

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

22.42 LABORATORIO DE ELECTRÓNICA

---

## Trabajo Práctico N°2

---

*Grupo 3*

BERTACHINI, Germán	58750
LAMBERTUCCI, Guido Enrique	58009
LONDERO BONAPARTE, Tomás Guillermo	58150
MECHOULAM, Alan	58438
SCAPOLLA, Franco	58465

*Profesores*

COSSUTTA, Pablo Martín  
WEILL, María  
SALVATI, Matías

Presentado: 20/09/19

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Capacitor . . . . .	4
<b>2. Filtro pasabajos</b>	<b>5</b>
<b>3. Filtro pasabanda</b>	<b>9</b>
<b>4. Filtro pasaaltos</b>	<b>10</b>
4.1. Análisis del circuito . . . . .	10
4.2. Respuesta en frecuencia. . . . .	10
<b>5. Filtro Notch</b>	<b>11</b>
<b>6. Medición del factor de calidad</b>	<b>13</b>
6.1. Q Teórico . . . . .	13
6.2. Q High/Low/Band-Pass . . . . .	13
6.3. Q Notch . . . . .	13

## 1. Introducción

En el presente trabajo de laboratorio se estudian filtros RLC de segundo orden, haciendo uso del osciloscopio, el generador de funciones y el analizador de impedancias. También, se realiza un programa para automatizar las mediciones del osciloscopio; dicho programa será de gran utilidad en trabajos prácticos futuros.

## Caracterización de componentes pasivos

### Inductancia

A continuación, se realizará un estudio acerca del comportamiento de una bobina, observando como varían sus magnitudes según la frecuencia y analizando sus circuitos equivalentes.

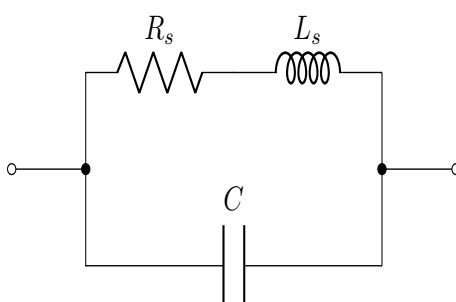
En un sistema simplificado, la bobina sólo tiene un componente inductivo, sin embargo, dicho planteo dista en gran medida de la realidad donde, debido en gran medida a su fabricación, las inductancias tendrán tanto componentes resistivos como capacitivos.

Las características previamente mencionadas nos llevarán a plantear distintos circuitos equivalentes. Se analizará cual de ellos refleja en mejor medida la práctica experimental realizada.

Para comenzar, se realiza el estudio de las magnitudes propias del inductor en función de la frecuencia.

Las frecuencias utilizadas fueron detectadas ya que eran las que permitían ver con claridad como variaba la fase. Las mediciones se tomaron en el modo serie del analizador de impedancias, las mismas se pueden apreciar en la tabla (1).

Se plantea el siguiente circuito equivalente:



Al ser las bobinas un conjunto de espiras enrolladas una gran cantidad de vueltas, el componente resistivo de la inductancia se debe a la resistencia eléctrica del material utilizado en su fabricación. También, se podría considerar la resistencia propia de los terminales. Por otro lado, debido a que constructivamente cada una de las vueltas de la bobina están aisladas eléctricamente entre

si debido al barniz que recubre el material y a la pequeña diferencia de tensión, se puede apreciar el comportamiento de un capacitor entre vuelta y vuelta del cable.

$f_s[Hz]$	$L_s[mH]$	$Q$	$R_s[\Omega]$	$ Z [\Omega]$	$\theta[^\circ]$
10	0.490	0.0	0.91	0.96	18.7
100	0.480	3.0	0.10	0.32	72.0
1K	0.480	16.6	0.18	3.02	86.0
5K	0.485	25.8	0.59	15.23	87.8
10K	0.482	26.0	1.16	30.32	87.8
20K	0.478	23.8	2.52	60.11	87.6
30K	0.474	22.1	4.04	89.35	87.4
50K	0.467	19.5	7.50	146.70	87.1
75K	0.462	16.7	13.00	217.80	86.6
100K	0.459	14.4	20.00	289.20	86.0
200K	0.466	8.6	67.70	589.50	83.4
400K	0.529	4.1	322	1368	76.4
450K	0.556	3.5	450	1635	74.1
500K	0.589	2.9	632	1954	71.2
550K	0.627	2.4	893	2344	67.6
600K	0.669	2.0	1281	2829	63.1
650K	0.708	1.5	1868	3442	57.1
700K	0.724	1.2	2763	4217	49.1
725K	0.711	1.0	3356	4664	44.0
750K	0.671	0.8	4060	5147	38.0
775K	0.595	0.6	4831	5633	31.0
800K	0.472	0.4	5608	6089	22.9
825K	0.301	0.2	6264	6456	14.0
850K	0.094	0.1	6653	6672	4.4
855K	0.053	0.0	6692	6698	2.5
862K5	-0.100	0.0	6715	6715	-0.5
870K	-0.719	0.1	6706	6718	-3.4
875K	-0.111	0.1	6677	6705	-5.3
900K	-0.290	0.3	6356	6563	-14.4
925K	-0.421	0.4	5787	6282	-22.9
950K	-0.500	0.6	5114	5921	-30.3
1M	-0.549	0.9	3820	5146	-42.1
1M1	-0.470	1.5	2132	3884	-56.7
1M2	-0.368	2.1	1306	3068	-64.8
1M3	-0.291	2.7	874	2531	-69.8
1M4	-0.235	3.3	626	2159	-73.2
2M	-0.093	6.7	175	1179	-81.5
4M	-19.79 $\mu$	16.8	29.6	498.4	-86.6
10M	-2.893 $\mu$	27.3	6.7	181.9	-87.9

Tabla 1: Magnitudes del inductor en función de la frecuencia

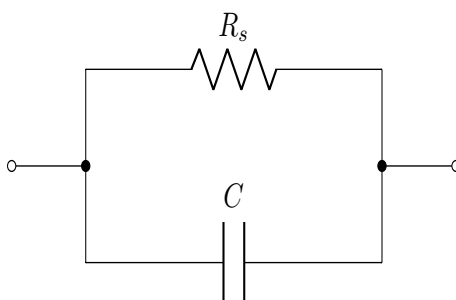
### 1.1. Capacitor

Se procederá a realizar el mismo análisis planteado anteriormente para una inductancia pero, para este caso con un capacitor, analizando como varían sus magnitudes según la frecuencia a la que trabaja y el estudio de sus circuitos equivalentes.

Para comenzar, se realiza el estudio de las magnitudes propias del capacitor en función de la frecuencia.

Las frecuencias utilizadas fueron detectadas ya que eran las que permitían ver con claridad como variaba la fase. Las mediciones se tomaron en el modo paralelo del analizador de impedancias por lo que se medirán conductancias. Las mismas se pueden apreciar en la tabla (2).

Se plantea el siguiente circuito equivalente:



La resistencia observada se debe a la resistencia eléctrica del material del componente(film). También, se podría considerar la resistencia propia de los terminales.

Por otro lado, se podría considerar una inductancia en el modelo equivalente pero debido al método de fabricación y por las frecuencias con las que se puede trabajar en el laboratorio no se pudo hallar una frecuencia donde se apreciará un comportamiento de tipo inductivo. El máximo cambio de fase obtenido fue de aproximadamente  $4^\circ$  a  $13MHz$ .

$f_P[Hz]$	$C_P[nF]$	$D$	$R_P[S]$	$ Z [S]$	$\theta[^\circ]$
10	2.2	0.000	0.00	$0.14\mu$	89.9
100	2.27	0.010	0.00	$1.43\mu$	89.90
1K	2.26	0.004	$0.05\mu$	$14.22\mu$	89.80
5K	2.25	0.007	$0.49\mu$	$70.73\mu$	89.60
10K	2.24	0.007	$1\mu$	$0.14m$	89.56
20K	2.23	0.010	$3\mu$	$0.28m$	89.42
30K	2.23	0.011	$5\mu$	$0.42m$	89.35
50K	2.22	0.013	$9\mu$	$0.70m$	89.28
75K	2.21	0.014	$14\mu$	$1.04m$	89.22
100K	2.21	0.014	$19\mu$	$1.38m$	89.21
200K	2.19	0.015	$42\mu$	$2.75m$	89.30
400K	2.18	0.016	$88\mu$	$5.47m$	89.08
450K	2.17	0.016	$100\mu$	$6.15m$	89.07
500K	2.17	0.016	$111\mu$	$6.82m$	89.06
550K	2.12	0.017	$124\mu$	$7.40m$	89.06
650K	2.17	0.017	$149\mu$	$8.84m$	89.04
750K	2.16	0.017	$173\mu$	$10.20m$	89.03
800K	2.16	0.017	$186\mu$	$10.87m$	89.02
900K	2.16	0.017	$210\mu$	$12.22m$	89.01
1M	2.16	0.018	$240\mu$	$13.57m$	89.00
1M2	2.16	0.018	$290\mu$	$16.27m$	88.97
2M	2.16	0.019	$520\mu$	$27.12m$	88.90
4M	2.2	0.023	$1.270m$	$55.38m$	88.68
7M	2.3	0.032	$3.200m$	$101.05m$	88.16
9M	2.43	0.039	0.005	0.13	87.70
11M	2.63	0.050	0.009	0.18	87.10
12M	2.76	0.057	0.012	0.21	86.70
13M	2.91	0.065	0.015	0.24	86.30

Tabla 2: Magnitudes del capacitor en función de la frecuencia

## 2. Filtro pasabajos

En esta sección se analizó la respuesta al escalón del circuito mostrado en la Figura (1). Sabiendo que  $L = 500 \mu H$ ,  $C = 33 nF$  y  $\xi = 0,33$ , se determinó que  $R = 81,24 \Omega$ . Además, se calculó la frecuencia de resonancia de este circuito, siendo esta  $f_0 = 39,2 kHz$ . Para determinar R se analizó primero la transferencia. Tenemos que la función transferencia del circuito es:

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (1)$$

Sabiendo que  $w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  y escribiendo el denominador de  $H(s)$  la forma

$1 + 2\xi \frac{s}{w_0} + (\frac{s}{w_0})^2$  obtenemos

$$H(s) = \frac{1}{1 + RC \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{s}{\sqrt{LC}} + (\frac{s}{\sqrt{LC}})^2} = \frac{1}{1 + R\sqrt{\frac{C}{L}} \frac{s}{w_0} + (\frac{s}{w_0})^2} \quad (2)$$

Por lo tanto, se tiene que  $2\xi = R\sqrt{\frac{C}{L}}$ , de donde como  $\xi = 0,33$ ,  $L = 500\mu H$  y  $C = 33nF$ , se encuentra  $R = 81,24\Omega$

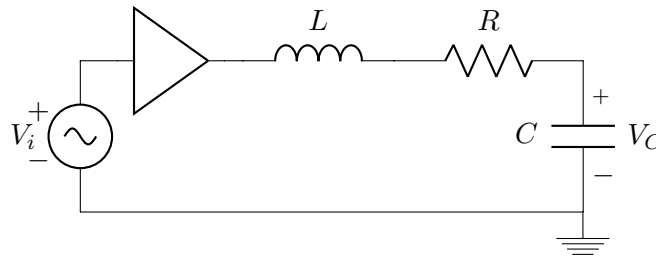


Figura 1: Primera etapa del circuito.

Luego se procedió a analizar distintos valores de importancia del circuito, como lo son la frecuencia de oscilación del transitorio, el tiempo de establecimiento del 5% y el sobrepico. Para ello se analiza nuevamente la transferencia del circuito hallada en (2)

$$H(S) = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1}$$

Es así que, sabiendo que la transformada de Laplace del escalón es  $\frac{1}{S}$ , y la salida del sistema es  $Y(S) = X(S) \cdot H(S)$ , se obtuvo la respuesta al escalón de este:

$$V_C(t) = 1 - e^{-t\frac{R}{2L}} \cdot \left[ \frac{1}{2\sqrt{4LC - RC^2}} \cdot \text{sen} \left( \frac{\sqrt{4LC - RC^2}}{2LC} \cdot t \right) + \cos \left( \frac{\sqrt{4LC - RC^2}}{2LC} \cdot t - \pi \right) \right] \quad (3)$$

Además, se sabe que la frecuencia de oscilación del transitorio se puede calcular como

$$f_t = f_0 \cdot \sqrt{|\xi^2 - 1|} = 37 \text{ kHz} \quad (4)$$

Por otro lado, el sobrepico se calcula como

$$M_p = e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = 333mV \quad (5)$$

Finalmente, el tiempo de establecimiento del 5% puede calcularse de (3) como

### COLOCAR CALCULOS.

Considerando los valores comerciales, y sabiendo que se disponía de una bobina de una inductancia de  $500 \mu H$ , se utilizaron una resistencia de  $82 \Omega$  y un capacitor de  $33 nF$ . Es así que se preparó el circuito en un protoboard y se procedió a realizar las mediciones pertinentes y así compararlas con los cálculos teóricos. Este circuito fue excitado con una señal cuadrada, la cual posee una frecuencia de  $3,92 kHz$  y una amplitud tal que la tensión de salida máxima sea de  $1 V_{pp}$ . Es así que se observó la respuesta al escalón del sistema, al inicio de cada cuadrada.

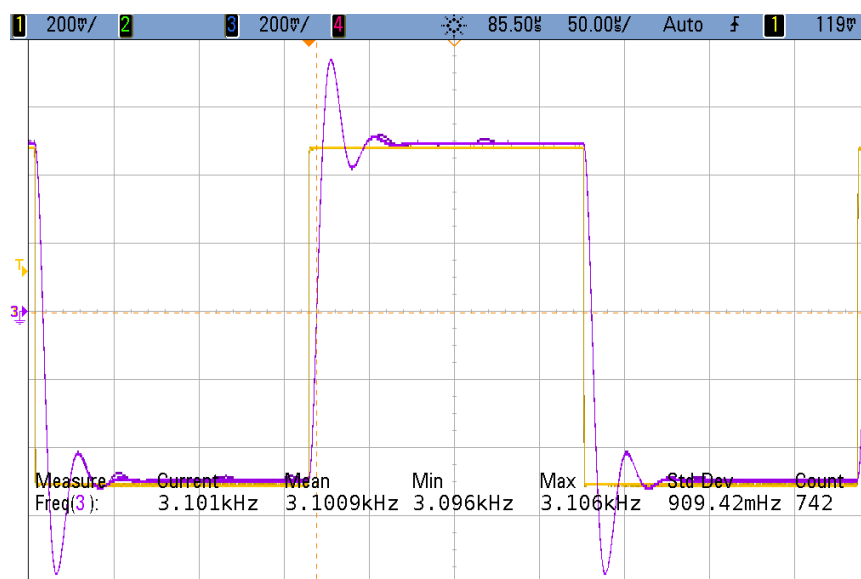


Figura 2: Respuesta al escalón del circuito.

De esta forma, se midió una frecuencia de oscilación de  $41 KHz$ , un sobrepico de  $245 mV$  y un tiempo de establecimiento del  $5\%$  de  $33,6 \mu s$ . Las discrepancias entre los valores teóricos y los medidos pueden deberse a varios factores: errores humanos, errores de instrumentación.

Luego, se obtuvo el diagrama de BODE del sistema. Es así que se compara este con el teórico y con el simulado.



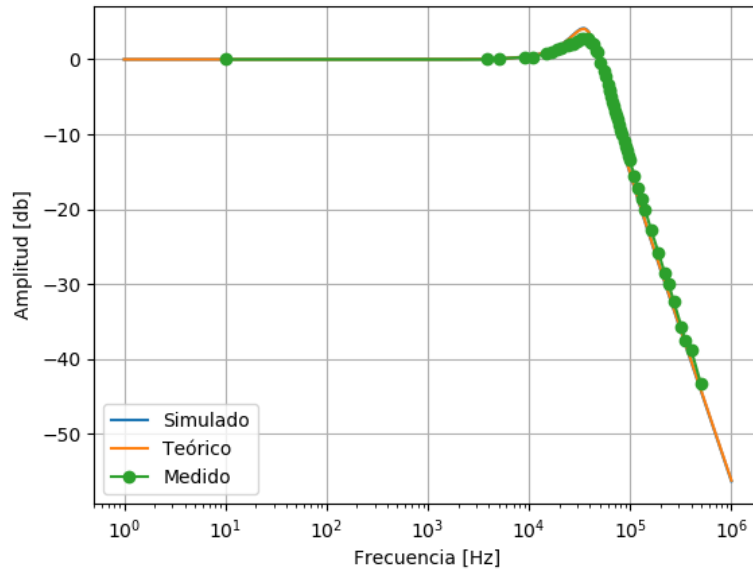


Figura 3: Comparación de diagramas de Bode en módulo.

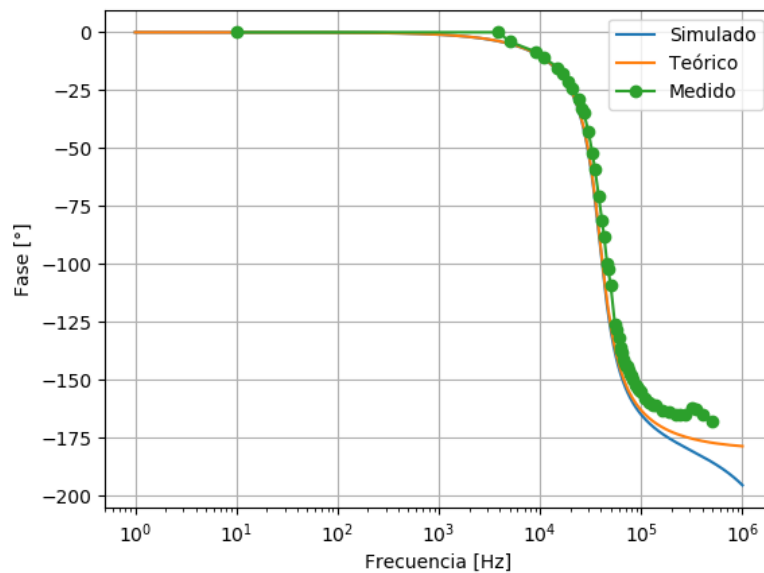


Figura 4: Comparación de diagramas de Bode en fase.

**PUNTO E.**

### 3. Filtro pasabanda

Se analizó el circuito de la figura 5

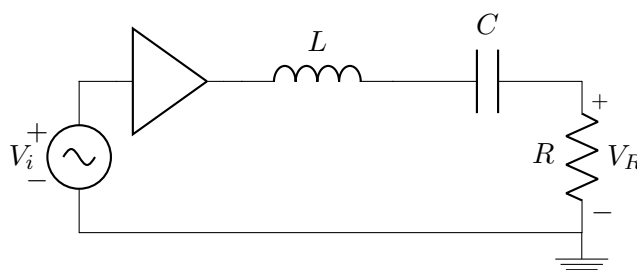


Figura 5: Filtro pasabanda

En este caso la función transferencia es

$$H(s) = \frac{sRC}{1 + sRC + s^2LC} \quad (6)$$

La frecuencia de oscilación y el valor de sobrepico teóricos son los mismos que en el caso del filtro pasabajos, calculados en (4) y (5) respectivamente. Se midió la respuesta en frecuencia del circuito (8) para contrastar que el modelo analítico corresponda con la realidad, además se hizo una simulación en **LTSpice** obteniendo los siguientes resultados:

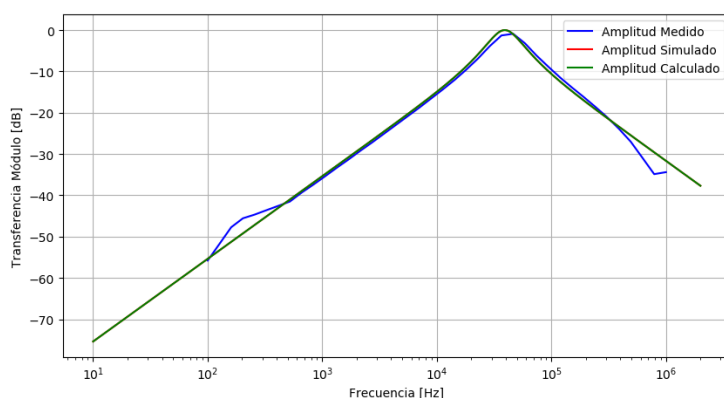


Figura 6: Comparación de diagramas de Bode en módulo Band-Pass.

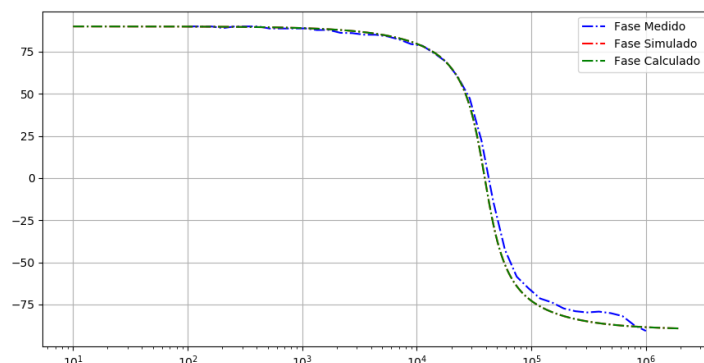


Figura 7: Comparación de diagramas de Bode en fase Band-Pass.

## 4. Filtro pasaaltos

### 4.1. Análisis del circuito

Se analizó el circuito de la figura 8

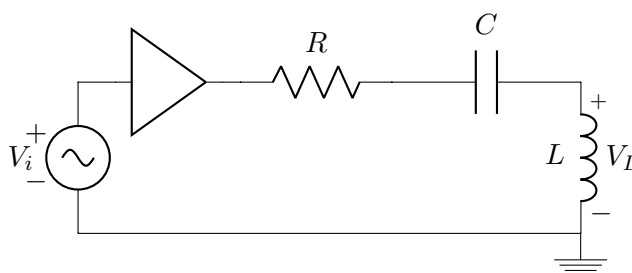


Figura 8: Filtro pasaaltos

En este caso la función transferencia es

$$H(s) = \frac{s^2 LC}{1 + sRC + s^2 LC} \quad (7)$$

Nuevamente, como el denominador de la función transferencia es el mismo que en los casos del filtro pasabanda y pasabajos, los valores teóricos de la frecuencia de oscilación y el sobrepico son los calculados en (4) y (5) respectivamente.

### 4.2. Respuesta en frecuencia.

Se midió la respuesta en frecuencia del circuito (8) para contrastar que el modelo analítico corresponda con la realidad, además se hizo una simulación en

**LTSpice** obteniendo los siguientes resultados:

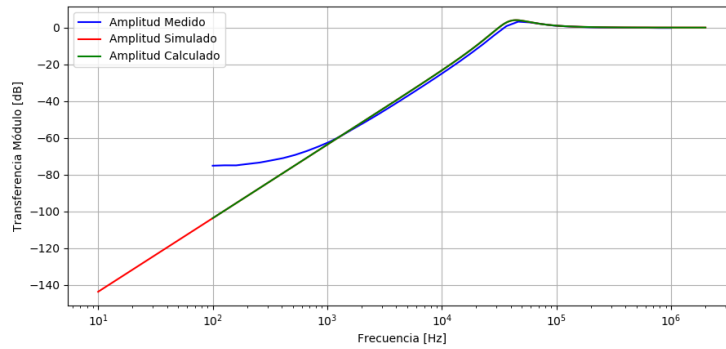


Figura 9: Comparación de diagramas de Bode en módulo High-Pass.

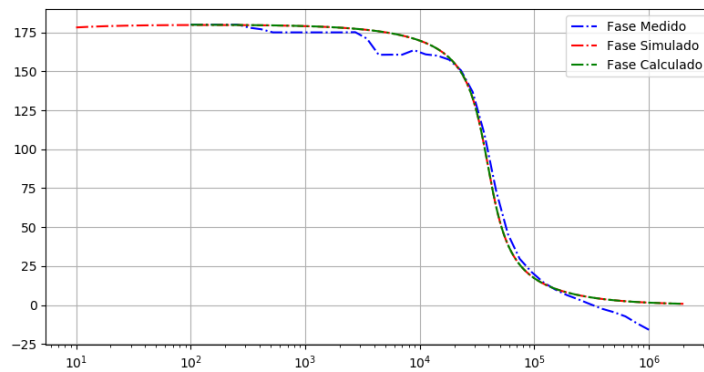


Figura 10: Comparación de diagramas de Bode en fase High-Pass.

## 5. Filtro Notch

Se analizó el circuito mostrado en la figura 11

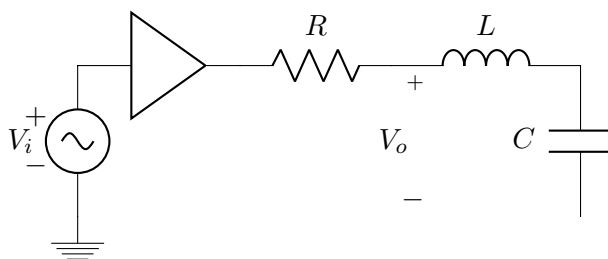


Figura 11: Filtro Notch

En este caso la transferencia está dada por

$$H(s) = \frac{1 + s^2 LC}{1 + sRC + s^2 LC} \quad (8)$$

Los valores teóricos de la frecuencia de oscilación y el sobrepico son, nuevamente, los de (4) y (5) Se midió la respuesta en frecuencia del circuito (8) para contrastar que el modelo analítico corresponda con la realidad, además se hizo una simulación en **LTSpice** obteniendo los siguientes resultados:

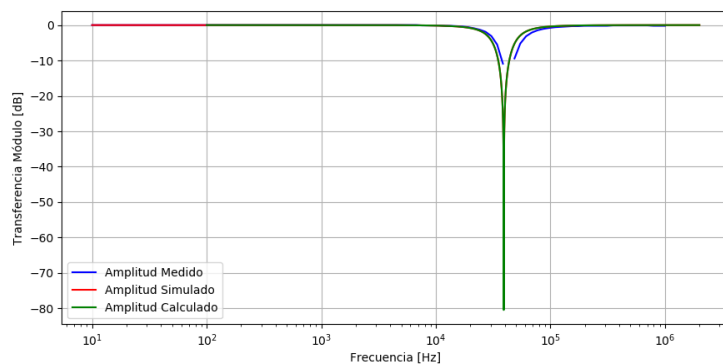


Figura 12: Comparación de diagramas de Bode en módulo Notch.

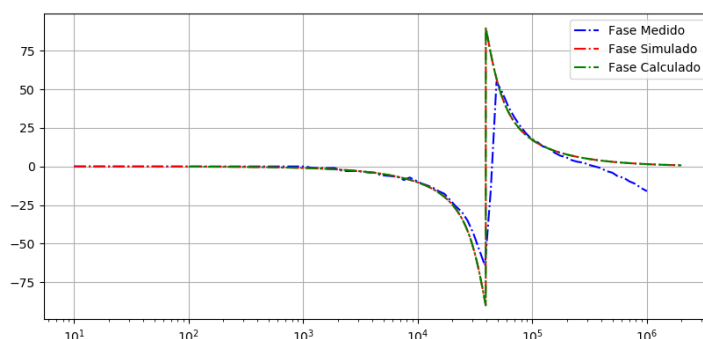


Figura 13: Comparación de diagramas de Bode en fase Notch.

## 6. Medición del factor de calidad

### 6.1. Q Teórico

Se calculó el valor del factor de calidad de forma teórica según

$$Q = \frac{1}{2\xi} = 1,51 \quad (9)$$

Luego, para cada una de las configuraciones anteriores (pasabajos, pasaaltos, pasabanda y notch) se midió el factor de calidad y se lo comparó con el teórico.

### 6.2. Q High/Low/Band-Pass

Para medir el Q del circuito se puede apreciar que si en las ecuaciones (7) , (8) , (2) se evalúa la función en  $\omega_0 \Rightarrow |H(s)| = Q$

### 6.3. Q Notch

En este caso no era tan simple como evaluar la transferencia en un valor dado a que si se evalúa  $H(j\omega_0) = 0$ , se optó por medir la respuesta al escalón, y de allí obtener el sobrepico, el cual esta ligado al  $\xi$  por la siguiente ecuación:

$$M_p = e^{\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (10)$$

obteniendo la siguiente medición:



Figura 14: Sobrepico de la respuesta al escalón en el Notch.