



**Teoría de Control Moderno**  
Guías de Laboratorio

Autores

**Galo Guzmán**

galof.guzman@ucuenca.edu.ec

**Pablo Andrés Barbecho Bautista**

pablo.barbecho@ucuenca.edu.ec

Esta guía presenta una serie de prácticas diseñadas para llevar a cabo durante las horas de APE, con el propósito de reforzar los conocimientos adquiridos en la asignatura. Cada práctica incluye los pasos necesarios para abordar los retos planteados.

Cuenca, Marzo 2024



## Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>Taller 9 - Diagramas de Bode</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivo del taller	1
1.3	Diagramas de bode	1
1.4	Desarrollo del taller	2
1.4.1	Diagrama de Bode en MATLAB	3
1.4.2	Visualizar un diagrama de Bode en LTspice	5
1.5	Actividad en clase	8
1.6	Actividad reto	9

## Taller 9 - Diagramas de Bode

### 1.1 Introducción

El término respuesta a la frecuencia se refiere a la respuesta en estado estacionario de un sistema a una entrada senoidal. Los métodos de respuesta en frecuencia consisten en variar la frecuencia de la señal de entrada dentro de un rango de interés y analizar la señal de respuesta.

Con las pruebas de respuesta en frecuencia es posible determinar de forma experimental las funciones de transferencia de componentes complicados a través de una prueba sencilla. Adicionalmente, los diseños de sistemas de control recurriendo al procedimiento de respuesta en frecuencia incluyen márgenes de estabilidad y robustez.

Esta práctica de laboratorio propone el estudio de la respuesta en frecuencia de filtros: paso bajo, alto y pasa banda.

### 1.2 Objetivo del taller

Analizar de forma práctica la respuesta de los sistemas a señales con diferentes frecuencias. Obtener las gráficas de amplitud y fase en LTspice para circuitos como: filtros pasa banda, bajo y alto.

### 1.3 Diagramas de bode

Un diagrama de Bode o diagrama logarítmico consiste en dos gráficas. La primera es una gráfica del logaritmo de la magnitud de una función de transferencia senoidal; la segunda es una gráfica del ángulo de fase. Ambas se representan contra la frecuencia en escala logarítmica.

La representación habitual o normalizada de la magnitud logarítmica de  $G(j\omega)$  es:  $20\log|G(j\omega)|$ , con 10 como la base de los logaritmos. La unidad utilizada en esta representación es el decibel, abreviado usualmente como dB.

Obsérvese que un número mayor que la unidad tiene un valor positivo en decibels, mientras que un número menor a la unidad tiene un valor negativo. Note también que, cuando se expresa en decibels, el inverso de un número difiere de su valor solamente en signo; esto es para el número  $k$ :

$$20\log k = -20\log(1/k) \quad (1.1)$$

En representación logarítmica, se utiliza la escala logarítmica para la frecuencia y la escala lineal para la magnitud (en decibelios) o para el ángulo de fase (en grados). La representación logarítmica es útil debido a que presenta las características de alta y de baja frecuencia de la función de transferencia en un solo diagrama.

Datos importantes a obtener tras la realización del diagrama de Bode para en análisis de la estabilidad de dicho sistema son los siguientes:

- **Margen de fase:** Es el ángulo que le falta a la fase para llegar a los  $-180^\circ$  cuando la ganancia es de 0dB. Si la ganancia es siempre inferior a 0dB, el margen de fase es infinito. Representa la cantidad de fase adicional que puede agregarse a un sistema de lazo cerrado antes de que el sistema se vuelva inestable.
- **Margen de ganancia:** Es el valor por el que habría que multiplicar (en decimal), o sumar (en dB) a la ganancia para llegar a 0dB cuando la fase es de  $-180^\circ$ . Representa cuánto más puede aumentar la ganancia de un sistema antes de que se vuelva inestable.

El sistema representado será estable si el margen de ganancia y el margen de fase son positivos. La siguiente figura presenta un ejemplo de diagrama de Bode y la definición de los márgenes de ganancia y de fase.

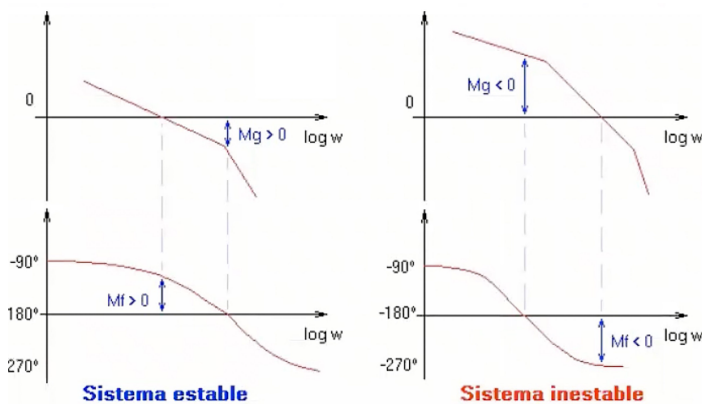


Figure 1.1: Estabilidad de un sistema

## 1.4 Desarrollo del taller

Considere el circuito RLC en serie mostrado en la figura 1.2 para el desarrollo de esta práctica. Con base en las prácticas anteriores, encuentre su función de transferencia y desarrolle los ejercicios propuestos.

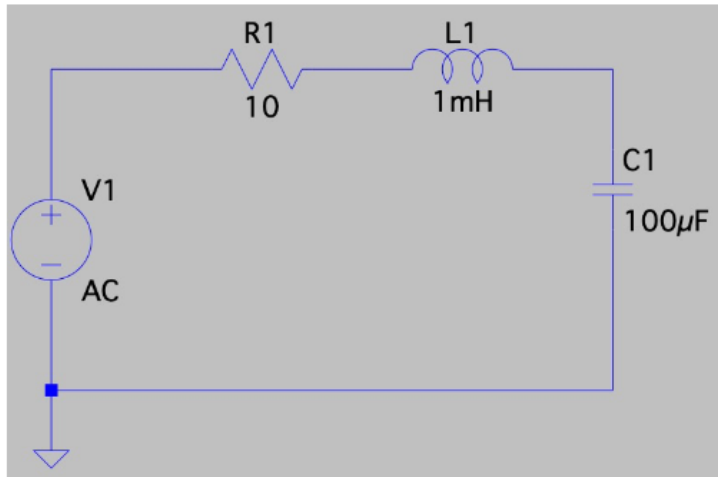


Figure 1.2: Circuito RLC

### 1.4.1 Diagrama de Bode en MATLAB

MATLAB proporciona la función *bode* para generar el diagrama de Bode correspondiente a una función de transferencia. Esta función permite especificar, como parámetro, el rango de frecuencias que se desea analizar; estas frecuencias deberán estar en radianes por segundo y es aconsejable calcular los valores de forma logarítmica. Para esto se puede usar la función *logspace* de la siguiente forma.

```
N = 100;  
w = logspace(1,7,N);  
  
bode(G,w);
```

De esta forma se obtiene un vector de 100 valores entre 10 Hz y 10 MHz, ya que *logspace* recibe como parámetro los exponentes de 10, que en este caso corresponden a las frecuencias. Tras la ejecución del comando, se obtiene el diagrama de Bode mostrado en la figura 1.3.

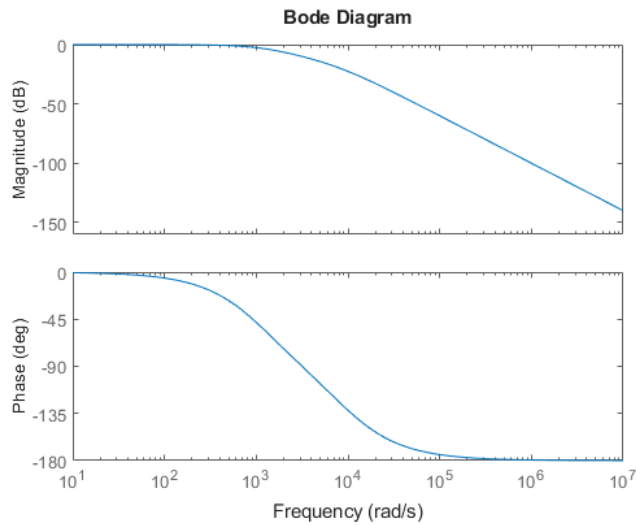


Figure 1.3: Diagrama de Bode resultante de la función *bode*

**Ejercicio 1.1** Investigue cómo realizar el diagrama de Bode de forma manual en MATLAB para obtener el mismo resultado que entrega la función original. Replique la gráfica 1.4 y responda las siguientes preguntas:

- ¿Qué unidad debe tener la magnitud?
- ¿Qué unidad debe tener la fase?
- ¿Qué debería hacer para obtener la gráfica en Hertz?
- ¿Cómo hizo para evaluar la función de transferencia en frecuencia determinada?
- ¿Cómo calculó la magnitud?
- ¿Cómo calculó la fase?

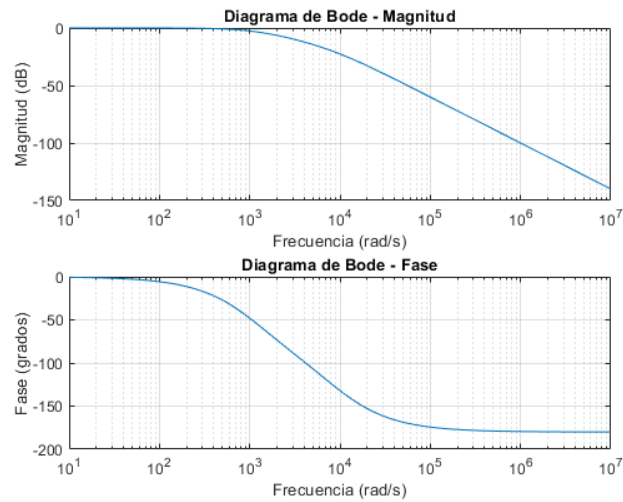


Figure 1.4: Diagrama de Bode graficado manualmente

### 1.4.2 Visualizar un diagrama de Bode en LTspice

Se comenzará creando el circuito de la figura 1.2 en donde, a diferencia de los circuitos creados anteriormente, la fuente de voltaje debe ser del tipo AC.

Para configurar la fuente, dar clic derecho sobre ésta y colocar 1 en el campo AC Amplitude, como se muestra en la figura - Small signal parameters (.AC):

**Edit Voltage Source V1**

Time Domain Function

style: DC Value

DC Value[V]:

Make this information visible on the schematic ☒

Small Signal Parameters(.AC)

AC Amplitude: 1

AC Phase[°]:

Make this information visible on the schematic ☐

Parasitic Impedances

Series Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on the schematic ☐

Figure 1.5: Configuración de la fuente

Para simular el sistema es necesario configurar los parámetros de simulación (directivas de simulación). Al dar clic en el botón RUN, aparecerá la ventana de edición de los comandos de simulación; para este caso, ya que no nos interesa la respuesta transitoria, ir a la pestaña AC Analysis y colocar de la forma que se muestra en la Figura:

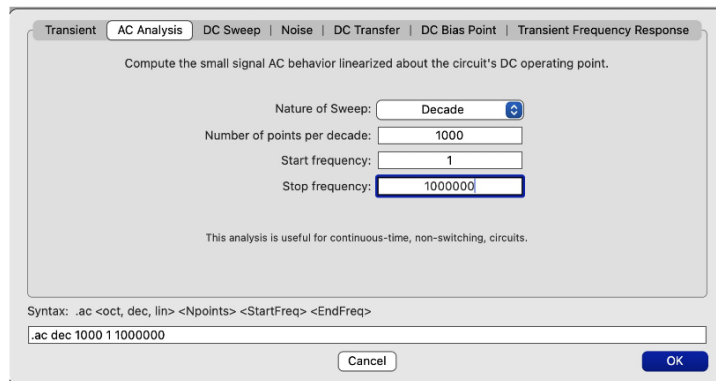


Figure 1.6: Parámetros para el análisis AC

Otra opción para modificar las directivas es pulsar con el botón derecho sobre las directivas y usar la herramienta Analysis Cmd como se muestra en la figura:

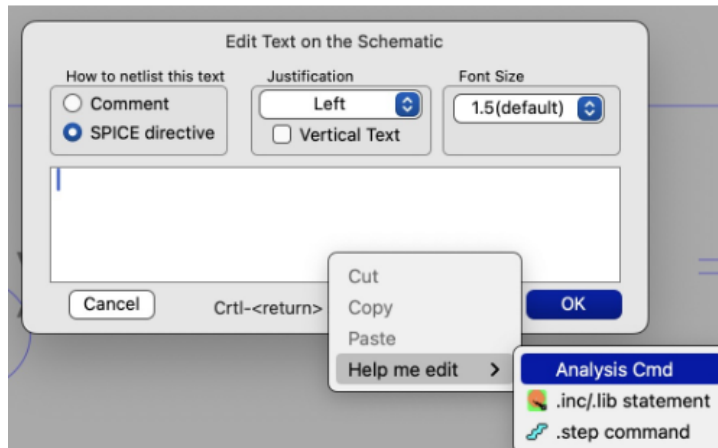


Figure 1.7: Analysis Cmd

Las gráficas obtenidas en la simulación se muestran en la siguiente figura, en donde la gráfica superior representa a la magnitud en dBs cuyo eje y es el de la izquierda, y la siguiente gráfica representa la fase en grados, con su eje y a la derecha.

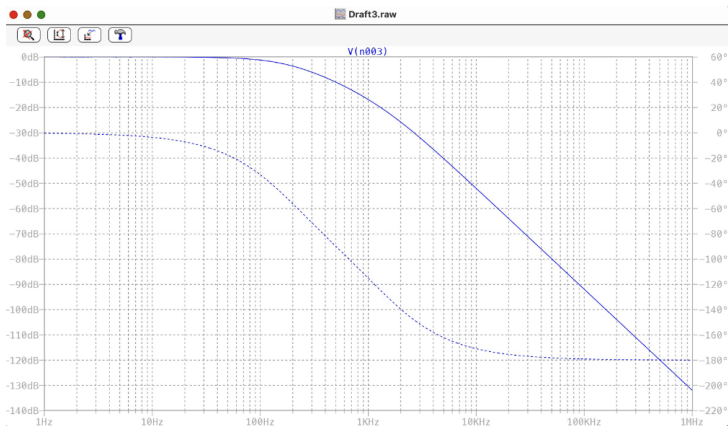


Figure 1.8: Diagrama de Bode en LTspice

Analizando este gráfico, es claro que se trata de un filtro paso bajo de segundo orden. De la gráfica anterior se tiene también que el margen de ganancia es infinito, pues la fase nunca llega a los  $-180^\circ$ .

## 1.5 Actividad en clase

Usando el circuito de la planta de primer orden de la siguiente figura, realice y reporte las siguientes tareas:

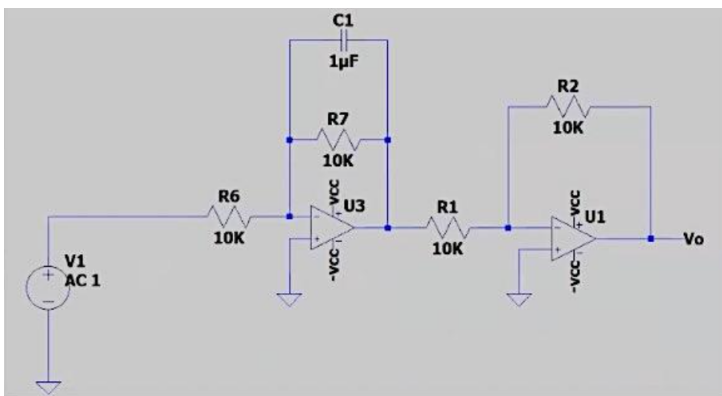


Figure 1.9: Circuito para la actividad

- Genere el diagrama de bode en LTSpice y MATLAB, interprete y compare.
- Aproxime de manera gráfica la frecuencia de corte (-3dB).
- Encuentre el margen de ganancia y fase.

## 1.6 Actividad reto

Usando un circuito RLC, genere diferentes configuraciones de filtros: pasa banda y paso alto. Tanto los filtros de paso bajo, alto y pasa banda pueden obtenerse de un circuito RLC en serie, tomando como salida el voltaje en el capacitor, inductor o resistencia, respectivamente.

1. Para el caso del filtro pasa alto, puede usar la siguiente configuración del circuito:

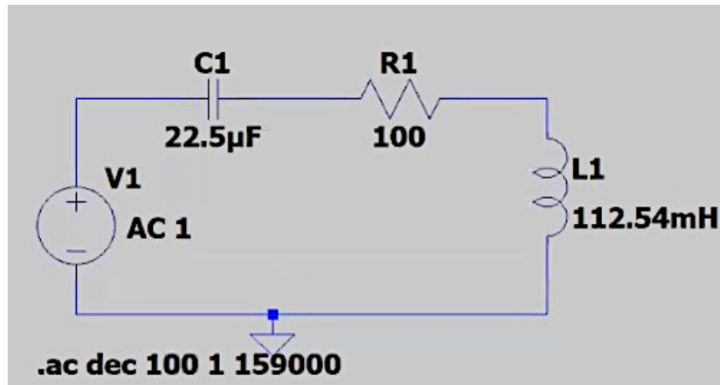


Figure 1.10: Filtro pasa alto

2. Para el caso del filtro pasa banda, puede usar la siguiente configuración del circuito:

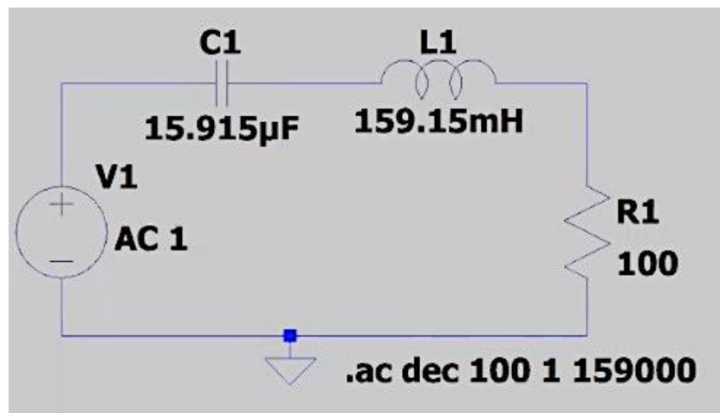


Figure 1.11: Filtro pasa banda

Para ambos casos 1) y 2) reporte las siguientes tareas:

- Genere el diagrama de bode en LTSpice.
- Genere el diagrama de bode en MATLAB por dos métodos, usando la función *bode* y por otro lado, implemente manualmente el procedimiento para calcular bode.
- Interprete sus resultados y compare las tres gráficas.
- Calcule la frecuencia de corte y verifique gráficamente
- Encuentre el margen de ganancia y fase para cada caso.