



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD JURIQUILLA
LICENCIATURA EN ÓRTESIS Y PRÓTESIS**



MANUAL DE PRÁCTICAS

**Para Amplificación y filtrado de señales
biomédicas en órtesis y prótesis**

**Autor
Dr. Octavio Díaz Hernández**

PAPIME PE102022

Título

Manual de prácticas para Amplificación y filtrado de señales biomédicas en
órtesis y prótesis

Materia

Amplificación y filtrado de señales biomédicas

Autor

Dr. Octavio Díaz Hernández
Universidad Nacional Autónoma de México
Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Juriquilla
Licenciatura en órtesis y prótesis

Agradecimientos

Se agradece a la UNAM-DGAPA que, a través del proyecto PAPIME con clave PE102022 y titulado "Diseño de prácticas de laboratorio para las asignaturas del área de electrónica en la Licenciatura de Órtesis y Prótesis", fue realizado este trabajo.

Licencia

Este trabajo has sido compartido por la UNAM bajo la licencia *Creative Commons* Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Las imágenes son de elaboración propia.

2024

ÍNDICE DE PRÁCTICAS

Introducción del manual	4
1. Práctica 1. Curvas características de transistor BJT	5
2. Práctica 2. Amplificación con transistores BJT	8
3. Práctica 3. Caracterización del transistor de efecto de campo, JFET	11
4. Práctica 4. Amplificación con transistor de efecto de campo, JFET	14
5. Práctica 5. Caracterización del transistor MOSFET	17
6. Práctica 6. Amplificación con transistor MOFSET	20
7. Práctica 7. Amplificadores operacionales: Configuración inversora y no inversora	22
8. Práctica 8. Amplificadores operacionales: Configuración sumador y restador	25
9. Práctica 9. Amplificadores operacionales: Configuración integrador y derivador	28
10. Práctica 10. Filtros pasivos. Pasa bajas y pasa altas	31
11. Práctica 11. Filtro activo. Paso banda	35
12. Práctica 12. Amplificador de instrumentación	38
13. Proyecto 1. Control de lazo cerrado con amplificadores operacionales	41
14. Proyecto 2. Sensor electromiográfico	43
15. Referencias del manual	45

Introducción del manual

En este manual se describirán en términos generales a las actividades experimentales sobre la amplificación y filtrado de señales biomédicas, donde se enfocará en los dispositivos analógicos tales como los transistores, tanto unipolares como bipolares, así mismo se tendrán prácticas con circuitos integrados como son los amplificadores operacionales para amplificar (aumentar o disminuir el voltaje de las señales) y también para realizar circuitos electrónicos activos para el filtrado de señales (eliminar señales en ciertas frecuencias). Cabe mencionar que esta serie de actividades de laboratorio conlleva antecedentes teóricos amplios, no solamente de las lecciones en el aula que reciben los alumnos, sino conocimientos de asignaturas previas, tales como análisis de circuitos y electrónica básica. En particular las unidades de conocimiento que los estudiantes deben comprender son los circuitos con resistencias, Ley de Ohm, Leyes de Kirchhoff, divisores de voltaje, divisores de corriente, capacitores, inductores, dispositivos semiconductores, transistores, entre otros.

El manual se ha pensado para el plan de estudios de la Licenciatura en órtesis y prótesis, aunque existe en otras licenciaturas, y es la última de una serie de asignaturas sobre electrónica aplicada a sistemas ortoprotésicos. Esta particularidad invita a insertar prácticas relacionadas con la instrumentación biomédica, razón por la cual se han agregado prácticas y proyectos de integración sobre sensores de uso común en la órtesis y prótesis. Adicionalmente se propone que haya una asignatura optativa específica sobre instrumentación biomédica o bien, "*Diseño biomecatrónico*" con la visión de proponer cambios y mejoras al plan de estudios de la licenciatura en cuestión.

Algunas de las competencias a formar en los estudiantes es que logren aplicar arreglos electrónicos analógicos que permiten la amplificación y filtrado de señales biomédicas. Asimismo, el alumno distinguirá los efectos de la amplificación en la amplitud, frecuencia y tiempo en las bioseñales, analizará las principales configuraciones usando transistores de unión bipolar y transistores de efecto de campo para la amplificación de señales, principalmente de voltaje. El alumno utilizará las principales características del amplificador operacional y sus configuraciones más comunes, tanto para amplificar señales como para filtrarlas. Reconocerá la importancia de los factores ambientales en el diseño de equipos y sistemas involucrados en órtesis y prótesis. Y también, utilizará amplificadores de varias etapas para la amplificación de señales bioeléctricas. Esto último se buscará complementar con los proyectos y con la integración de otros sistemas de procesamiento (p. ej. Microcontroladores) y el uso de sensores comerciales de bajo costo.

1. Práctica 1. Curvas características de transistor BJT

1.1. Introducción

Los transistores son dispositivos con tres terminales de conexión compuesto por materiales semiconductores. En particular, los transistores bipolares (*Bipolar Junction Transistor*, BJT) tienen semiconductores de tipo n y tipo p. Se pueden encontrar con capas NPN y PNP con características particulares, pero sus funciones son dos: conmutador y amplificador. En ambos casos se controla una corriente a través de otra corriente. Las terminales de los transistores son *Base*, *Colector* y *Emisor* [1]. En la Figura 1 se observan los símbolos de los dos tipos de transistores BJT.

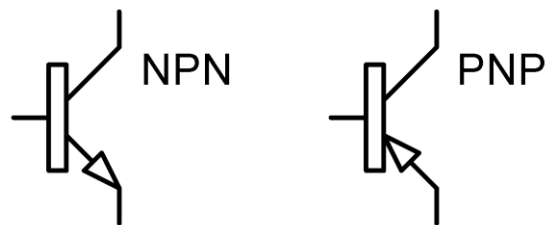


Figura 1. Transistores BJT.

Se encuentran aplicaciones muy variadas para los transistores, pero en el siguiente circuito se muestra la configuración típica para encontrar las curvas de las corrientes que circulan por la base I_B , el colector I_C y los voltajes de base-emisor V_{BE} y voltaje colector-emisor V_{CE} .

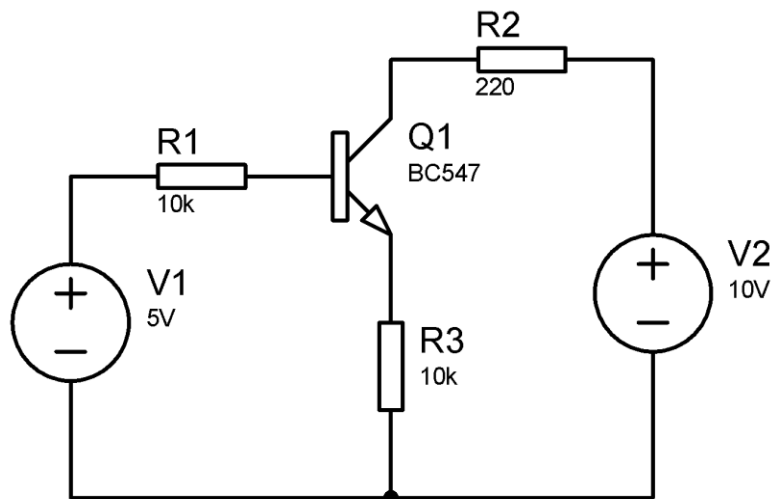


Figura 2. Circuito para obtener las curvas características.

1.2. Objetivos

- Obtener valores experimentales de las corrientes y voltajes para obtener una aproximación de las curvas características del transistor BJT.

1.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia de 10 K Ω
- Una resistencia de 220 Ω
- Un Transistor BC547
- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales (fuente de poder o alimentación).
- Multímetro

1.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito:

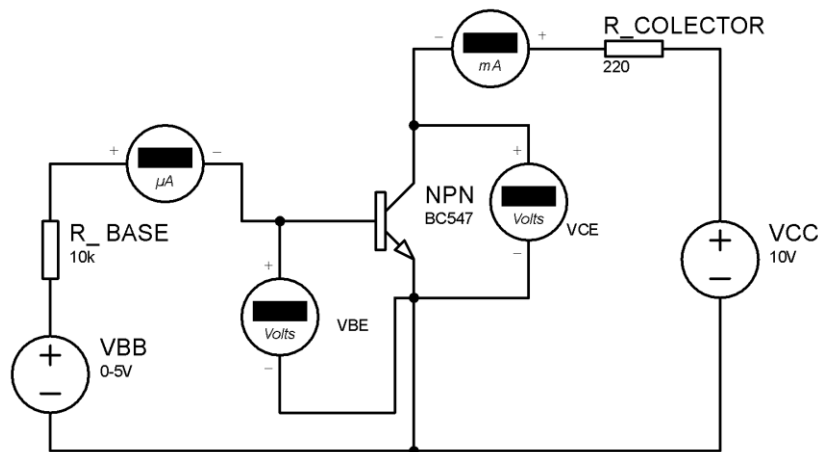


Figura 3. Circuito con transistor y fuentes.

- Configurar un canal de la fuente de voltaje a 10 V para conectarla donde el diagrama esquemático de la Figura 3 dice VCC, mientras que el otro canal etiquetado como VBB se inicia en 0 volts. La fuente VCC permanecerá constante durante las pruebas, la fuente VBB se regulará a distintos voltajes

conforme a la tabla 1, de tal forma que se obtenga la corriente de I_B aproximadamente.

- II. Realizar las mediciones de corriente y voltaje de la tabla 1.
- III. Ver la Figura 4 para realizar las gráficas de las curvas características (Gráficas de I_B vs V_{BB} y I_C vs V_{CE}) y comentarlo en el grupo.

Tabla 1. Datos obtenidos experimentalmente.

Experimento	Voltaje V_{BB}	Voltaje V_{CE}	Corriente I_B (aprox)	Corriente I_C
1			10	
2			50	
3			100	
4			200	
5			300	
6			400	

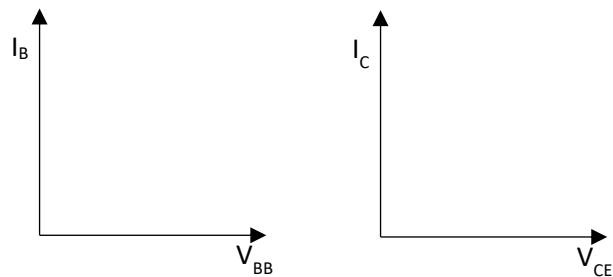


Figura 4. Ejemplos de gráficas de I_B vs V_{BB} y I_C vs V_{CE}

1.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

2. Práctica 2. Amplificación con transistores BJT

2.1. Introducción

Los transistores que operan en corriente directa son polarizados para establecer un punto de operación y se usa para conocer las variaciones de voltaje y corriente, pero en corriente alterna. Los transistores pueden amplificar señales alrededor del punto de operación y son útiles para manejar estas señales pequeñas de cd y a menudo se conocen como amplificadores de señal pequeña. Los amplificadores con base en transistor BJT tienen tres configuraciones básicas: Emisor común, Colector común y Base común. Teniendo particularidades cada configuración de ganancia y de conexiones [2], se muestran en la Figura 5.

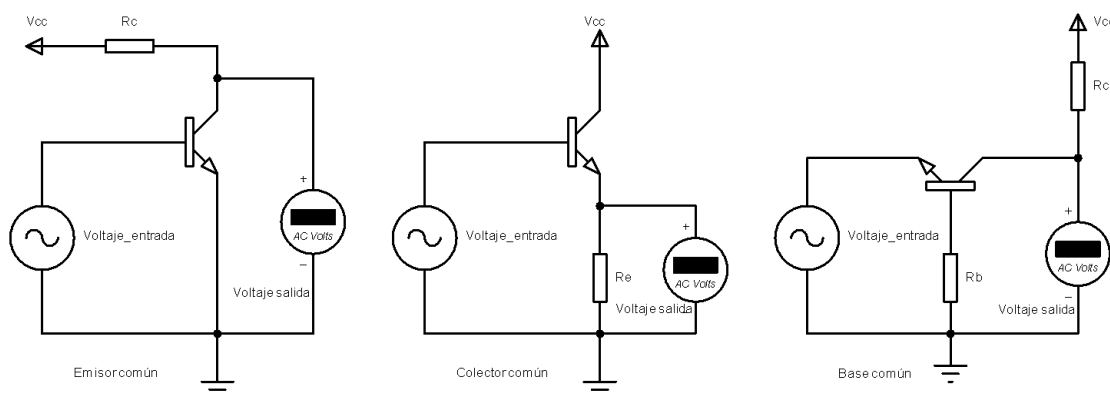


Figura 5. Configuraciones básicas con transistores BJT.

2.2. Objetivos

- Analizar el funcionamiento de un amplificador basado en transistor BJT.
- El alumno comprobará la amplificación de una señal de voltaje al analizar la entrada de voltaje con el voltaje de salida del circuito.

2.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia de $22\text{ K}\Omega$
- Una resistencia de $6.8\text{ K}\Omega$
- Una resistencia de $560\text{ }\Omega$

- Una resistencia de $1\text{ K}\Omega$
- Una resistencia de $10\text{ K}\Omega$
- Dos capacitores de $1\text{ }\mu\text{F}$
- Un Transistor BC547
- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales (fuente de poder o alimentación).
- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

2.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito:

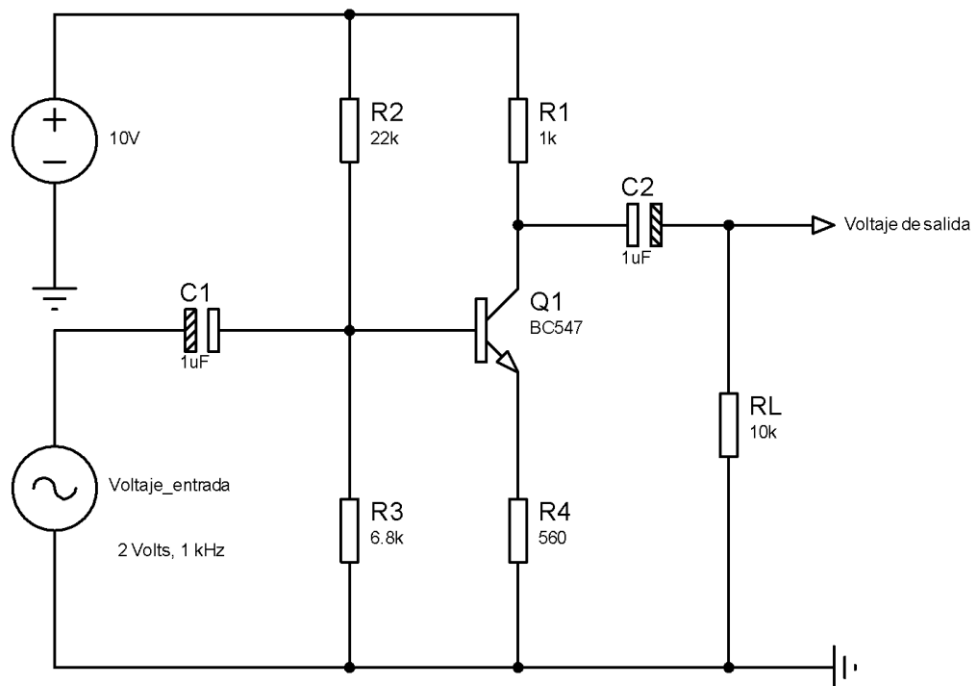


Figura 6. Conexiones para el amplificador con transistor BJT.

- Alambrar el circuito de la Figura 6 en la protoboard.
- Configurar un canal de la fuente de voltaje a 15V para conectarla donde el diagrama esquemático de la Figura 6.
- Configurar un generador de funciones con una señal senoidal con 2 V de amplitud y 1 kHz de frecuencia, el cual será el "voltaje de entrada" marcado en la Figura 6.

- IV. Conectar un canal del osciloscopio directamente al generador de funciones para medir el voltaje de entrada.
- V. Conectar el otro canal del osciloscopio a la señal marcada como “voltaje de salida”.
- VI. Encender la fuente y comparar las señales de entrada con respecto a la salida para comprobar la amplificación de la señal.
- VII. Calcular la ganancia de voltaje como el cociente entre el voltaje de salida sobre el voltaje de entrada.
- VIII. Comentar en el grupo los resultados.

2.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

3. Práctica 3. Caracterización del transistor de efecto de campo, JFET

3.1. Introducción

El transistor JFET (*Junction Field Effect Transistor*) es un dispositivo de tres terminales que controla un flujo de corriente por un canal semiconductor (tipo N o P), aplicando un campo eléctrico perpendicular a la trayectoria de la corriente mediante un voltaje. Se pueden encontrar de dos tipos: JFET y MOSFET. Las terminales son: D = drenaje = *drain*, la cual es una terminal por donde los portadores mayoritarios salen del dispositivo. S = fuente = *source*, es la terminal por donde los portadores mayoritarios entran al dispositivo. G = puerta = *gate*, es la terminal que se forma con dos capas de material tipo N o P para formar dos uniones del material semiconductor, las cuales generaran un “campo” para estrangular la corriente o permitir el paso, en función del voltaje [2].

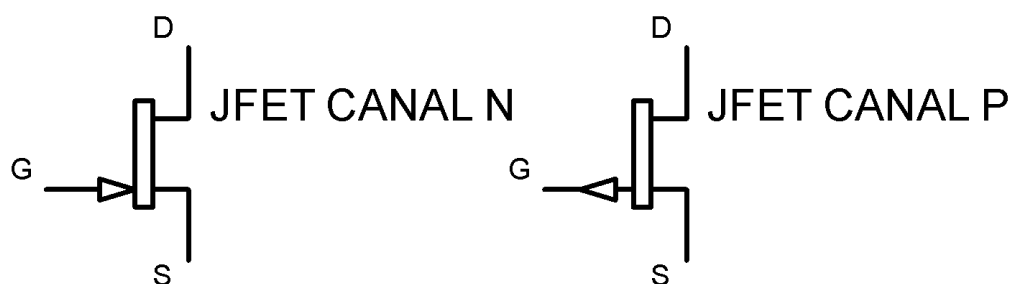


Figura 7. Tipos de transistores JFET.

El transistor JFET puede estudiarse y modelarse mediante la siguiente ecuación:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde V_{GS} es un voltaje, entre S y G; V_p es el voltaje de ruptura (dado por el fabricante y se puede obtener experimentalmente); I_D es la corriente de drenador; I_{DSS} es la corriente máxima que puede fluir del drenaje (D) a la fuente (S). La gráfica representativa de esta ecuación modela las zonas: óhmica, de corte y de saturación de estos transistores.

3.2. Objetivos

- Encontrar de manera experimental los parámetros de un transistor JFET y graficar sus curvas de transferencia y las zonas características.

3.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia variable (potenciómetro) 10 K Ω
- Un Transistor 2N3458 (o equivalente a JFET canal N)
- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales (fuente de poder o alimentación).

3.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se establece un circuito para seguir como el siguiente:

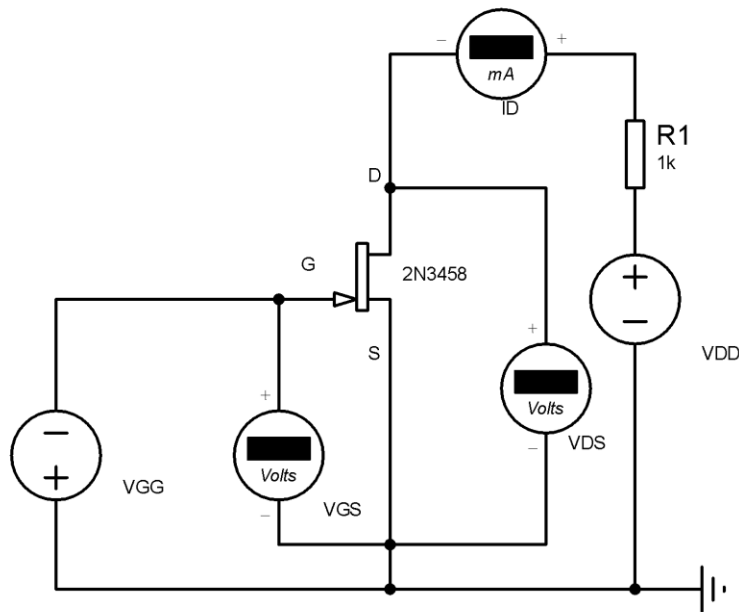


Figura 8. Diagrama de conexiones para ser implementada en protoboard.

- Se configuran dos canales de la fuente, uno con 0 volts y otro con 10 volts para ser conectado según el diagrama esquemático de la Figura 8.
- Se registrarán los valores solicitados en la Tabla 2. Tomando en cuenta que cuando V_{GS} es igual a V_p , la corriente de drenador es igual a cero. Y cuando V_{GS} es igual a cero, la corriente del drenador llega a su máximo valor I_{DSS} .
- Se grafican los valores siguiendo el ejemplo de la Figura 9.

- IV. En una segunda actividad, se deja fijo el valor de V_{GS} , para realizar una segunda gráfica. En la Tabla 2 se muestra a la derecha un valor sugerido para V_{GS} (de acuerdo con el modelo de transistor).
- V. Se hace variar a V_{DD} desde cero volts (0 V) hasta que 30 V.
- VI. Se realizan las gráficas en un editor de hojas de cálculo de preferencia.
- VII. Comentar en el grupo los resultados.

Tabla 2. Valores sugeridos para la obtener las curvas de transferencia de un transistor JFET. Las corrientes están en mA y los

V_{GS}	I_D	I_{DSS}	V_{DD}	I_D	V_{DS}	V_{GS}
0			0		0	-0.1
					0.2	-0.1
					0.4	-0.1
						-0.1
						-0.1
			...	...	...	-0.1
	0	V_P			30	-0.1

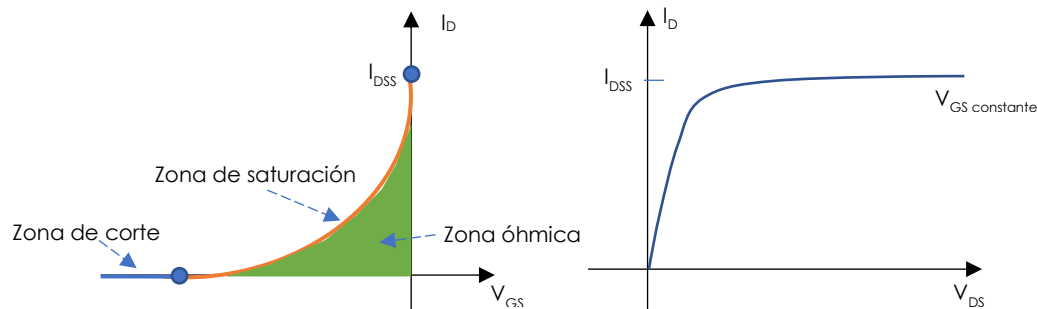


Figura 9. Ejemplo para graficar con los valores reales, teniendo en cuenta las zonas corte, óhmica y saturación.

3.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

4. Práctica 4. Amplificación con transistor de efecto de campo, JFET

4.1. Introducción

El FET es un dispositivo de tres terminales que controla un flujo de corriente por un canal semiconductor (tipo N o P), aplicando un campo eléctrico perpendicular a la trayectoria de la corriente mediante un voltaje. Existen configuraciones equivalentes a lo que se vio con el transistor BJT, pero ahora con la nomenclatura de *fuentes*, *compuerta* y *drenaje*. La configuración del amplificador más utilizada es de Fuente común, en la cual se aplica una señal de entrada de corriente alterna (CA) a la compuerta y la señal de salida de CA se toma del drenaje. La fuente es común para la señal de entrada y para la de salida. Debe tenerse en cuenta que la ganancia de voltaje está en función de la corriente de drenaje, el voltaje de compuerta-fuente y la resistencia de drenaje asociada, además que la salida será una señal invertida con respecto a la de entrada [1].

4.2. Objetivos

- Verificar de manera experimental la ganancia calculada para un amplificador con JFET en configuración de fuente común.
- Conocer el papel que juega la transconductancia en la amplificación.

4.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia de $560\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $100\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $560\ \Omega$
- Dos resistencias de $1\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $2\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $3\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $4\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $5\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $10\text{K}\Omega$
- Tres capacitores de $1\ \mu\text{F}$
- Un Transistor 2N5859 (o equivalente a JFET canal N)

- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

4.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se establece un circuito para seguir como el siguiente:

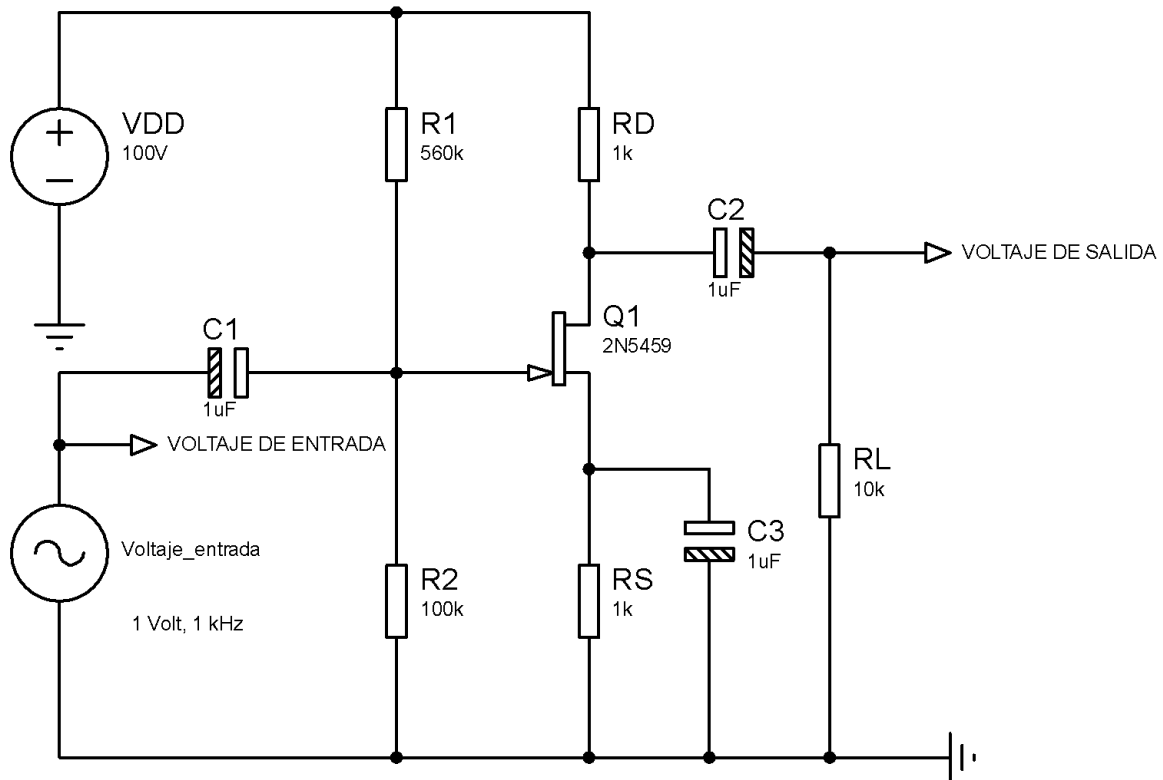


Figura 10. Circuito de amplificación con transistor JFET para alambrear.

- Alambrear el circuito de la Figura 10 en la protoboard o en el simulador si la práctica es virtual.
- Configurar un canal de la fuente de voltaje a 100 V para conectarla donde el diagrama esquemático de la Figura 10.
- Configurar un generador de funciones con una señal senoidal con 1 V de amplitud y 1 kHz de frecuencia, el cual será el "voltaje de entrada" marcado en la Figura 10.

- IV. Conectar un canal del osciloscopio directamente al generador de funciones para medir el voltaje de entrada.
- V. Conectar el otro canal del osciloscopio a la señal marcada como “voltaje de salida”.
- VI. Encender la fuente (iniciar la simulación si es práctica virtual) y comparar las señales de entrada con respecto a la salida para comprobar la amplificación de la señal.
- VII. Estimar la ganancia como el cociente del valor del voltaje de la salida sobre la entrada A_v . Emplear los valores de la amplitud cero a pico (V_{pico}) de la señal senoidal.
- VIII. Conociendo el valor de la resistencia R_D (R_D en la Figura 10), estimar la transconductancia (g_m) empleando la fórmula $A_v = g_m R_D$. Anotar el valor en una tabla: primera columna es R_D , segunda columna g_m y tercera columna A_v
- IX. Cambiar el valor de la resistencia R_D a 2k y repetir pasos VII y VIII.
- X. Cambiar el valor de la resistencia R_D a 3k y repetir pasos VII y VIII.
- XI. Cambiar el valor de la resistencia R_D a 4k y repetir pasos VII y VIII.
- XII. Cambiar el valor de la resistencia R_D a 5k y repetir pasos VII y VIII.
- XIII. Comentar en el grupo los resultados de la tabla.

4.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

5. Práctica 5. Caracterización del transistor MOSFET

5.1. Introducción

El transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor o MOSFET por sus siglas en inglés, está constituido de una placa de metal llamada compuerta y de una placa inferior constituida por un semiconductor, que puede ser de material tipo p o tipo n. La placa metálica y el semiconductor están separados por un aislante (dieléctrico, dióxido de silicio). El funcionamiento básico consiste en polarizar la estructura de las placas con un voltaje, la terminal positiva atrae los electrones de la placa metálica y esta queda cargada positivamente, mientras que la terminal negativa atrae los huecos del silicio extrínseco (por ejemplo, de tipo p) hacia la parte inferior del material, generando una carga espacial llena de electrones en la parte superior del material y a medida que se aumenta el voltaje, se forma una gran carga espacial de electrones que se llama "canal de conducción de corriente". Estos electrones que forman el canal son los encargados de permitir un flujo de corriente en la superficie del semiconductor [2]. A continuación, se muestran los tipos de transistores MOSFET.

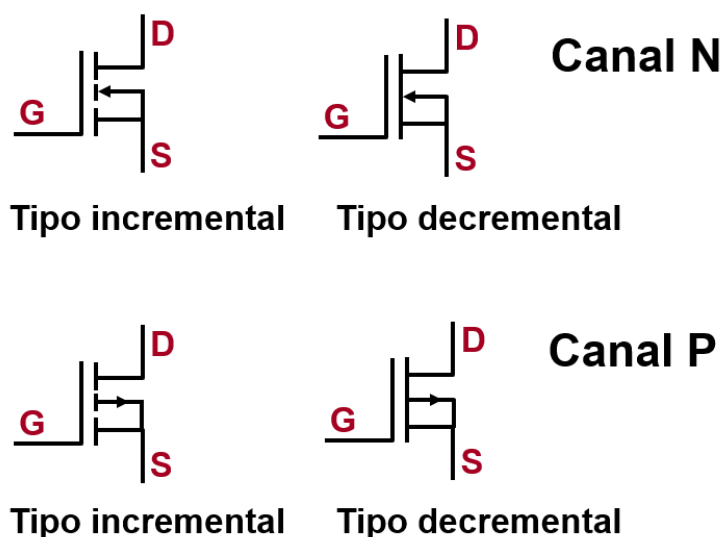


Figura 11. Tipos de Transistores MOSFET con sus respectivos símbolos,

5.2. Objetivos

- Encontrar de manera experimental los parámetros de un transistor MOSFET y graficar su curva corriente en función del voltaje de entrada.

5.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia 1 K Ω
- Un Transistor 2N7000 (o equivalente a MOSFET de enriquecimiento canal N)
- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Multímetro

5.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se establece un circuito para seguir como el siguiente:

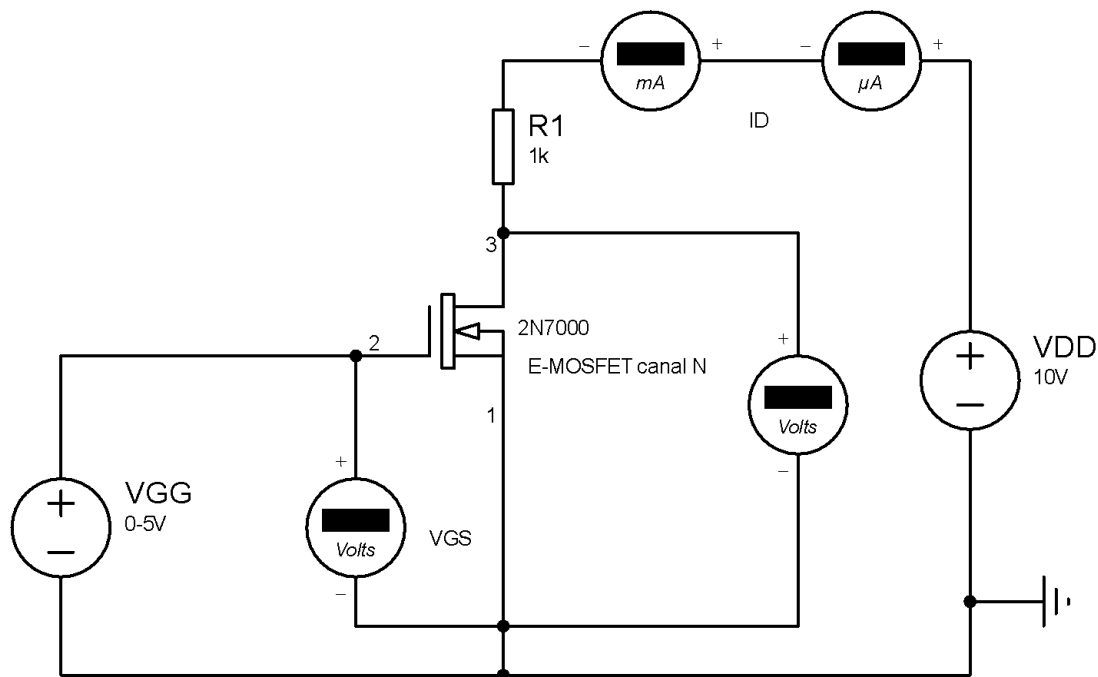


Figura 12. Diagrama de conexiones para ser implementada en protoboard.

- I. Se configuran dos canales de la fuente, uno con 5 volts para V_{GG} y otro con 10 volts para V_{DD}, de acuerdo con el diagrama esquemático de la Figura 12.

- II. Se registrarán los valores de I_D y V_{DS} solicitados en la Tabla 3, al hacer variar la fuente V_{GG}
- III. En una segunda prueba: Se registrarán los valores de I_D y V_{DS} solicitados en la Tabla 3, al hacer variar la fuente V_{DD} , usando un solo valor de V_{GS} (1 Volt)
- IV. Se grafican los valores siguiendo el ejemplo de la Figura 12.
- V. Se comenta los resultados en el grupo.

Tabla 3. Valores para la obtener la gráfica de entrada de un transistor MOSFET.

$V_{GG}=V_{GS}$	I_D	V_{DS}	V_{DD}	I_D	V_{DS}	V_{GS}
0			0		0	1
0.1			1			1
0.2			2			1
...			3			1
1			4			1
2			5			1
...			...	...	...	1
5V			30			1

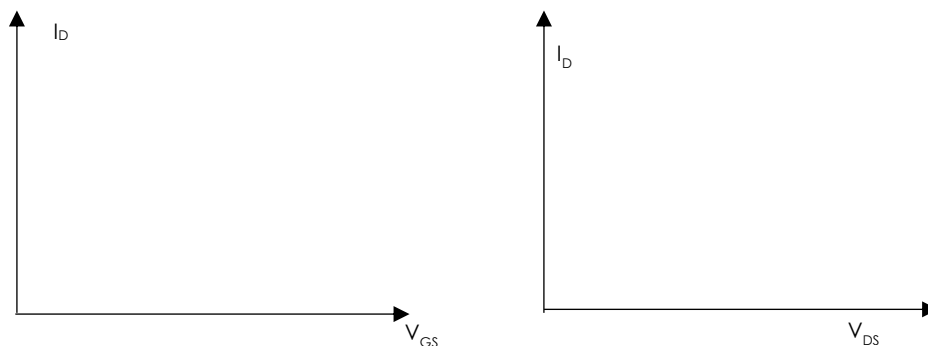


Figura 9. Ejemplo para graficar con los valores reales.

5.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

6. Práctica 6. Amplificación con transistor MOSFET

6.1. Introducción

En el caso del transistor MOSFET, es necesario garantizar su correcta polarización mediante alguno de los métodos siguientes: métodos auto-polarización o polarización por divisor resistivo. Estos dispositivos deben estar en la región de saturación para amplificar de forma adecuada, por lo tanto, es importante modificar los circuitos de las diferentes configuraciones para incluir la polarización de estos. Los circuitos de polarización pueden modificar considerablemente los parámetros de desempeño del amplificador, por lo tanto, deben diseñarse de forma que alteren el desempeño lo menos posible [2].

6.2. Objetivos

- Comprobar la amplificación de una señal con el amplificador basado en transistores de efecto de campo MOSFET.

6.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia de $560\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $100\text{K}\Omega$
- Una resistencia de 560Ω
- Dos resistencias de $1\text{K}\Omega$
- Una resistencia de $10\text{K}\Omega$
- Tres capacitores de $1\mu\text{F}$
- Un Transistor 2N7000 (o equivalente a MOSFET canal N)
- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

6.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se establece un circuito para seguir como el siguiente:

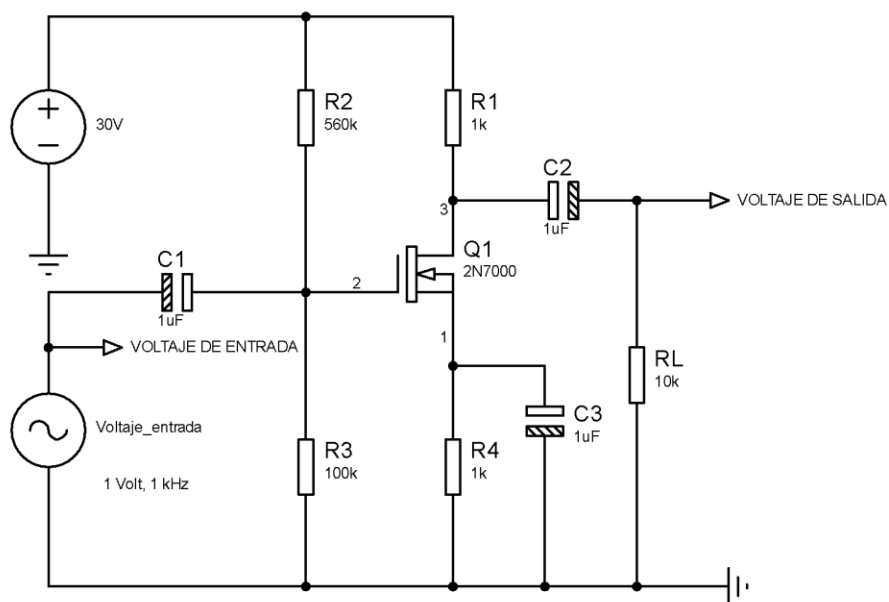


Figura 13. Circuito de amplificación con transistor MOSFET para alambrear.

- I. Alambrear el circuito de la Figura 13 en la protoboard.
- II. Configurar un canal de la fuente de voltaje a 30V para conectarla donde el diagrama esquemático de la Figura 10.
- III. Configurar un generador de funciones con una señal senoidal con 1 V de amplitud y 1 kHz de frecuencia, el cual será el "voltaje de entrada" marcado en la Figura 13.
- IV. Conectar un canal del osciloscopio directamente al generador de funciones para medir el voltaje de entrada.
- V. Conectar el otro canal del osciloscopio a la señal marcada como "voltaje de salida".
- VI. Encender la fuente y comparar las señales de entrada con respecto a la salida para comprobar la amplificación de la señal.
- VII. Comentar en el grupo los resultados.

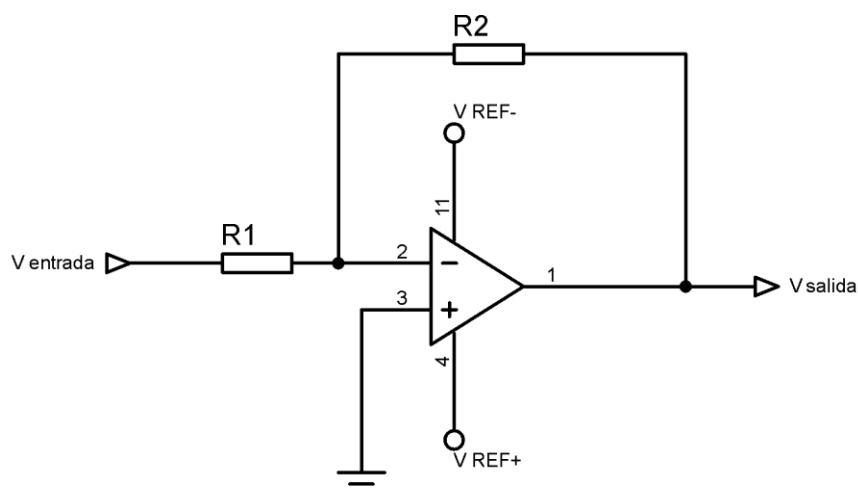
6.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

7. Práctica 7. Amplificadores operacionales: Configuración inversora y no inversora

7.1. Introducción

Los amplificadores operacionales (OPAMP) son dispositivos activos y lineales que están compuestos por un circuito electrónico que tiene dos entradas denominadas inversora (V_{i-}) y no inversora (V_{i+}) y una salida, su modelo más general implica una relación con la salida (V_o) donde una ganancia (A_v) multiplicada por la resta entre las entradas. Normalmente la ganancia está relacionada con dispositivos externos al amplificador operacional, por ejemplo, con resistencias. Siendo las configuraciones más comunes: a) *amplificador inversor* (Figura 14), b) *amplificador no inversor* (Figura 15), c) *sumador* (Figura 17), d) *restador* (Figura 18), e) *integrador* (Figura 20), y f) *derivador* (Figura 21). Aunque existen otras configuraciones, en este manual se practicarán con estas seis.



$$V_{salida} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) V_{entrada}$$

Figura 14. Amplificador inversor y su ganancia A_v está en función de las resistencias.

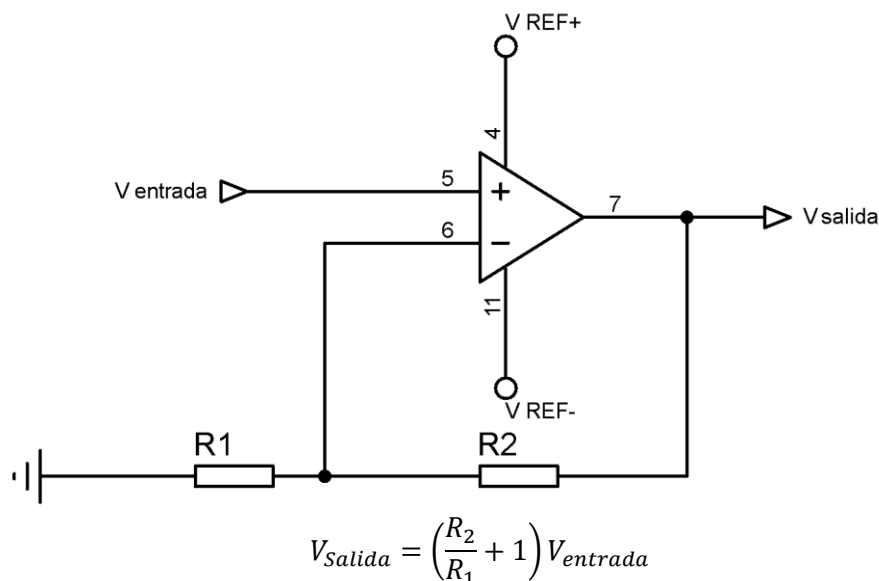


Figura 15. Amplificador inversor y su ganancia A_v está en función de las resistencias.

Se debe recordar que, al momento de amplificar una señal, existe un límite al cual se puede llegar, con lo cual la señal de salida máxima estará dada por la máxima señal de entrada (voltajes de referencia) para cada sistema de amplificación. Si la señal máxima de entrada es superada se produce una saturación en el sistema y la señal obtenida a la salida se verá limitada.

7.2. Objetivos

- Comprender el funcionamiento básico del amplificador operacional en su configuración inversora y no inversora.
- El alumno diseñará un amplificador inversor y no inversor para obtener una ganancia determinada por resistencias.

7.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Dos resistencias de 1 K Ω
- Dos resistencias variables de 10 K Ω
- Un amplificador operacional LM324
- Una protoboard

- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Un multímetro

7.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito con el diseño del amplificador de ganancia $A_v=10$.

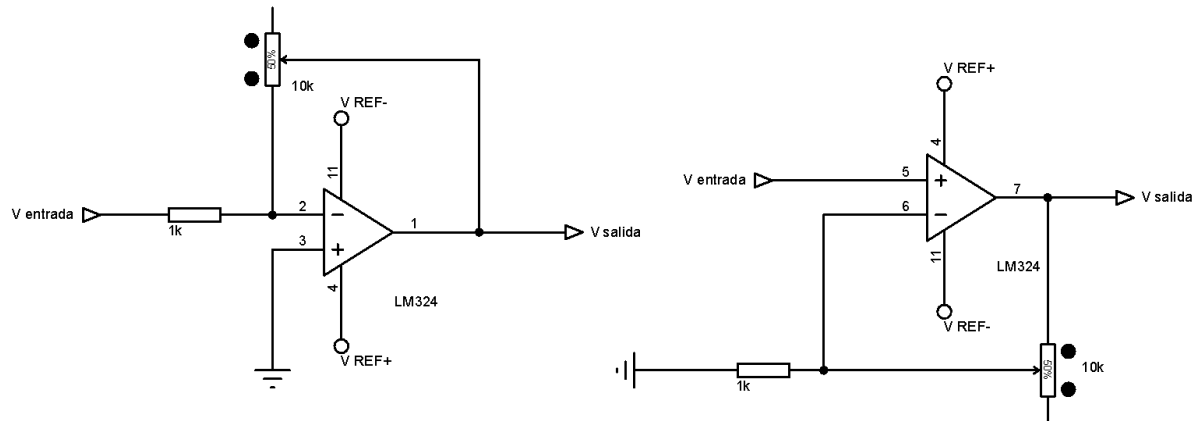


Figura 16. Circuito con las configuraciones.

- I. Alambrar el circuito de la Figura 16 en la protoboard.
- II. Considerando los modelos matemáticos, la resistencia variable debe configurarse al valor calculado.
- III. Configurar la fuente de voltaje a 15 V y -15 V que serán los voltajes de referencia positivo (V_{REF+}) y negativo (V_{REF-}).
- IV. Encender la fuente y comparar las señales de entrada con respecto a la salida para comprobar la amplificación de la señal.
- V. Comentar en el grupo los resultados.

7.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

8. Práctica 8. Amplificadores operacionales: Configuración sumador y restador

8.1. Introducción

La mayor parte del control y medida de los procesos industriales se realiza mediante circuitos electrónicos, siendo el amplificador operacional un módulo básico de dichos circuitos de control. Aunque cada vez más, el procesamiento de la información y la toma de decisiones del sistema se realiza con circuitos digitales o sistemas basados en microprocesadores, la conversión de las variables medidas (temperatura, presión, velocidad, etc.) en variables eléctricas: corriente o tensión (en los sensores), o la conversión inversa (en los actuadores analógicos), requiere de circuitos analógicos, donde el amplificador operacional juega un papel fundamental. En el control, uno de los elementos fundamentales en un diagrama de control es la suma o resta de señales (hay que recordar que el concepto de realimentación surge al querer comparar o restar la salida real de un sistema con la salida deseada para el mismo o referencia). Cuando estas señales son voltajes la utilización de un amplificador operacional simplifica mucho la construcción de los circuitos que realicen dichas funciones.

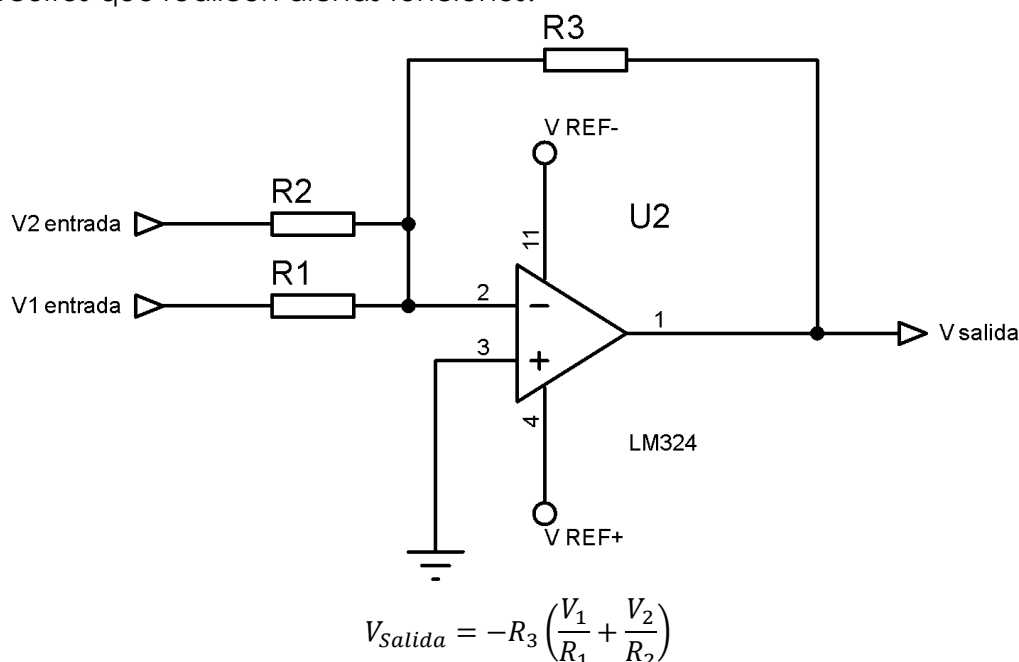
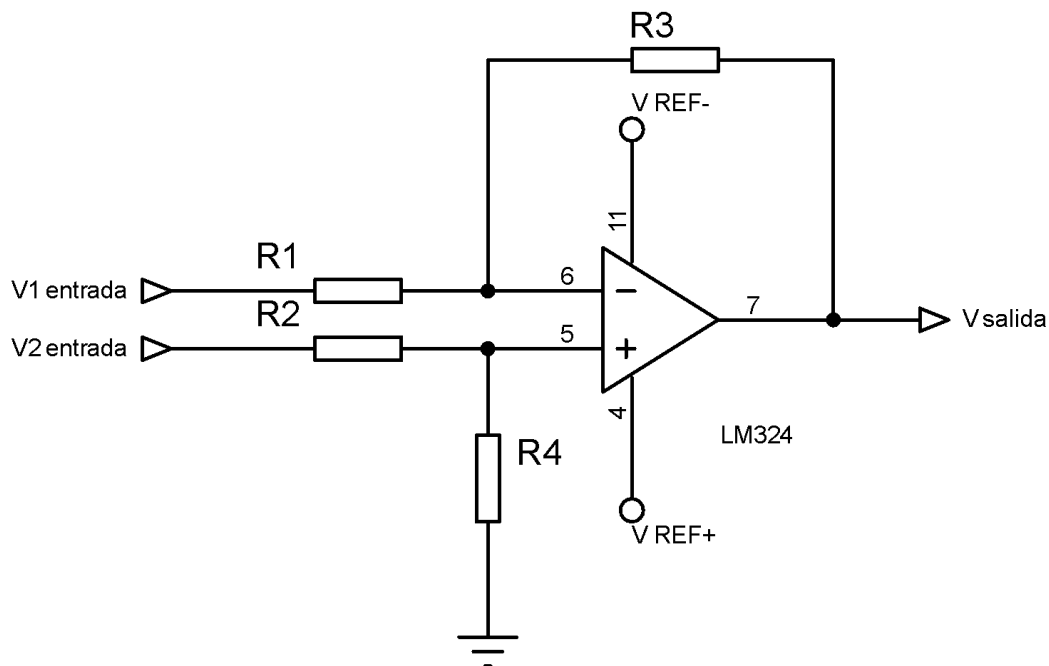


Figura 17. Amplificador sumador y su ganancia A_v está en función de las resistencias.



$$V_{salida} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Figura 18. Amplificador restador y su ganancia A_v está en función de las resistencias.

Se debe recordar que, al momento de amplificar una señal, existe un límite al cual se puede llegar, con lo cual la señal de salida máxima estará dada por la máxima señal de entrada (voltajes de referencia) para cada sistema de amplificación. Si la señal máxima de entrada es superada se produce una saturación en el sistema y la señal obtenida a la salida se verá limitada.

8.2. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del amplificador operacional en su configuración de sumador y restador.

8.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas

MATERIALES

- Dos resistencias de 1 K Ω
- Dos resistencias variables de 10 K Ω
- Un amplificador operacional LM324

- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Un multímetro

8.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito con el diseño del amplificador de ganancia $A_v=1$.

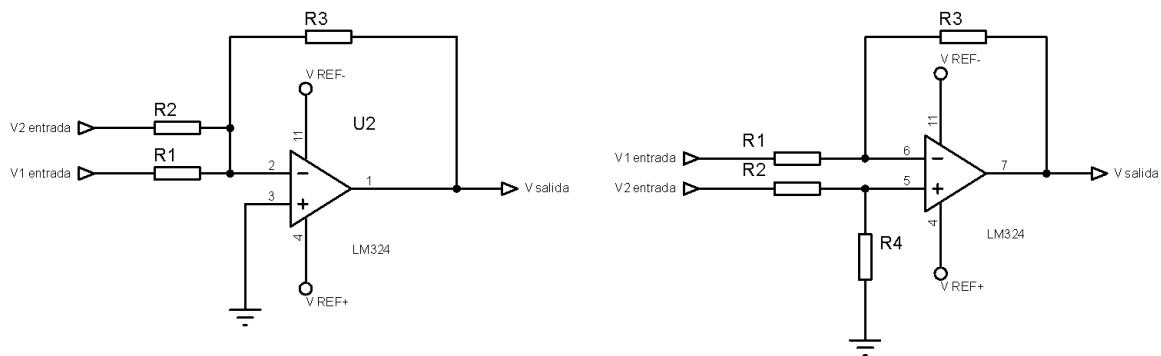


Figura 19. Circuito con las configuraciones.

- Alambrar el circuito de la Figura 19 en la protoboard.
- Considerando los modelos matemáticos, las resistencias tendrán que colocarse conforme al valor calculado.
- Configurar la fuente de voltaje a 15 V y -15 V que serán los voltajes de referencia positivo (VREF+) y negativo (VREF-).
- Encender la fuente.
- Comparar las señales de entrada con respecto a la salida.
- Comprobar la suma y resta de los voltajes de entrada.
- Comentar en el grupo los resultados.

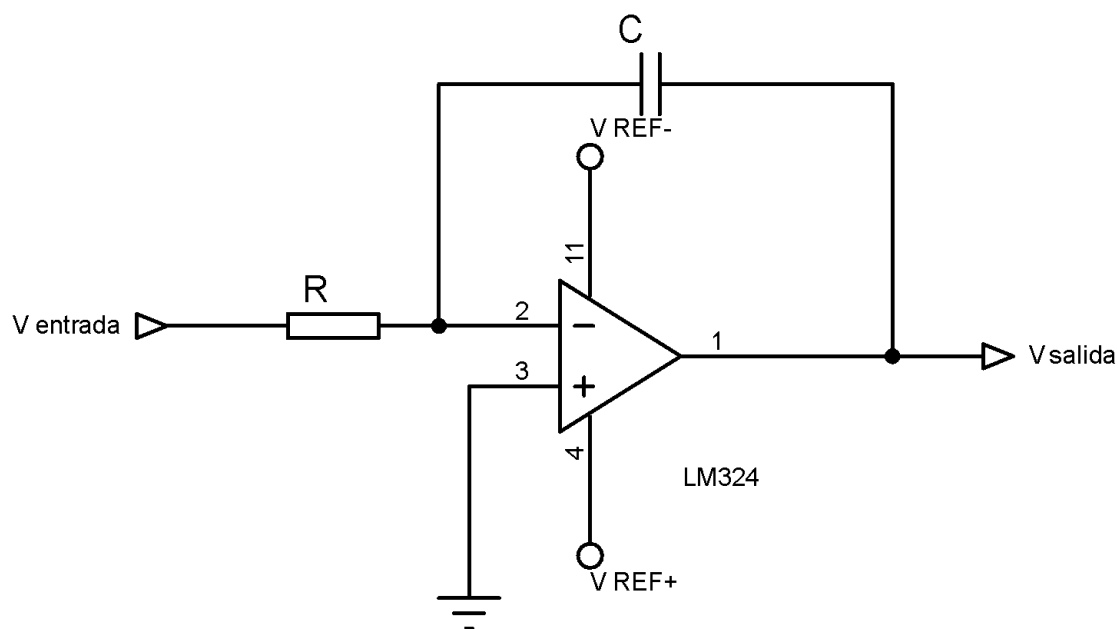
8.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

9. Práctica 9. Amplificadores operacionales: Configuración integrador y derivador

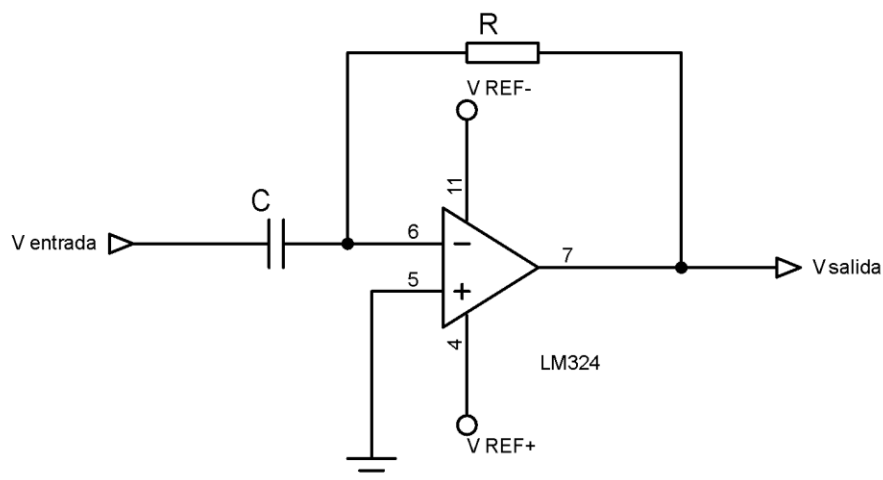
9.1. Introducción

Los amplificadores operacionales (OPAMP) siguen teniendo presencia en sistemas de control analógico donde unos de los ejemplos más comunes es el control Proporcional, Integral y Derivativo. Por lo que es importante repasar los circuitos básicos que hacen estas funciones de cálculo.



$$V_{salida} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{entrada} dt + V_{inicial}$$

Figura 20. Amplificador integrador y su ganancia A_v está en función de la resistencia y el capacitor.



$$V_{salida} = -RC \frac{dV_{entrada}}{dt}$$

Figura 21. Amplificador derivador y su ganancia A_v está en función de la resistencia y el capacitor.

Se debe recordar que, al momento de amplificar una señal, existe un límite al cual se puede llegar, con lo cual la señal de salida máxima estará dada por la máxima señal de entrada (voltajes de referencia) para cada sistema de amplificación. Si la señal máxima de entrada es superada se produce una saturación en el sistema y la señal obtenida a la salida se verá limitada.

9.2. Objetivos

- Comprender el funcionamiento básico del amplificador operacional en su configuración integrador y derivador.

9.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas

MATERIALES

- Dos resistencias de 1 K Ω
- Dos resistencias variables de 10 K Ω
- Un amplificador operacional LM324
- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales

- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

9.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito con el diseño del amplificador de ganancia $A_v=1$.

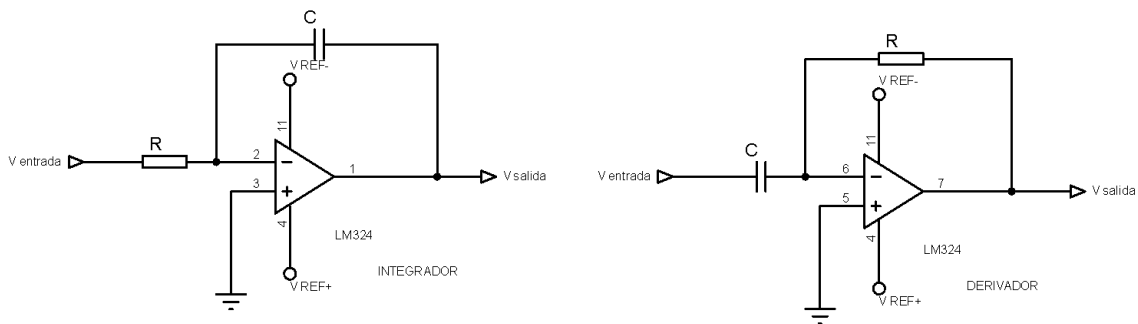


Figura 22. Circuito con las configuraciones.

- I. Alambrar el circuito de la Figura 22 en la protoboard.
- II. Considerando los modelos matemáticos, la resistencia variable debe configurarse al valor calculado.
- III. Configurar la fuente de voltaje a 15 V y -15 V que serán los voltajes de referencia positivo (VREF+) y negativo (VREF-).
- IV. Encender la fuente.
- V. Comparar las señales de entrada con respecto a la salida.
- VI. Comprobar la integración y derivación de las señales de entrada.
- VII. Comentar en el grupo los resultados.

9.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

10. Práctica 10. Filtros pasivos. Pasa bajas y pasa altas

10.1. Introducción

Un filtro electrónico deja pasar señales eléctricas a una cierta frecuencia (o rangos de frecuencia) mientras que previene el paso de otras. Estos dispositivos separan, pasan o suprimen un grupo de señales a partir de una mezcla de señales. La clasificación de los filtros es variada y pueden ser: pasivos o activos; pasa bajas, pasa altas, pasa banda o rechaza banda; de primer orden, segundo orden o de orden superior. Y analógicos o digitales. Un filtro pasivo es un circuito capaz de filtrar señales que no requiere de alimentación y puede componerse de elementos como resistencias y capacitores, dando propiedades de pasa bajas o paso altas. Y estos son los que se practicarán a continuación.

En cualquiera de los casos que se verán, el modelo matemático a la que responde en el diseño es la misma para ambos casos.

$$f_{corte\ baja} = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde f_{corte} es el parámetro de frecuencia a la cual se diseña, es decir, se elige una frecuencia que se desea dejar pasar o se le impide pasar por el filtro, usando los valores de R, que es la resistencia y C, que es el valor del capacitor. El término 2π se relaciona con la velocidad angular de la señal.

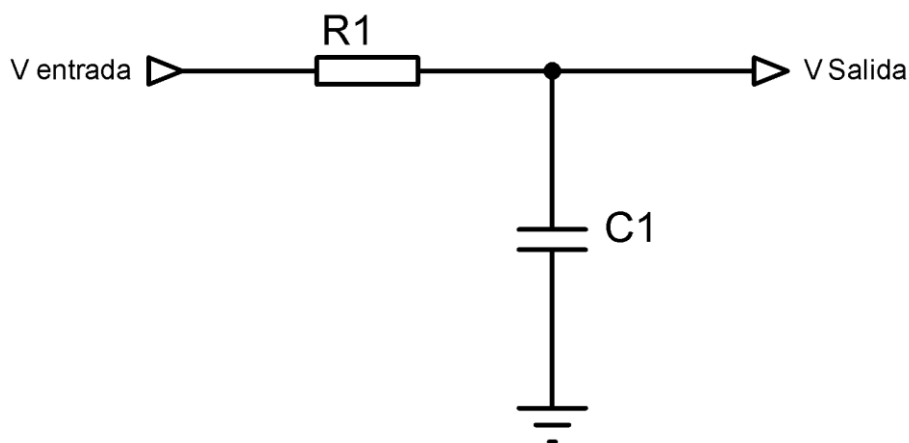


Figura 23. Filtro pasivo RC pasa bajas.

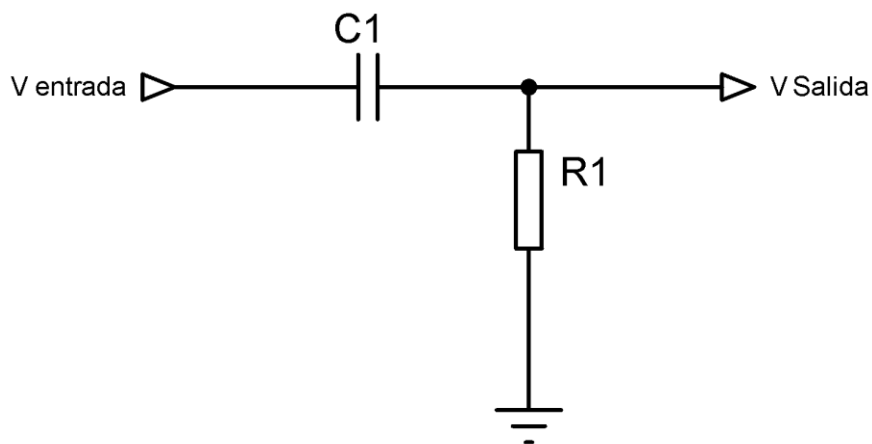


Figura 24. Filtro pasivo RC pasa altas.

La banda de paso de un filtro es el intervalo de frecuencias que el filtro deja pasar con atenuación mínima (casi siempre definida como menor de 3 dB de atenuación). La frecuencia crítica, f_c (también llamada frecuencia de corte) define el final de la banda de paso y normalmente se especifica en el punto donde la respuesta reduce 3 dB (70.7%) con respecto a la respuesta en la banda de paso. Después de la banda de paso existe una región llamada región de transición que conduce a una región llamada banda de rechazo. No existe ningún punto preciso entre la región de transición y la banda de rechazo.

10.2. Objetivos

- Diseñar un filtro pasa bajas y uno paso altas al determinar los valores del capacitor y la resistencia.
- El alumno comprobará el funcionamiento experimentalmente de los filtros.

10.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas

MATERIALES

- Dos resistencias variables de 10 K Ω
- Dos capacitores de 22 nF
- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales

- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

10.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito para implementar los filtros, considerar a la frecuencia de corte como 1 kHz.

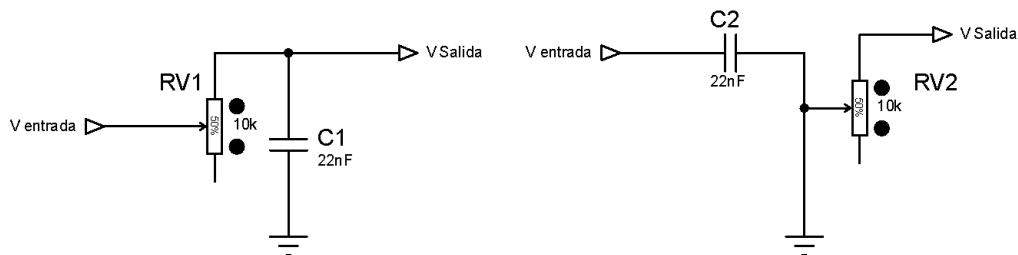


Figura 25. Filtros pasa bajas y paso altas respectivamente de izquierda a derecha.

- Alambrar el circuito de la Figura 25 en la protoboard.
- Considerando los modelos matemáticos, la resistencia variable debe configurarse al valor calculado dada la frecuencia de corte y el valor de capacitor dado.
- Configurar un canal del generador de funciones con una salida senoidal con amplitud de 5 volts, la cual será la señal etiquetada como "V entrada" en la Figura 25.
- En el canal 1 del osciloscopio se lee la señal senoidal original y con el canal 2 del osciloscopio se lee la señal de salida (filtrada) que fue etiquetada como "V salida" en la Figura 25.
- Completar la Tabla 4 de acuerdo con los valores de la frecuencia propuestos y graficar en "x" a la frecuencia en escala logarítmica y en "y" a la ganancia en decibeles.
- Realizar el procedimiento para ambos filtros.
- Comentar en el grupo los resultados.

Tabla 4. Valores de las amplitudes de las señales y la ganancia.

Frecuencia [Hz]	Amplitud de señal de entrada [V]	Amplitud de señal de salida [V]	Salida/entrada Ganancia [dB]
1			
10			
100			
1000			
10000			
100000			

10.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

11. Práctica 11. Filtro activo. Paso banda

11.1. Introducción

En el caso de los filtros activos, se requiere de alimentación para funcionar además de otros elementos que puedan regular una ganancia, para lo cual se emplea normalmente a los amplificadores operacionales con los que se han trabajado durante el manual. A continuación, se comentará sobre la aplicación de una práctica previa relacionada con el amplificador no inversor y el uso de dos filtros por separado cuyos elementos son un capacitor y una resistencia, mediante las cuales se diseña la frecuencia de que permitirá pasar.

Para un filtro pasa banda, se emplearán en este caso particular uno paso bajo, seguido de un paso alto, y en cualquiera de los casos que se verán, el modelo matemático a la que responde en el diseño es la misma para ambos casos.

$$f_{\text{corte baja}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{ecuación 3}$$

$$f_{\text{corte alta}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{ecuación 4}$$

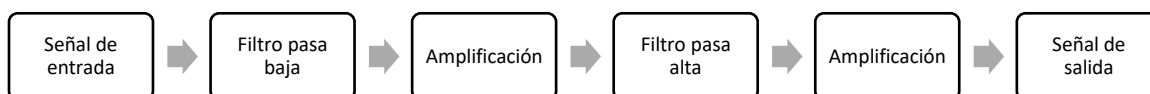


Figura 26. Diagrama de bloques sugerido para el filtro pasa banda.

Particularmente se puede calcular la “frecuencia central” (f_0) con la siguiente expresión:

$$f_0 = \sqrt{f_{\text{c baja}} f_{\text{c alta}}} \quad \text{ecuación 5}$$

Con la cual se puede saber el punto de ganancia más alto, es decir, donde el filtro permite pasar esa frecuencia con la amplitud de la señal más alta.

11.2. Objetivos

- Diseñar un filtro pasa bandas al determinar los valores de los capacitores y las resistencias.
- El alumno caracterizará el funcionamiento del filtro paso banda.

11.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Dos resistencias variables de 10 k Ω
- Dos capacitores de 22 nF
- Dos resistencias de 1 k Ω
- Dos resistencias de 9 k Ω
- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales
- Un generador de funciones
- Un osciloscopio con dos canales

11.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito para implementar los filtros, considerar a la frecuencia de corte baja como 1 kHz y la frecuencia de corte alta como 100 Hz.

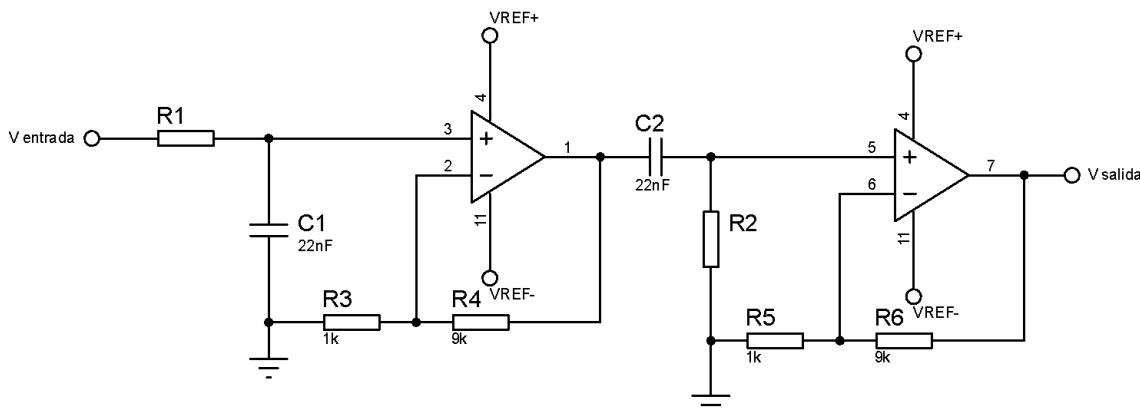


Figura 27. Filtro activo pasa banda.

- I. Alambrar el circuito de la Figura 27 en la protoboard.
- II. Considerando los modelos matemáticos, las resistencias R1 y R2 debe configurarse al valor calculado dada la frecuencia de corte baja y alta. Se sugiere que el valor de capacitor sea comercial.

- III. Configurar un canal del generador de funciones con una salida senoidal con amplitud de 5 volts, la cual será la señal etiquetada como "V entrada" en la Figura 27.
- IV. En el canal 1 del osciloscopio se lee la señal senoidal original y con el canal 2 del osciloscopio se lee la señal de salida (filtrada) que fue etiquetada como "V salida" en la Figura 27.
- V. Completar la Tabla 5 de acuerdo con los valores de la frecuencia solicitados.
- VI. Realizar el procedimiento para ambos filtros.
- VII. Realizar la gráfica de la Ganancia [dB] vs Frecuencia [Hz] en escala logarítmica.
- VIII. Comentar en el grupo los resultados.

Tabla 5. Valores de las amplitudes de las señales y la ganancia.

Frecuencia [Hz]	Amplitud de señal de entrada [V]	Amplitud de señal de salida [V]	Salida/entrada Ganancia [dB]
1			
10			
100			
Frecuencia central			
1000			
10000			
100000			

11.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

12. Práctica 12. Amplificador de instrumentación

12.1. Introducción

Un amplificador de instrumentación es capaz de amplificar la diferencia entre los voltajes cuyo propósito principal es aumentar la amplitud de señales pequeñas que pueden mezclarse con grandes. Algunas de sus características son una alta impedancia de entrada, un alto rechazo en modo común, un bajo desequilibrio de voltaje de salida y una baja impedancia de salida [2].

Se puede observar en la Figura 28 a un amplificador de instrumentación básico que internamente consta de tres amplificadores operacionales y varios resistores (R). La ganancia de voltaje se ajusta con un resistor externo (R_G).

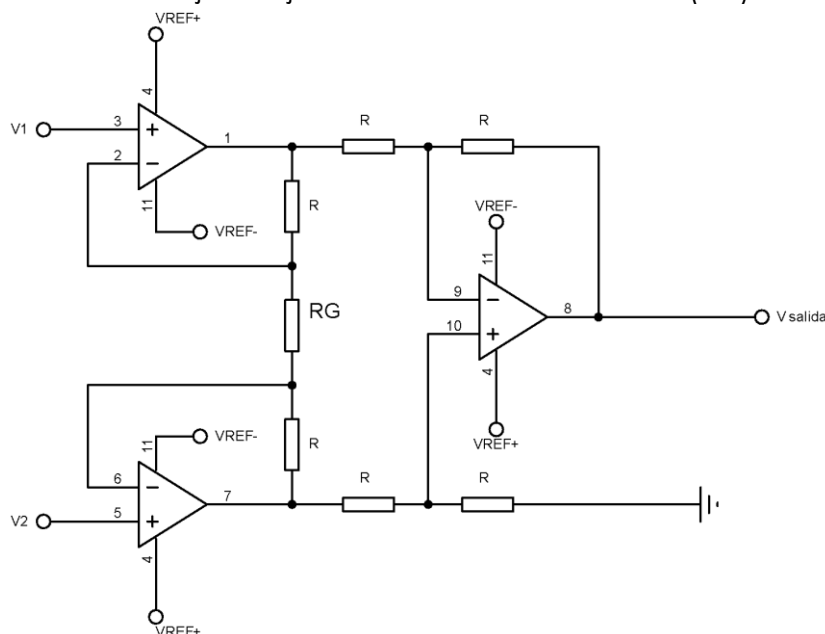


Figura 28. Composición interna de un amplificador de instrumentación.

La ganancia A_v se calcula con la siguiente expresión de acuerdo con los componentes resistivos:

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_G} \quad \text{ecuación 6}$$

Mientras que el voltaje de salida se calcula de la siguiente manera:

$$V_{salida} = A_v(V_2 - V_1) \quad \text{ecuación 7}$$

La resistencia R es aquella con la que se diseña internamente al amplificador y es un dato que el fabricante especifica.

12.2. Objetivos

- Comprobar experimentalmente el funcionamiento del amplificador de instrumentación.
- El alumno encontrará experimentalmente el valor de la resistencia interna del amplificador de instrumentación siguiendo los modelos matemáticos.

12.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Una resistencia variable de 10 K Ω
- Un circuito integrado AD620
- Una protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales (fuente de poder o alimentación).
- Un generador de funciones
- Multímetro

12.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito para la elaboración de la práctica que se debe alambrear en la protoboard.

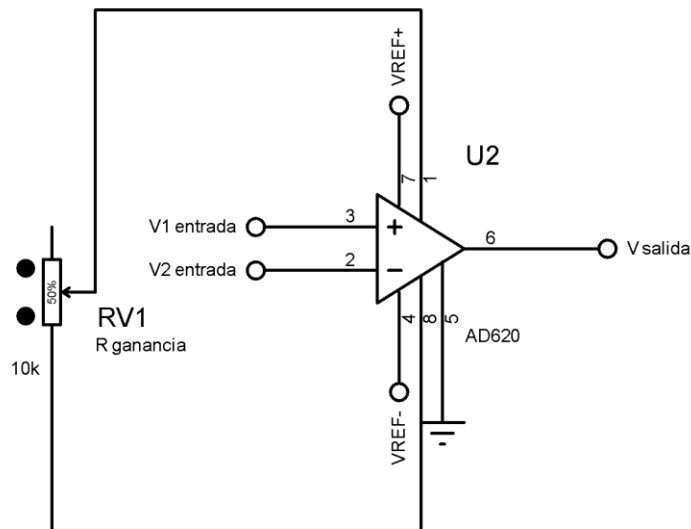


Figura 29. Amplificador de instrumentación para alambrear en la práctica.

- I. Alambrar el circuito de la Figura 29 en la protoboard.
- II. Considerando los modelos matemáticos, la resistencia variable debe estar al 50% para iniciar (aproximadamente 5 k Ω).
- III. Configurar el canal 1 de la fuente de poder con 1 V y conectarlo a la terminal etiquetada como "V1 entrada", mientras que el canal 2 se configura a 2 V, el cual se conectará a la terminal etiquetada como "V2 entrada".
- IV. Usando el multímetro configurado para medir voltaje, se conecta con la terminal etiquetada como "V salida".
- V. Con ayuda de la ecuación 7, despejar el valor de la ganancia de voltaje A_v .
- VI. Empleando la ecuación 6, encontrar el valor de la resistencia R.
- VII. Anotar los valores solicitados en la tabla 6.
- VIII. Comentar en el grupo los resultados.

Tabla 6. Valores estimados de la resistencia interna del amplificador de instrumentación.

Resistencia variable RV1 R ganancia [k Ω]	Valor estimado de la resistencia interna R [k Ω]
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

12.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

13. Proyecto 1. Control de lazo cerrado con amplificadores operacionales

13.1. Introducción

Los amplificadores operacionales son ampliamente usados para realizar control analógico y es de interés conocer cómo es un esquema de control básico de lazo cerrado [3]. En la Figura 30 se presentan algunos de los elementos que componen el lazo de control.

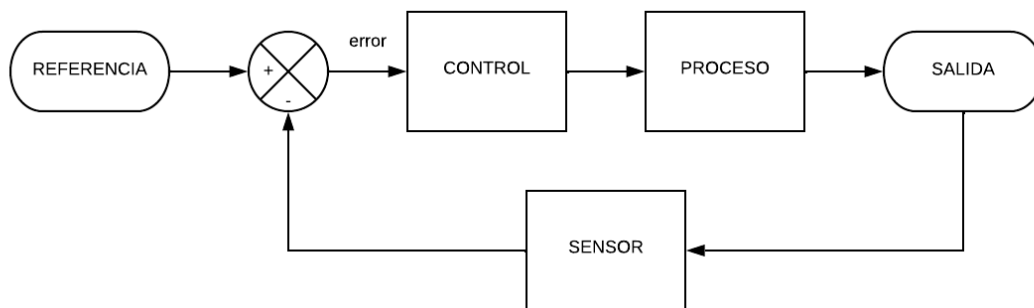


Figura 30. Diagrama básico del control de lazo cerrado.

13.2. Objetivos

- Comprobar experimentalmente el funcionamiento de un control usando amplificadores, sensor y un actuador (p.ej. motor).

13.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Dos resistencias variables de 10 k Ω
- Un circuito integrado LM324
- Dos diodos 1N4148
- Un transistor TIP41
- Un transistor TIP42
- Cuatro resistencias de 10 k Ω
- Una resistencia de 1.8 k Ω
- Una resistencia de 4.7 k Ω
- Un motor de corriente directa

- Una Protoboard
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales.
- Multímetro

13.4. Descripción y desarrollo de la práctica

Se propone el siguiente circuito para la elaboración de la práctica que se debe alambrear en la protoboard.

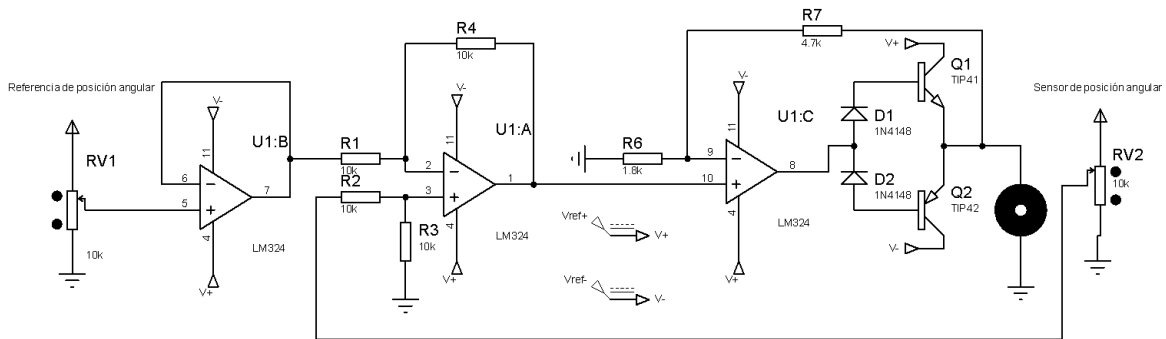


Figura 31. Control de motor.

- I. Alambrear el circuito de la Figura 31 en la protoboard.
- II. La resistencia variable "RV1" entrega un voltaje que el controlador usará como la *posición angular deseada* y la resistencia variable "RV2", que está acoplada al eje de salida del motor, entrega un voltaje que el controlador interpreta como la posición real.
- III. Se moverá la RV1 y el motor se moverá hasta alcanzar la posición deseada automáticamente.
- IV. Comentar en el grupo los resultados.

13.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.

14. Proyecto 2. Sensor electromiográfico

14.1. Introducción

Los músculos producen señales eléctricas durante una contracción muscular, las cuales son generadas por el intercambio de iones a través de las membranas de las fibras musculares.

La electromiografía (EMG) consiste en la adquisición, registro y análisis de la actividad eléctrica generada en nervios y músculos a través de la utilización de electrodos (por ejemplo, puede ser con electrodos superficiales o de aguja). Las mediciones extraídas de EMG proporcionan una información valiosa acerca de la fisiología y los patrones de activación muscular [3].

Este proyecto busca integrar distintas prácticas que se han visto en el manual, pero se suma la investigación sobre sensores previamente propuestos en la literatura para armar un sistema electrónico con las etapas mostradas en el diagrama de la Figura 32. La importancia de realizar este proyecto en órtesis y prótesis radica en la existencia de las prótesis mioeléctricas.

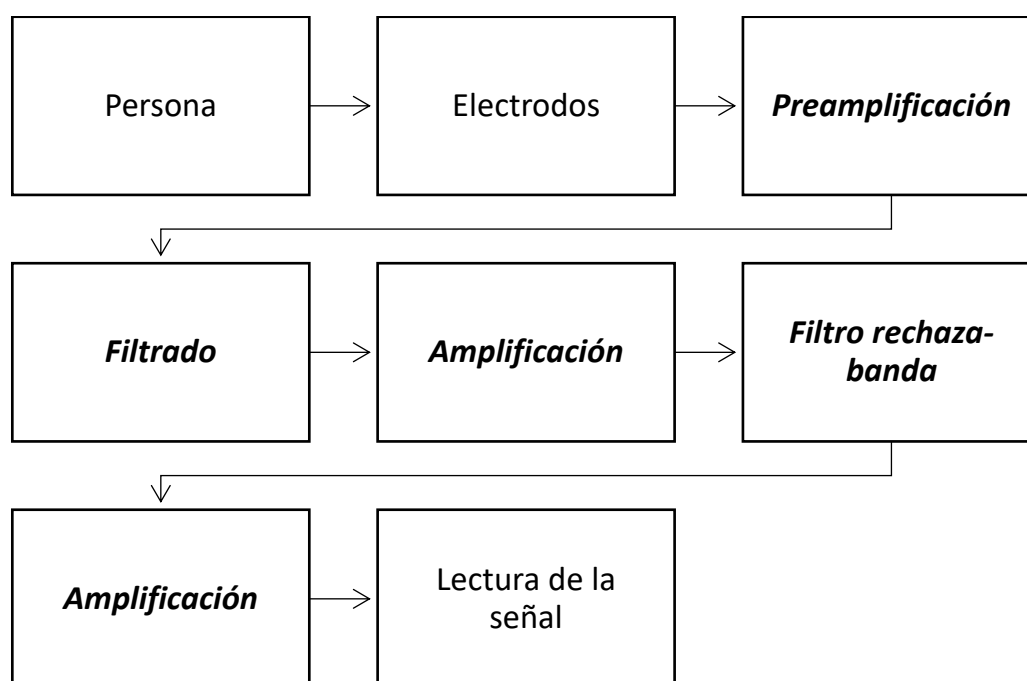


Figura 32. Etapas en la electromiografía, se han resaltado los bloques que se han visto en este manual.

14.2. Objetivos

- Integrar conocimiento de las prácticas anteriores junto con investigación para elaborar un sensor electromiográfico.
- Comprobar experimentalmente el funcionamiento de un sensor usando amplificación y filtrado.

14.3. Recursos de espacio, materiales y equipo

ESPACIO

- Laboratorio con mesas dieléctricas (superficie no conductora)

MATERIALES

- Resistencias
- Amplificadores
- Componentes determinados por el alumno
- Electrodo
- Una Protoboard o PCB
- Cables de conexión

EQUIPO

- Fuente de voltaje con dos canales.
- Osciloscopio
- Multímetro

14.4. Descripción y desarrollo de la práctica

- I. Investigar e integrar los componentes requeridos para el sensor.
- II. Alambrear un circuito.
- III. Medir la actividad muscular de un integrante del equipo.
- IV. Comentar en el grupo los resultados.

14.5. Bibliografía recomendada

- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009
- Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.
- Gutiérrez-Rivas, Eduardo. Manual de electromiografía clínica, 3ª ed., Ergon, México, 2021

15. Referencias del manual

- [1] Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª ed, Pearson, México, 2009 .
- [2] Floyd, T. L. & Salas, R. N. Dispositivos electrónicos 8ª ed., Pearson, México, 2008.
- [3] Nise, Norman. Control systems engineering, 6th ed. Wiley. USA. 2011.
- [4] Gutiérrez-Rivas, Eduardo. Manual de electromiografía clínica, 3ª ed., Ergon, México, 2021.