



Microtecnología y  
Sistemas Embebidos

# Instituto Politécnico Nacional

## Centro de Investigación en Computación

VLSI avanzado

Tarea 1 - Diseño de amplificador  
operacional simple de una etapa

PROFESOR:

DR. HERÓN MOLINA LOZANO

POR:

ING. RICARDO ALDAIR TIRADO TORRES

CIUDAD DE MÉXICO, 22 DE MAYO DE 2024

# Tabla de contenido

<b>1. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2. Cálculo de parámetros <math>\frac{W}{L}</math></b>	<b>3</b>
<b>3. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos</b>	<b>6</b>
<b>4. Anexos</b>	<b>11</b>
4.1. Anexo I: Programa utilizado para el cálculo de parámetros del diseño . . . .	11

# 1. Objetivos

- Diseñar un amplificador operacional simple 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 el circuito con la herramienta de Xschem y NGSPICE para comprobar que el diseño cumple con las especificaciones requeridas.

## 2. Cálculo de parámetros $\frac{W}{L}$

### Actividad 1

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

Step	Design Equations	Comments
1	$I_5 = SR \times C_L$	$SR$ 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, $M1 = M2$
Alternatively, one can use the low frequency gain to design $W_1/L_1$ and $W_2/L_2$		
2'	$A_o = g_m R_{out} \rightarrow \frac{W_1}{L_1} = \frac{W_2}{L_2} = \frac{A_o^2 (\lambda_2 + \lambda_4)^2 I_5}{4K'_1}$	$A_o$ specified, $M1 = M2$
3	$\frac{W_3}{L_3} = \frac{W_4}{L_4} = \frac{I_5}{K'_3 [V_{DD} - ICMR^+ -  V_{T3}  + V_{T1}]^2}$	$ICMR^+ = V_{in}(\max)$ specified, $M3 = M4$
4	$\frac{W_5}{L_5} = \frac{2I_5}{K'_N (ICMR^- - V_{GS1})^2}, V_{GS1} = \sqrt{\frac{I_5}{K'_N (\frac{W_1}{L_1})}} + V_{T1}$	Note that $ICMR^-$ must be greater than $V_{GS1}$

Figura 1: Procedimiento de diseño.

### Parámetros conocidos

$$V_{DD} = 1.8V$$

$$L_{min} = 150.0nm$$

$$0.7V \leq ICMR \leq 1.6V$$

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

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

$$V_{TN} = 0.769432V$$

$$V_{TP} = 0.624345V$$

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

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

$$C_L = 12.0pF$$

### Características deseadas

$$A_V = 100 \frac{V}{V}$$

$$P_{diss} \leq 1mW$$

$$GB = 10.0MHz$$

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

### Paso 1

$$I_5 = SR \times C_L = 5 \times 1.2e - 11$$

$$I_5 = 60.0\mu A$$

### Paso 2

$$g_m = 2\pi \times GB \times C_L = 2\pi \times 10000000.0 \times 1.2e - 11$$

$$g_m = 753.982237\mu S$$

$$\frac{W_1}{L_1} = \frac{gm^2}{K'_N \times I_5} = \frac{0.000754^2}{0.000151 \times 6e-05}$$

$$\frac{W_1}{L_1} = 62.591281$$

$$W_1 = \frac{W_1}{L_1} \times L_{min} = 62.591281 \times 1.5e - 07$$

$$W_1 = W_2 = 9.388692\mu m$$

### Paso 3

$$\frac{W_3}{L_3} = \frac{I_5}{K'_P \times [(V_{DD} - ICMR^+ - |V_{TP}| + V_{TN})^2]} = \frac{6e-05}{5.7e-05 \times [1.8 - 1.6 - 0.624345 + 0.769432]^2}$$

$$\frac{W_3}{L_3} = 8.837174$$

$$W_3 = \frac{W_3}{L_3} \times L_{min} = 8.837174 \times 1.5e - 07$$

$$W_3 = W_4 = 1.325576\mu m$$

**Paso 4**

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{I_5}{K'_N \times \frac{W_1}{L_1}}} + V_{TN} = \sqrt{\frac{6e-05}{0.000151 \times 62.591281}} + 0.769432$$

$$V_{GS1} = 0.849009V$$

$$\frac{W_5}{L_5} = \frac{2 \times I_5}{K'_N \times (ICMR - V_{GS1})^2} = \frac{2 \times 6e-05}{0.000151 \times (0.7 - 0.849009)^2}$$

$$\frac{W_5}{L_5} = 35.702313$$

$$W_5 = \frac{W_5}{L_5} \times L_{min} = 35.702313 \times 1.5e-07$$

$$W_5 = W_6 = 5.355347\mu m$$

**Paso 5**

$$A_0 = \frac{2g_m}{(\lambda_N + \lambda_P) \times I_5} = \frac{2 \times 0.000754}{(0.088964 + 0.068964) \times 6e-05}$$

$$A_0 = 159.141041 = 44.035644db$$

**Parámetros calculados**

$$W_1 = W_2 = 9.388692\mu m$$

$$W_3 = W_4 = 1.325576\mu m$$

$$W_5 = W_6 = 5.355347\mu m$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = 0.15\mu m$$

### 3. Resultados en Xschem, con los parámetros obtenidos

#### Actividad 2

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

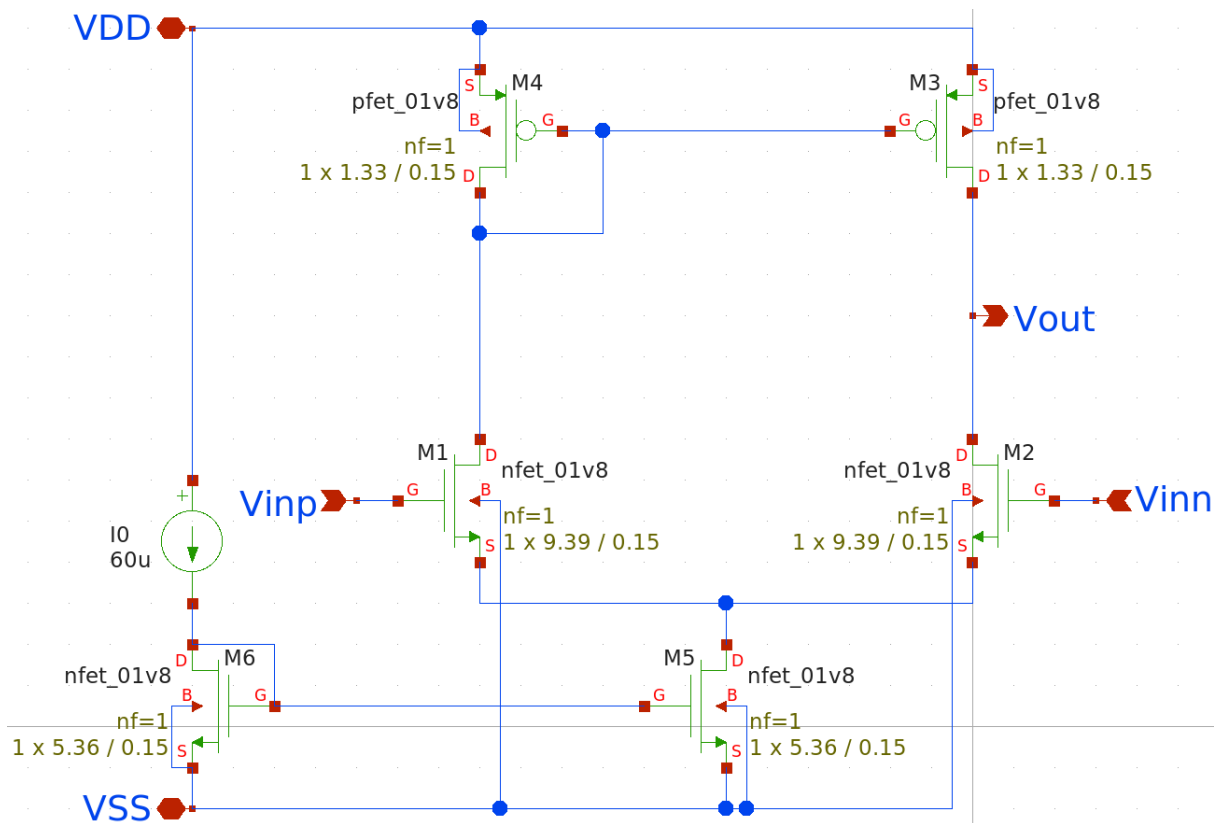


Figura 2: Diagrama esquemático del amplificador operacional sencillo de una etapa.

#### Resultados obtenidos de la simulación

$$A_V = \frac{A_V(0)}{R \times C} = \frac{15.742238}{100000.0 \times 1.2e-08}$$

$$A_V = 131.18532$$

$$P_{diss} = V_{DD} \times I_5 = 1.8 \times 6e-05$$

$$P_{diss} = 0.108mW$$

$$GB = 417.643781KHz$$

$$SlewRate = 11.823621 \frac{V}{\mu s}$$

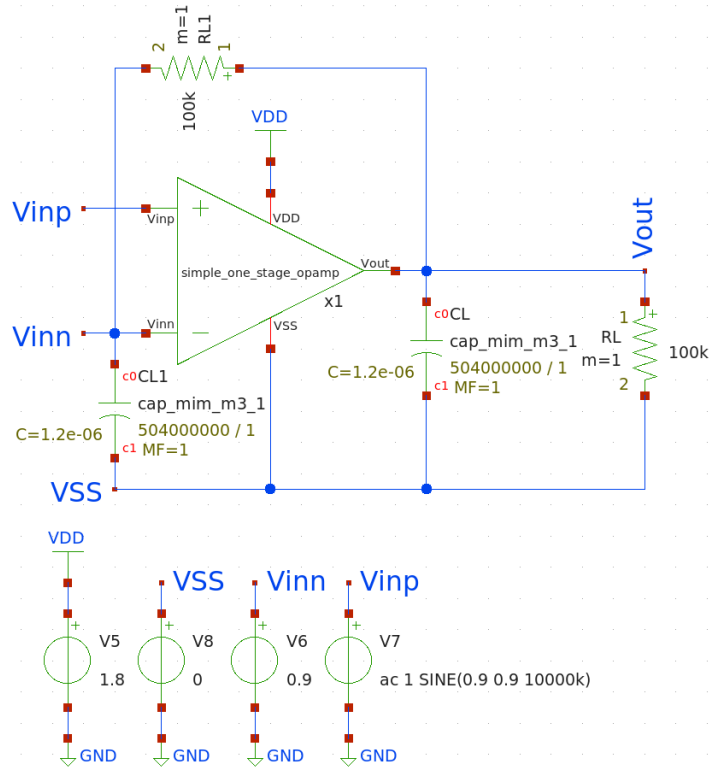


Figura 3: Circuito utilizado para obtener la ganancia del amplificador operacional sencillo de una etapa (Seguidor de voltaje).

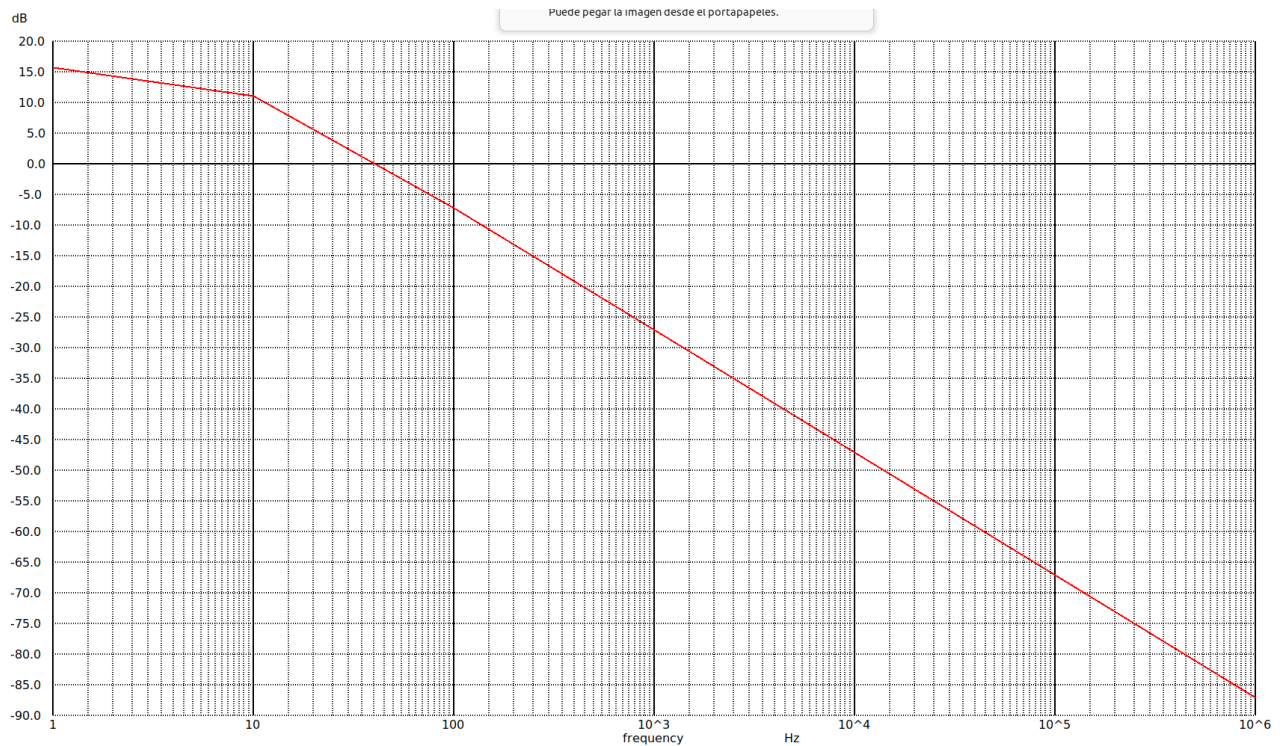


Figura 4: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 3.



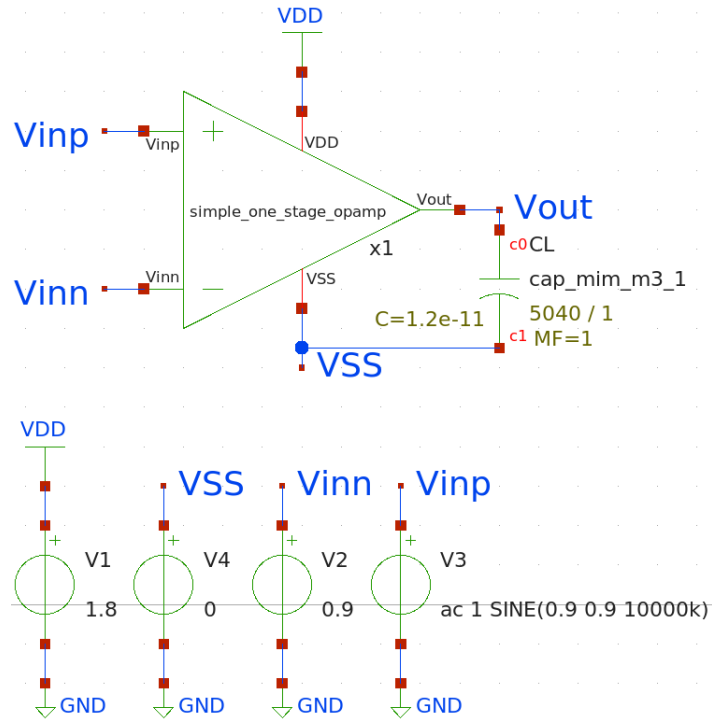


Figura 5: Circuito utilizado para obtener la ganancia en ancho de banda (*Gain Bandwidth*) del amplificador operacional sencillo de una etapa).

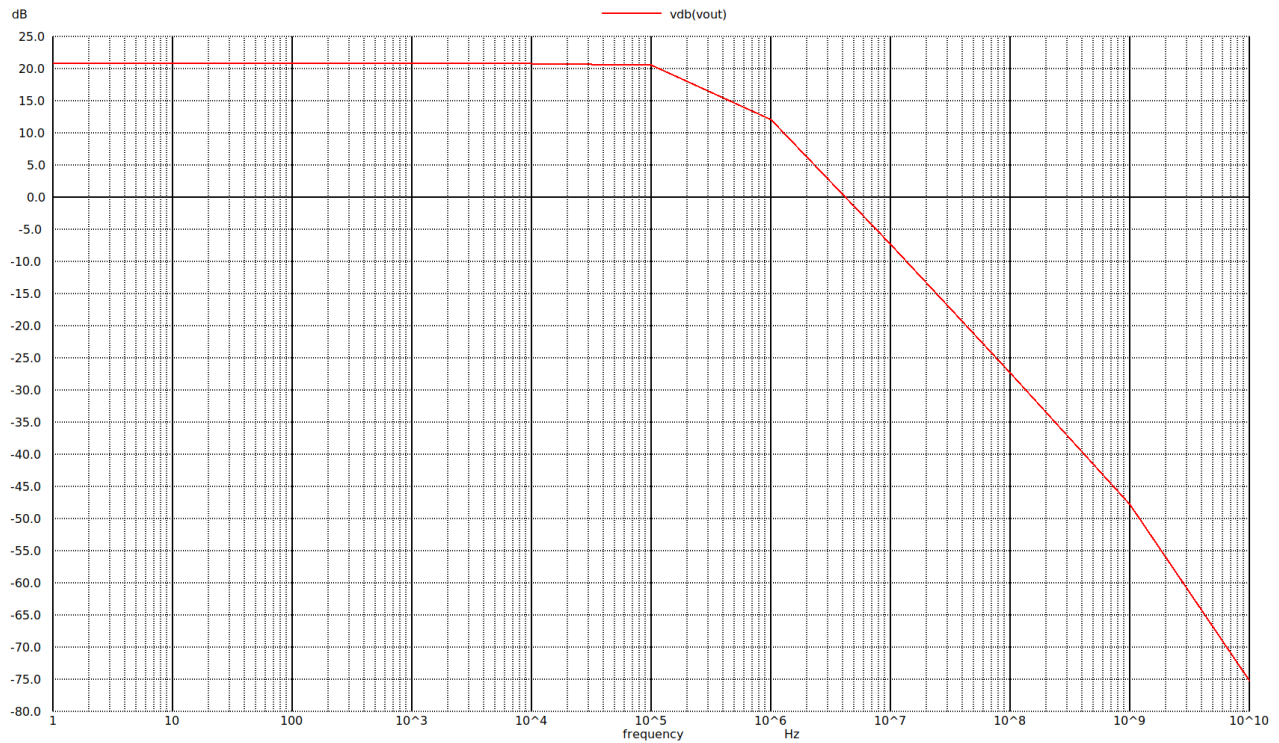


Figura 6: Diagrama de Bode obtenido de la Figura 5.

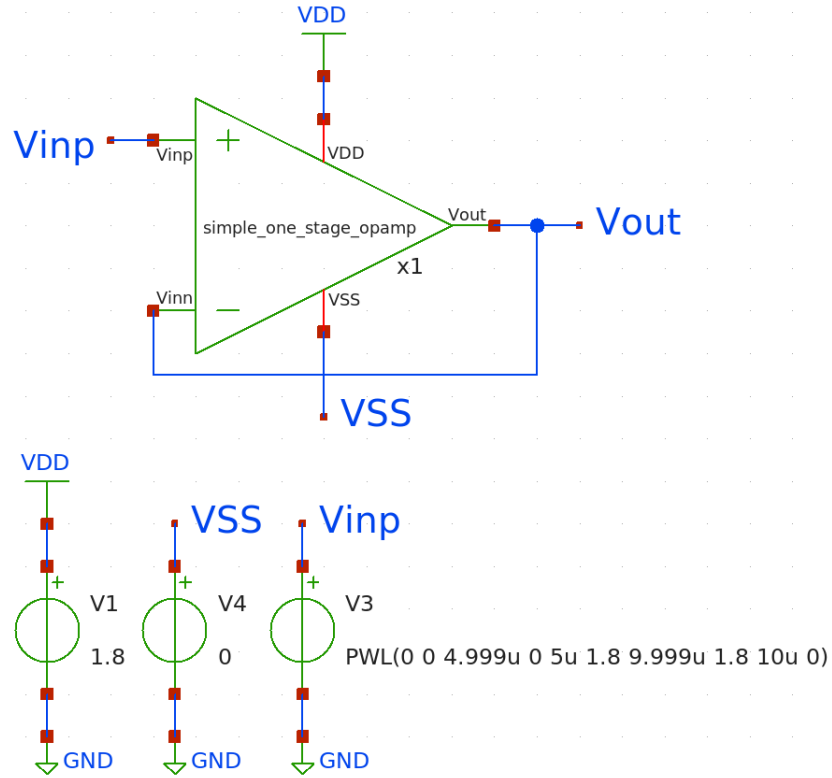


Figura 7: Circuito utilizado para evaluar obtener el *Slew Rate* del amplificador operacional sencillo de una etapa (Seguidor de voltaje).

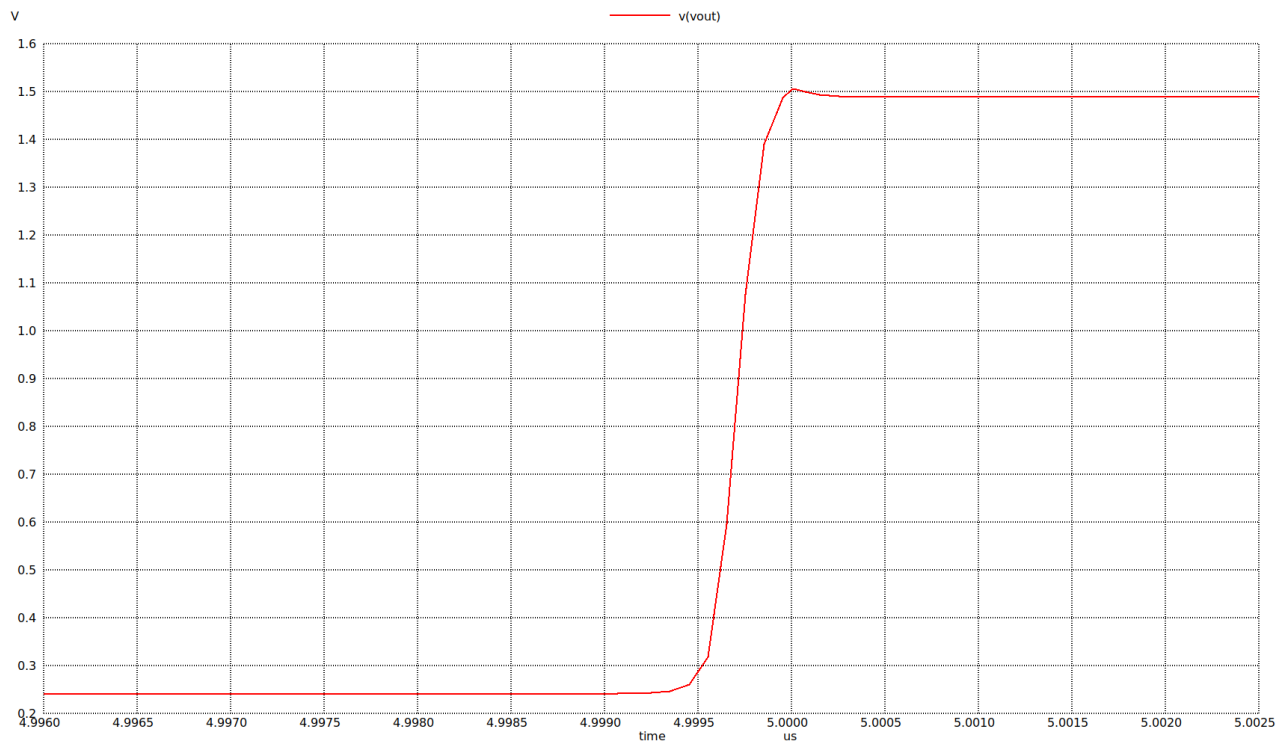


Figura 8: Grafica del voltaje de salida obtenido de la Figura 7.

## Referencias

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

## 4. Anexos

### 4.1. Anexo I: Programa utilizado para el cálculo de parámetros del diseño

```
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 L0 = 0.15e-6
9 C1 = 12e-12
10 AV = 100
11 VDD = 1.8
12 GB = 2*pi*(10e6)
13 SR = 5
14 ICMR_max = 1.6 #Vin(max)
15 ICMR_min = 0.7 #Vin(min)
16
17 # Transistor canal N
18 Vthn = 0.769432
19 Kn = 0.00015137603990044484
20 Lambda_n = 0.08896373280684104
21
22 # Transistor canal P
23 Vthp = 0.624345
24 Kp = 0.000057013889055450486
25 Lambda_p = 0.06896373280684104
26
27 # Paso 1
28 I5=SR*C1/(1e-6)
29
30 # Paso 2
31 gm=GB*C1
32 W1_L1=(gm**2)/(Kn*I5) #W1_L1=W1/L
33 W1=W1_L1*L0
34 W2=W1
35
36 # Paso 3
37 W3_L3=I5/(Kp*(VDD-ICMR_max-(abs(Vthp))+Vthn)**2)
38 W3=W3_L3*L0
```

```

39 W4=W3
40
41 # Paso 4
42 Vgs1=sqrt(I5/(Kn*W1_L1))+Vthn
43 W5_L5=(2*I5)/(Kn*(ICMR_min-Vgs1)**2)
44 W5=W5_L5*L0
45
46 # Paso 5
47 A0=(2*gm)/((Lambda_n+Lambda_p)*I5)
48 A0_db=20*log10(A0)
49
50 # Calculo de Av
51 Datos_Av = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/simple_one_stage_opamp_av.ssv')
52 X_Av = Datos_Av[0:1, 0]
53 Av_final = X_Av[0]/(100e3*1.2e-8)
54
55 # Calculo de GB
56 Datos_GB = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/simple_one_stage_opamp_gb.ssv')
57 X_GB = Datos_GB[7:9, 0]
58 Y_GB = Datos_GB[7:9, 1]
59 m_GB = (Y_GB[1]-Y_GB[0])/(X_GB[1]-X_GB[0])
60 b_GB = Y_GB[1]-(m_GB*X_GB[1])
61 GB_final = (Y_GB[0]-3-b_GB)/m_GB
62
63 # Calculo de Pdis
64 Pdis=VDD*I5
65
66 # Calculo de SR
67 Datos_SR = np.loadtxt('/home/ricardo/RATT_repos/Proyectos_xschem/
    simulations/simple_one_stage_opamp_sr.ssv')
68 X = Datos_SR[49997:50113, 0]
69 Y = Datos_SR[49997:50113, 1]
70 x_bias1 = np.c_[np.ones(X.shape[0]), X]
71 # Calculo de la pendiente para el SR -> theta = (X^T * X)^-1 * X^T * y
72 theta = np.linalg.inv(x_bias1.T @ x_bias1) @ x_bias1.T @ Y
73
74 print("W_{1} = W_{2} = ",W1*1e6,' \\mu m \\\\'')
75 print("W_{3} = W_{4} = ",W3*1e6,' \\mu m \\\\'')
76 print("W_{5} = W_{6} = ",W5*1e6,' \\mu m \\\\'')
77 print("L_{1} = L_{2} = L_{3} = L_{4} = L_{5} = L_{6} = ",L0*1e6,' \\mu m
    \\\\'')

```

Programa 1: Programa utilizado para el cálculo de parámetros del diseño.