

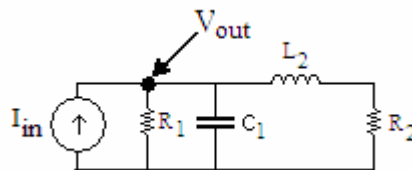
## CAPÍTULO 5

### Resultados

En este capítulo se muestran y analizan resultados para varios casos de filtros pasa-bajas y pasa-banda, además, a través de ejemplos con topologías pasivas y activas se corrobora la eficiencia del método de diseño propuesto en el capítulo anterior. Para el análisis se utilizan simuladores de circuitos como son ORCAD y Hspice.

#### 5.1 Filtro pasivo pasa-bajas de segundo orden normalizado

Esta sección analiza los resultados obtenidos para un filtro pasa-bajas tipo escalera de segundo orden, la Fig. 5.1 muestra el circuito usado, el que se puede ver, está formado únicamente de componentes pasivos.



**Fig. 5.1** Filtro pasivo pasa-bajas de segundo orden.

La tabla 5.1 muestra algunos resultados para los componentes del filtro, cabe mencionar que fueron obtenidos usando la rutina `calcula.m`, la cual fue descrita en el capítulo anterior y se encuentra en el apéndice B. Debido a que se tenían que fijar los valores para las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , se decidió usar diferentes proporciones de éstas, de tal forma que usando el valor normalizado de  $1\Omega$  como base, se hicieron los cálculos para los siguientes casos:

$$R_1 = R_2$$

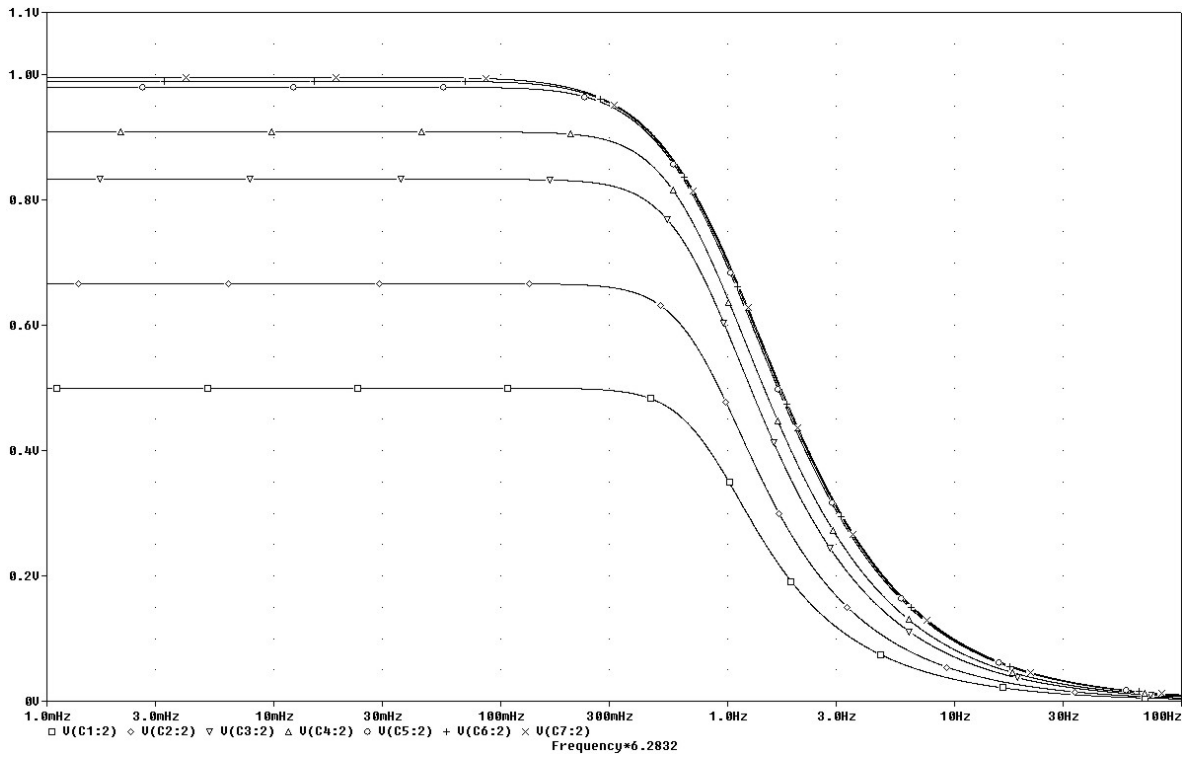
$2R_1 : R_2$	$R_1 : 2R_2$
$5R_1 : R_2$	$R_1 : 5R_2$
$10R_1 : R_2$	$R_1 : 10R_2$
$50R_1 : R_2$	$R_1 : 50R_2$
$100R_1 : R_2$	$R_1 : 100R_2$
$250R_1 : R_2$	$R_1 : 250R_2$
$1000R_1 : R_2$	$R_1 : 1000R_2$
$10000R_1 : R_2$	$R_1 : 10000R_2$

La frecuencia de corte usada fue  $\omega_0 = 1\text{rad} / \text{seg}$  o en hertz  $f_0 \approx 0.159\text{Hz}$ .

**Tabla 5.1** Valores obtenidos usando diferentes resistencias  $R_1$  y  $R_2$  para un filtro pasivo pasa-bajas de segundo orden ( $\omega_0 = 1\text{rad} / \text{seg}$ ).

	R1	R2	C1	L2	Ho
1	1	1	2.88523054890537	.96174351630179	0.5
2	1	2	1.98648803012055	2.30351521905704	0.66667
3	1	5	1.41804043778981	7.94135393883753	0.8333
4	1	10	1.21471645951503	21.34670840910109	0.90909
5	1	50	1.04285349194508	234.887388612634	.98039
6	1	100	1.02114644464507	671.247333671132	.9901
7	1	250	1.00831842931893	2692.54184722010	.99602
8	2	1	2.31833747574121	0.84857041066677	0.66667
9	5	1	1.96535559159154	0.77097157046595	0.8333
10	10	1	1.84465734591029	0.74284304806639	0.90909
11	50	1	1.74673677140924	.71932918836094	.98039
12	100	1	1.73440297637083	.71632040062644	.9901
13	250	1	1.7269921833352	0.71450732247895	0.9960159
14	1000	1	1.72328379667113	.71359856444444	.999
15	100000	1	1.72205958976678	0.71329834809878	.99999

Se puede ver que faltan algunas proporciones en la tabla 5.1, esto se debe a que Matlab no encontró soluciones reales para todos los casos, más específicamente para cuando  $1000R_1 \leq R_2$ .

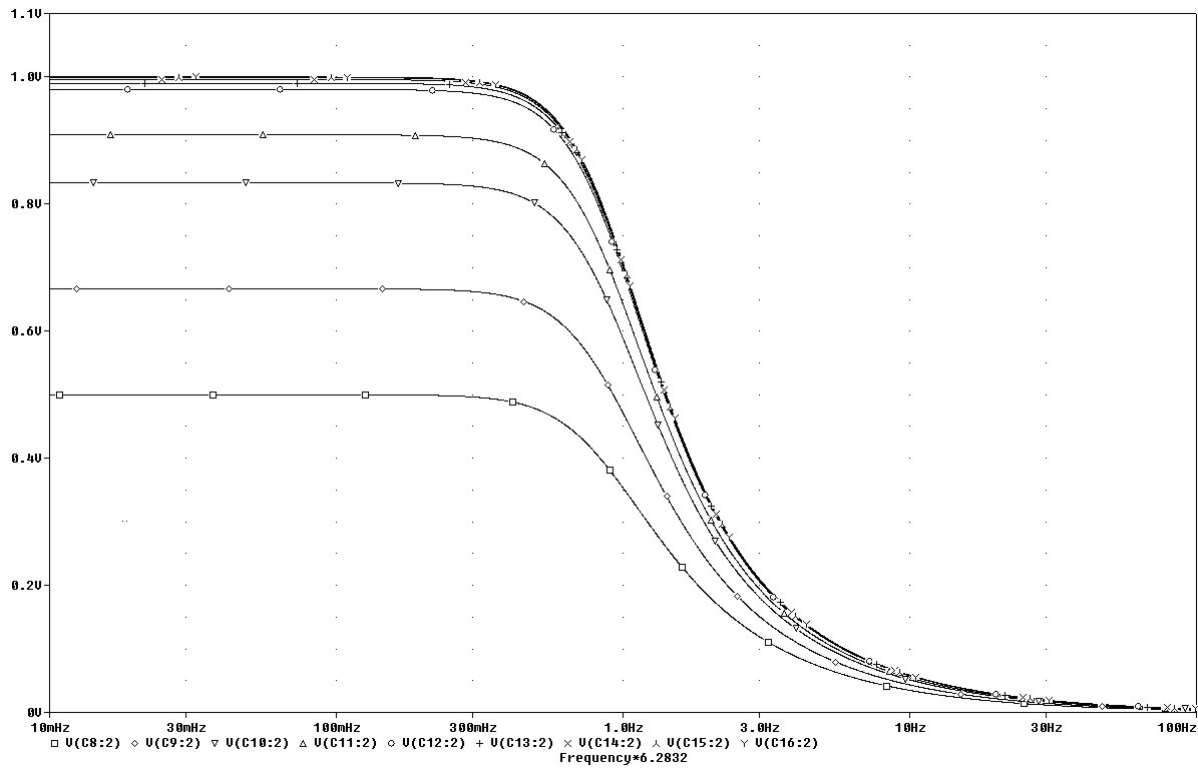


**Fig. 5.2** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-bajas de segundo orden cuando  $\omega_0 = 1 \text{ rad / seg}$  ;  $\square R_1 = R_2$ ,  $\diamond R_1 : 2R_2$ ,  $\nabla R_1 : 5R_2$ ,  $\Delta R_1 : 10R_2$ ,  $\circ R_1 : 50R_2$ ,  $+ R_1 : 100R_2$ ,  $\times R_1 : 250R_2$ .

**Tabla 5.2** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Cutoff\_Lowpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.2.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$f_0$ (Hertz)	$\omega_0$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.90830m	0.99845
$R_1 : 2R_2$	158.89153m	0.99834
$R_1 : 5R_2$	158.86557m	0.99818
$R_1 : 10R_2$	158.83722m	0.99800
$R_1 : 50R_2$	158.78610m	0.99768
$R_1 : 100R_2$	158.79272m	0.99772
$R_1 : 250R_2$	158.79272m	0.99772

Utilizando valores de la tabla 5.1, se simuló el filtro pasivo pasa-bajas de la Fig. 5.1 en Orcad, los resultados de estas simulaciones se muestran en las Figs. 5.2 y 5.3; debido a que el software grafica en hertz y la frecuencia de corte es de 1 rad/seg, se multiplicó la escala de frecuencia por  $2\pi$  o 6.2832 para que se apreciara mejor el funcionamiento del filtro. Para comprobar que la frecuencia de corte era de 1rad/seg como se esperaba, se usó la opción Cutoff\_Lowpass\_3dB del software, esta opción mide la frecuencia en hertz, tal que para cumplir con las especificaciones el valor medido deberá ser aproximadamente igual a 159mHz. Los resultados de las mediciones en hertz y en radianes se muestran en las tablas 5.2 y 5.3.



**Fig. 5.3** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-bajas de segundo orden cuando  $\omega_0 = 1 \text{ rad} / \text{seg}$  ;  $\square R_1 = R_2$  ,  $\diamond 2R_1 : R_2$  ,  $\nabla 5R_1 : R_2$  ,  $\Delta 10R_1 : R_2$  ,  $\circ 50R_1 : R_2$  ,  $+ 100R_1 : R_2$  ,  $\times 250R_1 : R_2$  ,  $\wedge 1000R_1 : R_2$  ,  $\cdot 10000R_1 : R_2$  .

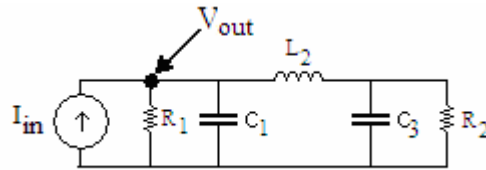
**Tabla 5.3** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Cutoff\_Lowpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.3.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$f_0$ (Hertz)	$\omega_0$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.90830m	0.99845
$2 R_1 : R_2$	158.91921m	0.99851
$5 R_1 : R_2$	158.91834m	0.99851
$10 R_1 : R_2$	158.92048m	0.99852
$50 R_1 : R_2$	158.93169m	0.99859
$100 R_1 : R_2$	158.92791m	0.99857
$250 R_1 : R_2$	158.92751m	0.99857
$1000 R_1 : R_2$	158.92824m	0.99857
$10000 R_1 : R_2$	158.92825m	0.99857

Analizando los resultados, en todos los casos se pudo comprobar que la frecuencia de corte es igual a un radián por segundo, y la respuesta en magnitud presenta característica máximamente plana. Cabe mencionar que estos resultados son normalizados en frecuencia y por lo tanto los valores obtenidos para los componentes, también están normalizados; más adelante en este capítulo se analizarán resultados para frecuencias desnormalizadas. En cuanto a la ganancia, se puede ver que para  $xR_1 = R_2$  y  $R_1 = xR_2$  es la misma, tal y como se esperaba debido a que la ganancia está dada por la Ec. 4.7.

## 5.2 Filtro pasivo pasa-bajas de tercer orden normalizado

Ahora se analizarán los resultados obtenidos para un filtro pasa-bajas tipo escalera de tercer orden, la Fig. 5.4 muestra el circuito usado, que al igual que el circuito analizado en la sección anterior, se puede ver que está formado únicamente de componentes pasivos.



**Fig. 5.4** Filtro pasivo pasa-bajas de tercer orden.

La tabla 5.4 muestra los resultados para los componentes del filtro, estos fueron obtenidos usando la rutina `calcula.m` para una frecuencia de corte de  $\omega_0 = 1 \text{ rad / seg}$  o  $f_0 \approx 0.159 \text{ Hz}$ . Los valores para las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  fueron dados de forma parecida a la usada en la sección anterior, de tal forma que usando el valor normalizado de  $1 \Omega$  como base, se hicieron los cálculos para:

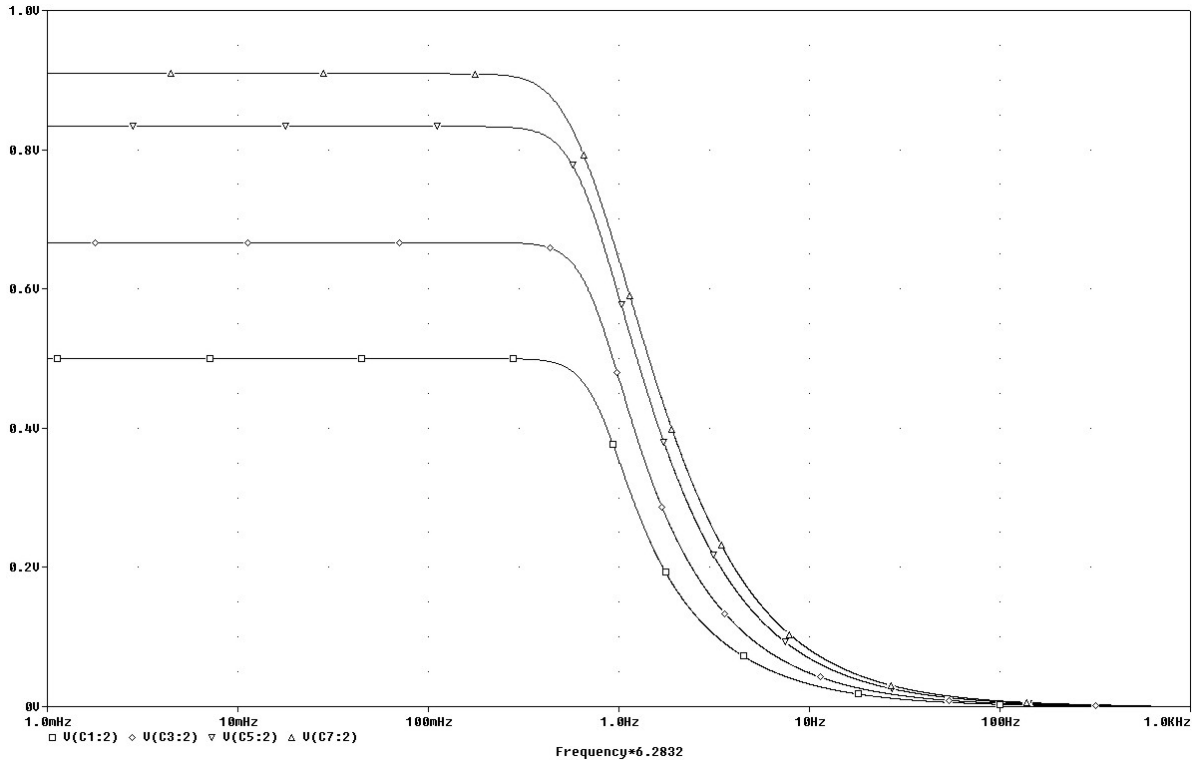
$R_1 = R_2$	
$2R_1 : R_2$	$R_1 : 2R_2$
$5R_1 : R_2$	$R_1 : 5R_2$
$10R_1 : R_2$	$R_1 : 10R_2$
$50R_1 : R_2$	$R_1 : 50R_2$
$100R_1 : R_2$	$R_1 : 100R_2$
$1000R_1 : R_2$	$R_1 : 1000R_2$

Matlab arrojó soluciones reales para los sistemas de ecuaciones en los casos donde  $R_2 \geq 50R_1$ , esto se debe a que al haber más ecuaciones e incógnitas, el sistema se complica.

**Tabla 5.4** Valores obtenidos usando diferentes valores de resistencias para un filtro pasivo pasa-bajas de tercer orden ( $\omega_0 = 1 \text{ rad / seg}$ ).

	R1	R2	C1	L2	C3
1	1	1	3.0925	1.8130	0.6498
2	1	2	2.0767	4.2254	0.3746
3	1	5	1.4401	14.1031	0.1970
4	1	10	1.2190	37.3768	0.1292
5	2	1	2.5370	1.6363	0.5914
6	5	1	2.1888	1.5154	0.5514
7	10	1	2.0692	1.4716	0.5370
8	50	1	1.9718	1.4349	0.5248
9	100	1	1.9595	1.4302	0.5233
10	1000	1	1.9485	1.4259	0.5219
11	10000	1	1.9473	1.4255	0.5217

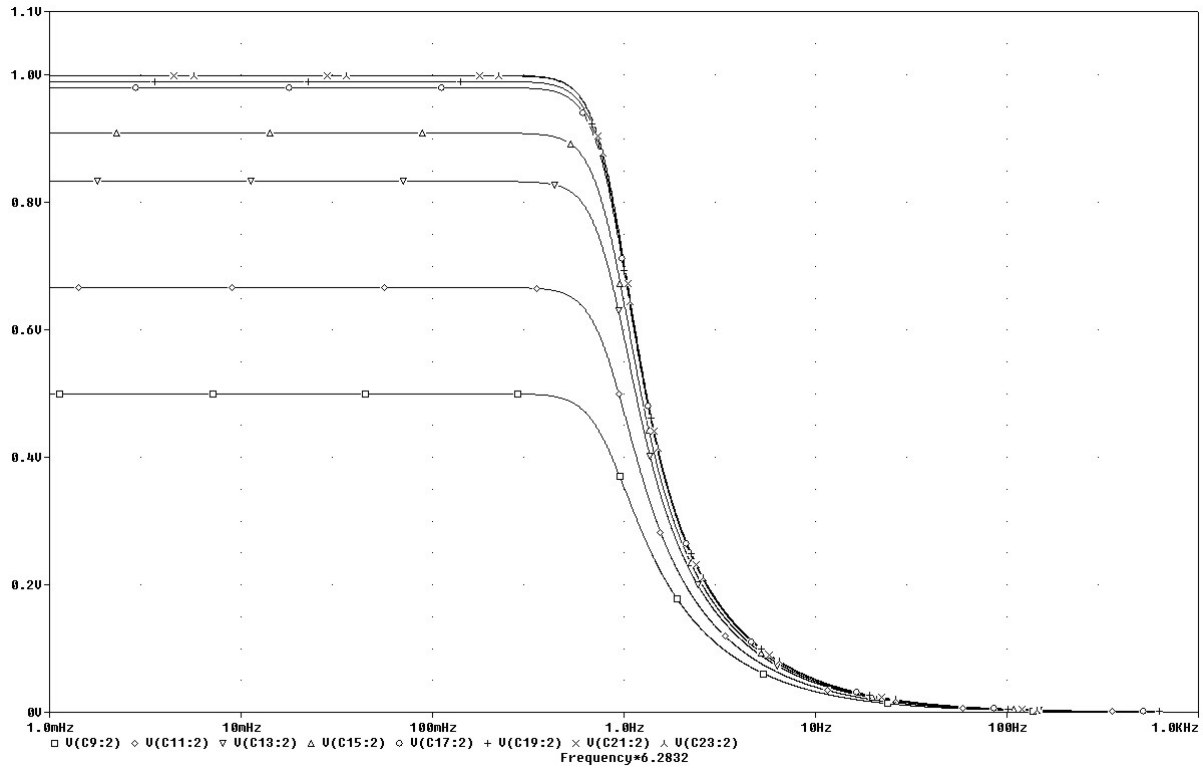
Utilizando los valores de la tabla 5.4, se simuló el filtro pasa-bajas de la Fig. 5.4, las curvas resultantes se muestran en las Figs. 5.5 y 5.6, donde al igual que en el caso de segundo orden se multiplicó la escala de frecuencia por  $2\pi$  o 6.2832. Las tablas 5.5 y 5.6 muestran las mediciones de sus frecuencias de corte.



**Fig. 5.5** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-bajas de tercer orden cuando  $\omega_0 = 1 \text{ rad/seg}$  ;  $\square R_1 = R_2$ ,  $\diamond R_1 : 2R_2$ ,  $\nabla R_1 : 5R_2$ ,  $\Delta R_1 : 10R_2$ .

**Tabla 5.5** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Cutoff\_Lowpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.5.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$f_0$ (Hertz)	$\omega_0$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.95202m	0.99872
$R_1 : 2R_2$	158.93302m	0.99860
$R_1 : 5R_2$	158.88205m	0.99828
$R_1 : 10R_2$	158.84978m	0.99808



**Fig. 5.6** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-bajas de tercer orden cuando  $\omega_0 = 1 \text{ rad/seg}$  ;  $\square R_1 = R_2$  ,  $\diamond 2R_1 : R_2$  ,  $\nabla 5R_1 : R_2$  ,  $\Delta 10R_1 : R_2$  ,  $\circ 50R_1 : R_2$  ,  $+ 100R_1 : R_2$  ,  $\times 1000R_1 : R_2$  ,  $\lambda 10000R_1 : R_2$  .

**Tabla 5.6** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Cutoff\_Lowpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.6.

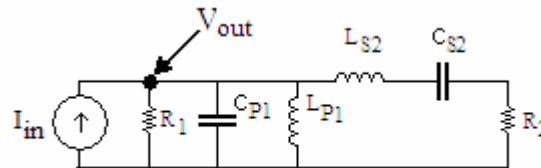
Relación entre $R_1$ y $R_2$	$f_0$ (Hertz)	$\omega_0$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.95202m	0.99872
$2 R_1 : R_2$	158.96630m	0.99881
$5 R_1 : R_2$	158.97959m	0.99889
$10 R_1 : R_2$	158.98215m	0.99891
$50 R_1 : R_2$	158.98586m	0.99893
$100 R_1 : R_2$	158.98994m	0.99896
$1000 R_1 : R_2$	158.98281m	0.99891
$10000 R_1 : R_2$	158.98927m	0.99895



Se puede observar que en todos los casos la frecuencia de corte es igual a un radián por segundo, y la respuesta en magnitud presenta característica máximamente plana. Siendo que la expresión para la ganancia es la misma para los casos de segundo y tercer orden, también se puede observar que según la Ec. 4.7 la ganancia es la misma si  $xR_1 = R_2$  o  $R_1 = xR_2$ .

### 5.3 Filtro pasivo pasa-banda de cuarto orden normalizado

Se tiene el circuito de la Fig. 5.7, que corresponde a un filtro pasivo pasa-banda de cuarto orden

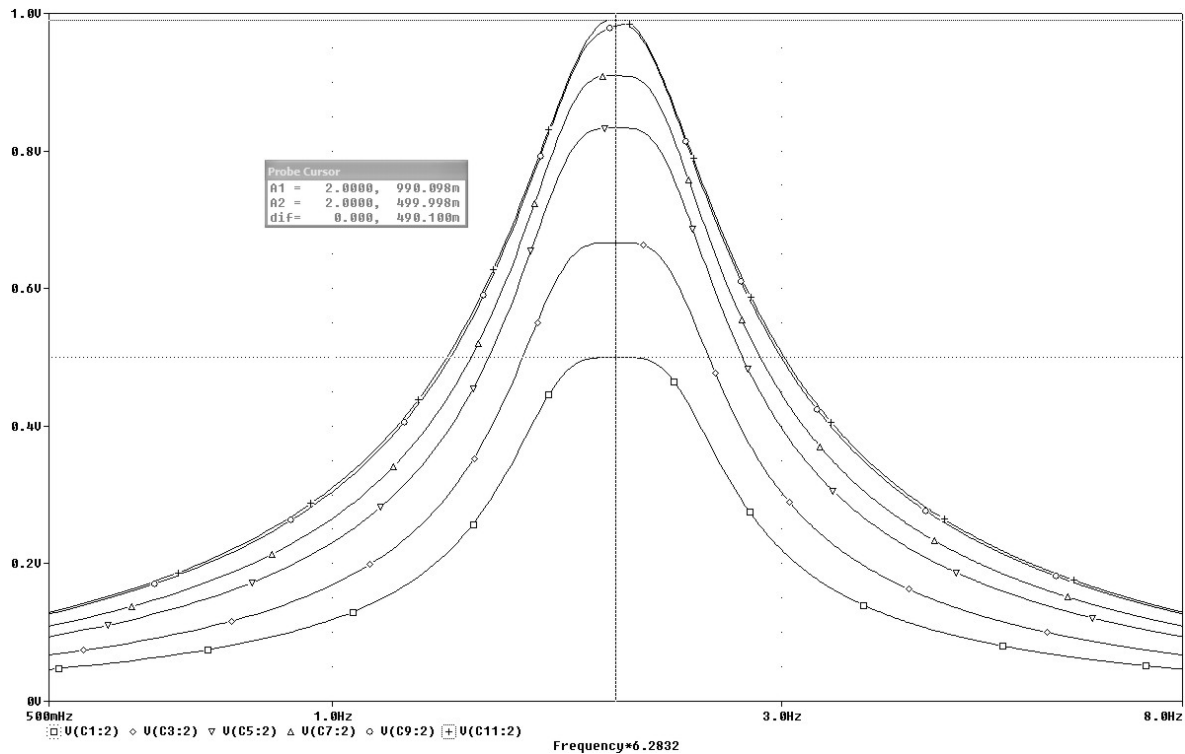


**Fig. 5.7** Filtro pasivo pasa-banda de cuarto orden.

Usando la rutina `calcula.m` se calcularon los valores de la tabla 5.7 para el filtro pasa-banda. Las frecuencias usadas para los cálculos son  $\omega_0 = 2rad/seg$  y  $Bw = 1rad/seg$  o en hertz  $f_0 \approx 0.3183Hz$  y  $Bw \approx 0.159Hz$ .

**Tabla 5.7** Valores obtenidos para el filtro pasa-banda de cuarto orden con  $\omega_0 = 2rad/seg$  y  $Bw = 1rad/seg$ .

R1	R2	CP1	LP1	LS2	CS2
1	1	2.8852	.0866	.96174	.2599
1	2	1.9865	.1258	2.3035	.1085
1	5	1.4180	.1763	7.9414	.0315
1	10	1.2147	.2058	21.347	.0117
1	50	1.0429	.2397	234.89	.0011
1	100	1.0211	.2448	671.25	.00037
2	1	2.3183	.1078	.84857	.2946
5	1	1.9654	.1272	.77097	.3243
10	1	1.8447	.1355	.74284	.3365
50	1	1.7467	.1431	.71933	.3475
100	1	1.7344	.1441	.71632	.3490

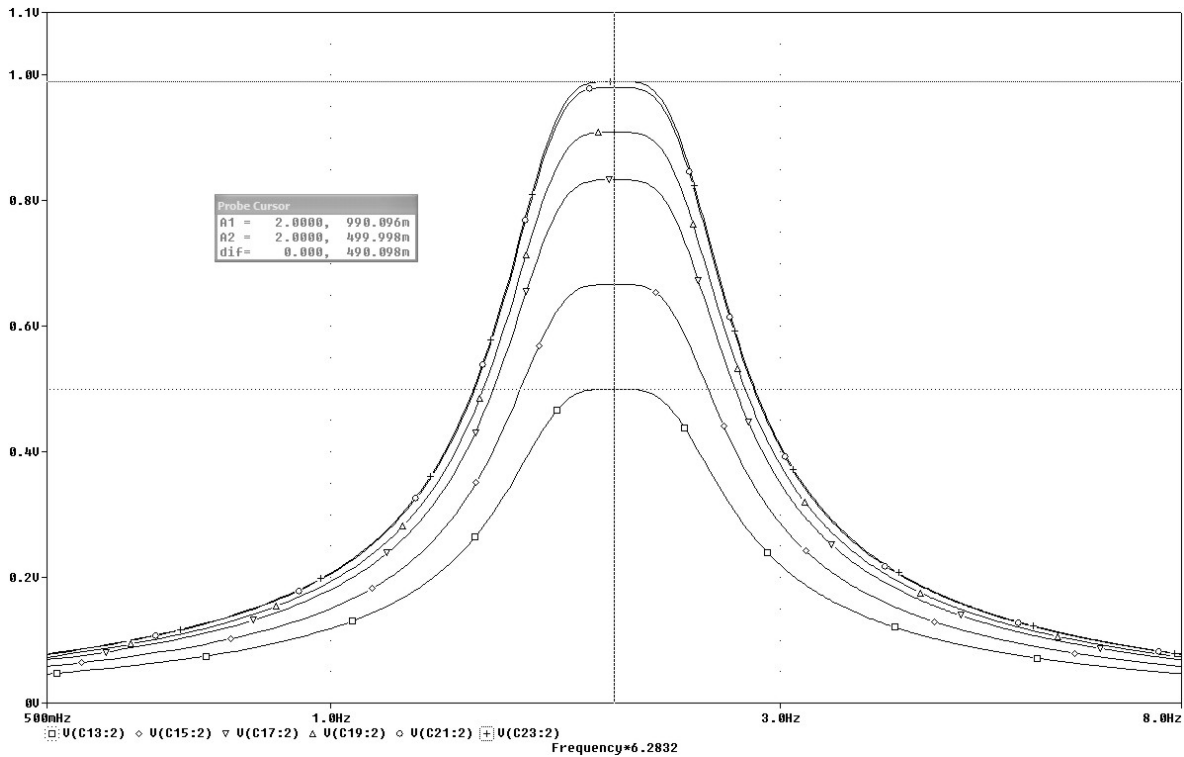


**Fig. 5.8** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-banda de cuarto orden cuando  $\omega_0 = 2\text{rad/seg}$  y  $Bw = 1\text{rad/seg}$ ;  $\square R_1 = R_2$ ,  $\diamond R_1 : 2R_2$ ,  $\nabla R_1 : 5R_2$ ,  $\Delta R_1 : 10R_2$ ,  $\circ R_1 : 50R_2$ ,  $+ R_1 : 100R_2$ .

**Tabla 5.8** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Bandwidth\_Bandpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.8.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$Bw$ (Hertz)	$Bw$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.85788m	0.99813
$R_1 : 2R_2$	158.86201m	0.99815
$R_1 : 5R_2$	158.85346m	0.99810
$R_1 : 10R_2$	158.85081m	0.99808
$R_1 : 50R_2$	158.96710m	0.99881
$R_1 : 100R_2$	158.78547m	0.99767

En las Figs. 5.8 y 5.9 se observan las curvas de respuesta en magnitud obtenidas con la ayuda de ORCAD para el circuito de la Fig. 5.7 usando los valores de los componentes de la tabla 5.7, la escala de frecuencia se multiplicó por  $2\pi$  o 6.2832 para convertir a radianes. Para comprobar que los filtros pasa-bandas cumplieran con las especificaciones se usó la opción `Bandwidth_Bandpass_3dB` para medir el ancho de banda, los resultados de dichas mediciones se encuentran contenidos en las tablas 5.8 y 5.9, donde las mediciones están situadas en aproximadamente 159Hz o 1 rad/seg.



**Fig. 5.9** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-banda de cuarto orden cuando  $\omega_0 = 2\text{rad/seg}$  y  $Bw = 1\text{rad/seg}$ ;  $\square R_1 : R_2$ ,  $\diamond 2R_1 : R_2$ ,  $\nabla 5R_1 : R_2$ ,  $\Delta 10R_1 : R_2$ ,  $\circ 50R_1 : R_2$ ,  $+ 100R_1 : R_2$ .

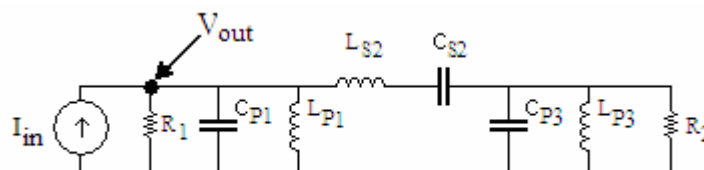
**Tabla 5.9** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Bandwidth\_Bandpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.9.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$Bw$ (Hertz)	$Bw$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.85788m	0.99813
$2 R_1 : R_2$	158.85296m	0.99810
$5 R_1 : R_2$	158.83986m	0.99802
$10 R_1 : R_2$	158.83884m	0.99801
$50 R_1 : R_2$	158.84539m	0.99805
$100 R_1 : R_2$	158.83894m	0.99801

Se tiene que en todos los casos la frecuencia central y el ancho de banda deseados fueron logrados, también se puede observar un comportamiento uniforme y simétrico, lo cual nos lleva a concluir que los filtros están funcionando correctamente.

## 5.4 Filtro pasivo pasa-banda de sexto orden normalizado

Se tiene en el filtro de la Fig. 5.10 que corresponde a un filtro pasivo pasa-banda de sexto orden.

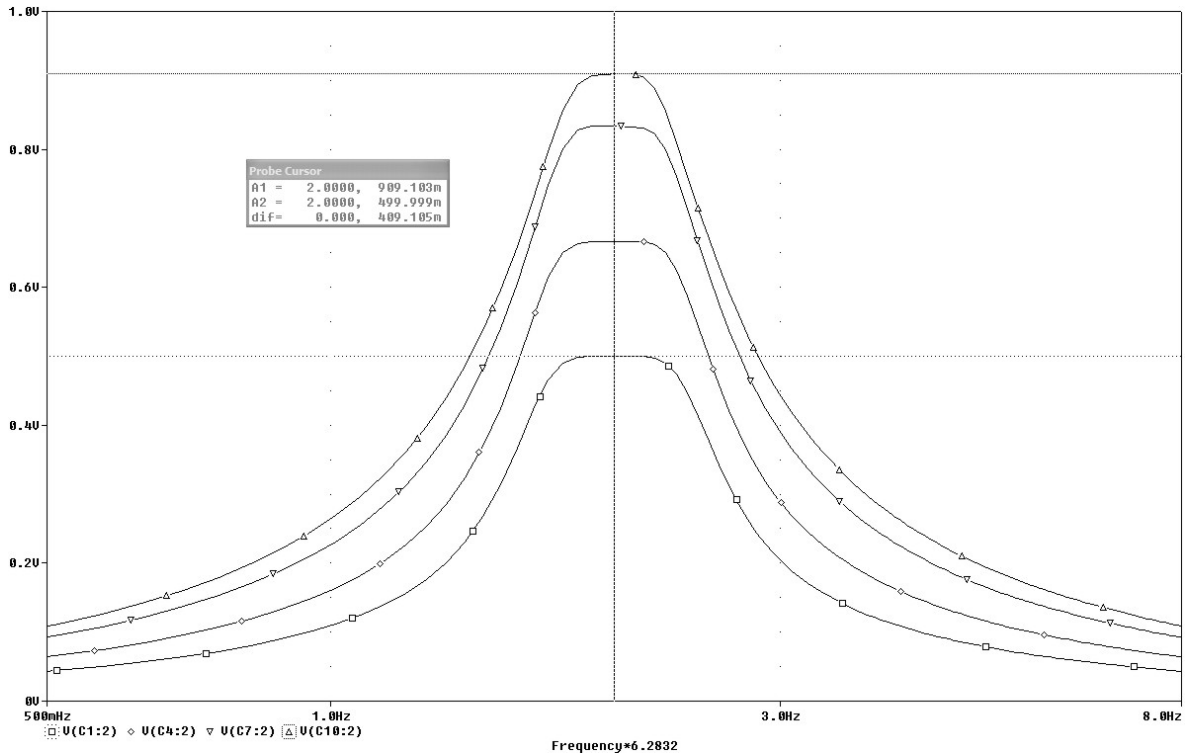


**Fig. 5.10** Filtro pasivo pasa-banda de sexto orden.

Usando la opción “d” de la rutina *calcula.m.*, se obtienen los valores de la tabla 5.10, las frecuencias usadas para los cálculos son  $\omega_0 = 2rad/seg$  y  $Bw = 1rad/seg$  o en hertz  $f_0 \approx 0.3183Hz$  y  $Bw \approx 0.159Hz$ .

**Tabla 5.10** Valores obtenidos para el filtro pasa-banda de sexto orden con  $\omega_0 = 2\text{rad/seg}$  y  $Bw = 1\text{rad/seg}$ .

R1	R2	C1p	L1p	L2s	C2s	C3p	L3p
1	1	3.0925	0.0808	1.8130	0.1379	0.6498	0.3847
1	2	2.0767	0.1204	4.2254	0.0592	0.3746	0.6674
1	5	1.4401	0.1736	14.1031	0.0177	0.1970	1.2690
1	10	1.2190	0.2051	37.3768	0.0067	0.1292	1.9350
2	1	2.5370	0.0985	1.6363	0.1528	0.5914	0.4227
5	1	2.1888	0.1142	1.5154	0.1650	0.5514	0.4534
10	1	2.0692	0.1208	1.4716	0.1699	0.5370	0.4655

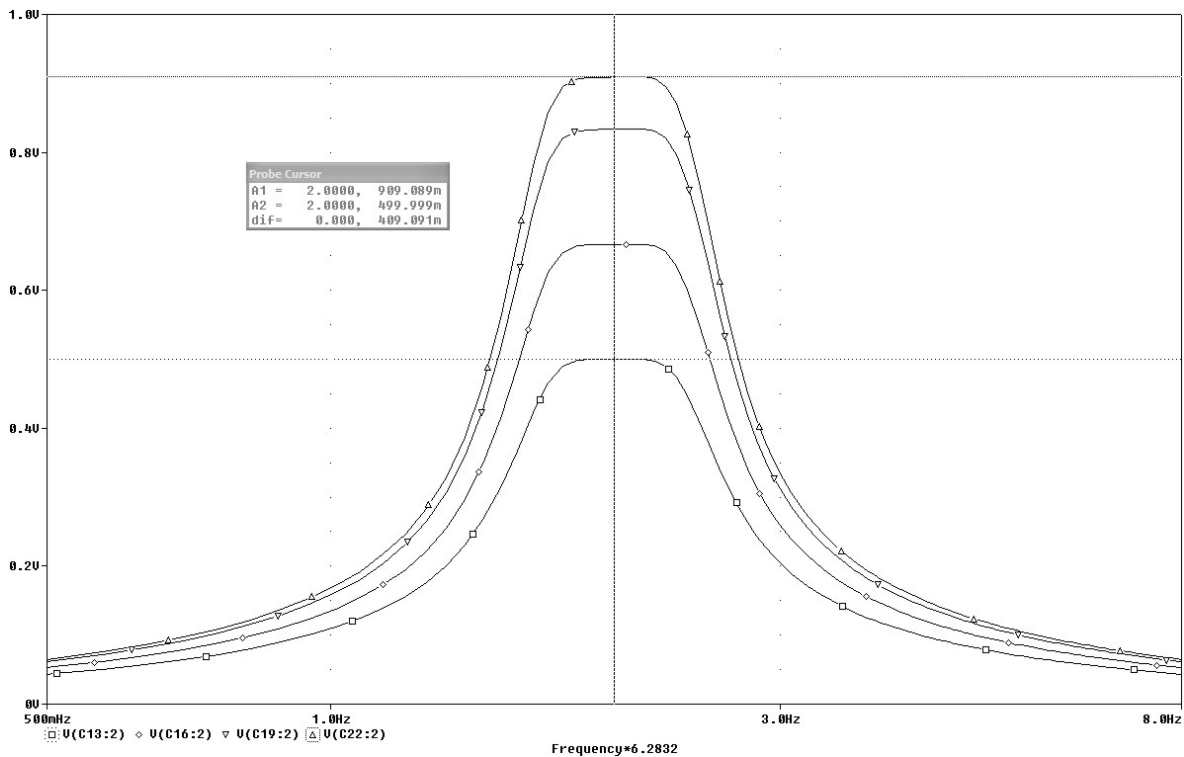


**Fig. 5.11** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-banda de sexto orden cuando  $\omega_0 = 2\text{rad/seg}$  y  $Bw = 1\text{rad/seg}$ ;  $\square R_1 = R_2$ ,  $\diamond R_1 : 2R_2$ ,  $\nabla R_1 : 5R_2$ ,  $\Delta R_1 : 10R_2$ .

**Tabla 5.11** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Bandwidth\_Bandpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.11.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$Bw$ (Hertz)	$Bw$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.85564m	0.99811
$2 R_1 : R_2$	158.87135m	0.99821
$5 R_1 : R_2$	158.78140m	0.99765
$10 R_1 : R_2$	158.71803m	0.99725

En las Figs. 5.11 y 5.12 se observan las curvas de respuesta en magnitud obtenidas para el circuito de la Fig. 5.16 usando los valores de los componentes de la tabla 5.9, la escala de frecuencia se multiplicó por  $2\pi$  o 6.2832 para convertir a radianes. Las tablas 5.11 y 5.12 contienen las mediciones de los anchos de banda, donde se aprecian valores aproximadamente de 159Hz o 1 rad/seg.



**Fig. 5.12** Respuesta en magnitud del filtro pasivo pasa-banda de sexto orden cuando  $\omega_0 = 2rad / seg$  y  $Bw = 1rad / seg$  ;  $\square R_1 = R_2$  ,  $\diamond 2R_1 : R_2$  ,  $\circ 5R_1 : R_2$  ,  $\times 10R_1 : R_2$  .

**Tabla 5.12** Medición de la frecuencia de corte usando la opción Bandwidth\_Bandpass\_3dB para las curvas de la Fig. 5.12.

Relación entre $R_1$ y $R_2$	$Bw$ (Hertz)	$Bw$ (rad/seg)
$R_1 = R_2$	158.85564m	0.99811
$2 R_1 : R_2$	158.82276m	0.99791
$5 R_1 : R_2$	158.81258m	0.99784
$10 R_1 : R_2$	158.79976m	0.99776

Al igual que en el caso de cuarto orden, se obtuvieron la frecuencia central y el ancho de banda deseados, y se puede observar un comportamiento uniforme y simétrico.

Hasta el momento, se han presentado ejemplos de filtros pasivos pasa-bajas de segundo y tercer orden, así como filtros pasa-banda de cuarto y sexto orden, todos normalizados en frecuencia, más adelante en este capítulo se mostrarán ejemplos de diseño de filtros activos así como casos desnormalizados en frecuencia.

## 5.5 Filtros pasa-bajas de segundo orden con fuentes dependientes de características ideales

Se hicieron simulaciones en ORCAD utilizando los bloques para los equivalentes con OTAs de la sección 4, los cuales modelan al OTA como una fuente ideal de corriente controlada por voltaje.

La Fig. 5.13 muestra el circuito para un filtro pasa-bajas de segundo orden implementado con OTAs ideales, esta configuración utiliza el subcircuito para el inductor flotante presentado en el capítulo 4. La Fig 5.14 muestra su implementación en ORCAD, donde  $G_1$  y  $G_2$  son los OTAs con los que se implementan las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente, R

sólo sirve para que ORCAD permita simular, y su valor es tan grande que puede ser tomada como un circuito abierto.

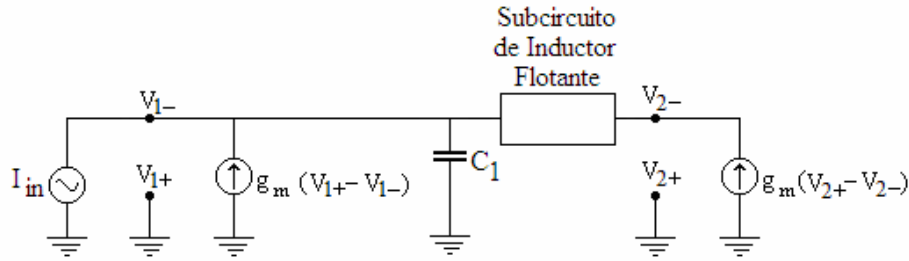


Fig. 5.13 Filtro pasa-bajas de segundo orden con OTAs ideales.

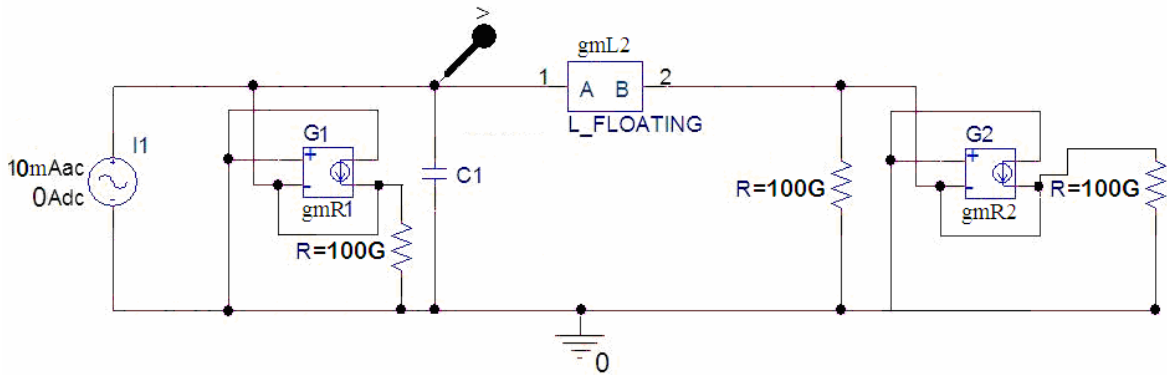


Fig. 5.14 Circuito en ORCAD del filtro pasa-bajas de segundo orden con OTAs ideales.

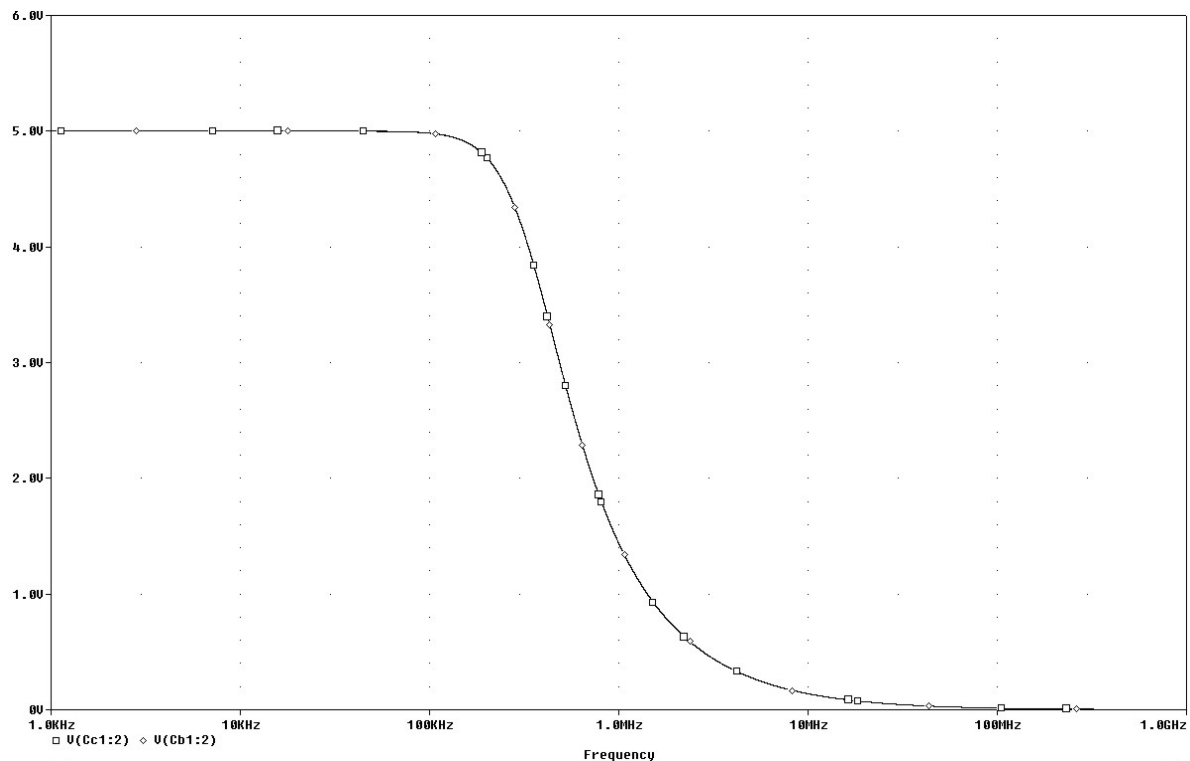
Se escribió la rutina `lp_gm.m`, la cual sirve para saber qué valores deberán de tener las  $g_m$  de los OTAs para que el filtro pasa-bajas funcione correctamente. La rutina `lp_gm.m` se encuentra incluida en el apéndice B. La tabla 5.13 contiene los valores de las  $g_m$  obtenidas para diferentes frecuencias de corte.

Tabla 5.13 Valores obtenidos para las  $g_m$  de un filtro activo pasa-bajas de segundo orden.

	$f_0$	$R_1$	$R_2$	$g_{mR1}$	$C_1$	$g_{mL2}$	$g_{mR2}$
1	400k	1k	1k	1m	1.14799n	16.165u	1m
2	1M	1k	1k	1m	0.45919n	25.559u	1m
3	10M	1k	1k	1m	45.9198p	80.8277u	1m
4	100M	1k	1k	1m	4.5919p	255.599u	1m



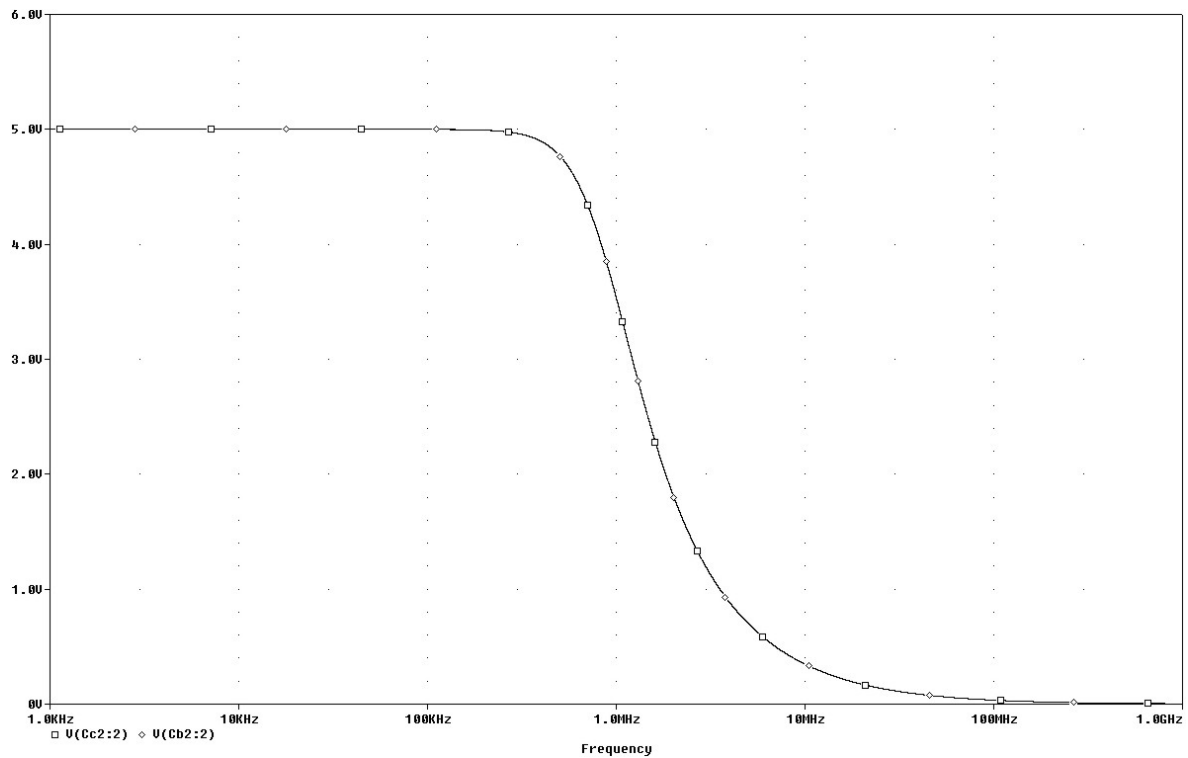
Para poder comparar la diferencia entre los filtros pasivos y activos, en cada caso se simularon dos circuitos: uno solamente hecho con componentes pasivos y el otro con sus equivalentes con OTAs. Las gráficas muestran ambas curvas encimadas y comprueban que el diseño del filtro está funcionando correctamente, nuevamente para demostrar esto se usó la función Cutoff\_Lowpass\_3dB, los resultados se observan en las Figs. 5.15, 5.17, 5.19 y 5.21. Las Figs. 5.16, 5.18, 5.20 y 5.22 muestran el resultado arrojado por ORCAD donde se determinan las frecuencias de corte para ambos casos: realización pasiva y realización con OTAs donde V(Cbi:2) corresponde a un circuito con componentes pasivos y V(Cci:2) a un circuito con modelos de OTAs.



**Fig. 5.15** Respuesta en magnitud del filtro pasa-bajas de segundo orden con  $f_0 = 400kHz$   
 V(Cb1:2) Filtro pasivo, V(Cc1:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cb1:2))	399.37507k
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cc1:2))	399.24934k

**Fig. 5.16** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_0 = 400kHz$ .

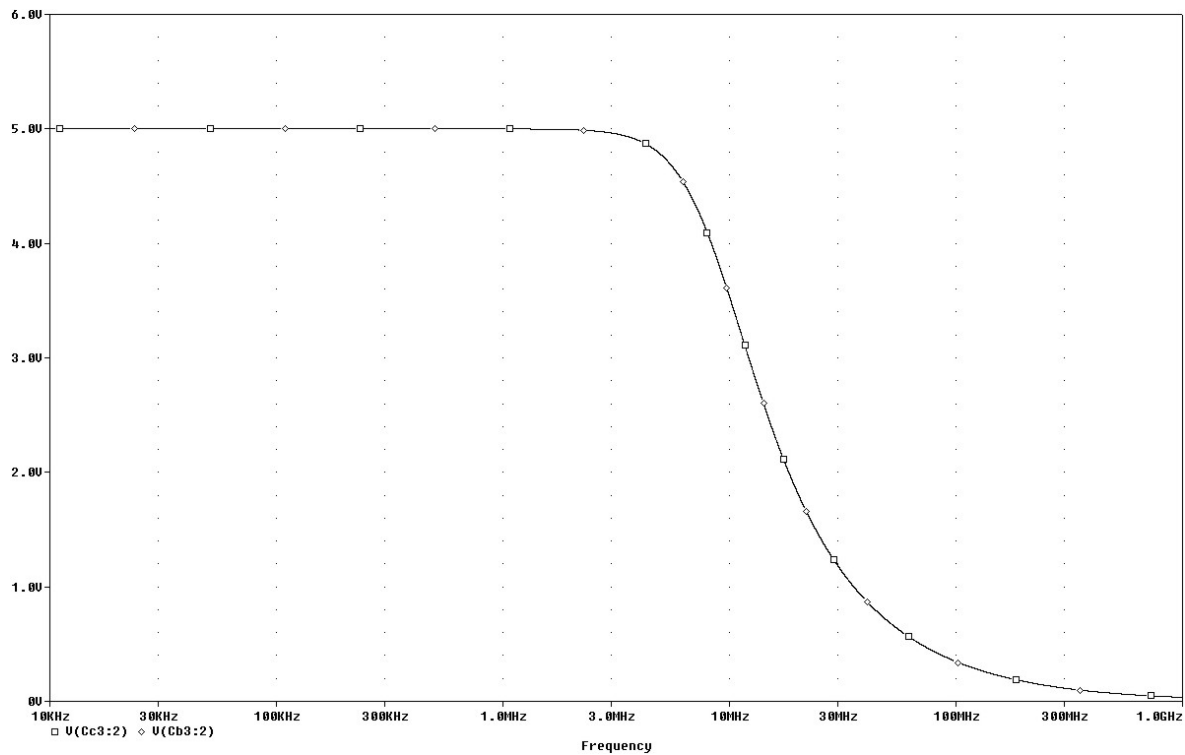


**Fig. 5.17** Respuesta en magnitud del filtro pasa-bajas de segundo orden con  $f_0 = 1MHz$ .

V(Cb2:2) Filtro pasivo, V(Cc2:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cb2:2))	998.43867k
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cc2:2))	998.33799k

**Fig. 5.18** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_0 = 1MHz$ .

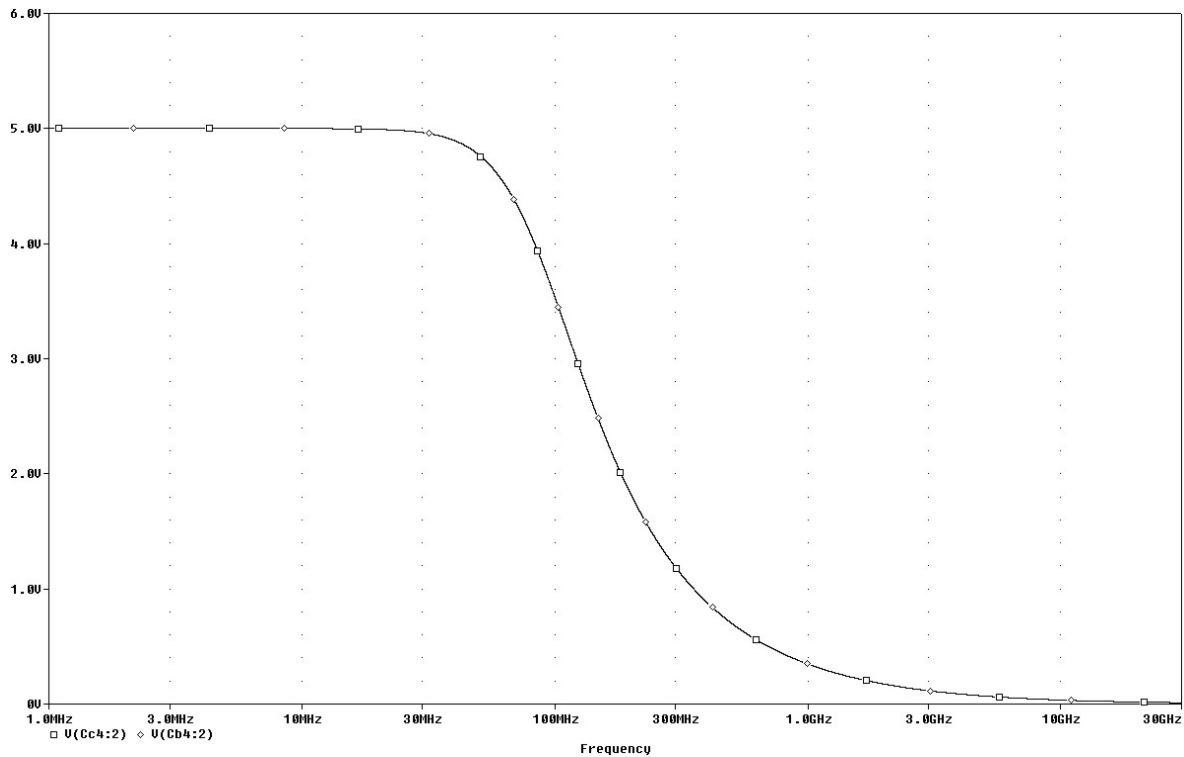


**Fig. 5.19** Respuesta en magnitud del filtro pasa-bajas de segundo orden con  $f_0 = 10MHz$ .

V(Cb3:2) Filtro pasivo, V(Cc3:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cb3:2))	9.98439meg
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cc3:2))	9.98427meg

**Fig. 5.20** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_0 = 10MHz$ .



**Fig. 5.21** Respuesta en magnitud del filtro pasa-bajas de segundo orden con  $f_0 = 100MHz$ .  
 V(Cb4:2) Filtro pasivo, V(Cc4:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cb4:2))	99.84387meg
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(Cc4:2))	99.84598meg

**Fig. 5.22** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_0 = 100MHz$ .

En todas las mediciones se puede observar que existe una pequeña variación entre los casos pasivos y con OTAs, atribuyéndose la discrepancia al número de decimales usados por Matlab u ORCAD para hacer los cálculos, y a la presencia de las resistencias R, ya que se pudo observar que al hacerla más grande el error disminuía.

## 5.6 Filtros pasa-banda de cuarto orden con fuentes dependientes de características ideales

Al igual que en la sección anterior, se simuló en ORCAD utilizando los bloques para los circuitos equivalentes con OTAs ideales. La Fig. 5.23 muestra el circuito para un filtro pasa-banda de cuarto orden implementado con OTAs ideales, esta configuración utiliza los subcircuitos para los inductores flotante y aterrizado presentes en el capítulo 4. La Fig 5.24 muestra su implementación en ORCAD, donde  $G_1$  y  $G_2$  son los OTAs con los que se implementan las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente,  $R$  sólo sirve para que ORCAD permita simular, y su valor es tan grande que puede ser tomada como un circuito abierto.

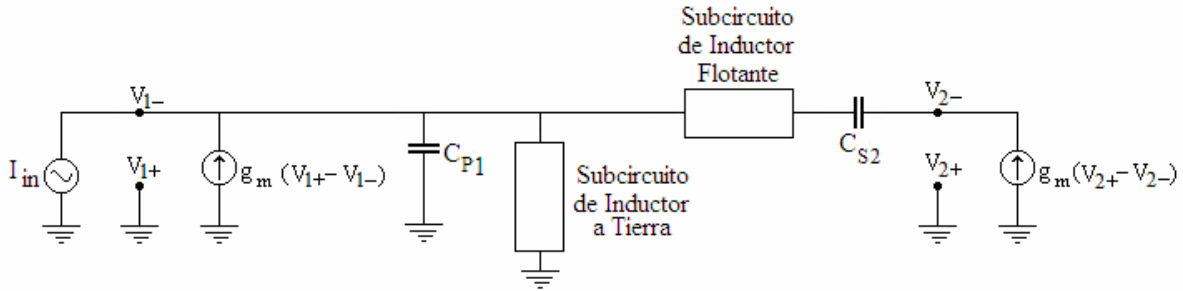


Fig. 5.23 Filtro pasa-banda de cuarto orden con OTAs ideales.

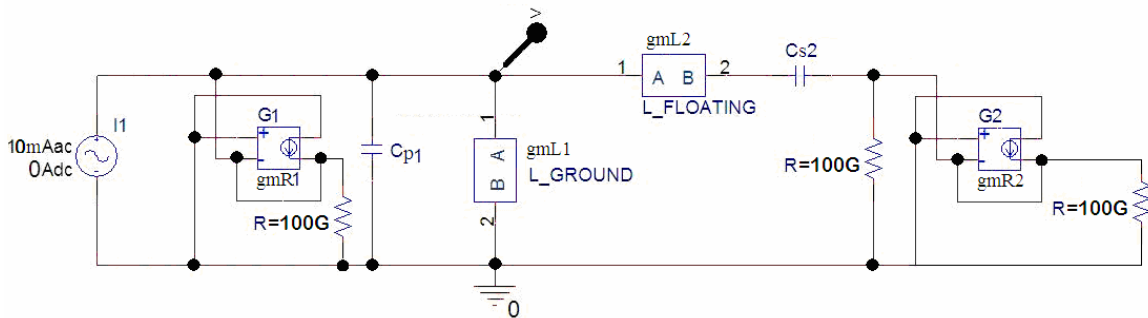


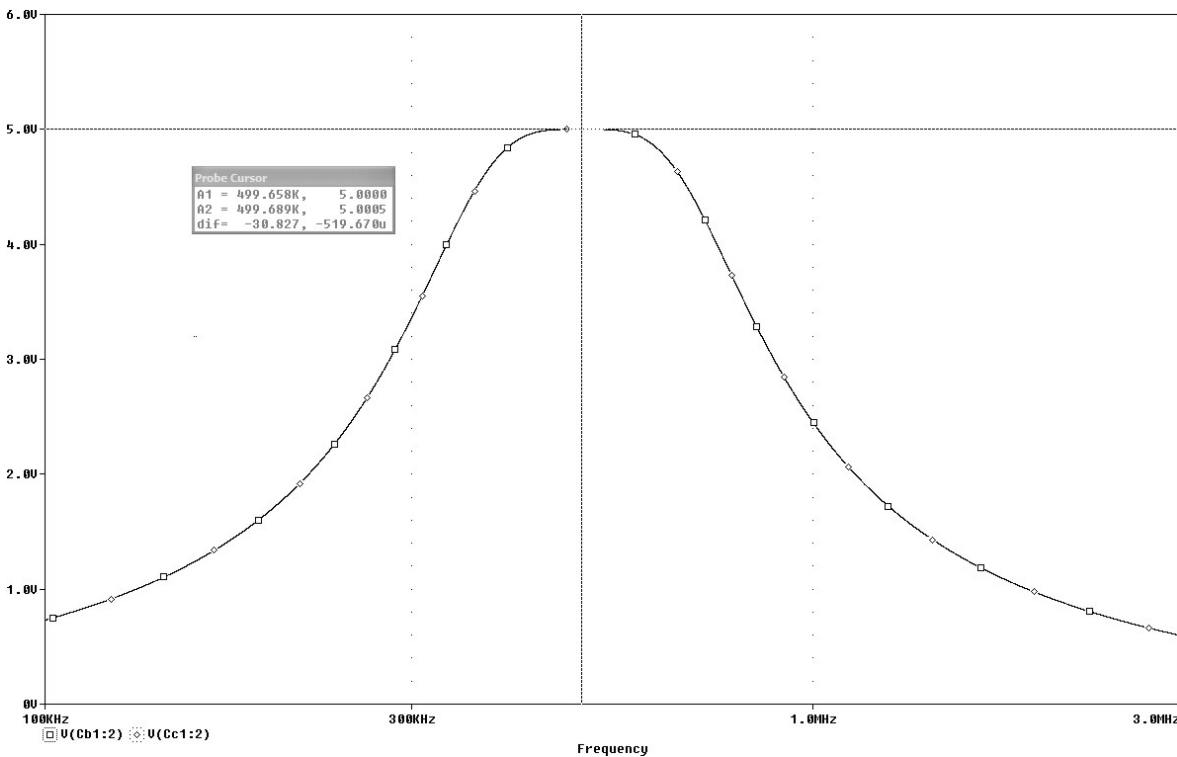
Fig. 5.24 Circuito en ORCAD del filtro pasa-banda de cuarto orden con OTAs ideales.

Se programó la rutina `bp_gm.m`, que sirve para saber que valores deberán de tener las  $g_m$  de los OTAs para que el filtro pasa-banda funcione adecuadamente. La rutina `bp_gm.m` se encuentra incluida en el apéndice B. La tabla 5.14 contiene los valores que se obtuvieron al usarla.

**Tabla 5.14** Valores obtenidos para las  $g_m$  de un filtro activo pasa-banda de cuarto orden.

	$f_c$	$Bw$	$R_1$	$R_2$	$g_{mR1}$	$C_{P1}$	$g_{mL1}$	$g_{mL2}$	$C_{S2}$	$g_{mR2}$
1	500k	500k	1k	1k	1m	918.3974p	30.106u	18.073u	330.97p	1m
2	1M	1M	1k	1k	1m	459.198p	42.577u	25.5599u	165.48p	1m
3	10M	1M	1k	1k	1m	459.198p	425.775u	25.559u	1.6548p	1m
4	100M	10M	1k	1k	1m	45.9198p	1.346m	80.8277u	0.16548p	1m

De la misma forma en que se hizo con el filtro pasa-bajas, para comparar entre los filtros pasivos y activos, se simularon dos circuitos, uno solamente hecho con componentes pasivos y el otro usando sus equivalentes con OTAs. Las gráficas muestran ambas curvas simultáneamente, para corroborar el buen funcionamiento de los circuitos se usó la función `Bandwidth_Bandpass_3dB`, la cual mide el ancho de banda; las gráficas resultantes se observan en las Figs. 5.25, 5.27, 5.29 y 5.31, y en las Figs. 5.26, 5.28, 5.30 y 5.32 se muestran los resultados arrojados por ORCAD donde se determinan los anchos de banda, de tal forma que `V(Cb1:2)` corresponde a un circuito con componentes pasivos y `V(Cc1:2)` a un circuito con equivalentes de OTAs.



**Fig. 5.25** Respuesta en magnitud del filtro pasa-banda de cuarto orden con  $f_c = 500kHz$ ,  $Bw = 500kHz$ , `V(Cb1:2)` Filtro pasivo, `V(Cc1:2)` Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cb1:2))	499.21885k
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cc1:2))	499.11164k

Fig. 5.26 Frecuencia de corte medida para el caso  $f_c = 500k$ ,  $Bw = 500kHz$ .

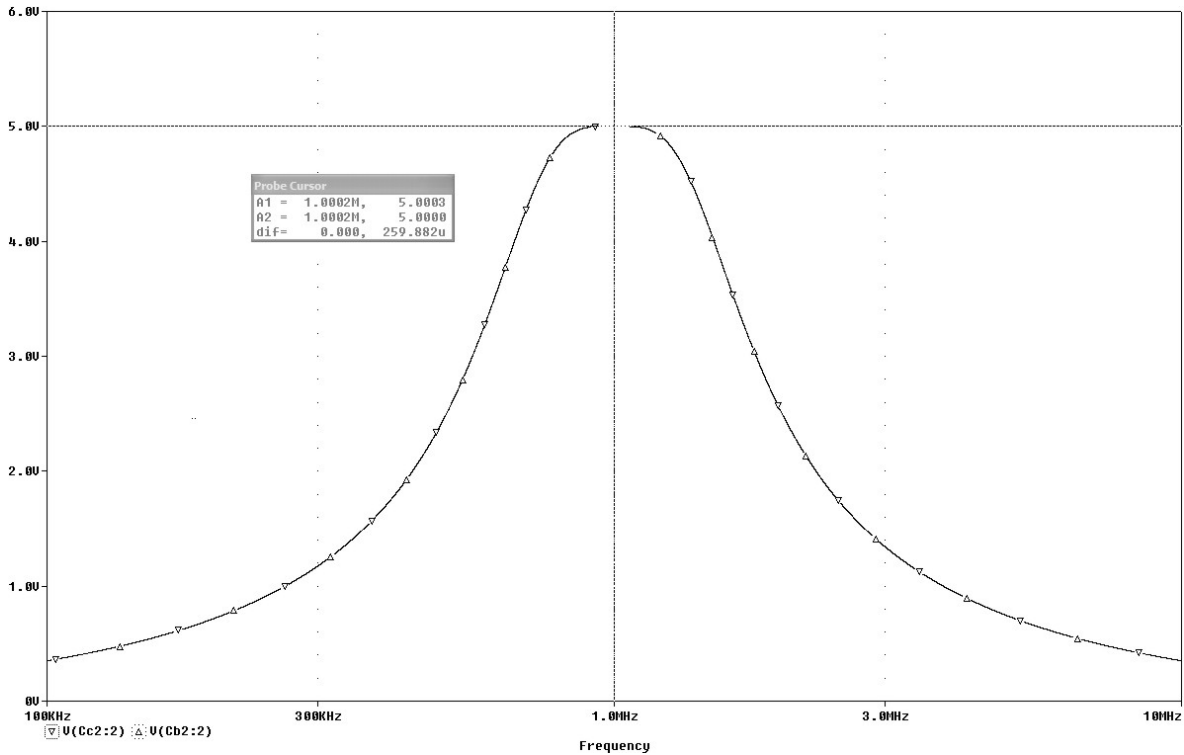
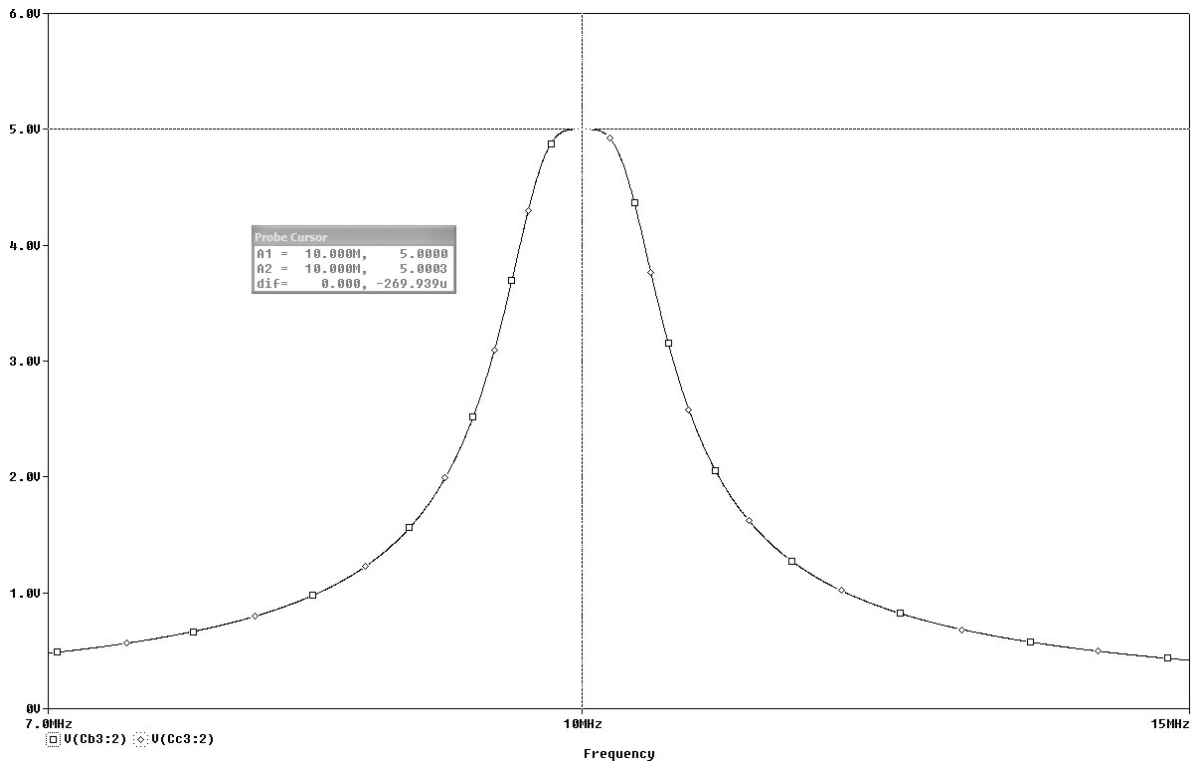


Fig. 5.27 Respuesta en magnitud del filtro pasa-banda de cuarto orden con  $f_c = 1MHz$ ,  $Bw = 1MHz$ , V(Cb2:2) Filtro pasivo, V(Cc2:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cb2:2))	998.44043k
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cc2:2))	998.32859k

Fig. 5.28 Frecuencia de corte medida para el caso  $f_c = 1MHz$ ,  $Bw = 1MHz$ .

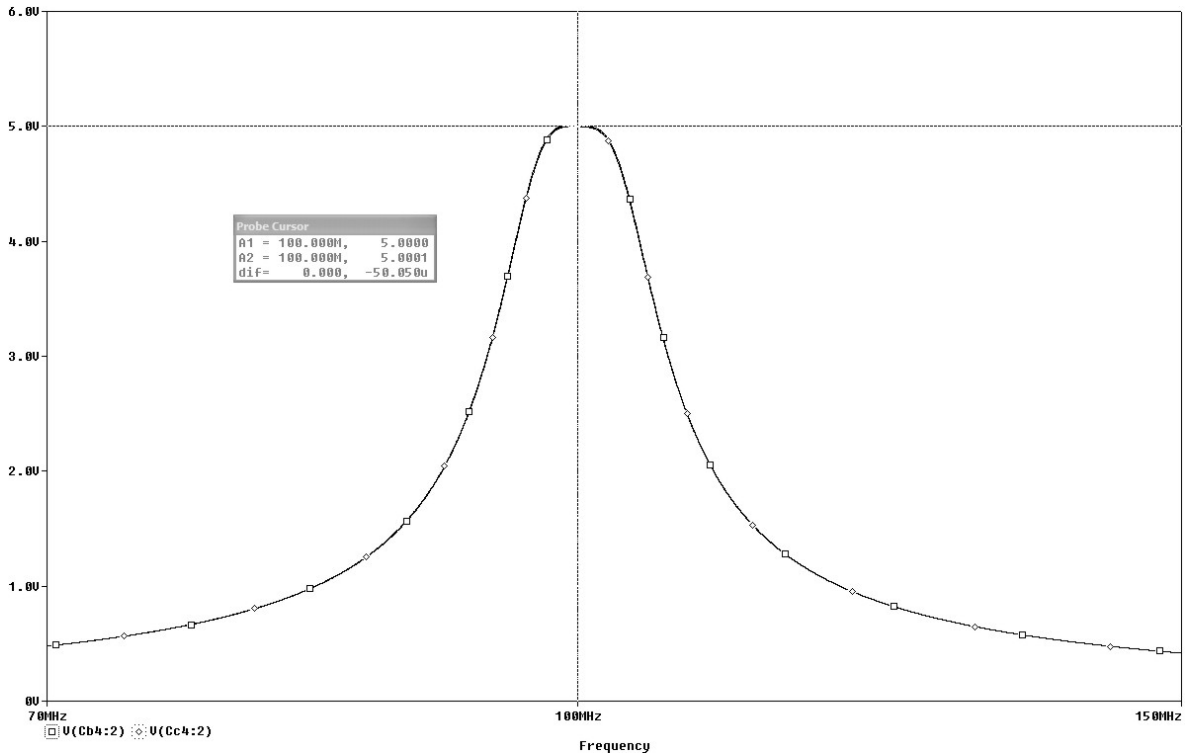


**Fig. 5.29** Respuesta en magnitud del filtro pasa-banda de cuarto orden con  $f_c = 10\text{MHz}$ ,  $Bw = 1\text{MHz}$ , V(Cb3:2) Filtro pasivo, V(Cc3:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cb3:2))	998.43989k
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cc3:2))	998.30113k

**Fig. 5.30** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_c = 10\text{MHz}$ ,  $Bw = 1\text{MHz}$ .





**Fig. 5.31** Respuesta en magnitud del filtro pasa-banda de cuarto orden con  $f_c = 100\text{MHz}$ ,  $Bw = 10\text{MHz}$ , V(Cb4:2) Filtro pasivo, V(Cc4:2) Filtro activo

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cb4:2))	9.98438meg
<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth_Bandpass_3dB(V(Cc4:2))	9.97245meg

**Fig. 5.32** Frecuencia de corte medida para el caso  $f_c = 100\text{MHz}$ ,  $Bw = 10\text{MHz}$ .

Analizando los resultados se puede observar que existe una pequeña variación entre los casos pasivos y activos, pero es despreciable.

Se debe notar que tanto en la tabla 5.13 como en la tabla 5.14, existen valores para la transconductancia no realizables con las tecnologías actuales, y sólo fueron usados para comprobar la eficacia del método de diseño, para fines prácticos se tendrá que diseñar en base a la transconductancia del OTA con el que se cuente, como se mostrará en la siguiente sección.

## 5.7 Filtro activo pasa-bajas con OTAs CMOS

El circuito de la Fig. 5.33 corresponde a un filtro pasa-bajas activo de segundo orden y se obtuvo utilizando los equivalentes con OTAs del capítulo tres.

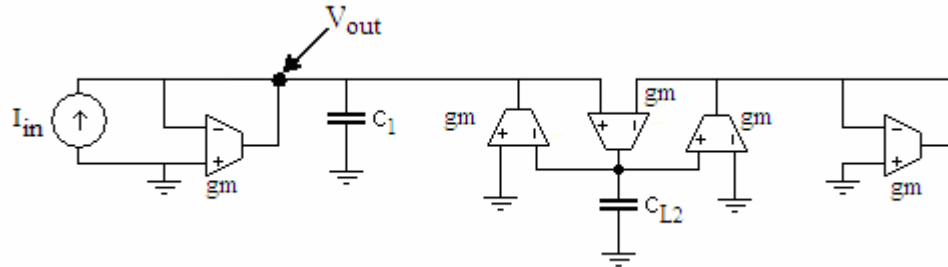


Fig. 5.33 Filtro pasa-bajas de segundo orden con OTAs.

Se usó la opción “e” de la rutina `calcula.m` en Matlab para calcular los valores de  $C_1$  y  $C_{L2}$ , en la cual:

1)  $R_1$  y  $R_2$  son fijos y no proporcionados por el usuario como en los casos anteriores, esto es porque el modelo CMOS para el OTA que se considera para sustituir los bloques, tiene una  $g_m$  de  $1e-4$  siemens, y de acuerdo a la Ec. 3.16 en el modelo equivalente con OTAs para las resistencias se tiene que:

$$R_{eq} = \frac{1}{g_m}$$

entonces las resistencias se considerarán con un valor igual a  $10k\Omega$ .

2) Calcula el valor para  $C_{L2}$  usando la ecuación

$$C_{L2} = L_2 g_m^2$$

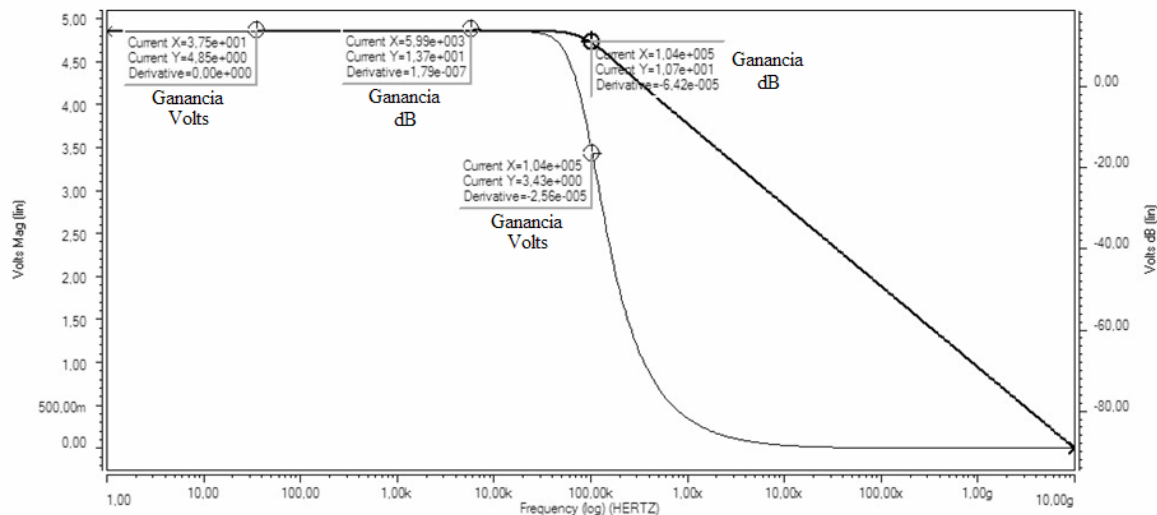
Esta rutina arrojó los valores citados en la tabla 5.15.

**Tabla 5.15** Valores obtenidos para los capacitores de un filtro activo pasa-bajas de segundo orden.

$f_c(Hz)$	$C_1$	$C_{L2}$
100kHz	457.82110770658E-12	152.60703590219E-12
1MHz	45.782110770658E-12	15.260703590219E-12
2MHz	22.891055385329E-12	7.63035179511E-12
10MHz	4.5782110770658E-12	1.5260703590219E-12

Debido a que el OTA está implementado utilizando tecnología CMOS se decidió usar Hspice. Se utilizó el modelo *amis05* disponible en la página de *mosis*, el cual corresponde a un transistor con una tecnología CMOS de 0.5 micras, este modelo y los archivos de simulación se encuentran en el apéndice D.

Los resultados para las simulaciones se observan en las Figs. 5.34 a 5.37, y corresponden a las gráficas de respuesta en magnitud en decibeles y en volts, en ellas se muestra la frecuencia de corte en la atenuación de 3 decibeles.



**Fig. 5.34** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

$$f_0 = 100kHz .$$

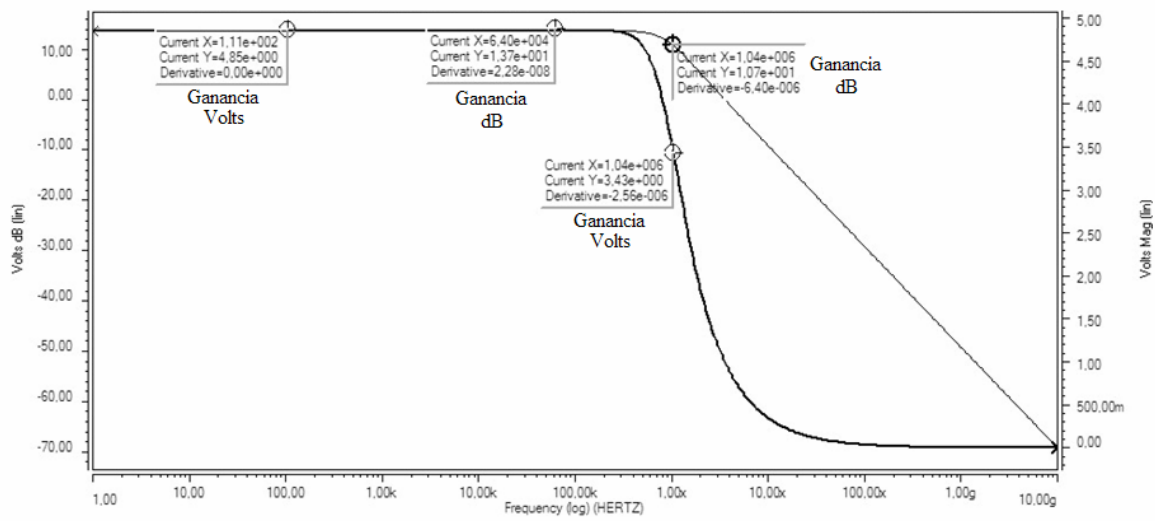


Fig. 5.35 Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

$$f_0 = 1MHz .$$

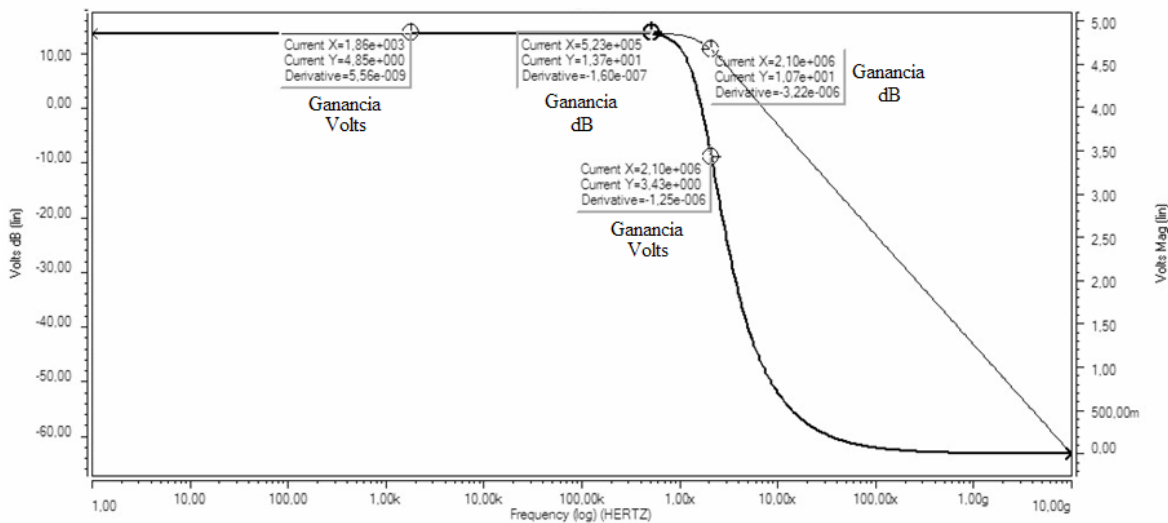
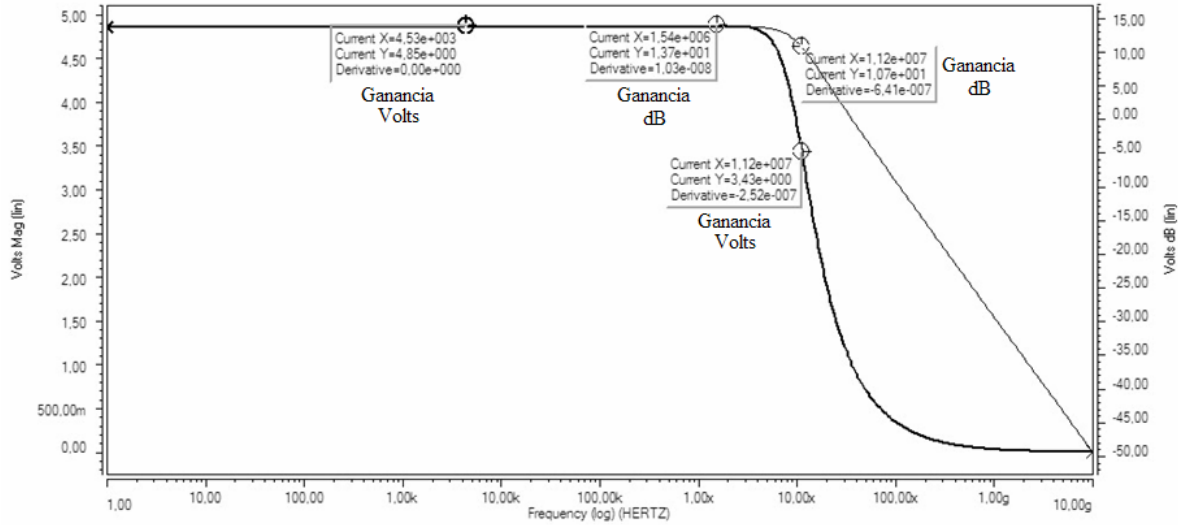


Fig. 5.36 Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

$$f_0 = 2MHz .$$



**Fig. 5.37** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

$$f_0 = 10MHz .$$

Enseguida se comparan los valores teóricos contra los valores medidos. A estos valores se les hizo un pequeño ajuste ya que debido a que los filtros están basados en un modelo real, mostraban una desviación que se encuentra dentro del rango de tolerancia de  $\pm 10\%$ . La  $g_m$  fue medida experimentalmente extrayéndola de los archivos de salida de la simulación y fue de aproximadamente 98.2720u. La tabla 5.16 muestra las desviaciones entre las frecuencias de corte ideales y las obtenidas en la simulación.

**Tabla 5.16** Valores teóricos contra valores medidos para un filtro pasa-bajas de segundo orden hecho con OTAs.

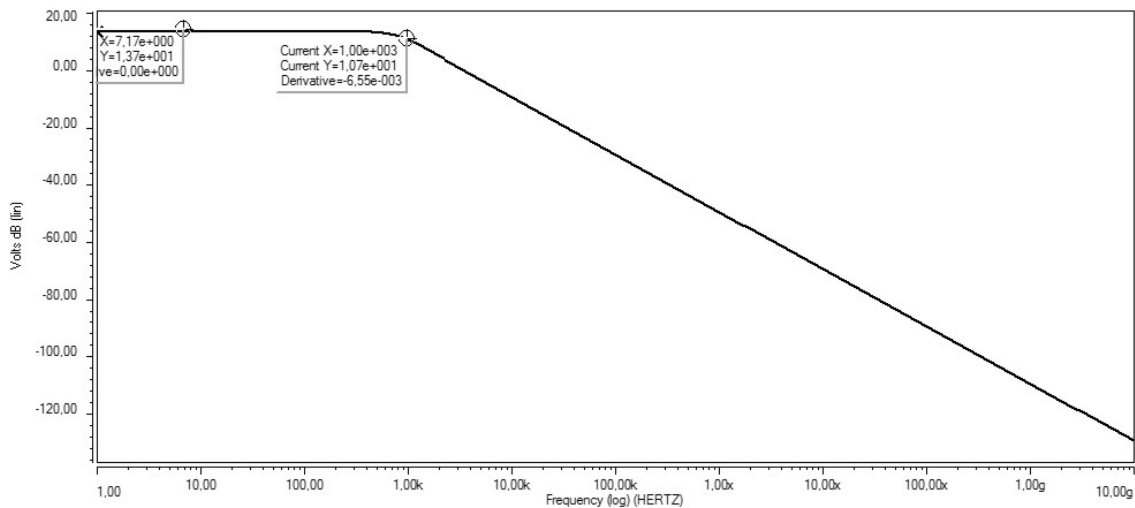
$f_c$ (teórica)	$f_c$ (medida)	Desviación
100kHz	104kHz	4%
1M Hz	1.04MHz	4%
2MHz	2.1MHz	5%
10MHz	11.2MHz	12%

Las diferencias entre los valores teóricos y los valores medidos, se pueden explicar debido a que el modelo simula condiciones reales tales como capacitancias parásitas y acoplamiento de impedancias, y los cálculos para el diseño fueron hechos en base a

condiciones ideales. Se pudo tener una mejor aproximación a las frecuencias de corte deseadas empleando los resultados obtenidos anteriormente, de tal forma que mediante diseño experimental, se modificó el valor de los capacitores pudiendo notar que al aumentar ligeramente  $C_1$ , el valor de la frecuencia de corte disminuía y al disminuirlo la frecuencia de corte aumentaba; también se pudo notar que lo contrario ocurría con  $C_{L2}$  donde al aumentar su valor, la frecuencia de corte aumentaba y al disminuirlo la frecuencia de corte disminuía. La tabla 5.17 muestra valores ajustados experimentalmente para  $C_1$  y  $C_{L2}$  que dan como resultado filtros donde la frecuencia de corte medida es igual a la deseada, las figuras 5.38 a 5.43 muestran las simulaciones de dichos filtros en Hspice.

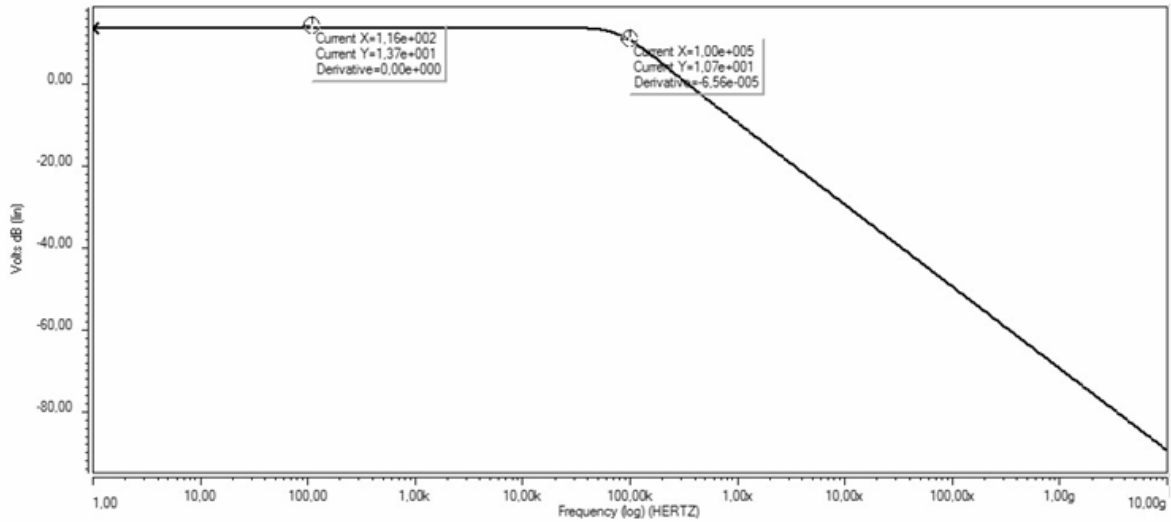
**Tabla 5.17** Valores obtenidos experimentalmente para los capacitores de un filtro activo pasa-bajas de segundo orden.

$f_C$ (medida)	$C_1$	$C_{L2}$
1K	46.95E-9	15.260703590219E-9
100k	470.5E-12	152.60703590219E-12
1M	47.7E-12	15.260703590219E-12
2M	23.8E-12	7.63035179511E-12
10M	5E-12	1.5260703590219E-12
30M	1.898969E-12	0.5086901196740E-12

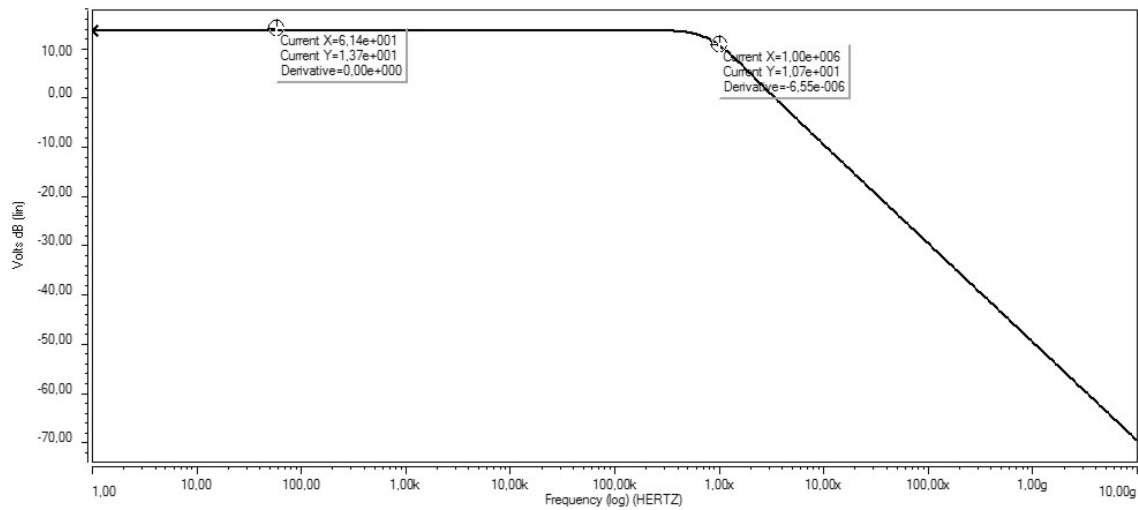


**Fig. 5.38** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

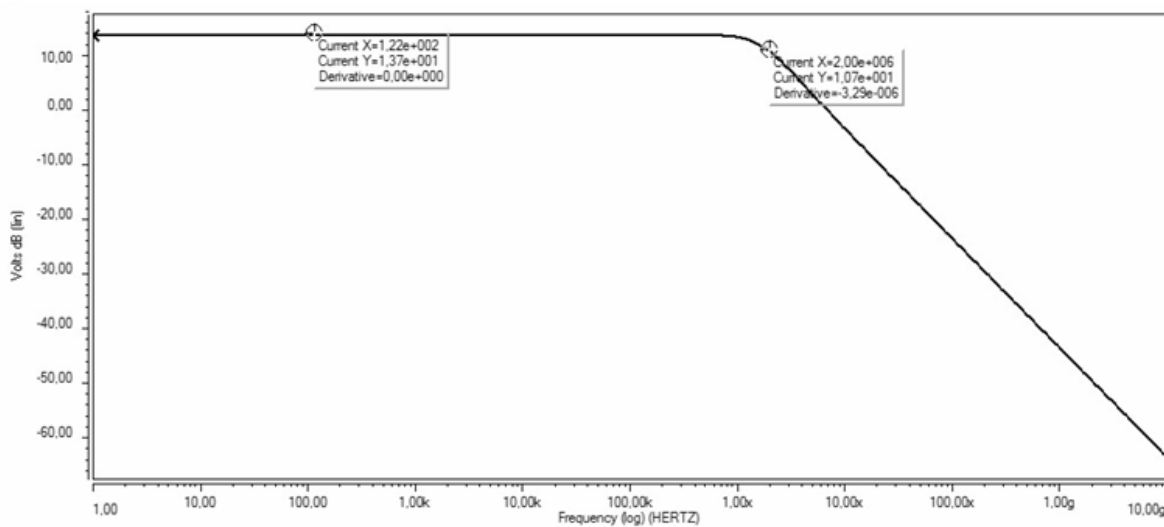
$$f_C = 1kHz .$$



**Fig. 5.39** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden  
 $f_c = 100kHz$ .

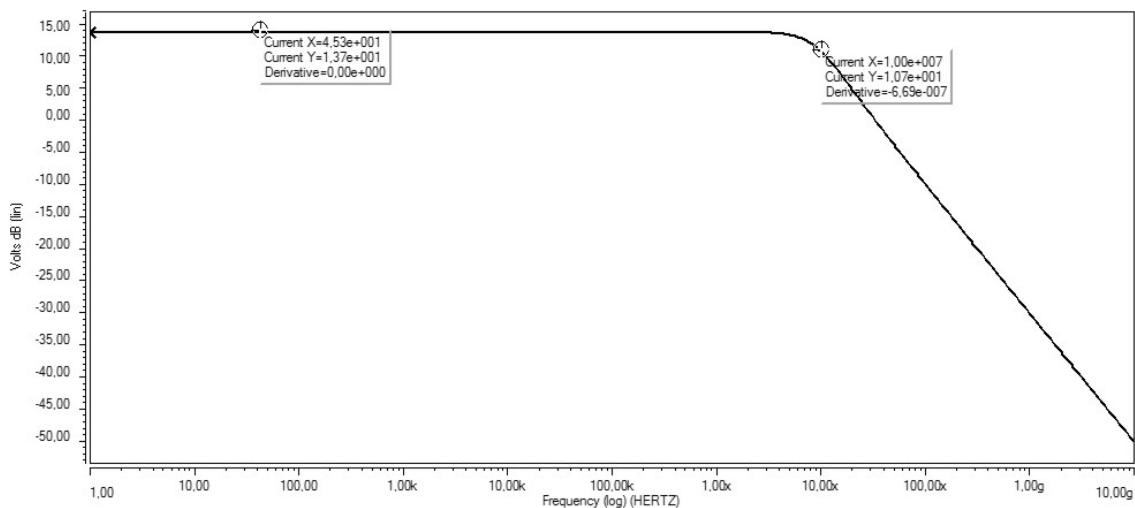


**Fig. 5.40** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden  
 $f_c = 1MHz$ .



**Fig. 5.41** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

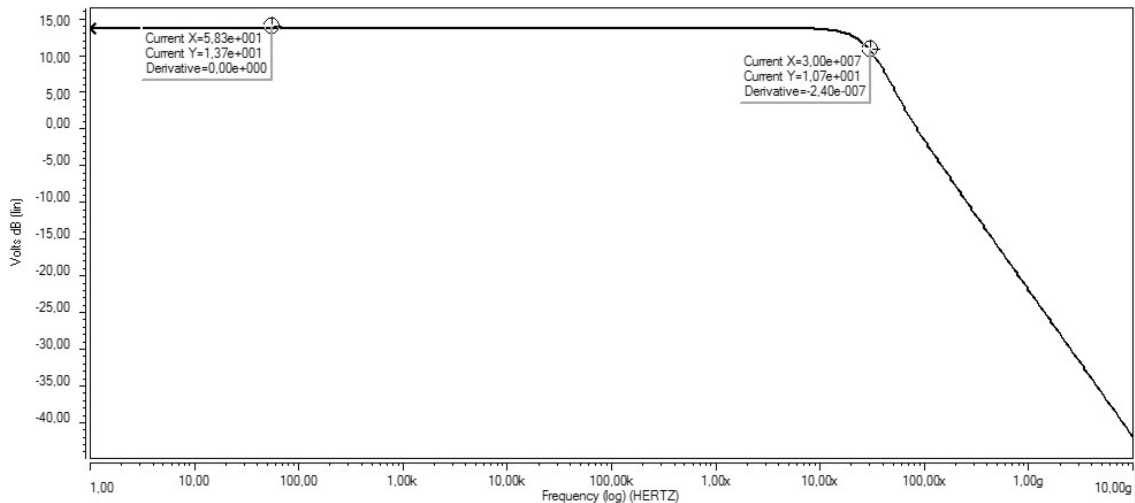
$$f_c = 2MHz .$$



**Fig. 5.42** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden

$$f_c = 10MHz .$$



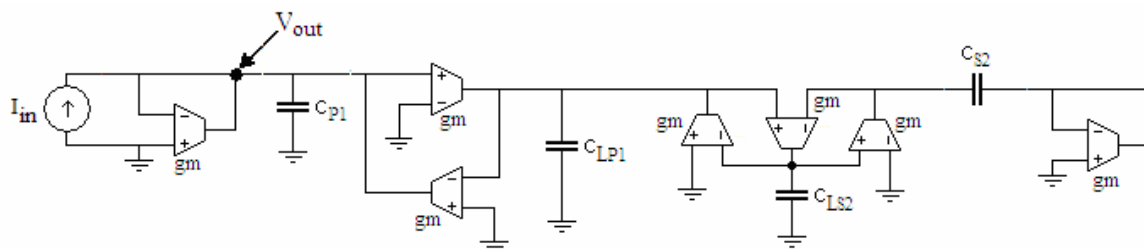


**Fig. 5.43** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-bajas de segundo orden  $f_c = 30\text{MHz}$ .

A través de estos últimos resultados se pudo observar que los capacitores sólo pueden ser ajustados como máximo  $\pm 10\%$  de su valor, y si se excede este porcentaje se corre el riesgo de que la curva de respuesta se deforme y pierda su característica de magnitud máximamente plana. También se pudo observar que utilizando este modelo de OTA CMOS, el rango de operación del filtro se encuentra aproximadamente entre 1kHz y 30MHz.

## 5.8 Filtro pasa-banda activo con OTAs de características reales

En la Fig. 5.44 se muestra un filtro pasa-banda activo de cuarto orden obtenido usando los equivalentes con OTAs del capítulo tres.



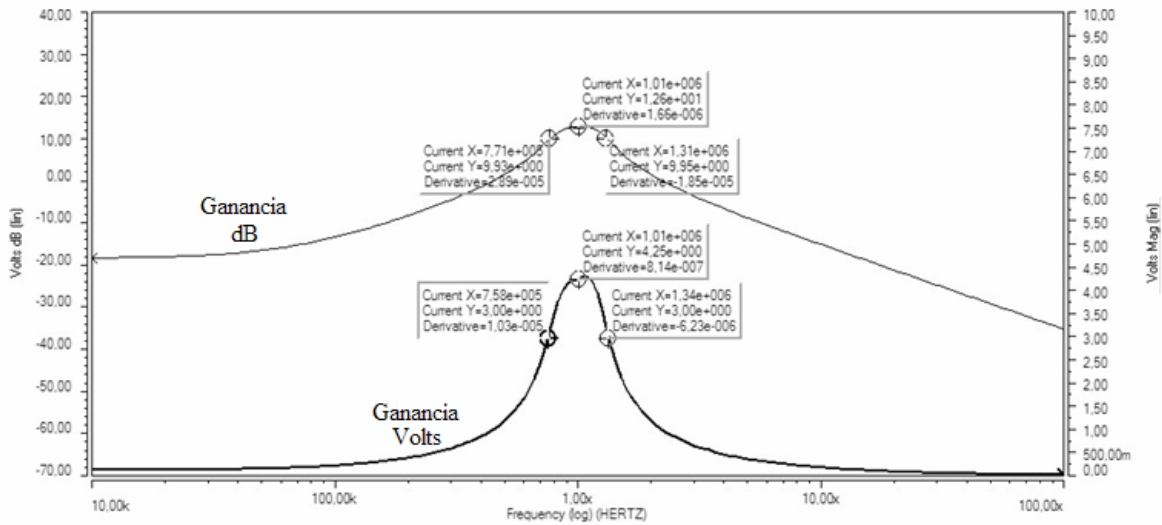
**Fig. 5.44** Filtro pasa-banda de cuarto orden con OTAs.

De igual forma que en la sección anterior se utilizó la rutina `calcula.m`, pero ahora escogiendo la opción “f” para obtener los valores para los componentes de este filtro, esta rutina calcula los valores de  $C_{P1}$ ,  $C_{LP1}$ ,  $C_{LS2}$  y  $C_{S2}$ , y el diseñador únicamente tiene que proporcionar el valor de la  $g_m$  del OTA que se va a utilizar, así como la frecuencia central en hertz y el ancho de banda que tendrá el filtro. La tabla 5.18 muestra los valores obtenidos para el filtro pasa-banda.

**Tabla 5.18** Valores obtenidos para un filtro activo pasa-banda de cuarto orden.

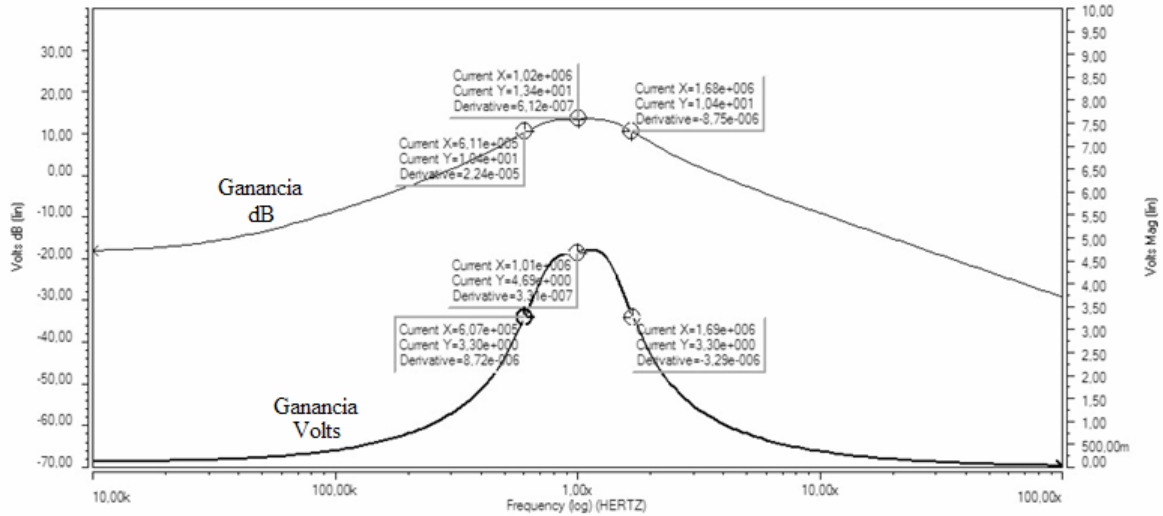
$f_o(Hz)$	Bw(Hz)	$C_{P1}$	$C_{LP1}$	$C_{S2}$	$C_{LS2}$
1M	500k	91.8397407E-12	2.7580974967E-12	8.2742924903E-12	30.61324692E-12
1M	1M	45.9198703816E	5.516194993577E-12	16.548584980E-12	15.30662346E-12

Nuevamente usando HSpice para simular los circuitos y el modelo `amis05` de `mosis`, se obtuvieron los resultados de las Figs. 5.45 y 5.46, que corresponden a las gráficas de respuesta en magnitud en decibeles y en volts, en ellas se miden la frecuencia central y las frecuencias en las atenuaciones de 3 decibeles.



**Fig. 5.45** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_c = 1MHz, Bw = 500k$$



**Fig. 5.46** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_c = 1\text{MHz}, Bw = 1\text{M}$$

Comparando los valores teóricos con los valores medidos. Se obtuvieron los datos de la tabla 5.18.

**Tabla 5.18** Valores teóricos contra valores medidos para un filtro pasa-banda de cuarto orden hecho con OTAs.

$f_c - Bw$ (teóricos)	$f_c - Bw$ (medidos)	Desviación
1MHz-500kHz	1.1MHz-539KHz	10% - 7.8%
1MHz-1MHz	1.01MHz-1.06MHz	1% - 6%

Las diferencias de los valores medidos con respecto a los valores reales se consideran aceptables, además se tiene que tomar en cuenta que hay un pequeño error en la medición debido a que es difícil situar los cursores en forma exacta en HSpice.

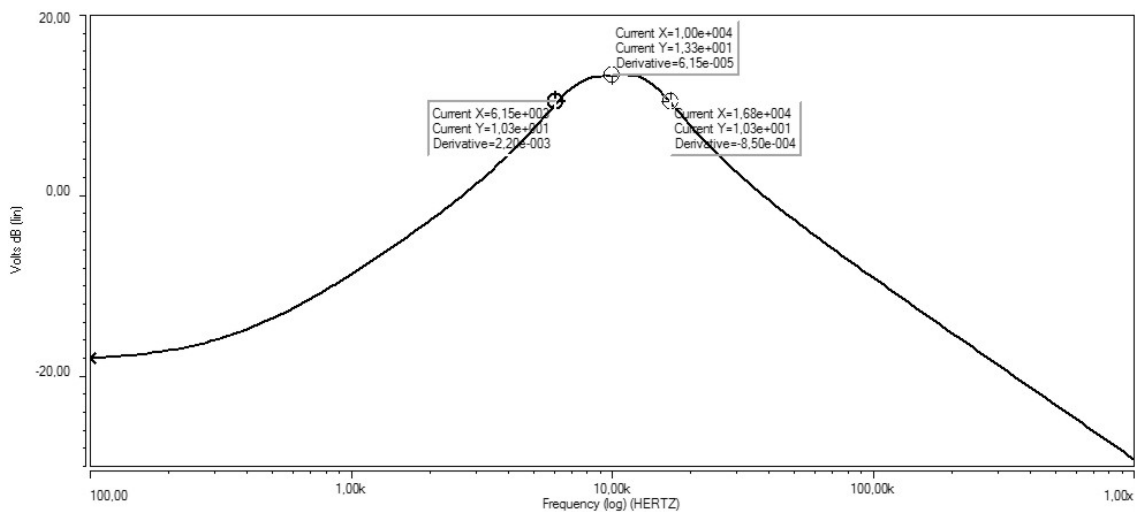
De igual forma que en el caso anterior se modificaron los valores de los capacitores para tratar de tener una mejor aproximación a las frecuencias deseadas, pero en esta ocasión no se pudo identificar una tendencia clara al variarlos, concluyendo que debido a la complejidad del circuito y a que los valores para los capacitores fueron obtenidos resolviendo un sistema de ecuaciones. Se pudo notar que el capacitor que menos afectaba el funcionamiento del filtro al ser modificado es  $C_{p1}$ , habiendo casos donde al variar su valor unas décimas la respuesta se deformaba, mientras que en otros casos se pudo variar

unidades enteras logrando ajustar el filtro; como sea, solamente se pudo ajustar exitosamente la frecuencia central, mientras que para el caso del ancho de banda no fue posible, aunque siempre se mantuvo el error dentro de un rango de  $\pm 10\%$ .

La tabla 5.19 muestra los valores resultantes para los capacitores, así como la frecuencia de corte y el ancho de banda medido para cada caso, los resultados de las simulaciones usando estos valores se aprecian en las figuras 5.47 a 5.51.

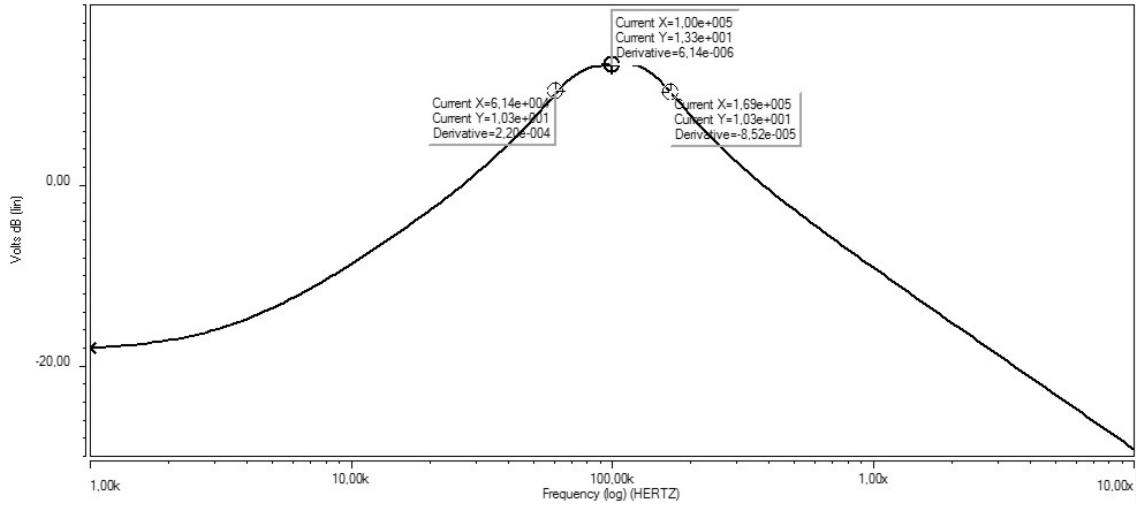
**Tabla 5.19** Valores obtenidos experimentalmente para los capacitores de un filtro activo pasa-bajas de segundo orden.

$f_c$ (Hz)	BW (Hz)	$C_{P1}$	$C_{LP1}$	$C_{S2}$	$C_{LS2}$
10k	10.65k	4591.981803E-12	551.6194993E-12	1654.85849E-12	1530.66234E-12
100k	107.6k	459.1981803E-12	55.16194993E-12	165.485849E-12	153.066234E-12
500k	507k	96.839740731E-12	11.032389982E-12	33.0971696E-12	30.6132469E-12
1M	555k	95.8397407E-12	2.7580974967E-12	8.27429249E-12	30.6132462E-12
1M	1.071M	45.95E-12	5.5161949935E-12	16.5485849E-12	15.3066234E-12



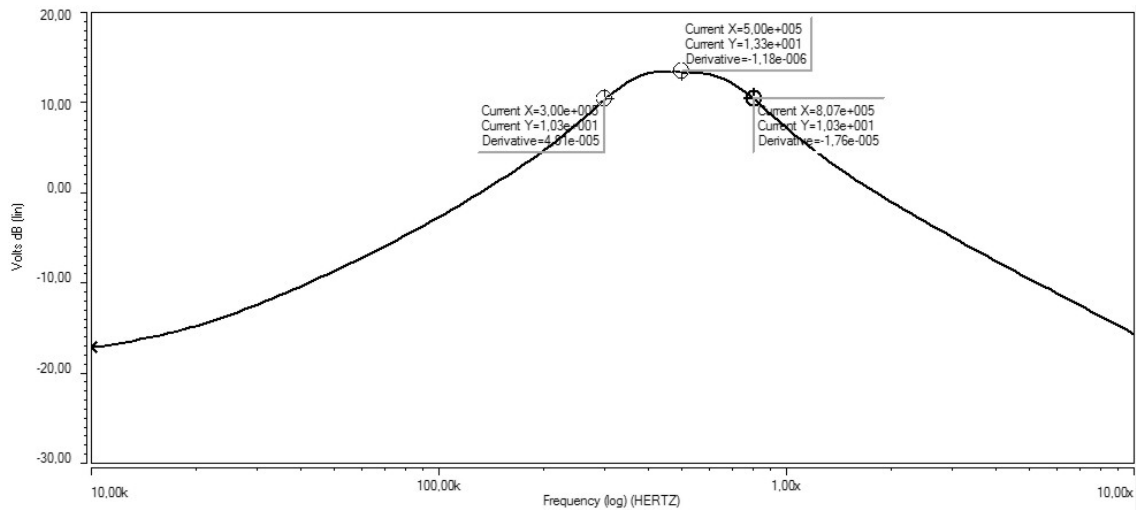
**Fig. 5.47** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_c = 10kHz, Bw = 10kHz$$



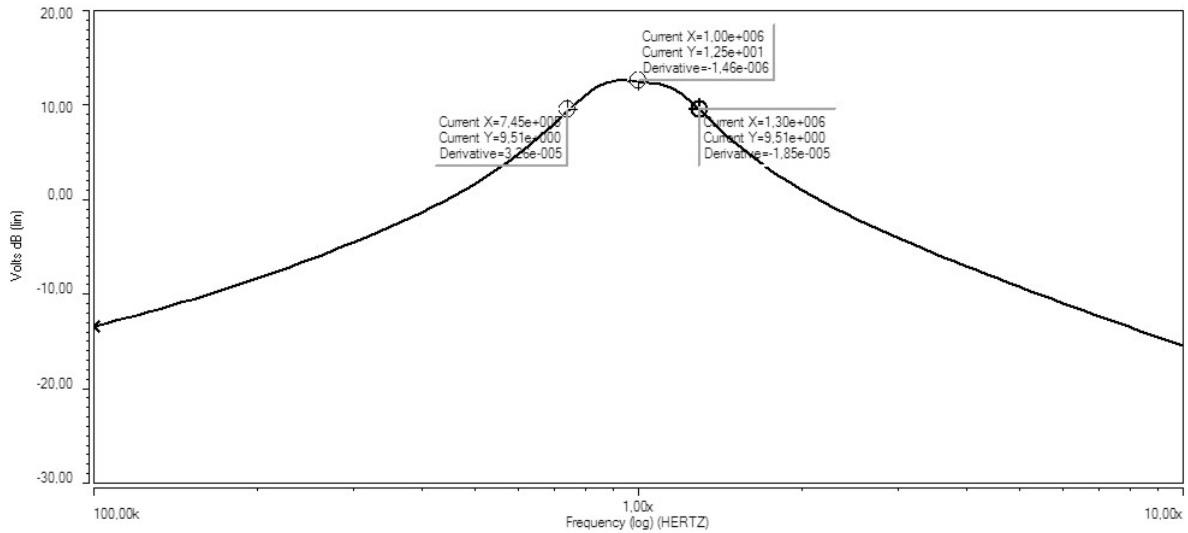
**Fig. 5.48** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_c = 100kHz, Bw = 100kHz$$



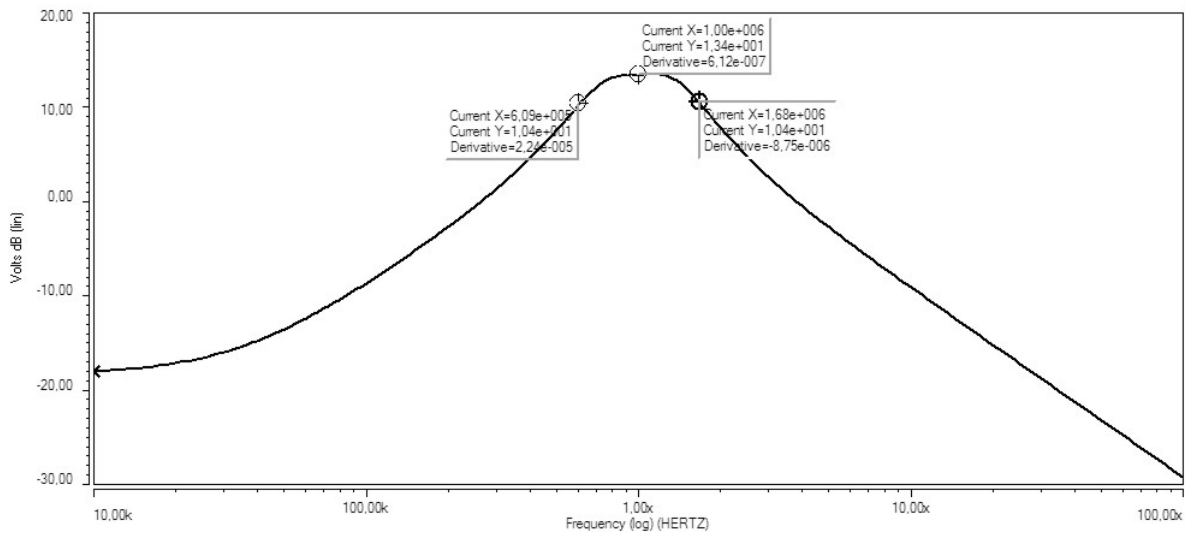
**Fig. 5.49** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_c = 500kHz, Bw = 500kHz$$



**Fig. 5.50** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_C = 1MHz, Bw = 500kHz$$



**Fig. 5.51** Respuesta en magnitud del filtro activo pasa-banda de cuarto orden

$$f_C = 1MHz, Bw = 1MHz$$

Se puede concluir que para el caso pasa-banda empleando el OTA CMOS propuesto en este trabajo, el rango de operación del filtro se encuentra aproximadamente entre 10kHz y 1MHz.

## 5.9 Análisis de sensibilidad

En esta sección se realiza un tipo de análisis para ver en que forma se podría comportar un circuito a diferentes frecuencias, si los valores de los elementos usados tuvieran tolerancia, como en la realidad sucede en la práctica.

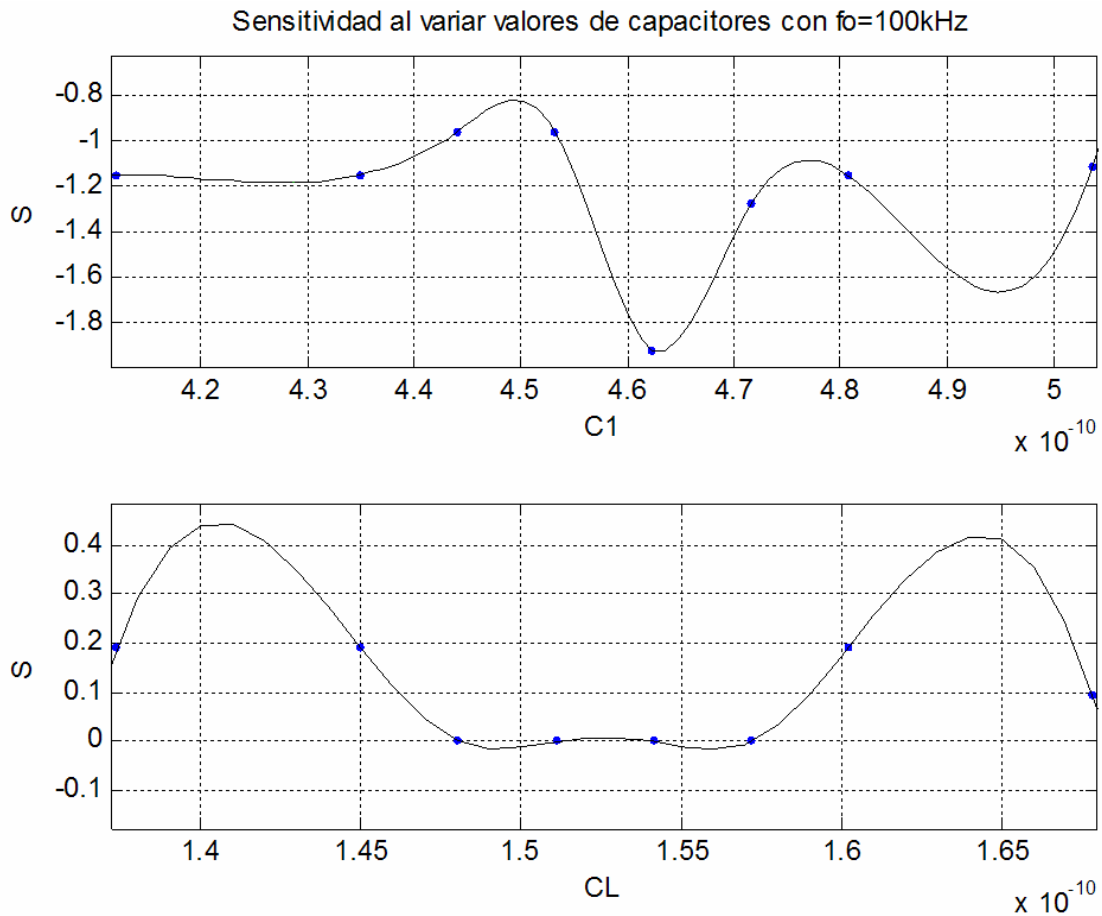
Partiendo de la ecuación

$$S_C^{f_o} = \frac{C}{f_o} \frac{\Delta f_o}{\Delta C} \quad (5.1)$$

la cual sirve para calcular la sensibilidad con respecto a la frecuencia  $f_o$  cuando cambia el valor del capacitor  $C$ . Tal que para el filtro pasa-bajas de segundo orden implementado con OTAs CMOS después de variar el valor de alguno de los capacitores  $C_1$  o  $C_L$  en cierto porcentaje, se obtuvieron las gráficas de sensibilidad para frecuencias de corte de 100kHz, 1MHz, y 10MHz, los resultados se muestran en las figuras 5.52 a 5.54 respectivamente. Las variaciones en la frecuencia de corte, se muestran en las tablas 5.20 a 5.22.

**Tabla 5.20** Variaciones al cambiar el valor de los capacitores en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseñado para una frecuencia de corte de 100kHz. a) Variando  $C_1$ ; b) Variando  $C_L$ .

(a)		(b)	
$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)	$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)
-10	-11.54	-10	1.92
-5	-5.77	-5	0.96
-3	-2.88	-3	0
-1	-0.96	-1	0
1	1.92	1	0
3	3.85	3	0
5	5.77	5	-0.96
10	11.15	10	-0.96

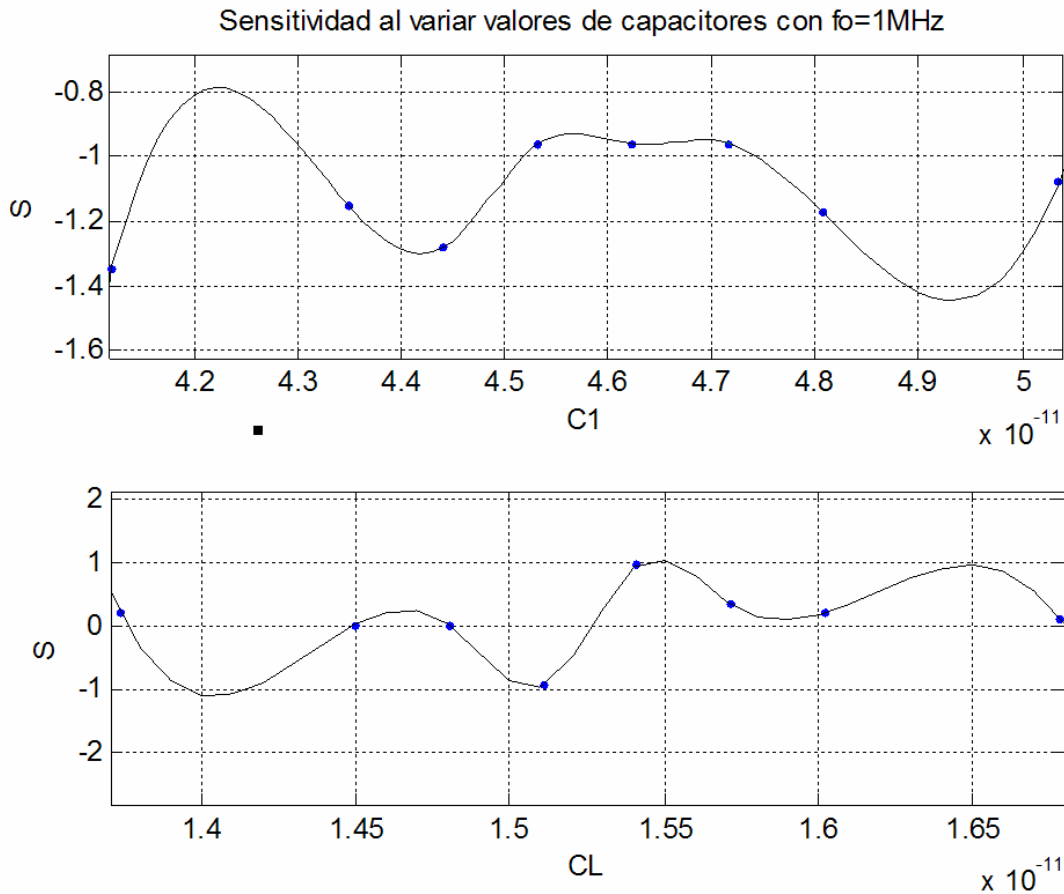


**Fig. 5.52** Sensitivities al variar  $C_1$  y  $C_L$  en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseñado para una frecuencia de corte de 100kHz.

**Tabla 5.21** Variaciones al cambiar el valor de los capacitores en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseñado para una frecuencia de corte de 1MHz. a) Variando  $C_1$ ; b) Variando  $C_L$ .

(a)		(b)	
$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)	$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)
-10	-13.46	-10	1.92
-5	-5.77	-5	0.00
-3	-3.85	-3	0.00
-1	-0.96	-1	-0.96
1	0.96	1	-0.96
3	2.88	3	-0.96
5	5.87	5	-0.96
10	10.77	10	-0.96

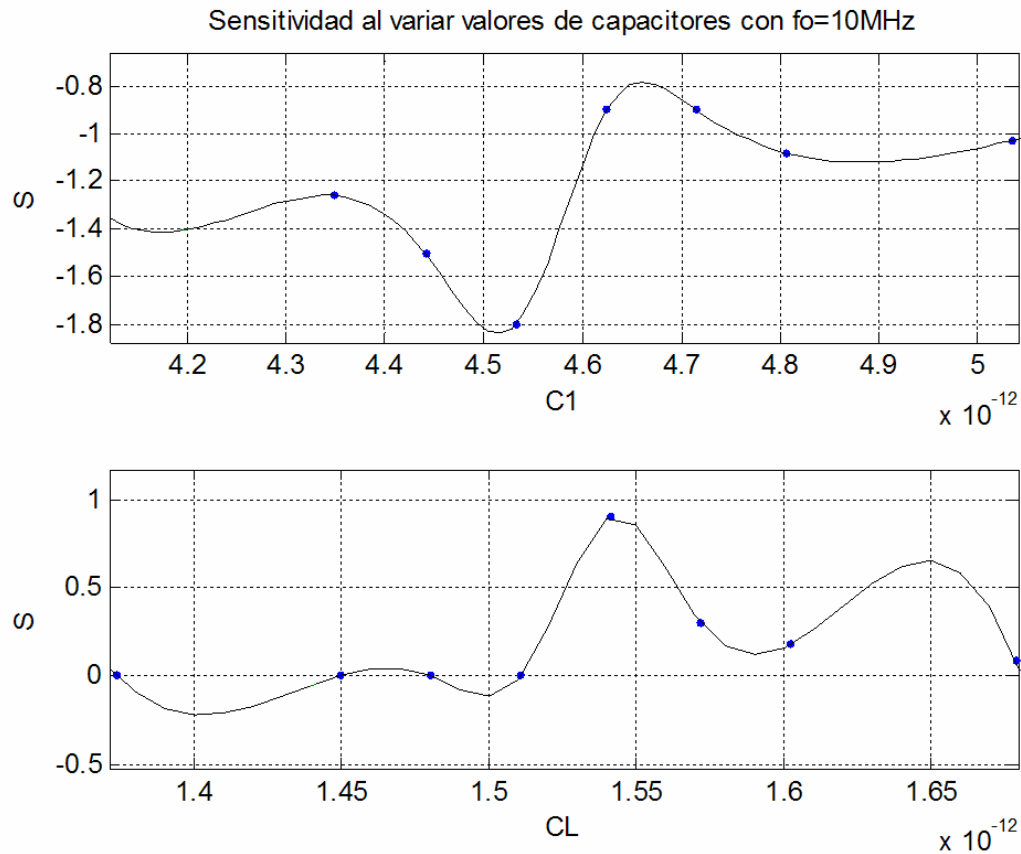




**Fig. 5.53** Sensitvidades al variar  $C_1$  y  $C_L$  en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseado para una frecuencia de corte de 1MHz.

**Tabla 5.22** Variaciones al cambiar el valor de los capacitores en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseado para una frecuencia de corte de 10MHz. a) Variando  $C_1$ ; b) Variando  $C_L$ .

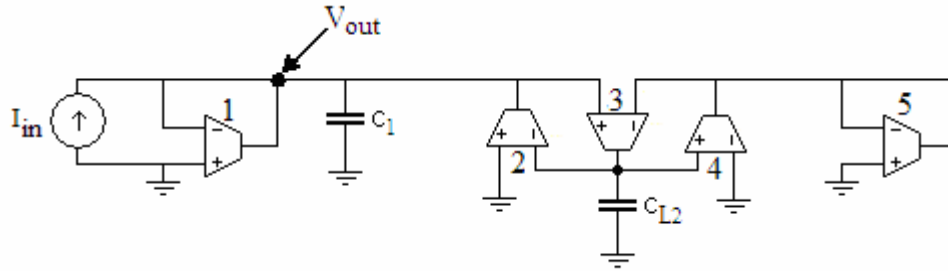
(a)		(b)	
$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)	$\Delta C$ (%)	$\Delta f_o$ (%)
-10	-13.51	-10	0
-5	-6.31	-5	0
-3	-4.50	-3	0
-1	-1.80	-1	0
1	0.90	1	-0.90
3	2.70	3	-0.90
5	5.41	5	-0.90
10	10.27	10	-0.90



**Fig. 5.54** Sensitvidades al variar  $C_1$  y  $C_L$  en un filtro pasabajas con OTAs CMOS diseado para una frecuencia de corte de 10MHz.

De las gráficas se puede concluir que para el caso pasa-bajas la sensibilidad al variar los capacitores es baja, siendo más viable variar  $C_L$  para hacer ajustes de diseo ya que éste presenta sensitvidades menores a la unidad.

También se hicieron pruebas variando los valores de las  $g_m$  de los OTAs, esto se consideró necesario ya que en componentes reales este valor puede ser diferente incluso entre OTAs del mismo modelo y fabricante. La variación que se consideró fue de aproximadamente  $\pm 10\%$  y se consiguió variando levemente las dimensiones de los transistores CMOS que conforman a los OTAs. La figura 5.55 muestra el circuito para el filtro pasa-bajas de segundo orden con los OTAs numerados para su identificación. Las variaciones en porcentaje de las características del filtro se muestran en la tabla 5.23.



**Fig. 5.55** Filtro pasa-bajas de segundo orden con OTAs numerados.

**Tabla 5.23** Variaciones en porcentaje de las características del filtro de la Fig. 5.55 al cambiar el valor de las  $g_m$  de los OTAs aproximadamente  $\pm 10\%$ .

Componente modificado	$\Delta g_m$ (%)	$\Delta f_o$ (%)	$\Delta H_0$ (%)	Sensitividad $S_{g_m}^{f_o}$
OTA 1	-11.01	-4.5	3.65	0.409
OTA 1	+11	+4.5	-2.92	0.406
OTA 2	-10.72	-8.11	3.65	0.75
OTA 2	+10.72	+7.21	-2.92	0.67
OTA 3	-10.75	+0.90	0	-0.08
OTA 3	+10.75	0	0	0
OTA 4	-10.39	+9.91	-3.65	-0.95
OTA 4	+10.31	+6.31	2.92	0.61
OTA 5	-11.28	-9.01	3.65	0.79
OTA 5	+11.43	+8.11	-2.92	0.70

De estos resultados se concluye que si los valores de las  $g_m$  varían dentro de un rango de aproximadamente  $\pm 10\%$  con respecto al valor esperado, no habrá un cambio negativo en el desempeño del filtro, ya que como se vio en esta sección las pequeñas variaciones en la frecuencia de corte pueden ser ajustadas a través de los valores de capacitores. Cabe mencionar que las sensibilidades de la frecuencia con respecto a las  $g_m$  es baja, siendo menor que la unidad para todos los casos que se simularon.

Se omitió el análisis de sensibilidad para el caso pasa-banda ya que al intentar medir el cambio en la frecuencia se observó que, aún al modificar levemente los valores de los capacitores, la respuesta en magnitud se deforma, es decir tiene una sensibilidad muy alta.

En este capítulo se analizaron los resultados para distintos casos de filtros diseñados usando el método propuesto y siempre se obtuvo una respuesta aceptable. Hay que tomar en cuenta que las rutinas de Matlab no fueron capaces de encontrar valores para todos los casos. Se pudo observar una tendencia que ayuda a concluir que generalmente se obtienen mejores resultados cuando ambas resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , son iguales.