



Lista de componentes para a montagem:

R1 – 1 M $\Omega$	R <sub>s</sub> – 1 k $\Omega$	A2 – ½ 082
R2 – 1 k $\Omega$	C1 – 3,3 $\mu$ F	Placa de montagem Fios diversos para ligações na placa;
R3 – 1 M $\Omega$	C2 – 10 $\mu$ F (1 $\mu$ F,100 $\mu$ F)	
R4 – 4,7 k $\Omega$	C3 – 50 pF	
R5 – 470 k $\Omega$	A1 – 5534A	

Equipamento necessário:

1 Fonte de alimentação (+12, 0, -12); 1 Osciloscópio; 1 Gerador de Sinais; 1 Voltímetro AC de valor eficaz verdadeiro; 1 Caixa metálica para alojar a montagem e realizar a sua blindagem.

### C- Esquema equivalente para ruído:

Desenhe o esquema equivalente para ruído do circuito do amplificador

Justifique que a contribuição do amplificador A2 será desprezável, relativamente à de A1.

### D- Geradores equivalentes do modelo V<sub>n</sub>-I<sub>n</sub>:

Determine os valores dos geradores equivalentes de ruído do amplificador, V<sub>n</sub> e I<sub>n</sub>, mediante as características fornecidas.

### E- Cálculo do ruído total:

Calcule a adição das contribuições das várias fontes de ruído à saída do amplificador A2, V<sub>no</sub>.

### F- Referir à entrada e F:

Calcule o valor referido à entrada, V<sub>ni</sub> e o Factor de ruído, F (faça-o também experimentalmente).

### G- Medições:

Faça medições da razão  $V_{no}/V_{no1}/V_s$  em amplitude e fase, nas frequências compreendidas entre  $F_L/4$  e  $4F_H$  espaçadas aproximadamente de uma oitava ( $F_L/4, F_L/2, F_L, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, F_H, 2F_H, 4F_H$ ) e confronte os valores obtidos entre si e com o valor teórico calculado para V<sub>no</sub> em E.

### H- Observação da forma de onda do ruído 1/f:

Observe qualitativamente os efeitos de aumento e diminuição da componente de ruído 1/f, respectivamente, por diminuição e aumento da frequência inferior de corte do circuito através da troca do condensador C2 por outros de 100  $\mu$ F e de 1  $\mu$ F.

### I- Relatório:

Elabore um relatório sucinto que constitua um registo fiel e justificado dos cálculos e observações efectuadas durante o trabalho.

\*\*\*\*\*

Apontamentos para a realização do trabalho prático:

**A- Esquema para pequenos sinais AC do amplificador A1:**

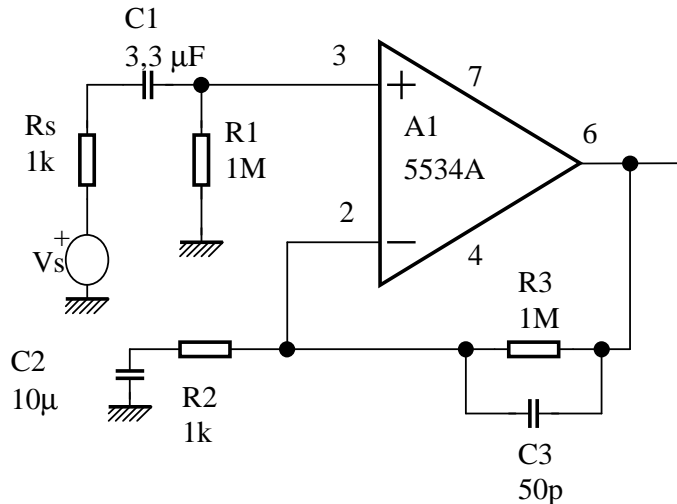


Figura 2

Considerando o amplificador A1 com características ideais (Fig. 2), o condensador C1 (lead) determinará, além do zero na origem, um polo na frequência:

$$F_{p1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3,3e-6 \cdot (1e6 + 1e3)} \approx 0,048 \text{ Hz}$$

o condensador C2 (lead-lag) introduzirá um zero em:

$$F_{z1} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot R3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10e-6 \cdot (1e6)} \approx 0,016 \text{ Hz}, \quad \text{e um polo em:}$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C2 \cdot R2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10e-6 \cdot (1e3)} \approx 16 \text{ Hz} \approx F_L.$$

O condensador C3 (lag), por sua vez, produzirá um polo em:

$$F_{p3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C3 \cdot R3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50e-12 \cdot 1e6} \approx 3200 \text{ Hz} \approx F_H.$$

O ganho teórico na banda passante valerá, para A1:

$$A_{v1} = \frac{R3 + R2}{R2} = \frac{1M + 1k}{1k} \approx 1000$$

e para A2:

$$A_{v2} = \frac{-R5}{R4} = \frac{-470k}{4,7k} \approx -100.$$

Em virtude de os pólos que determinam  $F_L$  e  $F_H$  se encontrarem muito afastados de todos os outros, particularmente, dentro da banda  $F_L/3$  a  $3F_H$  pode considerar-se que a banda de passagem do circuito se estabelece entre  $F_{p2}$  e  $F_{p3}$ , com pendentes de 20 dB/década e  $-20$  dB/década, respectivamente, nas respectivas bandas de transição (1 polo cada)

A banda equivalente de ruído pode assim determinar-se utilizando o coeficiente de valor 1,57 para calcular o valor da b.e.r. a partir do valor da banda a  $-3$  dB:

$$B = [3200 \cdot 1,57 - 16/1,57] \approx [5024 - 10] \approx 5000 \text{ Hz}.$$

### C- Esquema equivalente para ruído do amplificador:

Consideram-se as características fornecidas pelo fabricante para as densidades espectrais de potência  $v_n$  e  $i_n$  do amplificador A1, com os valores de  $1,8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  e  $0,4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ , respectivamente. Não se utilizará o valor de  $3,5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  do fabricante original do 5534A visto que o actual é bastante inferior. O valor de  $f_{ci}$  determina-se pela fórmula teórica sobre o gráfico de  $i_n$  constante da folha de características e o valor de  $f_{cv}$  a utilizar pode ser o mesmo que o extraído do gráfico original, embora o valor de  $v_n$  a utilizar não seja o mesmo, como se referiu atrás.

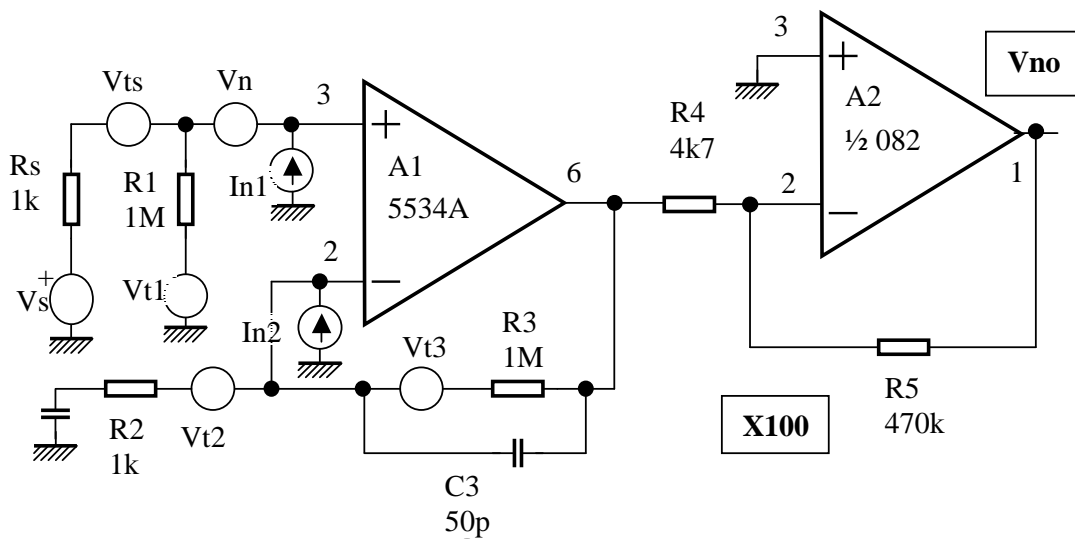


Figura 3

A justificação para não considerar a contribuição de ruído intrínseco de A2 reside no facto de o ganho de A1 ser muito elevado (1000), de modo que a componente de ruído à saída de A1 vale 1000 vezes o valor referido à entrada. Como a adição do ruído à entrada próprio de A2 se faz com a componente de ruído à saída de A1, resulta que aquela terá, em regra, valor relativamente desprezável.

Considere-se a temperatura ambiente com o valor de 22 graus centígrados, de modo que  $T=295 \text{ K}$ :

$$4kT = (4 \cdot 1,38e-23 \cdot 295) \approx 1,63e-20 \text{ V}^2/\text{Hz}/\Omega.$$

Calculemos os valores dos geradores de ruído do circuito (Fig.3):

$$V_{ts}^2 = 4kTBR_s = (1,63e-20 \cdot 5000 \cdot 1000) \approx 8,12e-14 \text{ V}^2 \approx (0,285 \mu\text{V})^2$$

$$V_{t1}^2 = 4kTBR_1 = (1,63e-20 \cdot 5000 \cdot 1000000) \approx 8,12e-11 \text{ V}^2 \approx (9 \mu\text{V})^2$$

$$V_{t2}^2 = 4kTBR_2 = (1,63e-20 \cdot 5000 \cdot 1000) \approx 8,12e-14 \text{ V}^2 \approx (0,285 \mu\text{V})^2$$

$$V_{t3}^2 = 4kTBR_3 = (1,63e-20 \cdot 5000 \cdot 1000000) \approx 8,12e-11 \text{ V}^2 \approx (9 \mu\text{V})^2$$

### D- Geradores equivalentes de ruído do amplificador:

Ler nos gráficos os valores  $v_{nf}$ ,  $v_N$ ,  $i_{nf}$  e  $i_N$ . Com estes, calcular:

$$f_{cv} \approx f \cdot v_{nf}^2(f) / v_N^2 = 10 \cdot (7e-9)^2 / (3,5e-9)^2 \approx 40 \text{ Hz}$$

$$f_{ci} \approx f \cdot i_{nf}^2(f) / i_N^2 = 10 \cdot (4,5e-12)^2 / (0,4e-12)^2 \approx 1270 \text{ Hz}$$

$$V_n^2 = v_N^2 \left( f_{cv} \cdot \ln \frac{5024}{10} + 5024 - 10 \right) \approx (1,8e-9)^2 \cdot (40 \cdot 6,22 + 5024 - 10) \approx 1,71e-14$$

$$I_n^2 = i_N^2 \cdot \left( f_{ci} \cdot \ln \frac{5024}{10} + 5024 - 10 \right) \approx (0,4e-12)^2 \cdot (1270 \cdot 6,22 + 5024 - 10) \approx 2,06e-21$$

### E- Ruído total à saída do amplificador:

À saída do amplificador A1, teremos:

$$V_{no1}^2 =$$

$$A_{v1}^2 \cdot V_{ts}^2 + A_{v1}^2 \cdot V_{t1}^2 \cdot \left( \frac{1k}{1k+1M} \right)^2 + V_{t2}^2 \cdot \left( \frac{1M}{1k} \right)^2 + V_{t3}^2 + A_{v1}^2 \cdot V_n^2 + A_{v1}^2 \cdot I_n^2 \cdot (1k//1M)^2 +$$

$$I_n^2 \cdot 1M^2 \approx$$

$$1e6 \cdot (0,285 \mu V)^2 + 1e6 \cdot (9 \mu V)^2 \cdot 1e-6 + 1e6 \cdot (0,285 \mu V)^2 + (9 \mu V)^2 + 1e6 \cdot 1,71e-14 + 1e6 \cdot 2,06e-21 \cdot 1e6 + 2,06e-21 \cdot 1e6 \cdot 1e6 \approx$$

$$8,1e-8 + 8,1e-11 + 8,1e-8 + 8,1e-11 + 1,7e-8 + 2,1e-9 + 2,1e-9 \approx 1,8e-7 \approx (0,43 \text{ mV})^2.$$

$$V_{no}^2 = 100^2 \cdot V_{no1}^2 = 100^2 \cdot 1,8e-7 \approx (43 \text{ mV})^2.$$

### F – Ruído referido à entrada e Factor de Ruído:

O valor do ruído total referido à entrada do amplificador vale:

$$V_{ni}^2 = V_{no}^2 / 1000^2 / 100^2 = (0,43 \mu V)^2$$

O Factor de ruído:

$$F = \frac{\text{Potência de Ruído Real}}{\text{Potência de Ruído só da Fonte}} \approx \frac{(0,43 \mu V)^2}{(0,285 \mu V)^2} \approx \frac{1,8e-13}{8,1e-14} \approx 2,3.$$

\*\*\*\*\*