

APELLIDOS:

NOMBRE:

SOLUCION

Problema 1. Tenemos una fuente de señal cuya impedancia de salida es resistiva $R_s=20\text{k}\Omega$ que entrega una señal $v_s(t)=10\mu\text{V}_{\text{ef}}$ en la banda desde $f\rightarrow 0$ hasta $f=20\text{ kHz}$. Datos: $k=1.38\times 10^{-23}\text{ J/K}$, $T=300\text{K}$.

1- Calcule la relación señal/ruido $(S/N)_i$ que proporcionará la fuente de señal pensando en filtrados reales con un ancho de banda equivalente de ruido correspondiente a un filtro paso-bajo con $f_c=20\text{ kHz}$. Dibuje cómo veríamos en un osciloscopio ideal, una señal senoidal de 1 kHz entregada por la fuente en presencia del ruido que la acompañaría, indicando el valor eficaz de ese ruido. **(10 p)**

2- Pensando en amplificar esa señal, disponemos de dos Amplificadores Operacionales (AO) de bajo ruido que usaremos realimentándolos negativamente, en configuración no inversora. El primero es el LT1028 para el que podemos emplear los equivalentes de ruido: $e_n=1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ e $i_n=1\text{pA}/\text{Hz}^{1/2}$. El segundo es el LT1169 para el que usaremos los equivalentes $e_n=6\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ e $i_n=1\text{fA}/\text{Hz}^{1/2}$. Calcule las resistencias óptimas R_{opt} de cada uno de ellos, indicando qué tecnología usarán en su par diferencial de entrada y para qué tipo de fuente se señal será adecuado cada uno de ellos. **(10 p)**

3- Necesitamos amplificar en tensión $v_s(t)$ por 1000 (60 dB) con la menor degradación posible de la relación S/N, para lo que podemos utilizar un transformador de relación 10:1 (o de relación 1:10, según se conecte) junto con alguno de los AO. Dibuje los esquemas del amplificador propuesto para cada AO indicando:

- a)** La misión principal del transformador, alguna otra misión importante del mismo de cara al funcionamiento del AO y si contribuye a tener ganancia en tensión. **(10 p)**
- b)** El valor de las resistencias de realimentación del AO que utilice, justificando su elección. **(10 p)**
- c)** El valor y la misión de algún elemento de circuito que limite la potencia de ruido. **(10 p)**

4- Indique razonadamente cuál de los dos circuitos anteriores dará la menor Figura de ruido (F) o si lo prefiere, calcule las dos Figuras de ruido (más lento y puede que sea innecesario). **(20 p)**

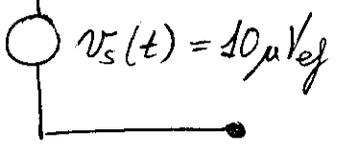
5- El transformador es un elemento costoso que sólo se emplea si no hay más remedio. Supongamos que nos basta con lograr una $F<1.2$ en la que el ruido que aporta la electrónica no supera el 20% de la potencia de ruido que da la propia fuente. ¿Sería posible prescindir en tal caso del transformador, conectando directamente la fuente de señal a la entrada no-inversora de alguno de los AO? Justifique su respuesta suponiendo que la fuente de señal permite el paso de corriente continua a través de su R_s y que la corriente de polarización ($I_{B+}=I_{B-}$) del LT1028 es de 10 nA , mientras que la del LT1169 es de 1 pA . **(10 p)**

6- En el caso de que utilicemos el LT1169 en el Apartado anterior, ¿Qué efecto veremos en la salida debido las corrientes de polarización I_{B+} e I_{B-} del AO? **(10 p)**

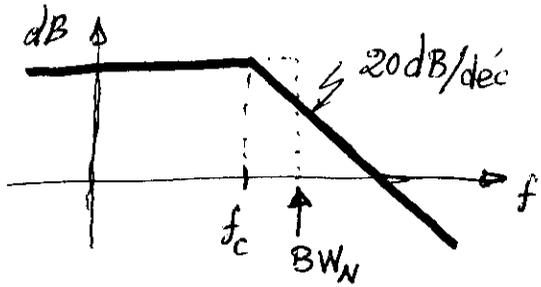
7- Como es posible (y hasta bueno) que a estas alturas del examen no haya calculado ninguna Figura de ruido, obtenga la Figura de ruido correspondiente al Apartado 6. Si ya la obtuvo antes, escriba ahora el valor eficaz de ruido v_{on} a la salida en tal caso. **(10 p)**

Asignatura		Fecha	
Apellidos	- SOLUCION -		Curso
Nombre		Grupo	

1) $R_s = 20k\Omega$ $BW: (f \rightarrow 0, f_{sup} = 20kHz)$



BW_N para $f_c = 20kHz$ es $BW_N = \frac{\pi}{2} \cdot 20kHz$



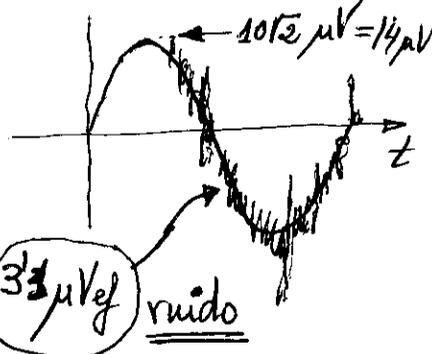
Potencia de ruido recogido en este BW_N

$$N = 4kTR_s \times BW_N = 4kT \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 20 \cdot 10^3$$

$$N = 1656 \cdot 10^{-23} \cdot 20 \cdot 20 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10^6 = 3312 \cdot \pi \cdot 10^{-15} \approx 10^{-11} W \text{ (sobre } 1\Omega)$$

$$S = (10^{-5})^2 = 10^{-10} W \text{ sobre } 1\Omega$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \frac{10^{-10}}{10^{-11}} = 10$$



Handwritten calculations for noise power and signal-to-noise ratio:

```

138
x 1200
-----
276
138
-----
1656

1656
x 2
-----
3312

3312
x 31416
-----
13248224
3312
-----
9936
1039968
    
```

$$N \approx 10^{-11} V^2 \text{ o } (W \text{ sobre } 1\Omega) = 0.1 \cdot 10^{-10} V^2 = \frac{1}{\sqrt{10}} \cdot 10 \mu V_{ef} = 3.1 \mu V_{ef} \text{ ruido}$$

2) LT1028: $R_{opt} = \frac{e_n}{i_n} = \frac{1mV/\sqrt{Hz}}{4pA/\sqrt{Hz}} = 1k\Omega$. Probable tecnología BIPOLAR en el par diferencial de entrada.

LT1169: $R_{opt} = \frac{6mV/\sqrt{Hz}}{4fA/\sqrt{Hz}} = 6M\Omega$. Probable tecnología FET (podría MOS) pero de Efecto Campo en cualquier caso.

El primero resulta adecuado para fuentes de señal de impedancia media-baja (en torno al $k\Omega$). El LT1169 será muy adecuado para fuentes de señal de alta impedancia ($M\Omega$) aunque tampoco hará mal papel con

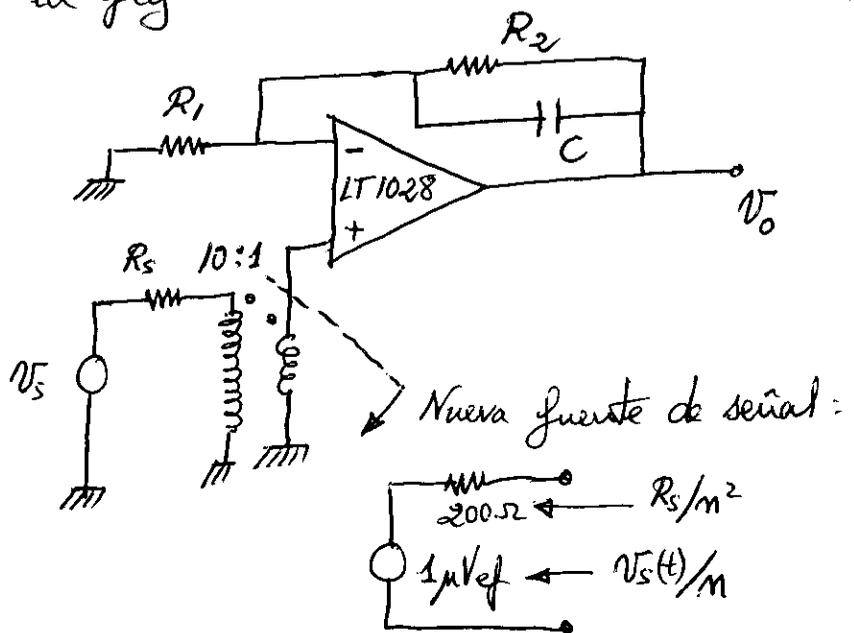
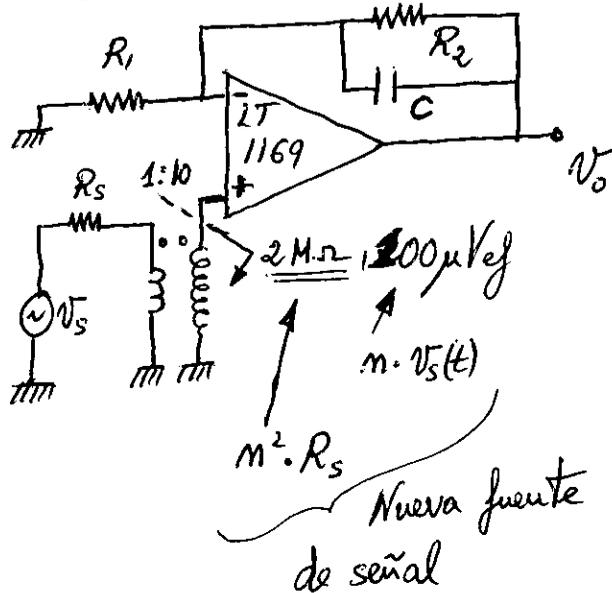
fuentes de cientos de $k\Omega$ y hasta decenas de $k\Omega$.

(2)

3) La $R_s = 20 k\Omega$ que tenemos parece quedar entre las zonas de resistencia de fuente de señal que los AO necesitarían para dar las mejores Figuras de ruido. Por ello podemos pensar en elevar R_s mediante el transformador para usar esta $m^2 R_s$ con el LT1169, o en rebajar R_s para usar R_s/m^2 con el LT1028. Como $m=10$, al rebajar R_s obtenemos 200 Ω que es la quinta parte de $1 k\Omega$. Este valor se acerca más que $20 k\Omega$ a la R_{opt} del LT1028 que es de $1 k\Omega$.

Al elevar R_s obtendremos $20 k\Omega \times 10^2 = \underline{2 M\Omega}$ que se acerca bastante a la R_{opt} del LT1169 ($6 M\Omega$). Por ello el transformador se usa con ganancia 10 en tensión (elevador de R_s) con el LT1169 y con atenuación 10 en tensión (ganancia 10 en corriente) con el LT1028 (reductor de R_s). Esto en cuanto a la misión principal del transformador: adaptar impedancias, y de paso amplificar o atenuar en tensión, según el caso.

Misión importante: permitir el paso de la corriente de polarización I_{B+} del AO sin tener que añadir electrónica adicional que suele atenuar algo la señal, degradando algo la figura de ruido.



Valores de las resistencias:

$$V_{om} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \sqrt{e_n^2 + (i_n R_N)^2 + 4kTR_N} BW_N$$

3

Buscaremos si es posible:

$$R_N = R_3 + R_1 // R_2$$

$$\underline{R_1 // R_2 \ll R_3}$$

Con el LT1169 $R_3 = 2M\Omega \Rightarrow R_1 // R_2 \ll 2M\Omega \rightarrow$ Muy fácil: $R_1 // R_2 < 1k\Omega$ (por ejemplo)

Como el transformador gana por 10 en este caso, $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ sólo debe valer 100 $\Rightarrow R_2 \approx 100R_1$. Con $\underline{R_1 = 100\Omega} \Rightarrow \underline{R_2 = 10k\Omega} \Rightarrow \underline{R_1 // R_2 \approx 100\Omega} \ll 2M\Omega$

Tenemos buen diseño para bajo ruido ($R_1 // R_2 \ll R_3$) y el A.O. no sufre un efecto de carga duro porque $(R_1 + R_2) > 10k\Omega$.

Con el LT1028 $R_3 = 200\Omega \Rightarrow R_1 // R_2 \ll 200\Omega$. Como el transformador atenúa la tensión en un factor 10 en este caso, $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ debe valer 10.000 $\Rightarrow R_2 \approx 10^4 R_1$. Con $\underline{R_1 = 1\Omega}$ y $\underline{R_2 = 10k\Omega} \Rightarrow R_1 // R_2 \approx 1\Omega \ll 200\Omega$.

Tenemos buen diseño para bajo ruido ($R_1 // R_2 \ll R_3$) y el A.O. no sufre un efecto de carga severo porque $(R_1 + R_2) \approx 10k\Omega$.

Valor del condensador C:

Para tener $f_c = 20kHz$, a esta f_c la reactancia de C debe igualar a la de R_2 en cada caso. Como $R_2 = 10k\Omega$ en ambos casos, tenemos

$$R_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 20kHz \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3} = \frac{1}{400\pi} \mu F \approx \underline{\underline{800pF}}$$

4) Para comparar Figuras de ruido de forma muy rápida en estos casos en que $R_N \approx R_S$ de la fuente de señal (modificada o no por el transformador) basta fijarse en el término $e_n^2 + (i_n R_N)^2 + 4kTR_N$ y comparar.

Con el LT1028, $R_s = 200\Omega = R_N$ (porque $R_1 || R_2 \ll R_3 = R_s$)

tenemos:

$$1^2 \cdot 10^{-18} + \frac{4}{100} \cdot 10^{-18} + 4KT \cdot R_s \equiv 1^2 + 0.04 + 331$$

$200\Omega \cdot 1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
 $(0.2 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 = \frac{4}{100}$

$\frac{16.56}{15} \frac{15}{06} \frac{15}{331}$

$\frac{16.56}{5} \leftarrow (1 \text{ k}\Omega)$

RUIDO DE LA ELECTRONICA	RUIDO DE LA FUENTE
$\approx 25\%$	$\approx 75\%$
del ruido total	

Con el LT1169 $R_s = 2 \text{ M}\Omega = R_N$ (idem)

tenemos:

$$6^2 \cdot 10^{-18} + 4 \cdot 10^{-18} + 33120 \cdot 10^{-18} \equiv 6 + 4 + 33120$$

$2 \text{ M}\Omega \times 1 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}} = 16.56 \rightarrow (1 \text{ k}\Omega)$
 $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \rightarrow \frac{2000}{33120} = 2 \text{ M}\Omega$

$\frac{10}{33120}$

La electrónica aporta 10 frente a 33120 (o 1 frente a 3312)

luego $F \rightarrow 1$ en este caso y con el

LT1028: $F \approx \frac{25\% + 75\%}{75\%} \approx 1.3 \Rightarrow$ El LT1169 dará una mejor figura de ruido

5) Visto lo que ocurre con el LT1028 aun "adaptando" en buena medida con el transformador los $20 \text{ k}\Omega$ a su $R_{opt} = 1 \text{ k}\Omega$ (no llegamos a adaptar porque nos "pasamos" al obtener 200Ω en vez de $1 \text{ k}\Omega$), ya podemos sospechar que sin transformador no va a mejorar.

Con $R_s = 20 \text{ k}\Omega$ directamente, el termino $e_n^2 + (i_n R_N)^2 + 4KT R_N$ será

$$1^2 \cdot 10^{-18} + 400 \cdot 10^{-18} + 331.2$$

$20 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
 $20 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$

$\frac{16.56}{20} \leftarrow 1 \text{ k}\Omega$
 $\frac{16.56}{331.2} \leftarrow 20 \text{ veces más}$

\Rightarrow Vemos que con el LT1028 la electrónica ya metenía más potencia de ruido que los $20 \text{ k}\Omega$ ($F > 2$) luego no vale, como previmos.

Con el LT1169 vamos a ver qué ocurre para $R_3 = 20k\Omega$ directamente sin transformador. Tendremos:

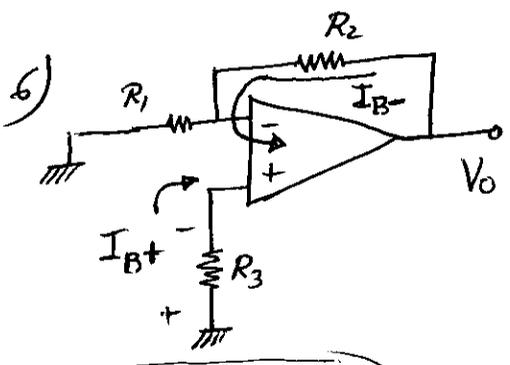
$$e_n^2 + (i_n \cdot R_n)^2 + 4kT \cdot 20k\Omega = 36 \cdot 10^{-18} + \emptyset + 331'2$$

$1fA/\sqrt{Hz} \times 20k\Omega =$
 $20pA/\sqrt{Hz} = 0'02 \mu A$

Ruido total ≈ 367 (proporcional a)

la electrónica añade 36 a los 331 de la fuente, luego: $F < 1'2$

Resulta posible prescindir del transformador con el LT1169 a costa de tener una $F = \frac{367}{331} \approx 1'1x$ que no está mal.



CIRCUITO EN DC

Superposición de efectos:

Con $I_{B-} = 0 \Rightarrow V_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) (-I_{B+} \cdot R_3) = 10^3 (-20 \mu V)$

El efecto de I_{B+} es dar un nivel DC de $-20 \mu V$ a la salida.

Con $I_{B+} = 0 \Rightarrow V(+)=0=V(-) \Rightarrow$ Por R_1 no fluye I_{B-} , \Rightarrow

I_{B-} fluye por $R_2 \Rightarrow V_o = R_2 \times I_{B-} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Diseñando sobre la marcha } R_2 = 10k\Omega, R_1 = 10k\Omega \\ \text{para el Apto 5} \end{array} \right.$

$V_o = 10^4 \cdot 1pA = 10 \mu V \Rightarrow$ Superposición de efectos. $V_o = -20 \mu V + 10 \mu V \approx -10 \mu V$

7) $V_{ON} = (1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega}) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot 20 \cdot 10^3 [36 + \emptyset + 331'2] \cdot 10^{-18}} = 1001 \times \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot 2 \cdot 367'2 \cdot 10^{-14}}$

$= 1001 \cdot \sqrt{\pi \cdot 367'2 \cdot 10^{-12}} = 1001 \sqrt{\pi \cdot 3'67 \cdot 10^{-6}} \approx 3'4 mV_{ef}$

$(\frac{S}{N})_0 = (*) = \frac{(10^{-5})^2}{(3'4 \mu V_{ef})^2} \Rightarrow F$ $\approx \sqrt{10}$ $F = \frac{(3'4)^2}{3'1^2} = 1'1x$ (*)