

RED ACTIVA DE CONTROL DE TONO

Elaborado por Ing. Ramón Vargas Patrón
rvargas@inictel.gob.pe

División de Producción Académica

En la Fig. 1 se muestra una red de control de tono que emplea un OP-AMP y elementos pasivos R-C.

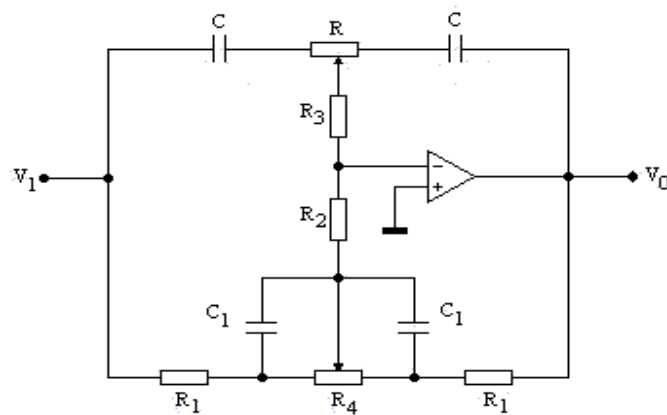


FIG.1 RED DE CONTROL DE TONO

Para frecuencias altas, los condensadores C_1 se comportan como cortocircuitos a la señal. Tenemos entonces el circuito equivalente de la Fig. 2.

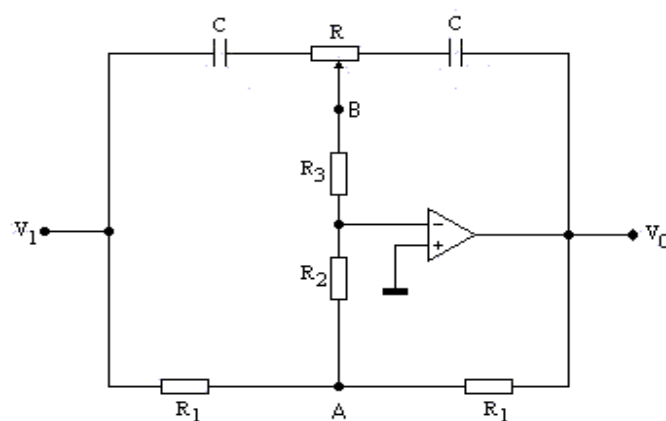


FIG.2 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA FRECUENCIAS ALTAS

Podemos escribir:

$$\frac{V_1 - V_A}{R_1} = \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_A - V_0}{R_1}$$

$$\frac{V_1 + V_0}{R_1} = V_A \left(\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$V_1 + V_0 = V_A \left(2 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$V_A = (V_1 + V_0) \left(\frac{R_2}{2R_2 + R_1} \right) \quad \dots (1)$$

Si hacemos $R_2 = R_1$, entonces:

$$V_A = \frac{V_1 + V_0}{3} \quad \dots (2)$$

Por otro lado:

$$\frac{V_A}{R_2} = - \frac{V_B}{R_3}$$

Luego:

$$V_B = - V_A \frac{R_3}{R_2} \quad \dots (3)$$

En la rama C-R-C (Fig. 2), el potenciómetro R permite el ajuste de los agudos.

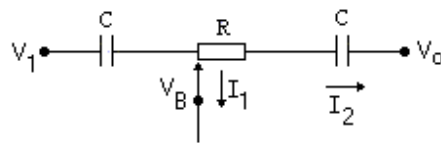


Fig.3 POSICION DEL CURSOR PARA MÁXIMO REFUERZO DE AGUDOS

Con el cursor de R en el extremo izquierdo (Fig. 3), tenemos máximo refuerzo de agudos. Asumiendo $I_1 \gg I_2$ (para simplificar los cálculos) tenemos:

$$\frac{V_B}{R_3} \gg \left| \frac{V_B - V_0}{R + \frac{1}{sC}} \right|$$

Donde $\left| R + \frac{1}{sC} \right|$ es la magnitud del fasor $R + \frac{1}{sC}$, con $s = j\omega$

$$\therefore \frac{\left| R + \frac{1}{sC} \right|}{R_3} \gg \frac{V_B - V_0}{V_B}$$

lo que es siempre cierto si:

$$\frac{R}{R_3} \gg \frac{V_B - V_0}{V_B}$$

Reemplazando la ec. (3) en la última expresión:

$$\frac{R}{R_3} \gg \frac{-V_A \frac{R_3}{R_2} - V_0}{-V_A \frac{R_3}{R_2}}$$

Sustituyendo la ec. (2):

$$\frac{R}{R_3} \gg \frac{\frac{V_1 + V_0}{3R_2} R_3 + V_0}{\frac{V_1 + V_0}{3R_2} R_3}$$

$$\therefore \frac{R}{R_3} \gg 1 + \left(\frac{V_0}{V_1 + V_0} \right) \left(\frac{3R_2}{R_3} \right)$$

Luego:

$$R \gg R_3 + \frac{\frac{V_0}{V_1}}{\left(1 + \frac{V_0}{V_1} \right)} (3R_2)$$

Para la posición de máximo refuerzo, usualmente se adopta $V_0/V_1 = -10$ (en el extremo alto del espectro de agudos).

$$\therefore R \gg R_3 + \frac{-10}{-9} (3R_2)$$

es decir:

$$R \gg R_3 + 3.33 R_2 \quad \dots(4)$$

La última expresión nos permite escribir:

$$\frac{V_A}{R_2} = - \frac{V_1}{R_3 + \frac{1}{sC}}$$

esto es:

$$\frac{V_1 + V_0}{3R_2} = -\frac{V_1}{R_3 + \frac{1}{sC}}$$

$$= -\frac{V_1 sC}{sR_3 C + 1}$$

$$\therefore (V_1 + V_0)(sR_3 C + 1) = -3V_1 sR_2 C$$

Luego :

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{sC(3R_2 + R_3) + 1}{sR_3 C + 1} \quad \dots(5)$$

Tenemos un cero en:

$$s = -\frac{1}{(3R_2 + R_3)C}$$

y un polo en:

$$s = -\frac{1}{R_3 C}$$

A frecuencias bajas ($s \rightarrow 0$) la magnitud de la ganancia (ec. 5) tiende a la unidad. A frecuencias suficientemente altas ($s \rightarrow \infty$), la magnitud tiende a $\left(1 + \frac{3R_2}{R_3}\right)$.

El gráfico de Bode correspondiente sería como muestra la Fig. 4.

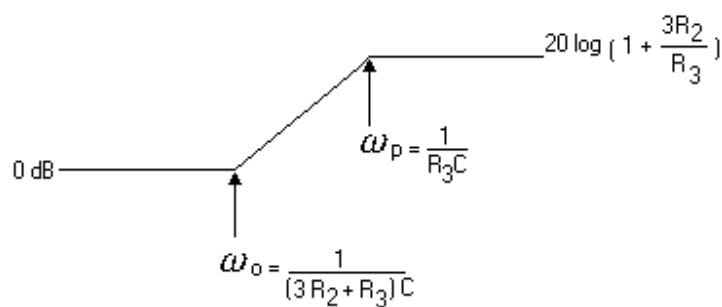


FIG.4 GRAFICO DE BODE PARA LA ECUACION 5.

Con el cursor de R en el extremo derecho tenemos máxima atenuación de agudos. Se cumple:

$$\frac{V_A}{R_2} = -V_0 \frac{1}{R_3 + \frac{1}{sC}}$$

esto es:

$$\frac{V_1 + V_0}{3R_2} = -V_0 \frac{sC}{sR_3C + 1}$$

$$\therefore (V_1 + V_0)(sR_3C + 1) = -3V_0(sR_2C)$$

$$V_1(sR_3C + 1) = -V_0(3sR_2C + sR_3C + 1)$$

$$= -V_0 [sC(3R_2 + R_3) + 1]$$

luego:

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{sR_3C + 1}{sC(3R_2 + R_3) + 1} \quad \dots\dots(6)$$

Tenemos un cero en:

$$s = -\frac{1}{R_3C}$$

y un polo en:

$$s = -\frac{1}{(3R_2 + R_3)C}$$

A frecuencias bajas ($s \rightarrow 0$) la magnitud de la ganancia (ec. 6) tiende a la unidad.

A frecuencias suficientemente altas ($s \rightarrow \infty$), la magnitud tiende a $\frac{R_3}{3R_2 + R_3}$, es decir,

$$\frac{1}{\left(1 + 3\frac{R_2}{R_3}\right)}$$

El gráfico de Bode correspondiente sería como muestra la Fig. 5.

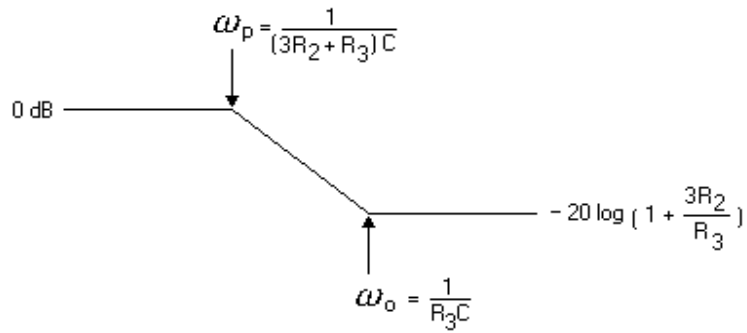


Fig.5 GRAFICO DE BODE PARA LA ECUACION 6.

El gráfico de Bode compuesto se muestra en la Fig. 6.

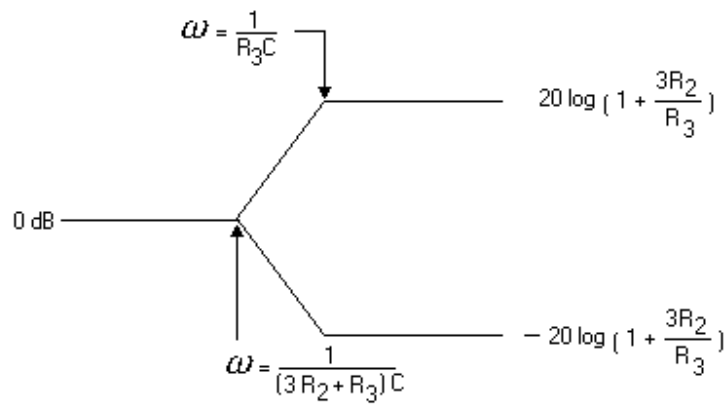


Fig.6 GRAFICO DE BODE COMPUESTO PARA EL CONTROL DE AGUDOS

A las frecuencias graves, los condensadores C son circuitos abiertos para la señal (Fig. 1). El refuerzo y atenuación de estas frecuencias se efectúa con el potenciómetro R₄ (Fig. 1 y Fig. 7).

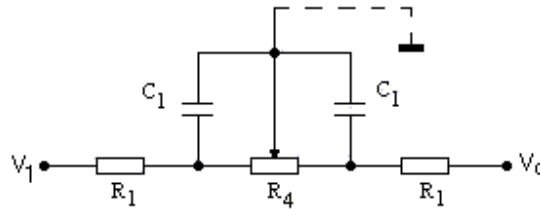


Fig.7 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA RED DE CONTROL DE GRAVES A BAJAS FRECUENCIAS

En la Fig.7, con el cursor de R₄ en el extremo izquierdo tenemos máximo refuerzo de graves. Podemos escribir entonces:

$$\begin{aligned} \frac{V_0}{V_1} &= - \frac{R_1 + R_4 // \bar{X}_{C1}}{R_1} \\ R_4 // \bar{X}_{C1} &= \frac{R_4 \frac{1}{sC_1}}{R_4 + \frac{1}{sC_1}} \\ &= \frac{R_4}{sR_4 C_1 + 1} \\ \therefore \frac{V_0}{V_1} &= - \frac{R_1 + \frac{R_4}{sR_4 C_1 + 1}}{R_1} \\ &= - \frac{R_1(sR_4 C_1 + 1) + R_4}{R_1(sR_4 C_1 + 1)} \\ &= - \frac{(sR_4 C_1 + 1) + \frac{R_4}{R_1}}{sR_4 C_1 + 1} \quad \dots(7) \end{aligned}$$

Tenemos un cero en:

$$s = - \frac{1 + \frac{R_4}{R_1}}{R_4 C_1}$$

y un polo en:

$$s = -\frac{1}{R_4 C_1}$$

A frecuencias bajas ($s \rightarrow 0$), la magnitud de la ganancia (ec. 7) tiende a $\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)$.

A frecuencias altas ($s \rightarrow \infty$), la magnitud tiende a la unidad.

El gráfico de Bode correspondiente sería como se muestra en la Fig. 8.

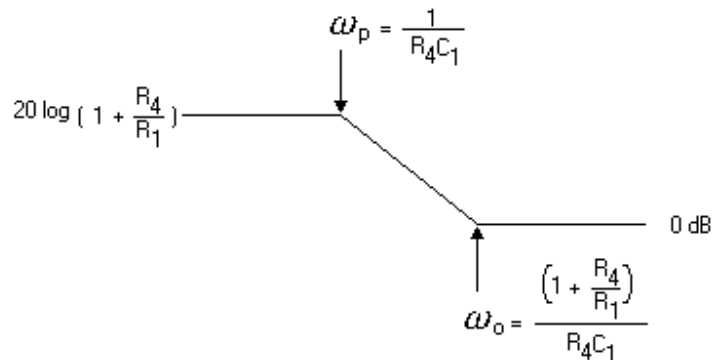


Fig.8 GRAFICO DE BODE PARA LA ECUACION 7

Con el cursor de R4 en el extremo derecho tenemos máxima atenuación de graves. Se cumple:

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_4 // X_{C1}}$$

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{sR_4C_1 + 1}{(sR_4C_1 + 1) + \frac{R_4}{R_1}} \quad \dots(8)$$

Tenemos un cero en:

$$s = -\frac{1}{R_4 C_1}$$

y un polo en:

$$s = -\frac{1 + \frac{R_4}{R_1}}{R_4 C_1}$$

A frecuencias bajas ($s \rightarrow 0$), la magnitud de la ganancia (ec. 8) tiende a $\frac{1}{\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)}$.

A frecuencias altas ($s \rightarrow \infty$), la magnitud tiende a la unidad.
El gráfico de Bode correspondiente se muestra en la Fig. 9.

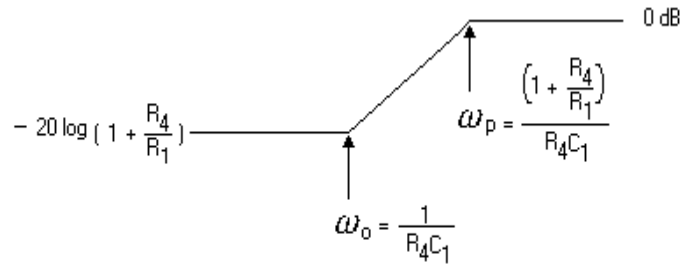


Fig.9 GRAFICO DE BODE PARA LA ECUACION 8.

El gráfico de Bode compuesto sería como indica la Fig. 10.

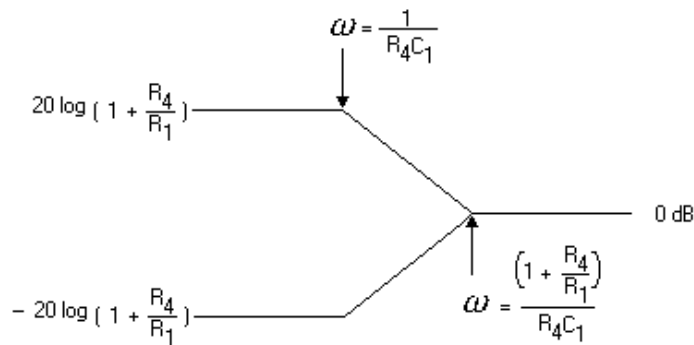


Fig.10 GRAFICO DE BODE COMPUESTO PARA EL CONTROL DE GRAVES.

El gráfico de Bode de la respuesta de la red de control de tono para posiciones extremas de los cursores de R y R₄ se puede observar en la Fig. 11.

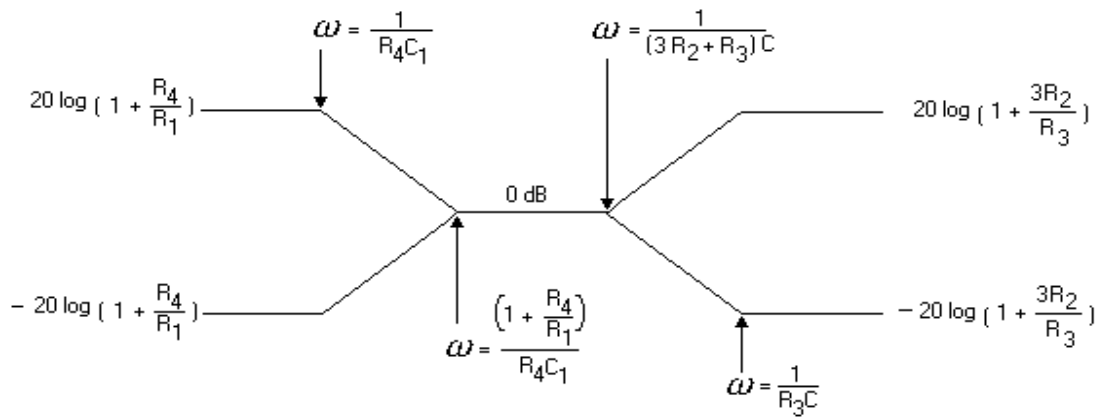


Fig.11 RESPUESTA DE LA RED DE CONTROL DE TONOS R Y R₄ EN POSICIONES EXTREMAS

IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE CONTROL DE TONO ACTIVA

En la Fig. 12. se muestra una red de control de tono que emplea la topología estudiada.

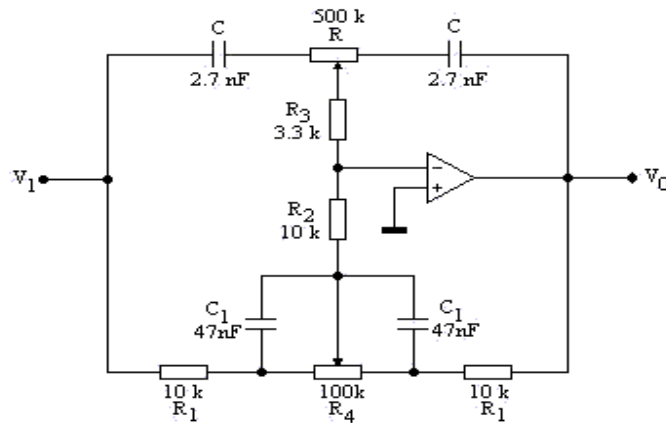


Fig.12 RED DE CONTROL DE TONO ACTIVA

Frecuencias de quiebre:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_4 C_1} = 33.9 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi(3R_2 + R_3)C} = 1770 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)}{2\pi R_4 C_1} = 372.5 \text{ Hz}$$

$$f_4 = \frac{1}{2\pi R_3 C} = 17862.5 \text{ Hz}$$

Máximo refuerzo de graves : $20\log\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) = 20.83 \text{ dB}$

Máxima atenuación de graves : $20\log\left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) = 20.83 \text{ dB}$

Máximo refuerzo de agudos : $20\log\left(1 + \frac{3R_2}{R_3}\right) = 20.08 \text{ dB}$

Máxima atenuación de agudos: $20\log\left(1 + \frac{3R_2}{R_3}\right) = 20.08 \text{ dB}$

Comprobación:

Debe cumplirse que $R \gg R_3 + 3.33R_2$. Reemplazando valores numéricos se obtiene $500K \gg 36.6K$.

En las figuras 13 y 14 se muestra la respuesta en frecuencia del circuito obtenida mediante una simulación en SPICE.

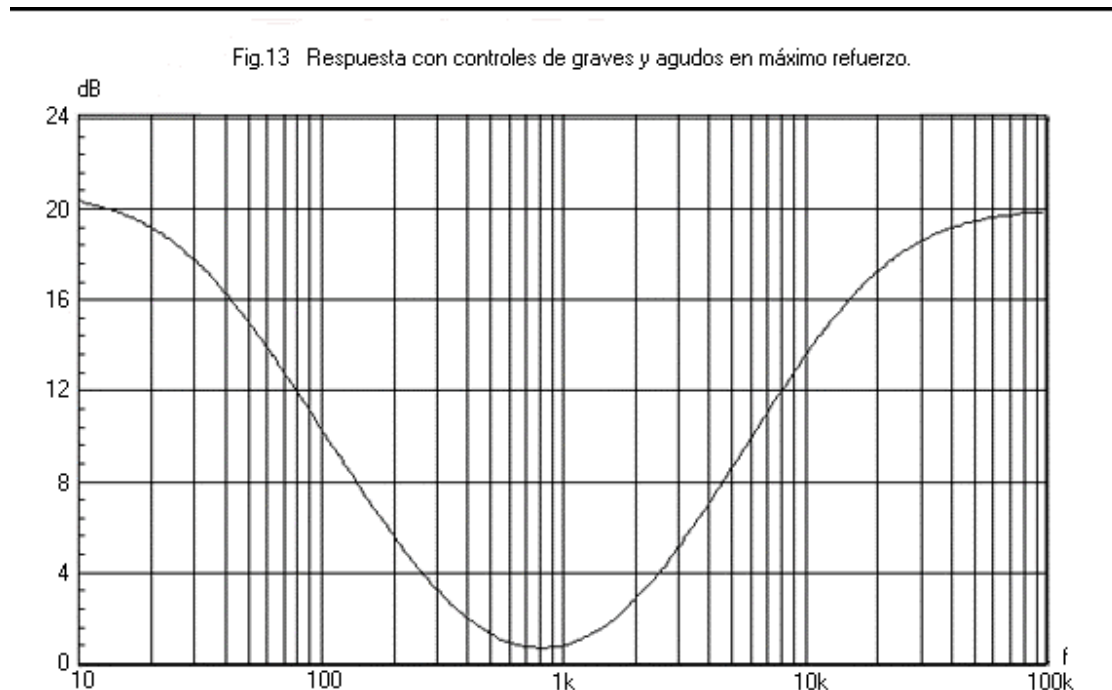


Fig.14 Respuesta con controles de graves y agudos en máxima atenuación.

