

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION
Departamento de Ingeniería Electrónica. Sistemas Electrónicos Analógicos, Quinto Curso.

Parcial 3 del 18 de Enero de 2007.

D.N.I.:

APELLIDOS:

NOMBRE:

Problema 1. Un sensor resistivo cuya impedancia de salida es $R_S=100\Omega$ entrega una débil señal $v_S=10\mu V_{\text{eff}}$ debida a las señales que detecta en la banda de frecuencias 100Hz-2100Hz. Para excitar el convertidor analógico digital del analizador FFT que nos va a permitir estudiar esas señales necesitamos que tales señales sean de unos $10mV_{\text{eff}}$ al menos. Por ello vamos a diseñar un amplificador con 60dB de ganancia en tensión eligiendo un amplificador operacional (AO) de bajo ruido entre los dos cuyas prestaciones son:

Modelo LT1028: $e_n = 1 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ e $i_n = 1 \text{ pA/Hz}^{1/2}$, planas con la frecuencia (sin considerar ruido 1/f)

Modelo LT1066: $e_n = 6 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ e $i_n = 1 \text{ fA/Hz}^{1/2}$, planas con la frecuencia (sin considerar ruido 1/f)

Datos adicionales: $T=300\text{K}$, $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

1- Sin elegir todavía el AO entre los dos que se dan, proponga un amplificador no-inversor basado en AO que sirva para tal fin, que tenga limitado el ancho de banda a 2100Hz (-3dB) y que pueda tener una baja figura de ruido. Procure no cargar la salida del AO con cargas inferiores al $K\Omega$. Diseñe los valores de las resistencias de realimentación y de algún elemento que limite el ancho de banda. Suponga, si lo necesita, que el sensor permite el paso de corriente dc. (15 p)

2- Calcule la relación $(S/N)_i$ a la salida del sensor empleando el ancho de banda de ruido que va a tener la etapa que ha propuesto. Suponga que las frecuencias menores que 100Hz serán eliminadas por filtrado paso-alto adecuado, de modo que la región de frecuencia entre 0Hz (dc) y 100Hz no aporta ruido Johnson. (10 p)

3- Justifique cuál de los dos AOs utilizará en su diseño del Apartado 1 dando algún dato numérico que aconseje el empleo de uno u otro Amplificador Operacional. ¿Qué tipo de transistores (bipolar o FET) cree V_d que tiene cada AO en su diferencial de entrada?. (10 p)

4- Calcule la relación $(S/N)_o$ en su diseño del Apartado 1 con el AO elegido en el Apartado 3. ¿Cuánto vale la Figura de ruido F de su diseño?. (15 p)

5- Recordando que tenemos unos excelentes transformadores de relación de tensión 10:1 o 1:10 según se mire, que consideraremos ideales, vamos a estudiar su posible utilización en nuestro diseño. Indique cómo conectaría uno de esos transformadores entre el sensor y su circuito del Apartado 1 y justifíquelo en función de la impedancia que presenta hacia la entrada del AO. (10 p)

6- Compare la acción de ese transformador según se utilice el AO con diferencial de entrada en tecnología bipolar o el AO cuyos transistores del diferencial de entrada son FETs. ¿Merece la pena usar el LT1066 con uno de esos transformadores?. Puede hacer cálculos con "spot noise" para mayor rapidez. (15 p)

7- Si en el Apartado anterior llegó a la conclusión de que no merecía la pena usar el LT1066 con uno de esos transformadores, pruebe a conectar dos transformadores en cascada para ver si cambia de parecer. Si ya le parecía interesante el empleo del LT1066 con un transformador, quizá tampoco sea malo probar con dos de ellos en cascada, por tanto: Calcule las relaciones $(S/N)_o$ para el LT1066 con uno y con dos transformadores en cascada y comente el efecto que observa y a qué puede deberse. (15 p)

NOTA: Se sobreentiende que la combinación de dos transformadores en cascada en la que uno eleva tensión y otro la reduce, dando una ganancia unidad, no se va a considerar, aunque en algún caso podría ser interesante de cara a sensores de alta impedancia en $f \rightarrow 0$ que no dejan pasar corriente continua.

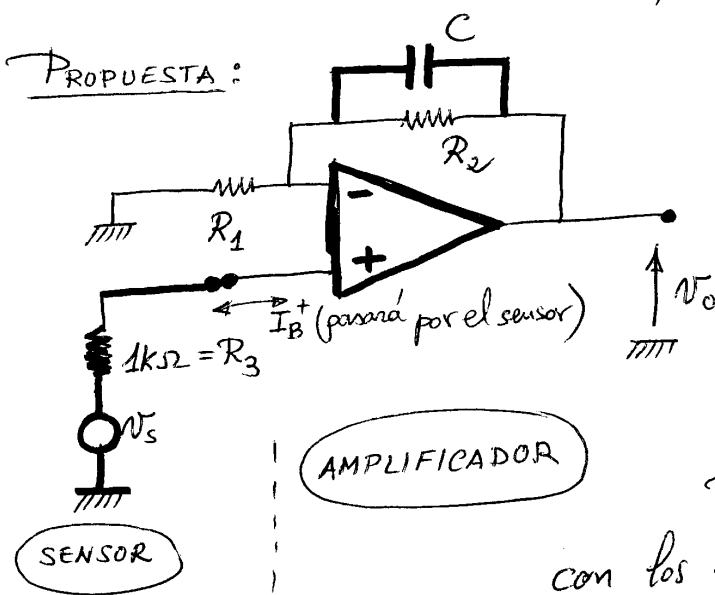
8- Explique con un ejemplo a qué se refiere la NOTA anterior. Sugerencia: Mire qué pasaría con un sensor con $R_S=100\Omega$ en a.c. que no dejase pasar la corriente continua en su diseño del Apartado 1. (10 p)

(En esta pregunta 8 queríamos decir $R_S=1000\Omega$, pero se puede responder con $R_S=100\Omega$ y el LT1066 es sólo un nombre que correspondería al AO real LT1169).



Asignatura		Fecha	
Apellidos		Curso	
Nombre	— SOLUCION —		Grupo

① BW : 100 Hz — 2100 Hz , G = 60 dB (x1000)



$\frac{v_0}{v_s} = 10^3 \Rightarrow R_2 = 999 R_1$
 porque $v_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_s$
 Además:
 MINIMIZAMOS $R_N = R_3 + (R_1 \parallel R_2)$
 o lo hacemos lo menor posible sin que sufra el AO
 con los efectos de carga $(R_1 + R_2)$ a su salida (p.e. $R_1 + R_2 \geq 1k\Omega$)

Por tanto: $R_1 \parallel R_2 \ll R_3 = 100\Omega \Rightarrow R_1 \parallel R_2 \leq \underline{\underline{1\Omega}}$

Como $R_2 = 999 R_1 \Rightarrow R_1 \parallel R_2 \approx R_1$ y $(R_1 + R_2) = (999 + 1) R_1$

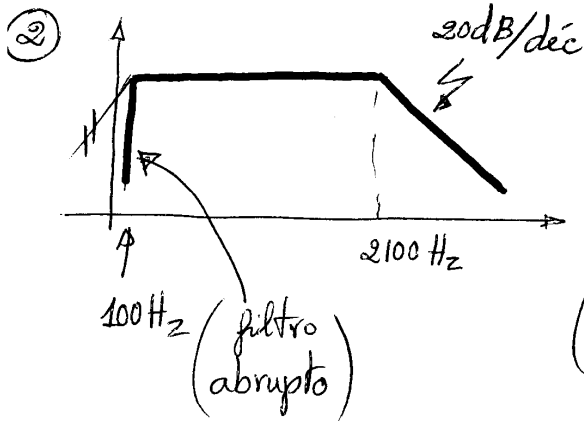
Para que $(R_1 + R_2)$ supere o al menos iguale el $1k\Omega$ tenemos:

$R_1 + R_2 = (999 + 1) R_1 \geq 1k\Omega \Rightarrow R_1 \geq 1\Omega$. Tomando $\underline{\underline{R_1 = 1\Omega}}$

tenemos $R_1 \parallel R_2 \approx R_1 = 1\Omega$ (en rigor $R_1 \parallel R_2 < 1\Omega$) luego

$\underline{\underline{R_2 = 999\Omega}}$ ($1k\Omega$). Condensador: $2100\text{ Hz} = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C} \Rightarrow$

$\underline{\underline{C = \frac{1}{2100 \cdot 2\pi \cdot 999} = 76\text{ mF}}} \text{ (} 0,076\text{ }\mu\text{F)} \text{ y } R_N \approx R_3$



El ancho de banda ^(equivalente) de ruido (térmico en este caso) será:

$$\left(2100 \times \frac{\pi}{2} - 100 \right) = BW_N = \underline{\underline{3200 \text{ Hz}}}$$

corte NO ABRUPTO

$$(N)_i = 4kTR_s \times BW_N = 5'3 \cdot 10^{-15} \text{ (W o } V_{ej}^2 \text{ sobre } 1\Omega)$$

$$(S)_i = (10 \mu V_{ej})^2 = 10^{-10} \text{ W (o } V_{ej}^2 \text{ sobre } 1\Omega)$$

$$\text{Luego } \left(\frac{S}{N} \right)_i = 18.868 = \underline{\underline{42'75 \text{ dB}}}$$

③ Tomamos parte de la expresión siguiente:

$$V_{om} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \sqrt{\left[\underbrace{e_m^2}_{\text{Término A}} + \underbrace{i_m^2 \cdot R_N^2}_{\text{Término B}} + \underbrace{4kT \cdot R_N}_{\text{Término C}} \right] \cdot BW_N}$$

Para $R_N \approx R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ el término C vale: $1'656 \cdot 10^{-18} \text{ } \frac{V^2}{\text{Hz}}$

Con el LT1028, el término A es: $A = 10^{-18} \text{ } \frac{V^2}{\text{Hz}}$ y el término B es $B = 0'01 \cdot 10^{-18} \text{ } \frac{V^2}{\text{Hz}}$

Con el LT1066, el término A es: $A = 36 \cdot 10^{-18}$ por lo que ya no hace falta seguir: usaremos el LT1028 en el esquema de la figura del Apartado 1. Por su alta i_m , parece que los TRT's de su diferencial de entrada serán bipolares y FET en el LT1066 (baja i_m)

$$\textcircled{4} \quad V_{ON} = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{1001} \cdot \sqrt{\left[10^{-18} + 0.04 \cdot 10^{-18} + 1.656 \cdot 10^{-18}\right] \cdot 3200 \text{ Hz}}$$

$$\sqrt{S_o} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_s \quad \text{luego: } N_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot \left[2.666 \cdot 10^{-18}\right] \cdot 3200$$

$$\text{y } S_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot v_s^2$$

$$\text{Por tanto: } \left(\frac{S}{N}\right)_o = \frac{v_s^2 = 10^{-10} (\text{V}^2)}{2.666 \cdot 10^{-18} \cdot 3200} = 11.722 = \underline{\underline{40.69 \text{ dB}}}$$

$$\text{Por tanto: } F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \text{ y en dB's: } 42.75 - 40.69 = \underline{\underline{2.06 \text{ dB}}}$$

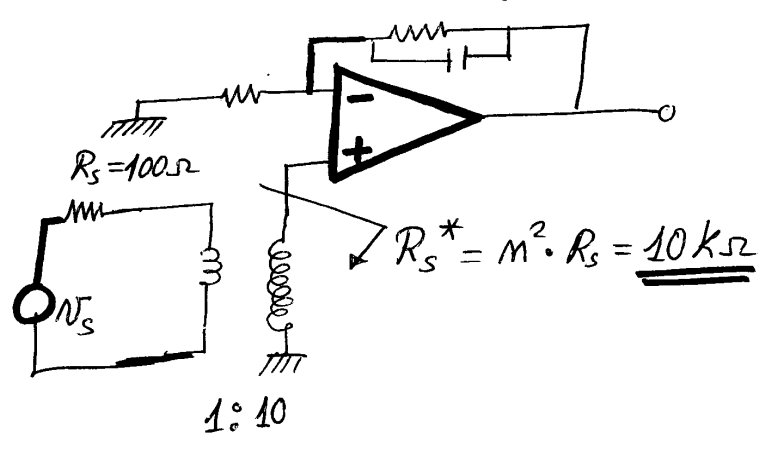
que debe corresponder a la relación aproximada:

$$\frac{\text{Término C} + \text{Término A con LT1028}}{\text{Término C}} = \frac{2.656}{1.656} = \underline{\underline{1.6}} \quad (2.05 \text{ dB})$$

⑤ El LT1028 ha resultado mejor porque, además de ser un excelente A.O. de bajo ruido, su $R_{opt} = e_n / i_n = 1 \text{ k}\Omega$ "solo" estaba una década por encima de R_s . Sin embargo, el LT1066, que también es un AO (FET input) de bajo ruido, no ha podido competir debido a su mayor e_n y a que su R_{opt} es del orden de los $6 \text{ M}\Omega$, casi 5 décadas por encima de R_s . Pero si empleamos un transformador de relación

1:10, podemos ver el sensor "transformado" en uno cuya R_s^* pasa a ser $m^2 \cdot R_s = \underline{10\text{ k}\Omega}$, algo que se pasa de la R_{opt} del LT1028, por lo que puede que el (LT1028 + TRANSFORMADOR) no sea una buena opción, pero el (LT1066 + TRANSFORMADOR) sí lo sea.

Conectaríamos el transformador así:



y ahora faltaría ver qué ocurre respecto al caso de antes en el Apartado 3.

Ahora con $R_s^* = 100 \cdot R_s$ el término C vale: $165'6 \cdot 10^{-18}$ y

con el LT1028, tenemos: { Término A = $1 \cdot 10^{-18}$ (despreciable)
 { Término B = $100 \cdot 10^{-18}$ (apreciable)

pero la relación: $\frac{\text{Término C} + \text{Término B}}{\text{Término C}} = \frac{265'6}{165'6}$ es muy

parecida a la de antes, solo que ahora domina el efecto de i_n sobre el de i_m .

Para el LT1066 tenemos ahora: { término A = $36 \cdot 10^{-18}$ (APRECIABLE)
 { término B = $0'0001 \cdot 10^{-18}$ (despreciable)

pero $\frac{165'6 + 36}{\text{CON LT1066}} < \frac{165'6 + 100}{\text{CON LT 1028}}$ ya va a ser mejor el **LT1066**

6) La acción del transformador elevador de impedancia en el caso del LT1028 es dejar prácticamente la misma figura de ruido solo que ahora se debe en su mayor parte al equivalente de ruido en corriente i_n del A.O.

antes teníamos : $R_s \approx \frac{R_{OPT\ LT1028}}{10}$ y ahora tenemos

$R_s^* \approx 10 \cdot R_{OPT\ LT1028}$ por lo que ocurre lo que acabo de decir. Pero ahora $R_s^* = 10\text{K}\Omega$ empieza a entrar en el terreno donde los A.O. con entrada FET se vuelven "imbatibles": el terreno de las altas impedancias (o mejor dicho: el terreno de la electrónica adecuada para sensores de alta impedancia)

Con el LT1066 y el transformador, la figura de ruido que tendremos será:

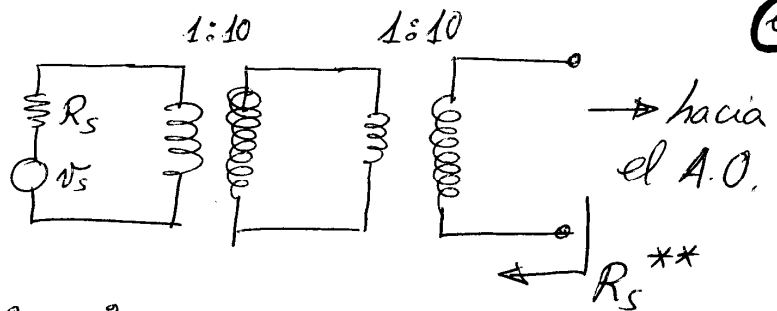
$$F = \frac{\text{Término C} + \text{Término A}}{\text{Término C}} = \frac{165'6 + 36}{165'6} = 1'21 \left(\underline{\underline{0'85\text{dB}}} \right)$$

Merece la pena el LT1066 + Transform.

menos que los 2'05dB del LT1028 con y sin transformad

~~Tenemos esta posibilidad~~ Además, como el transformador tiene ganancia en tensión 10, ahora $R_2 = 1\text{K}\Omega$ y $R_1 = 10\Omega$ (lo cual no es malo si el GxBW del A.O. fuese bajo).

⑦ Si hacemos esto:



⑥

$$\text{Ahora } R_s^{**} = R_s \cdot 10^2 \cdot 10^2 = \underline{\underline{1\text{M}\Omega}}$$

Este valor claramente entra en el terreno de los que, A.O. con entrada FET como etapa amplificadora es lo mejor. De hecho se acerca mucho a la $R_{opt}_{LT1066} = 6\text{K}\Omega$ de este A.O. por lo que la figura de ruido va a ser excelente.

Con $R_s^{**} = 1\text{M}\Omega$, el término C vale: $16,560 \cdot 10^{-18} \text{V}^2/\text{Hz}$

el Término A valdrá con el LT1066: $A = 36 \cdot 10^{-18} \text{V}^2/\text{Hz}$

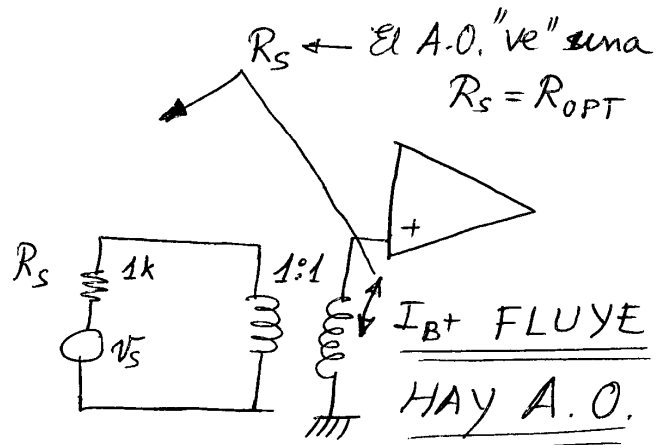
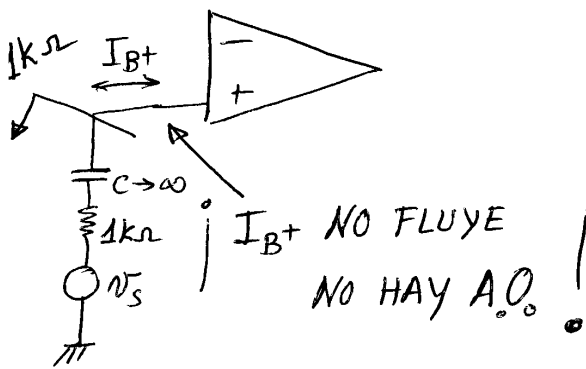
el Término B " " " " $B = 1 \cdot 10^{-18} \text{V}^2/\text{Hz}$

con lo que la Figura de ruido va a tender a 1 (0dB)

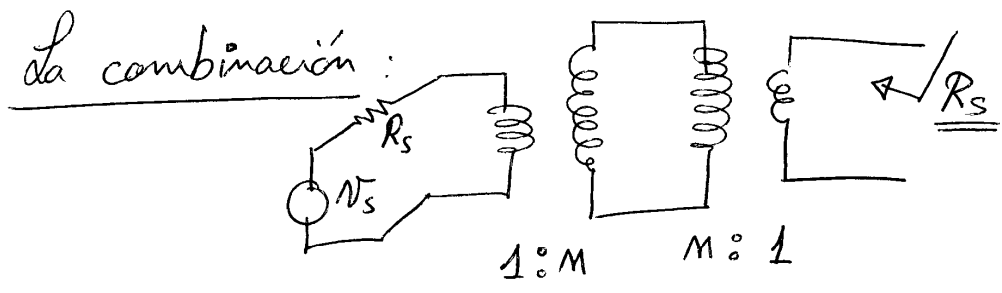
$$F = \frac{16560 + 36 + 1}{16560} = \underline{\underline{1,0022}} \text{ (0,01dB)}$$

y además el A.O. sólo deberá dar ganancia 10 porque los transformadores ya dan 100 entre los dos. Ello requeriría $R_2 = 1\text{k}\Omega$ y $R_1 = 100\Omega$ y como $R_1 \ll R_s^{**} = R_3$ los cálculos anteriores sirven perfectamente.

⑧ La nota anterior se refiere a que el LT1028 con un sensor de $R_s = 1k\Omega = R_{opt\ LT1028}$ estaba dando la mejor figura de ruido posible. Si tal sensor no dejase pasar la continua, una forma de solventar el problema sin atenuar la señal sería usar un transformador de relación 1:1. Así:

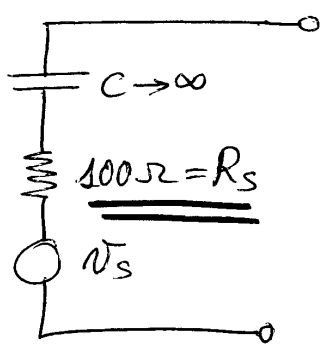


Esto nos permite que I_{B+} circule sin modificar R_s , porque $M=1$



nos permite tener relación 1:1 con transformadores de relación 10:1 para no cambiar la impedancia vista por el A.O. (en aquellos casos en que no converga).
como un sensor con $R_s = 1k\Omega$ y el LT1028

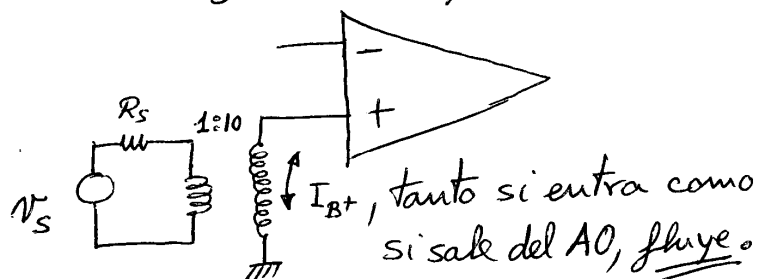
Para un sensor como el de este apartado, que podríamos representar así:



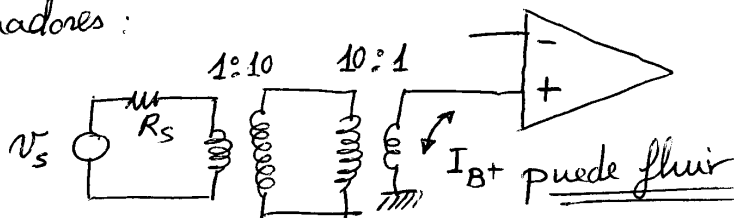
lo mejor sería usar un transformador y el LT1066 porque de esa forma tendríamos:

- a) Una figura de ruido de 0'85dB que es muy buena en general y

b) El problema del paso de continua para la corriente de polarización I_{B+} del A.O. estaría garantizado por el enrollamiento del secundario



Esta misma utilización con el LT1028 deja una figura de ruido mayor (2'05dB) e igual a la que dejaría esta otra posibilidad con 2 transformadores:



que soluciona el problema de I_{B+} y que sería muy buena para sensores con $R_s = 1000\Omega$ que era el dato que quería poner en el enunciado, pero que no fue así.