

# Análisis de Circuitos (66.06)

## Trabajo práctico n.1

Rozanec, Matías (97404)

rozanecm@gmail.com



1C 2018

Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires

# Análisis de Circuitos

## Trabajo de Laboratorio N° 1

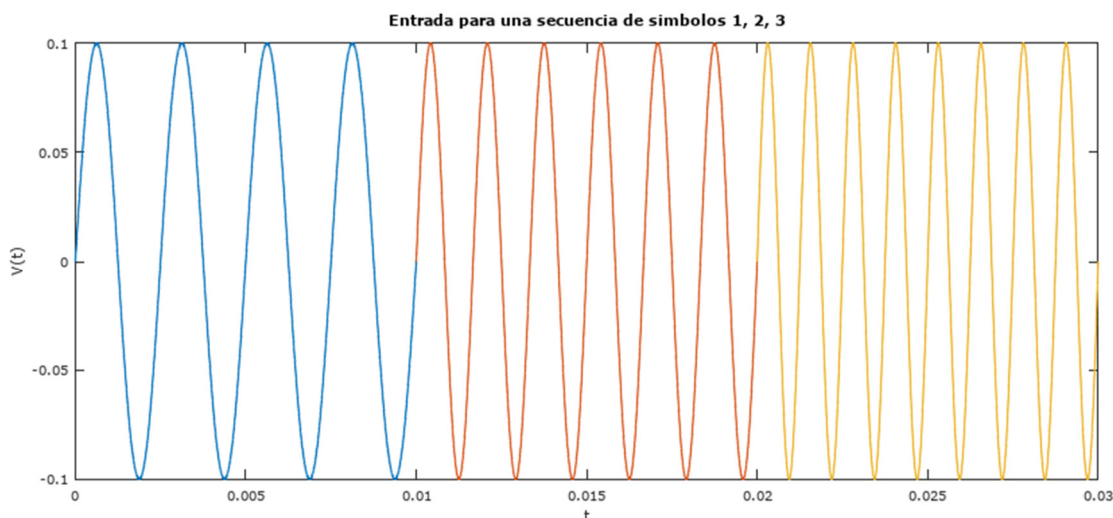
**DESCRIPCIÓN:** Un sistema de comunicaciones digitales utiliza una modulación Multiple Frequency Shift Keying (MFSK) para convertir 3 posibles símbolos digitales en tonos de frecuencias compatibles con las características del canal de comunicaciones. Las tres formas de onda que viajan por el canal son de la forma:

$$\omega_1 = 2 \pi 400\text{Hz}$$

$$S_i(t) = A \cos(\omega_i t + \phi) \quad \text{con} \quad \omega_2 = 2 \pi 600\text{Hz}$$

$$\omega_3 = 2 \pi 800\text{Hz}$$

En todos los casos, la amplitud  $A$  es  $0.1\text{V}$  y la fase inicial  $\phi$  es arbitraria. La duración de cada símbolo en el canal es  $T = 10\text{ms}$ .



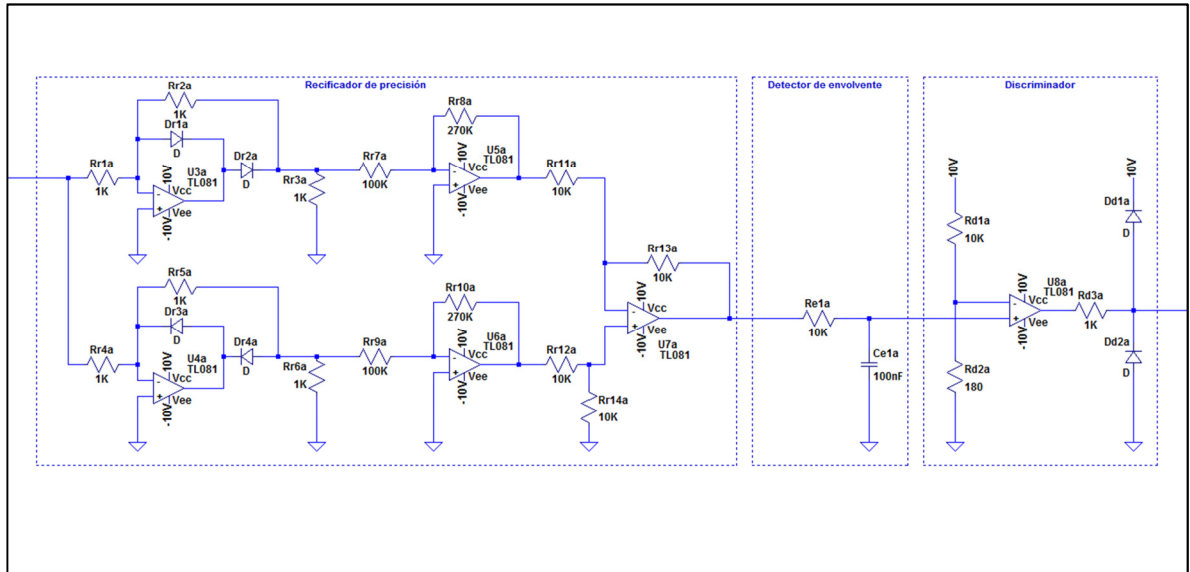
**OBJETIVO:** 1) Se desea diseñar un banco de filtros que formará parte del sistema receptor. El mismo debe generar 3 salidas. Cada una deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Dado que la duración de cada símbolo en el canal es de  $10\text{ms}$ , el tiempo de respuesta de los filtros debe ser menor a  $5\text{ms}$ <sup>1</sup>.
2. La amplitud de salida del filtro  $m$ -ésimo, debe ser mayor o igual a  $0.095\text{V}$  cuando se recibe el símbolo  $m$ -ésimo.
3. La amplitud de salida del filtro  $m$ -ésimo, debe ser menor o igual a  $0.05\text{V}$  cuando no se recibe el símbolo  $m$ -ésimo.

---

<sup>1</sup> Esto permite que el bloque siguiente del sistema pueda muestrear las 3 salidas a intervalos de tiempo regulares y tomar una decisión sobre qué símbolo se recibió.

II) A continuación se puede ver un esquema casi completo del receptor (en el mismo sólo falta el bloque de sincronismo). Hay 3 de estos bloques, cada uno de ellos recibe la señal de un filtro y genera a la salida una señal digital que indica si el tono correspondiente está o no presente.



Utilice al archivo de LTSpice adjunto para cargar y simularlo en su computadora, luego analice los siguientes puntos:

1. Identifique cada uno de los bloques. ¿Qué función cumple cada uno y cómo la lleva a cabo? Analice el funcionamiento de cada etapa graficando las señales de entrada y salida de cada uno.
2. ¿Por qué se utiliza un rectificador con 5 operacionales en lugar del característico puente de diodos?
3. ¿Qué ventaja tiene utilizar un rectificador de onda completa frente a uno de media onda?
4. ¿Por qué los rebotes (pasajes de 0 a 1 y 1 a 0) de las señales de salida de los discriminadores no compromete la correcta identificación de cada uno de los símbolos recibidos?

Defino 3 filtros pasa banda, uno para cada frecuencia. Los valores  $n1$ ,  $n2$ ,  $n3$  indican la cantidad de cada uno de los filtros que habra que usar.  $W_i$  y  $Q_i$  indican la frecuencia central y el ancho de banda de cada filtro respectivamente.

$$n1 := 2$$

$$n2 := 2$$

$$n3 := 2$$

$$h1 := 1$$

$$h2 := 1$$

$$h3 := 1$$

$$W1 := 2\pi 360$$

$$W2 := 2\pi 560$$

$$W3 := 2\pi 800$$

$$Q1 := 1$$

$$Q2 := 1.5$$

$$Q3 := 2$$

$$H1(s) := \left( \frac{h1 \cdot \frac{s \cdot W1}{Q1}}{s^2 + \frac{s \cdot W1}{Q1} + W1^2} \right)^{n1} \quad H2(s) := \left( \frac{h2 \cdot \frac{s \cdot W2}{Q2}}{s^2 + \frac{s \cdot W2}{Q2} + W2^2} \right)^{n2} \quad H3(s) := \left( \frac{h3 \cdot \frac{s \cdot W3}{Q3}}{s^2 + \frac{s \cdot W3}{Q3} + W3^2} \right)^{n3}$$

Evaluamos las especificaciones que pide el enunciado. Segun el enunciado, la amplitud de salida del filtro m-esimo, debe ser mayor o igual a 0.095V cuando se recibe el simbolo i-esimo; y debe ser menor o igual a 0.05V cuando no se recibe el simbolo m-esimo. Esto se traduce en que el modulo de la transferencia debe ser mayor o igual a 0.95 en el caso de la frecuencia deseada, y menor o igual a 0.5 en el resto de los casos.

$$w1 := 2\pi 400$$

$$w2 := 2\pi 600$$

$$w3 := 2\pi 800$$

$$|H1(i \cdot w1)| = 0.957$$

$$|H2(i \cdot w1)| = 0.486$$

$$|H3(i \cdot w1)| = 0.1$$

$$|H1(i \cdot w2)| = 0.468$$

$$|H2(i \cdot w2)| = 0.959$$

$$|H3(i \cdot w2)| = 0.424$$

$$|H1(i \cdot w3)| = 0.242$$

$$|H2(i \cdot w3)| = 0.456$$

$$|H3(i \cdot w3)| = 1$$

Tiempos

$$10 \frac{Q1}{W1} = 4.421 \times 10^{-3}$$

$$10 \frac{Q2}{W2} = 4.263 \times 10^{-3}$$

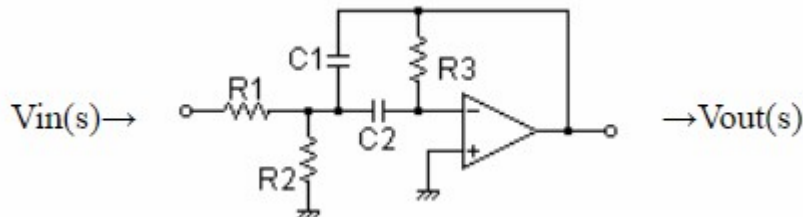
$$10 \frac{Q3}{W3} = 3.979 \times 10^{-3}$$

$$10 \frac{Q1}{W1} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

$$10 \frac{Q2}{W2} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

$$10 \frac{Q3}{W3} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

Busco relacion entre  $h$ ,  $Q$ ,  $W$  y componentes reales, sabiendo que elijo un filtro del tipo infinite gain multi feedback band pass filter.



$$H1n(s, R11, R21, R31, C11, C21) := \left[ \frac{\frac{-1}{R11 \cdot C11} s}{s^2 + s \cdot \left( \frac{1}{R31 \cdot C21} + \frac{1}{R31 \cdot C11} \right) + \frac{1}{R31 \cdot C11 \cdot C21} \cdot \left( \frac{1}{R11} + \frac{1}{R21} \right)} \right]^{n1}$$

$$H2n(s, R12, R22, R32, C12, C22) := \left[ \frac{\frac{-1}{R12 \cdot C12} s}{s^2 + s \cdot \left( \frac{1}{R32 \cdot C22} + \frac{1}{R32 \cdot C12} \right) + \frac{1}{R32 \cdot C12 \cdot C22} \cdot \left( \frac{1}{R12} + \frac{1}{R22} \right)} \right]^{n2}$$

$$H3n(s, R13, R23, R33, C13, C23) := \left[ \frac{\frac{-1}{R13 \cdot C13} s}{s^2 + s \cdot \left( \frac{1}{R33 \cdot C23} + \frac{1}{R33 \cdot C13} \right) + \frac{1}{R33 \cdot C13 \cdot C23} \cdot \left( \frac{1}{R13} + \frac{1}{R23} \right)} \right]^{n3}$$

Busco valores aproximados

**Filtro 1:**

$$C11 := 10^{-9}$$

$$C21 := 10^{-9}$$

Given

$$h1 = \frac{1}{R11 \cdot C11} \cdot \frac{Q1}{W1} \quad \frac{W1}{Q1} = \left( \frac{1}{R31 \cdot C21} + \frac{1}{R31 \cdot C11} \right) \quad W1^2 = \frac{1}{R31 \cdot C11 \cdot C21} \cdot \left( \frac{1}{R11} + \frac{1}{R21} \right)$$

$$\text{Find}(R11, R21, R31) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{12500000}{9 \cdot \pi} \\ \frac{12500000}{9 \cdot \pi} \\ \frac{25000000}{9 \cdot \pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.421 \times 10^5 \\ 4.421 \times 10^5 \\ 8.842 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

**Filtro 2:**

$$C12 := 10^{-9}$$

$$C22 := 10^{-9}$$

Given

$$h2 = \frac{1}{R12 \cdot C12} \cdot \frac{Q2}{W2} \quad \frac{W2}{Q2} = \left( \frac{1}{R32 \cdot C22} + \frac{1}{R32 \cdot C12} \right) \quad W2^2 = \frac{1}{R32 \cdot C12 \cdot C22} \cdot \left( \frac{1}{R12} + \frac{1}{R22} \right)$$

$$\text{Find}(R12, R22, R32) \rightarrow \begin{pmatrix} 426307.88328186250652 \\ 121802.25236624643044 \\ 852615.76656372501304 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.263 \times 10^5 \\ 1.218 \times 10^5 \\ 8.526 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

**Filtro 3:**

$$C13 := 10^{-9}$$

$$C23 := 10^{-9}$$

Given

$$h3 = \frac{1}{R13 \cdot C13} \cdot \frac{Q3}{W3} \quad \frac{W3}{Q3} = \left( \frac{1}{R33 \cdot C23} + \frac{1}{R33 \cdot C13} \right) \quad W3^2 = \frac{1}{R33 \cdot C13 \cdot C23} \cdot \left( \frac{1}{R13} + \frac{1}{R23} \right)$$

$$\text{Find}(R13, R23, R33) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1250000}{\pi} \\ \frac{1250000}{7 \cdot \pi} \\ \frac{2500000}{\pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.979 \times 10^5 \\ 5.684 \times 10^4 \\ 7.958 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

Busco valores reales para los componentes, considerando que:

4k7 <= resistencias <= 2M2      -> E96 -> 1%  
 1n <= capacitores <= 470m      -> E12 -> 5%

### Filtro 1

$$R11 := 442 \cdot 10^3$$

$$R21 := 442 \cdot 10^3$$

$$R31 := 887 \cdot 10^3$$

$$4.7 \cdot 10^3 < R11 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R21 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R31 < 2.2 \cdot 10^6 = 1$$

$$|H1n(i \cdot w1, R11, R21, R31, C11, C21)| = 0.963 \quad |H1n(i \cdot w1, R11, R21, R31, C11, C21)| \geq 0.95 = 1$$

$$|H1n(i \cdot w2, R11, R21, R31, C11, C21)| = 0.469 \quad |H1n(i \cdot w2, R11, R21, R31, C11, C21)| \leq 0.5 = 1$$

$$|H1n(i \cdot w3, R11, R21, R31, C11, C21)| = 0.242 \quad |H1n(i \cdot w3, R11, R21, R31, C11, C21)| \leq 0.5 = 1$$

Tiempos

$$10 \left( \frac{1}{R31 \cdot C21} + \frac{1}{R31 \cdot C11} \right)^{-1} = 4.435 \times 10^{-3} \quad 10 \left( \frac{1}{R31 \cdot C21} + \frac{1}{R31 \cdot C11} \right)^{-1} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

### Filtro 2

$$R12 := 422 \cdot 10^3$$

$$R22 := 121 \cdot 10^3$$

$$R32 := 845 \cdot 10^3$$

$$4.7 \cdot 10^3 < R12 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R22 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R32 < 2.2 \cdot 10^6 = 1$$

$$|H2n(i \cdot w1, R12, R22, R32, C12, C22)| = 0.475 \quad |H2n(i \cdot w1, R12, R22, R32, C12, C22)| \leq 0.5 = 1$$

$$|H2n(i \cdot w2, R12, R22, R32, C12, C22)| = 0.97 \quad |H2n(i \cdot w2, R12, R22, R32, C12, C22)| \geq 0.95 = 1$$

$$|H2n(i \cdot w3, R12, R22, R32, C12, C22)| = 0.469 \quad |H2n(i \cdot w3, R12, R22, R32, C12, C22)| \leq 0.5 = 1$$

Tiempos

$$10 \left( \frac{1}{R32 \cdot C22} + \frac{1}{R32 \cdot C12} \right)^{-1} = 4.225 \times 10^{-3} \quad 10 \left( \frac{1}{R32 \cdot C22} + \frac{1}{R32 \cdot C12} \right)^{-1} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

### Filtro 3

$$R13 := 392 \cdot 10^3$$

$$R23 := 56.2 \cdot 10^3$$

$$R33 := 806 \cdot 10^3$$

$$4.7 \cdot 10^3 < R13 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R23 < 2.2 \cdot 10^6 = 1 \quad 4.7 \cdot 10^3 < R33 < 2.2 \cdot 10^6 = 1$$

$$|H3n(i \cdot w1, R13, R23, R33, C13, C23)| = 0.104 \quad |H3n(i \cdot w1, R13, R23, R33, C13, C23)| \leq 0.5 = 1$$

$$|H3n(i \cdot w2, R13, R23, R33, C13, C23)| = 0.442 \quad |H3n(i \cdot w2, R13, R23, R33, C13, C23)| \leq 0.5 = 1$$

$$|H3n(i \cdot w3, R13, R23, R33, C13, C23)| = 1.057 \quad |H3n(i \cdot w3, R13, R23, R33, C13, C23)| \geq 0.95 = 1$$

Tiempos

$$10 \left( \frac{1}{R33 \cdot C23} + \frac{1}{R33 \cdot C13} \right)^{-1} = 4.03 \times 10^{-3} \quad 10 \left( \frac{1}{R33 \cdot C23} + \frac{1}{R33 \cdot C13} \right)^{-1} < 5 \cdot 10^{-3} = 1$$

Diagramas

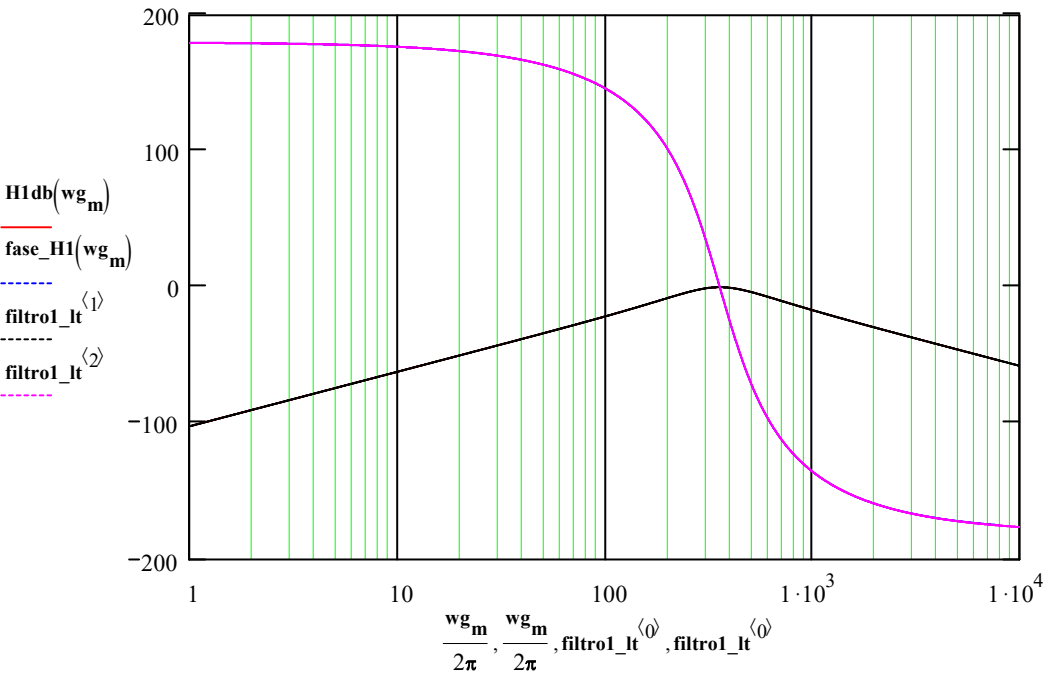
$Mg := 1000$        $m := 0.. Mg$        $wi := 2\pi \cdot 1$        $wf := 2\pi 8000$        $wg_m := wi \cdot \left(\frac{wf}{wi}\right)^{\frac{m}{Mg}}$

Filtro 1

$H1db(w) := 20 \cdot \log(|H1n(i \cdot w, R11, R21, R31, C11, C21)|)$   
 $fase\_H1(w) := \arg(H1n(i \cdot w, R11, R21, R31, C11, C21)) \cdot \frac{180}{\pi}$

Importo los datos de los gráficos de LTSpice. En todos los casos se conservan 15 decimales pues a partir de ahí, si se siguen agregando decimales, los mismos tienen valor nulo.

`filtro1_lt :=  
    ..\filtro1v2.tx`

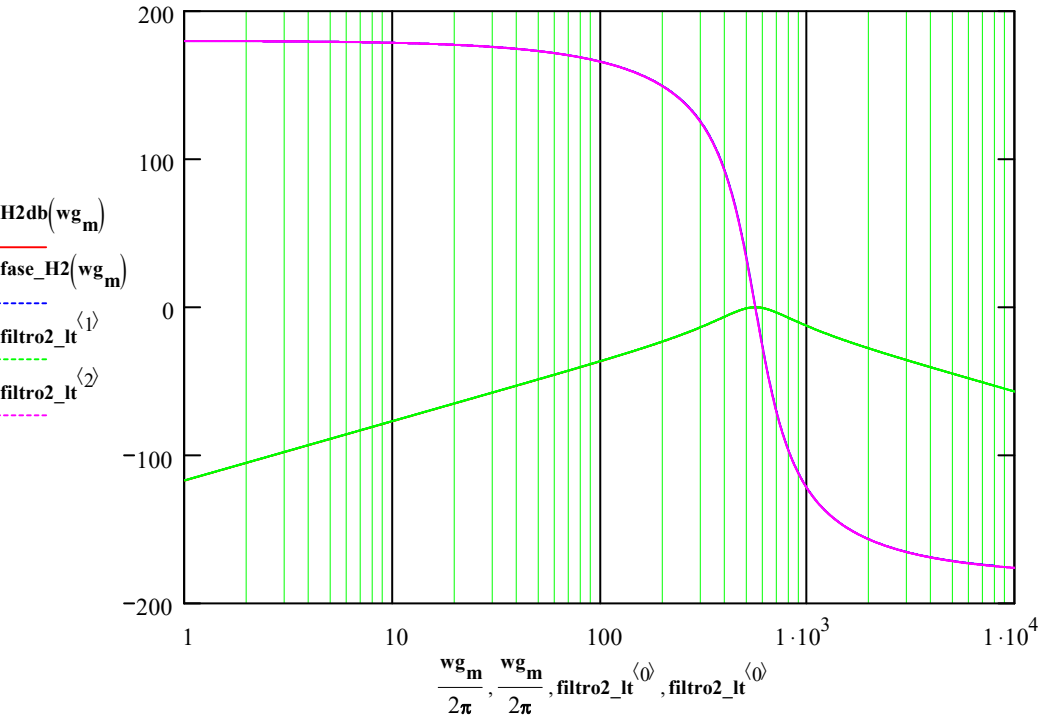


**Filtro 2**

$$H2db(w) := 20 \cdot \log(|H2n(i \cdot w, R12, R22, R32, C12, C22)|)$$
$$fase\_H2(w) := \arg(H2n(i \cdot w, R12, R22, R32, C12, C22)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$filtro2\_lt := \dots$$

..\filtro2v2.tx

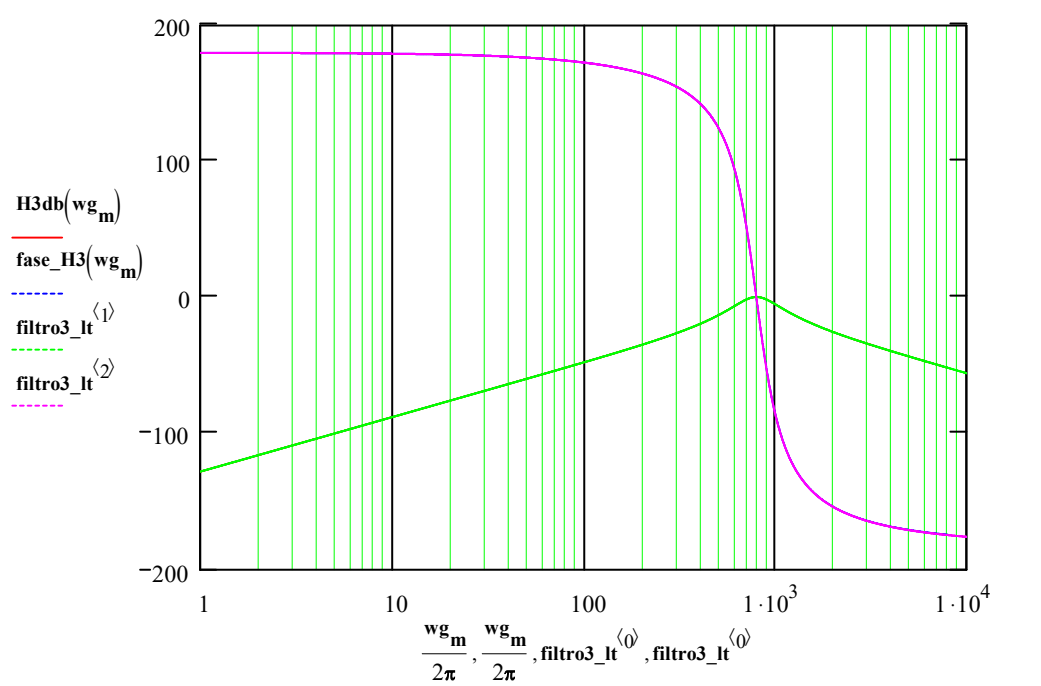


**Filtro 3**

$$H3db(w) := 20 \cdot \log(|H3n(i \cdot w, R13, R23, R33, C13, C23)|)$$
$$fase\_H3(w) := \arg(H3n(i \cdot w, R13, R23, R33, C13, C23)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$filtro3\_lt := \dots$$

..\filtro3v2.tx

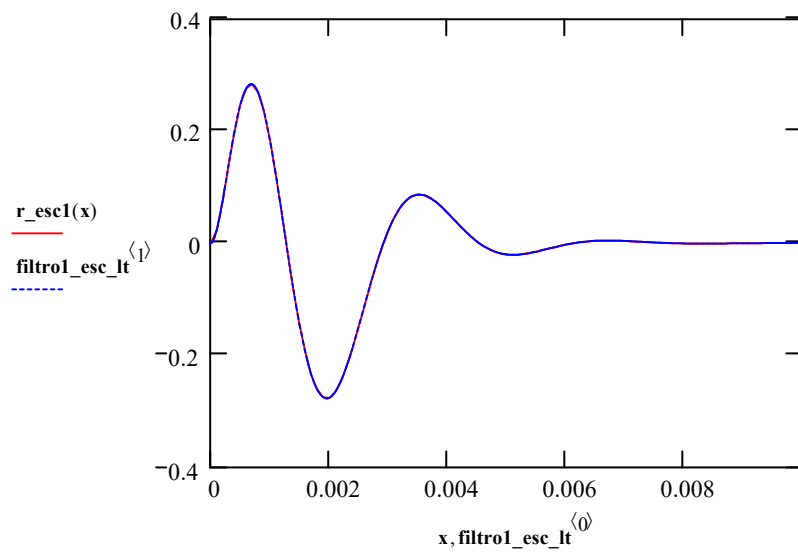




$$\mathbf{x} := 0, 10^{-4} \dots 10 \cdot 10^{-3} \qquad \mathbf{wsen} := 2 \cdot \pi \cdot 440$$
$$\mathbf{H1n(s)} := \mathbf{H1n(s, R11, R21, R31, C11, C21)}$$

```
filtro1_esc_lt :=
    ..\filtro1_esc_v2.tx
```

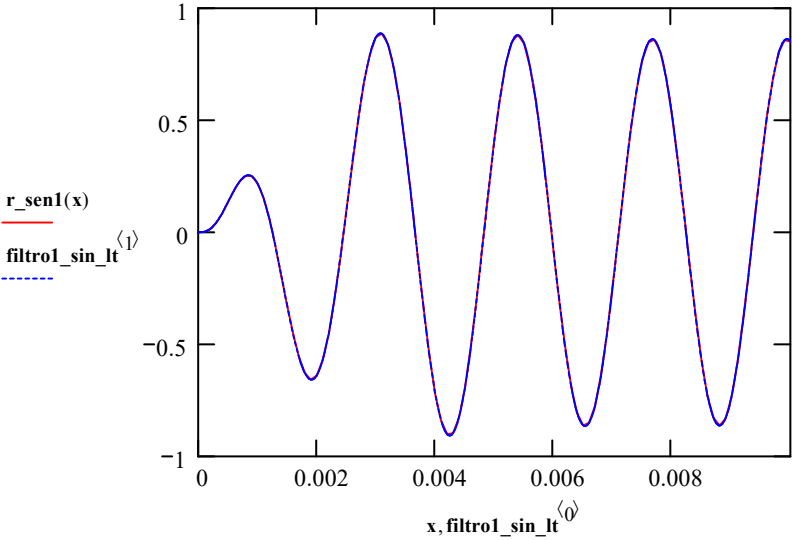
$$\mathbf{r\_esc1(t)} := \frac{1}{s} \mathbf{H1n(s)} \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{-887}{261402336} \cdot \exp\left(\frac{-1000000}{887} \cdot t\right) \cdot 12866820226^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\left(\frac{3000000}{173875949} \cdot 12\right)$$



Seno

```
filtro1_sin_lt :=  
    ..\filtro1_sin_v2.tx
```

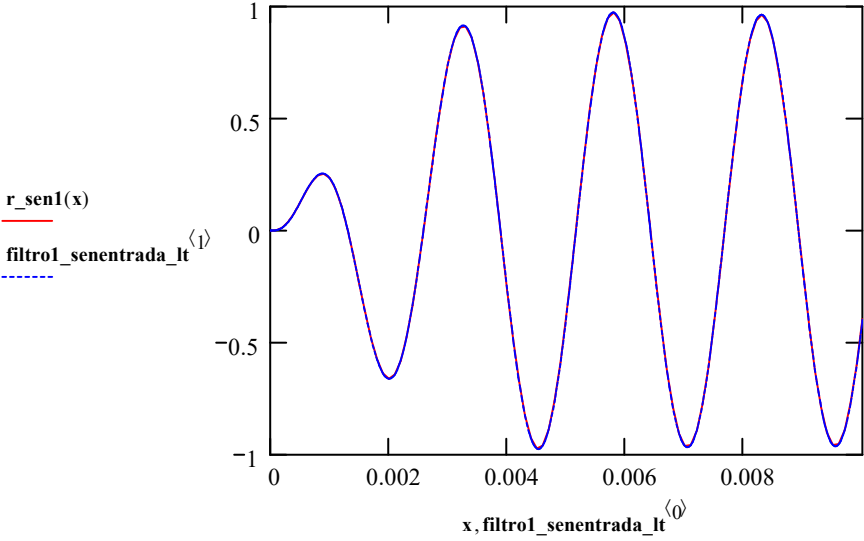
$$r\_sen1(t) := \frac{wsen}{s^2 + wsen^2} H1n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{2200000000000000}{48841} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{-609327}{256 \cdot (2441406250000000 - 371)} \right]$$



Senal de entrada

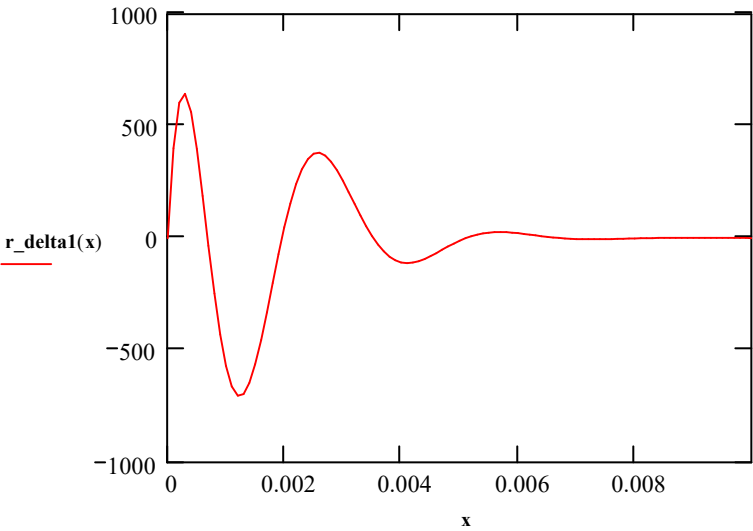
```
filtro1_senentrada_lt :=  
    ..\filtro1_senentrada_v2.tx
```

$$r\_sen1(t) := \frac{w1}{s^2 + w1^2} H1n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{2000000000000000}{48841} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{-1664715235}{102400 \cdot (2441406250000 - 307328)} \right]$$



Delta

$$r\_delta1(t) := H1n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{27718750}{1805309883} \cdot \exp\left(\frac{-1000000}{887} \cdot t\right) \cdot 12866820226^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\left(\frac{3000000}{173875949} \cdot t\right) \cdot 1$$



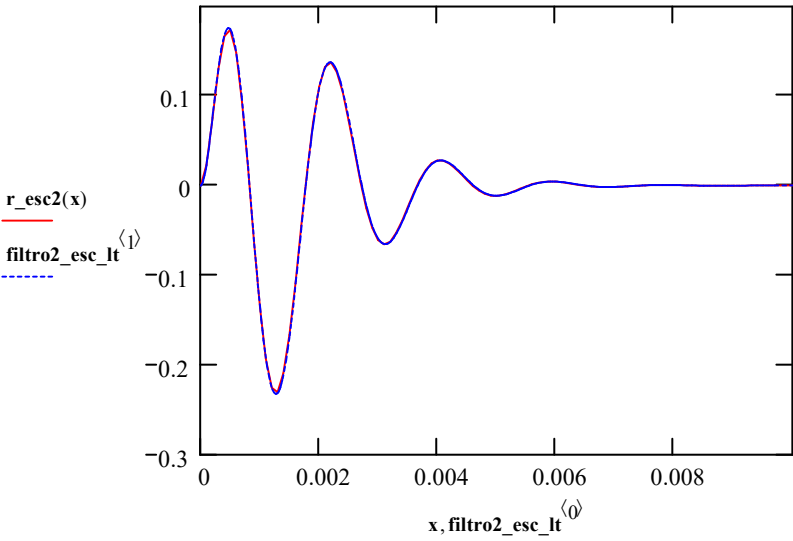
**Filtro 2**

$$H2n(s) := H2n(s, R12, R22, R32, C12, C22)$$

Escalon

$$filtro2\_esc\_lt := \dots \backslash filtro2\_esc\_v2.tx$$

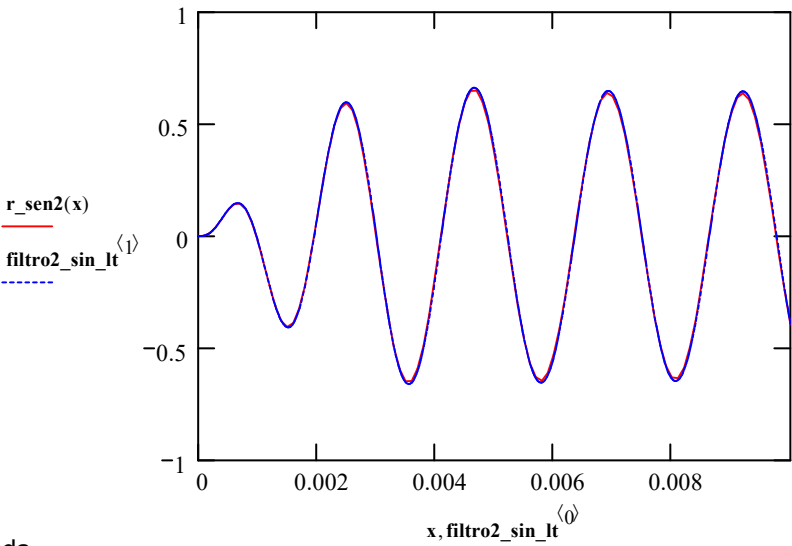
$$r\_esc2(t) := \frac{1}{s} H2n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{-950367275}{140339323682476} \cdot \exp\left(\frac{-200000}{169} \cdot t\right) \cdot 172080206^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\left(\frac{100000}{392249} \cdot t\right) \cdot 17$$



Seno

filtro2\_sin\_lt :=  
..\filtro2\_sin\_v2.tx

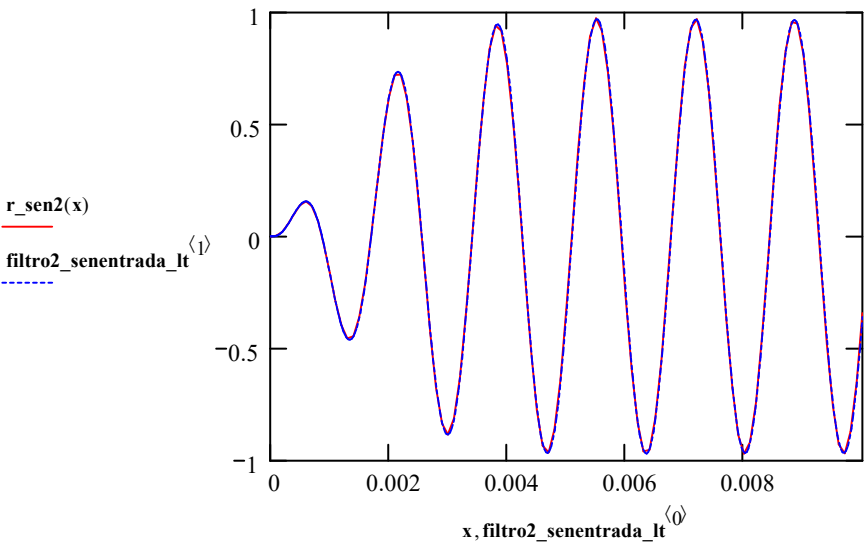
$$r\_sen2(t) := \frac{wsen}{s^2 + wsen^2} H2n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{2200000000000000}{44521} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{110901}{256 \cdot (71984619140625000000 - i)}$$



Senal de entrada

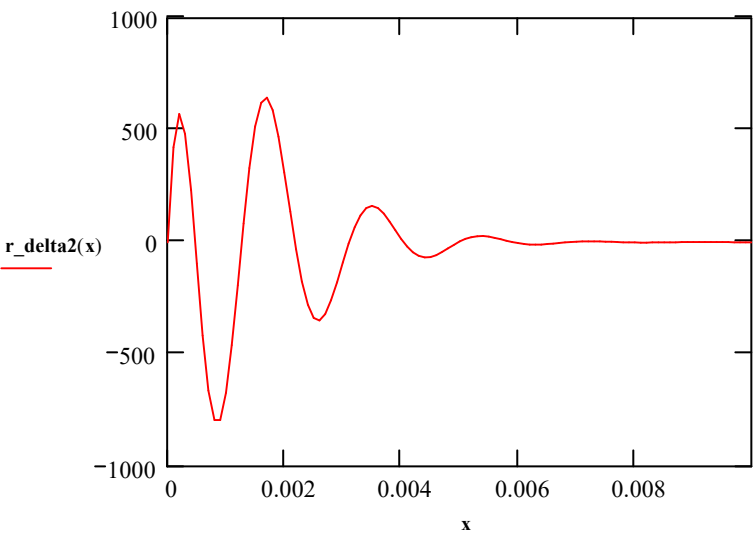
filtro2\_senentrada\_lt :=  
..\filtro2\_senentrada\_v2.tx

$$r\_sen2(t) := \frac{w2}{s^2 + w2^2} H2n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{3000000000000000}{44521} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{-2050838i}{32000 \cdot (12797265625000000 - 227i)}$$



Delta

$$r\_delta2(t) := H2n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow \frac{533108915625000}{7402899324250609} \cdot \exp\left(\frac{-200000}{169} \cdot t\right) \cdot 172080206^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\left(\frac{100000}{392249} \cdot t\right)$$



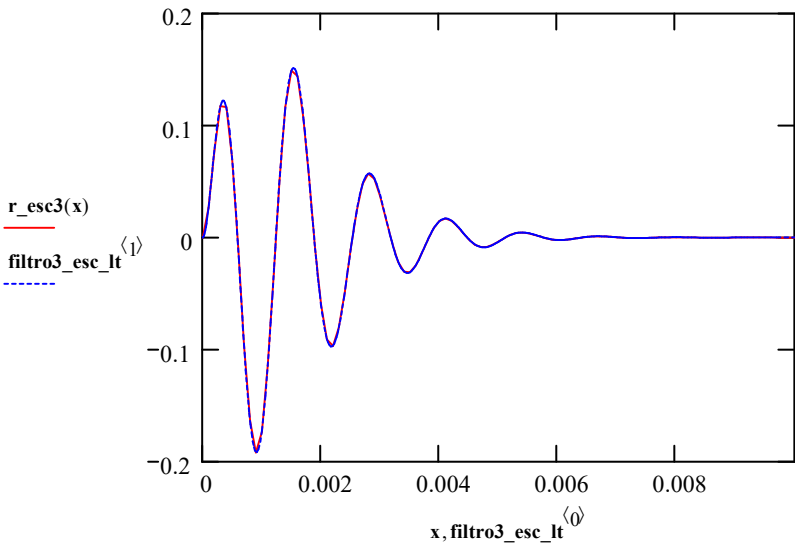
**Filtro 3**

$$H3n(s) := H3n(s, R13, R23, R33, C13, C23)$$

Escalon

$$filtro3\_esc\_lt := \dots \backslash filtro3\_esc\_v2.tx$$

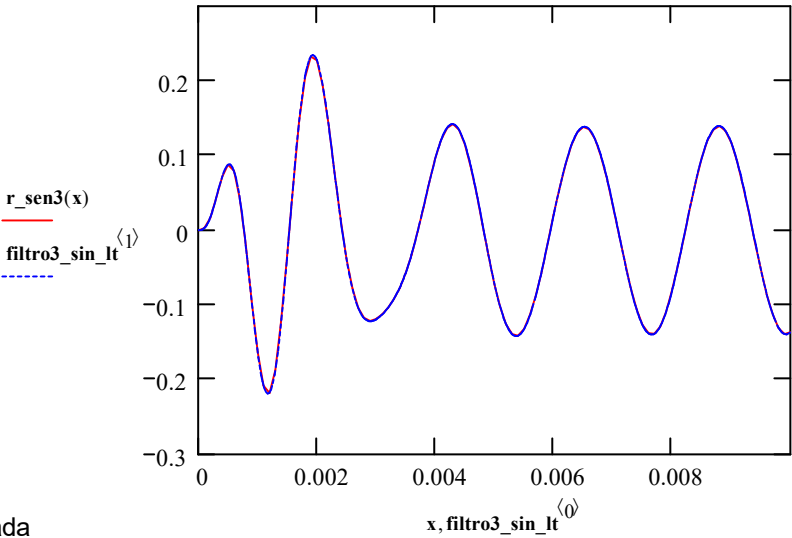
$$r\_esc3(t) := \frac{1}{s} H3n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow -3.4984982222494606709 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-1240.6947890818858561 \cdot t) \cdot$$



Seno

filtro3\_sin\_lt :=  
..\filtro3\_sin\_v2.tx

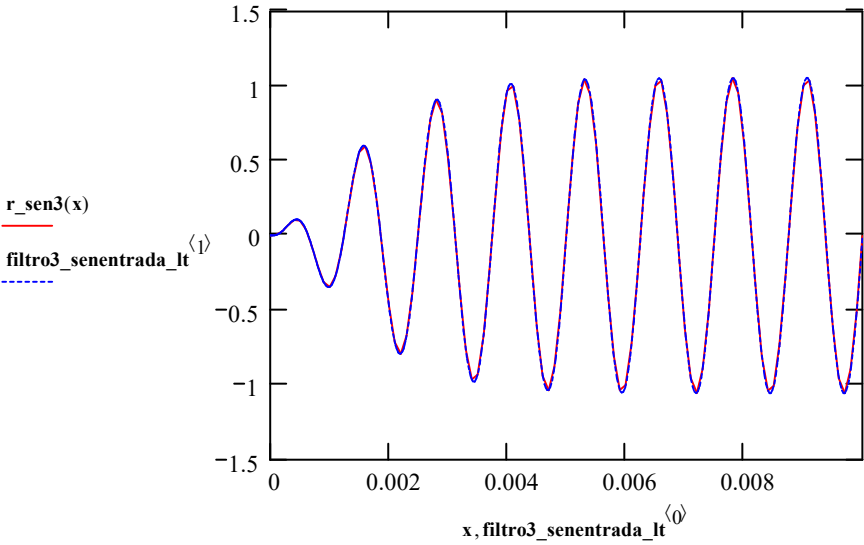
$$r\_sen3(t) := \frac{wsen}{s^2 + wsen^2} H3n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow 9.4353792754856179319 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(2764.6015351590180$$



Señal de entrada

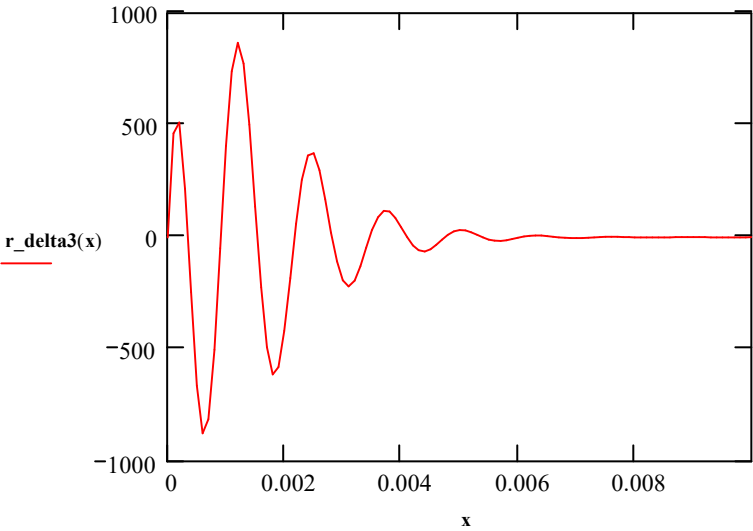
filtro3\_senentrada\_lt :=  
..\filtro3\_senentrada\_v2.tx

$$r\_sen3(t) := \frac{w3}{s^2 + w3^2} H3n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow 1.0568974169925991577 \cdot \sin(5026.5482457436691816 \cdot t) -$$



Delta

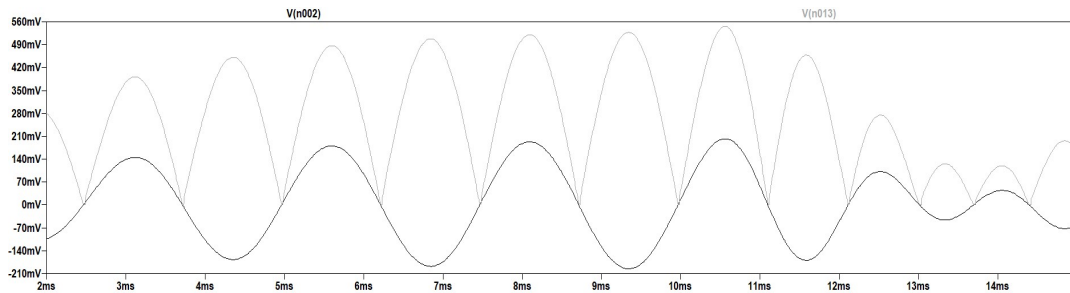
$r\_delta3(t) := H3n(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow 711.75598410024705529 \cdot \exp(-1240.6947890818858561 \cdot t) \cdot \sin(48t)$



## Parte 2

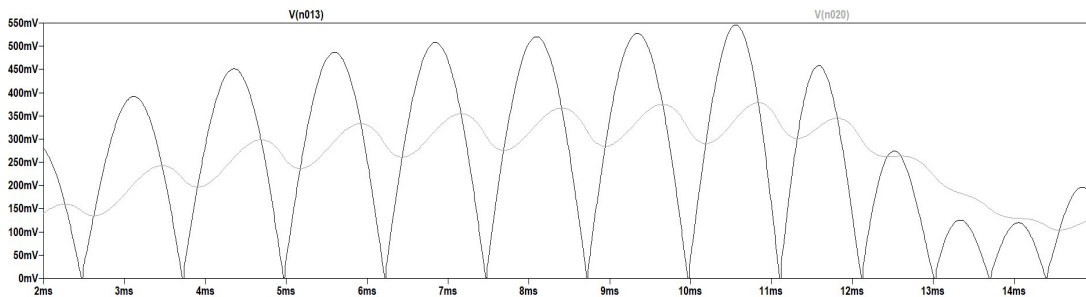
En todos los gráficos presentados, la señal de entrada al bloque en estudio se muestra en color negro, mientras que la de salida se muestra en color gris.

### Rectificador de precisión



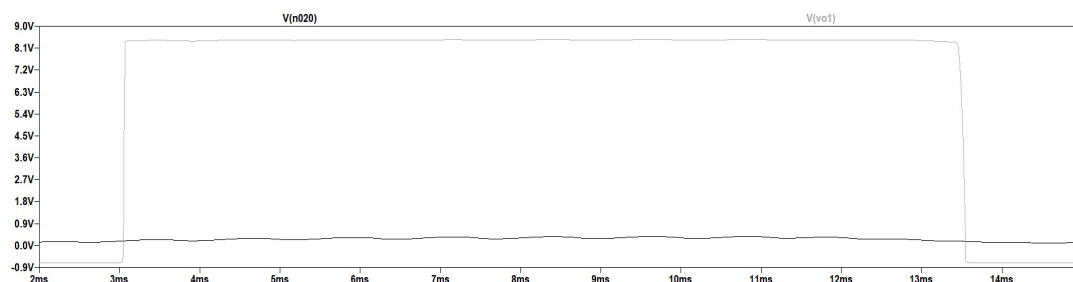
El circuito empleado tiene una forma similar a un puente de diodos, pero se diferencia de este último en que se hace uso de amplificadores operacionales. Esto es necesario ya que el tradicional puente de diodos no sería adecuado para el caso que se presenta, debido a que la señal original es de 0.1V, y los diodos tienen una caída de tensión de 0.4V cada uno, lo que ocasiona un total de una caída de 1.4V.

### Detector de envolvente



El capacitor de este bloque almacena carga cuando la señal de entrada crece, mientras que cuando la señal decrece, el capacitor pierde carga a través de la resistencia.

### Discriminador



Esta última etapa genera una señal en DC, que es el fin último de todo este receptor.



## **Rectificador de media onda vs de onda completa**

En el rectificador de media onda, al trabajar solamente con el semiciclo positivo, se produce una salida con mayor ripple, lo que hace que la rectificación no sea tan buena como se puede lograr con un rectificador de onda completa.

## **Rebotes**

En la última etapa hay un amplificador operacional sin realimentación. El mismo sirve como comparador de tensiones. Si se conecta una de las entradas al amplificador a una tensión de referencia (en este caso 0.1768V, que sale del divisor de tensión de la fuente de 10V y las resistencias de 180 y 10k Ohm respectivamente), en cuanto la tensión de la otra entrada sea similar, el amplificador estará saturado, dando como salida un 1 digital.

## **Conclusiones**

El presente Trabajo práctico sirvió para comprender desde un enfoque práctico la importancia de los diagramas de Bode, viendo cómo se piensan los circuitos en la realidad, cuando hay que pensar un circuito para resolver un problema concreto. Resulta ser de mucha importancia en una materia enfocada en el análisis de circuitos, ya que completa un aprendizaje que de otra forma quedaría inconcluso.

Queda clara la forma de trabajar primero en un plano teórico, pensando de una forma más genérica buscando la transferencia correcta para cada caso presentado, para luego poder pensar en el diseño de un circuito real a partir de esa transferencia. Se ve cómo primero se obtienen unos valores para los componentes, pero también cómo se trabaja trasladando eso a la práctica, donde no se consiguen componentes con los valores que se obtienen de los cálculos matemáticos precisos, y donde cada componente presenta cierto porcentaje de error inherente.