

Problema 5 (3 puntos). Utilice SPICE para simular el amplificador operacional de la Figura 3 por el que todos los transistores tienen una longitud de canal $L = 5 \mu m$ excepto los transistores del buffer de salida (M9, M91, M10, M101) que tienen longitud de canal $L = 2 \mu m$. Los anchos de canal de los transistores se muestran en negrita en la figura. Se pide utilizar el simulador para estudiar el comportamiento en frecuencia (ganancia de lazo abierto y respuesta de fase). ¿Cuál es el margen de fase?

Asimismo, determine la tensión de offset en entrada, la dinámica de salida, el CMRR, la disipación de potencia, el PSRR, y las limitaciones impuestas por el slew rate.

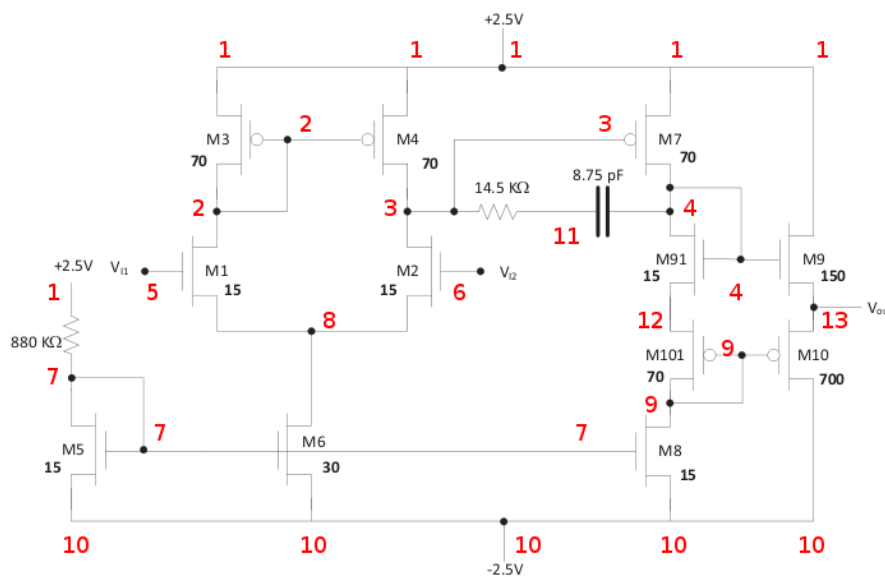


Figura 3

P5.CIR

VDD	1	0	DC	2.5			
VSS	10	0	DC	-2.5			
VIC	5	0	DC				
VID	14	5	AC				
VOFFSET	6	14	DC				
M1	2	5	8	10	CMOSNB	L=5u	W=15u
M2	3	6	8	10	CMOSNB	L=5u	W=15u
M3	2	2	1	1	CMOSPB	L=5u	W=70u
M4	3	2	1	1	CMOSPB	L=5u	W=70u
M5	7	7	10	10	CMOSNB	L=5u	W=15u
M6	8	7	10	10	CMOSNB	L=5u	W=30u
M7	4	3	1	1	CMOSPB	L=5u	W=70u
M8	9	7	10	10	CMOSNB	L=5u	W=15u
M9	1	4	13	10	CMOSNB	L=2u	W=150u
M10	10	9	13	1	CMOSPB	L=2u	W=700u
M91	4	4	12	10	CMOSNB	L=2u	W=15u
M101	9	9	12	1	CMOSPB	L=2u	W=70u
R1	1	7	880K				
R2	3	11	14.5K				
C1	11	4	8.75p				

CÁLCULO DE LA GANANCIA DE LAZO ABIERTO:

P5-ABIERTO.CIR

R2 0 11 14.5K
C1 11 4 8.75p

.AC DEC 5 1 10K
.PRINT AC VM(13) VP(13)
.PLOT AC VM(13) VP(13)

Index	frequency	vm(13)	vp(13)
0	1.000000e+00	5.461242e+03	-1.64507e-04
1	1.584893e+00	5.461242e+03	-2.60727e-04
2	2.511886e+00	5.461241e+03	-4.13224e-04
3	3.981072e+00	5.461241e+03	-6.54916e-04
4	6.309573e+00	5.461239e+03	-1.03797e-03
5	1.000000e+01	5.461235e+03	-1.64507e-03
6	1.584893e+01	5.461224e+03	-2.60726e-03
7	2.511886e+01	5.461196e+03	-4.13222e-03
8	3.981072e+01	5.461128e+03	-6.54907e-03
9	6.309573e+01	5.460956e+03	-1.03794e-02
10	1.000000e+02	5.460524e+03	-1.64493e-02
11	1.584893e+02	5.459440e+03	-2.60670e-02
12	2.511886e+02	5.456720e+03	-4.12999e-02
13	3.981072e+02	5.449906e+03	-6.54023e-02
14	6.309573e+02	5.432901e+03	-1.03443e-01
15	1.000000e+03	5.390878e+03	-1.63110e-01
16	1.584893e+03	5.289476e+03	-2.55291e-01
17	2.511886e+03	5.058025e+03	-3.92737e-01
18	3.981072e+03	4.588655e+03	-5.82708e-01
19	6.309573e+03	3.817663e+03	-8.11953e-01
20	1.000000e+04	2.866481e+03	-1.04234e+00
21	1.584893e+04	1.979088e+03	-1.23817e+00
22	2.511886e+04	1.299135e+03	-1.39106e+00
23	3.981072e+04	8.306041e+02	-1.51357e+00
24	6.309573e+04	5.223540e+02	-1.62491e+00
25	1.000000e+05	3.223386e+02	-1.74407e+00
26	1.584893e+05	1.922803e+02	-1.88503e+00
27	2.511886e+05	1.079812e+02	-2.04587e+00
28	3.981072e+05	5.590929e+01	-2.19537e+00
29	6.309573e+05	2.714421e+01	-2.28562e+00
30	1.000000e+06	1.309134e+01	-2.29724e+00

La ganancia a frecuencias medias en lazo abierto es, a partir de la tabla:

$$A_{dif} = 5461 \approx 75 \text{ dB}$$

El margen de fase es de 90°

CÁLCULO DE LA TENSION DE OFFSET EN ENTRADA:

P5-OFFSET.CIR

```
.DC          VOFFSET  -0.13M    -0.12M    0.5U
.PRINT      DC          V(13)
```

Index	v-sweep	v(13)
0	-1.30000e-04	-4.75690e-03
1	-1.29500e-04	-2.33162e-03
2	-1.29000e-04	1.077515e-04
3	-1.28500e-04	2.547613e-03
4	-1.28000e-04	4.988422e-03
5	-1.27500e-04	7.430180e-03
6	-1.27000e-04	9.872886e-03
7	-1.26500e-04	1.231654e-02
8	-1.26000e-04	1.476115e-02
9	-1.25500e-04	1.720671e-02
10	-1.25000e-04	1.965322e-02
11	-1.24500e-04	2.210069e-02
12	-1.24000e-04	2.454912e-02
13	-1.23500e-04	2.699850e-02
14	-1.23000e-04	2.944884e-02
15	-1.22500e-04	3.190014e-02
16	-1.22000e-04	3.435240e-02
17	-1.21500e-04	3.680562e-02
18	-1.21000e-04	3.925980e-02
19	-1.20500e-04	4.171495e-02
20	-1.20000e-04	4.417107e-02

Tal y como puede observarse en la tabla, el valor de la tensión de offset de entrada es el siguiente:

$$V_{offset} = -0.129 \text{ mV}$$

CÁLCULO DE LA DINÁMICA DE SALIDA:

P5-DINASAL.CIR

```
.DC          VOFFSET  -0.4M 0.1M 10U
.PRINT      DC          V(13)
```

Index	v-sweep	v(13)
0	-4.00000e-04	-8.50230e-01
1	-3.90000e-04	-8.47668e-01
2	-3.80000e-04	-8.44918e-01
3	-3.70000e-04	-8.42069e-01
4	-3.60000e-04	-8.39016e-01
5	-3.50000e-04	-8.35702e-01
6	-3.40000e-04	-8.32034e-01
7	-3.30000e-04	-8.27847e-01
8	-3.20000e-04	-8.22787e-01
9	-3.10000e-04	-8.15753e-01
10	-3.00000e-04	-7.91946e-01
11	-2.90000e-04	-7.41791e-01
12	-2.80000e-04	-6.97960e-01
13	-2.70000e-04	-6.53892e-01
14	-2.60000e-04	-6.09545e-01
15	-2.50000e-04	-5.64912e-01
16	-2.40000e-04	-5.19988e-01
17	-2.30000e-04	-4.74766e-01
18	-2.20000e-04	-4.29241e-01
19	-2.10000e-04	-3.83407e-01
20	-2.00000e-04	-3.37256e-01

41	1.000000e-05	7.196611e-01
42	2.000000e-05	7.751091e-01
43	3.000000e-05	8.311382e-01
44	4.000000e-05	8.877693e-01
45	5.000000e-05	9.450241e-01
46	6.000000e-05	9.892238e-01
47	7.000000e-05	9.925734e-01
48	8.000000e-05	9.923425e-01
49	9.000000e-05	9.953400e-01
50	1.000000e-04	9.977427e-01

Tal y como podemos observar en la tabla, el margen dinámico de salida es el siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_{salida} = [-0.82 \text{ V}, 0.99 \text{ V}] \\ \Delta V_{entrada} = [-0.31 \text{ mV}, 0.06 \text{ mV}] \end{array} \right\}$$

CÁLCULO DE LA GANANCIA EN MODO DIFERENCIAL A FRECUENCIAS MEDIAS:

P5-GANADIF.CIR

```
.AC      DEC 5 1 10K
.PRINT  AC  VM(13) VP(13)
```

Index	frequency	vm(13)	vp(13)
0	1.000000e+00	5.460995e+03	-9.51230e-03
1	1.584893e+00	5.460621e+03	-1.50753e-02
2	2.511886e+00	5.459684e+03	-2.38900e-02
3	3.981072e+00	5.457330e+03	-3.78522e-02
4	6.309573e+00	5.451433e+03	-5.99485e-02
5	1.000000e+01	5.436703e+03	-9.48405e-02
6	1.584893e+01	5.400223e+03	-1.49638e-01
7	2.511886e+01	5.311734e+03	-2.34549e-01
8	3.981072e+01	5.107328e+03	-3.62017e-01
9	6.309573e+01	4.682657e+03	-5.40582e-01
10	1.000000e+02	3.957063e+03	-7.60461e-01
11	1.584893e+02	3.018866e+03	-9.85223e-01
12	2.511886e+02	2.108516e+03	-1.17461e+00
13	3.981072e+02	1.394407e+03	-1.31292e+00
14	6.309573e+02	8.975977e+02	-1.40618e+00
15	1.000000e+03	5.710070e+02	-1.46683e+00
16	1.584893e+03	3.614723e+02	-1.50579e+00
17	2.511886e+03	2.283750e+02	-1.53092e+00
18	3.981072e+03	1.441709e+02	-1.54749e+00
19	6.309573e+03	9.098505e+01	-1.55904e+00
20	1.000000e+04	5.741288e+01	-1.56805e+00

La ganancia a frecuencias medias en modo diferencial es, a partir de la tabla:

$$A_{dif} = 5461 = 74.75 \text{ dB}$$

CÁLCULO DE LA GANANCIA EN MODO COMÚN A FRECUENCIAS MEDIAS:

P5-GANACOM.CIR

```

VIC      5      0      AC
VID      14     5      DC
VOFFSET  6      14     DC

.AC      DEC 5      1      10K
.PRINT   AC  VM(13)  VP(13)
    
```

Index	frequency	vm(13)	vp(13)
0	1.000000e+00	6.723726e-01	-9.50653e-03
1	1.584893e+00	6.723266e-01	-1.50661e-02
2	2.511886e+00	6.722112e-01	-2.38755e-02
3	3.981072e+00	6.719215e-01	-3.78292e-02
4	6.309573e+00	6.711954e-01	-5.99121e-02
5	1.000000e+01	6.693818e-01	-9.47829e-02
6	1.584893e+01	6.648903e-01	-1.49546e-01
7	2.511886e+01	6.539953e-01	-2.34404e-01
8	3.981072e+01	6.288283e-01	-3.61787e-01
9	6.309573e+01	5.765417e-01	-5.40218e-01
10	1.000000e+02	4.872047e-01	-7.59884e-01
11	1.584893e+02	3.716915e-01	-9.84309e-01
12	2.511886e+02	2.596071e-01	-1.17316e+00
13	3.981072e+02	1.716845e-01	-1.31062e+00
14	6.309573e+02	1.105168e-01	-1.40254e+00
15	1.000000e+03	7.030738e-02	-1.46106e+00
16	1.584893e+03	4.451092e-02	-1.49665e+00
17	2.511886e+03	2.812682e-02	-1.51644e+00
18	3.981072e+03	1.776446e-02	-1.52454e+00
19	6.309573e+03	1.122411e-02	-1.52271e+00
20	1.000000e+04	7.103329e-03	-1.51062e+00

La ganancia a frecuencias medias en modo común es, a partir de la tabla:

$$A_{com} = 0.6724 = -3.45 \text{ dB}$$

A partir de los dos resultados anteriores, se obtiene que la **Razón de Rechazo al Modo Común (CMRR)** tiene un valor:

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{dif}}{A_{com}} = 74.75 \text{ dB} - (-3.45 \text{ dB}) \approx 78 \text{ dB}$$

CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE POTENCIA:

P5.CIR

.OP

.PRINT OP V(1,10) I(VSS)

```
-----  
Index v(1)-v(10)          vss#branch  
-----  
0      5.000000e+00      1.454254e-04  
-----
```

La disipación de potencia es, según los resultados del análisis del punto de trabajo:

$$P = (V_{DD} - V_{SS}) \cdot I_{SS} = 5 \text{ V} \cdot 0.145 \text{ mA} = 0.725 \text{ mW}$$

CÁLCULO DE LA PSRR+:

P5-PSRR-POS.CIR

```
VDD      15    0    DC    2.5
VPSRRP   1    15   AC
.AC      DEC   5    1    10K
.PRINT   AC   VM(13) VP(13)
```

Index	frequency	vm(13)	vp(13)
0	1.000000e+00	2.768816e-01	2.156380e-02
1	1.584893e+00	2.770646e-01	3.415306e-02
2	2.511886e+00	2.775236e-01	5.403666e-02
3	3.981072e+00	2.786719e-01	8.527780e-02
4	6.309573e+00	2.815270e-01	1.337331e-01
5	1.000000e+01	2.885216e-01	2.065511e-01
6	1.584893e+01	3.050785e-01	3.081403e-01
7	2.511886e+01	3.415236e-01	4.284112e-01
8	3.981072e+01	4.118074e-01	5.291712e-01
9	6.309573e+01	5.224418e-01	5.587609e-01
10	1.000000e+02	6.548262e-01	4.991662e-01
11	1.584893e+02	7.690956e-01	3.854287e-01
12	2.511886e+02	8.411614e-01	2.689892e-01
13	3.981072e+02	8.773493e-01	1.775212e-01
14	6.309573e+02	8.933370e-01	1.141104e-01
15	1.000000e+03	8.999862e-01	7.250110e-02
16	1.584893e+03	9.026808e-01	4.580226e-02
17	2.511886e+03	9.037612e-01	2.880129e-02
18	3.981072e+03	9.041924e-01	1.796943e-02
19	6.309573e+03	9.043640e-01	1.100429e-02
20	1.000000e+04	9.044315e-01	6.411404e-03

$$PSRR^+ = \frac{A_{OL}}{V_{OUT}/V^+} = \frac{5461}{0.277} \approx 86 \text{ dB}$$

CÁLCULO DE LA PSRR:-

P5-PSRR-NEG.CIR

```
VSS      15   0   DC   -2.5
VPSRRN   10  15   AC

.AC      DEC  5   1   10K
.PRINT   AC   VM(13) VP(13)
```

Index	frequency	vm(13)	vp(13)
0	1.000000e+00	5.084370e-02	8.293214e-03
1	1.584893e+00	5.085240e-02	1.314004e-02
2	2.511886e+00	5.087425e-02	2.081037e-02
3	3.981072e+00	5.092901e-02	3.292194e-02
4	6.309573e+00	5.106588e-02	5.193948e-02
5	1.000000e+01	5.140553e-02	8.138666e-02
6	1.584893e+01	5.223329e-02	1.254380e-01
7	2.511886e+01	5.416653e-02	1.860660e-01
8	3.981072e+01	5.827669e-02	2.546960e-01
9	6.309573e+01	6.556200e-02	3.029987e-01
10	1.000000e+02	7.522477e-02	2.987826e-01
11	1.584893e+02	8.413694e-02	2.452848e-01
12	2.511886e+02	8.995525e-02	1.766389e-01
13	3.981072e+02	9.292353e-02	1.183857e-01
14	6.309573e+02	9.424377e-02	7.687848e-02
15	1.000000e+03	9.479440e-02	4.951297e-02
16	1.584893e+03	9.501786e-02	3.219180e-02
17	2.511886e+03	9.510768e-02	2.165489e-02
18	3.981072e+03	9.514399e-02	1.575060e-02
19	6.309573e+03	9.515958e-02	1.323557e-02
20	1.000000e+04	9.516860e-02	1.357457e-02

$$PSRR = \frac{A_{OL}}{V_{OUT}/V} = \frac{5461}{0.051} \approx 101 \text{ dB}$$

CÁLCULO DEL SLEW-RATE:

P5-SR.CIR

VID 14 5 PULSE (0 1 15u 0u 0u 15u 30u)

.TRAN 0.05U 16U 15U
 .PRINT TRAN V(13)

time	v(13)
1.500e-05	6.648e-01 . +
1.505e-05	6.576e-01 . +
1.510e-05	7.055e-01 . +
1.515e-05	7.574e-01 . . +
1.520e-05	8.102e-01 . . .+
1.525e-05	8.609e-01 . . . +
1.530e-05	9.035e-01 . . . +
1.535e-05	9.369e-01 . . . +
1.540e-05	9.631e-01 . . . +
1.545e-05	9.833e-01 . . . +
1.550e-05	9.994e-01 . . . +
1.555e-05	1.012e+00+
1.560e-05	1.023e+00+
1.565e-05	1.031e+00+
1.570e-05	1.038e+00+
1.575e-05	1.044e+00+
1.580e-05	1.050e+00+
1.585e-05	1.054e+00+
1.590e-05	1.058e+00+
1.595e-05	1.062e+00+
1.600e-05	1.065e+00+

$$SLEW - RATE = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta t} = \frac{0.2576 V}{0.3 \mu s} \approx 0.86 \frac{V}{\mu s}$$