

# ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION

Departamento de Ingeniería Electrónica. Sistemas electrónicos Analógicos, Quinto Curso.

Examen del 17 de Septiembre de 2008.

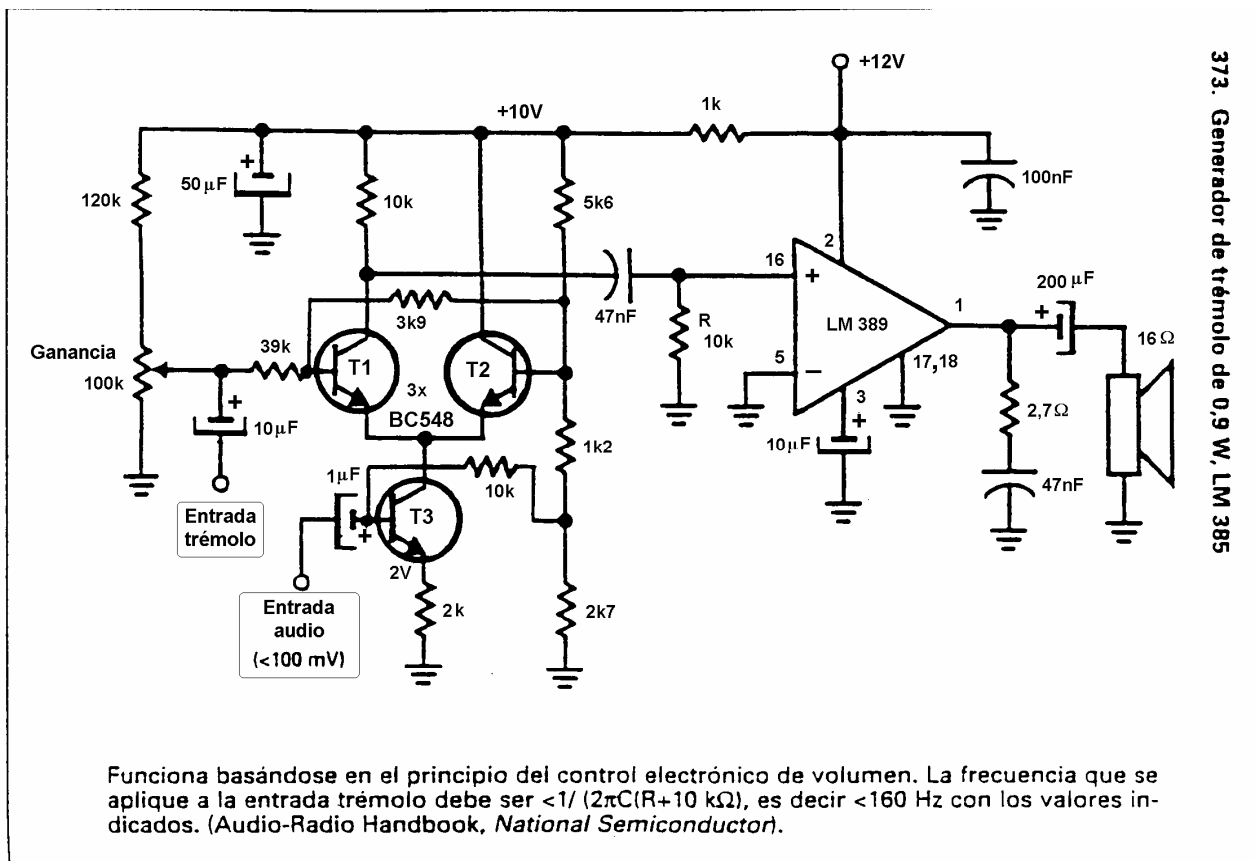
D.N.I.:

APELLIDOS:

NOMBRE:

## SOLUCION

**Problema 1.** El circuito de la figura permite superponer un efecto “trémolo” (cierta modulación de amplitud al ritmo de pocas decenas de Hz) a una señal de audio. Esta señal producto es posteriormente amplificada por el C. I. LM389 a fin de obtener 900 mW sobre el altavoz para oirla cómodamente. (50 p)



H. Schreiber “ 400 circuitos electrónicos de baja frecuencia” 1995.

- 1) Explique cómo se genera esa señal producto en base a multiplicadores analógicos o en base al parascodo formado por dos de los tres transistores BC548 de la figura con la idea de ganancia variable por reparto de corriente.
- 2) Suponiendo que  $\beta=200$ , calcule los puntos de trabajo de los transistores despreciando de momento la corriente que llega a la base de T1 a través de la resistencia de  $39 \text{ K}\Omega$  frente a la que lo hace a través de la resistencia de  $3 \text{ K}\Omega$ .  $V_{BE}=0.6 \text{ V}$ .
- 3) Justifique la validez de la aproximación anterior en base a los equivalentes Norton de continua “vistos” por la base T1 mirando hacia una u otra de las resistencias mencionadas, suponiendo el potenciómetro de  $100 \text{ K}\Omega$  a mitad de su recorrido.

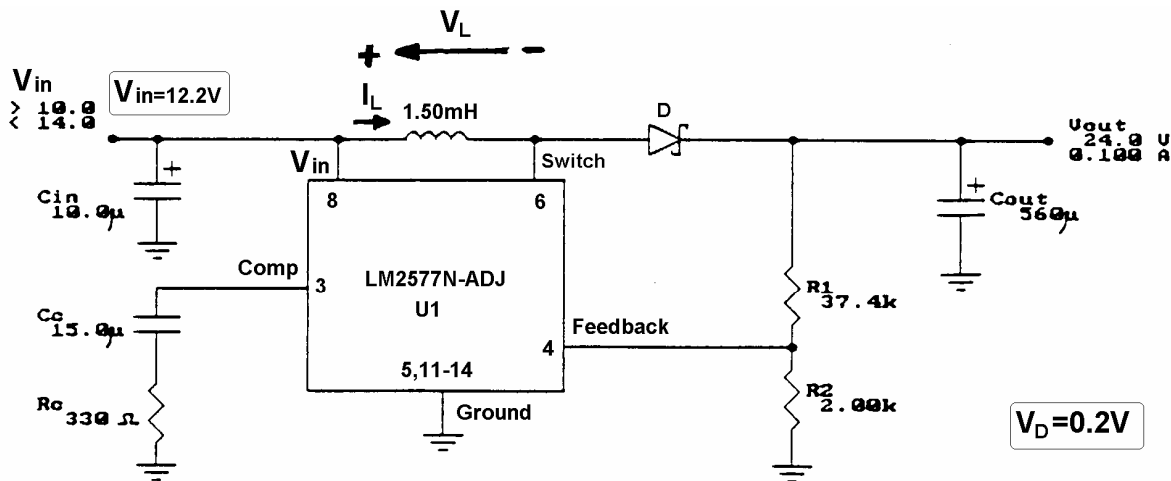
4) Desplazando algo el cursor del potenciómetro de su posición central se consigue que la corriente de T3 se reparta por igual entre T1 y T2. En estas condiciones calcule las frecuencias de corte inferior de las entradas de trémolo y de audio. Suponga el cursor en el centro a efecto de cálculo de impedancias de entrada, que los generadores que excitan estas entradas poseen  $600\ \Omega$  de impedancia. Datos:  $V_T=26\text{ mV}$  y  $h_{fe}=200$ .

5) En las condiciones del apartado anterior, calcule la ganancia en la etapa moduladora  $A_v=v_{16}/v_{\text{audio}}$ .

6) El comentario de la figura sobre la máxima frecuencia de la entrada “trémolo” parece referirse al acoplo entre el colector de T1 y la resistencia R de  $10\text{ K}\Omega$  que define la impedancia de entrada de la etapa amplificadora. ¿Qué significado tiene la fórmula del comentario para dicho acoplo? Considerando una señal de audio de  $200\text{ Hz}$  a la que modulamos con un efecto “trémolo” de  $12\text{ Hz}$  ¿Cree que el acoplo permitirá que esta señal producto pase hacia el amplificador? ¿Por qué? ¿Y si la señal de audio es de  $60\text{ Hz}$ ?

**Problema 2.** Queremos hacer un convertidor  $i-v$  con una transimpedancia de  $10^4\text{ V/A}$  mediante un A.O. realimentado negativamente con una resistencia. Para ello podemos emplear el A.O. LT1169 ( $6\text{ nV/Hz}^{1/2}$ ,  $1\text{ fA/Hz}^{1/2}$ ) o el LT1028 ( $0.85\text{ nV/Hz}^{1/2}$ ,  $0.85\text{ pA/Hz}^{1/2}$ ) cuyas características de ruido supondremos constantes con la frecuencia en la banda de interés ( $100\text{--}10.000\text{ Hz}$ ). Elija el que produzca el menor ruido a la salida al amplificar la corriente  $i$  de un sensor de  $100\text{ K}\Omega$  de impedancia y estime la tensión eficaz de ruido a la salida. (25 p)

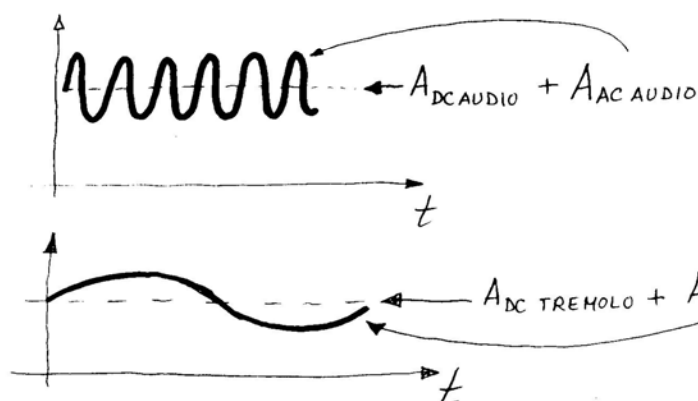
**Problema 3.** En el regulador conmutado de la figura se mide  $t_{\text{on}} = t_{\text{off}} = 15\ \mu\text{s}$ . Dibuje las formas de onda de la corriente a través de la bobina y de la tensión en sus bornas, acotando sus valores. Justifique si es correcta la frase “La potencia media disipada por la bobina es nula porque durante  $t_{\text{on}}$  almacena  $63\ \mu\text{J}$  que entrega durante  $t_{\text{off}}$ ”. (25 p)



|                                                                       |                 |              |                     |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|---------------------|--|--|
| <b>ESCUELA TECNICA SUPERIOR<br/>DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION</b> |                 |              |                     |  |  |
| <b>ASIGNATURA</b>                                                     |                 | <b>FECHA</b> |                     |  |  |
| <b>APELLIDOS</b>                                                      | <b>SOLUCION</b> | <b>CURSO</b> | <b>CALIFICACION</b> |  |  |
| <b>NOMBRE</b>                                                         |                 | <b>GRUPO</b> |                     |  |  |
|                                                                       |                 |              |                     |  |  |

Problema 4: 1) Visión como multiplicador-modulador AM:

Los tres transistores forman un multiplicador de 2 cuadrantes. Ahora bien, como las señales de audio y de trémolo se acoplan en alterna al nivel DC del par diferencial (trémolo) o del transistor que polariza al diferencial, tendremos:



Productos resultantes:

$$A_{DC \text{ AUDIO}} \times A_{DC \text{ TREMOLO}} \rightarrow \text{DC} \quad \textcircled{D}$$

(Término DC)

$$A_{AC \text{ AUDIO}} \times A_{DC \text{ TREMOLO}} \quad \textcircled{A}$$

$$A_{DC \text{ AUDIO}} \times A_{AC \text{ TREMOLO}} \quad \textcircled{B}$$

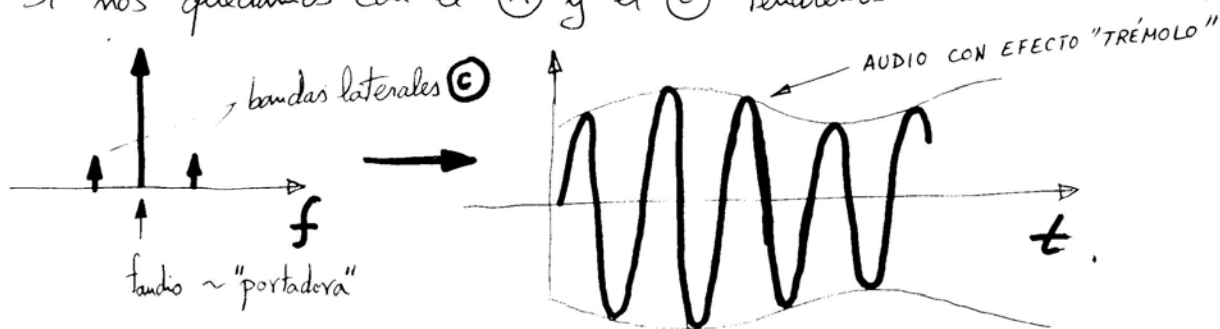
$$A_{AC \text{ TREMOLO}} \times A_{AC \text{ AUDIO}} \quad \textcircled{C}$$

El término  $\textcircled{A}$  es de frecuencia de audio

El término  $\textcircled{B}$  es de frecuencia de trémolo (muy baja, habrá que eliminar)

El término  $\textcircled{C}$  da dos frecuencias ( $f_{\text{audio}} + f_{\text{trémolo}}$ ) y ( $f_{\text{audio}} - f_{\text{trémolo}}$ )

Si nos quedamos con el  $\textcircled{A}$  y el  $\textcircled{C}$  tendremos:





$$V_A = 10V \frac{2k7}{2k7 + 1k2 + 5k6} = 2'84V$$

El dato del circuito  $V_{E3} = 2V$  sugiere que  $I_{E3}$  debe ser de  $1mA$  ( $2V = 2k\Omega \times 1mA$ ) lo que sugiere que  $V_{BE} \approx 0.7V$  es mejor dato que  $V_{BE} = 0.6V$

Así  $V_A = V_{E3} + 0.7V + 10k \cdot \frac{1mA}{201} = 2.75V \approx 2.84V$  con sólo  $1mA = I_{C3}$ .

201

Ahora la corriente por el divisor de tensiones  $V_A$  y  $V_B$  será:  $I_{DIV} = \frac{10V}{2k7 + 1k2 + 5k6}$   
es decir:  $I_{DIV} = 1'05mA \approx 1mA$ . Así la corriente que atraviesa la resistencia de  $1k\Omega$  de alimentación es de unos  $2mA$  ( $I_{C3} + I_{DIV}$ ) lo cual es coherente con los  $2V$  ( $12V - 10V$ ) que caen en ella. Si se usa  $V_{BE} = 0'6$ , entonces  $I_{E3}$  sale de  $1'12mA$ , con lo que  $I_{E3} + I_{DIV} = 2'17mA$  y  $2'17mA \cdot 1k\Omega = 2'17V$ , encaja menos con los  $2V$  que caen en ella. En cualquier caso esto afecta poco al punto de trabajo de los TRT'S---- Seguimos con  $V_{BE} = 0'7V$

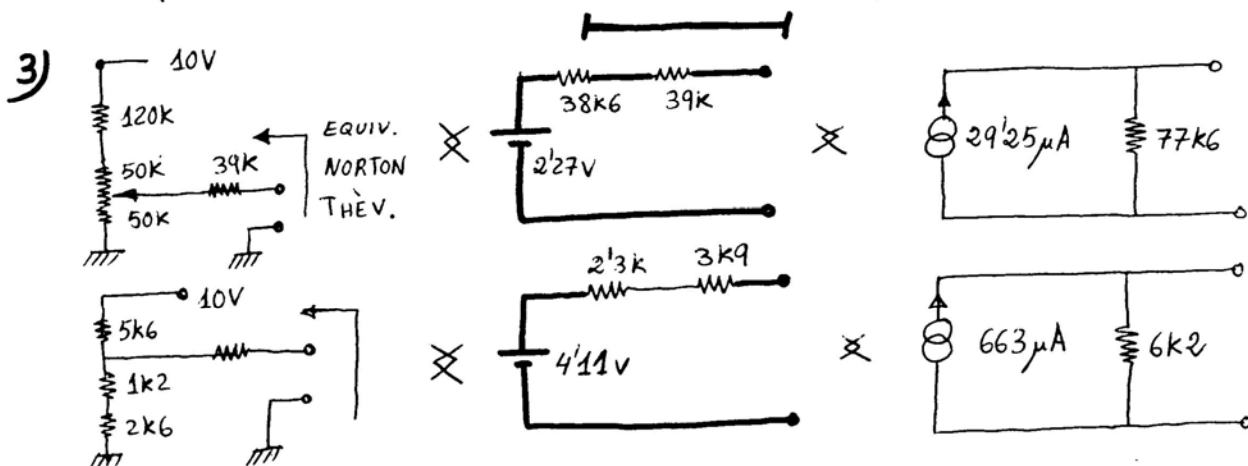
$$V_B = 10V \frac{2k7 + 1k2}{2k7 + 1k2 + 5k6} = 4.11V = V_{B2} \approx V_{B1} \Rightarrow V_{E2} = 3.41V$$

T3: ( $V_{CE} = 3.41 - 2 = 1.41 \text{ V}$ ,  $I_{C3} = 1 \text{ mA}$ )

$$T_2: (V_{CE} = 10 - 3.41 = 6.59V, I_{C2} = 0.5mA)$$

T1:  $(V_{CE} = 10 - 3'41 - 10k\Omega \cdot 0'5mA = 1'59V, I_{C1} = 0'5mA)$   $\nearrow$  arroglia a:  $th\left(\frac{3k\Omega \cdot I_{B1}}{2V_T}\right)$

Suponemos  $V_{B1} \approx V_{B2} \Rightarrow$   
 $I_{C1} \approx I_{C2}$ , aunque  
 podrían repartirse con  
 arreglo a:  $\frac{3k_9 \cdot I_{B1}}{2V_T}$

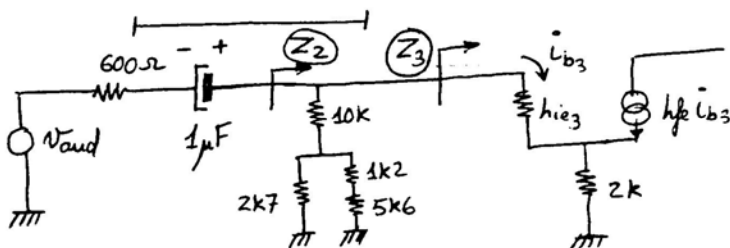


La aportación en corriente del primer Norton al total (suma) es de un 4'5% de los  $663\mu A$  que aporta el segundo (despreciable por tanto) y su efecto en la resistencia es bajarla de  $6k\Omega$  a  $6k\Omega // 77k\Omega = 5'74k\Omega = 0'926 \cdot 6k$  es decir modificarla en un 7'4%. Efecto también despreciable.

No obstante subiendo el cursor del potenciómetro se puede subir la tensión de base de T1 de modo que se compense la caída  $I_{B1} \times 3k\Omega \approx 19mV$  debida a  $I_{B1}$  y así tener  $I_{C1} = I_{C2}$ .

4) Entrada de audio:

$$h_{ie3} = 200 \cdot \frac{26mV}{1mA} = 5k\Omega$$

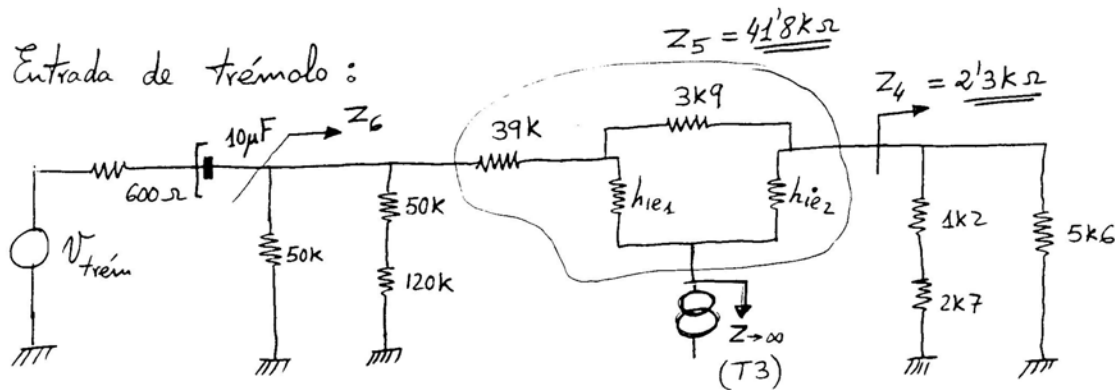


$$Z_3 = h_{ie3} + (1 + h_{fe}) \cdot 2k = 407k\Omega$$

$$Z_2 = [10k + 2k7 // (1k2 + 5k6)] // Z_3 \approx 10k + 2k7 // (1k2 + 5k6) = 11'9k\Omega$$

$$f_{cinf} = \frac{1}{2\pi \cdot 1\mu F (600\Omega + 11k9)} = 12'73 Hz$$

Entrada de trémolo:

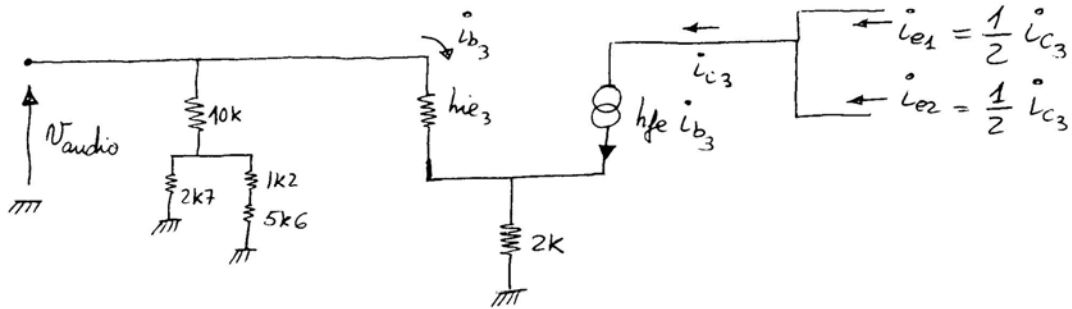


$$Z_6 = 50k // 170k // 44'1k = 38'6k // 44'1k = 20'6k\Omega$$

$$h_{ie1} = h_{ie2} = 2 \cdot h_{ie3} = 10k4$$

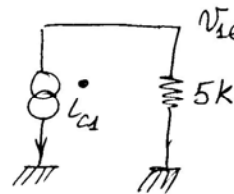
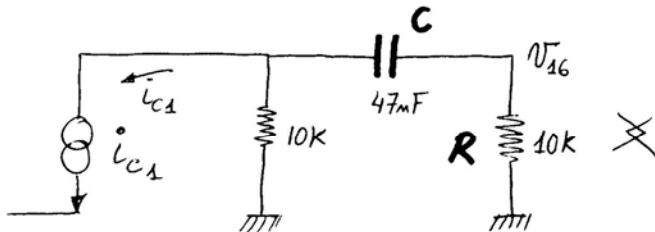
$$f_{cinf. trémolo} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\mu F \cdot (20k6 + 600)} = 0'75 Hz$$

5)



$$\frac{i_{c3}}{V_{audio}} = \frac{h_{fe} i_{b3}}{i_{b3} (h_{ie3} + (1+h_{fe}) \cdot 2k)} \approx \frac{h_{fe} i_{b3}}{i_{b3} \cdot (1+h_{fe}) \cdot 2k\Omega} = \frac{1}{2k\Omega}$$

$$i_{e1} = \frac{1}{2} i_{c3} \Rightarrow \frac{i_{e1}}{V_{audio}} = \frac{\frac{1}{2} i_{c3}}{V_{audio}} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2k\Omega} \approx \frac{i_{c1}}{V_{audio}} \left( i_{c1} \approx i_{e1} \right)$$



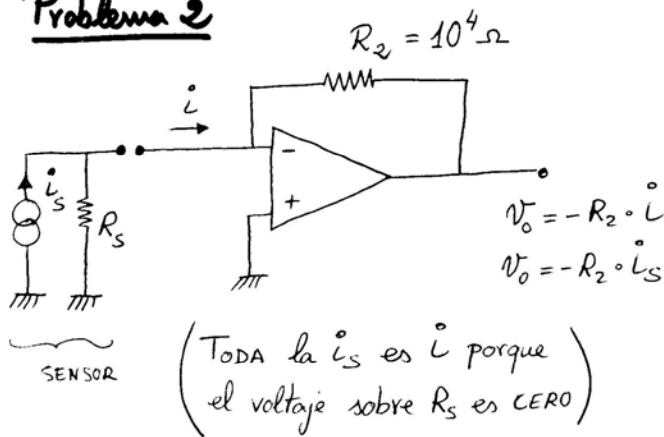
Suponemos que a frecuencias medias el condensador acopla bien

$$\frac{V_{16}}{V_{audio}} = \frac{i_{c1}}{V_{audio}} \times \frac{V_{16}}{i_{c1}} = \left( \frac{1}{2} \times \frac{1}{2k} \right) \times (-5k\Omega) = \frac{-5}{4} = -1.25$$

6) La expresión  $\frac{1}{2\pi \cdot C (R + 10k\Omega)}$  da la frecuencia de corte inferior del acoplo debido al condensador de 47mF. Su valor exacto  $169.3\text{Hz} \approx 160\text{Hz}$  indica que las frecuencias  $f > 160\text{Hz}$  entrarán bien al amplificador. Es el caso de  $f_{audio} = 200\text{Hz}$  con el trémolo de 12Hz ("Portadora" a 200Hz y bandas laterales a 212Hz y 188Hz)  $\rightarrow$  Visión multiplicador

En el caso de  $f_{audio} = 60\text{Hz}$  y trémolo a 12Hz ("Portadora" a 60Hz y bandas laterales a 48Hz y 72Hz) las señales pasan algo atenuadas por estar en frecuencias por debajo de 160Hz.

## Problema 2



$$V_{ON} = \left(1 + \frac{R_2}{R_s}\right) \sqrt{e_n^2 + (i_n R_N)^2 + 4KT R_N}$$

SPOT NOISE

$$R_N = R_2 \parallel R_s$$

$$R_N = 9.1 k\Omega$$

porque  $R_s = 100 k\Omega$  y  $R_2 = 10 k\Omega$

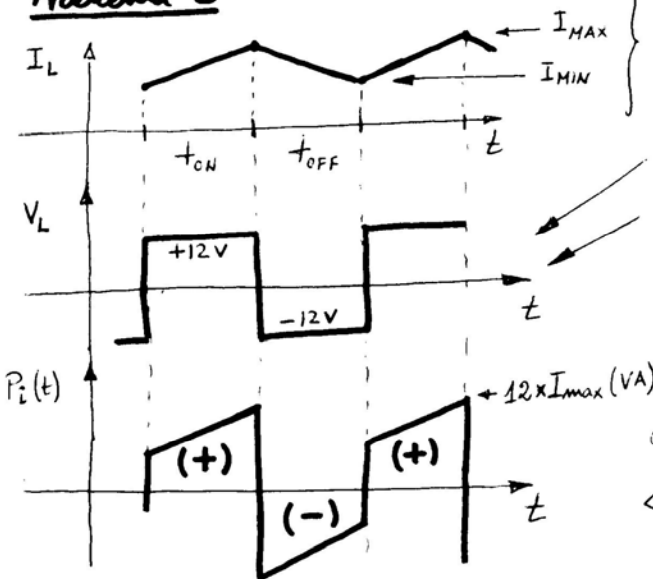
$$V_{ON, SPOT} = \left(1 + 0.1\right) \sqrt{e_n^2 + (i_n R_N)^2 + \frac{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 9.100}{1.5 \cdot 10^{-16} = 150 \cdot 10^{-18}}}$$

$36 \cdot 10^{-18} + 8.28 \cdot 10^{-23} \leftarrow LT1169$   
 $0.72 \cdot 10^{-18} + 59.8 \cdot 10^{-18} \leftarrow LT1028 \text{ (este es peor)}$

Tomamos el LT1169 y despreciamos  $100 Hz$  frente a  $40.000 Hz \Rightarrow BW_{NOISE} = \frac{\pi}{2} \cdot 10^4 Hz$

$$V_{ON, eff} = (1 + 0.1) \sqrt{[36 \cdot 10^{-18} + 8.28 \cdot 10^{-23} + 150 \cdot 10^{-18}] \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10.000} = 1.9 \mu V_{eficaces}$$

## Problema 3



$$\Delta I_L = (I_{MAX} - I_{MIN}) = \frac{V_{LON}}{L} \cdot t_{ON} = \frac{V_{LOFF} \cdot t_{OFF}}{L}$$

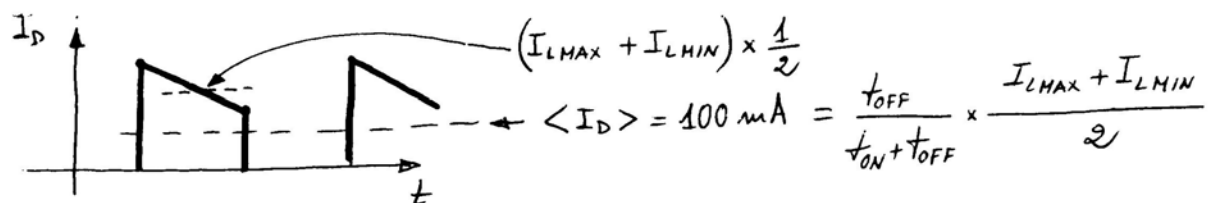
$$\Sigma t_{OFF} : V_{IN} - V_{LOFF} = V_{OUT} + V_D = 24.2 V$$

$$\text{Luego } V_{LOFF} = 12.2 - 24.2 = -12 V$$

$$\text{Si } t_{ON} = t_{OFF} \Rightarrow V_{LON} = |V_{LOFF}|$$

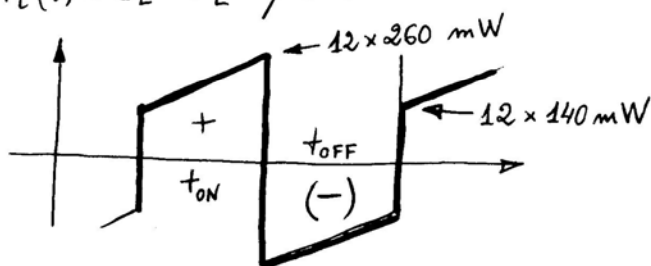
$$\Delta I_L = \frac{12V}{1.5 mH} \cdot 15 \mu s = 120 mA$$

La corriente media por el diodo  $\langle I_D \rangle$  ha de ser los  $100 mA$  de corriente de salida. Por tanto:



Por tanto:  $\begin{cases} I_{LMAX} + I_{LMIN} = 400 \text{ mA} \\ I_{LMAX} - I_{LMIN} = 120 \text{ mA} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{LMAX} = 260 \text{ mA} \\ I_{LMIN} = 140 \text{ mA} \end{cases}$

Ahora hay dos caminos: a) completar la gráfica de potencia instantánea  $P_i(t) = V_L \times I_L$  y calcular una de las áreas positiva (+) o negativa (-).



$$\text{Area (+)} = \frac{12 \times 260 + 12 \times 140}{2} \cdot t_{ON}$$

$$\text{Area (+)} = 36.000 \text{ mJ} = 36 \mu\text{Julios}$$

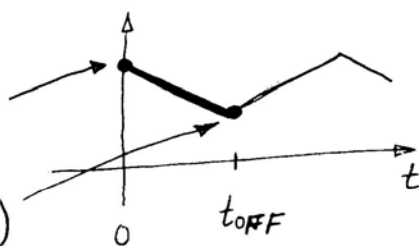
$$\text{Area (-)} = 36 \mu\text{Julios}.$$

La potencia disipada en promedio por la bobina es cero, luego la frase es cierta en su primera parte. No es cierta en cuanto a la energía almacenada durante  $t_{ON}$  y cedida durante  $t_{OFF}$ , ya que no es de  $63 \mu\text{J}$ , sino de  $36 \mu\text{Julios}$ .

b) Otra forma de ver la energía almacenada durante  $t_{ON}$  (o la perdida durante  $t_{OFF}$ ) es ésta:

$$U_L(t=0) = \frac{1}{2} L \cdot \dot{I}^2(t=0)$$

$$U_L(t=t_{OFF}) = \frac{1}{2} L \cdot \dot{I}^2(t=t_{OFF})$$



$$\Delta U_L = \frac{1}{2} L \left[ (260 \cdot 10^{-3})^2 - (140 \cdot 10^{-3})^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot 1'5 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{\underline{\Delta U_L = 36 \cdot 10^{-6} \text{ Julios}}}$$



1) Visión como amplificador cascodo con ganancia variable. Perfectamente válido

$T_3$  es un amplificador en emisor común de la señal de audio, por lo que en su colector recogeremos señal amplificada proporcional a su  $g_{m3}$  y a la impedancia vista en los emisores de  $T_1$  y  $T_2$ . Esta es aproximadamente constante y de bajo valor al ser  $T_1$  y  $T_2$  transistores en base común (casi en BC, con lo que esa impedancia sería del orden de  $g_{m3}^{-1}$ ).

Sin embargo el transistor  $T_1$  es casi un base común cuya señal en colector (y su ganancia en tensión por tanto) es proporcional a su  $g_{m2}$  (y a su corriente de colector por tanto).

El efecto de la señal de trémolo es variar el reparto de  $I_{C3}$  entre  $I_{E2}$  e  $I_{E1}$  (o entre  $I_{C2}$  e  $I_{C1}$ ) con lo que la ganancia del par ( $T_3, T_1$ ) depende de ese reparto y así la señal de audio es más o menos amplificada, al ritmo de la señal de trémolo. Tendremos por tanto:

