

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

## 22.42 LABORATORIO DE ELECTRÓNICA

### TRABAJO PRÁCTICO N° 1

---

## **Osciloscopios/ Analizador de Impedancias/ Circuitos RC**

---

*Grupo 5:*

Nicolás DE LEÓN

Leg. 57232

Tomás VIGÓN

Leg. 57327

Benjamín LIN

Leg. 57242

Lucero Guadalupe FERNANDEZ

Leg. 57485

*Profesor:*

Pablo COSSUTTA

Alejandra WEILL

Matías SALVATI

Entregado: 28 de Agosto de 2018

## 1. Análisis de circuito RC

Se armó el circuito de la figura inferior con los valores nominales de  $R = 3,9k\Omega$  y  $C = 1,8nF$ .

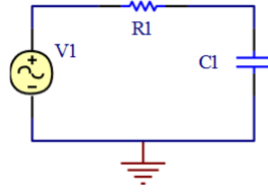


Figura 1.1: Circuito RC armado.

### 1.1. Cálculo analítico de la función transferencial

Teniendo en cuenta la figura 1.1; con  $V_{out}$  la tensión del capacitor y  $V_{in}$  como la tensión de entrada que fue una senoidal de  $5 V_{pp}$ , se halló analíticamente la función transferencial planteando un divisor resistivo. Se tuvo en cuenta la resistencia interna del generador ( $50\Omega$ ), y se la sumó a la  $R_{teorica} = R$ . La función transferencial resultó ser:

$$H(s) = \frac{1}{sRC + 1} \quad (1.1)$$

siendo  $s = j\omega$  y  $R = R_{medida} + R_{generador}$ . Se puede ver que la función obtenida es un pasabajos con un polo simple en  $\frac{1}{2\pi RC}$ . La frecuencia de corte es aquella en la que la salida  $V_{out}$  atenúa la entrada  $V_{in}$  en  $-3dB$  y la primera desfasa a la segunda en  $45^\circ$ ; de esta manera se buscó experimentalmente su respectiva frecuencia de corte que resultó ser  $f_{medido} = 21,8kHz$ .

A continuación, sabiendo que  $C_{cal} = \frac{1}{2\pi fR}$  se completó la siguiente tabla:

$ V_{in} [V]$	$ V_{out} [V]$	$R[k\Omega]$	$C_{calculado}[nF]$	$C_{medido}[nF]$	Error %
4.97	3.46	3.95	1.775	1.848	3.95
4.97	3.46	3.93	1.784	1.848	3.46

Cuadro 1.1: Tensiones y valores de componentes del circuito.

### 1.2. Medición de ángulo de fase entre $I$ y $V_C$

Para el cálculo de la corriente se utilizó  $I = \frac{V_R}{R}$ , asumiendo que la tensión y la corriente de la resistencia estaban en fase. Luego con el uso de la opción math del osciloscopio, se restó la caída en el capacitor a la tensión de entrada y se midieron las fases y amplitudes de las mismas, siendo la resultante de la resta  $V_R$ . Una vez que se obtuvo, se la dividió por el valor de la resistencia, obteniendo así, el valor vectorial de la corriente. De esta manera se obtuvo que  $|V_R| = 3,51V$  y  $|V_C| = 3,48V$ .

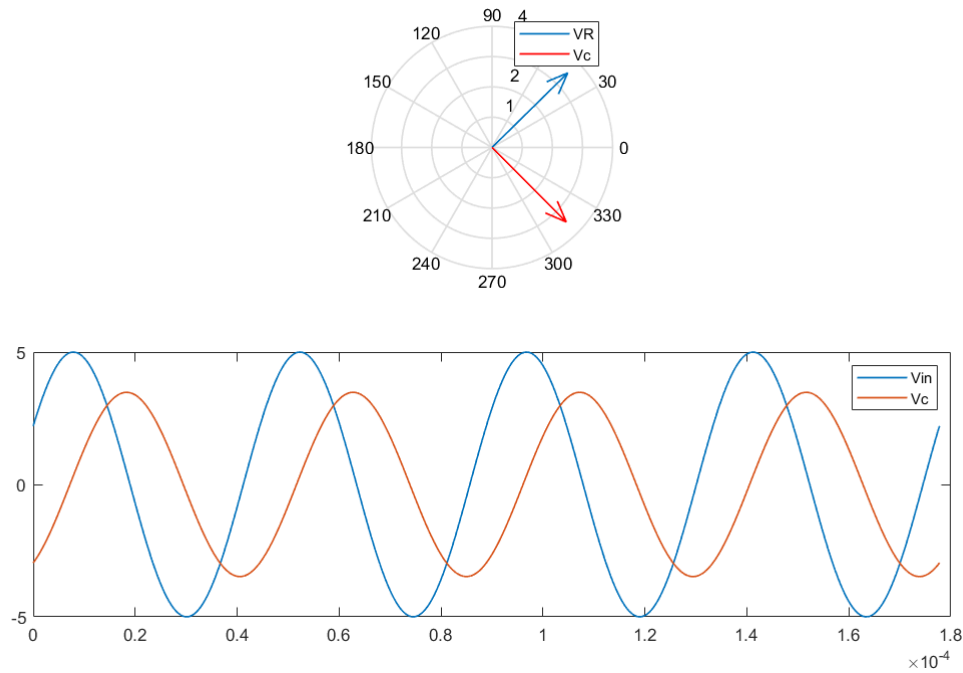


Figura 1.2: Diagrama fasorial y representación de las señales VR y VC.

De la figura 1.2 observamos que la corriente se adelanta a la tensión del capacitor  $90^\circ$ . Además, la suma fasorial de  $V_R$  y  $V_C$  es de 4.97V en vez de los 5V, esto puede ser por la resistencia del generador que aún siendo pequeña genera una caída de tensión en el circuito.

### 1.3. Cálculo analítico de la frecuencia de corte y diagrama de Bode

Como se vio en la sección 1.1, la frecuencia de corte resulta ser el polo de la función, es decir, cuando  $\omega_c = \frac{1}{RC}$ . Entonces, teniendo en cuenta que  $\omega = 2\pi f$ , se deduce que la frecuencia de corte es  $f_{c\text{calculado}} = 22,75\text{kHz}$ . Se diagramó el Bode de magnitud y fase, que se muestra a continuación.

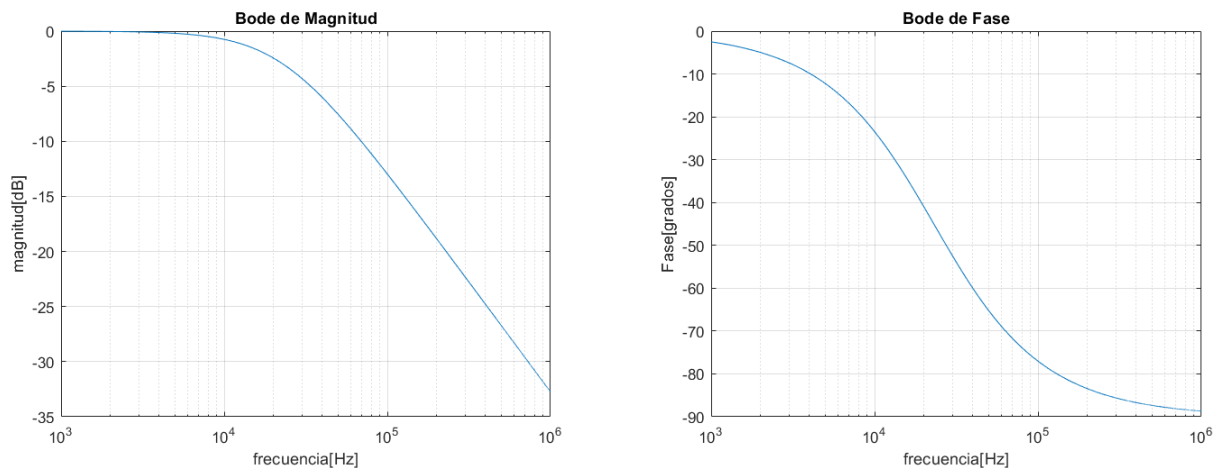


Figura 1.3: Bode de magnitud y fase para los valores medidos de R y C.

En la figura 1.3 puede verse que la frecuencia en la que la ganancia del circuito es  $-3\text{dB}$  y el desfase es de  $45^\circ$  es la

frecuencia de corte, que ronda los 22.7kHz.

#### 1.4. Función transferencia a distintas frecuencias

Se excitó con una senoidal de amplitud 5V, se midieron valores de tensión del capacitor y fase a distintas frecuencias entre 10Hz y 1MHz, completando la siguiente tabla. Donde el ángulo  $\phi_1$  fue medido en el modo  $\Delta t$  del osciloscopio; y el ángulo  $\phi_2$ , en el modo XY del osciloscopio. Se tomaron únicamente algunos valores representativos para el  $\phi_2$ , ya que sólo se quería un análisis cualitativo respecto de  $\phi_1$ . La diferencia entre ambos  $\phi$  se debe a errores de apreciación al medir y de cálculo al realizar  $\arcsin(\frac{\Delta X}{\Delta Y})$ , siendo  $\Delta X$  el ancho mínimo entre 2 extremos de la elipse y  $\Delta Y$  el ancho máximo entre dos de ellos.

$f[Hz]$	$ V_{in} [V]$	$ V_C [V]$	$H(s) = \frac{V_C}{V_{in}}(s)[dB]$	$\phi_1[grados]$	$\phi_2[grados]$
1k	4.97	4.86	-0.1	-3	0
5k	4.97	4.5	-0.3	-10	-
10k	4.97	4.1	-0.9	-20	-23
15k	4.97	3.93	-1.71	-34	-
17k	4.97	3.85	-2.1	-37	-
18k	4.97	3.76	-2.3	-38.5	-
19k	4.97	3.68	-2.4	-40	-
20k	4.97	3.64	-2.6	-41	-44
20.5k	4.97	3.62	-2.7	-42	-
20.8k	4.97	3.6	-2.8	-42	-
21k	4.97	3.59	-2.8	-43	-
21.2k	4.97	3.56	-2.8	-43	-
22.5k	4.97	3.48	-3.1	-45	-46
22.8k	4.97	3.46	-3.1	-45	-46
23.2k	4.97	3.43	-3.2	-46	-
24k	4.97	3.37	-3.4	-47	-
25k	4.97	3.3	-3.6	-48	-
27k	4.97	3.16	-3.9	-51	-
30k	4.97	2.97	-4.5	-53	-
35k	4.97	2.68	-5.4	-58	-53
42k	4.97	2.35	-6.6	-62	-
50k	4.97	2.04	-7.8	-65	-
58k	4.97	1.79	-8.9	-69	-
65k	4.97	1.62	-9.8	-70	-
95k	4.97	1.15	-12.8	-77	-
230k	4.97	0.49	-20.4	-84	-89
630k	4.97	0	-29.1	-90	-
1M	4.97	0	-32.7	-90	-

Cuadro 1.2: Módulo y fase de tensiones a distintas frecuencias.

#### 1.5. Bode teórico y empírico

Se graficó lo obtenido de la tabla 1.2 y se lo superpuso con el diagrama de Bode teórico de la función transferencia (ecuación 1.1).

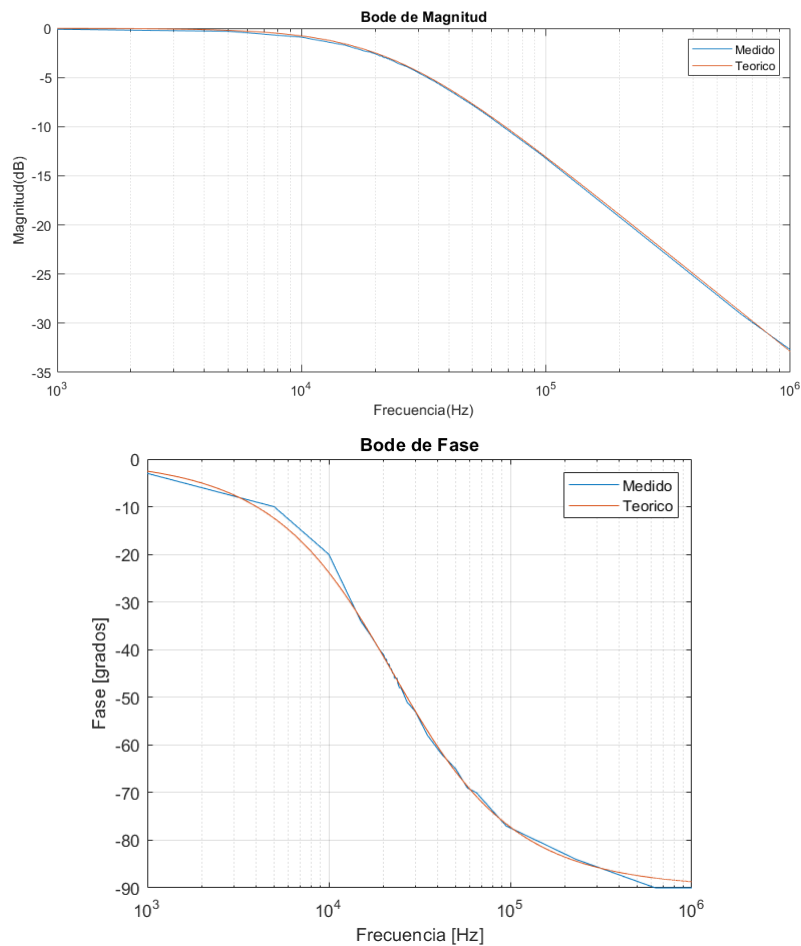


Figura 1.4: Bode de magnitud y fase medido y teórico.

Se puede observar que para el diagrama de amplitud las mediciones a distintas frecuencias se corresponden a lo calculado teóricamente. En el diagrama de fase, las variaciones se deben a errores de medición y en el rango de frecuencias altas, donde la señal es atenuada, se encuentra un mayor error ya que el ruido se hace comparable con la magnitud de la señal.

## 1.6. Respuesta al escalón

Se excitó al circuito con una señal cuadrada de  $5 V_{pp}$  en un rango de frecuencias entre  $500\text{Hz}$  y  $500\text{kHz}$ . Se destacaron las frecuencias  $1\text{kHz}$ ,  $15\text{kHz}$  y  $200\text{kHz}$ . Las mismas se muestran a continuación.

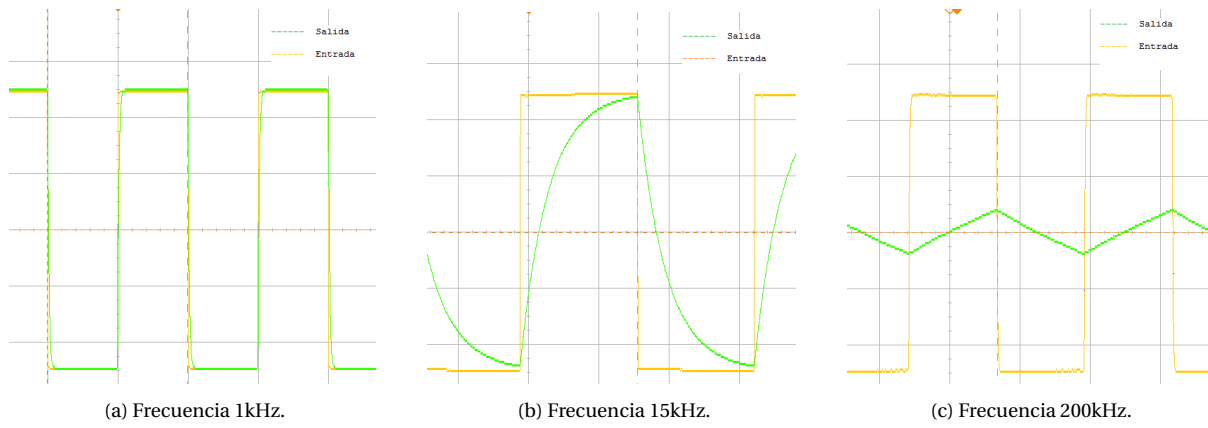


Figura 1.5: Respuesta al escalón.

Si antitransformamos la función transferencia para obtener la respuesta en el tiempo, ésta resulta:

$$h(t) = \frac{e^{-\frac{t}{RC}}}{RC} \quad (1.2)$$

Su respectiva respuesta al escalón será:

$$\tilde{h}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.3)$$

con  $\tau = RC$ . Cuando la frecuencia es de  $1kHz$ ; como se ve en la figura 1.5 (a), debido a la baja frecuencia, el circuito logra llegar a un estado estacionario en lo que dura el período de la excitación cuadrada. Esto se debe a que el tiempo característico del circuito  $\tau = RC = 6,84\mu s$ , que es mucho menor al período de la señal de entrada  $T = 1ms$ . Al excitar el circuito con una frecuencia de  $15kHz$ , cuyo período es de  $T \approx 66,67\mu s$ , que ya es comparable con el tiempo característico del circuito, se llega a apreciar el estado transitorio del mismo. Esto se puede observar en la figura 1.5 (b). En el último caso, en la figura 1.5 (c), con una frecuencia de  $200kHz$ , no se llega al estado estacionario, sino que se observa una fracción del transitorio, que se debe a que el período de la excitación cuadrada se vuelve menor al tiempo característico del circuito ( $T \approx 5\mu s$ ). Lo que se está viendo es la pendiente de la exponencial, que se asemeja con una recta. Se puede notar que a frecuencias mucho mayores a la de corte, la función transferencia puede aproximarse a  $H(s) = \frac{1}{sRC}$ , que es la transferencia de un circuito integrador. De este análisis se deriva, que a altas frecuencias el circuito integra.

## 1.7. Respuesta en frecuencia de VR

Se calculó la tensión en la resistencia a partir de las mediciones sobre la tensión del capacitor, realizando la resta entre  $V_{in}$  y  $V_C$ . Obteniéndose el siguiente gráfico de amplitud, se observa que la caída de tensión en la resistencia aumenta a medida que lo hace la frecuencia. Esto es lógico pues a medida que la frecuencia aumenta, la caída en el capacitor disminuye; -a altas frecuencias la impedancia del capacitor ( $Z_C = \frac{1}{sC}$ ) se hace nula, es decir el capacitor se convierte en un cable-.

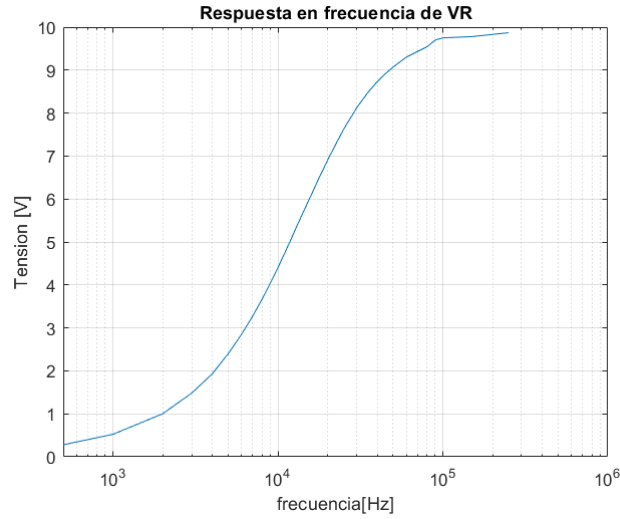


Figura 1.6: Respuesta en frecuencia de la tensión en la resistencia.

### 1.8. Influencia de las puntas en la medición

La punta del osciloscopio y el mismo tienen un modelo eléctrico, el cual en ciertas condiciones puede afectar la medición de un circuito. Esto puede modelarse como una resistencia  $R_{osc}$  en paralelo con un capacitor  $C_{osc}$  conectadas en la salida del circuito. Al medir con las puntas en x1 el valor de la resistencia interna es de  $R_{osc} = 1M\Omega$ ; mientras que en x10 pasa a valer  $10M\Omega$ , con  $C_{osc}$  a determinar. Al circuito en cuestión se le puede calcular la función transferencia asociando la impedancia del osciloscopio y realizando un divisor resistivo, dado que  $Z_{osc} = \frac{R_{osc}}{1+sR_{osc}C_{osc}}$ . De donde se obtiene:

$$H(s) = \frac{\frac{R_{osc}}{R+R_{osc}}}{1 + \frac{sR_{osc}C_{osc}R}{R+R_{osc}}} \quad (1.4)$$

Esta función tiene la forma de un pasabajos con  $f_{corte} = \frac{R+R_{osc}}{2\pi RC_{osc}R_{osc}}$ . Variando la frecuencia se encontró que la frecuencia de corte con las puntas x1 rondaba los 370kHz, mientras que en puntas x10 estaba cerca de los 2.3MHz. A continuación se muestran los diagramas de Bode realizados con las mediciones en ambas puntas y se muestra la tabla 1.3 comparando ambos resultados.

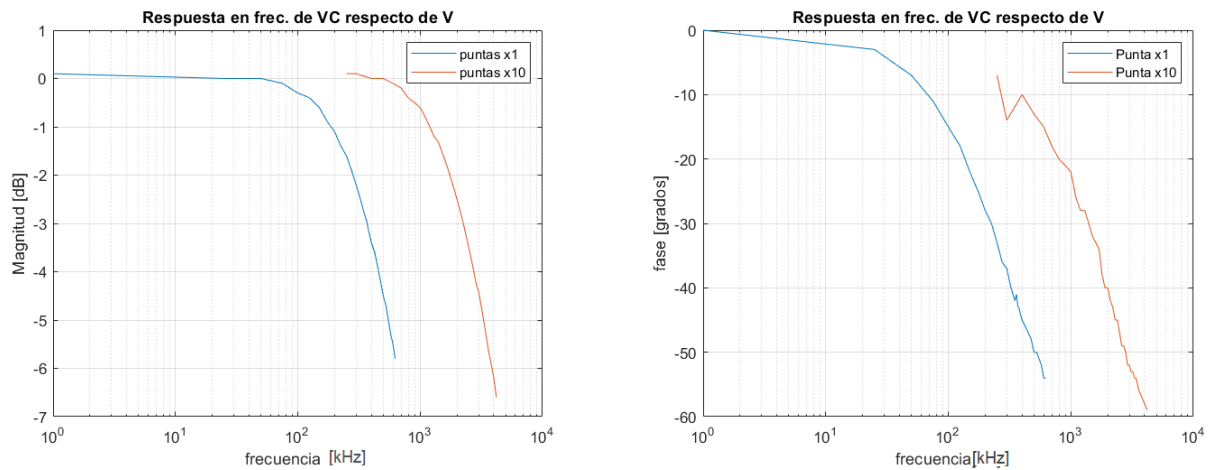


Figura 1.7: .

$ V_{in} [V]$	$ V_C [V]$	$R[k\Omega]$	$C_{calculado}[pF]$	$C_{medido}[pF]$	Error%
4.97	3.51	3.95	113.63	105.5	7.7
4.97	3.51	3.93	18.04	14.85	21.48

Cuadro 1.3: Valores de los componentes del osciloscopio.

## 1.9. Conclusiones

Se logró medir la respuesta del circuito RC y se verificó el análisis teórico de filtro pasabajos con frecuencia de corte en  $\frac{1}{2\pi RC}$ . También se vio cómo a altas frecuencias el circuito integra ya que su función transferencia se asemeja a aquella de un circuito integrador. Al analizar las puntas del osciloscopio se logró visualizar que puede actuar como filtro al combinarse con el osciloscopio, atenuando la señal que se intenta medir, ergo alterando las mediciones a altas frecuencias. Además, se llegaron a valores similares de capacitancia del osciloscopio que se suponían alrededor de los 100pF para las puntas x1 y 10pF para las puntas x10.

## 2. Análisis Circuito CR

Se armó el circuito de la figura inferior con los componentes anteriores.

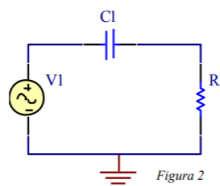


Figura 2.1: Circuito CR armado.

### 2.1. Función Transferencia

Como la función de transferencia en este circuito es  $H(s) = \frac{V_R(s)}{V_1}$  y considerando la resistencia del generador, la función de transferencia resulta ser:  $H(s) = \frac{sCR}{(R+R_{gen})Cs+1}$ . Además, como vimos en la sección anterior, el circuito RC tiene la



misma frecuencia de corte que el circuito CR, por lo que  $f_{corte} = 21,8kHz$  Por lo que notamos que a mayor frecuencia la tensión  $V_R$  aumenta, lo que es característico de un filtro pasa alto. Es posible visualizar este comportamiento en el siguiente diagrama de Bode:

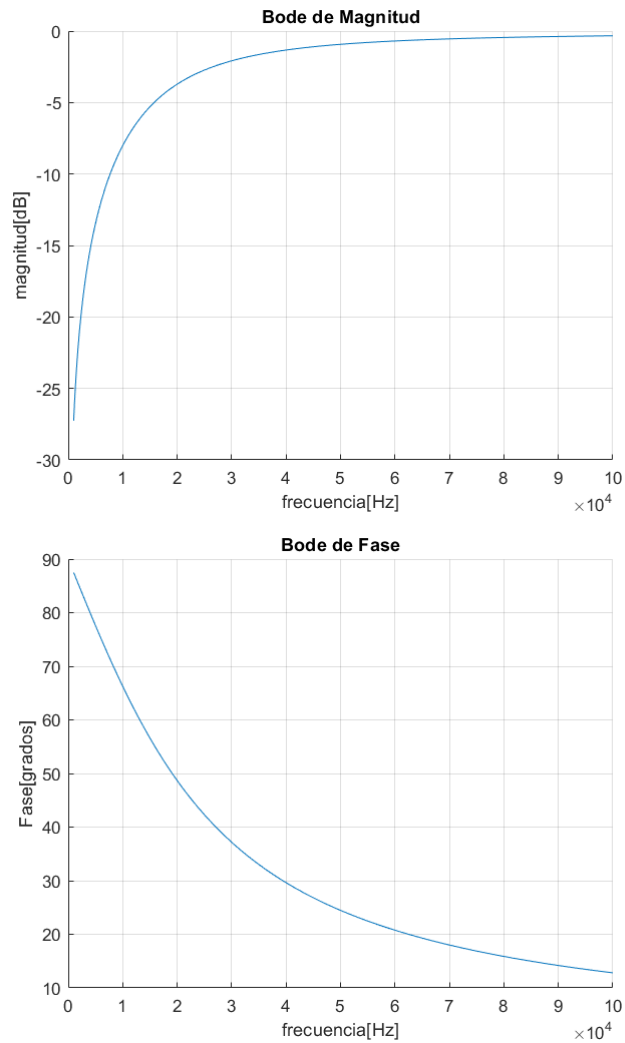


Figura 2.2: Diagrama de Bode Teórico.

## 2.2. Tabla de Mediciones

Excitando el circuito con una onda senoidal de  $10 V_{pp}$ , obtuvimos los siguientes resultados:

f[Hz]	$ V_{in} [V]$	$ V_R [V]$	$H(s) = \frac{V_R}{V_{in}}(s)[dB]$	$\phi[grados]$
1.00E+03	10	4.80E-01	-26.6	90
5.00E+03	10	2.28	-12.9	78.52
1.00E+04	10	4.15	-7.6	63.75
1.50E+04	10	5.55	-5.1	52.28
1.70E+04	10	6	-4.4	49.46
2.00E+04	10	6.5	-3.7	45.15
2.05E+04	10	6.6	-3.6	44.27
2.10E+04	10	6.67	-3.5	43.87
2.13E+04	10	6.7	-3.4	43.08
2.16E+04	10	6.75	-3.4	42.77
2.19E+04	10	6.8	-3.3	37.66
2.24E+04	10	6.87	-3.2	41.67
2.28E+04	10	6.96	-3.1	41.60
2.30E+04	10	7	-3.1	40.92
2.32E+04	10	7.02	-3	40.54
2.34E+04	10	7.05	-3	40.39
2.38E+04	10	7.1	-3	40.08
2.40E+04	10	7.12	-2.9	39.93
2.45E+04	10	7.2	-2.8	39.04
2.50E+04	10	7.24	-2.8	38.83
2.80E+04	10	7.54	-2.4	35.80
3.00E+04	10	7.72	-2.2	33.44
3.50E+04	10	8.04	-1.8	29.87
4.00E+04	10	8.3	-1.6	27.06
4.50E+04	10	8.5	-1.4	24.89
5.00E+04	10	8.64	-1.2	21.14
5.50E+04	10	8.75	-1.1	20.49
6.50E+04	10	8.9	-1	17.18
7.50E+04	10	9	-9.00E-01	15.96
8.00E+04	10	9.06	-8.00E-01	13.86
8.50E+04	10	9.1	-8.00E-01	12.56

Cuadro 2.1: Módulo de Tensiones, Magnitud y Fase de la función transferencia.

### 2.3. Análisis de Resultados

Con el uso de los datos hallados en el punto anterior conseguimos los siguientes diagramas, para los cuales se superpusieron la tensión  $V_R$  y  $\frac{V_R}{V_{in}}$  del circuito RC y los valores teóricos de la función de transferencia del circuito CR.

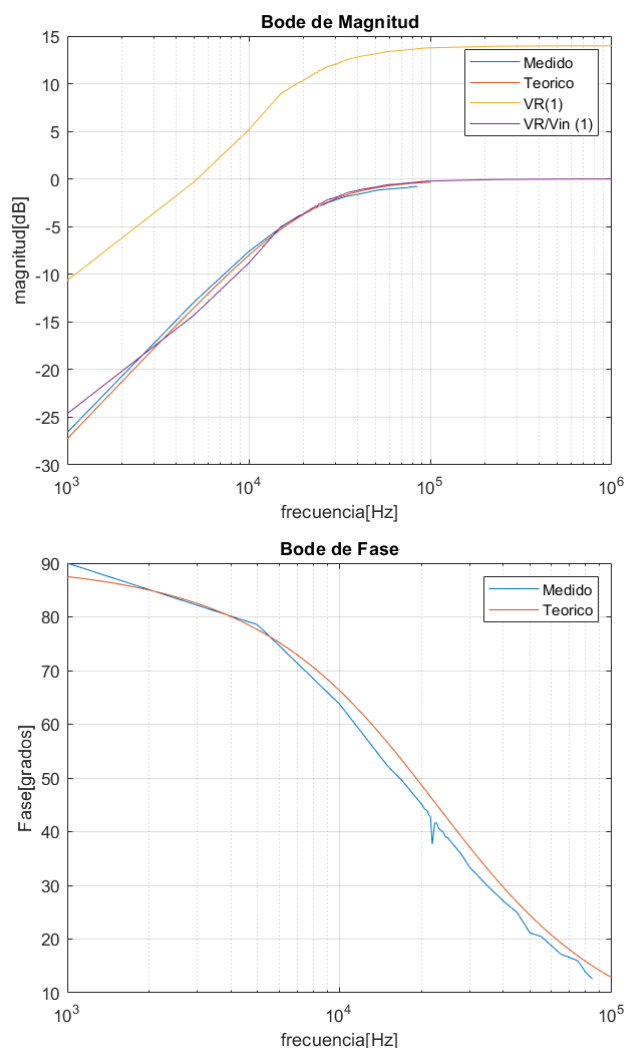


Figura 2.3: Diagramas de Amplitud y Frecuencia del circuito CR.

En la figura notamos una leve distinción entre los valores de amplitud y frecuencia de los medidos y los teóricos; esto se debe a que pudo haber errores durante la medición y además los componentes no son perfectos, por lo que presentan impedancia parásita causando alteraciones impredecibles durante la medición. Pero es posible la identificación del circuito CR como un filtro pasa altos. No es comparable el Bode del circuito RC con el  $V_R$ , debido a que el bode es la ganancia referida a la tensión de entrada mientras que  $V_R$  es la caída de tensión a una entrada específica, además los diferentes circuitos fueron alimentados con diferentes tensiones de entradas y se tomaron diferentes datos de frecuencias. Por lo que se propuso el gráfico de  $\frac{V_R}{V_{in}}$  lo que se asemeja más al filtro pasa altos.

### 2.4. Respuesta a señal triangular

Excitando al circuito CR con una onda triangular obtuvimos diferentes diagramas a diferentes frecuencias.

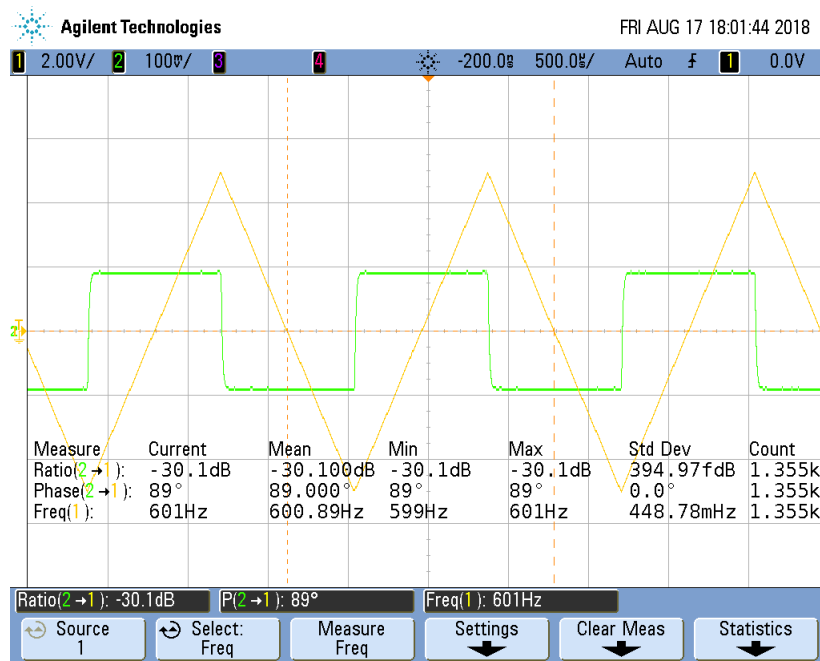


Figura 2.4: Diagramas del Circuito RC excitado con onda triangular a 600Hz.

A 600Hz notamos que la tensión de salida es muy atenuada ya que tiene características correspondientes a un filtro pasa-altos, es decir, se atenúan frecuencias menores a la de corte. Por otro lado, la salida es idéntica a la señal de entrada derivada. Esto es debido a que en la función de transferencia,  $H(s) = \frac{sCR}{(R+R_{gen})Cs+1}$  a bajas frecuencias, el denominador se asemeja a la unidad. Resulta entonces que la función de transferencia equivale a  $H(s) = sCR$ .

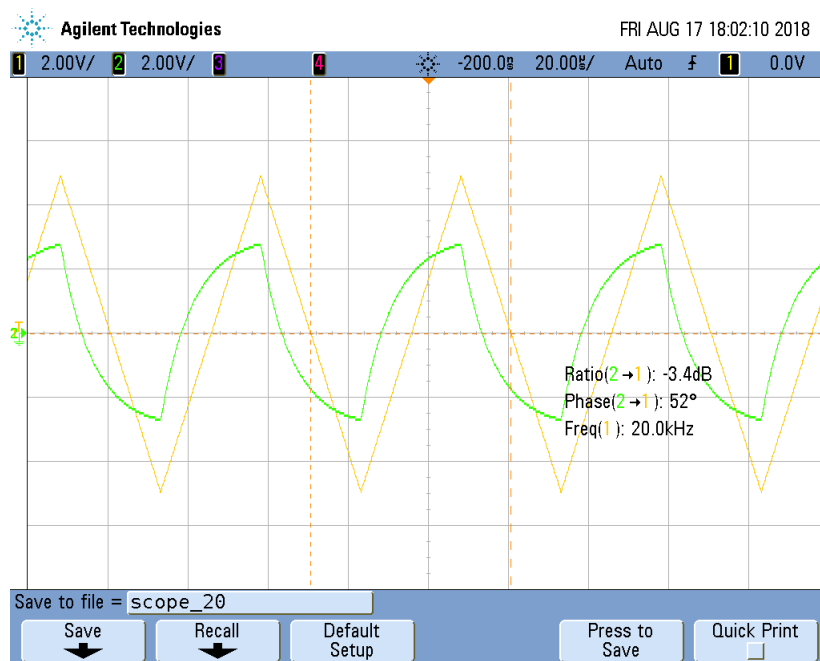


Figura 2.5: Diagramas del Circuito RC excitado con onda triangular a 20kHz.

Observamos que a 20kHz la salida está levemente atenuada. Puesto que el circuito es un pasa-altos y su frecuencia de corte está cerca de los 20kHz, es razonable que la atenuación sea ligera.

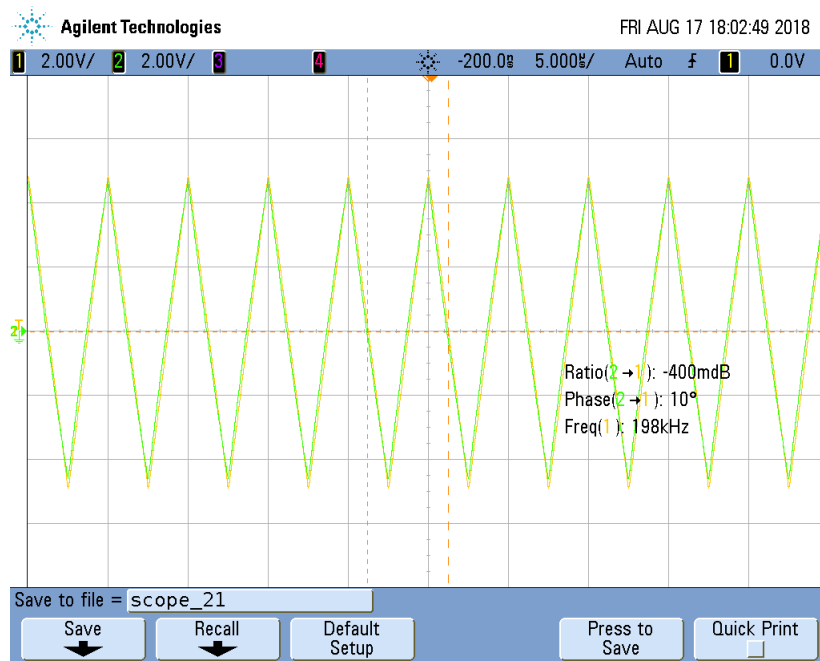


Figura 2.6: Diagramas del Circuito RC excitado con onda triangular a  $200\text{kHz}$ .

En esta última figura, a  $200\text{kHz}$ , contemplamos a grandes rasgos que la señal de salida es idéntica a la señal de entrada. Podemos explicar este fenómeno ya que a altas frecuencias el capacitor tiene características de un cable; pues el tiempo característico del circuito es  $\tau = RC = 7,02\mu\text{s}$  y el período de la señal de entrada al circuito es  $T = 5,05\mu\text{s}$ , entonces como el período del circuito es mucho mayor al tiempo característico la carga y descarga del capacitor se hacen en simultáneo con la señal de entrada.

### 3. Respuesta en frecuencia con barrido automático

#### 3.1. Modo normal del osciloscopio

El barrido automático se realizó con el generador en donde se barrió de  $100\text{Hz}$  a  $2\text{MHz}$  en un lapso de  $100\text{ms}$  con una senoidal de  $20\text{ V}_{pp}$ . La salida del generador se utilizó para excitar al circuito RC y se conectó el sync al osciloscopio para poder triggerear la señal, además se aprovechó el marker del sweep del generador para que la señal cuadrada entregada por el sync tenga un ancho de  $22,6\text{kHz}$  para que coincida con la frecuencia de corte calculada de nuestro circuito. Cabe mencionar que el barrido automático estaba configurado en escala logarítmica. Se obtuvo la siguiente imagen:

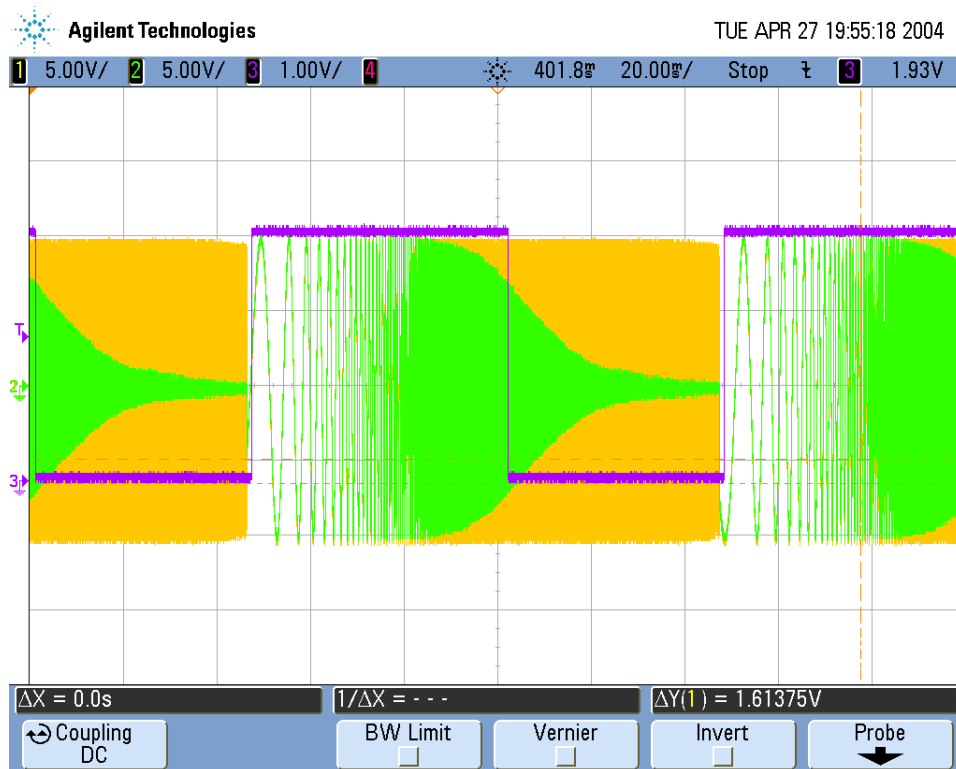


Figura 3.1: Respuesta en frecuencia con barrido automático en modo normal

La figura evidencia claramente el efecto del filtro pasa bajos sobre el circuito, mientras que la señal amarilla, que es la entrada, se mantiene constante en amplitud a lo largo de todo el barrido. La salida que es la señal verde tiene ganancia unitaria en las bajas frecuencias y luego se atenúa a medida que ésta aumenta. La señal cuadrada violeta marca la frecuencia de corte del circuito donde se espera una caída de 3dB. En veces equivale aproximadamente a una atenuación de  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , es decir,  $V_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} * V_{in}$ . En nuestro caso como  $V_{in}$  tiene una amplitud de 10 V,  $V_{out}$  debería tener una amplitud aproximada de 7.1 V, esto se puede observar claramente en el gráfico.

### 3.2. Modo XY del osciloscopio

Se intentó simular el barrido en el modo XY bajo ciertas características. Se colocó un generador realizando un sweep barriendo nuevamente frecuencias de 100Hz a 2MHz esta vez lineal cada 10ms con una senoidal 20Vpp y bajo estas condiciones se lo conectó a la entrada del circuito. Luego se sincronizó el trigger del generador de sweep con el flanco descendente de la señal del generador 2, en el cual se colocó una rampa de 10Vp a un período de 11ms y se la conectó en la entrada X del osciloscopio. Se conectó la salida del circuito a la entrada Y del osciloscopio. Por consecuente, tomando en cuenta las consideraciones establecidas, se esperaba ver como en el modo XY el eje Y iba a presentar las senoidales en modo sweep desde la frecuencia inicial a la final y en la componente X un desplazamiento de 0 a 10V estableciendo la relación 0V a  $t = 0$  y en 10V  $t = 11ms$  dejando entrar un poco mas de un barrido en pantalla.



Figura 3.2: Respuesta en frecuencia con barrido automático en modo XY

Se puede observar como las configuraciones previas permitieron el análisis en frecuencia del circuito, dando una imagen relacionada directamente con la obtenida en el modo normal del osciloscopio bajo el mismo sweep. Es importante notar como se configuró la escala en X y en Y para poder formar correctamente la imagen en pantalla del barrido en frecuencia.

#### 4. Respuesta en frecuencia del osciloscopio

Para medir la respuesta en frecuencia del osciloscopio se utilizaron dos puntas de osciloscopio y un generador, por un lado se conectaron ambas puntas con el generador de señales entre sí y por el otro las masas de estos tres elementos también entre sí. El bode del circuito se realizó con los filtros AC y el BW de una punta activados y se lo excitó con una senoidal de  $10 V_{pp}$ . Los resultados obtenidos de las mediciones se graficaron en la siguiente figura:

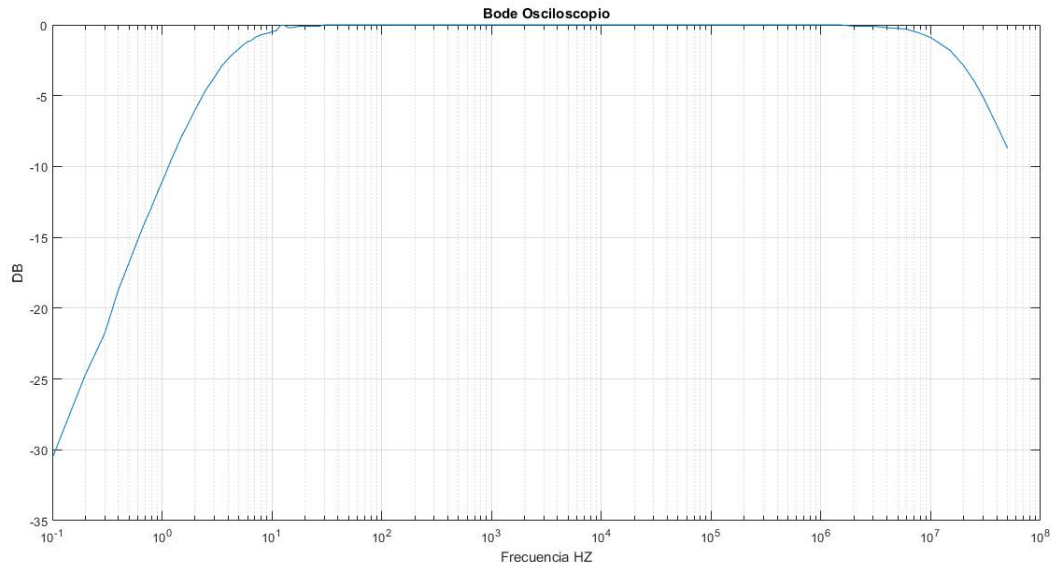


Figura 4.1: Respuesta en frecuencia del osciloscopio

Se puede observar que la forma de la respuesta en frecuencia es la de un filtro pasa banda ya que atenúa las frecuencias menores a 10Hz y las frecuencias mayores a 10MHz. Esto se debe a que el filtro AC del osciloscopio filtra las señales continuas con un capacitor formando un filtro pasa altos que posee una frecuencia de corte muy pequeña; y el filtro BW disminuye el ancho de banda atenuando las altas frecuencias mediante un filtro pasabajos, la combinación de ambos actúa como el pasa banda representado en la figura 4.1.