



Bitácora de Laboratorio #11

Escuela de Ingeniería en Computadores

Laboratorio de Circuitos Eléctricos (CE-2201)

Integrantes:

Tamara Cajiao Molina - 2024143333
Santiago Robles Obando - 2022207100

Profesor: Jeferson González Gómez

II Semestre

2025

Laboratorio 11. Respuesta en frecuencia de circuitos RC

1. Introducción

En este experimento se verificará la respuesta en frecuencia de circuitos RC serie, y serie paralelo. Se estudiará el comportamiento de estos circuitos como filtros y en la evaluación se utilizarán varias representaciones de estas respuestas en frecuencia.

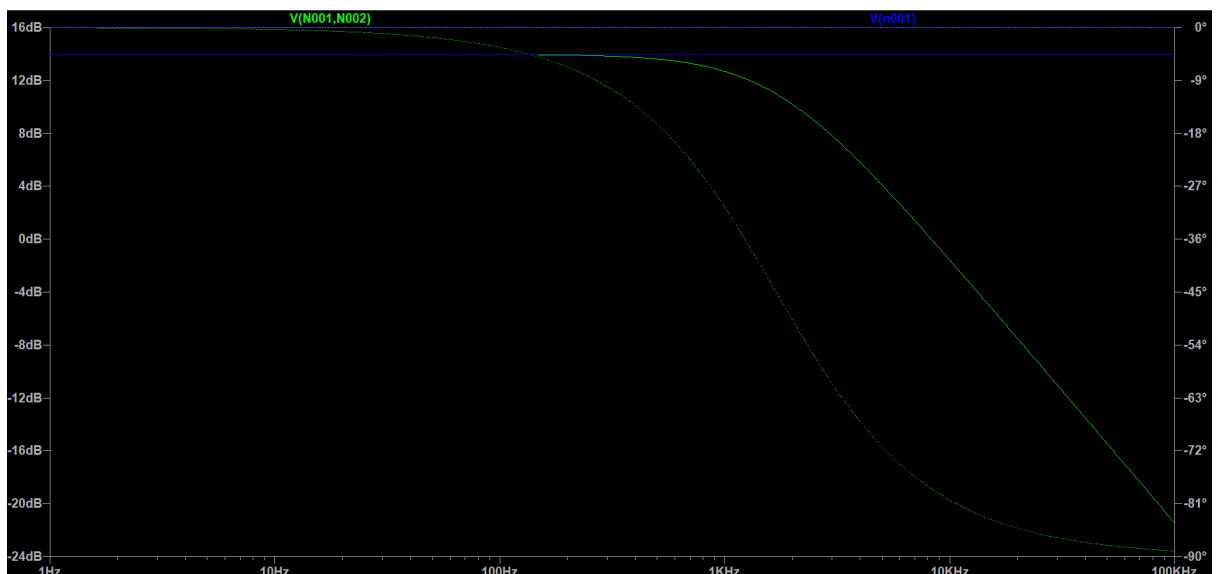
2. Objetivos

1. Estudiar la respuesta en frecuencia de los circuitos RC serie y serie-paralelo.
2. Obtener experimentalmente las gráficas de magnitud y fase en ambos circuitos.
3. Simular los circuitos RC serie y serie-paralelo en LTSpice haciendo un barrido de frecuencia.
4. Utilizar distintas representaciones de la respuesta en frecuencia.

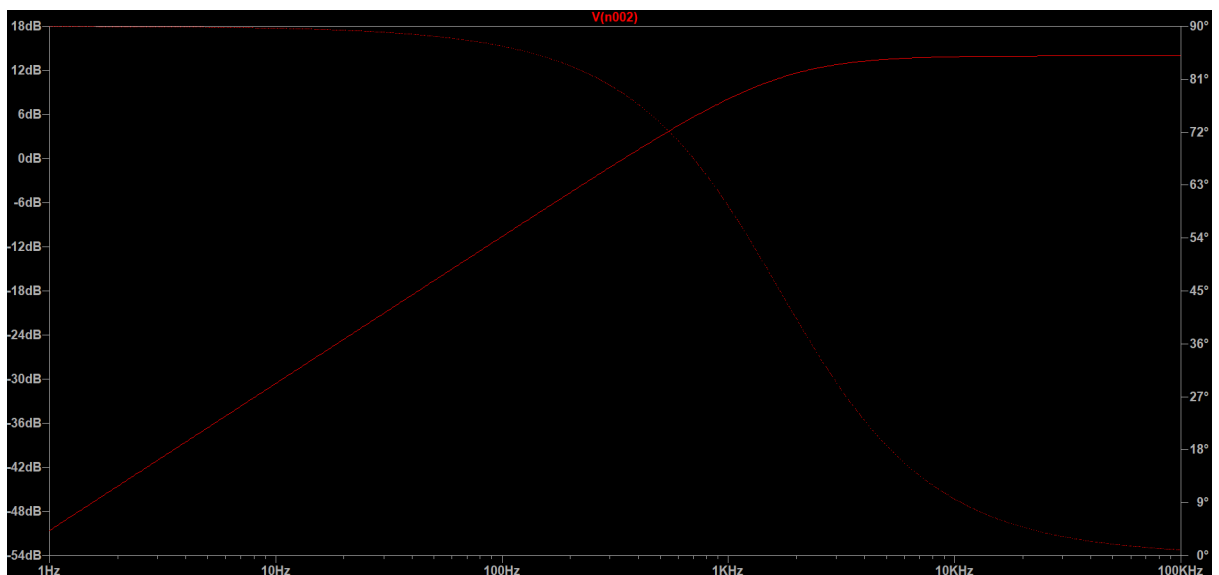
3. Cuestionario Previo

1. Simule los circuitos en las figuras 11.1 y 11.2 haciendo un barrido de frecuencia de 1 Hz a 100 kHz. Obtenga los gráficos respectivos en escala semilogarítmica para la tensión y la fase en la resistencia y en el condensador. Si utiliza LTSpice, utilice el componente *voltage* como fuente, en donde debe seleccionar la función SINE, y para permitir el análisis de respuesta en frecuencia debe indicar al menos la amplitud en Small signal AC analysis(.AC). Debe configurar el barrido de frecuencia en Simulate → Edit Simulation Cmd → AC Analysis.

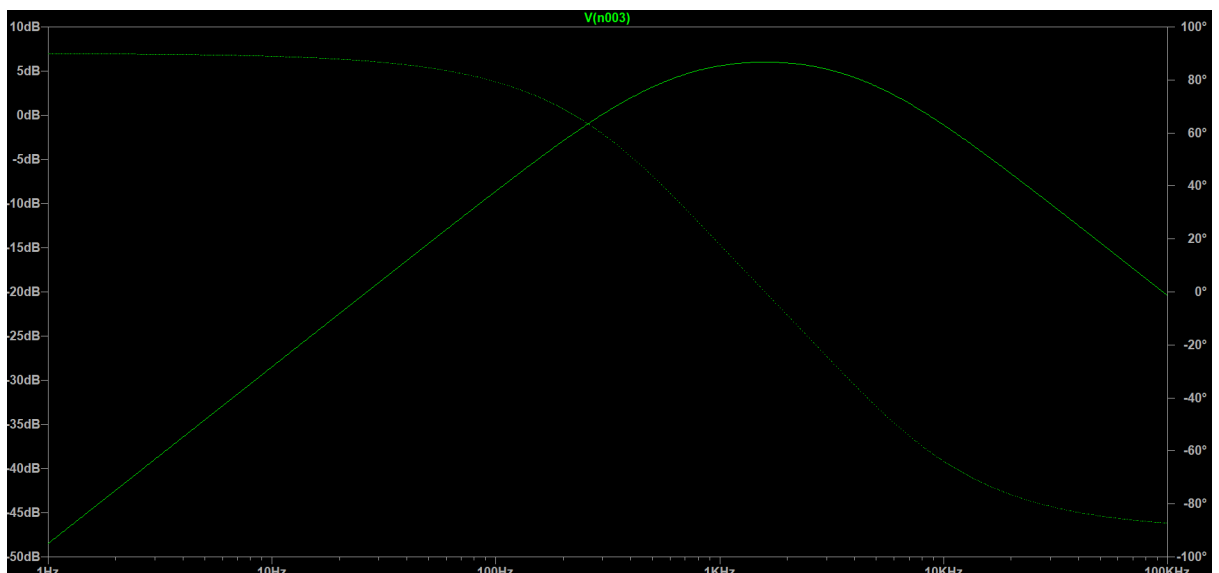
Gráfica 1. Respuesta simulada del capacitor del circuito de la figura 11.1



Gráfica 2. Respuesta simulada para la resistencia del circuito de la figura 11.1



Gráfica 3. Respuesta simulada para el voltaje V_{sal} del circuito de la figura 11.2



2. ¿Cuál es la utilidad práctica o aplicación del circuito RC serie de la figura 11.1 investigado en función de la frecuencia?

Se puede utilizar como un filtro paso-alto o paso-bajo, los circuitos RC serie son típicamente usados en aplicaciones como la eliminación de ruido filtrando frecuencias no deseadas, o como controlador de tiempo entre impulsos dentro de un temporizador 555, entre otros.

3. ¿Cómo se denomina el circuito según la salida se toma en el condensador o en la resistencia?

Si la salida se toma en el condensador, el circuito se comporta como un paso-bajo; y si la salida se toma en la resistencia, el circuito se comporta como un paso-alto.

4. ¿Cual es la utilidad práctica del circuito RC serie-paralelo (Wien) en la figura 11.2?

La utilidad práctica del Puente de Wien es la generación de ondas sinusoidales estables y precisas, para ser usadas normalmente en osciladores de audio y equipos de prueba electrónica.

5. Defina frecuencia de corte y ancho de banda.

La frecuencia de corte es la que marca el punto en el que el rango de frecuencias en el que la ganancia no se desvía más del 70.7%. El ancho de banda se define como la distancia entre las dos frecuencias de corte en un pasa bandas.

6. Investigue sobre la unidad dB y su aplicación en la graficación de la respuesta en frecuencia de sistemas, como los dos circuitos utilizados en el laboratorio.

Los decibelios son una unidad logarítmica relativa pues son una forma conveniente de expresar una relación, como la amplitud de una señal de entrada entre la de salida. Es conveniente en el análisis de sistemas de respuesta en frecuencia pues las gráficas son intuitivas y visualmente informativas cuando el eje de frecuencia usa una escala logarítmica y el de amplitud una escala db.

4. Equipo y Materiales

Cantidad	Descripción
1	Generador de funciones
1	Osciloscopio
1	Multímetro digital
1	Protoboard
1	Resistencia de 2k
2	Resistencias de 1k
1	Condensador de 47nF

2	Condensadores de 100nF
	Cables de conexión tipo banana-banana

5. Procedimiento

5.1. Circuito RC serie

1. Monte el circuito de la figura 11.1

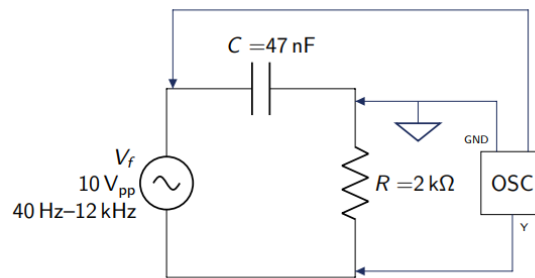


Figura 11.1: Circuito RC serie.

2. Ajuste la tensión del generador en un valor pico-pico de 10 V. Se debe mantener constante en el resto del experimento.

3. Verifique que el cable del osciloscopio no tenga conexión a tierra. Intercambie el cable si es necesario.

4. Obtenga en el osciloscopio las tensiones V_f contra V_C y V_f contra V_R . Mida para diferentes valores de frecuencia, de 40 Hz (si puede visualizar bien las señales a una frecuencia menor, utilícela para mejor comprensión) a 12 kHz la amplitud de V_C y su ángulo de fase con respecto a V_f . Tome como convención:

- Ángulo de fase positiva: V_C o V_R atrasa a V_f .
- Ángulo de fase negativa: V_C o V_R adelanta a V_f .

5. Resuma sus datos en la tabla 11.1.

Tabla 11.1: Valores de tensión y ángulos de fase

f [Hz]	V_C [V]	$\angle V_C / V_f$ [°]	V_R [V]	$\angle V_R / V_f$ [°]
40	2.4	1.44	0.273	-83.52
100	2.48	3.24	0.664	-88.56
150	4.9	5.40	0.898	-82.04

200	7.4	7.2	1.2	-80.64
250	9.8	7.92	1.52	-81
300	9.6	8.65	1.8	-77.84
400	9.6	14,4	2.34	-74.88
500	9.53	16.2	2.85	-72
700	9.1	22.18	3.87	-65.45
900	8.7	27.86	4.6	-60.97
1000	8.4	31.68	5.03	-57.6
2000	6.25	51.12	7.4	-38.16
3000	4.7	61.62	8.59	-32.43
4000	3.52	65.66	8.98	-23.62
6000	2.6	74.74	9.37	-12.93
8000	1.992	77.76	9.38	-10.94
10000	1.6	79.2	9.53	-9.36
12000	1.39	81.25	9.61	-7.78

5.2. Circuito RC serie-paralelo (Wien)

1. Monte el circuito de la figura 11.1

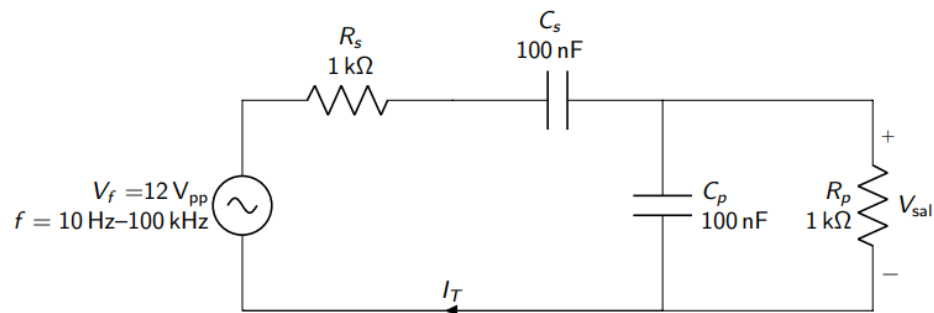


Figura 11.2: Circuito RC serie-paralelo.

2. Mida la tensión de salida V_{sal} pico-pico y el desfase θ entre la tensión de entrada V_{ent} y V_{sal} para los valores de frecuencia indicados en la tabla 11.2. Suponga ángulos positivos si la salida adelanta respecto a la entrada y negativos si existe atraso.

Tabla 11.2: Valores de tensión y ángulo de fase.

f [Hz]	V_{sal} [V_{pp}]	$\angle V_{sal}/V_f$ [°]
40	0.352	-79.2
100	0.781	-74.88
200	1.41	-64.8
300	1.99	-56.22
500	2.79	-43.2
800	3.2	-24.77
1000	3.48	-18
1200	3.7	-9.94
1600	2.5	3.46
3000	1.5	22.49
7000	1.23	51.61
15000	1.25	69.63
30000	0.719	73.94
50000	0.461	79.92
100000	0.266	86.4

6. Evaluación

6.1. Circuito RC serie

1. Con los datos obtenidos en la sección del procedimiento grafique (en computadora) con escala semilogarítmica, en un mismo gráfico, las curvas de las tensiones V_C y V_R en función de la frecuencia.

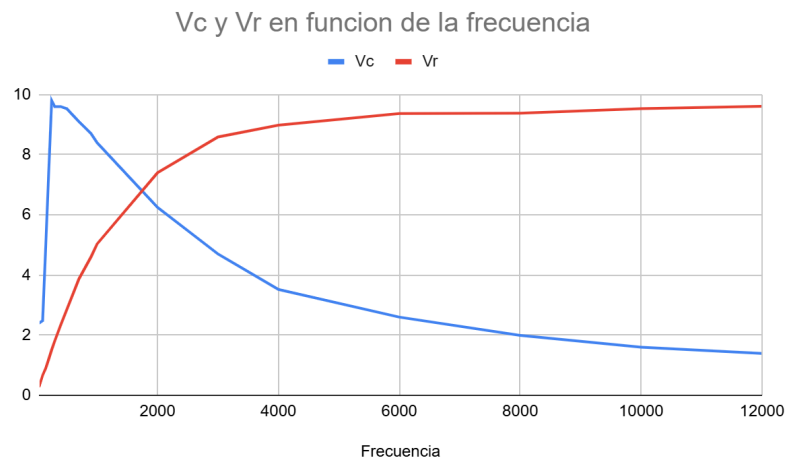


Figura 11.3. V_C y V_R del circuito RC serie en función de la frecuencia

2. Repita lo anterior para los ángulos de fase de V_C y V_R con respecto a V_f .

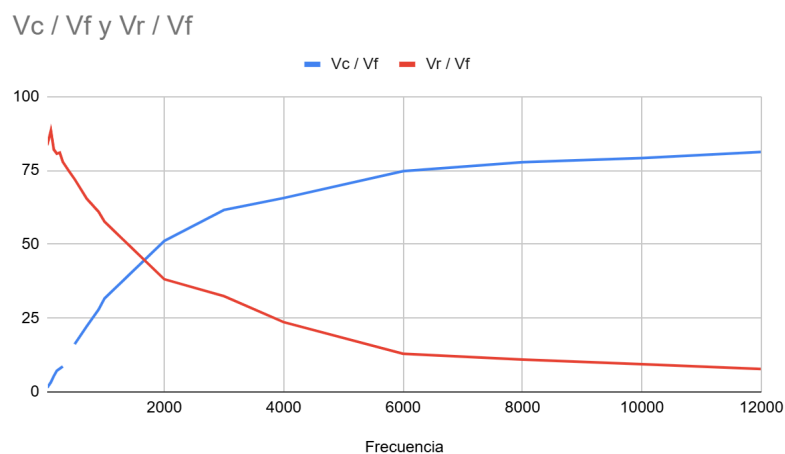


Figura 11.4: V_C contra V_f y V_R contra V_f en función de la frecuencia.

3. En los gráficos anteriores indique lo siguiente:
 - 3.1. La frecuencia a la cual se intersecan ambas curvas. Indique el valor de la tensión correspondiente. ¿Cómo se denomina esta frecuencia?

La frecuencia en la que se intersecan las curvas (muy similar a la que es la frecuencia de corte)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 2k\Omega \cdot 47nF} = 1693Hz$$

se puede obtener por medio de interpolación lineal en Bode, y con los siguientes valores dentro del rango de frecuencias 1000 y 2000:

$$f = f_1 + (f_2 - f_1) \cdot \frac{0 - D_1}{D_2 - D_1}$$

$$D_1 = V_c(1000\text{Hz}) - V_R(1000\text{Hz}) = 8.4 - 5.03 = 3.37V$$

$$D_2 = V_c(2000\text{Hz}) - V_R(2000\text{Hz}) = 6.25 - 7.4 = -1.15V$$

$$f = 1000 + (2000 - 1000) \cdot \frac{0 - 3.37}{-1.15 - 3.37} = 1745.58\text{Hz}$$

Para obtener el voltaje de interpolación, utilizamos el mismo método con los elementos intercambiados:

$$V_c(1745.58) = 8.4 + (6.25 - 8.4) \cdot \frac{1745.58 - 1000}{2000 - 1000} = 6.8V$$

3.2. Un rango de frecuencia en el que el ángulo de fase es nulo entre la tensión de salida VC o VR respecto a la tensión de entrada.

Basándonos en los datos de la tabla 11.1 podemos ver que el ángulo de desfase de V_c entre V_f es cercano a 0 conforme la frecuencia se acerca a 0; mientras que el ángulo de desfase de V_R entre V_f se acerca a 0 conforme la frecuencia aumenta.

3.3. Un rango de frecuencia en que el ángulo de fase es de 90° entre la tensión de salida VC o VR respecto a la tensión de entrada.

Con un análisis similar al inciso anterior podemos decir que el ángulo de fase entre V_c y V_f es de 90 o se va acercando a este, conforme la frecuencia aumenta a frecuencias muy altas; mientras que el ángulo de fase entre V_R y V_f se va acercando a 90 conforme la frecuencia se va acercando a 0.

3.4. La frecuencia a la cual el ángulo de fase entre la tensión de salida y la de entrada es de ±45° (según sea VC o VR).

La frecuencia en la que ambas curvas tienen un ángulo de fase de 45 grados con respecto a V_f es en la frecuencia de corte $f_c = 1693\text{Hz}$

4. ¿Cómo se denomina la frecuencia a la cual se cumple lo indicado en el punto 3.4? ¿Cómo se determina matemáticamente esta frecuencia? Obtenga su valor numérico.

Cómo calculado anteriormente, la frecuencia de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 2k\Omega \cdot 47nF} = 1693Hz$$

5. Analice la relación que hay entre la frecuencia obtenida en el punto 3.4 y la tensión de salida V_C o V_R .

La tensión en la cual se alcanza la frecuencia de corte es igual a la tensión de salida entre raíz de dos, la tensión de salida siendo V_C o V_R según corresponda.

6. Analice la relación que hay entre la frecuencia obtenida en el punto 3.4 y los valores de las impedancias R y X_C según el caso.

Esta frecuencia es el punto justo en el que (con el aumento de la frecuencia) el voltaje en el capacitor pasa de ser mayor que el voltaje en la resistencia, a ser cada vez menor, pues el capacitor ya alcanzó su capacidad máxima.

7. Deduzca la relación V_{sal}/V_f , en función de ω (frecuencia angular) y de los elementos del circuito R y C .

Las funciones de transferencia con divisor de tensión, para $V_{sal} = V_C$:

$$V_C = V_{in} \cdot \frac{Z_C}{Z_C + R}$$

$$\frac{V_C}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Para $V_{sal} = V_R$:

$$V_R = V_{in} \cdot \frac{R}{Z_C + R}$$

$$\frac{V_R}{V_{in}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

8. Para los casos en que $f = 1 \text{ kHz}$ y $f = 5 \text{ kHz}$, determine la magnitud de las tensiones, de las impedancias, de las corrientes y el ángulo de fase de la tensión de salida respecto a la tensión de entrada.

Para $f = 1 \text{ kHz}$:

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi \cdot 1000 \cdot 47 \text{ nF}} = -j3386.5 \Omega$$

$$Z_{total} = 2000 - j3386.5 \Omega$$

$$I = \frac{V_{in}}{|Z_{total}|} = \frac{10}{\sqrt{2000^2 + 3386.5^2}} = 2.54 \text{ mA}$$

$$|V_C| = I \cdot |Z_C| = 2.54 \text{ mA} \cdot 3386.5 \Omega = 8.6 \text{ Vpp}$$

$$\angle V_C = -\arctan(\omega RC) = \arctan(2\pi(1000)(2000)(47 \text{ nF})) = -30.57^\circ$$

$$|V_R| = I \cdot |R| = 2.54 \text{ mA} \cdot 2000 \Omega = 5.1 \text{ Vpp}$$

$$\angle V_R = \arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2\pi(1000)(2000)(47 \text{ nF})}\right) = 59.43^\circ$$

Para $f = 5 \text{ kHz}$:

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi \cdot 5000 \cdot 47 \text{ nF}} = -j677.3 \Omega$$

$$Z_{total} = 2000 - j677.3 \Omega$$

$$I = \frac{V_{in}}{|Z_{total}|} = \frac{10}{\sqrt{2000^2 + 677.3^2}} = 4.74 \text{ mA}$$

$$|V_C| = I \cdot |Z_C| = 4.74 \text{ mA} \cdot 677.3 \Omega = 3.2 \text{ Vpp}$$

$$\angle V_C = -\arctan(\omega RC) = \arctan(2\pi(5000)(2000)(47 \text{ nF})) = -71.29^\circ$$

$$|V_R| = I \cdot |R| = 4.74 \text{ mA} \cdot 2000 \Omega = 9.5 \text{ Vpp}$$

$$\angle V_R = \arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2\pi(5000)(2000)(47 \text{ nF})}\right) = 18.71^\circ$$

9. Utilizando los resultados obtenidos en el experimento brinde una explicación del funcionamiento de este circuito.

Como podemos observar en los datos experimentales, conforme más baja es la frecuencia, más grande es la impedancia del capacitor, lo que implica que tiene mayor caída de tensión, por lo tanto, al ver la salida en el capacitor durante este periodo, se observa una salida de voltaje alta en el capacitor y una salida de voltaje baja en la resistencia, lo que indica el comportamiento de un paso-bajo; además de un ángulo de fase de V_C cercano a 0 y un ángulo de fase de V_R cercano a 90. Por el contrario, en frecuencias más altas podemos ver que la impedancia del capacitor es baja, por lo tanto así lo es su caída de tensión, y la tensión en la resistencia es más alta, por lo tanto se ve el comportamiento de un paso-alto; además de un ángulo de fase de V_C cercano a 90 y un ángulo de fase de V_R cercano a 0. Si vemos el comportamiento alrededor de la frecuencia de corte, podemos ver que las tensiones del capacitor y de la resistencia son iguales (o muy similares) y los ángulos de fase de V_C y V_R son cercanos a 45.

10. Utilizando la simulación analice la diferencia en utilizar escalas lineal, logarítmica y en dB para la relación entre las amplitudes de entrada y salida.

Usando una escala lineal se muestran valores absolutos reales pero si la respuesta en frecuencia varía mucho, no se aprecia la diferencia entre una y otra. Mientras que usando una escala logarítmica se visualizan a la perfección los datos en décadas con las pendientes bien marcadas, con la magnitud en dB permitiendo leer de forma cómoda y estándar las atenuaciones.

6.2. Circuito RC serie-paralelo

1. Grafique V_{sal} y el desfase entre V_f y V_{sal} contra la frecuencia (en computadora) en escala semilogarítmica.

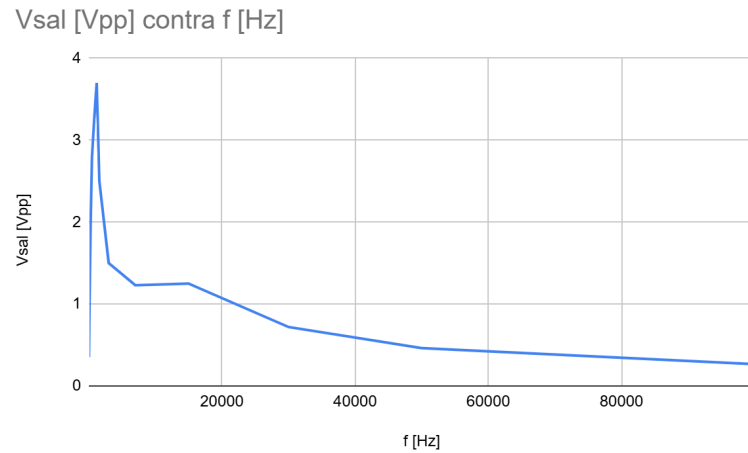


Figura 11.5: V_{sal} en función de la frecuencia.

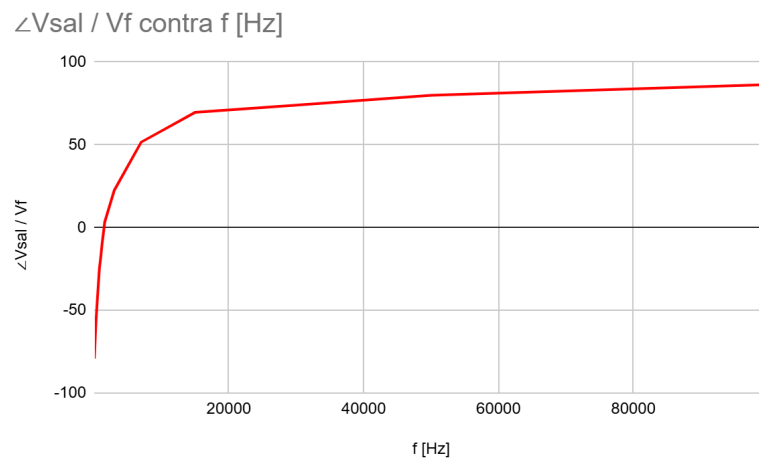


Figura 11.6: Ángulo de fase V_{sal} contra V_f en función de la frecuencia.

2. Determine la frecuencia a la cual se obtiene una tensión de salida máxima.

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 100nF} = 1591.55 \text{ Hz}$$
$$1591.55 \text{ Hz} \approx 1200 \text{ Hz}$$

3. Obtenga la relación V_{sal}/V_f a esta frecuencia.

En los datos experimentales:

$$f_o = 1200 \text{ Hz}, V_{sal} = 3.7 V_{pp}. \text{ Así: } \frac{V_{sal}}{V_{in}} = \frac{3.7 V_{pp}}{12 V_{pp}} = 0.3 V_{pp}$$

4. ¿A qué frecuencia se obtiene un desfase nulo?

En f_0 la fase de la función de transferencia es aproximadamente 0, y como podemos ver en los datos experimentales, dentro del rango de frecuencias 1200-1600 está el ángulo de fase igual a 0.

5. ¿Por qué a bajas y a altas frecuencias la tensión de salida tiende a 0 V?

Porque los capacitores tienden a comportarse como circuitos abiertos a bajas frecuencias y a altas frecuencias se comportan como cortocircuitos, se equilibran únicamente en el rango de f_0 .

6. Determine los siguientes datos experimentales:

- Frecuencia de corte inferior $f_{c \min}$
- Frecuencia de corte superior $f_{c \max}$
- Ancho de banda del filtro: $B = |f_{c \max} - f_{c \min}|$

Para las frecuencias de corte:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC - (\omega RC)^2}$$

$$|H|^2 = \frac{(j\omega RC)^2}{(1 - (\omega RC)^2)^2 + (3\omega RC)^2}$$

Ganancia máxima, $\omega = 1/RC$:

$$|H|^2_{\max} = \frac{1}{9}$$

Frecuencias de corte con:

$$|H|^2 = \frac{|H|^2_{\max}}{2} = \frac{1}{18}$$

Así:

$$\frac{1}{18} = \frac{(j\omega RC)^2}{(1 - (\omega RC)^2)^2 + (3\omega RC)^2}$$

Así:

$$f_{c, \min} = 481.88 \text{ Hz}$$

$$f_{c, \max} = 5256.53 \text{ Hz}$$

Para ancho de banda:

$$BW = f_{c, \max} - f_{c, \min} = 4774.65 \text{ Hz}$$

7. Calcule la reactancia capacitiva X_C para las siguientes frecuencias: 300 Hz, 1600 Hz, 7 kHz.

$$X_C(300) = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 100nF} = 5305\Omega$$

$$X_C(1600) = \frac{1}{2\pi \cdot 1600 \cdot 100nF} = 994.7\Omega$$

$$X_C(7000) = \frac{1}{2\pi \cdot 7000 \cdot 100nF} = 227.36\Omega$$

8. Realice los diagramas fasoriales de impedancia para las tres frecuencias anteriores (tres diagramas).

9. Dibuje un diagrama fasorial de voltajes superpuesto con uno de corrientes, válidos para la frecuencia en que la tensión de salida es máxima.

10. Del diagrama anterior, determine el ángulo de fase entre la tensión de salida y la tensión total. Indique si es adelanto o atraso.

11. La frecuencia del punto 2 del procedimiento se denomina frecuencia de oscilación f_o . Para esta frecuencia resuma el comportamiento del circuito Wien en cuanto a:

11.1. Voltajes: En f_o la tensión de salida alcanza su máximo teórico $V_{in}/3$.

11.2. Fase de impedancias: En f_o las fases serie y paralelo se combinan, obteniendo una fase real.

11.3. Corrientes: La corriente que pasa por la parte serie y paralelas tienen fases que se compensan.

7. Bibliografía

- C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, "Fundamentos de circuitos eléctricos", McGraw-Hill.
- R. C. Dorf, J. A. Svoboda, "Introduction to electric circuits", John Wiley & Sons
- All About Circuits. (s.f.). La guía del ingeniero de RF sobre el decibelio. Guía práctica para el análisis y desafío de radiofrecuencia. Recuperado de: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/rf-principles-components/the-rf-engineers-guide-to-the-decibel/>
- Cadence PCB Solutions. (s.f.). Designing a Wien Bridge Oscillator for a Sine Wave Generation. Recuperado de:

<https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-designing-a-wien-bridge-oscillator-for-sine-wave-generation>