

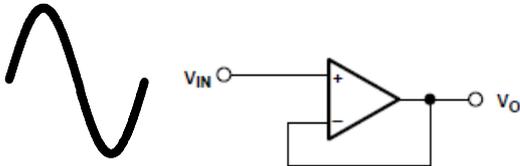
# **SISTEMAS ELECTRÓNICOS**

Grados en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones, Sistemas Audiovisuales, Telemática y Tecnologías de Telecomunicación

Ejercicios propuestos Tema 5:  
“Amplificador Operacional y Circuitos de Aplicación”

## EJERCICIO 1

Se dispone de un amplificador operacional cuya respuesta en frecuencia se muestra en la Figura C1.1. Como dato adicional se conoce que dicho amplificador operacional presenta un "slew rate" de  $16 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Se pretende utilizar dicho amplificador en la configuración de seguidor de tensión.



Se pide estimar justificadamente, cual puede ser la máxima frecuencia de una onda sinusoidal que aplicada en la entrada  $V_{IN}$  será amplificada sin presentar ningún tipo de distorsión o desfase con respecto a la onda de partida para dos casos:

- Amplitud  $V_{in} = 50 \text{ mV}$
- Amplitud  $V_{in} = 3 \text{ V}$ .

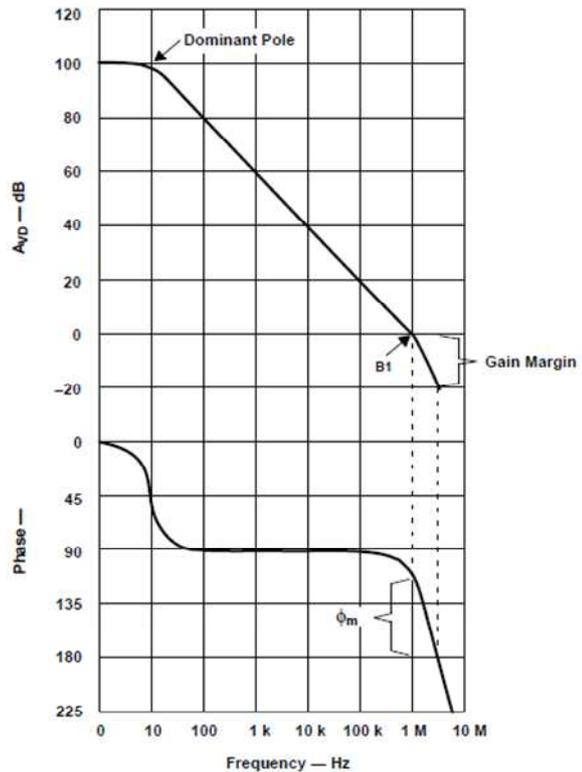


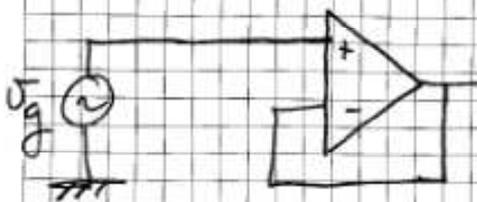
Figura C1.1

## CUESTIÓN 1

La definición del "slew rate" es:

$$SR = \left( \frac{dv}{dt} \right)_{\max}$$

Para averiguar la frecuencia máxima para la que este parámetro no significará una limitación, se supone una tensión de entrada sinusoidal en la entrada del amplificador:



$$v_g = A \cdot \text{sen } \omega t$$

Por tanto:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} [A \cdot \text{sen } \omega t] = A \cdot \omega \cdot \text{cos } \omega t$$

$$\left( \frac{dv}{dt} \right)_{\max} = (A \cdot \omega)_{\max} = A \cdot \omega_{\max} = SR$$

y de esta expresión se tiene:

$$A \cdot 2\pi f_{\max} = SR \rightarrow \boxed{f_{\max} = \frac{SR}{2\pi A}}$$

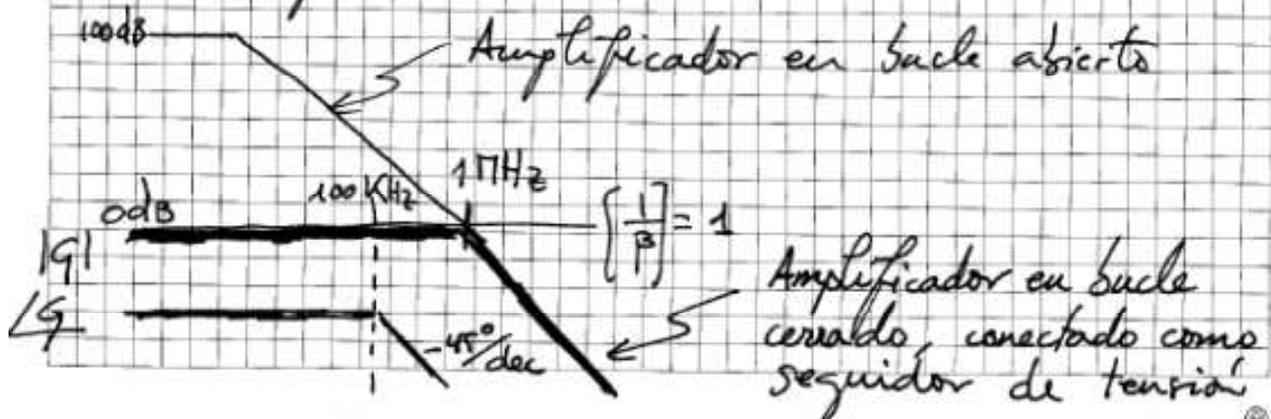
TENSIÓN DE GRAN SEÑAL:  $\hat{V}_{in} = 3V$

$$f_{\max} = \frac{16 V/\mu s}{2\pi \cdot 3V} = 848 \text{ KHz}$$

TENSIÓN DE PEQUEÑA SEÑAL

$$f_{\max} = \frac{16 V/\mu s}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 51 \text{ MHz}$$

Por otro lado, el ancho de banda del amplificador operacional, también supone una limitación a la frecuencia máxima:



Por tanto la frecuencia máxima que puede amplificar el seguidor de tensión sin que aparezca desfase en la salida son 100 KHz

	SR	$f_{max}$	$\Delta B$
$\hat{V}_{in} = 3V$	848 KHz	100 KHz	
$\hat{V}_{in} = 50mV$	51 MHz	100 KHz	

CASO MAS DESFAVORABLE

$$f_{max} = 100 \text{ KHz}$$

## EJERCICIO 2

Se quiere realizar un integrador (Figura C2.1) mediante un amplificador operacional real, que presenta una tensión de desviación de  $2 \mu\text{V}$ . ¿Qué función cumple la resistencia  $R_2$ ? ¿Cómo se calcularía su valor?

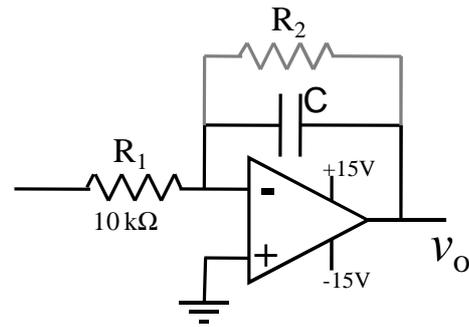
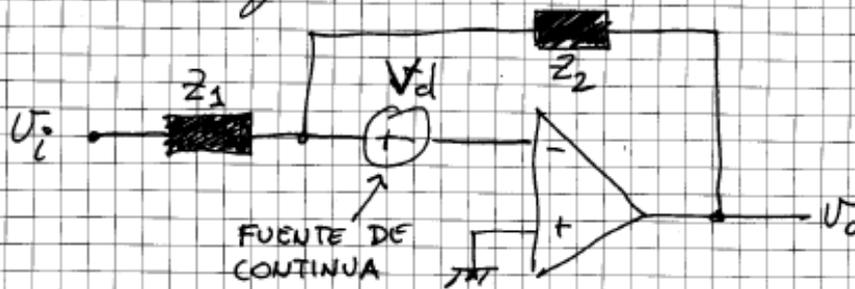


Figura C2.1

### CUESTIÓN 2

El circuito de la figura C2.1 se modifica al tener en cuenta la tensión de desviación de la siguiente manera:

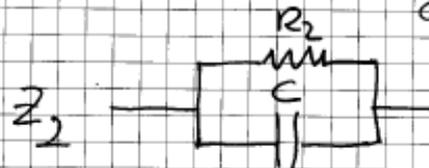


Este circuito responde a la expresión

$$V_0 = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot V_i + \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \cdot V_d$$

Ya que la tensión de desviación es continua, hay que analizar su efecto en continua y sin entrada:  $V_i = 0$

Además en continua  $Z_2$  se convierte en  $R_2$



Por tanto se tiene

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_d < 15 \text{ V} \quad \left(\begin{array}{l} V_{cc} \\ \text{tensión de} \\ \text{alimentación} \end{array}\right)$$

$$1 + \frac{R_2}{R_1} < \frac{V_{cc}}{V_d}$$

$$\frac{R_2}{R_1} < \frac{V_{cc}}{V_d} - 1$$

$$R_2 < R_1 \left[ \frac{V_{cc}}{V_d} - 1 \right]$$

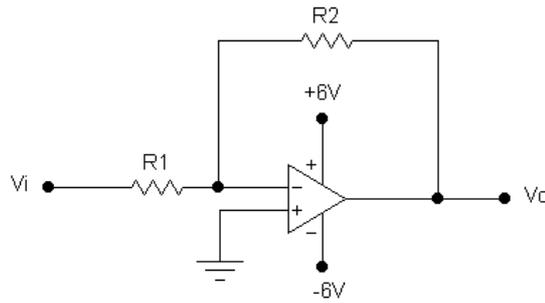
$$R_2 < 10 \text{ K}\Omega \left[ \frac{15}{2 \cdot 10^{-6}} - 1 \right]$$

$$R_2 < 10 \text{ K}\Omega \cdot (7.5 \cdot 10^6)$$

$R_2$  sirve para que el operacional no se sature por el efecto de la tensión de derivación, dada la enorme ganancia en DC que presenta el integrador.

### EJERCICIO 3

Dado el amplificador de la figura:



**Datos:**  $R1=1.8k\Omega$ ,  $R2=900k\Omega$ ,

$$V_i(t)=10mV \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 10kHz \cdot t)$$

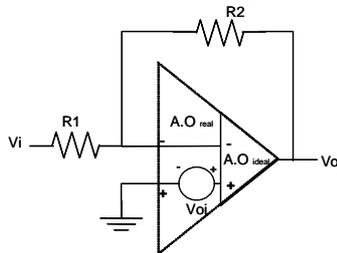
Amplificador operacional: Tensión de offset de entrada ( $V_{oi}$ ) = 5mV, en el resto de características puede considerarse ideal.

#### SE PIDE:

- Obtenga la tensión de salida del circuito ( $V_o$ ), para la tensión de entrada ( $V_i$ ) dada.
- Represente, en función del tiempo, la señal de salida del circuito para la señal de entrada dada. No olvide acotar claramente la señal en los ejes de tensión y tiempo.

#### SOLUCIÓN:

a) Si añadimos al A.O ideal un generador de tensión independiente para modelar el efecto de la tensión de offset de entrada el circuito nos queda como sigue:



Analizando el circuito, aplicando el teorema de superposición, nos queda:

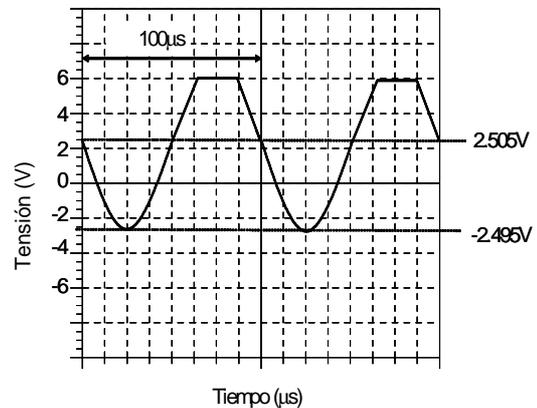
$$V_o = V_{o1}\Big|_{V_{oi}=0} + V_{o2}\Big|_{V_i=0} = -\frac{R2}{R1} \cdot V_i \pm \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot V_{oi}$$

$$\Rightarrow V_o = 5V \text{sen}(2\pi \cdot 10kHz \cdot t - \pi) \pm 2.505V$$

b) Representación de  $V_o$  en función del tiempo

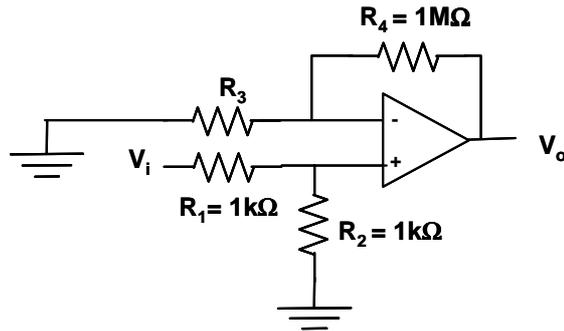
(tomando

$$V_o = 5V \text{sen}(2\pi \cdot 10kHz \cdot t - \pi) + 2.505V)$$



## EJERCICIO 4

Dado el amplificador de la figura:



### Datos:

$V_i$  es una señal cuadrada de 10mV de amplitud y 100kHz.

Amplificador operacional: Corriente de polarización de entrada  $I_B = 100$  nA, Slew Rate =  $1V/\mu s$ , en el resto de características puede considerarse ideal.

El Amplificador Operacional está alimentado entre +5 V y -5 V

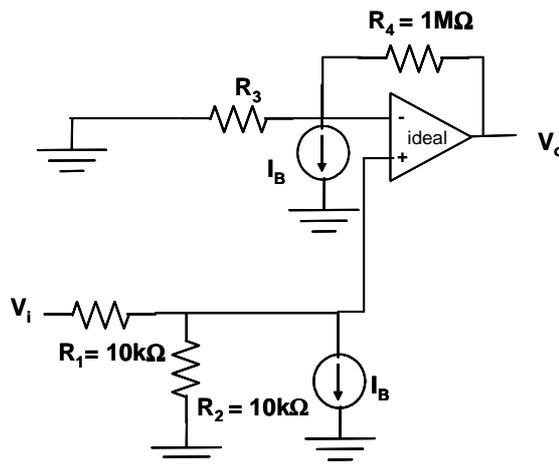
### SE PIDE:

- Si  $R_3 = 10$  k $\Omega$ , obtenga la tensión de salida del circuito ( $V_o$ ), para la tensión de entrada ( $V_i$ ) dada. Represente ambas señales,  $V_i$  y  $V_o$  en función del tiempo, acotándolas claramente en tensión y tiempo.
- ¿Qué valor habría que dar a  $R_3$  para minimizar el efecto de la corriente de polarización de entrada a la salida,  $V_o$ , del circuito? Razone su respuesta.

### SOLUCIÓN

- Si  $R_3 = 10$  k $\Omega$ , obtenga la tensión de salida del circuito ( $V_o$ ), para la tensión de entrada ( $V_i$ ) dada. Represente ambas señales,  $V_i$  y  $V_o$  en función del tiempo, acotándolas claramente en tensión y tiempo.

Modelando la corriente de polarización de entrada del A.O., el circuito a analizar queda:



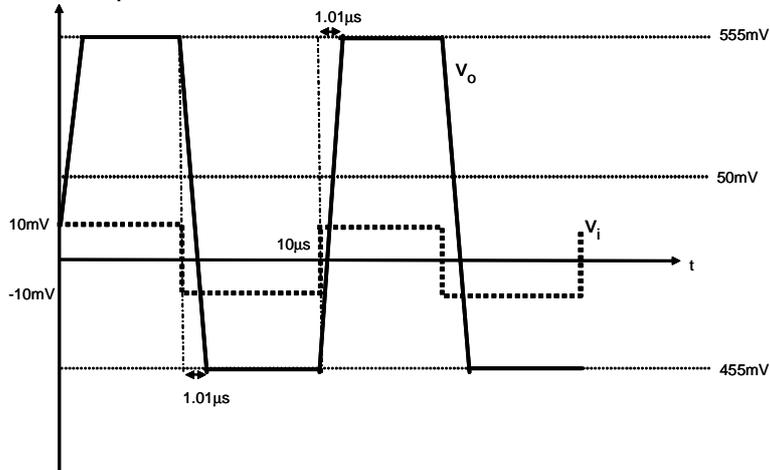
Aplicando el principio de superposición se tiene:

$$V_o = V_o \Big|_{I_B=0}^{V_i} + V_o \Big|_{V_i=0}^{I_B}$$

Resolviendo se obtiene:

$$v_o = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \cdot v_i + \left( 1 - \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 \parallel R_4} \right) \cdot R_4 \cdot I_B = 50.5 \cdot v_i + 50mV$$

Con lo que la representación de  $v_i$  y  $v_o$  en función del tiempo, teniendo en cuenta el SR del A.O queda:



- b) ¿Qué valor habría que dar a  $R_3$  para minimizar el efecto de la corriente de polarización de entrada a la salida,  $V_o$ , del circuito? Razone su respuesta.

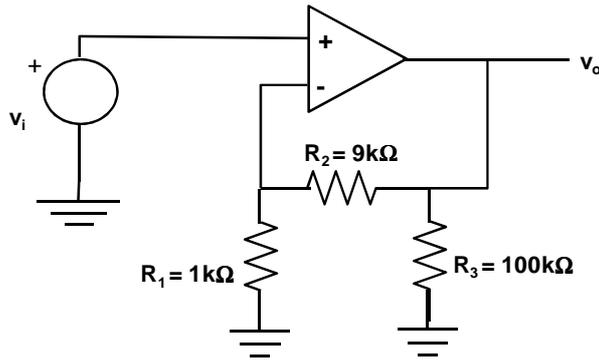
Para minimizar la contribución de  $I_B$  a la tensión de salida del circuito:

$$v_o|_{I_B} = \left( 1 - \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 \parallel R_4} \right) \cdot R_4 \cdot I_B = 0 \quad \text{si}$$

$$R_1 \parallel R_2 = R_3 \parallel R_4 \Rightarrow R_3 = 4.98k\Omega \cong 5k\Omega$$

## EJERCICIO 5

Dado el circuito de la Figura:



**DATOS:** El amplificador operacional está alimentado a  $\pm 10V$  y puede considerarse ideal en todas sus características excepto en su Slew Rate,  $SR = 0.5V/\mu s$ .

### SE PIDE:

- Si  $v_i$  es una señal sinusoidal sin componente continua y 1kHz de frecuencia, determine la máxima amplitud de  $v_i$  ( $V_{i\text{máx}}$ ) para obtener en  $v_o$  una señal sin distorsión.
- Si  $v_i$  es una señal cuadrada con 2.5V de componente continua, 2.5V de amplitud y 10kHz de frecuencia, represente dos períodos de la señal de entrada,  $v_i$ , y de salida del circuito,  $v_o$ . Razone su respuesta incluyendo todos los cálculos que le hayan permitido dibujar  $v_o$ .

### SOLUCIÓN:

- Si  $v_i$  es una señal sinusoidal sin componente continua y 1kHz de frecuencia, determine la máxima amplitud de  $v_i$  ( $V_{i\text{máx}}$ ) para obtener en  $v_o$  una señal sin distorsión.

Aplicando el principio de cortocircuito virtual, se tiene que la ganancia del circuito de la figura es:

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10 \frac{V}{V}$$

La señal de salida se puede distorsionar por el efecto del slew rate (SR) o por el recorte debido a la limitación de la alimentación del amplificador operacional.

- Calculando primero el efecto del SR,  $v_o$  se distorsionará si  $\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\text{max}} > SR$ . Para la señal de entrada dada

$$v_o(t) = V_{ip} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 1\text{kHz}t) = 10 \cdot V_{ip} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 1\text{kHz}t) \Rightarrow \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\text{max}} = 10 \cdot V_{ip} \cdot 2\pi \cdot 1\text{kHz}$$

Por lo tanto, habrá distorsión en la señal de salida, debida al SR, si

$$\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\text{max}} > SR \Rightarrow V_{ip} > \frac{SR}{10 \cdot 2\pi \cdot 1\text{kHz}} \Rightarrow V_{ip} > 8V_p$$

- Calculando ahora la limitación debida a la alimentación de amplificador operacional,  $V_{op\text{máx}} = 10V = V_{ip\text{máx}} \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \Rightarrow V_{ip\text{máx}} = \frac{10V}{10} = 1V_p$

Por lo tanto, en este caso, es más restrictivo el recorte debido a la alimentación y

$$v_{i\text{max a)}} = 1V_p$$

- Si  $v_i$  es una señal cuadrada con 2.5V de componente continua, 2.5V de amplitud y 10kHz de frecuencia, represente dos períodos de la señal de

entrada,  $v_i$ , y de salida del circuito,  $v_o$ . Razone su respuesta incluyendo todos los cálculos que le hayan permitido dibujar  $v_o$ .

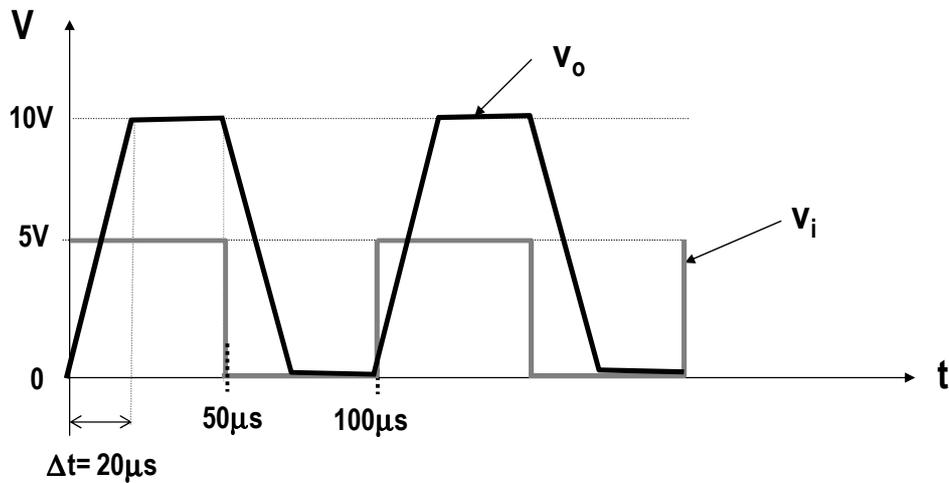
En este caso:

- al tratarse de una señal de entrada cuadrada, la señal de salida estará distorsionada debido al SR.
- como la amplitud es  $>1V_p$ , la señal de salida también estará recortada a 10V debido a la limitación de la alimentación del amplificador operacional.

El tiempo que tardará  $v_o$  en pasar de su valor mínimo (0V) a su valor máximo (10V), estará condicionado por el SR y será:

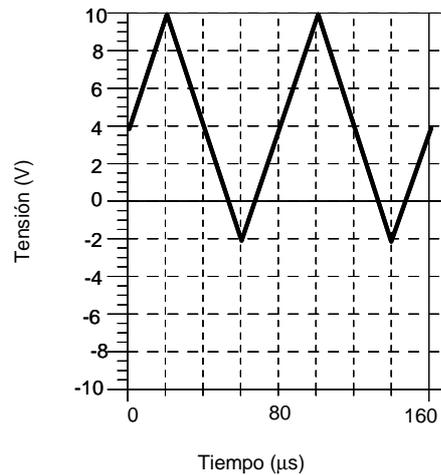
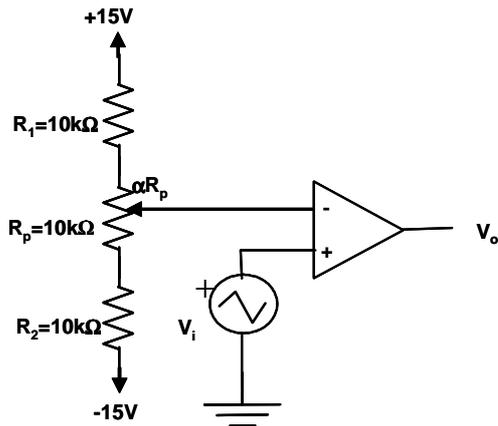
$$\Delta t = \frac{\Delta V}{SR} = \frac{10V}{0.5V/\mu s} = 20\mu s$$

Con todo ello, la representación, en función del tiempo, de las señales de entrada y salida del circuito queda como sigue:



## EJERCICIO 6

Dado el circuito de la Figura



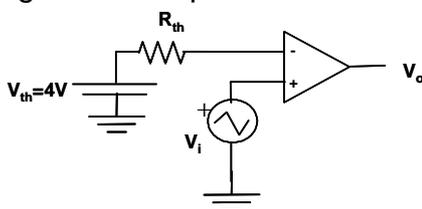
### DATOS:

- La posición del cursor del potenciómetro es  $\alpha = 0.1$
- El amplificador operacional está alimentado a  $\pm 10V$  y puede considerarse ideal en todas sus características excepto en su Slew Rate,  $SR = 1V/\mu s$

Represente en la gráfica adjunta, la señal de salida del circuito,  $V_o$ , si se introduce una señal de entrada  $V_i$  como la representada. Razone su respuesta incluyendo todos los cálculos que le hayan permitido calcular  $V_o$ .

### SOLUCIÓN:

Se trata de un comparador simple en configuración no inversora. Calculando el circuito equivalente de Thévenin entre la entrada inversora y la referencia del circuito, el circuito de la figura 2 es equivalente a:



donde

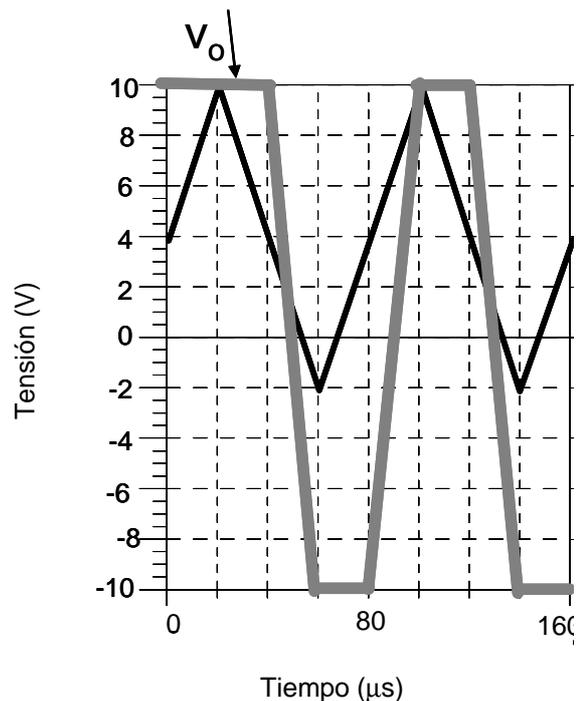
$$V_{th} = \left( (1 - \alpha)R_p + R_2 \right) \frac{30V}{R_1 + R_p + R_2} - 15V = 4$$

Con el amplificador operacional ideal:

$$v_o = +10V \quad \text{si} \quad v_i > 4V$$

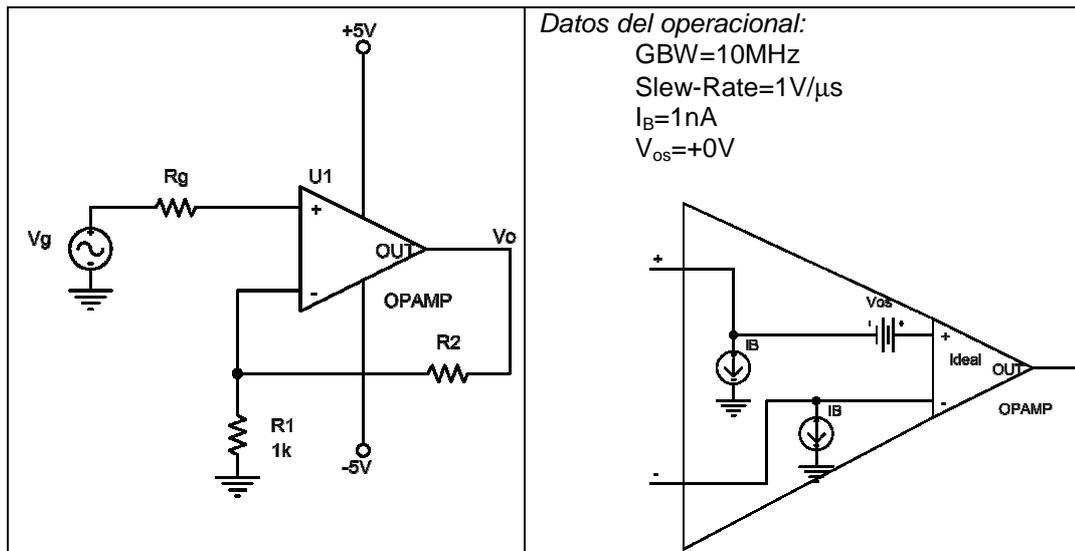
$$v_o = -10V \quad \text{si} \quad v_i < 4V$$

Teniendo en cuenta el Slew Rate del amplificador operacional la señal de salida del circuito, para la señal de entrada dada, queda como se representa en la gráfica (suponiendo en  $t=0$ ,  $V_o = +10V$ ):



## EJERCICIO 7

El siguiente circuito práctico es un amplificador de tensión de 20dB:



*Datos del operacional:*

GBW=10MHz

Slew-Rate=1V/ $\mu$ s

$I_B=1$ nA

$V_{os}=+0$ V

**Conteste a las siguientes preguntas:**

- 1) Considerando el operacional ideal en todas sus características, y dada la  $R_1$  de la figura, calcule  $R_2$  para conseguir los 20dB de ganancia de tensión ( $V_o/V_g$ ).
- 2) El operacional tiene el producto GBW de la figura y se considera ideal para el resto de características. Determine la frecuencia máxima del generador de entrada  $V_g$  para amplificar los 20dB sin distorsión de fase ni de amplitud.
- 3) Suponga que  $V_g$  es una fuente senoidal de 100kHz. Determine la amplitud máxima que se puede usar en ese generador teniendo en cuenta que el operacional tiene el Slew-Rate de la figura. Tenga en cuenta que el amplificador es de 20dB.
- 4) Calcule  $R_g$  para compensar una corriente de polarización  $I_B=1$ nA. Considere el operacional ideal para el resto de características. Suponga  $R_2=9$ K $\Omega$  para este apartado.

## SOLUCION:

1)

Ganancia  $V_o/V_g = G = 1 + R_2/R_1$

$$G = 10^{20\text{dB}/20} = 10\text{V/V} \rightarrow R_2 = 9R_1 = 9\text{K}\Omega$$

2)

$$G \cdot f_p = \text{GBW} \rightarrow 10 \cdot f_p = 10\text{MHz} \rightarrow f_p = 1\text{MHz}$$

Para evitar distorsión de fase tenemos que situarnos una década antes del polo:

$$f_{\text{max}} = 100\text{KHz}$$

3)

La pendiente máxima de una señal senoidal  $A \sin(\omega t)$  viene dada por  $A\omega$

$$(\max d/dt (A \sin(\omega t))) = \max A\omega \cos(\omega t) = A\omega$$

La limitación de SR se produce en la señal de salida. Por tanto,

$$A_o \cdot 2\pi \cdot 100\text{KHz} = 1\text{V}/\mu\text{s} \rightarrow A_o = 1.6\text{V de amplitud a la salida}$$

Teniendo en cuenta la ganancia de 10 V/V

$$A_g = 160\text{mV}$$

4)

Independientemente del valor de  $I_B$ ,

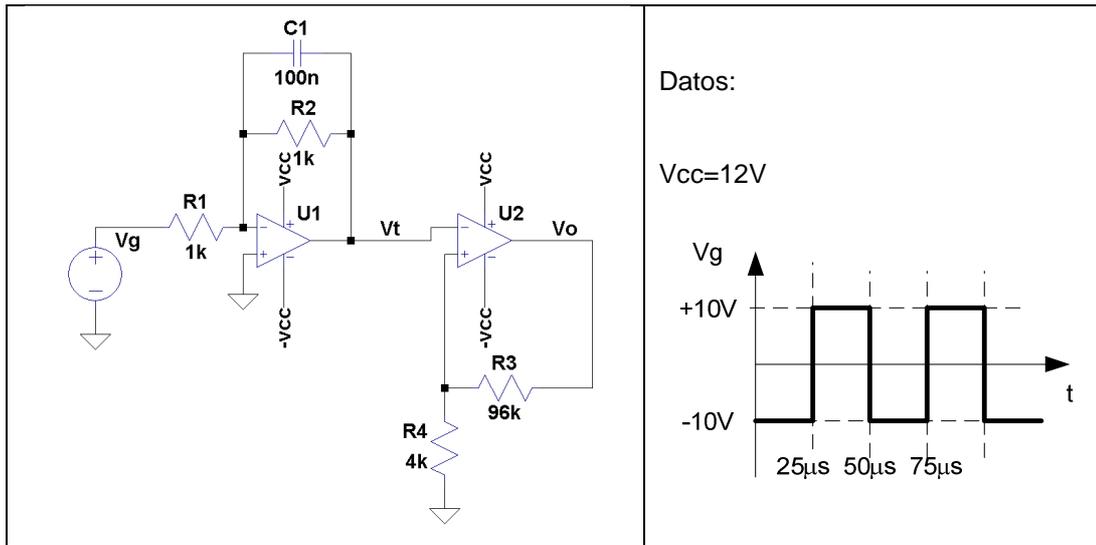
$$V_o = f_1(V_g) + f_2(I_B)$$

0

$$0 = R_2 \cdot I_B - R_g \cdot I_B \cdot (1 + R_2/R_1) \rightarrow R_g = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 900\Omega$$

## EJERCICIO 8

Se quiere usar el siguiente circuito para desfasar una onda cuadrada, mediante integración y comparación con histéresis:



Conteste a las siguientes preguntas:

- 1) Calcule el periodo y la amplitud de  $V_t$  en régimen permanente. Dibuje un ciclo de  $V_g$  y  $V_t$  en régimen permanente acotando tensiones y tiempos.
- 2) ¿Qué forma de onda obtendría en  $V_t$  si el semiperiodo de  $V_g$  es 1ms, y cuál sería su amplitud? Dibújela de forma aproximada y justifique su respuesta.
- 3) Calcule y dibuje la función de transferencia del comparador,  $V_o/V_t$ .
- 4) Calcule el Slew-Rate en  $V/\mu s$  que necesita el amplificador U2 para que la pendiente de subida nunca supere los 100ns en  $V_o$ .

## SOLUCIÓN

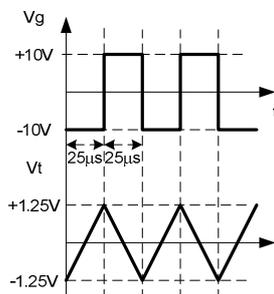
- 1) Calcule el periodo y la amplitud de  $V_t$  en régimen permanente. Dibuje un ciclo de  $V_g$  y  $V_t$  en régimen permanente acotando tensiones y tiempos.

$$R_2 \cdot C_1 = 10^{-4} \text{ s} = 1 \text{ ms} > 25 \mu \text{ s} \text{ (semiperiodo de } V_g \text{)}$$

Por tanto, el circuito se comporta como un integrador (inversor), produciendo una señal triangular de la misma frecuencia que  $V_g$  y desfasada  $180^\circ$ . Dentro de un semiperiodo su amplitud será:

$$\Delta V_t = 10 / R_1 / C_1 \cdot T / 2 = 2.5 \text{ V}$$

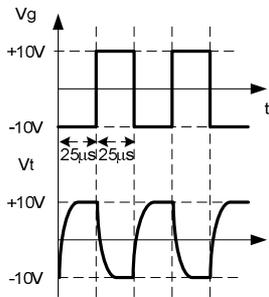
Por tanto, en régimen permanente:



- 2) ¿Qué forma de onda obtendría en  $V_t$  si el semiperiodo de  $V_g$  es 1ms, y cuál sería su amplitud? Dibújela de forma aproximada y justifique su respuesta.

Si el semiperiodo es 1ms, como  $R_1 \cdot C_1 = 0.1 \text{ ms}$ , el condensador tiene tiempo suficiente para cargarse completamente. Por tanto,  $V_t$  tendrá la misma amplitud y frecuencia que  $V_g$ , y será una señal cuadrada con subidas y bajadas exponenciales.

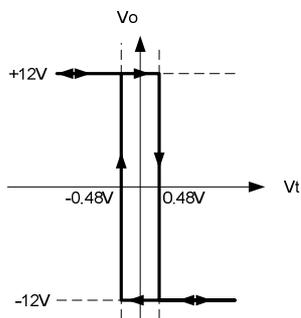
De forma aproximada:



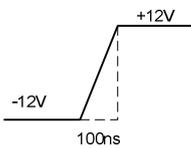
3) Calcule y dibuje la función de transferencia del comparador,  $V_o/V_t$ .

$$V_o = \begin{cases} +12V & \text{si } V_t < V_+ = 12 \cdot 0.04 = 0.48V \\ -12V & \text{si } V_t > V_+ = -12 \cdot 0.04 = -0.48V \end{cases}$$

$$V_+ = V_o \cdot R_4 / (R_3 + R_4) = V_o \cdot 4 / 100$$



4) Calcule el Slew-Rate en  $V/\mu s$  que necesita el amplificador U2 para que la pendiente de subida nunca supere los 100ns en  $V_o$ .



$$SR = 24V / 100ns = 240 V/\mu s$$

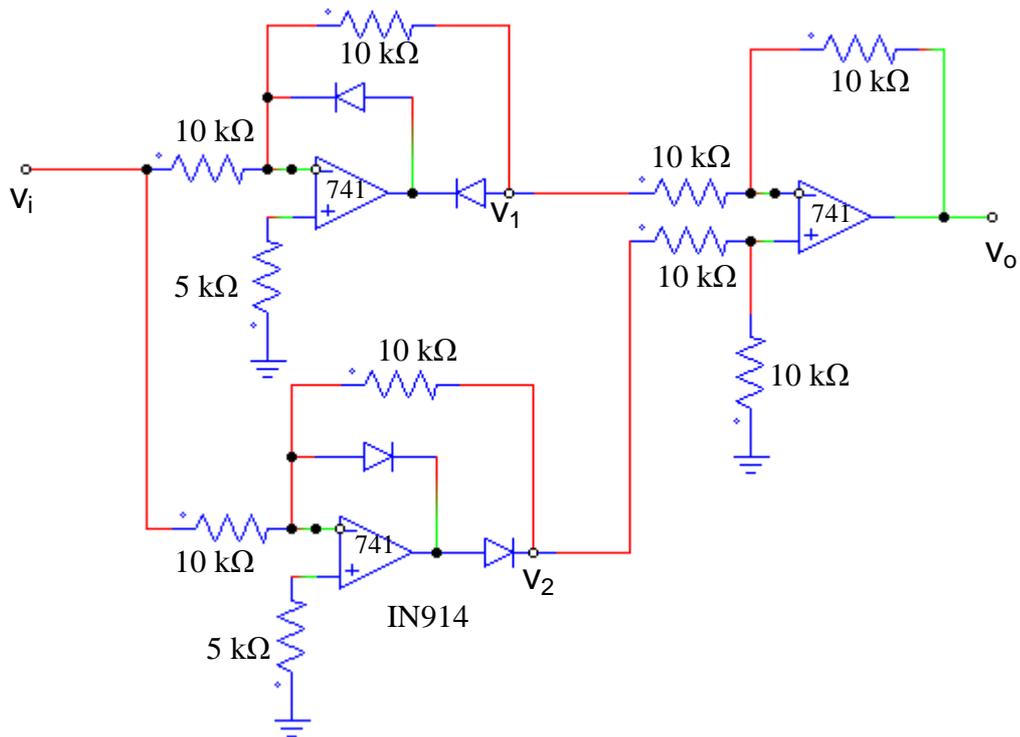
## EJERCICIO 9

En la figura se representa el esquemático de un sistema en el que se pueden considerar ideales tanto los diodos como los amplificadores operacionales.

Se pide:

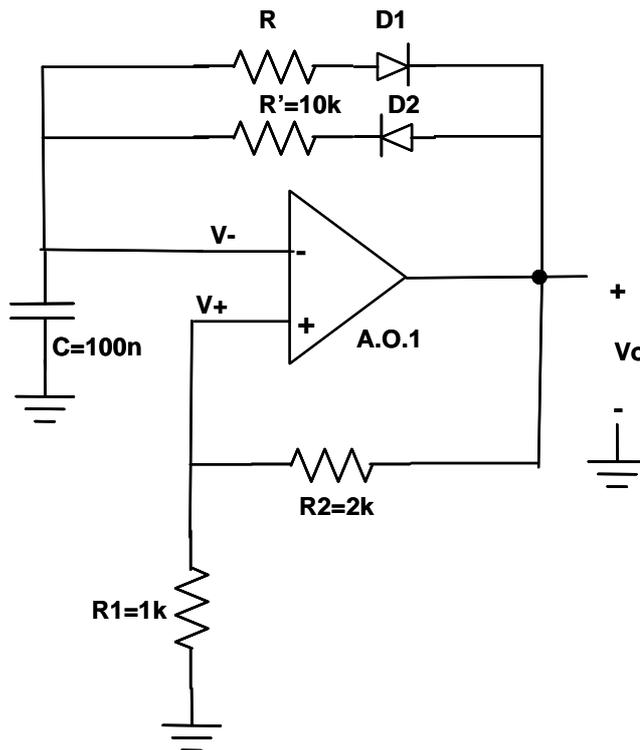
1.- Explique el funcionamiento de cada uno de los bloques en que se pueden descomponer el sistema y de su conjunto, obteniendo las funciones de transferencia:  $(V_1/V_i)$ ,  $(V_2/V_i)$  y  $(V_0/V_i)$ .

2.- Obtenga las formas de onda de las tensiones  $V_1$ ,  $V_2$ , y  $V_0$  para unas tensiones de entrada sinusoidal,  $V_i$ , de amplitudes 1V y 20V (en ambos casos suponga que la tensión de alimentación de los amplificadores operacionales es de  $\pm 15V$ ).



## EJERCICIO 10

Se desea generar una señal cuadrada,  $V_o$ , de 15V de amplitud y con un ciclo de trabajo del 20% utilizando el esquema de la Figura:



**DATOS:** D1 y D2 son diodos ideales. **A.O.1** es un amplificador operacional ideal alimentado a  $\pm 15V$

**SE PIDE:**

- Represente las formas de onda en función del tiempo, claramente acotadas, presentes en las entradas y la salida del amplificador operacional ( $V_+$ ,  $V_-$  y  $V_o$ ).
- Calcule el valor de la resistencia  $R$  para obtener la señal de salida con el ciclo de trabajo deseado.

**SOLUCIÓN:**

- Represente las formas de onda en función del tiempo, claramente acotadas, presentes en las entradas y la salida del amplificador operacional ( $V_+$ ,  $V_-$  y  $V_o$ ).

Se trata de un multivibrador astable (generador de onda cuadrada), por lo que la **salida  $V_o$**  será una señal cuadrada de amplitud 15V (tensión de alimentación del amplificador operacional ideal):

$$V_o = +15V \text{ si } V_+ > V_-$$

$$V_o = -15V \text{ si } V_+ < V_-$$

La **tensión en la entrada no inversora ( $V_+$ )**, con el amplificador operacional ideal, será:

$$V_+ = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_+ = +15V \frac{R_1}{R_1 + R_2} = +15V \frac{1k\Omega}{3k\Omega} = +5V \text{ si } V_o = +15V$$

$$V_+ = -15V \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -15V \frac{1k\Omega}{3k\Omega} = -5V \text{ si } V_o = -15V$$

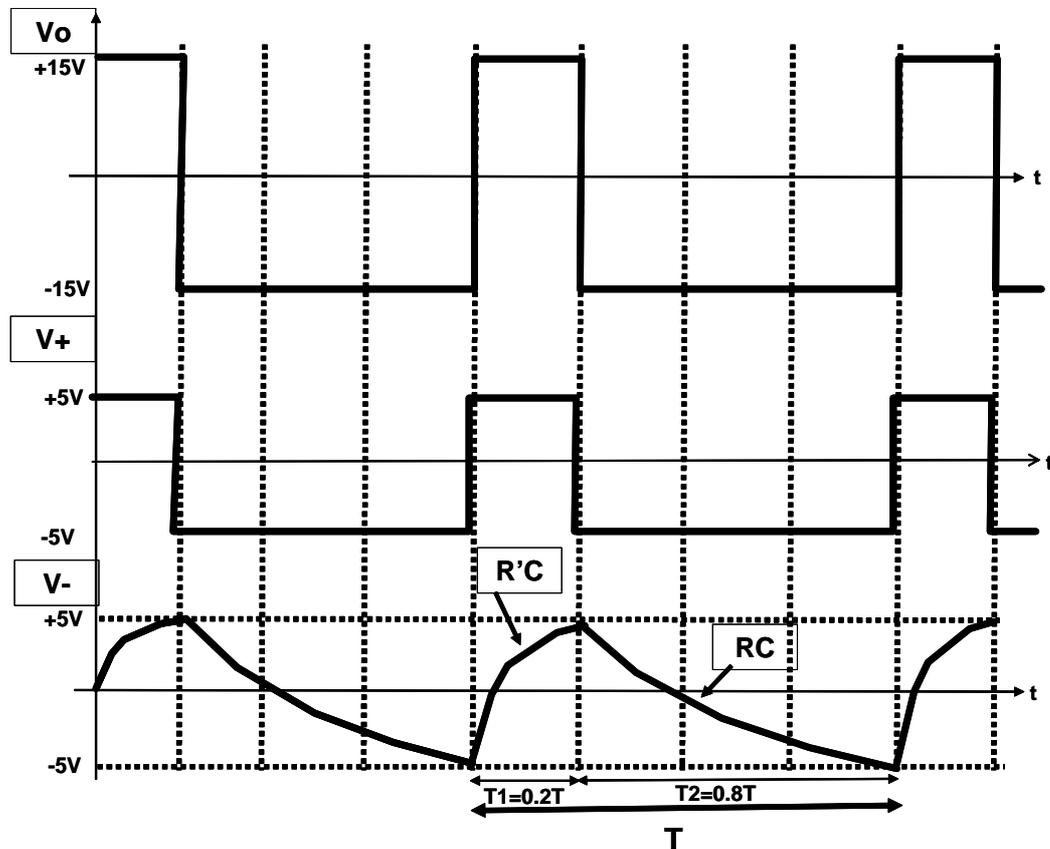
La **tensión en la entrada inversora ( $V_-$ )** es la tensión en el condensador  $C$  ( $V(C)$ ), con el amplificador operacional ideal, será:

$$V_- = V(C) = V - (t \rightarrow \infty) + (V - (t=0) - V - (t \rightarrow \infty)) \bullet e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Si  $V_o=+15V$  D1 estará en OFF y D2 en ON por lo que en este caso la constante de tiempo será  $\tau'=R'C$

Si  $V_o=-15V$  D1 estará en ON y D2 en OFF por lo que en este caso la constante de tiempo será  $\tau=RC$

Con todo ello las formas de onda presentes en las entradas y la salida del amplificador operacional serán, suponiendo en  $t=0$   $V_o=+15V$  y el condensador inicialmente descargado ( $V_-(t=0)=0$ ):



b) Calcule el valor de la resistencia R para obtener la señal de salida con el ciclo de trabajo deseado.

Particularizando la ecuación de  $V_-$  en el intervalo  $T_1$  se tiene:

$$V_-(T_1) = +15V + (-5V - (+15V)) \cdot e^{-\frac{T_1}{R'C}} = +5V \Rightarrow T_1 = -\ln(0.5) \cdot R'C \cong 0.7ms$$

Para tener un ciclo de trabajo del 20%  $\Rightarrow \frac{T_1}{T} \cdot 100 = 20\% \Rightarrow \frac{T_1}{T_1+T_2} = 0.2 \Rightarrow T_2 = 2.8ms$

Particularizando la ecuación de  $V_-$  en el intervalo  $T_2$  se tiene:

$$V_-(T_2) = -15V + (+5V - (-15V)) \cdot e^{-\frac{T_2}{RC}} = -5V \Rightarrow R = -\frac{T_2}{\ln(0.5) \cdot C} \cong 40k\Omega$$