac{1}{\lambda_N \times \left(\frac{I_T - I_3}{2}\right)} = \frac{1}{0.088964 \times \left(\frac{0.00033 - 0.00015}{2}\right)}$$

$$r_{ds8} = 124.894839K\Omega$$

$$R_{OUT} = (g_{m8} \times r_{ds8}^2) || [g_{m6} \times r_{ds6} \times (r_{ds1} || r_{ds4})]$$

$$R_{OUT} = (0.002 \times 124894.839^2) || [0.001 \times 161115.28 \times (149873.807 || 87881.062)]$$

$$R_{OUT} = 13.616628M\Omega$$

$$A_0 = g_{m1} \times R_{OUT} = 0.00015 \times 13616627.980708$$

$$A_0 = 2042.494197 = 66.203217db$$

Parámetros calculados

$$W_1 = W_2 = 0.446\mu m$$

$$W_3 = 16.776\mu m$$

$$W_4 = W_5 = W_6 = W_7 = 65.116\mu m$$

$$W_8 = W_9 = W_{10} = W_{11} = 43.6\mu m$$

$$L_1 - L_{11} = 0.45\mu m$$

5. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos del amplificador tipo *folded cascode*

Actividad 2

Utilizando el simulador NGSPICE en la herramienta de Xschem, simular el amplificador operacional *folded cascode* con las razones $\frac{W}{L}$ calculadas previamente.

Resultados obtenidos de la simulación

$$A_V = \frac{A_V(0)}{R \times C} = \frac{8.495026}{100000.0 \times 1.2e-08}$$

$$A_V = 5663.350973$$

$$P_{diss} = V_{DD} \times (I_9 + I_{10}) = 1.8 \times (0.000165 + 0.000165)$$

$$P_{diss} = 0.594mW$$

$$GB = 105.841211KHz$$

$$SlewRate = 5.214511 \frac{V}{\mu s}$$

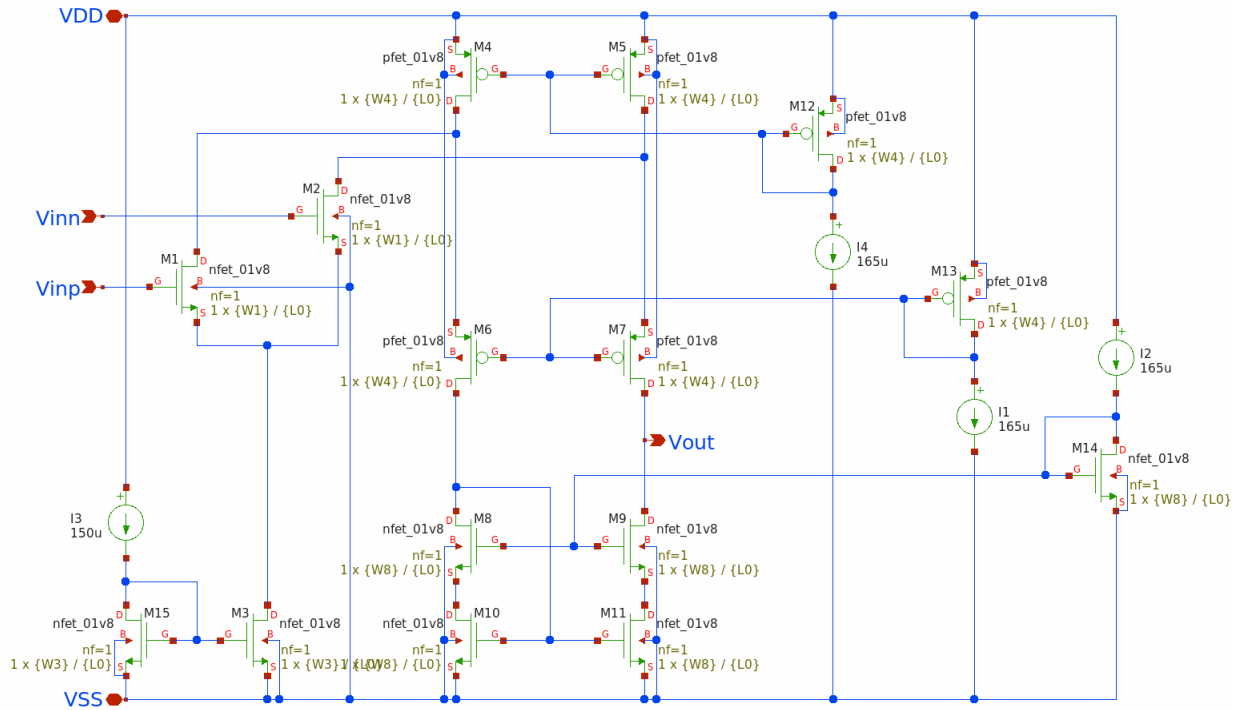


Figura 10: Diagrama esquemático del amplificador operacional *folded cascode* de una etapa.

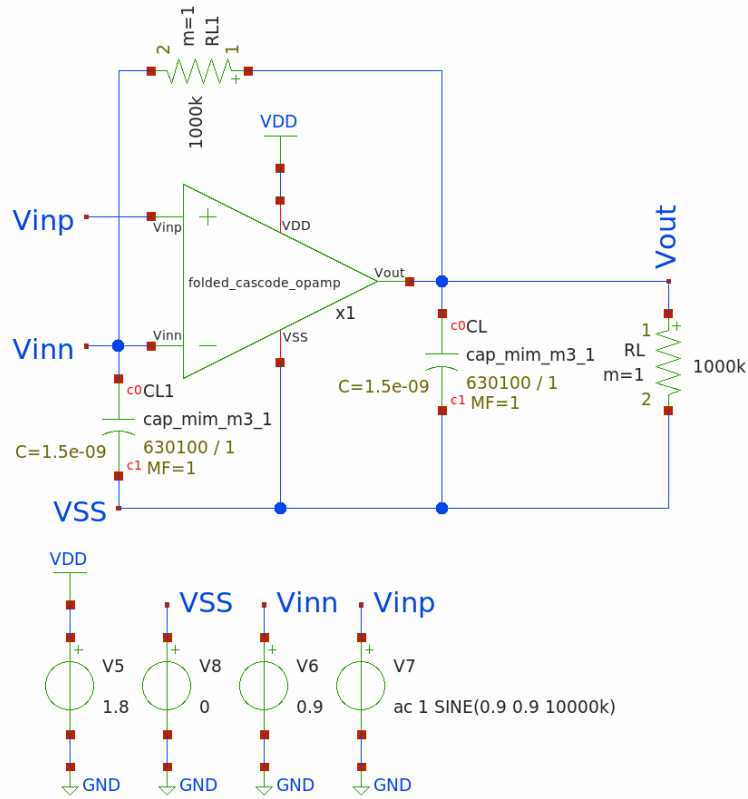


Figura 11: Circuito utilizado para obtener la ganancia del amplificador operacional *folded cascode* de una etapa.

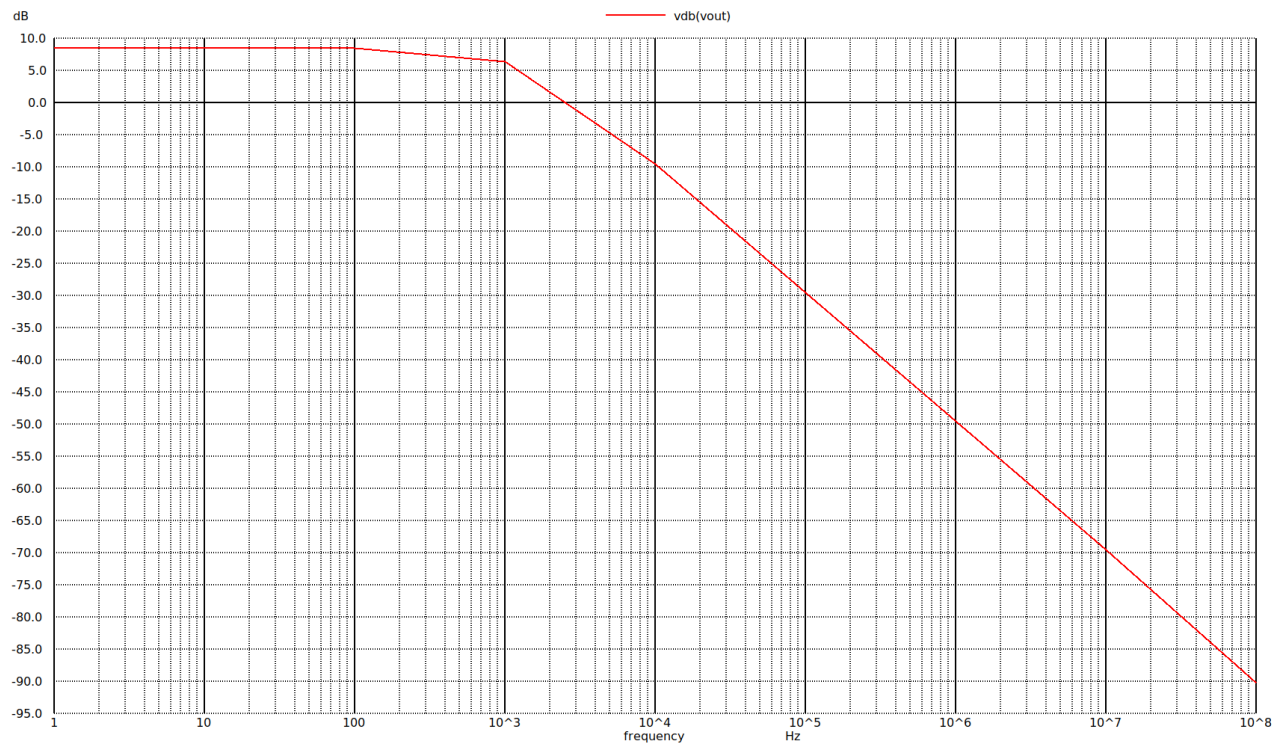


Figura 12: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 11.

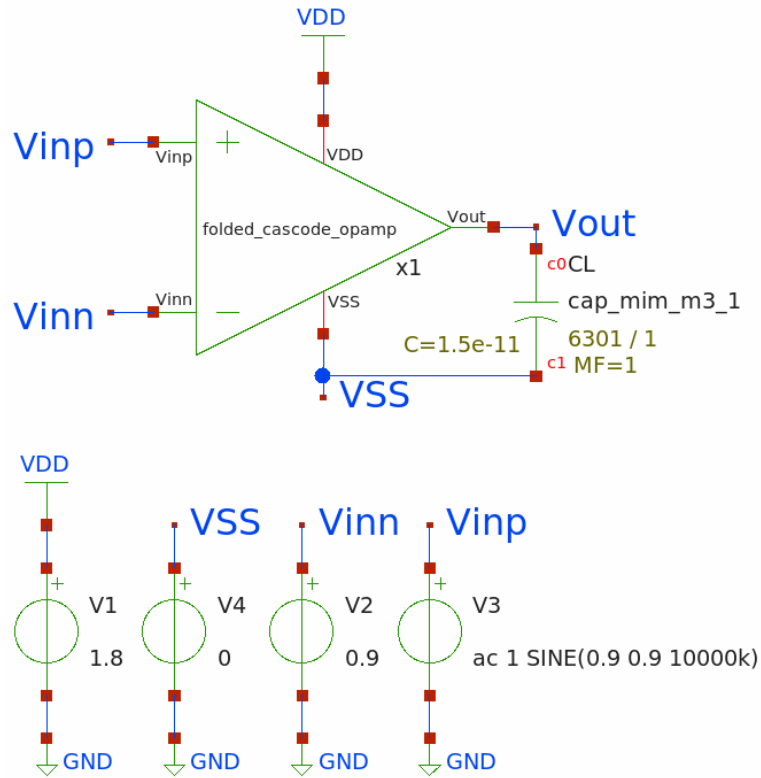


Figura 13: Circuito utilizado para obtener la ganancia en ancho de banda (*Gain Bandwidth*) del amplificador operacional *folded cascode* de una etapa.

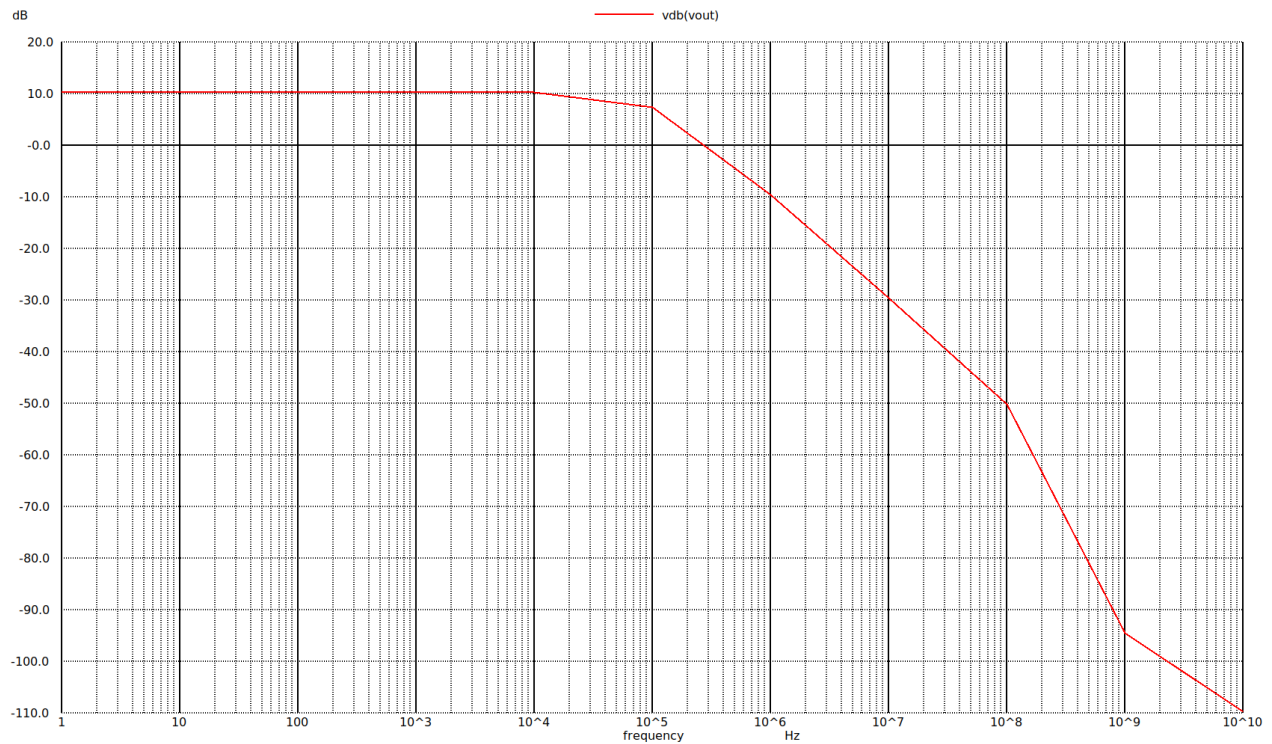


Figura 14: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 13.

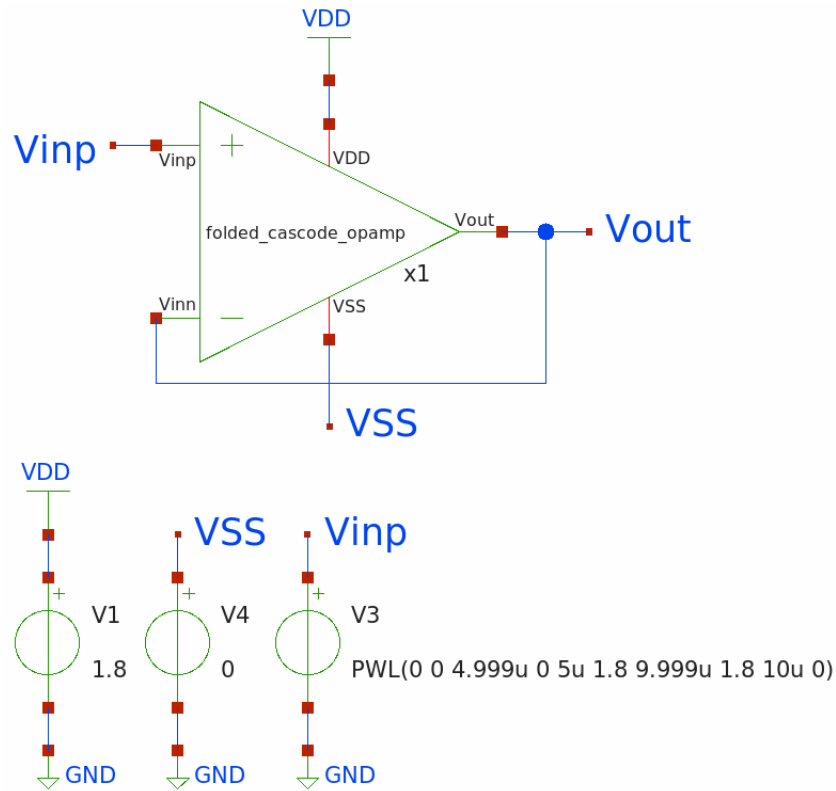


Figura 15: Circuito utilizado para evaluar obtener el *Slew Rate* del amplificador operacional *folded cascode* de una etapa (seguidor de voltaje).

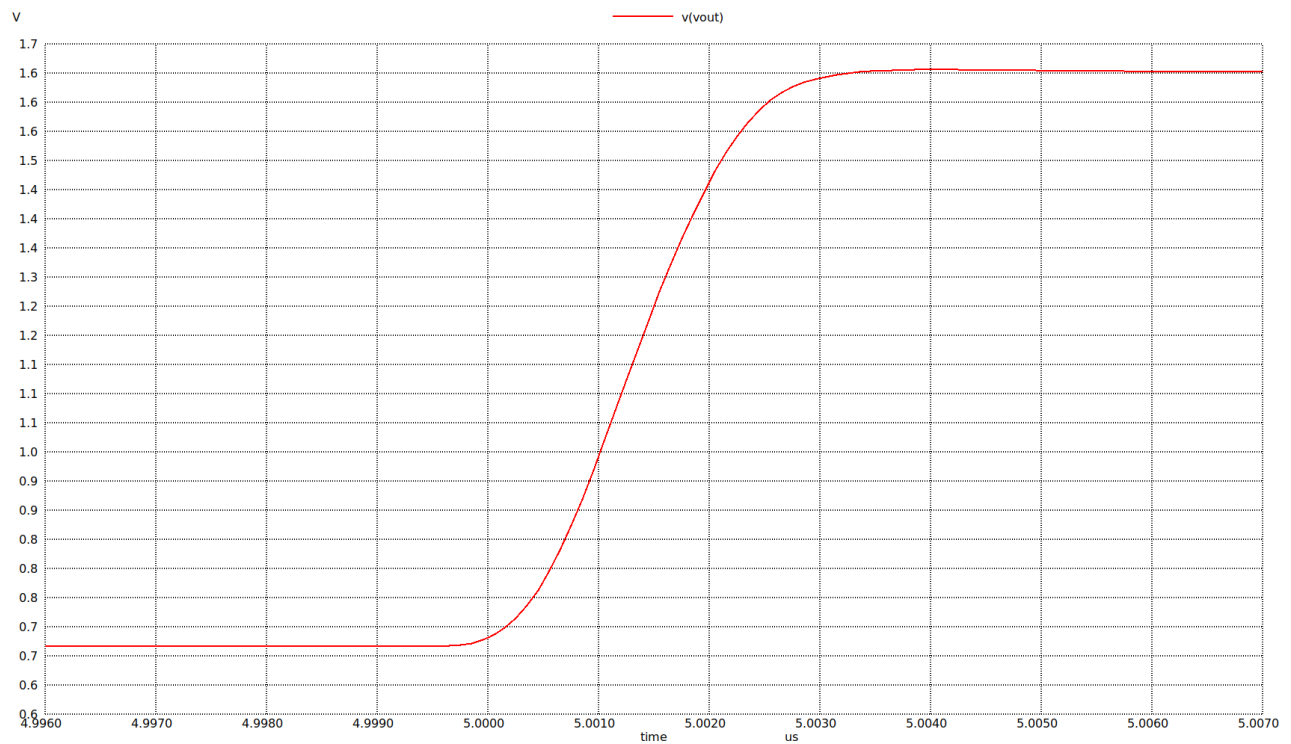


Figura 16: Gráfica del voltaje de salida obtenido de la Figura 15.

Referencias

- [1] P. E. Allen and D. R. Holberg, *CMOS Analog Circuit Design*. Oxford University Press, Incorporated, 2012.

6. Anexos

6.1. Anexo I: Programas utilizados para el cálculo de parámetros de los diseños

```
1 from math import sqrt
2 from math import pi
3 from math import log10
4 import math
5 import numpy as np
6
7 # Datos propuestos:
8 AV = 3000
9 VDD = 1.8
10 VSS = 0
11 GB = 10e6
12 SR = 10
13 Vout_max = 1.5      #Vout(max)
14 Vout_min = 0.3      #Vout(min)
15 ICMR_max = 1.8      #Vin(max)
16 ICMR_min = 0.8      #Vin(min)
17 Pd = 1e-3
18
19 # Parametros
20 L0 = 0.15e-6
21 C1 = 12e-12
22 # Transistor canal N
23 Vthn = 0.769432
24 Kn = 0.00015137603990044484
25 Lambda_n = 0.08896373280684104
26 # Transistor canal P
27 Vthp = 0.624345
28 Kp = 0.000057013889055450486
29 Lambda_p = 0.06896373280684104
30
31 # Paso 1
32 I9=SR*C1/(1e-6)
33
34 # Paso 2
35 gm=2*pi*GB*C1
36 I5=0.5*I9
37 W1_L1=(gm**2)/(Kn*I5)
38 W1=W1_L1*L0
```

```

39 W2=W1
40
41 # Paso 3
42 W3=W1
43 W4=W1
44
45 # Paso 4
46 I10=12e-6          # I9/10
47 W10_L10=50
48 W10=W10_L10*L0
49
50 # Paso 5
51 I1=0.5*I9
52 I2=I1
53 W11_L11=(I10/(4*I1))*W1_L1
54 W11=W11_L11*L0
55
56 # Paso 6
57 Vds3_sat=sqrt((2*I1)/(Kn*W1_L1))
58 W7_L7=(2*I1)/(Kp*(VDD-ICMR_max-Vthp-Vds3_sat+Vthn))
59 W7=W7_L7*L0
60 W8=W7
61
62 # Paso 7
63 W5=W7
64 W6=W7
65
66 # Paso 8
67 Vgs1=sqrt(I9/(Kn*W1_L1))+Vthn
68 W9_L9=(2*I9)/(Kn*(ICMR_min-Vgs1)**2)
69 W9=W9_L9*L0
70
71 # Paso 9
72 rds2=1/(Lambda_n*I2)
73 rds6=1/(Lambda_p*I2)
74 gm4=sqrt(2*Kn*W1_L1*I2)
75 gm6=sqrt(2*Kp*W7_L7*I2)
76 Rout=1/((1/(rds2*gm4*rds2))+(1/(rds6*gm6*rds6)))
77 A0=gm*Rout
78 A0_db=20*log10(A0)
79
80 # Paso 10
81 Vds8_sat=sqrt((2*I2)/(Kn*W7_L7))
82 Vds9_sat=sqrt((2*I9)/(Kn*W9_L9))
83 V0_max=VDD-(2*Vds8_sat)

```

```

84 V0_min=(2*Vds3_sat)+Vds9_sat
85
86 # Calculo de Av
87 Datos_Av = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
      simulations/cascode_one_stage_opamp_av.ssv')
88 Y_Av = Datos_Av[0:1, 1]
89 Av_final = Y_Av[0]/(100e3*1.2e-8)
90
91 # Calculo de GB
92 Datos_GB = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
      simulations/cascode_one_stage_opamp_gb.ssv')
93 X_GB = Datos_GB[5:7, 0]
94 Y_GB = Datos_GB[5:7, 1]
95 m_GB = (Y_GB[1]-Y_GB[0])/(X_GB[1]-X_GB[0])
96 b_GB = Y_GB[1]-(m_GB*X_GB[1])
97 GB_final = (Y_GB[0]-3-b_GB)/m_GB
98
99 # Calculo de Pdis
100 Pdis=VDD*(I9+I10)
101
102 # Calculo de SR
103 Datos_SR = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
      simulations/cascode_one_stage_opamp_sr.ssv')
104 X = Datos_SR[50010:50018, 0]
105 Y = Datos_SR[50010:50018, 1]
106 x_bias1 = np.c_[np.ones(X.shape[0]), X]
107 # Calculo de la pendiente para el SR -> theta = (X^T * X)^-1 * X^T * y
108 theta = np.linalg.inv(x_bias1.T @ x_bias1) @ x_bias1.T @ Y

```

Programa 1: Programa utilizado para el cálculo de parámetros del diseño de un amplificador *cascode* de una etapa.

```

1 from math import sqrt
2 from math import pi
3 from math import log10
4 import math
5 import numpy as np
6
7 #Datos propuestos:
8 AV = 3000
9 VDD = 1.8
10 VSS = 0
11 GB = 10e6
12 SR = 10
13 Vout_max = 1.4      #Vout(max)
14 Vout_min = 0.3      #Vout(min)

```



```

15 ICMR_max = 1.8          #Vin(max)
16 ICMR_min = 0.8          #Vin(min)
17 Pd = 1e-3
18
19 # Parametros
20 L0 = 0.45e-6
21 C1 = 15e-12
22 # Transistor canal N
23 Vthn = 0.769432
24 Kn = 0.00015137603990044484
25 Lambda_n = 0.08896373280684104
26 # Transistor canal P
27 Vthp = 0.624345
28 Kp = 0.000057013889055450486
29 Lambda_p = 0.06896373280684104
30
31 # Paso 1
32 I3=SR*C1/(1e-6)
33 I1=I3/2
34
35 # Paso 2
36 I4=1.1*I3
37 I5=I4
38
39 # Paso 3
40 Vsd4_sat=0.5*(VDD-Vout_max)
41 W4_L4=(2*I4)/(Kp*(Vsd4_sat**2))
42 W4=W4_L4*L0
43 W5=W4
44
45 # Paso 4
46 I6=I4
47 I7=I4
48 W6=W4
49 W7=W4
50
51 # Paso 5
52 I8=I4
53 Vds8_sat=0.5*(Vout_min-VSS)
54 W8_L8=(2*I8)/(Kn*(Vds8_sat**2))
55 W8=W8_L8*L0
56 W9=W8
57 W10=W8
58 W11=W8
59

```

```

60 # Paso 6
61 W1_L1=((GB**2)*(C1**2))/(Kn*I3)
62 W1=W1_L1*L0
63 W2=W1
64
65 # Paso 7
66 Vds3_sat=(sqrt(I3/(Kn*W1_L1)))-Vthn
67 W3_L3=(2*I3)/(Kn*(Vds3_sat**2))
68 W3=W3_L3*L0
69
70 # Paso 8
71 W4_L4_CM=(2*I4)/(Kp*(VDD-ICMR_max+Vthn)**2)
72 if(W4_L4>W4_L4_CM):
73     print("Relacion W4/L4 bien calculada")
74 else:
75     print("Corregir relacion W4/L4")
76
77 # Paso 9
78 It=I4+I5
79 Pdis=(VDD-VSS)*(It)
80 gm4=sqrt(2*I4*Kp*W4_L4)
81 gm6=sqrt(2*((It-I3)/2)*Kp*W4_L4)
82 gm8=sqrt(2*((It-I3)/2)*Kn*W8_L8)
83 gm1=sqrt(2*I1*Kn*W1_L1)
84 rds4=1/(Lambda_p*I4)
85 rds6=1/(Lambda_p*((It-I3)/2))
86 rds8=1/(Lambda_n*((It-I3)/2))
87 rds1=1/(Lambda_n*I1)
88 Rout=1/((1/(gm8*rds8*rds8))+(1/(gm6*rds6*(1/(1/rds1)+(1/rds4))))))
89 A0=gm1*Rout
90 A0_db=20*log10(A0)
91
92 # Calculo de Av
93 Datos_Av = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/folded_one_stage_opamp_av.ssv')
94 Y_Av = Datos_Av[0:1, 1]
95 Av_final = Y_Av[0]/(1e6*1.5e-9)
96
97 # Calculo de GB
98 Datos_GB = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/folded_one_stage_opamp_gb.ssv')
99 X_GB = Datos_GB[5:7, 0]
100 Y_GB = Datos_GB[5:7, 1]
101 m_GB = (Y_GB[1]-Y_GB[0])/(X_GB[1]-X_GB[0])
102 b_GB = Y_GB[1]-(m_GB*X_GB[1])

```

```

103 GB_final = (Y_GB[0]-0.11-b_GB)/m_GB
104
105 # Calculo de Pdis
106 Pdis=VDD*(It)
107
108 # Calculo de SR
109 Datos_SR = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/folded_one_stage_opamp_sr.ssv')
110 X = Datos_SR[50023:50027, 0]
111 Y = Datos_SR[50023:50027, 1]
112 x_bias1 = np.c_[np.ones(X.shape[0]), X]
113 # Calculo de la pendiente para el SR -> theta = (X^T * X)^-1 * X^T * y
114 theta = np.linalg.inv(x_bias1.T @ x_bias1) @ x_bias1.T @ Y

```

Programa 2: Programa utilizado para el cálculo de parámetros del diseño de un amplificador *folded cascode* de una etapa.