Análisis de Circuitos
Trabajo Práctico Final

Margarita Manterola
Padrón 77091

Agosto 2004

Índice

1. Filtro pedido

En el enunciado del trabajo práctico se solicita diseñar un filtro que tenga un cero simple en $\omega = -100$ y otro cero simple en $\omega = -10000$, un polo simple en $\omega = -5000$ y dos polos complejos conjugados con $\omega = 1000$ y $Q_P = 12dB$.
El módulo de la transferencia, cuando $\omega = 0$ es de $2dB$.

Se trata de un filtro pasa banda, con dos ceros y tres polos.

2. Análisis de la transferencia

Teniendo en cuenta los datos proporcionados en el enunciado, la transferencia del circuito cuando $\omega = 0$ es

$$|T(s)| = 2db \tag{2.1}$$

De manera que, este valor se puede convertir a $|T(s)| = 10^{2/20} \approx 1{,}26$.

Por otro lado, el factor Q_P que determina los polos complejos del circuito está dado por:

$$Q_P = 12db \tag{2.2}$$

De manera que, este valor se puede convertir a $Q_P = 10^{12/20} \approx 3{,}981$.

Teniendo en cuenta los ceros y los polos proporcionados en el enunciado, y los datos recién obtenidos, la transferencia será de la forma:

$$T(s) = 1{,}26 \frac{\left(\frac{s}{100} + 1\right)\left(\frac{s}{10000} + 1\right)}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)\left(\frac{s}{5000} + 1\right)} \tag{2.3}$$

Para la construcción del filtro solicitado, se dividirá esta transferencia en dos subfiltros, que luego se unirán en uno solo:

$$T(s) = 1{,}26 \frac{\left(\frac{s}{10000} + 1\right)}{\left(\frac{s}{5000} + 1\right)} \frac{\left(\frac{s}{100} + 1\right)}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.4}$$

2.1. Filtro pasabajos sencillo

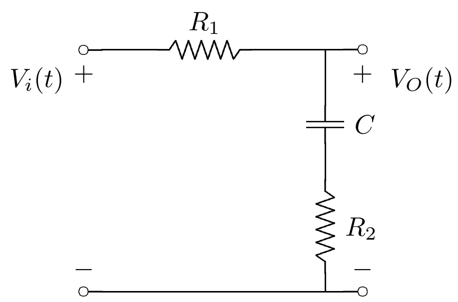


Figura 2.1: Filtro pasabajos utilizado

La transferencia del circuito representado en la Figura 2.1 es:

$$T(s) = \frac{1/SC + R_2}{R_1 + R_2 + 1/SC} \tag{2.5}$$

$$T(s) = \frac{1 + R_2SC}{R_1SC + R_2SC + 1} \tag{2.6}$$

$$T(s) = \frac{CR_2S + 1}{C(R_1 + R_2)S + 1} \tag{2.7}$$

Otorgando los valores de $100nF$ al capacitor, y $1k\Omega$ a los resistores se obtiene la transferencia buscada:

$$T(s) = \frac{\frac{S}{10000} + 1}{\frac{S}{5000} + 1} \tag{2.8}$$

2.2. Filtro de segundo orden

Para la segunda parte, es necesario desarrollar un filtro de segundo orden que cumpla con la siguiente ecuación.

$$T(s) = \frac{\left(\frac{s}{100} + 1\right)}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.9}$$

2.2.1. Filtro pasabajos de segundo orden

Para ello, se dividirá esta ecuación nuevamente en dós términos. El primero, dado por la siguiente ecuación:

$$T(s) = \frac{1}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.10}$$

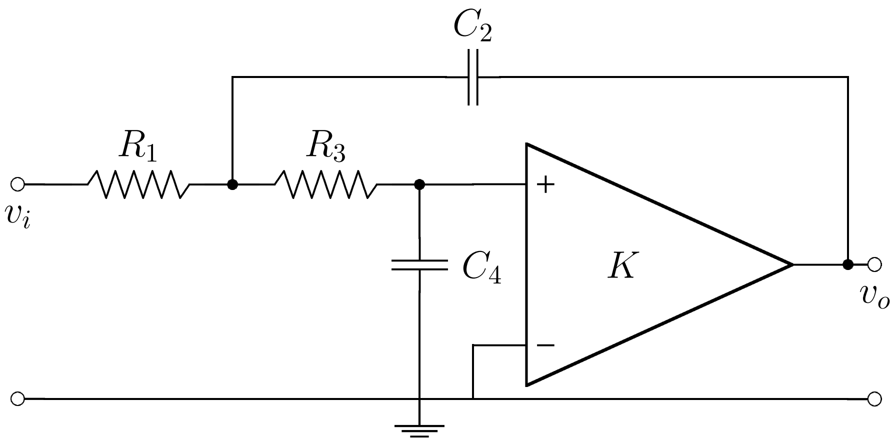


Figura 2.2: Filtro pasabajos Sallen y Key

Se trata de un pasabajos de segundo orden, que puede modelizarse fácilmente a través de un *Pasabajos Sallen y Key*, como el de la Figura 2.2.

Los polos de este filtro pueden calcularse según los valores que se le den a los resistores y capacitores.

Si se toma $R_1 = R_3 = R$ y $C_2 = C_4 = C$, se puede llegar a que:

$$\omega = 1/RC \tag{2.11}$$

$$1/Q = 3 - K \tag{2.12}$$

De manera que, para el filtro buscado, se debe cumplir que $RC = 1/1000$ y $K = 3 - 1/Q$. K queda determinado, y es $K \approx 2{,}75$. Los valores para R y para C se pueden elegir según sea conveniente, en este caso se elige $10k\Omega$ y $100nF$ respectivamente.

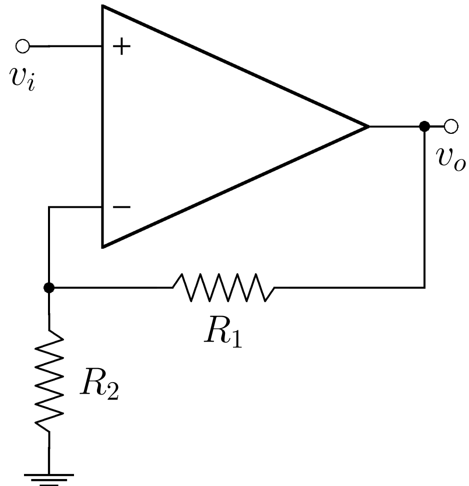


Figura 2.3: Amplificador de coeficiente K

Para armar el amplificador K se utiliza un filtro como el de la Figura 2.3, en el que la salida está dada por la siguiente ecuación:

$$v_o = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) v_i \tag{2.13}$$

De manera que para obtener $K = 2{,}75$, se pueden elegir valores como $R_1 = 1750\Omega$ y $R_2 = 1k\Omega$.

La salida del circuito armado con los valores especificados será:

$$T(s) = \frac{2{,}75}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.14}$$

Para obtener la salida deseada, se puede utilizar un simple divisor resistivo como el de la Figura 2.4, donde la salida está dada por $v_o = \frac{R_2}{R_1+R_2} v_i$ De manera que se podrían elegir los valores de $R_1 = 1750\Omega$ y $R_2 = 1k\Omega$ para obtener una salida sin amplificar.

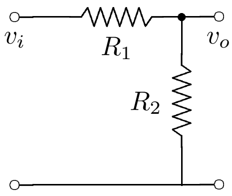


Figura 2.4: Divisor resistivo

2.2.2. Filtro pasabanda de segundo orden

Para la segunda parte de la ecuación, se debe encontrar un circuito que satisfaga la ecuación:

$$T(s) = \frac{s/100}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.15}$$

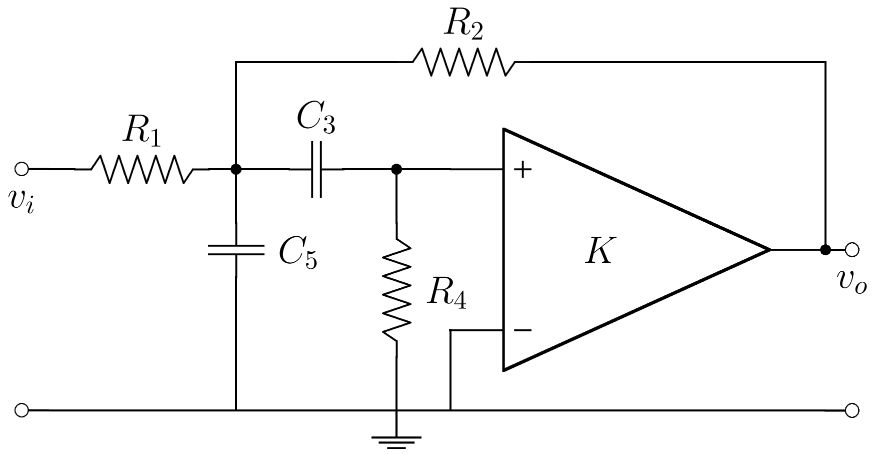


Figura 2.5: Filtro pasabanda Sallen y Key

Esto se puede lograr utilizando un filtro *Pasabanda Sallen y Key* como el mostrado en la figura 2.5.

En este caso, si se toma $R_1 = R_2 = R_4 = R$ y $C_5 = C_3 = C$, se puede llegar a que:

$$\omega = \sqrt{2}/RC \tag{2.16}$$

$$1/Q = 4 - K/\sqrt{2} \tag{2.17}$$

De manera que es necesario encontrar valores para R y C tal que $RC = \sqrt{2}/1000$ y K queda determinado como $K = 4 - \sqrt{2}/3{,}981 = 3{,}65$. Los valores de R y C se pueden elegir como $R \approx 1414\Omega$ y $C = 1\mu F$.

En este caso, la salida obtenida para el circuito será equivalente a:

$$T(s) = \frac{s/388}{\left(\left(\frac{s}{1000}\right)^2 + \frac{s}{3981} + 1\right)} \tag{2.18}$$

Es decir, que es necesario amplificar la salida por un factor de 3,88 para que sea la indicada en la ecuación de transferencia. En lugar de efectuar esta amplificación directamente, es posible efectuarla junto con la suma de la salida del circuito pasabajos. Para esto, se atenuará la salida del circuito pasabajos de manera que ambas salidas entren con el mismo factor de atenuación al circuito sumador.

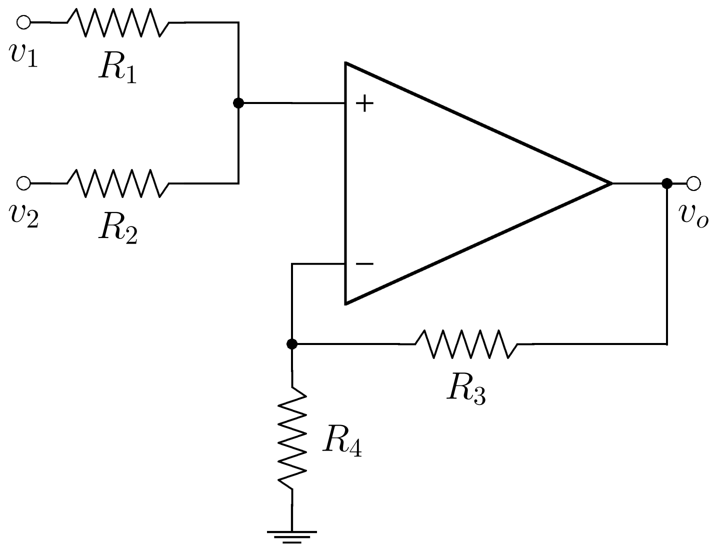


Figura 2.6: Circuito Sumador

La suma de estos dos filtros de segundo orden se realiza utilizando un sumador como el de la Figura 2.6. Cuya salida está dada por la siguiente ecuación:

$$v_0 = \frac{R_3 + R_4}{R_4} \left(\frac{v_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{v_2 R_1}{R_1 + R_2} \right) \tag{2.19}$$

Si se toma $R_1 = R_2$, la ecuación se simplifica:

$$v_0 = \frac{R_3 + R_4}{2R_4} (v_1 + v_2) \tag{2.20}$$

De manera que es posible determinar los valores de R_3 y R_4 para obtener la salida amplificada tanto como se desee. En este caso, se debe amplificar la salida por un factor de 3,88 para obtener la transferencia planteada al comienzo de esta sección. Pero es necesario amplificarla por un factor adicional de 1,26, para obtener la transferencia pedida por el enunciado del problema. El factor total de amplificación es entonces de 4,89.

Los valores para los resistores podrían ser, por ejemplo, de $R_3 = 8780\Omega$ y $R_4 = 1k\Omega$.

2.3. Filtro completo

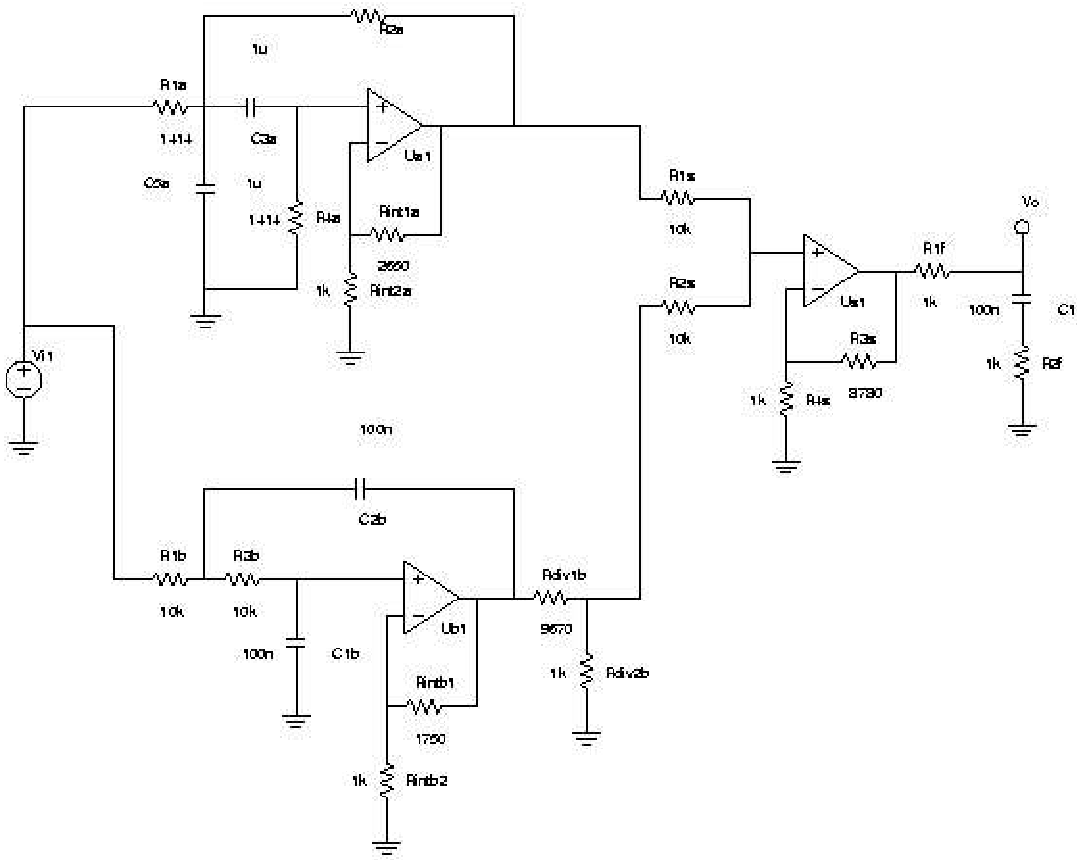


Figura 2.7: Circuito Completo

Componiendo los filtros diseñados se puede llegar a un filtro cuya salida sea la pedida, como el que se muestra en la Figura 2.7, que fue generada por el programa de simulación de circuitos **Oregano**.

Los valores dados para algunas de los resistores en el diagrama no corresponden a los valores estándar de resistores que se pueden comprar. Para obtener estos valores será necesario utilizar resistores en serie, cuya suma sea apróximadamente el valor utilizado en la simulación del circuito.

Por ejemplo, para el resistor que se indica de 1750Ω, se pude utilizar un resistor de 1,2$k\Omega$ y un resistor de 560Ω, obteniendo una resistencia total de 1760Ω, muy cercana a la pedida por el circuito (1 % de diferencia).

3. Respuesta en Frecuencia

La Figura 3.1 muestra el diagrama de Bode para el circuito propuesto. Es claro que la mayor amplificación se dá cuando $\omega = 1000$, en cuyo caso la ganancia llega a los 34dB.

Estos 34dB de amplificación se deben a los 20dB de ganancia que aporta el cero que se encuentra en $\omega = 100$, los 12dB que aporta el Q de los polos complejos conjugados en $\omega = 1000$ y los 2dB de ganancia para $\omega = 0$.

Se trata de un valor de amplificación bastante importante. Con una señal de entrada de 1v de amplitud, se obtendrá una señal de salida de aproximadamente 50v de amplitud.

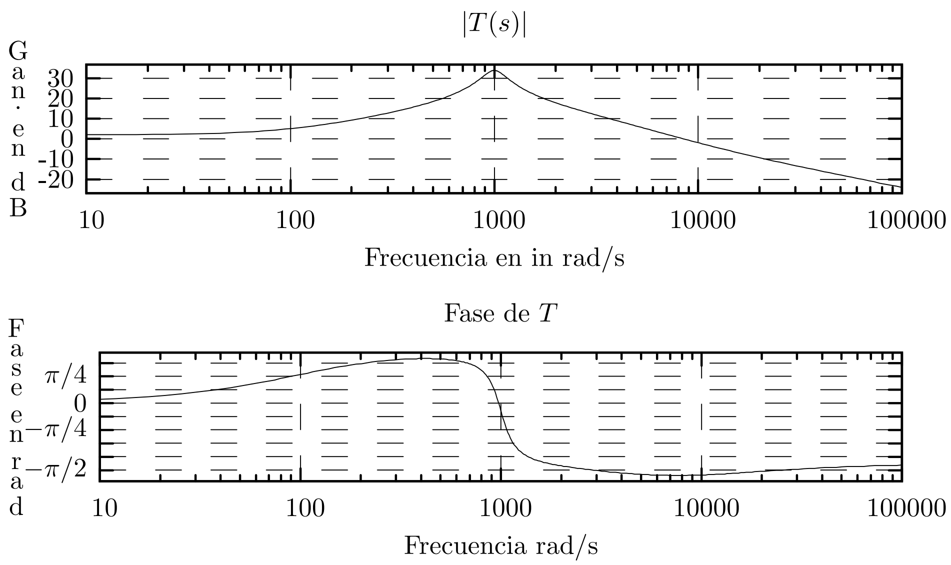


Figura 3.1: Diagrama de Bode

Por otro lado, es posible observar que alrededor de esta frecuencia se produce un cambio importante en la fase de la salida del circuito, que pasa de estar adelantada casi $\pi/3$ radianes, a estar atrasada $pi/2$ radianes. Esto se debe a la presencia del polo doble en $\omega = 1000$.

4. Respuesta a excitaciones

La función de transferencia puede ser también analizada utilizando la respuesta a distintas excitaciones. Para encontrar esta respuesta analíticamente es necesario multiplicar la función de transferencia dada por la ecuación (2.3) por las transformadas de cada una de las excitaciones y luego anti-transformar para obtener la expresión en el tiempo.

Por otro lado, es posible simular esta respuesta tanto con un programa de matemática como con un programa de simulación de circuitos. Para la realización de este análisis, se efectuó la simulación matemática con el programa **Octave** y la simulación del circuito con los programas **Oregano** y **Spice**.

4.1. Respuesta al impulso

Dado que la transformada de Laplace del impulso es 1, la respuesta al impulso puede obtenerse haciendo la anti-transformada de la ecuacion (2.3). Y $h(t)$ será la respuesta al impulso puede obtenerse mediante el método de fracciones simples:

$$\begin{aligned}
H(s) &= 1{,}26\left(\frac{-4950{,}7}{s+5000}+\frac{-4975{,}30-373{,}10i}{s-(-125{,}60+992{,}08i)}+\frac{-4975{,}30+373{,}10i}{s-(-125{,}60-992{,}08i)}\right)\\
H(s) &= 1{,}26\left(\frac{-4950{,}7}{s+5000}+\frac{(99{,}75)^2 s+(1410{,}70)^2}{s^2+251s+1000^2}\right)\\
H(s) &= 1{,}26\left(\frac{-4950{,}7}{s+5000}+\frac{(99{,}75)^2\,(s+125{,}6)}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2}+\frac{(860{,}43)^2}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2}\right)
\end{aligned}$$

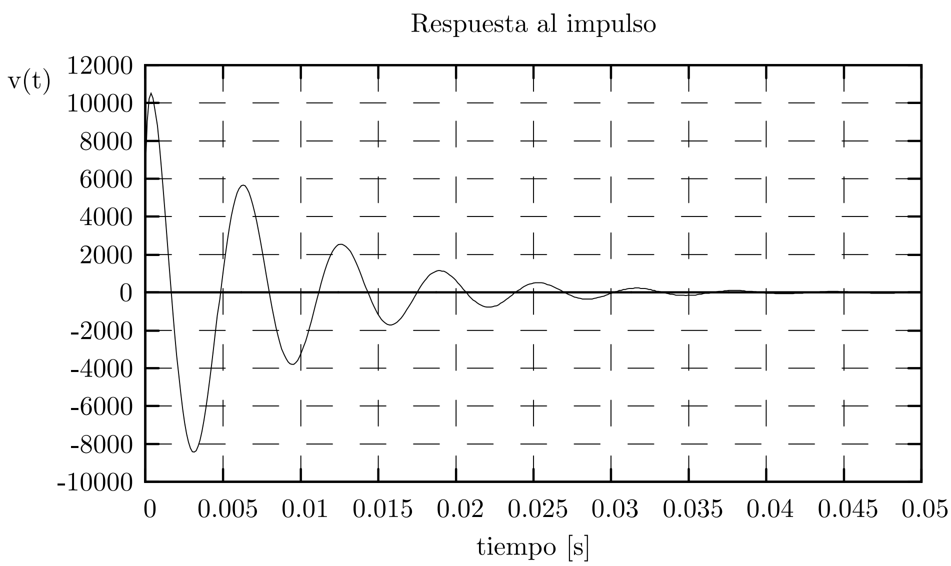


Figura 4.1: Respuesta al impulso, simulada con **octave**

De manera que la respuesta al impulso será:

$$h(t) = 1{,}26u(t)\left(-4950{,}7e^{-5000t} + e^{-125t}\left((99{,}75)^2\cos(992{,}08t) + 0{,}87\sin(992{,}08)\right)\right) \tag{4.1}$$

Viendo la Figura 4.1 que grafica la respuesta al impulso, es claro que el impulso genera una respuesta senoidal amortiguada, con un pico muy alto en el momento de producirse el impulso, pero que decae muy rápidamente a cero.

Esta respuesta no es posible simularla en spice, ya que no se puede generar un impulso real. Sin embargo, utilizando un pulso de muy corta duración y mucha amplitud es posible obtener un comportamiento similar al del impulso.

4.2. Respuesta al escalón

La respuesta al escalón se puede obtener analíticamente, multiplicando la ecuacion (2.3) por la transformada del escalón, es decir $1/s$. Y $s(t)$ será la respuesta al escalón:

$$
\begin{aligned}
S(s) &= 1{,}26\left(\frac{1}{s}+\frac{0{,}99}{s+5000}+\frac{-0{,}995-4{,}89i}{s-(-125{,}60+992{,}08i)}+\frac{-0{,}995+4{,}89i}{s-(-125{,}60-992{,}08i)}\right)\\
S(s) &= 1{,}26\left(\frac{1}{s}+\frac{0{,}99}{s+5000}+\frac{1{,}99s+(97{,}22)^2}{s^2+251s+1000^2}\right)\\
S(s) &= 1{,}26\left(\frac{1/s}{+}\frac{0{,}99}{s+5000}+\frac{1{,}99\,(s+125{,}6)}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2}+\frac{(95{,}9)^2}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2}\right)
\end{aligned}
$$

De manera que la respuesta al escalón será:

$$
s(t) = 1{,}26u(t)\left(1+0{,}99e^{-5000t}+e^{-125t}\left(1{,}99\cos(992{,}08t)+0{,}0093\sin(992{,}08)\right)\right) \tag{4.2}
$$

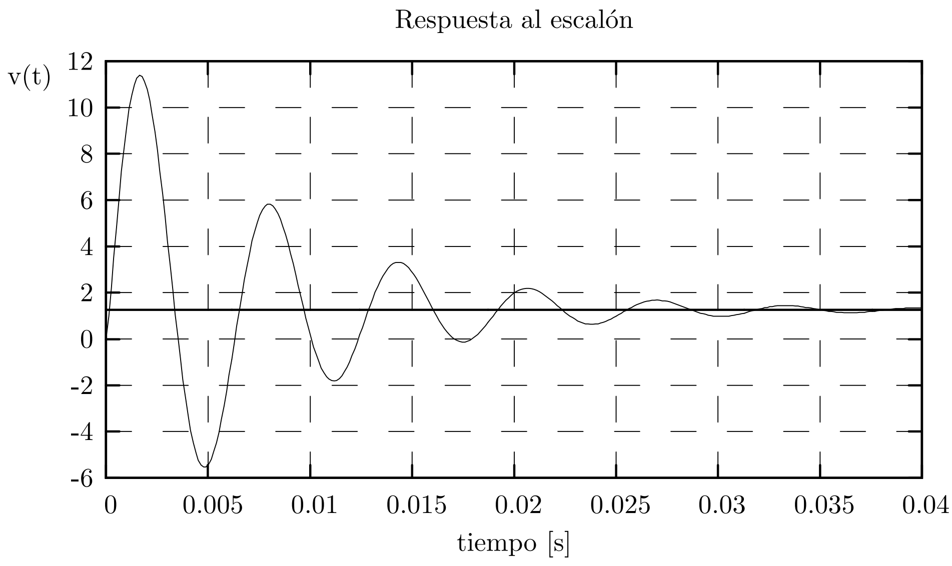


Figura 4.2: Respuesta al escalón, simulada con **octave**

La Figura 4.2 grafica la respuesta analítica al escalón. Es importante destacar que esta respuesta tiene a 1,26v, que es la transferencia de $2dB$ que se pidió en el enunciado para $\omega = 0$.

De la ecuación analítica de la respuesta al escalón es claro que se va a presentar este comportamiento, debido a la presencia del térmido de valor 1.

Además, se puede ver que el comportamiento es el de una onda sinusoidal amortiguada que tiende muy rápidamente al valor estable.

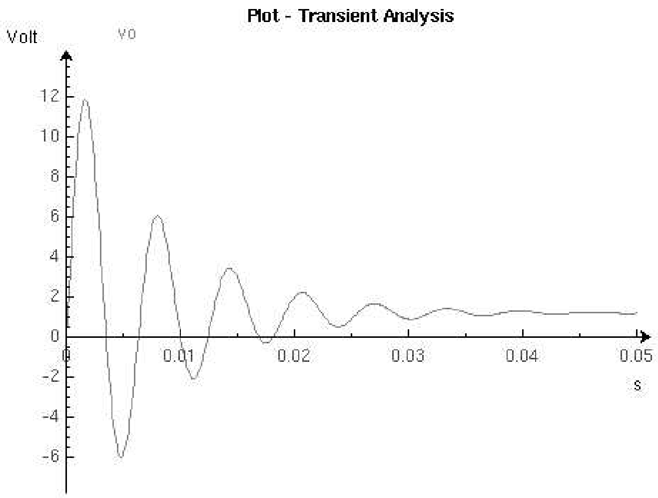


Figura 4.3: Respuesta al escalón, simulada con **spice**

Para simular este comportamiento sobre el circuito, se utilizó una fuente de un pulso, con un tiempo de crecimiento de 1μs, y 1s de duración. El comportamiento observado se grafica en la Figura 4.3. Puede verse que al igual que la respuesta analítica, el pulso tiende muy rápidamente (0,05s) a estabilizarse en la salida para $\omega = 0$.

4.3. Respuesta a una onda senoidal

La respuesta a una onda senoidal se puede obtener analíticamente, multiplicando la ecuación (2.3) por la transformada de la onda senoidal deseada, dada por $\omega/(s^2+\omega^2)$, con $\omega = 1000$. Y $v(t)$ será la respuesta a esta onda:

$$
\begin{aligned}
V(s) &= 1260\left(\frac{-1{,}90}{s+5000} + \frac{-0{,}0039-0{,}019i}{s-0{,}001i} + \frac{-0{,}0039+0{,}019i}{s+0{,}001i} + \right.\\
&\qquad \left.\frac{0{,}004+0{,}019i}{s-(-125{,}60+992{,}08i)} + \frac{0{,}004+0{,}019i}{s-(-125{,}60-992{,}08i)}\right)\\
V(s) &= 1260\left(\frac{-1{,}90}{s+5000} + \frac{-0{,}0077s+(6{,}22)^2}{s^2+1000^2} + \frac{0{,}0079s+-37{,}62}{s^2+251s+1000^2}\right)\\
V(s) &= 1260\left(\frac{1{,}90}{s+5000} + \frac{-0{,}0077s}{s^2+1000^2} + \frac{(6{,}22)^2}{s^2+1000^2} + \right.\\
&\qquad \left.\frac{0{,}0079\,(s+125{,}6)}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2} - \frac{38{,}6}{(s+125{,}6)^2+992{,}08^2}\right)
\end{aligned}
$$

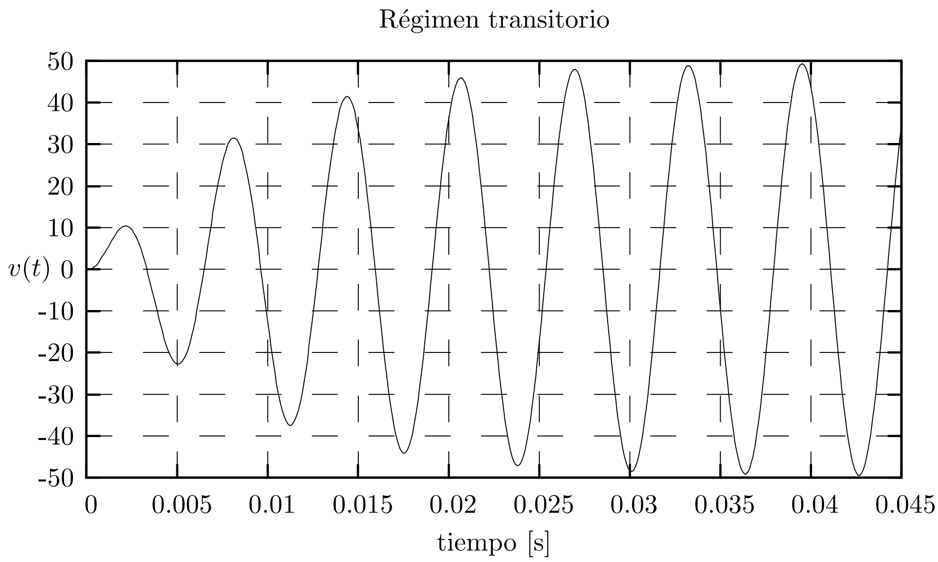


Figura 4.4: Respuesta a una onda senoidal con $\omega = 1000$, simulada con **octave**

De manera que la respuesta a la senoidal, con $\omega = 1000$ será:

$$
\begin{aligned}
v(t) &= 1260u(t)\left(-1{,}90e^{-5000t} + \right.\\
&\quad e^{-125t}\left(0{,}0079\cos(992{,}08t) - 3{,}9\times10^{-5}\sin(992{,}08)\right) - \\
&\quad \left.0{,}0077\cos(1000t) + 0{,}04\,\mathrm{sen}(1000t)\right)
\end{aligned}
$$

Es decir que la salida será una onda senoidal de la misma frecuencia que la entrada, que durante el régimen transitorio sufrirá una amortiguación de muy corta duración.

La frecuencia de amplificación máxima del circuito es en los $1000rad/s$, equivalente a 159Hz. Para poder apreciar la amplificación, se simula una onda senoidal de 159Hz de frecuencia y amplitud 1v.

La respuesta a esta onda se puede ver claramente en la Figura 4.4, simulada matemáticamente, y en la Figura 4.5 simulada con **spice**.

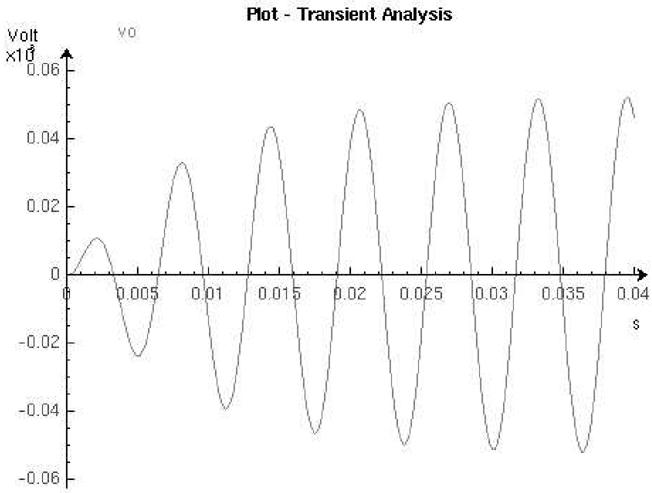


Figura 4.5: Respuesta a una onda senoidal con $\omega = 1000$, simulada con **spice**

Como se ve en las figuras, durante los primeros ciclos hay un régimen transitorio en el que la amplificación va creciendo, una vez alcanzado el régimen estacionario, la onda es de 50v pico, como se esperaba.

El comportamiento del circuito ante ondas senoidales de distintas frecuencias no es el mismo. Por esa razón, se simulan tanto en **octave** como en **spice** ondas senoidales de frecuencias 10Hz, 50Hz, 100Hz, 500Hz, 1000Hz y 5000Hz.

En estas figuras es posible apreciar dos características del comportamiento del circuito.

Por un lado, es claro que cuando la frecuencia de entrada es cercana a la de máxima amplificación, la amplificación a la salida es bastante importante. A 100Hz, por ejemplo, la salida es una onda de 13v de amplitud, mientras que a 50Hz y 500Hz la salida es cercana a los 4v, y a frecuencias más distantes es aún menor.

Por otro lado, es interesante analizar las distintas maneras en que se presenta el régimen transitorio según la frecuencia de la onda de entrada. Mientras que a frecuencias bajas el régimen transitorio afecta a unos pocos ciclos, a frecuencias altas afecta un número muy importante de ciclos. En este caso, es claro que la onda se encuentra envuelta en una senoidal amortiguada de menor frecuencia (unos 100Hz).

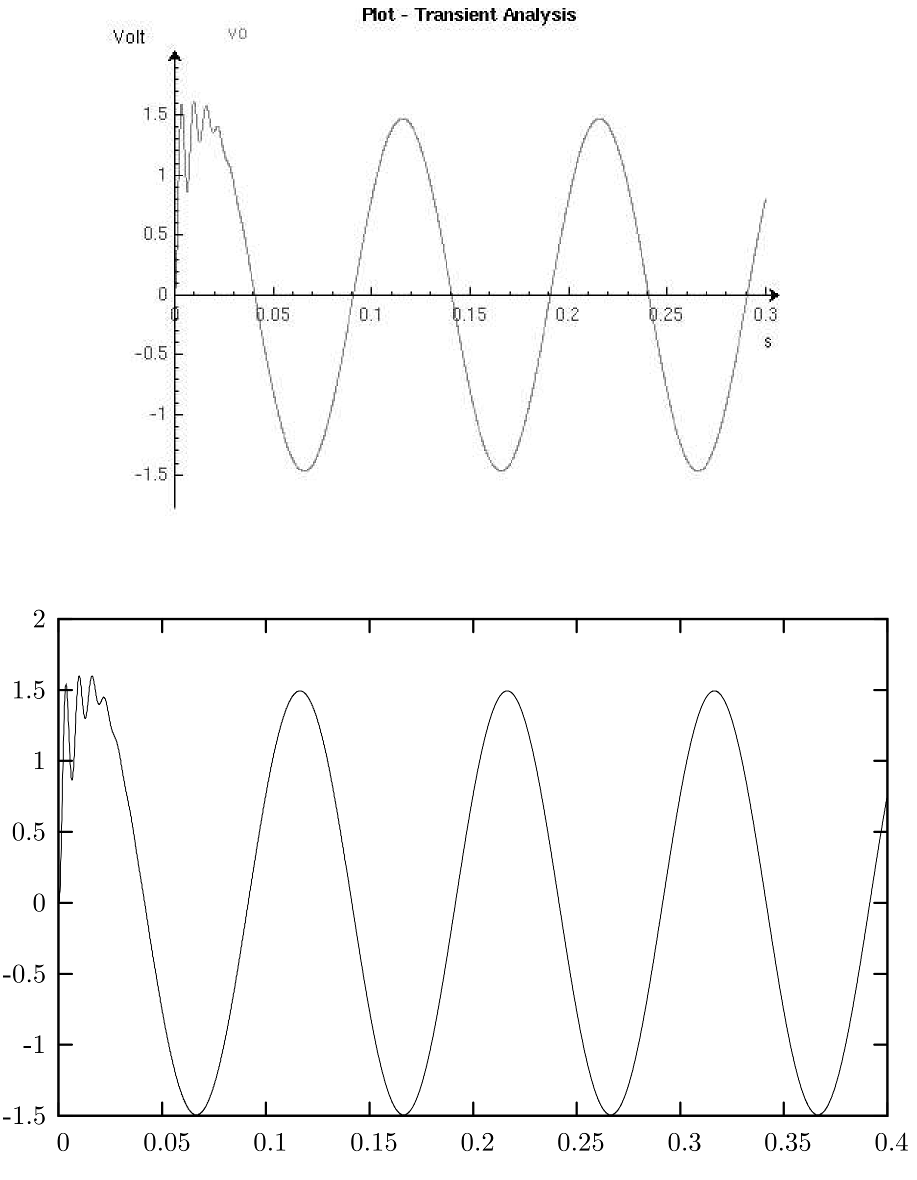


Figura 4.6: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 10Hz, simulada con **spice** y con **octave**

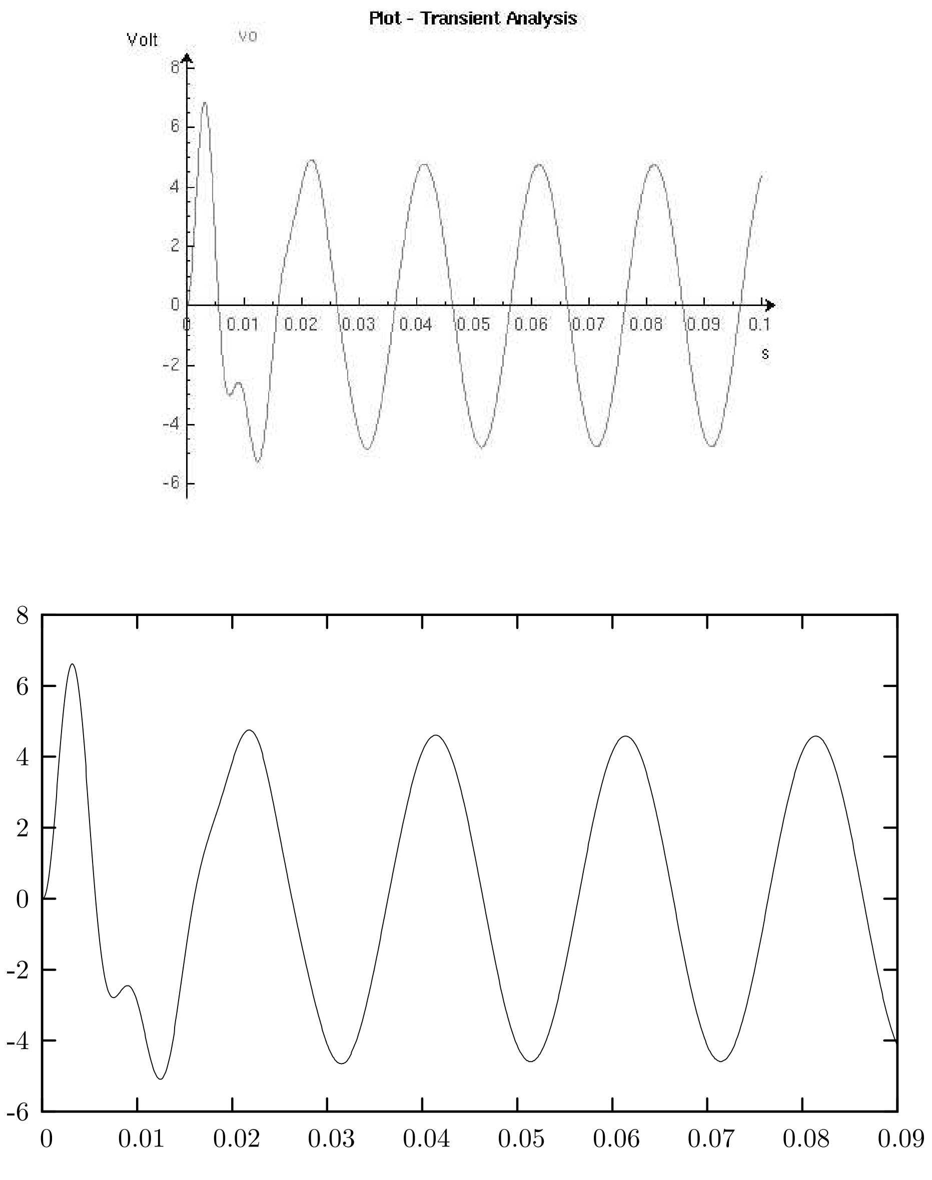
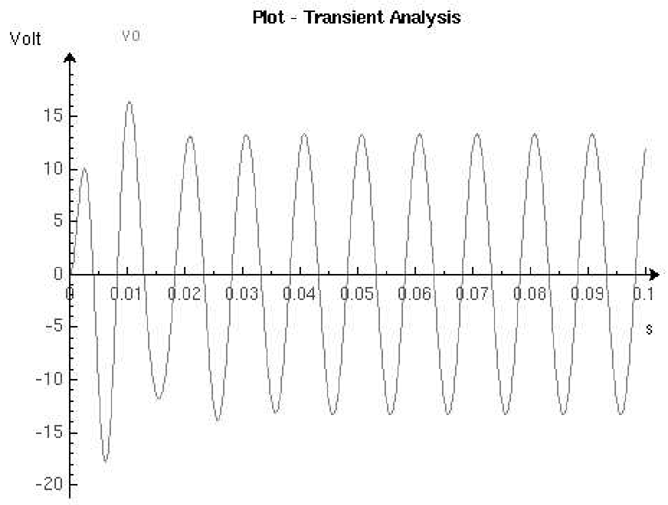


Figura 4.7: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 50Hz, simulada con **spice** y con **octave**



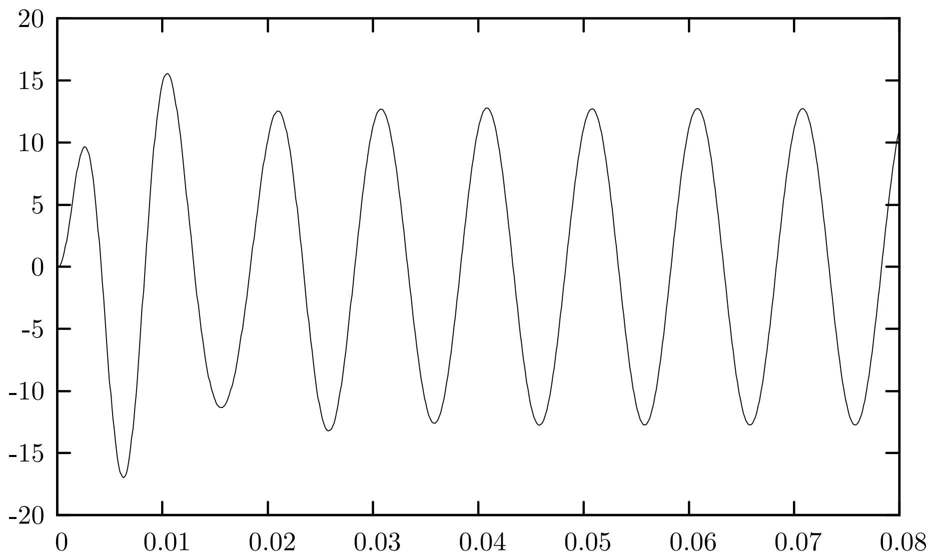


Figura 4.8: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 100Hz, simulada con **spice** y con **octave**

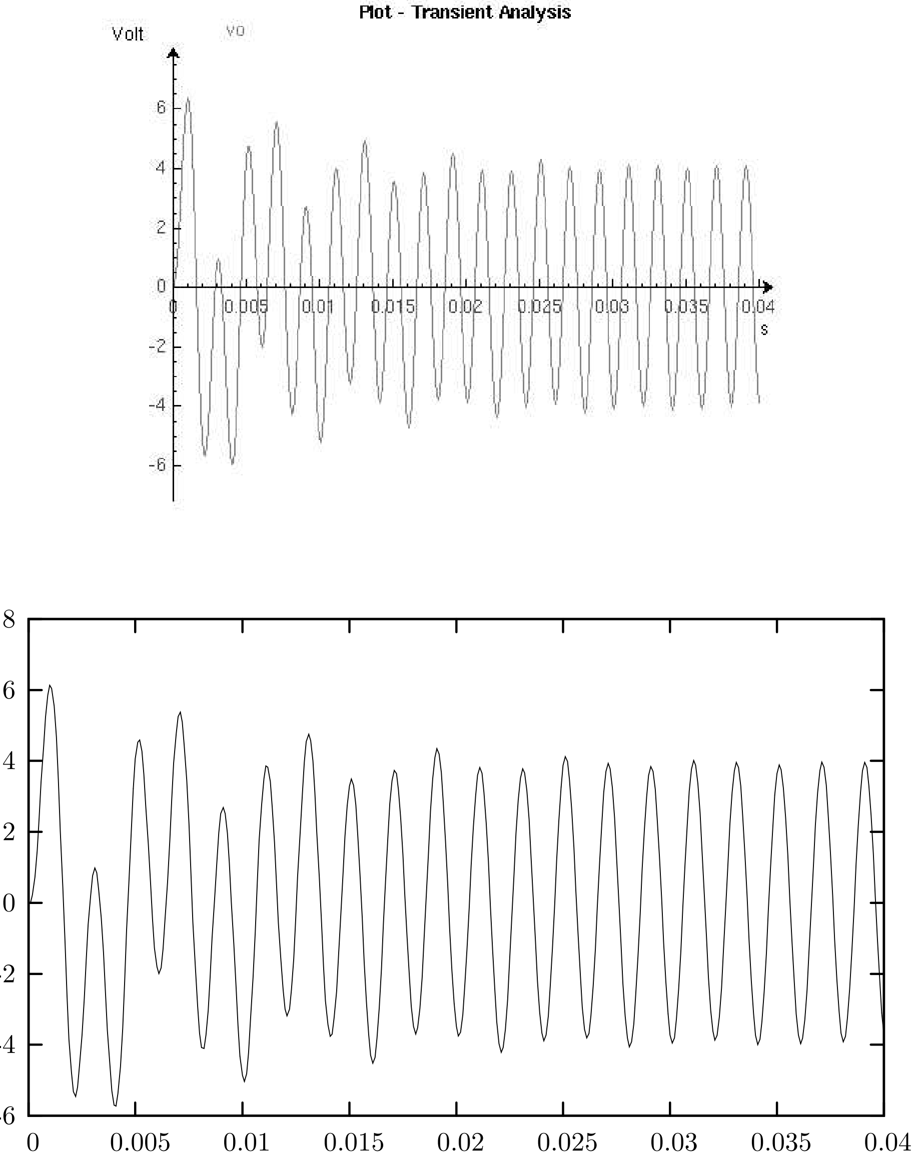
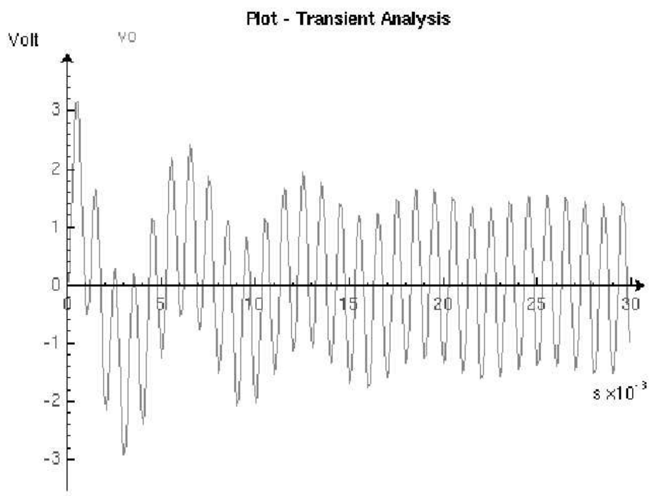


Figura 4.9: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 500Hz, simulada con **spice** y con **octave**



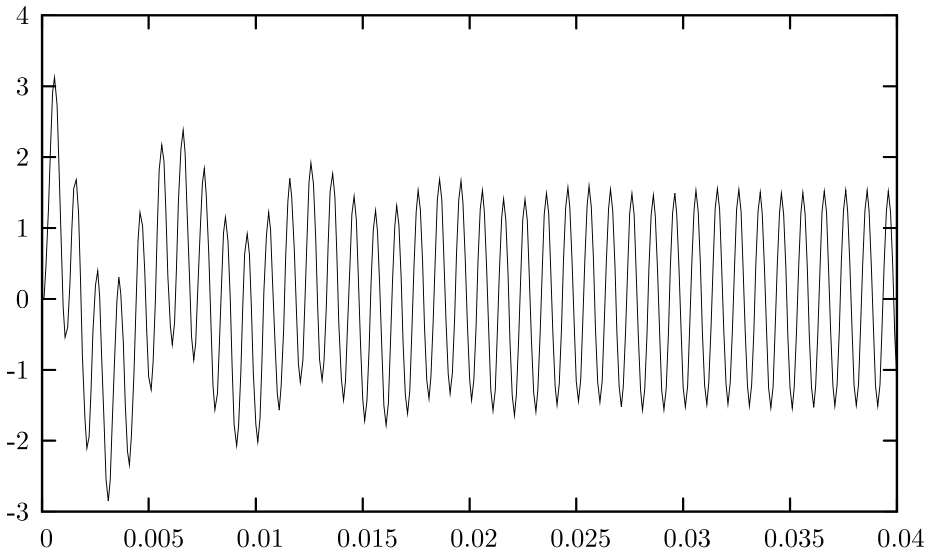


Figura 4.10: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 1kHz, simulada con **spice** y con **octave**

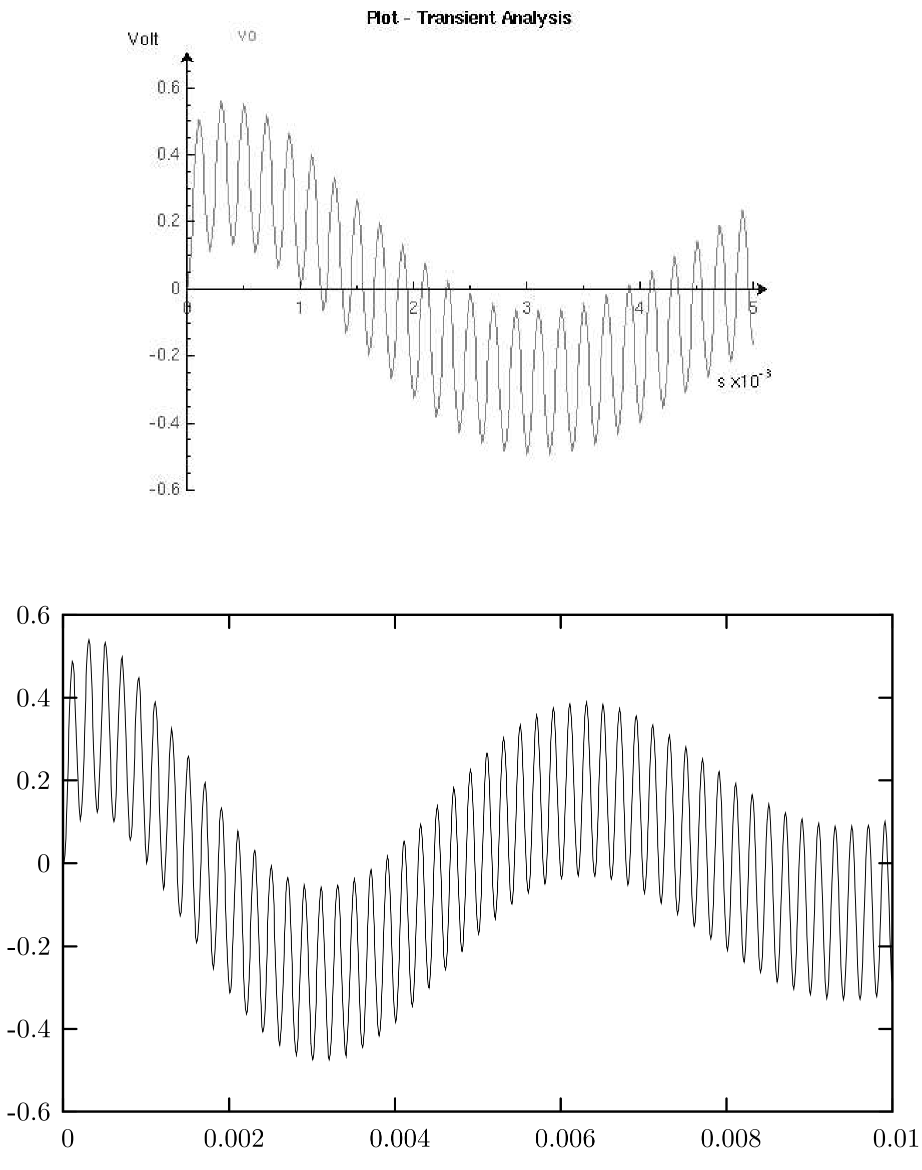
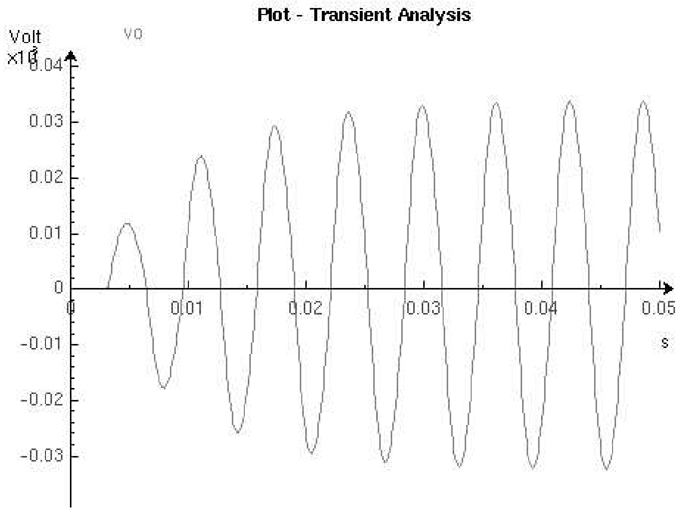


Figura 4.11: Respuesta a una onda senoidal con una frecuencia de 5kHz, simulada con **spice** y con **octave**

4.4. Respuesta a una onda cuadrada

La respuesta del circuito a la onda cuadrada varía apreciablemente con la frecuencia de la onda aplicada. A bajas frecuencias, la respuesta será similar a la del escalón seguida por la de un escalón invertido. A altas frecuencias, la respuesta será similar a la de una onda senoidal.

La Figura 4.12, ilustra el comportamiento del circuito a la frecuencia de máxima amplificación ($159Hz$).



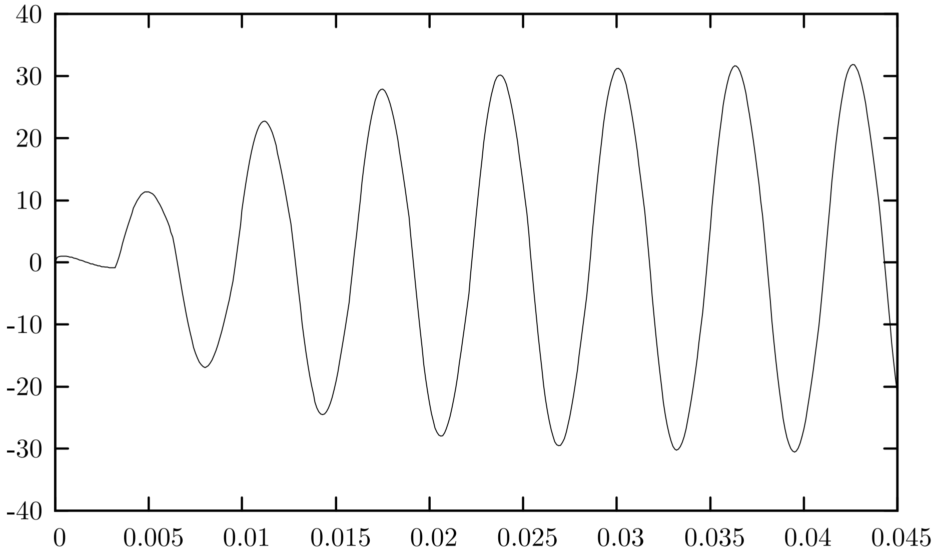


Figura 4.12: Respuesta a la onda cuadrada con frecuencia $159Hz$, simulada con **spice** y con **octave**

En ambos casos se simuló con una onda cuadrada de 1v pico, que comienza en cero, y tiene un ciclo como el ilustrado en la Figura 4.13. El tiempo de crecimiento del flanco, en la simulación con spice es de 10ns.

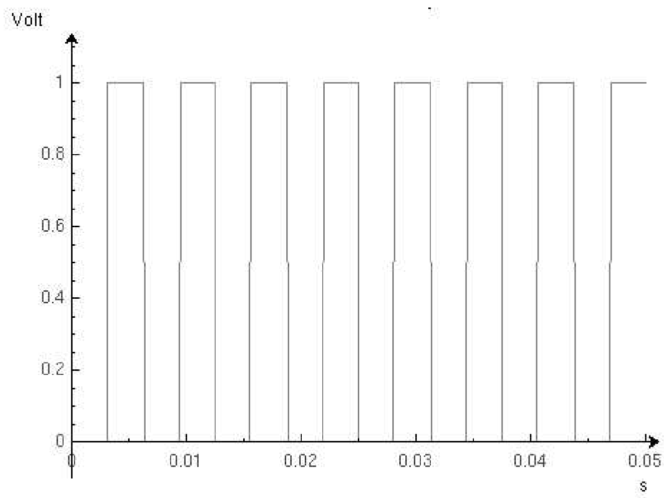


Figura 4.13: Onda cuadrada de 159Hz utilizada en la simulación

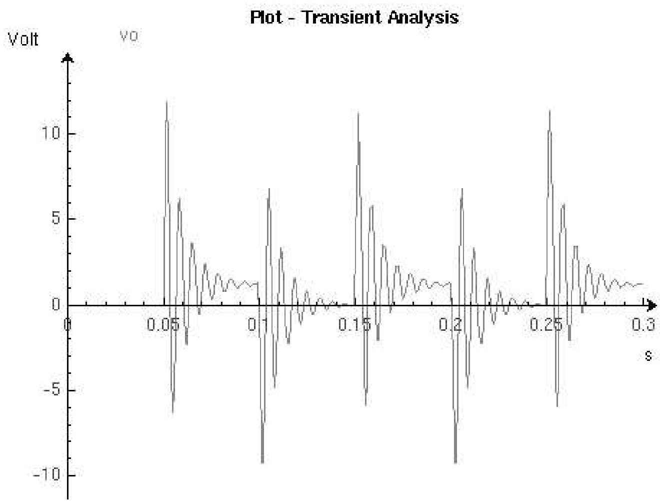
La respuesta observada es muy similar a la de la onda senoidal, llegando a un pico de casi 30v. La diferencia en la amplitud se debe principalmente a que se está utilizando una onda de 1v pico a pico, mientras que la senoidal utilizada era de 1v pico.

Para poder apreciar los diversos comportamientos que tiene el circuito ante las distintas frecuencias que puede tener la onda cuadrada, se realizó esta misma simulación con varias frecuencias adicionales: 10Hz, 50Hz, 100Hz, 200Hz, 1000Hz y 2000Hz.

A bajas frecuencias (10Hz) es posible apreciar como para cada flanco de la onda cuadrada se produce una onda senoidal amortiguada, similar a la de la respuesta al escalón, que es prácticamente independiente de las producidas para los otros flancos.

A medida que la frecuencia de la onda cuadrada aumenta, sin embargo, la salida se va aproximando más a una onda senoidal.

A altas frecuencias (1kHz, 2kHz) nuevamente es posible apreciar la presencia de una onda senoidal amortiguada (de poco más de 100Hz) que envuelve a la onda de alta frecuencia.



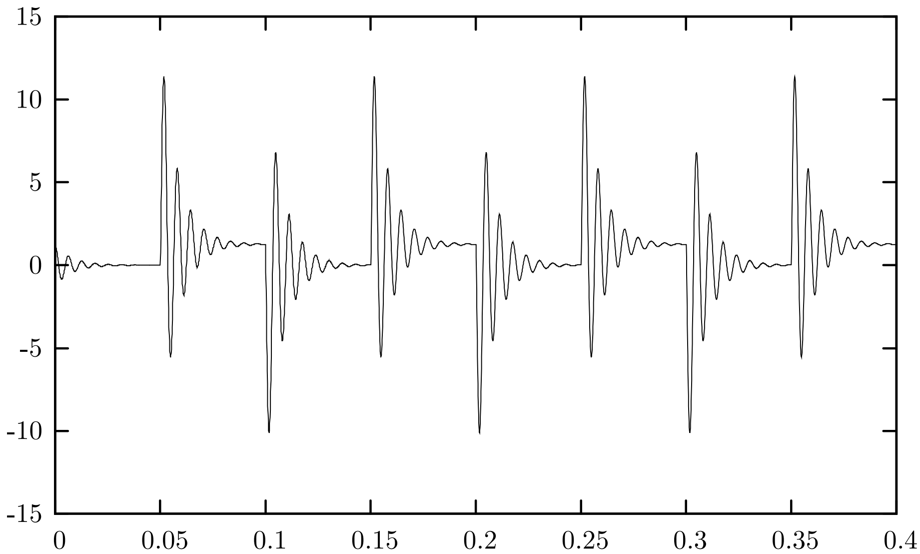
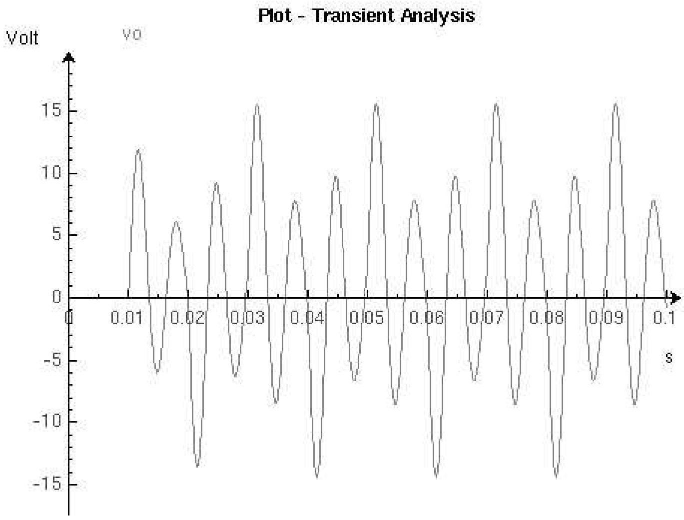


Figura 4.14: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 10Hz, simulada con **spice** y con **octave**



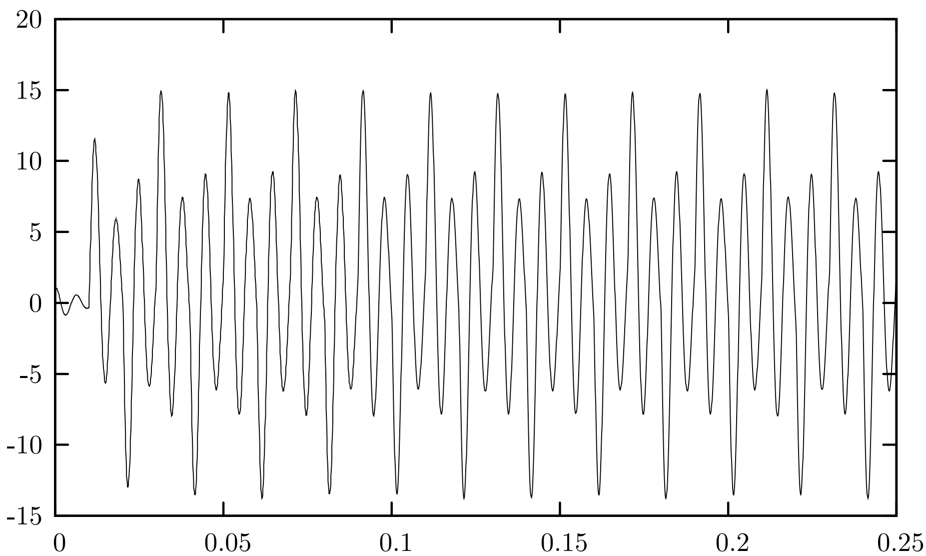


Figura 4.15: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 50Hz, simulada con **spice** y con **octave**

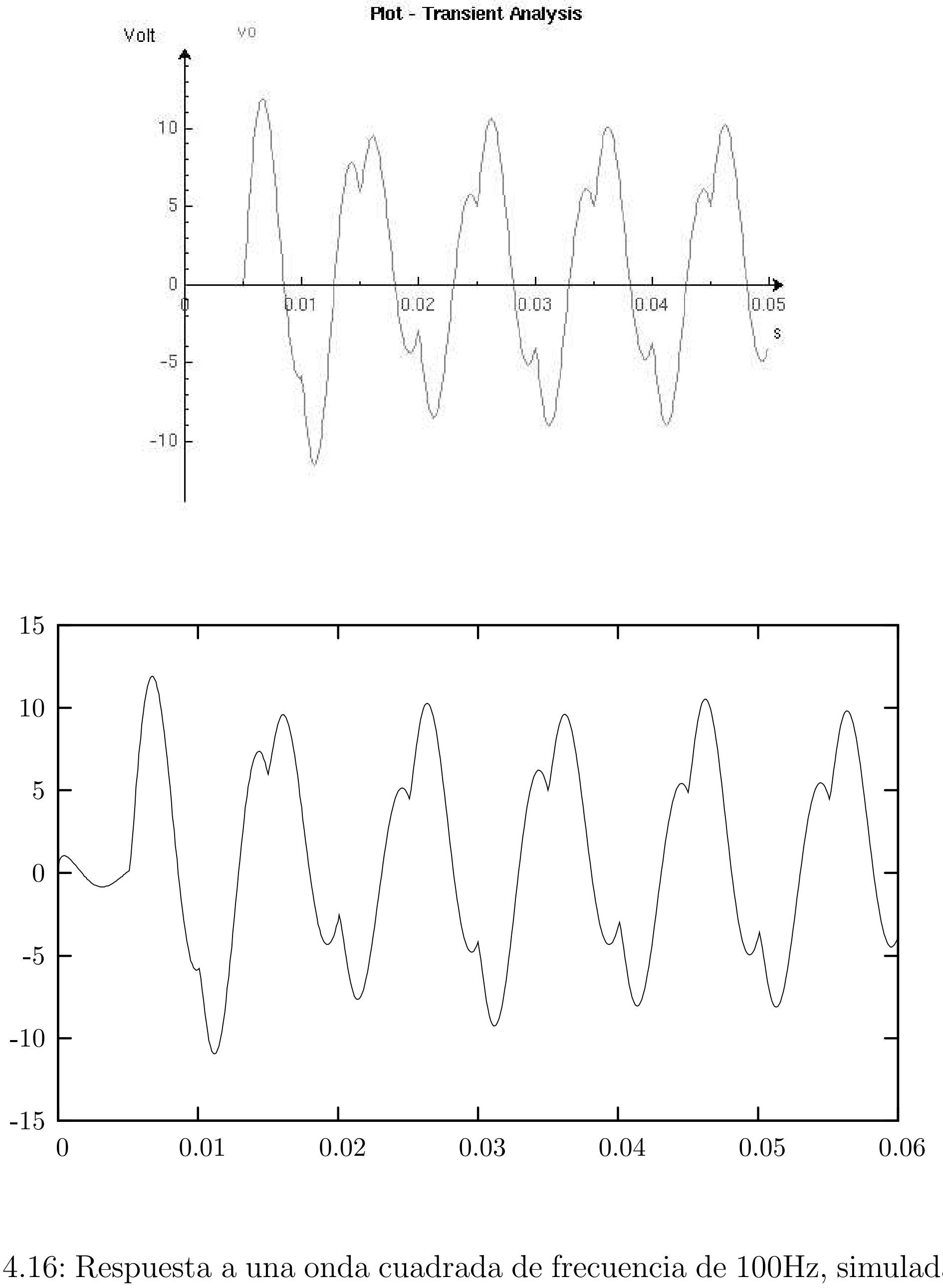
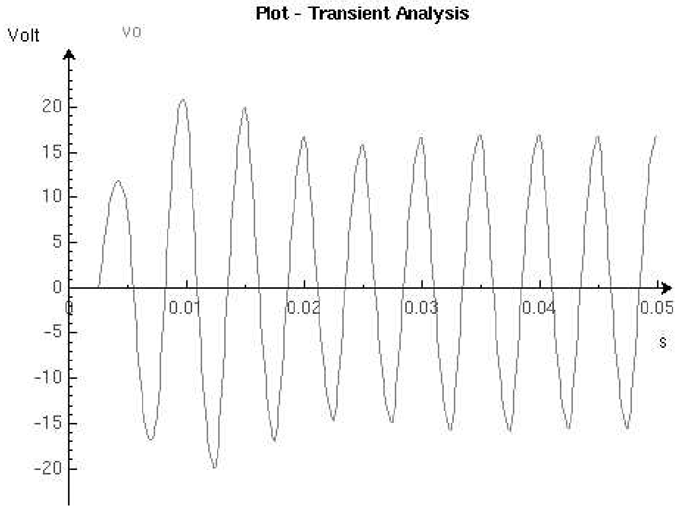


Figura 4.16: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 100Hz, simulada con **spice** y con **octave**



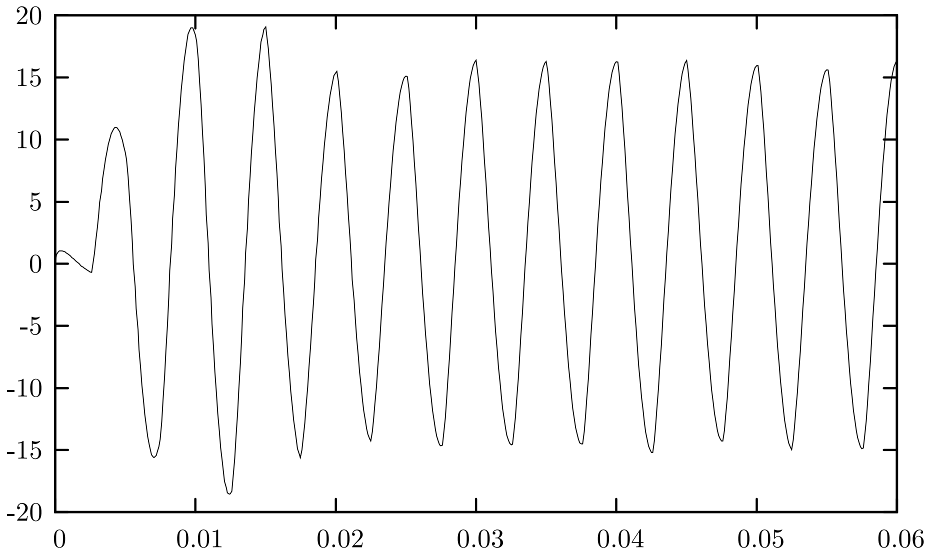
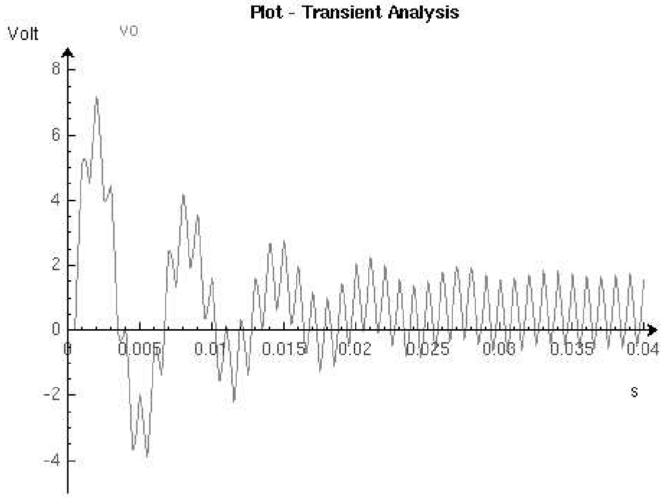


Figura 4.17: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 200Hz, simulada con **spice** y con **octave**



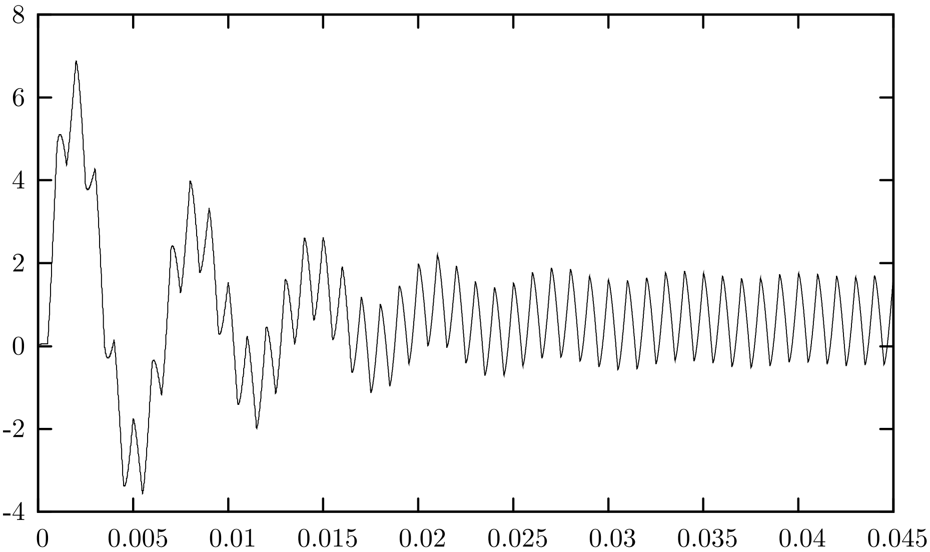


Figura 4.18: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 1kHz, simulada con **spice** y con **octave**

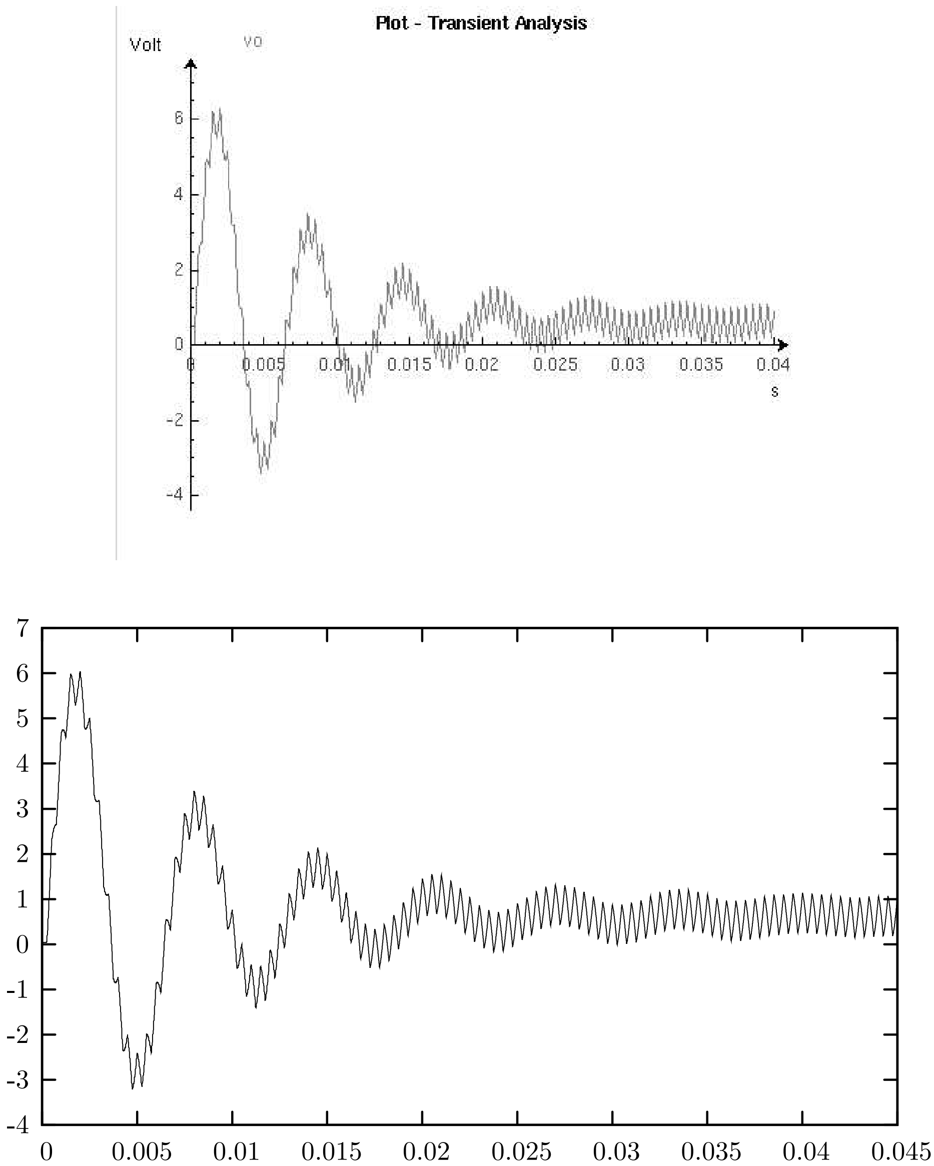


Figura 4.19: Respuesta a una onda cuadrada de frecuencia de 2kHz, simulada con **spice** y con **octave**

5. Implementación del circuito

Para la implementación del circuito es necesario tener en cuenta lo mencionado anteriormente con respecto a los valores de las resistencias, es decir, que los valores comerciales de los resistores no se ajustan a todos los valores utilizados en el circuito, por lo que será necesario reemplazarlos por dos o tres resistores en serie, obteniendo una resistencia total que se puede alejar un poco de la resistencia ideal.

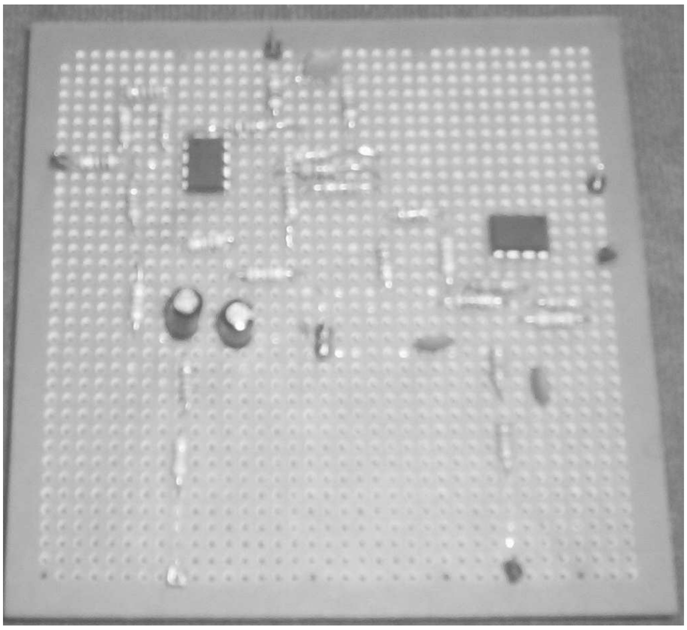


Figura 5.1: Fotografía del circuito armado

En la Figura 5.1 puede verse una fotografía del circuito armado sobre una plaqueta de experimentación. Mientras que en la Figura 5.2 puede verse el diagrama del circuito con los valores de las sumas de las resistencias utilizadas en el circuito.

Si bien se puede ver que los valores no son los mismos, la transferencia obtenida al utilizar estos valores en la simulación con **spice** es muy similar a la de los valores exactos, de manera que se puede considerar que los valores están dentro del rango aceptable de tolerancia.

5.1. Componentes utilizados

Para el amplificador operacional se utilizó un amplificador tl082, que tiene un rango importante en la tensión de entrada (12 a 36v), necesarios para que se puedan amplificar los 34dB a frecuencia máxima.

Se utilizaron resistores de 10kΩ, 8.2kΩ, 1.2kΩ, 1kΩ, 560Ω, 330Ω y 220Ω. Y capacitores de 1μF y 100nF.

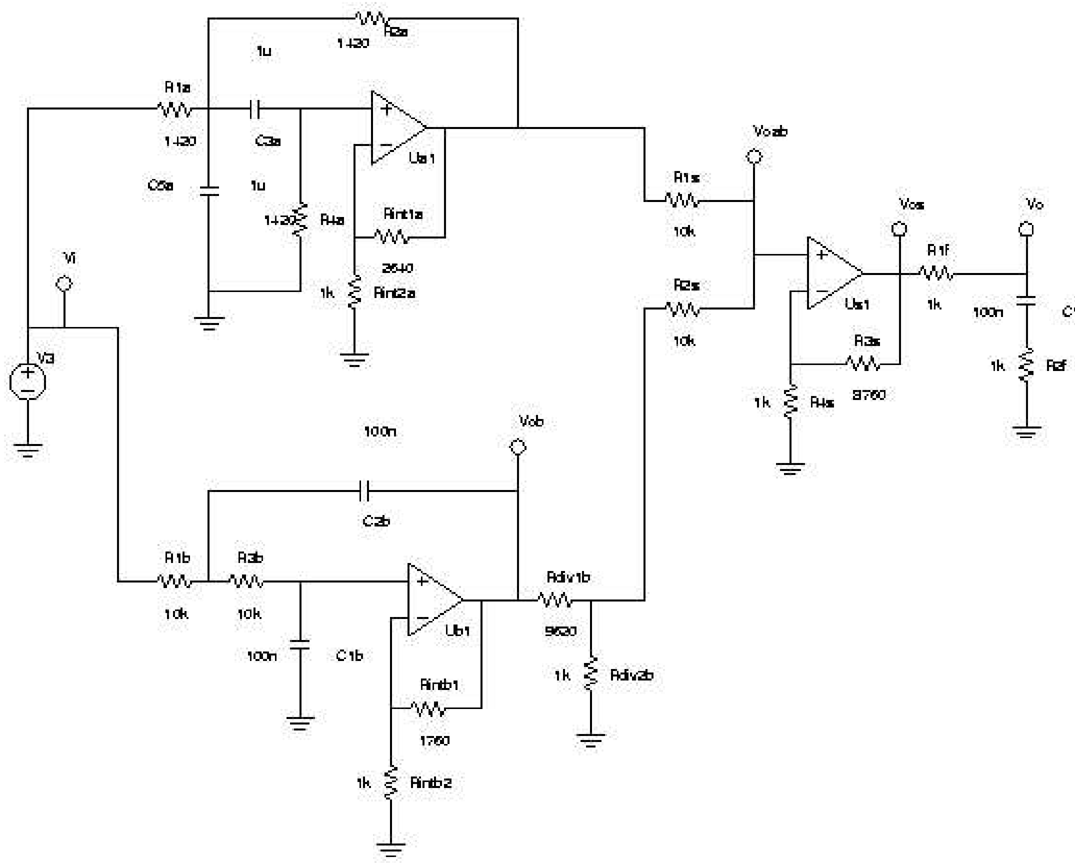


Figura 5.2: Circuito con los valores reales de los resistores

5.2. Problemas a tener en cuenta

Es importante tener en cuenta que la tensión que se le utilice como entrada del circuito debe tener una amplitud lo suficientemente pequeña como para no saturar el circuito.

Con una entrada de 1V de amplitud, por ejemplo, la alimentación de los amplificadores no será suficiente para obtener la salida esperada (50V).

Utilizando una entrada de 50mV pico a pico, la salida para la frecuencia de máxima amplificación deberá ser de 2,5V pico a pico. Este es un valor un poco más razonable, y sin embargo el circuito sigue saturando.

Es recomendable, entonces, utilizar tensiones aún menores a este valor, de manera que los amplificadores operacionales no saturen la salida, pero teniendo cuidado de que no se introduzca ruido externo.

6. Conclusiones

La ecuación de transferencia pedida en el enunciado (2.3) se cumple con el circuito propuesto. Sin embargo, resulta claro que el circuito es excesivamente complejo, ya que se trata de un pasabanda con dos ceros y tres polos y se están utilizando 5 capacitores, 3 operacionales y un gran número de resistores.

Resulta casi evidente que se debe poder construir un filtro que cumpla con la transferencia pedida, pero que utilice 2 operacionales, 3 capacitores y un número menor de resistores. Un circuito de estas características sería más sencillo de implementar en la práctica y tendría menos posibilidades de error humano.

Sin embargo, no fue posible encontrar el circuito que cumpla con estas características, ya que no se trata de un filtro trivial.

Por otro lado, es tanta la ganancia del circuito en la frecuencia máxima, que la salida del circuito se satura con fácilidad, y ya no se puede observar la salida esperada.