

## Práctica 6: Filtros activos

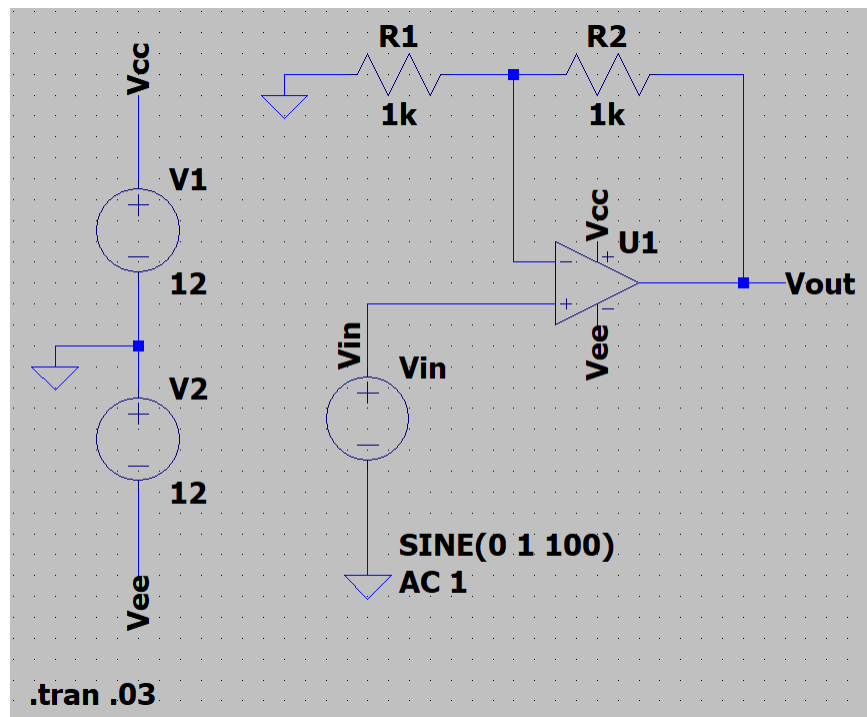
Pablo Cuesta Sierra. Grupo 1201.

### TRABAJO PREVIO (Simulación LTSpice y cálculos teóricos)

a. Dibuje el circuito 1 con los valores de componentes mostrados en la figura. Use el modelo de Amplificador Operacional Universal (UniversalOpamp2) dentro de la carpeta [Opamps]  $V_{cc}=12V$  y  $V_{ee}=-12V$  son las tensiones de alimentación simétricas para el Amplificador Operacional.

b. Conecte una fuente de tensión a la entrada  $V_{in}$  de tipo sinusoidal de frecuencia y amplitud arbitraria. Asegúrese de que la amplitud en la señal de entrada no alcanza las tensiones de saturación del amplificador operacional a la salida.

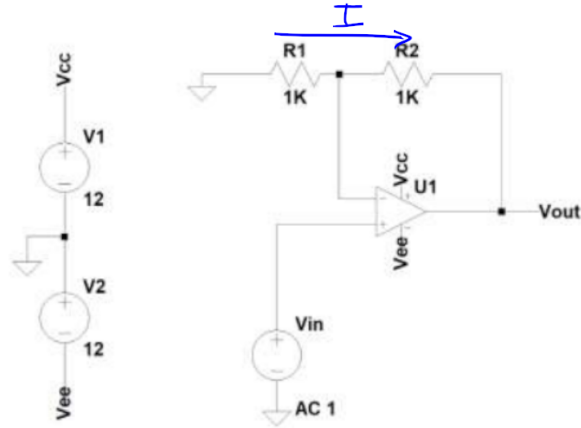
Como se calcula en (c), la ganancia es de valor  $2 = |\frac{V_{out}}{V_{in}}|$ , por lo que para no alcanzar las tensiones de saturación, basta con tomar  $V_{in} < 6V$ , para simplificar, tomaré amplitud  $1V$ , además de una frecuencia de  $100Hz$  (he incluido el comando de la simulación, para ver las señales en un tiempo de  $30ms$ ):



Dibujo Circuito 1 en LTSpice.

c. Determine la ganancia del amplificador y el desfase entre la señal de entrada y la de salida. Compare la ganancia simulada con la calculada teóricamente.

Cálculos teóricos:

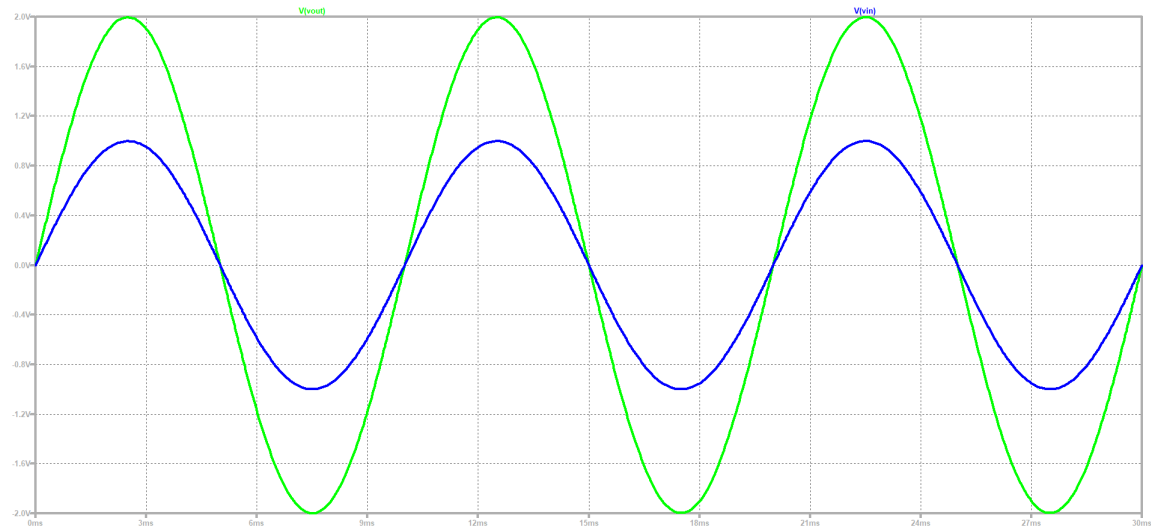


*Circuito 1*

Como el AO está realimentado negativamente, asumimos que  $v^+ = v^- = v_{in}$ .

$$\Rightarrow I = \frac{0 - v_{in}}{R_1} = \frac{v_{in} - v_{out}}{R_2} \Rightarrow v_{out} = R_2 v_{in} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 2 v_{in} \Rightarrow A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = 2. \quad |A_v| = 2. \quad \phi_{A_v} = 0$$

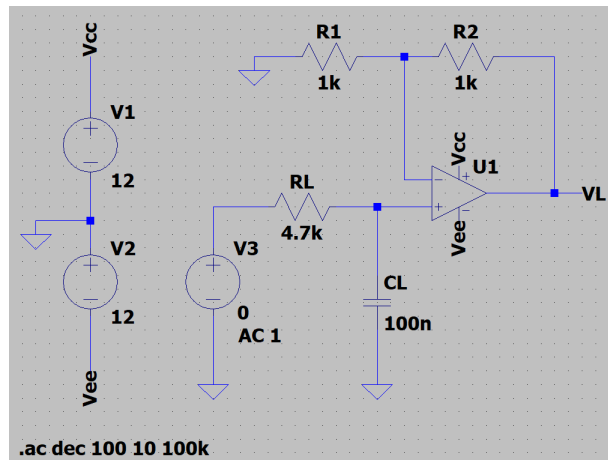
En la simulación, como está configurada en la imagen del apartado anterior:



$V_{out}$ , en verde.  $V_{in}$ , en azul.

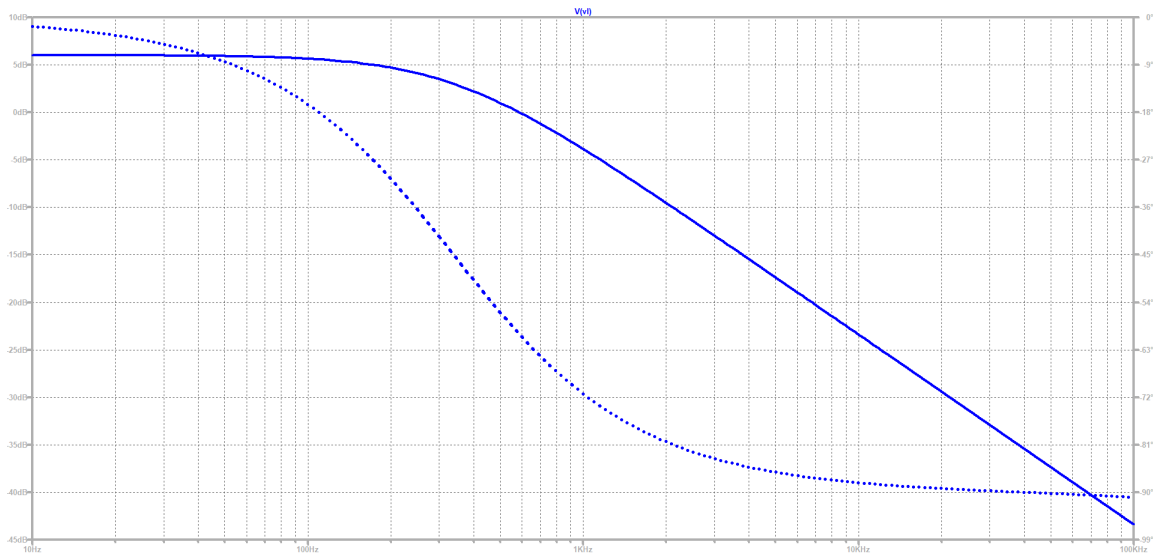
Podemos comprobar que la diferencia de fase es nula y que la amplitud de  $V_{out}$  es 2V, el doble que la de  $V_{in}$ .

d. Conecte un filtro RC a la entrada no inversora del Amplificador Operacional siguiendo el esquema del circuito 2. Conecte a la entrada del filtro una fuente de tensión alterna V3 de amplitud 1 V.



Dibujo Circuito 2 en LTSpice.

e. Mediante una simulación en alterna determine el comportamiento del circuito con la frecuencia de V3. Dibuje la ganancia  $V_L/V_3$  y el desfase entre las dos señales en función de la frecuencia en el rango 10 Hz - 100 KHz.

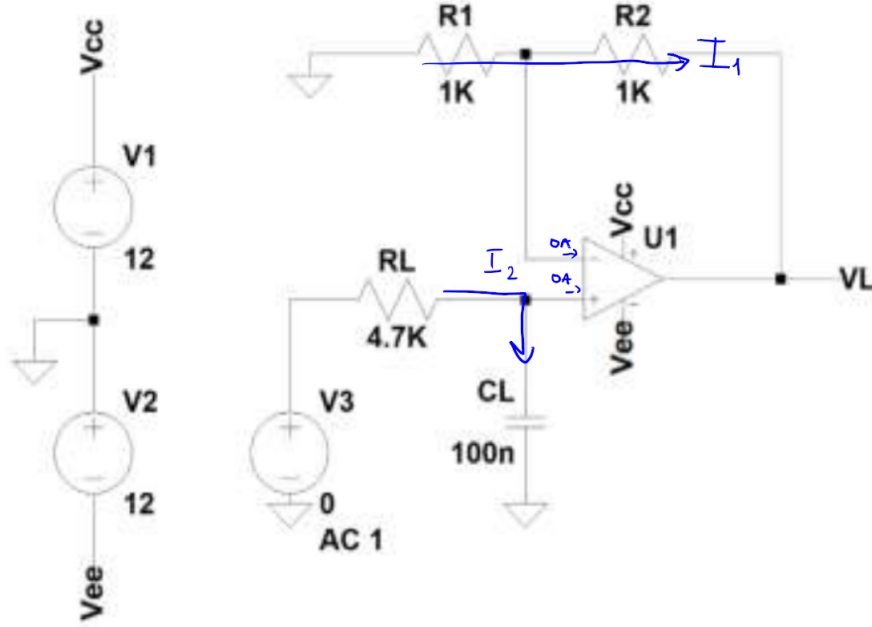


Gráfica de  $A_v$  (ya que  $|V_3| = 1V$ ), tanto la fase (puntos discontinuos) como la norma. Representada frente a la frecuencia.

f. ¿Qué tipo de filtrado que realiza el circuito sobre la señal de entrada: paso alto, paso bajo o paso banda? Determine la frecuencia o frecuencias de corte a partir de la representación gráfica de la simulación y mediante el cálculo teórico.

Como se puede apreciar en la gráfica, corresponde a un filtro de paso bajo.

Cálculos teóricos:



### Circuito 2

De nuevo, como el AO está realimentado negativamente, asumimos que  $v^+ = v^-$ . Entonces,

$$I_2 = \frac{v_3 - v^+}{R_L} = \frac{v^+}{Z_{C_L}} \Rightarrow v^+ \left( \frac{1}{Z_{C_L}} + \frac{1}{R_L} \right) = \frac{v_3}{R_L} \Rightarrow v^+ = \frac{v_3 Z_{C_L}}{R_L + Z_{C_L}} = \frac{v_3}{1 + \frac{R_L}{Z_{C_L}}}$$

Por otro lado,

$$I_1 = \frac{0 - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_L}{R_2} \Rightarrow v_L = R_2 v^- \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 2 v^- = 2 v^+ = \frac{2 v_3}{1 + \frac{R_L}{Z_{C_L}}}$$

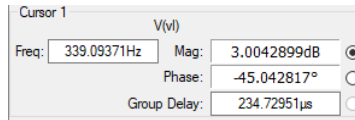
$$\Rightarrow A_v(jf) = \frac{v_L}{v_3} = \frac{2}{1 + \frac{R_L}{Z_{C_L}}} = \frac{2}{1 + j2\pi f C_L R_L} \Rightarrow |A_v|(f) = \frac{2}{\sqrt{1 + (2\pi f C_L R_L)^2}}, \quad \phi(f) = -\arctan(2\pi f C_L R_L)$$

El valor de la frecuencia de corte:

$$|A_v|^{max} = 2 = |A_v|(0) \Rightarrow |A_v|(f_c) = \frac{2}{\sqrt{2}} \iff f_c = \frac{1}{2\pi C_L R_L} \approx 338,628 Hz$$

además,  $\phi(f) = -\arctan(f/f_c) \Rightarrow \phi(f_c) = -45^\circ$ .

En la simulación, para obtener la frecuencia de corte, por tanto, tengo que mover el cursor hasta la frecuencia en la que la fase sea de valor  $-45^\circ$ :



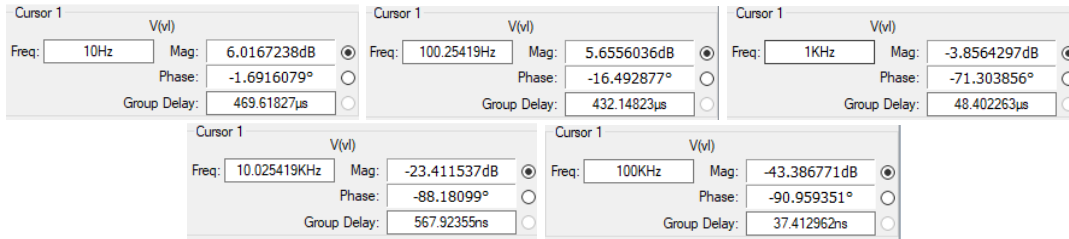
lo que nos da una frecuencia de corte en la simulación de 339,094Hz, por lo que se ha tenido un error de:

$$E_r = 100 \times \frac{|339,094 - 338,628|}{339,094} = 0,137\%$$

En la siguiente tabla utilizo estas fórmulas para unas pocas frecuencias:

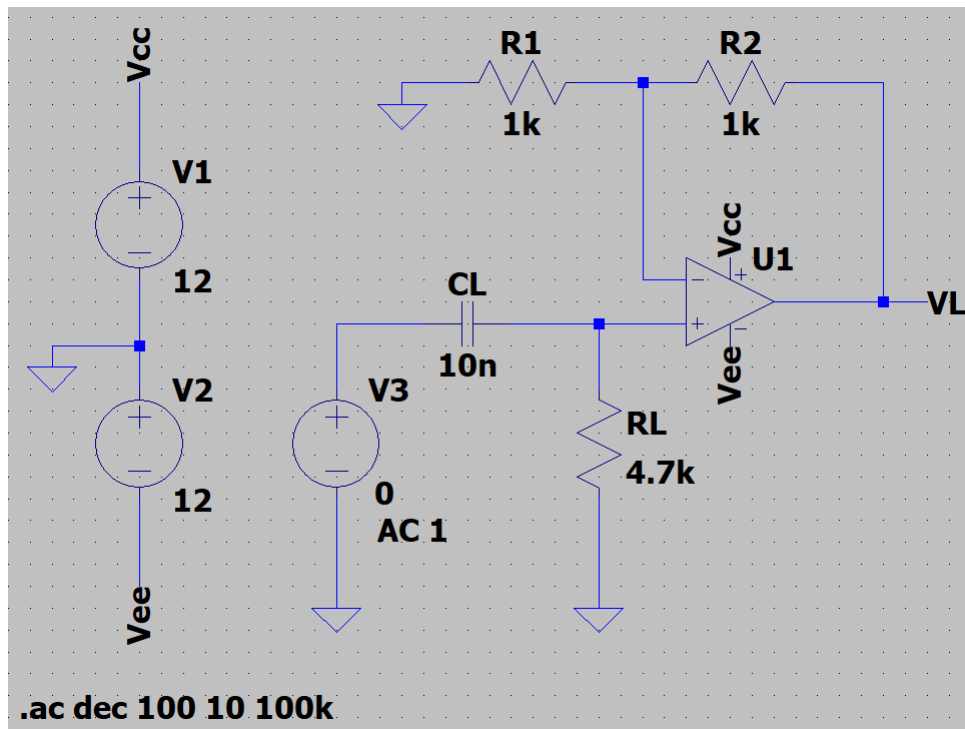
frecuencia (Hz)	$ A_v $	$ A_v (dB)$	$\phi(f) (^{\circ})$
10	1,999128492	6,016814176	-1,691508405
100	1,91811089	5,65747422	-16,45238226
1000	0,6414744806	-3,856412324	-71,29248409
10000	0,06768671111	-23,38993175	-88,06054821
100000	0,00677251194	-43,38500441	-89,80598145

Los valores en la simulación para las mismas frecuencias:

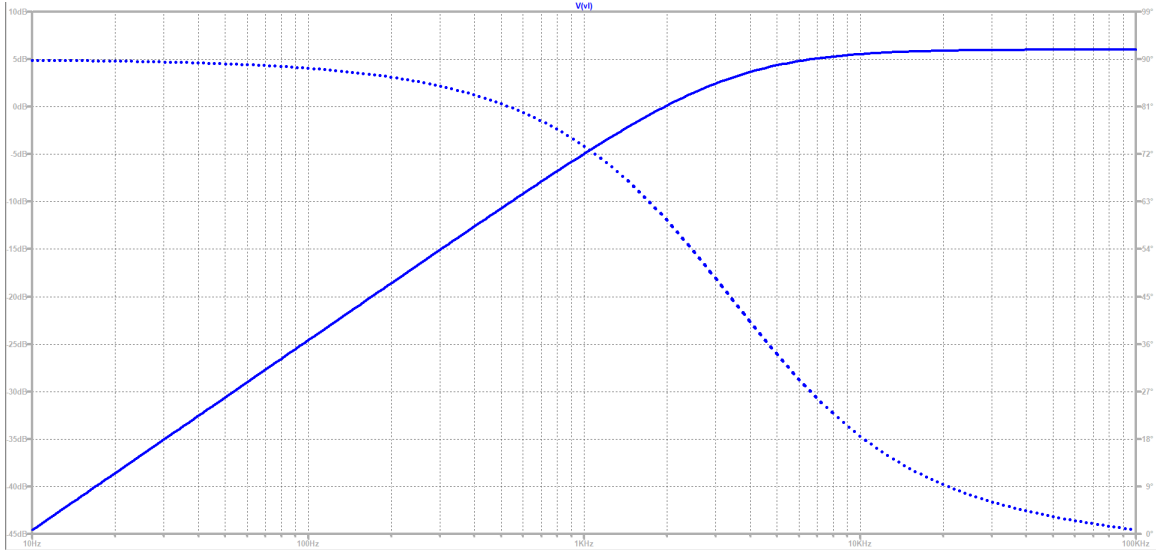


Que difieren muy ligeramente de los teóricos (porque en muchos casos no se podía poner el cursor exactamente en la frecuencia deseada).

g. Repita los apartados d) e) y f) para el circuito 3. En este circuito la red RC se ha sustituido por otra distinta (note que, además de intercambiar el condensador y la resistencia de posición, se ha reducido el valor del condensador de 100 nF a 10nF).



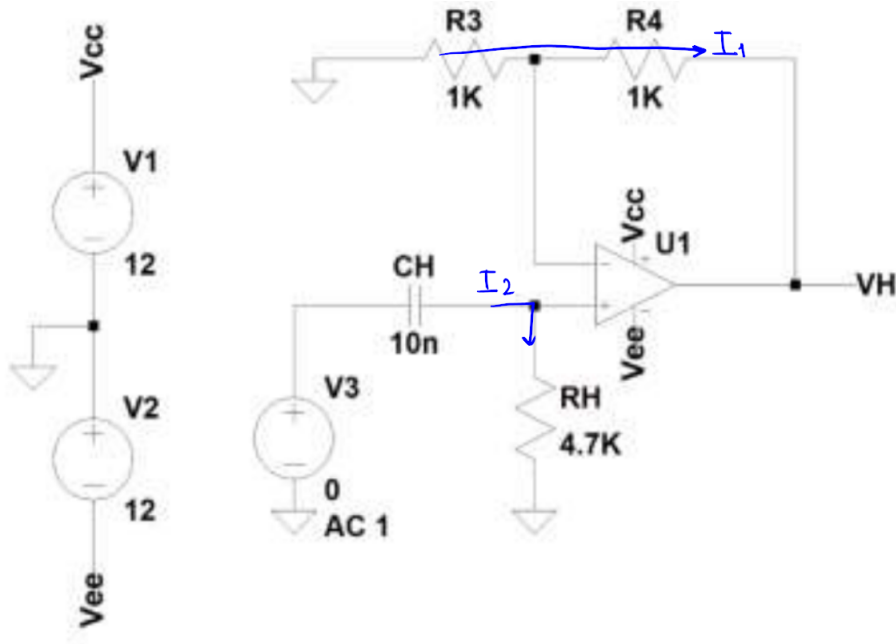
Dibujo Circuito 3 en LTSpice.



Gráfica de  $A_v$  (ya que  $|V_3| = 1V$ ), tanto la fase (puntos discontinuos) como la norma. Representada frente a la frecuencia.

Este circuito corresponde a un filtro de paso alto.

Cálculos teóricos:



### Circuito 3

El AO está realimentado negativamente, por lo que asumimos que  $v^+ = v^-$ . Entonces, como antes (los cálculos de  $I_1$  no varían):

$$I_1 = \frac{0 - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_L}{R_2} \Rightarrow v_L = R_2 v^- \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 2 v^-$$

$$I_2 = \frac{v_3 - v^+}{Z_{CL}} = \frac{v^+}{R_L} \Rightarrow v^+ \left( \frac{1}{Z_{CL}} + \frac{1}{R_L} \right) = \frac{v_3}{Z_{CL}} \Rightarrow v^+ = \frac{v_3 R_L}{R_L + Z_{CL}} = \frac{v_3}{1 + \frac{Z_{CL}}{R_L}}$$

Por tanto,

$$v_L = 2 v^- = 2 v^+ = \frac{2 v_3}{1 + \frac{Z_{C_L}}{R_L}} = \frac{2 v_3}{1 - \frac{j}{2\pi f C_L R_L}}$$

$$A_v(jf) = \frac{v_L}{v_3} = \frac{2}{1 - \frac{j}{2\pi f C_L R_L}}, \quad |A_v|(f) = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f C_L R_L)^2}}}, \quad \phi(f) = -\arctan\left(\frac{-1}{(2\pi f C_L R_L)}\right)$$

La frecuencia de corte (se calcula de la misma forma que en el Circuito 2, aunque cambia el valor porque el valor de  $C_L$  es diferente):

$$|A_v|^{max} = 2 = |A_v|(0) \Rightarrow |A_v|(f_c) = \frac{2}{\sqrt{2}} \iff f_c = \frac{1}{2\pi C_L R_L} \approx 3386,275Hz$$

De nuevo, con estas fórmulas he rellenado una tabla como la anterior:

frecuencia (Hz)	$ A_v $	$ A_v (dB)$	$\phi(f)(^\circ)$
10	0,005906168436	-44,57388343	89,83080049
100	0,0590362054	-24,5776313	88,30849159
1000	0,5664367696	-4,936971254	73,54761774
10000	1,894336425	5,549142202	18,70751591
100000	1,998854299	6,015622772	1,939451791

Los valores en la simulación para las mismas frecuencias:

Cursor 1 V(vl) Freq: 10Hz Mag: -44.573974dB Phase: 89.830687° Group Delay: 47.031191µs	Cursor 1 V(vl) Freq: 100.25087Hz Mag: -24.555978dB Phase: 88.30311° Group Delay: 46.990437µs	Cursor 1 V(vl) Freq: 1KHz Mag: -4.9370553dB Phase: 73.536229° Group Delay: 43.26129µs
Cursor 1 V(vl) Freq: 10.025087KHz Mag: 5.5512803dB Phase: 18.549266° Group Delay: 4.8473026µs	Cursor 1 V(vl) Freq: 100KHz Mag: 6.013856dB Phase: 786.09845m° Group Delay: 85.803557ns	

De nuevo, no hay diferencia entre los valores de la simulación y los obtenidos mediante los cálculos teóricos. (Las diferencias se deben a que no siempre se puede poner el cursor sobre la frecuencia deseada.)

En este caso, con la frecuencia de corte tenemos que  $\phi(f) = -\arctan(-f_c/f)$ , por tanto,  $\phi(f_c) = +45^\circ$ . Así que buscando en la gráfica de la simulación la frecuencia en la que la fase tiene este valor, hallamos:

Cursor 1 V(vl) Freq: 3.3793696KHz Mag: 3.0011957dB Phase: 45.020547° Group Delay: 23.581999µs
--

Es decir, que la frecuencia de corte en la simulación corresponde a 3379,370Hz, es decir, tiene un error relativo con el valor teórico de  $E_r = 100 \times \frac{|3379,370 - 3386,275|}{3379,370} = 0,204\%$