

Informes de CIREL

Rafael Sánchez Sánchez - Alejandro Santorum Varela
Universidad Autónoma de Madrid
Sesión 7

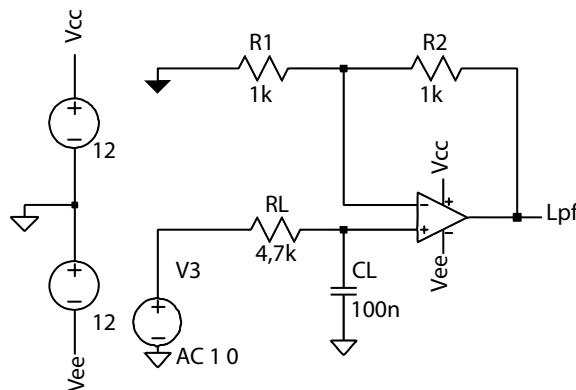
1 Introducción.

1.1 Objetivo.

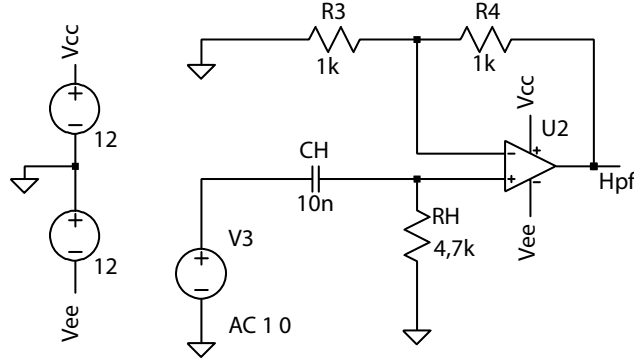
1. Estudio teórico del amplificador operacional con el circuito 0.
2. Montaje de un circuito basado en un amplificador operacional para filtrar señales de corriente alterna. Tomar medidas del circuito e identificar los rangos audibles de la señal de salida con unos audífonos.

1.2 Descripción del montaje.

1. El primer circuito consiste en el segundo circuito simulado. $V3$ es una señal de onda sinusoidal, de amplitud de $1V$. El resto de datos figuran con claridad en el siguiente esquemático:



2. En el segundo circuito tenemos que montar una variación del circuito anterior, cambiando la posición de la resistencia y el condensador, y cambiando éste último por uno de 10 nF . Éste se corresponde con el siguiente esquemático:

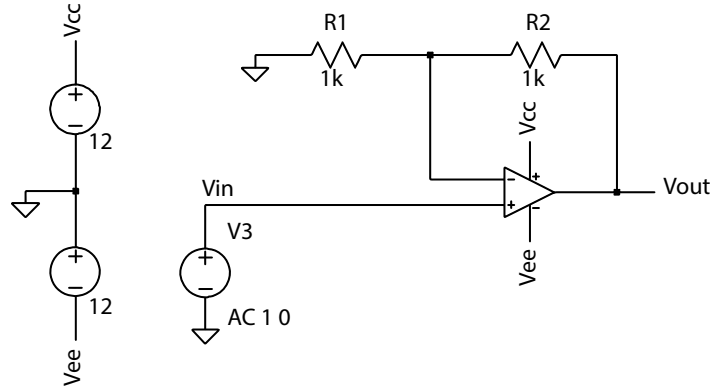


Finalmente, el audífono se conectará de tierra a la señal de salida del amplificador operacional.

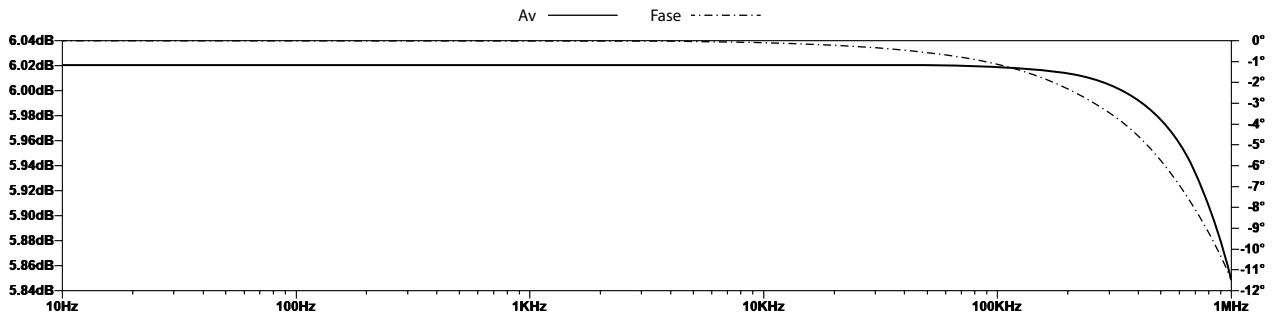
2 Simulación y cálculos teóricos.

En el circuito 0 estudiaremos el comportamiento del amplificador operacional:

2.1 Amplificador no inversor.



Tras simular el circuito con una amplitud de 1V obtenemos la siguiente gráfica de simulación:



De donde deducimos que $A_v \simeq 6,02 \text{ dB}$ y la diferencia de fase $\simeq 0^\circ$. Se observa que para frecuencias mayores a 100kHz la ganancia empieza a decaer, por lo que nuestro circuito funcionará bien para frecuencias menores a esta, sin embargo cabe destacar que la fase empieza

a decaer a frecuencias mayores de 10kHz.

Se muestra a continuación el cálculo teórico:

Suponiendo I la intensidad que circula por la rama superior, podemos afirmar que la intensidad que atraviesa la primera resistencia es igual a la segunda por el funcionamiento ideal del amplificador. Por tanto:

$$\begin{cases} I = \frac{0-V_i}{R_1} \\ I = \frac{V_i-V_o}{R_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{-V_i}{R_1} = \frac{V_i-V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_i}{V_o} = \frac{R_1+R_2}{R_1} \Rightarrow |A_v| = \frac{R_1+R_2}{R_1}$$

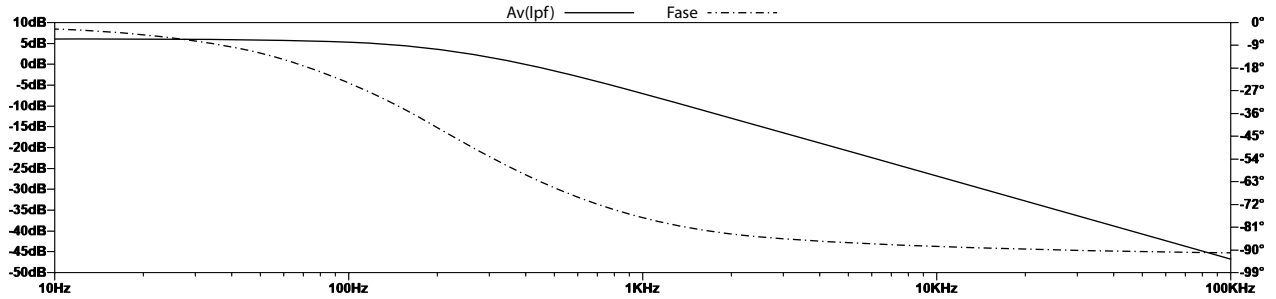
$$|A_v|_{dB} = 20\log_{10}(2) \simeq 6,021dB; \quad \phi = 0^\circ$$

Podemos comprobar nuestra hipótesis de que para frecuencias menores el circuito funciona de forma esperada al coincidir el resultado teórico con el calculado.

2.2 Filtros RC.

2.2.1 Circuito 1.

Gráfica de simulación:



Donde podemos observar que es un filtro paso bajo y la frecuencia de corte $f_0 \simeq 300Hz$. Procedemos al cálculo teórico: Suponiendo I_2 la corriente que atraviesa a las resistencias R_1 y R_2 e I_1 la corriente que atraviesa a la resistencia R_L , y $V_i = V_3$ obtenemos los siguientes sistemas:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{V_3-V_+}{R_L} \\ I_1 = \frac{V_+-V_0}{Z_{CL}} \end{cases} \quad (1) \quad \begin{cases} I_2 = \frac{-V_+}{R_1} \\ I_2 = \frac{V_+-V_0}{R_2} \end{cases} \quad (2)$$

De donde deducimos:

$$(1) V_+ = \frac{Z_{CL} V_3}{R_L + Z_{CL}}; \quad (2) V_+ = \frac{R_1 V_0}{R_1 + R_2}$$

Igualando las expresiones anteriores y sustituyendo Z_{CL} por $\frac{1}{\omega C_j}$, obtenemos la expresión de la ganancia:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C R_L}$$

$$|A_v| = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (j\omega CR_L)^2}} \Rightarrow |A_v|_{dB} = 20\log_{10} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) - 20\log_{10} \left(\sqrt{1 + (j\omega CR_L)^2} \right)$$

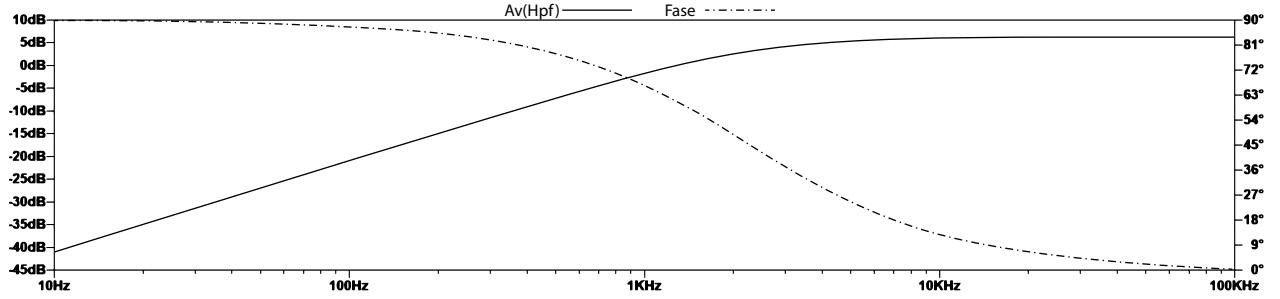
Cuando $\omega \rightarrow 0$, $|A_v|_{dB} \rightarrow 6,021 \text{ dB}$ y $\omega \rightarrow \infty$, $|A_v|_{dB} \rightarrow -\infty \text{ dB}$ con lo que determinamos que es un filtro paso bajo.

Sabiendo que la fase $\phi = -\arctan(\omega CR_L)$, comprobamos que: $\omega \rightarrow 0$, $\phi \rightarrow 0 \text{ rad}$ y que $\omega \rightarrow \infty$, $\phi \rightarrow \frac{\pi}{2} \text{ rad}$.

Finalmente, el cálculo de la frecuencia de corte $\omega_0 = (CR_L)^{-1} \Rightarrow f_0 = (2\pi CR_L)^{-1} = 338,63 \text{ Hz}$.

2.2.2 Circuito 2.

Gráfica de simulación:



Donde podemos observar que es un filtro paso alto y la frecuencia de corte $f_0 \simeq 3000 \text{ Hz}$. Procedemos al cálculo teórico: Suponiendo I_2 la corriente que atraviesa a las resistencias R_3 y R_4 e I_1 la corriente que atraviesa al condensador C_H , y $V_i = V_3$ obtenemos los siguientes sistemas:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{V_3 - V_+}{Z_{C_H}} \\ I_1 = \frac{V_+ - 0}{R_H} \end{cases} \quad (1) \quad \begin{cases} I_2 = \frac{-V_+}{R_3} \\ I_2 = \frac{V_+ - V_o}{R_4} \end{cases} \quad (2)$$

De donde deducimos:

$$(1) V_+ = \frac{R_H V_3}{R_H + Z_{C_H}}; \quad (2) V_+ = \frac{R_3 V_o}{R_3 + R_4}$$

Iguando las expresiones anteriores y sustituyendo Z_{C_H} por $\frac{1}{\omega C_j}$, obtenemos la expresión de la ganancia:

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_3 R_H + R_4 R_H}{R_3} \cdot \frac{j\omega C}{1 + j\omega C R_H} \\ |A_v| &= \frac{R_3 R_H + R_4 R_H}{R_3} \cdot \frac{\omega C}{\sqrt{1 + (j\omega C R_H)^2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow |A_v|_{dB} &= 20\log_{10} \left(\frac{R_3 R_H + R_4 R_H}{R_3} \right) + 20\log(\omega C) - 20\log_{10} \left(\sqrt{1 + (j\omega C R_H)^2} \right) \end{aligned}$$

Cuando $\omega \rightarrow 0$, $|A_v|_{dB} \rightarrow -\infty \text{ dB}$ y $\omega \rightarrow \infty$, $|A_v|_{dB} \rightarrow 6,021 \text{ dB}$ con lo que determinamos que es un filtro paso alto.

Sabiendo que la fase $\phi = -\arctan(\omega CR_H)$, comprobamos que: $\omega \rightarrow 0$, $\phi \rightarrow \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ y que $\omega \rightarrow \infty$, $\phi \rightarrow 0 \text{ rad}$.

Finalmente, el cálculo de la frecuencia de corte $\omega_0 = (CR_H)^{-1} \Rightarrow f_0 = (2\pi CR_H)^{-1} = 3386,28 \text{ Hz}$.

3 Datos y resultados experimentales.

Las tablas de mediciones se encuentran en la sección 3.1. Las gráficas se encuentran en la sección 3.2. No se pedía montar el circuito 0.

3.0.1 Circuito 1. Frecuencias de corte experimentales.

En la tabla de la sección 3.1.1 podemos observar que el valor máximo de la señal de salida es 1.96 V . La frecuencia de corte es aquella a la que la señal de salida es $\frac{1.96}{\sqrt{2}} \text{ V} = 1.386 \text{ V}$. Regulando manualmente la frecuencia hallamos que es 369 Hz y midiendo con los cursores determinamos un desfase de -47.82° .

3.0.2 Circuito 1. Rango de frecuencia audible.

Tras reducir la señal de entrada a una amplitud de pico de 500 mV y variar la frecuencia a la que la señal empieza y termina de escucharse se obtienen los siguientes resultados:

Mínima frecuencia audible: 11 Hz .

Máxima frecuencia audible: 16.5 kHz .

3.0.3 Circuito 2. Frecuencias de corte experimentales.

En la tabla de la sección 3.1.2 podemos observar que el valor máximo de la señal de salida es 2.04 V . La frecuencia de corte es aquella a la que la señal de salida es $\frac{2.04}{\sqrt{2}} \text{ V} = 1.44 \text{ V}$. Regulando manualmente la frecuencia hallamos que es 3300 Hz y midiendo con los cursores determinamos un desfase de 47.52° .

3.0.4 Circuito 1. Rango de frecuencia audible.

Tras reducir la señal de entrada a una amplitud de pico de 500 mV y variar la frecuencia a la que la señal empieza y termina de escucharse se obtienen los siguientes resultados:

Mínima frecuencia audible: 450 Hz .

Máxima frecuencia audible: 16.5 kHz .

3.1 Tablas

3.1.1 Circuito 1.

<i>Frecuencia</i> (Hz)	$ V_{lpf} $ (V)	$ V_3 $ (V)	$ A_v $	δt (s)	δt (°)
80	1,96	1	1,96	0,0007	-20,16
100	1,96	1	1,96	0,0006	-21,6
200	1,76	1	1,76	0,00056	-40,32
400	1,36	1	1,36	0,00041	-59,04
600	1,04	1	1,04	0,0003	-64,8
800	0,84	1	0,84	0,00026	-74,88
1000	0,68	1	0,68	0,00022	-79,2
3000	0,24	1	0,24	0,00008	-86,4
5000	0,15	1	0,15	0,0000485	-87,3
7000	0,112	1	0,112	0,000035	-88,2
9000	0,088	1	0,088	0,0000275	-89,1
10000	0,08	1	0,08	0,000025	-90
30000	0,027	1	0,027	0,0000084	-90,72
50000	0,0156	1	0,0156	0,0000051	-91,8
70000	0,0128	1	0,0128	0,0000036	-90,72
90000	0,0105	1	0,0105	0,00000285	-92,34
100000	0,0096	1	0,0096	0,0000026	-93,6

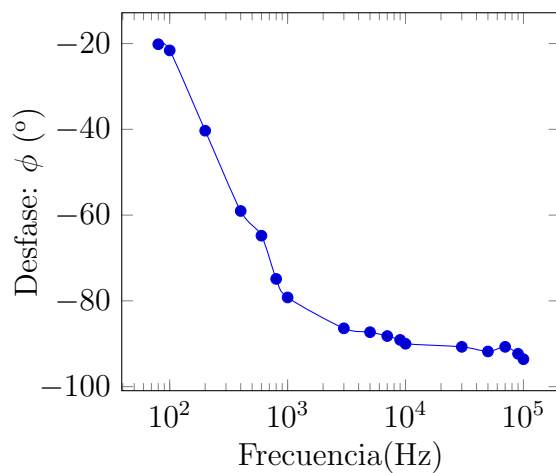
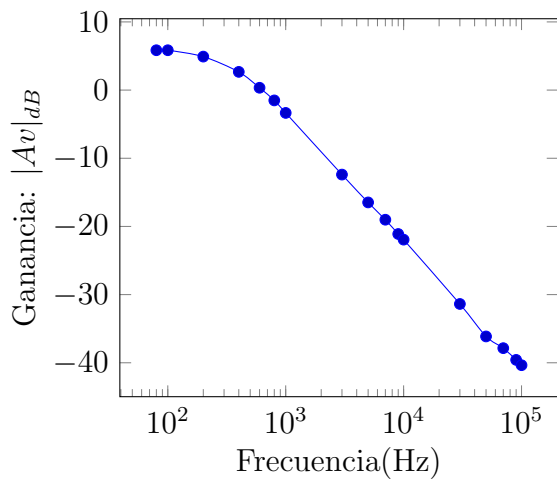
3.1.2 Circuito 2.

<i>Frecuencia</i> (Hz)	$ V_{hpf} $ (V)	$ V_3 $ (V)	$ A_v $	$\delta t(s)$	$\delta t(^{\circ})$
80	0,05	1	0,05	0,0032	92,16
100	0,062	1	0,062	0,00249	89,8
200	0,12	1	0,12	0,00121	87,2
400	0,236	1	0,236	0,0006	86,4
600	0,35	1	0,35	0,00038	82,08
800	0,46	1	0,46	0,00028	80,64
1000	0,57	1	0,57	0,00021	75,6
3000	1,36	1	1,36	0,000052	56,16
5000	1,67	1	1,67	0,00002	36
7000	1,88	1	1,88	0,000009	22,68
9000	1,96	1	1,96	0,000006	19,44
10000	1,96	1	1,96	0,000005	18
30000	2,04	1	2,04	0,00000004	0,432

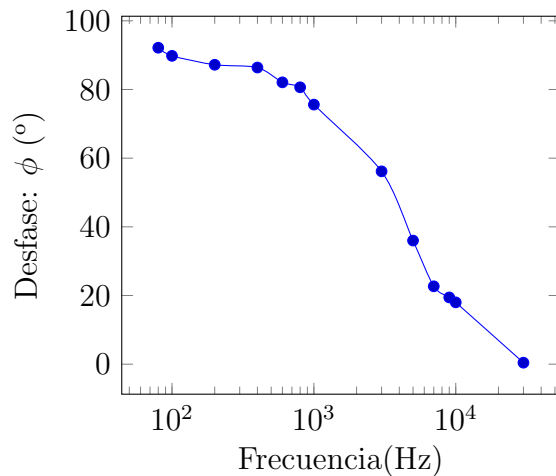
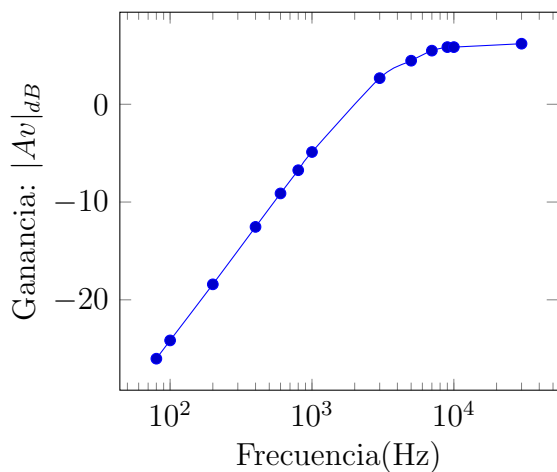
El circuito se encuentra saturado a partir de esta frecuencia, ya que observamos que la señal comienza a achataarse.

3.2 Gráficas

3.2.1 Circuito 1.



3.2.2 Circuito 2.



4 Discusión y conclusiones.

En esta sección se disponen las comparaciones entre los valores experimentales y los teóricos. En el circuito 0 establecimos que el amplificador empezaba a saturarse a partir de 100 kHz (la fase comenzaba a decaer en 10 kHz), sin embargo observamos que en el circuito 2 la señal se saturaba a partir de 30 kHz . Esto puede deberse a la no idealidad del amplificador. La señal se volvía triangular debido a que la respuesta del amplificador era más lenta que la actualización de la señal a altas frecuencias. Los valores límite de la ganancia y la fase se corresponden prácticamente en su totalidad con los simulados.

En cuanto a las frecuencias de corte, podemos deducir que el valor es bastante aproximado, considerando los fallos de redondeo, medición y no idealidad de los componentes. Para el

circuito 1 existe un error relativo de un 8,98 %, y para el circuito 2 uno del 2,54 %. Estos valores tampoco quedan muy lejos de los simulados con LTSpice.

Finalmente, existe una diferencia mucho mayor en puntos porcentuales en las frecuencias bajas que en las altas. Para las frecuencias bajas observamos una frecuencia mínima audible de 11 Hz para el circuito 1 y de 450 Hz para el segundo ($\simeq 3390$ %). En cuanto a las frecuencias máximas obtenemos unos valores de 16 kHz para el primer circuito y unos 16.5 kHz en cuanto al segundo ($\simeq 3,1$ %). Esto puede deberse a la diferencia entre los filtros, el circuito 1 es un paso-bajo mientras que el 2 es un paso-alto.