

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL Y OPERACIONAL

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL, OPERACIONAL, FILTROS ACTIVOS

Ing. Jorge Antonio Polanía Puentes

Ingeniero Electrónico. Universidad Distrital - Colombia

Magister en Ingeniería Electrónica. UNAM- México

Copyright (© 2025, ing. Jorge Antonio Polanía, "Todos los derechos reservados")

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO 1. EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA.....	9
1.3 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS	10
1.4 POLARIZACIÓN DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL.....	12
CAPÍTULO 2. A. DIFERENCIAL: SIMULACIÓN	15
2.1 DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA.....	15
2.2 DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO DIFERENCIAL	16
2.3 DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO COMÚN	18
CAPÍTULO 3. A. DIFERENCIAL- LABORATORIO.....	20
3.1 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON POLARIZACIÓN RE	20
3.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON FUENTE DE CORRIENTE	22
CAPÍTULO 4. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	23
4.1 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL - TEORÍA	23
4.2 LM741: UN SOLO AMPLIFICADOR OPERACIONAL	24
4.3 CONFIGURACIONES BÁSICAS DE AO	26
4.4 AMPLIFICADOR DE DIFERENCIAS	29
CAPÍTULO 5. A. OPERACIONAL- SIMULACIÓN	32
5.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL NO-INVERSOR	32
5.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL INVERSOR.....	32
5.3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL SUMADOR	33
CAPÍTULO 6. A. OPERACIONAL- LABORATORIO	35
6.1 GENERADOR DE SEÑAL SENO.	35
6.2 AMPLIFICADOR NO INVERSOR	36
6.3 AMPLIFICADOR INVERSOR	36
6.4 AMPLIFICADOR SUMADOR.....	37
7. APLICACIONES DEL A. OPERACIONAL.....	39
7.1 CONVERTIDOR CORRIENTE A VOLTAJE	39
7.2 CONVERTIDOR DE VOLTAJE A CORRIENTE	41
7.3 AMPLIFICADOR DE CORRIENTE	42

7.4 AMPLIFICADOR DE DIFERENCIAS	42
7.5 COMPARADORES DE VOLTAJE: LM311	44
7.6 TEMPORIZADOR: LM 555	45
7.7 APLICACIÓN ASTABLE CON 555	46
7.8 GENERADOR DE SEÑALES: 8038	46
CAPÍTULO 8. APLICACIONES DEL AO - SIMULACIÓN.....	48
8.1 DETECTOR DE NIVEL.....	48
8.2 DETECTOR DE UMBRAL	48
CAPÍTULO 9. APLICACIONES DEL AO - LABORATORIO	50
9.1 DETECTOR DE NIVEL.....	50
9.2 DETECTOR DE VENTANA	51
CAPÍTULO 10. FILTROS ACTIVOS.....	52
10.1 FILTROS DE PRIMER ORDEN	53
10.2 FILTROS KRC (SALLEN-KEY) DE SEGUNDO ORDEN	60
CAPÍTULO 11. FILTROS ACTIVOS - SIMULACIÓN	66
11.1 FILTRO PASA BAJO	66
11.2 FILTRO PASA ALTO	66
11.3 FILTRO PASA BANDA	67
CAPÍTULO 12. FILTROS ACTIVOS - LABORATORIO.....	68
12.2 FILTRO PASA ALTO	69
12.3 FILTRO PASA BANDA	69
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA	71
SOBRE EL AUTOR.....	74

INTRODUCCIÓN

De los Transistores Discretos a los Circuitos Integrados de Precisión

La evolución de la electrónica analógica ha estado marcada por el desarrollo de componentes cada vez más sofisticados que permiten un control preciso de las señales eléctricas. Desde los amplificadores diferenciales construidos con transistores discretos hasta los modernos amplificadores operacionales integrados, estos circuitos constituyen el corazón de la instrumentación electrónica, el procesamiento de señales y los sistemas de control automático.

Este libro, "Amplificador Diferencial y Operacional, Filtros Activos: Teoría, Simulación y Práctica", nace con el propósito de proporcionar a estudiantes, técnicos e ingenieros una comprensión sólida y práctica de estos circuitos fundamentales. A diferencia de los textos puramente teóricos, esta obra integra el análisis conceptual con ejemplos resueltos, simulaciones computacionales y actividades de laboratorio que permiten al lector validar los conceptos en la práctica.

Propósito del Libro

El contenido que se presenta es el resultado de más de 30 años de experiencia en la enseñanza universitaria de la ingeniería electrónica. A lo largo de este texto, se busca no solo transmitir conocimiento teórico sobre el funcionamiento de los amplificadores diferenciales y operacionales, sino también desarrollar la capacidad de analizar, diseñar y depurar circuitos analógicos reales.

Cada capítulo ha sido cuidadosamente estructurado para guiar al lector desde los conceptos fundamentales del amplificador diferencial hasta aplicaciones más complejas como filtros activos de primer y segundo orden, siempre manteniendo un equilibrio entre el rigor técnico y la claridad expositiva.

¿Qué Encontrará en Este Libro?

El texto está organizado en capítulos clave que cubren el espectro esencial de los amplificadores diferenciales, operacionales y filtros activos:

Capítulo 1: El Amplificador Diferencial. Análisis detallado de las configuraciones con una y dos entradas, modos diferencial y común, cálculo de ganancias, impedancias de entrada y salida, y la crucial Relación de Rechazo en Modo Común (CMRR). Incluye polarización con resistencia de emisor y fuente de corriente.

Capítulo 2 y 3: Simulación y Laboratorio del Amplificador Diferencial. Ejercicios prácticos de simulación en software especializado y actividades de laboratorio para validar teóricamente las ganancias en modo diferencial y común, así como el CMRR en ambas configuraciones de polarización.

Capítulo 4: El Amplificador Operacional. Historia, estructura interna, características del AO ideal vs. real, y el popular LM741. Configuraciones básicas: no inversor, inversor, sumador y amplificador de diferencias con ejemplos numéricos resueltos.

Capítulo 5 y 6: Simulación y Laboratorio del Amplificador Operacional. Simulación de configuraciones no inversora, inversora y sumadora. Implementación práctica en protoboard con generación de señales senoidales usando el ICL8038 y verificación de ganancias teóricas vs. medidas.

Capítulo 7: Aplicaciones del Amplificador Operacional. Convertidores corriente-voltaje (I-V) y voltaje-corriente (V-I), amplificadores de corriente, comparadores de voltaje (LM311), temporizador 555 en configuración astable, y generador de señales 8038.

Capítulo 8 y 9: Simulación y Laboratorio de Aplicaciones. Simulación de detectores de nivel, umbral y ventana. Implementación práctica de comparadores con LM311 y LM339 para validación experimental de los umbrales de conmutación.

Capítulo 10: Filtros Activos. Fundamentos de filtros analógicos, respuesta en frecuencia, función de transferencia. Filtros de primer orden (diferenciador, integrador, pasa bajos, pasa altos) y filtros de segundo orden KRC (Sallen-Key) para pasa bajos, pasa altos, pasa banda y rechazo de banda (Notch).

Capítulo 11 y 12: Simulación y Laboratorio de Filtros Activos. Simulación en Proteus de filtros pasa bajos, altos y banda. Implementación práctica en protoboard con medición de frecuencias de corte, ganancia en banda media y verificación del ancho de banda.

Enfoque Pedagógico

Cada capítulo incluye:

Explicaciones teóricas claras que establecen los fundamentos conceptuales de cada circuito.

- Ejemplos numéricos resueltos que ilustran la aplicación práctica de las fórmulas y parámetros del amplificador operacional.
- Ejercicios de simulación que permiten validar los diseños antes de la implementación física.
- Actividades de laboratorio con listas de materiales, procedimientos y espacios para registro de mediciones.
- Aplicaciones prácticas que conectan la teoría con el diseño real de instrumentación y procesamiento de señales.

Se ha puesto especial énfasis en el desarrollo paso a paso de los cálculos, permitiendo al lector seguir la lógica del razonamiento y comprender no solo el "cómo" sino también el "por qué" de cada configuración de circuito.

Para Quién es Este Libro

Este texto está dirigido principalmente a:

- Estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y mecatrónica que cursan asignaturas de electrónica analógica e instrumentación.
- Técnicos y tecnólogos que desean profundizar sus conocimientos en amplificadores operacionales y filtros activos.
- Profesionales que requieren actualizar o reforzar sus fundamentos en diseño de circuitos analógicos de precisión.
- Docentes que buscan material de apoyo con ejemplos resueltos, simulaciones y prácticas de laboratorio para sus cursos.
- Aficionados a la electrónica con bases matemáticas y físicas sólidas que desean construir circuitos de instrumentación y filtrado de señales.

Requisitos Previos

Para aprovechar al máximo este texto, se recomienda que el lector tenga conocimientos básicos de:

- Circuitos eléctricos de corriente continua y alterna.
- Leyes de Kirchhoff y teoremas de circuitos.
- Fundamentos de semiconductores y transistores BJT.
- Análisis de circuitos en frecuencia (fasores, impedancia).
- Uso básico de instrumentos de laboratorio (osciloscopio, generador de funciones, multímetro).

Conexión con Otras Publicaciones del Autor

Este libro complementa perfectamente mi serie de textos sobre electrónica analógica:

- "Fundamentos de Electrónica: Semiconductores, Diodos y Transistores" - Donde se establecen los fundamentos de dispositivos semiconductores.
- "Amplificadores Transistorizados: Multietapas, Video y Sintonizados" - Que cubre amplificadores con transistores discretos.
- "Dispositivos de Control Electrónico" - Que aborda FET, MOSFET, SCR, TRIAC y optoelectrónica.
- "Señales y Sistemas Continuos" - Que establece la teoría de transformadas y respuesta de sistemas.

Juntos, estos volúmenes forman una colección integral que cubre desde los fundamentos de circuitos eléctricos hasta el diseño avanzado de sistemas de control y procesamiento de señales.

Nota del Autor

Con base en mi experiencia como Profesor Titular, Decano y Rector en la Universidad Surcolombiana, y la publicación de cursos virtuales y libros técnicos en Amazon KDP, he recopilado en este volumen los conceptos esenciales que todo profesional debe dominar en el área de amplificadores operacionales y filtros activos.

Mi deseo es que este libro no solo le ayude a aprobar un examen, sino a resolver problemas reales de instrumentación y procesamiento de señales con seguridad y eficiencia. Los circuitos que estudiamos en este libro son los bloques constructivos de sistemas tan complejos como los equipos de medición médica, los sistemas de adquisición de datos y los procesadores de audio, pero su funcionamiento se basa en principios relativamente simples que pueden ser comprendidos con estudio y dedicación.

Invito al lector a abordar este material con mente abierta y espíritu crítico. No se limite a memorizar configuraciones; busque comprender los fenómenos físicos subyacentes. Resuelva los ejercicios propuestos, verifique los ejemplos por su cuenta y, sobre todo, no dude en experimentar y construir circuitos reales siempre que tenga la oportunidad. La teoría cobra vida cuando se observa su manifestación práctica en el osciloscopio.

Agradezco de antemano cualquier comentario, sugerencia o corrección que los lectores deseen compartir, con el fin de enriquecer futuras ediciones de este texto.

Ing. Jorge Antonio Polanía Puentes

Neiva, Colombia

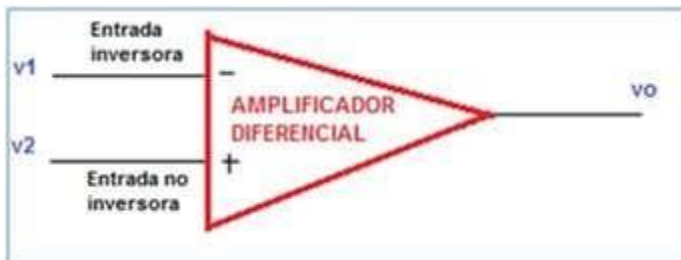
2025

CAPÍTULO 1. EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

El amplificador diferencial es un circuito que constituye parte fundamental de muchos amplificadores y comparadores. En esta unidad se describen y analizan diferentes tipos de amplificadores diferenciales su polarización y análisis de pequeña señal introduciendo los conceptos en modo diferencial y modo común que permiten simplificar el análisis de estos amplificadores. Se estudiarán los siguientes temas: Amplificador diferencial con una entrada, Amplificador diferencial con dos entradas y Polarización del amplificador diferencial.

1.1 INTRODUCCIÓN

El amplificador diferencial (AD) es un circuito utilizado para amplificar la diferencia de dos señales v_1 y v_2 como se indica en la figura.



El amplificador diferencial AD representado por el bloque de la figura, tiene dos entradas, una de ellas definida como inversora (-) y la otra como no inversora (+), y una salida. Las entradas son excitadas con dos señales v_1 y v_2 , se define:

v_{iD} , como la señal de entrada diferencial, esto es, la diferencia entre la señal aplicada a la entrada inversora, $v_{i(-)}$ y la señal aplicada a la entrada no inversora, $v_{i(+)}$:

$$v_{iD} = v_{i(-)} - v_{i(+)} = v_1 - v_2$$

v_{iC} , como la señal de entrada a modo común, como la semisuma de las dos entradas:

$$v_{iC} = \frac{v_{i(-)} + v_{i(+)}}{2} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

En consecuencia, es posible expresar:

$$v_1 = v_{iC} + \frac{v_{iD}}{2}$$

$$v_2 = v_{iC} - \frac{v_{iD}}{2}$$

En esta unidad estudiaremos el AD con una sola entrada haciendo la señal $v_2=0$, con las dos entradas en modo diferencial cuando las señales $v_1 = -v_2$, en modo común cuando $v_1 = v_2$, la relación de rechazo modo común MCRR y su polarización utilizando una simple resistencia de emisor o una fuente de corriente.

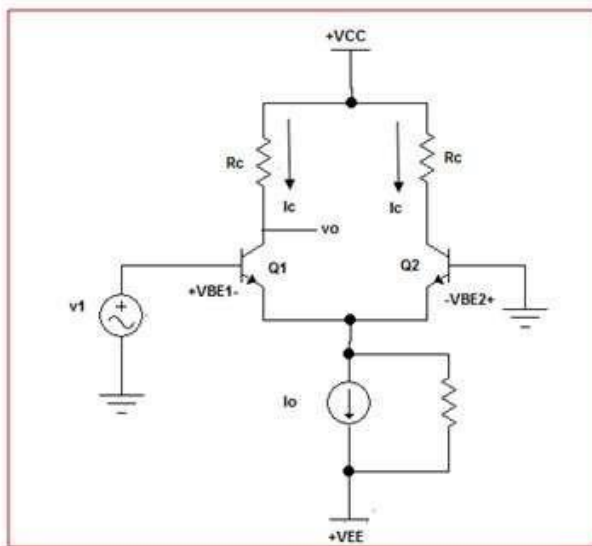
1.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA

Se hace $v_2=0$ como se indica en la figura, siendo, I_0 = la fuente de corriente constante; R_n = resistencia de la fuente de corriente. Se supone que los transistores son idénticos, esto es,

$$V_{BE1} = V_{BE2},$$

Por lo que la corriente de colector es la mitad de la fuente de corriente I_0 , $I_c = I_0 / (2 \cdot Q1)$, V_{EE} es una fuente de valor negativo.

La amplificación de voltajes se deduce de la siguiente forma:



AMPLIFICACIÓN DE VOLTAJE

$$A_v = \frac{v_o}{v_1} = -\frac{\beta R_c}{2r_\pi}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}, \quad g_m = \frac{I_c}{V_T}$$

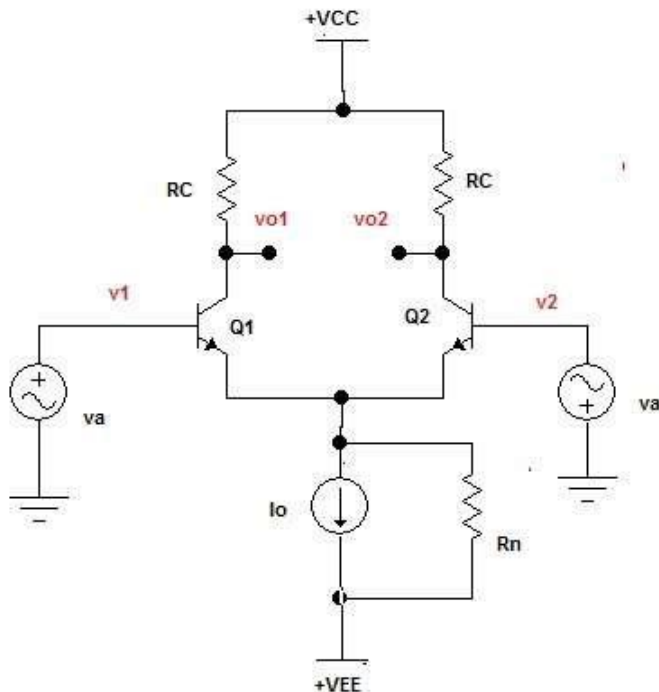
$$V_T = 25 \text{ mV}$$

β es la amplificación del transistor

r_π , β y g_m son parámetros del transistor.

1.3 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS

A) MODO DIFERENCIAL



$$v1 = va, \quad v2 = -va$$

Modo común:

$$v_{im} = \frac{v1 + v2}{2} = 0$$

Modo diferencial:

$$v_{idm} = v1 - v2 = 2va$$

$$v_{o1} = -i_{c1}R_c, \quad v_{o2} = -i_{c2}R_c$$

$$v_{o1} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi}} va$$

$$v_{o2} = \frac{\beta R_c}{r_{\pi}} va$$

Las entradas $v1$ y $v2$ son iguales a: $v1 = va$ y $v2 = -va$

V_{idm} = voltaje de entrada diferencial

V_{im} = voltaje de entrada modo común

Es un circuito simétrico, no hay señal a través de R_n y el emisor se comporta como TIERRA VIRTUAL.

Si definimos:

A_{dm1} = ganancia diferencial en terminal 1

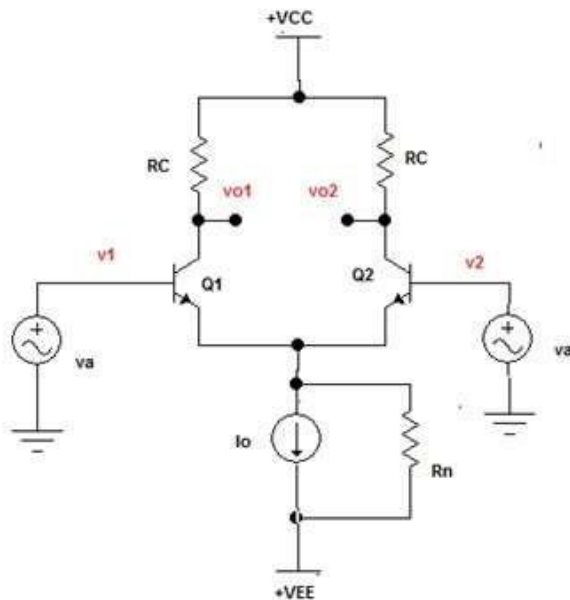
A_{dm2} = ganancia diferencial en terminal 2

$A_{dm\text{dif}}$ = ganancia modo diferencial del circuito, entonces,

$$A_{dm1} = \frac{v_{o1}}{v_{idm}} = -\frac{\frac{\beta R_c * va}{r_{\pi}}}{2va} = -\frac{\beta R_c}{2r_{\pi}}, \quad A_{dm2} = \frac{v_{o2}}{v_{idm}} = \frac{\frac{\beta R_c * va}{r_{\pi}}}{2va} = \frac{\beta R_c}{2r_{\pi}}$$

$$A_{dm\text{dif}} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{idm}} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi}} = A_{dm1} - A_{dm2}$$

B) MODO COMÚN



$$v1 = va, \quad v2 = va$$

$$vidm = v1 - v2 = 0$$

$$vicm = \frac{v1 + v2}{2} = va$$

$$vo1 = vo2 = -\frac{\beta R_c * va}{r\pi + 2(\beta + 1)R_n}$$

Las dos entradas $v1$ y $v2$ son iguales y además tienen la misma polaridad, esto es: $v1 = va$, $v2 = va$. Por tanto, $v1 - v2 = 0$. Las salidas son iguales a:

En esta configuración no hay tierra virtual, se debe tener en cuenta R_n (resistencia de la fuente).

Ganancia común en los terminales 1 y 2:

$$A_{cm1} = \frac{vo1}{vicm} = \frac{vo1}{va} = -\frac{\beta R_c}{r\pi + 2(\beta + 1)R_n}$$

$$A_{cm2} = \frac{vo2}{vicm} = \frac{vo2}{va} = -\frac{\beta R_c}{r\pi + 2(\beta + 1)R_n}$$

Las ganancias son iguales, entonces:

$$A_{cmdif} = \frac{vo1 - vo2}{2} = A_{cm1} - A_{cm2} = 0$$

La ganancia diferencial en modo común idealmente = 0.

RELACIÓN DE RECHAZO MODO COMÚN - CMRR

Lo que se requiere en un amplificador diferencial es que tenga una ganancia en modo diferencial grande y una ganancia en modo común pequeña para que rechace la señal que está en modo común. El grado de rechazo se denomina: Relación de rechazo en modo común - CMRR y es igual a la relación entre estas ganancias, como se indica:

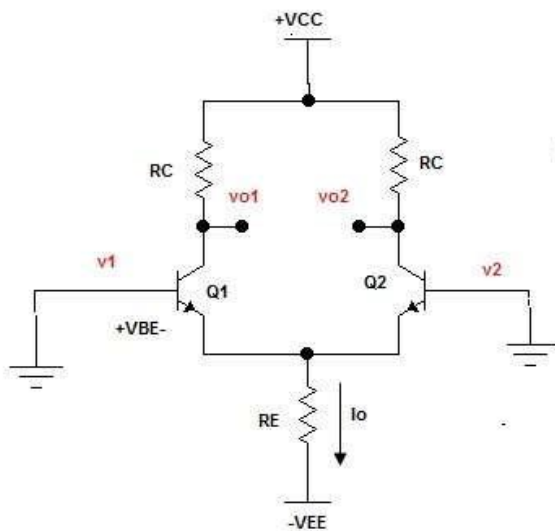
$$CMRR = \frac{|A_{dm}|}{|A_{cm}|} = 20 \log \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| \text{ en decibeles, para } v_1 \neq v_2$$

$$CMRR \approx \frac{\beta R_n}{r_\pi} = g_m * R_n$$

1.4 POLARIZACIÓN DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

A) CON RESISTENCIA DE EMISOR

Es una forma sencilla de polarizar el AD polarizando los transistores colocando una resistencia común RE en los emisores de los transistores a una fuente de voltaje -VEE, como se indica en la figura.



Se polariza con una resistencia RE y con la fuente VEE.

Las señales en polarización se hacen cero (fuentes muertas)

$$I_o = \frac{-V_{BE} - V_{EE}}{R_E}$$

$$A_{dm2} = \frac{\beta R_c}{2r_\pi} = \frac{g_m R_c}{2}$$

$$A_{cm2} = -\frac{\beta R_c}{r_\pi + 2(\beta + 1)R_E}$$

$$A_{cm2} \approx -\frac{R_c}{2R_E}$$

EJEMPLO 1:

Un amplificador diferencial tiene una señal de entrada diferencial (v_1-v_2) de 20 mV y se requiere a la salida del terminal 2 una señal amplificada de 1 V. Existe una señal de ruido en cada entrada que se debe rechazar por un factor de 5. Si la polarización se realiza con $V_{CC}=15V$, $V_{EE}= - 15V$, $R_E= 10K\Omega$, hallar CMRR.

Solución

$$v_{idm}=20mV, v_{o2}=1V, \text{ entonces, } A_{dm2} = v_{o2} / v_{idm} = 1V / 20mV = 50, A_{dm2}=50$$

$$A_{dm2} = \frac{g_m R_c}{2} = \frac{I_c R_c}{V_T 2} = \frac{V_{Rc}}{2V_T}, \quad \text{despejando } V_{Rc}$$

$$V_{Rc} = A_{dm2} * 2V_T = 50 * 2 * 25mV = 100 * 0,025 = 2,5V$$

$$A_{cm2} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} = \frac{1}{5} = \frac{R_c}{2R_E}, \text{ entonces, } R_c = 0,4R_E, \text{ o menor}$$

$$\text{Si } R_E=10K, \text{ entonces, } R_c=0,4*R_E=0,4*10K=4K, \text{ escoger } R_c=3,3K$$

$$V_{RE} = -V_{BE} - V_{EE} = -0,7 + 15 = 14,3V,$$

$$I_o = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{14,3}{10K} = 1,43 \text{ mA}, \quad I_c = \frac{I_o}{2} = 0,72 \text{ mA}$$

$$A_{cm2} = \frac{R_c}{2R_E} = \frac{3,3K}{2 * 10K} = 0,165$$

El nuevo A_{dm2} es igual a:

$$A_{dm2} = \frac{g_m R_c}{2} = \frac{I_c R_c}{V_T 2} = \frac{0,72 \text{ mA} * 3,3K\Omega}{25mV * 2} = 47$$

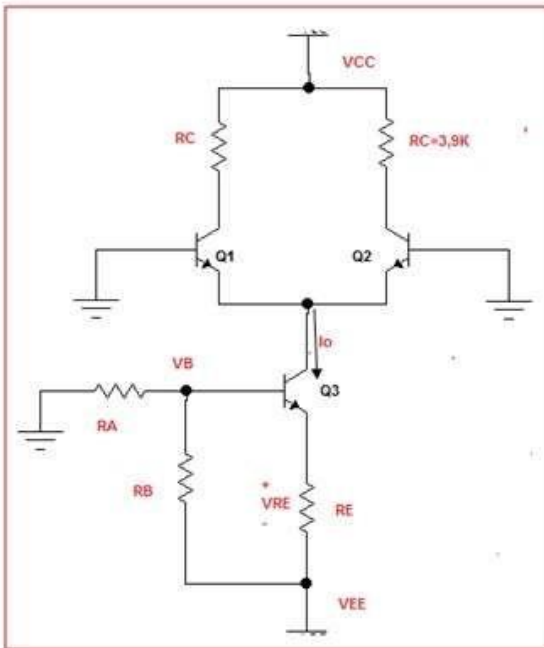
$$CMRR = \frac{A_{dm2}}{A_{cm2}} = \frac{47}{0,165} = 284,8, \quad CMRR = 20 \log(284,8) = 49,1 \text{ dB}$$

Entre más alto sea el valor de MCRR, mejor será el amplificador diferencial.

B) POLARIZACIÓN CON FUENTE DE CORRIENTE

La polarización se realiza por medio de una fuente de corriente utilizando un transistor Q3 en los emisores.

EJEMPLO 2:



a) CÁLCULO DE RE

Datos:

$$R_A=470\Omega, R_B=5K, R_C=3,9K, V_{EE}=-15V$$

$$V_B = \frac{R_A}{R_A + R_B} * V_{EE} = \frac{0,47}{0,47 + 5} (-15)$$

$$V_B = -1,3V$$

$$V_{RE} = V_B - V_{BE} - V_{EE}$$

$$V_{RE} = -1,3 - 0,7 + 15 = 13V$$

Del ejemplo anterior $I_o = 1,43mA$

$$I_o \approx I_{E3} = \frac{V_{RE}}{R_E} = 1,43mA$$

$$R_E = \frac{13}{1,43} = 9,1K\Omega$$

b) Cálculo de Rn

$$R_n = r_{o3} \left[1 + \frac{\beta_3 R_E}{R_E + r_{\pi 3} + R_p} \right], \quad R_p = R_A \parallel R_B = \frac{0,47 * 5}{0,47 + 5} = 430\Omega$$

Parámetros del transistor: $r_{o3}=50K, \beta_3=100$

$$r_{\pi 3} = \frac{\beta_3}{g_{m3}} = \frac{\beta_3 V_T}{I_{E3}} = \frac{100 * 0,025}{1,43} = 1,75K\Omega$$

$$R_n = 50 \left[1 + \frac{100 * 9,1}{9,1 + 1,75 + 0,43} \right] = 4083 = 4,1M\Omega$$

c) GANANCIA COMÚN EN UN TERMINAL

$$A_{cm1} = -\frac{\beta R_C}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_n} \approx -\frac{R_C}{2R_n} = -\frac{3,9K}{2 * 4,1M} = 4,75 * 10^{-4}$$

En el ejemplo anterior no había dado $A_{cm}=0,165$, o sea, $0,165/4,75 * 10^{-4} = 347$ veces menor

CAPÍTULO 2. A. DIFERENCIAL: SIMULACIÓN

2.1 DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA

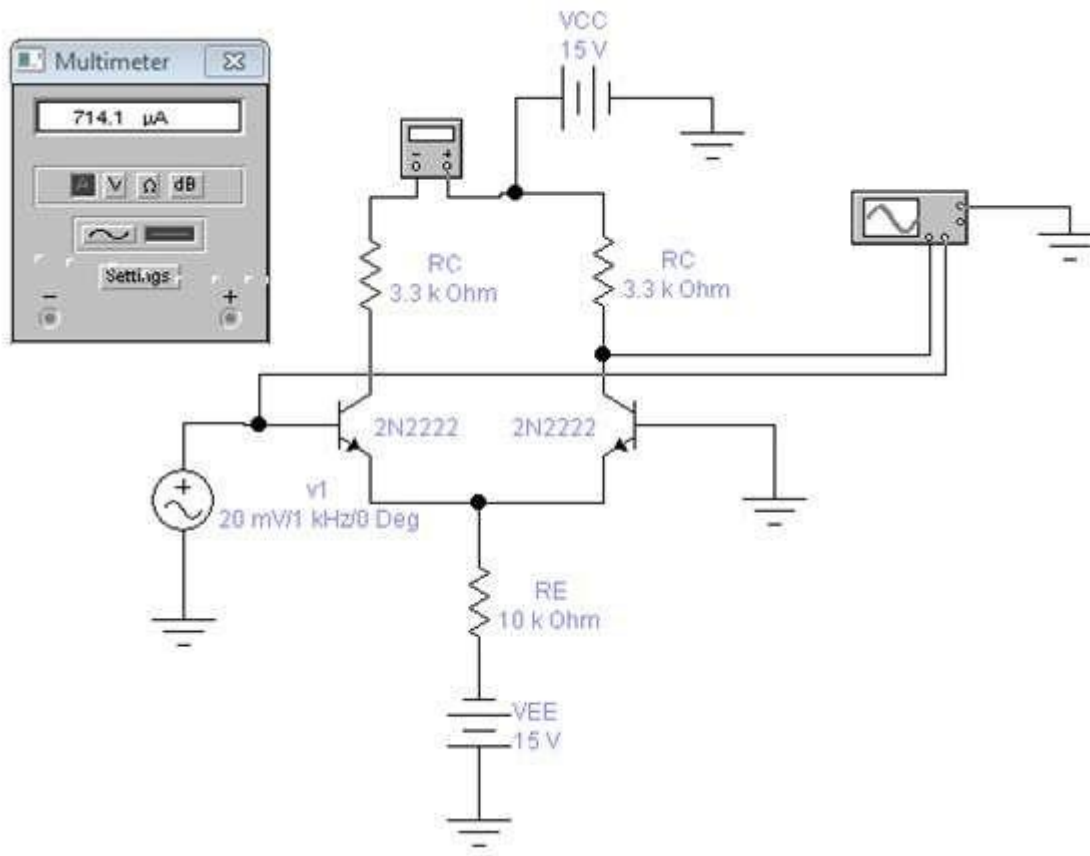
En la figura se tiene un amplificador diferencial con una entrada v1 simulado en Workbench (v2 = 0).

Como señal de entrada se ha considerado una senoidal de $20 \text{ mVrms} = 28 \text{ mVpp}$ a 1 KHz .

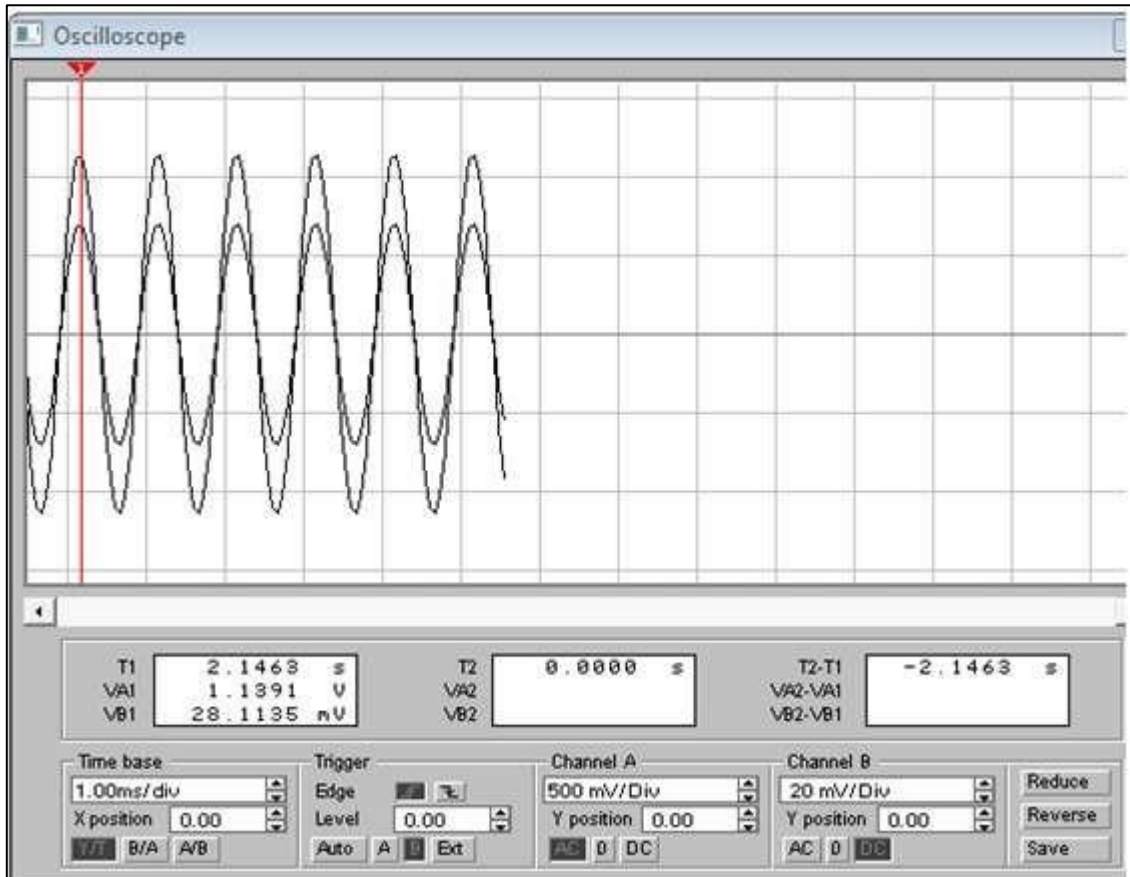
Fuentes de polarización de 15 V y -15 V y como transistores se han utilizado el $Q1=Q2=2\text{N}2222$, $R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_E = 10 \text{ k}\Omega$

Mida la corriente de colector colocando un multímetro en serie con R_C como se aprecia en la figura. Anote este resultado como: $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$

La corriente en $R_E = I_o$ es aproximadamente: $I_o = 2 * I_C = \underline{\hspace{2cm}}$



En la salida del transistor Q2 coloque un osciloscopio para observar y medir el voltaje de entrada y de salida.



$v_1 =$ _____ $v_{o2} =$ _____

Calcule la ganancia del amplificador diferencial, según lo observado en el osciloscopio, como,

$A_v = v_{o2} / v_1 =$ _____

Valide este resultado comprobándolo teóricamente.

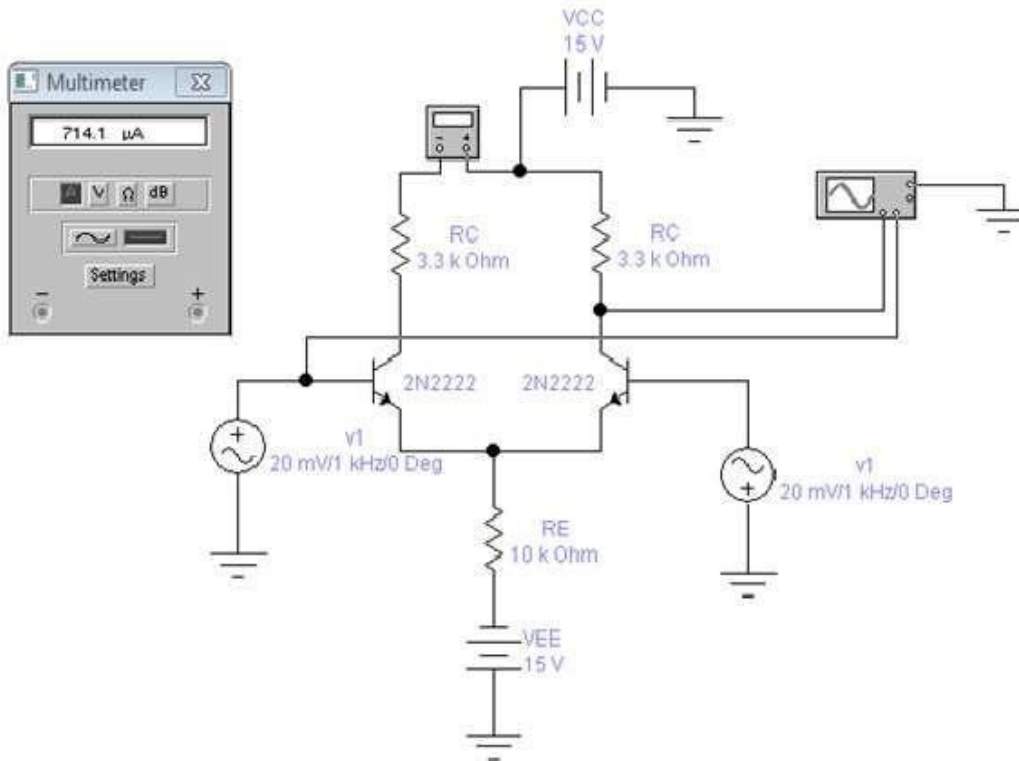
2.2 DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO DIFERENCIAL

Simule el circuito de la figura en modo diferencial con: $v_1=20$ mV, $v_2= -20$ mV (polaridad opuesta).

Mida el valor de I_C con el multímetro colocado en serie con R_C y calcule la corriente de polarización:

$I_C =$ _____

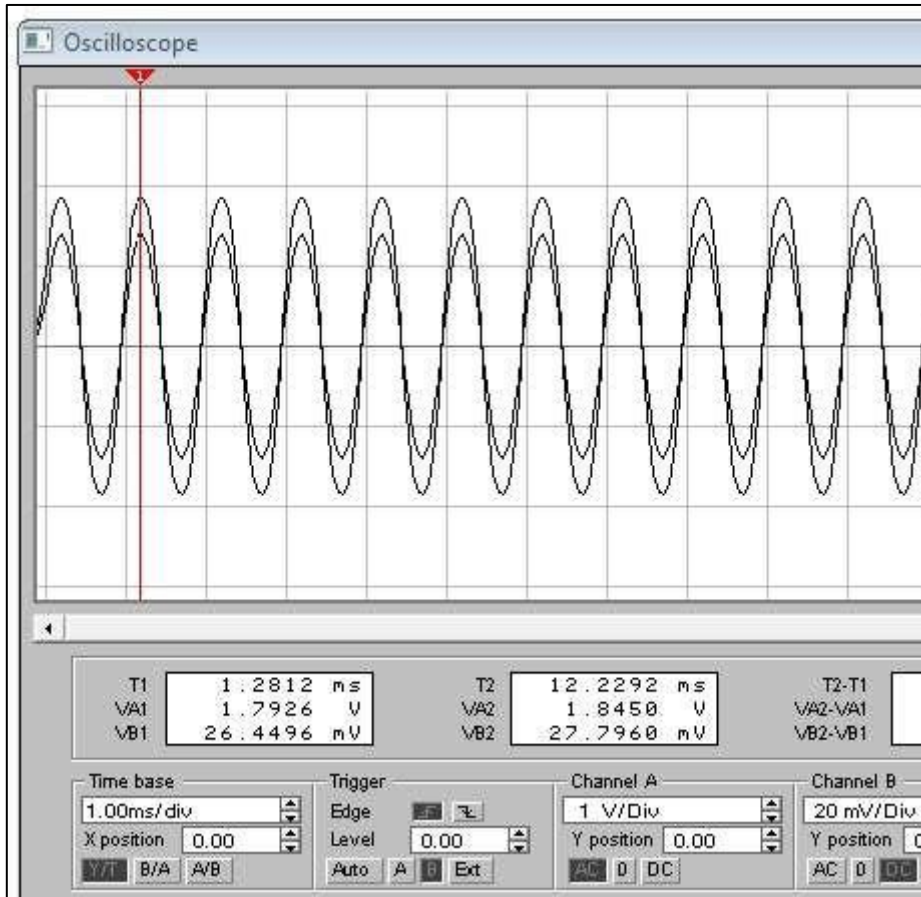
$I_o =$ _____



Observe la señal dada en el osciloscopio para la entrada y salida del amplificador. Anote estos resultados:

Entrada $v_1 =$ _____ salida $v_2 =$ _____ , la salida está en fase con la entrada?

Voltaje de entrada diferencial de: $v_{idm} =$ _____



La amplificación de voltajes es de:

$$Adm2 = v_{o2} / v_{idm} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Encuentre $Adm1$ y Adm_{dif} .

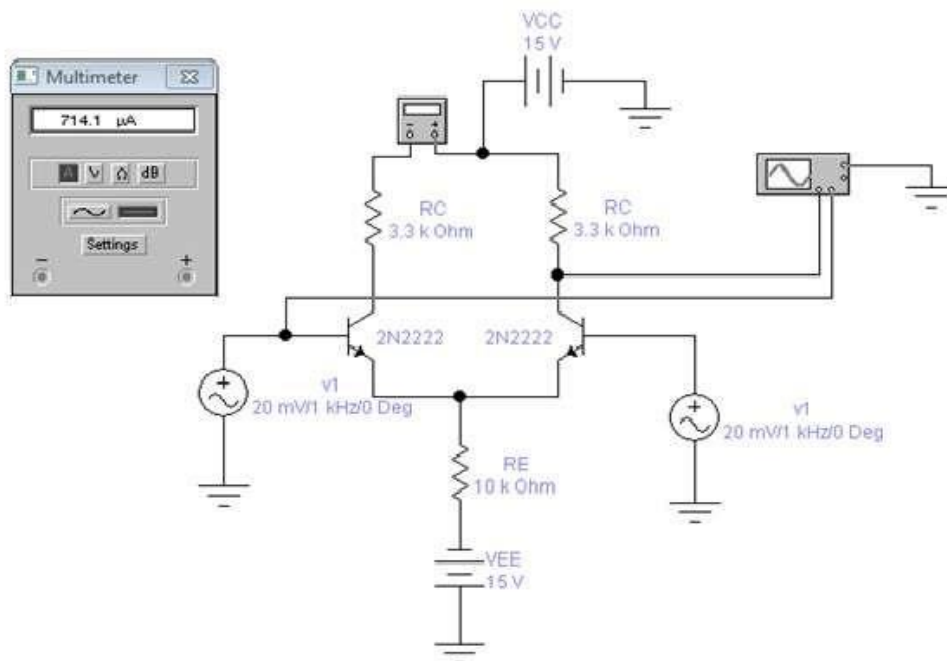
Compruebe estos resultados dados por el simulador de forma teórica.

2.3 DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO COMÚN

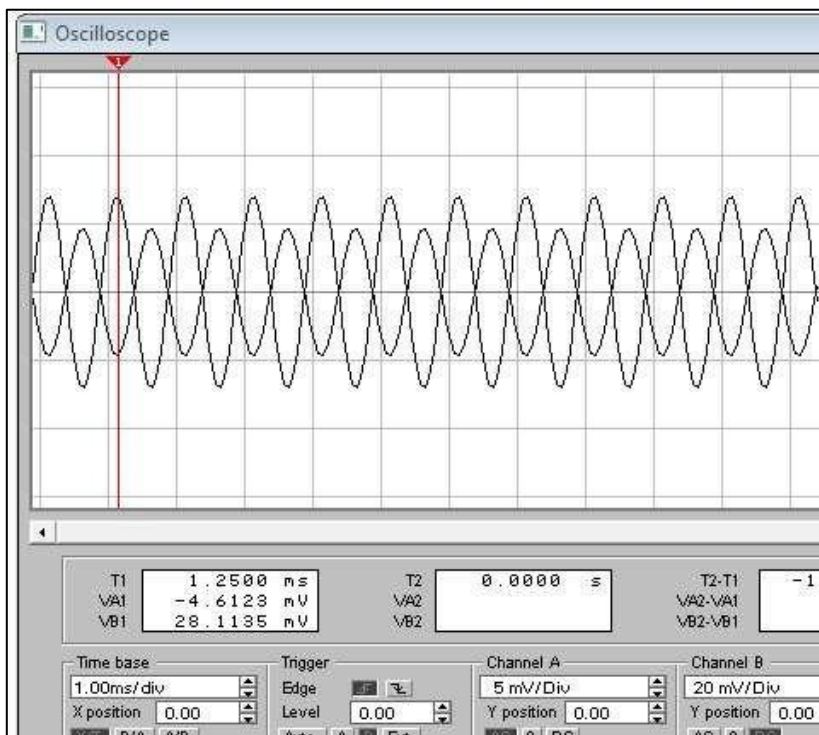
Simule el circuito de la figura con: $v_1 = v_2 = 20\text{mV}$, igual polaridad. Mida la corriente de colector y de polarización.

$$I_C = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_o = \underline{\hspace{2cm}}$$



La salida dada en el osciloscopio está desfasada 180 grados respecto a la entrada.
 $v_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $v_02 = \underline{\hspace{2cm}}$



Encuentre A_{cm1} y A_{cm2} . Compruebe los datos teóricamente.

CAPÍTULO 3. A. DIFERENCIAL- LABORATORIO

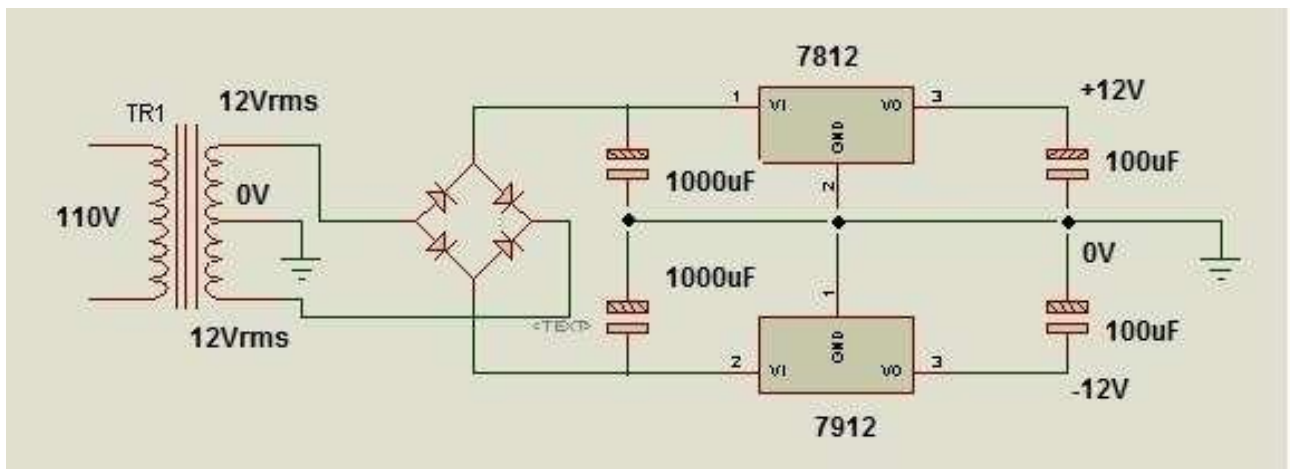
El objetivo de este laboratorio es comprobar de modo práctico la ganancia de un amplificador diferencial en modo diferencial y en modo común utilizando como polarización una resistencia de emisor y una fuente de corriente y la relación de rechazo en modo común en ambas opciones.

EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

- Osciloscopio
- Generador de señales
- Fuente de $\pm 12V$
- Multímetro
- Protoboard
- 3 transistores 2N2222
- 2 condensadores de 10 μF / 35V
- Resistencias a 1/4W de: 2x3.9K, 2x560K, 6.8K, 5.1K y 470 Ω □ Conectores

FUENTE DE VOLTAJE DE $\pm 12V$

Esta es la fuente de voltaje que vamos a utilizar en la práctica.



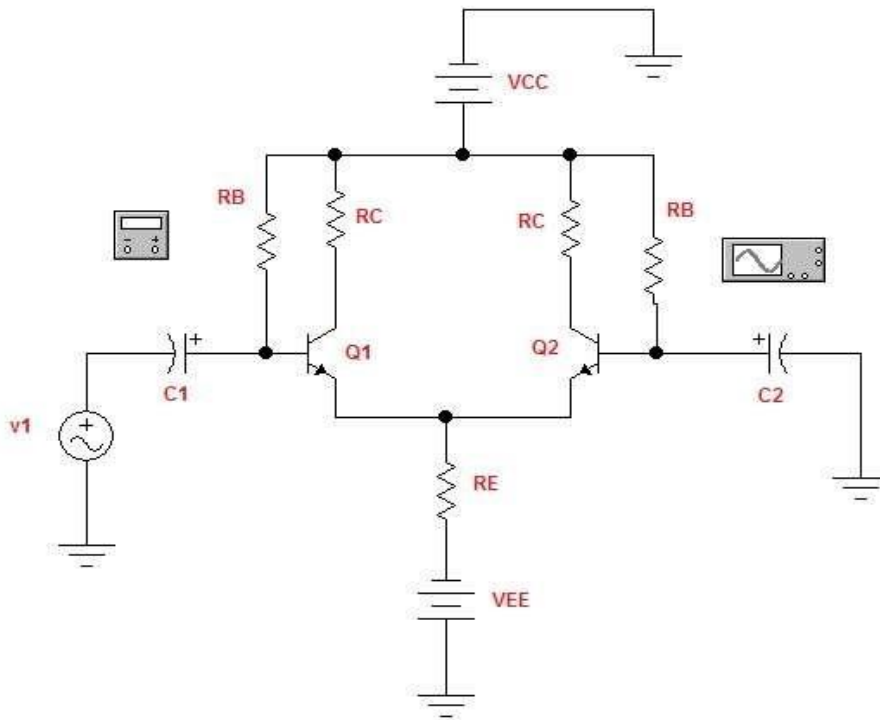
3.1 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON POLARIZACIÓN RE

Implemente el amplificador diferencial de la figura con: $V_{CC} = 12V$, $V_{EE} = -12V$,

$R_C=3.9\text{ K}\Omega$, $R_B=560\text{ K}\Omega$, $R_E=6.8\text{ K}\Omega$,

$C_1 = C_2 = 10\mu\text{F}$, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 2\text{N}2222$. Utilice una señal de entrada v_1 de 0.1V a 1 KHz .

a) Sin aplicar la señal haga las mediciones para encontrar la corriente de colector I_C y la corriente que pasa por la resistencia $R_E = I_o$. Encuentre el valor de β del transistor.



$I_C = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$, $\beta = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_o = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Aplique la señal y con el osciloscopio encuentre la ganancia en modo diferencial. Compruebe el resultado teóricamente.

$A_{dm} = \underline{\hspace{2cm}}$

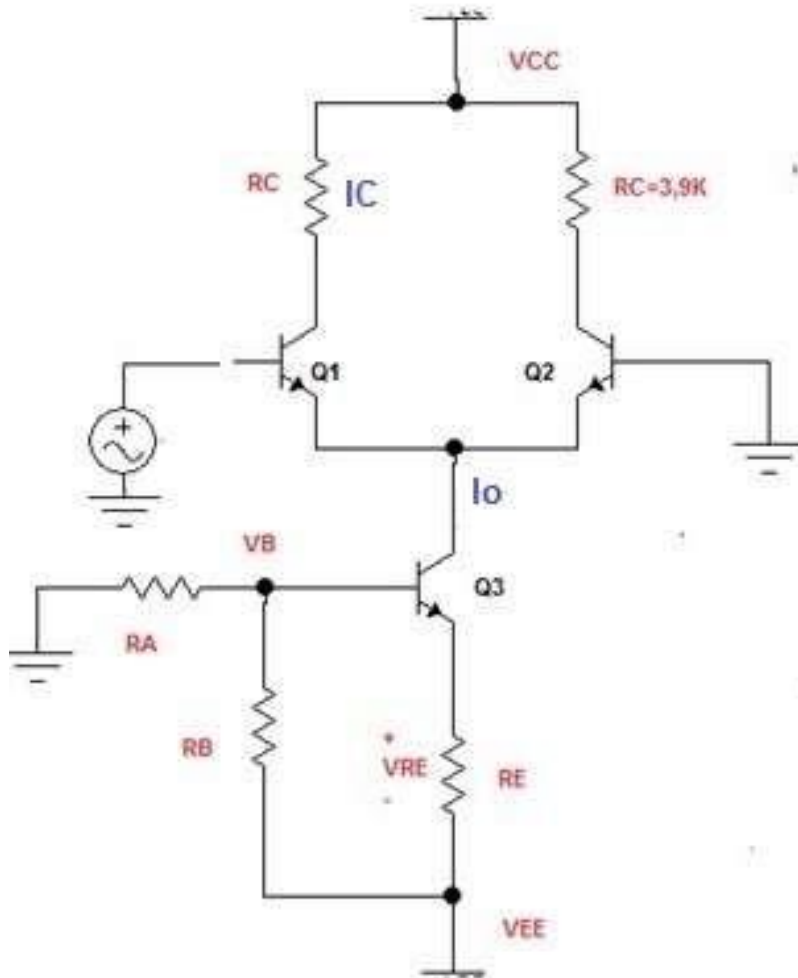
c) Aplique idéntica señal a las bases de los transistores para encontrar la ganancia en modo común. $A_{cm} = \underline{\hspace{2cm}}$

d) Encuentre la relación de MCRR en decibeles

$CMRR = \underline{\hspace{2cm}}$

3.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON FUENTE DE CORRIENTE

Repita el procedimiento anterior para el amplificador de la figura. $R_A=470\Omega$, $R_B=5.1K\Omega$, $R_E=6.8K\Omega$. No olvide la polarización de base de los transistores Q1 y Q2 y los condensadores.



$A_{dm} = \underline{\hspace{2cm}}$, $A_{cm} = \underline{\hspace{2cm}}$, $CMRR = \underline{\hspace{2cm}}$

Explique la diferencia entre los dos modelos de amplificador diferencial.

CAPÍTULO 4. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

La electrónica analógica se ha visto enriquecida con la incorporación de un nuevo componente básico: el amplificador operacional (A.O.). Aunque realmente el A.O. es un circuito electrónico evolucionado, sus características de versatilidad, uniformidad de polarización, propiedades notables y disposición en circuito integrado, convierten al mismo en un nuevo elemento electrónico capaz de intervenir en la conformación de circuitos analógicos de mayor complejidad. La utilización del A.O. en circuitería presupone un adecuado conocimiento de sus características de funcionamiento con base en determinadas características proporcionadas por el fabricante. Se estudiará, el amplificador operacional ideal y sus configuraciones básicas.

Como es costumbre se explicará su teoría, se presentarán simulaciones y actividades prácticas de laboratorio.

4.1 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL - TEORÍA

El primer amplificador operacional monolítico, que data de los años 1960, fue el Fairchild μ A702 (1964), diseñado por Bob Widlar. Le siguió el Fairchild μ A709 (1965), también de Widlar, y que constituyó un gran éxito comercial. Más tarde sería sustituido por el popular Fairchild μ A741 (1968), de David Fullagar, y fabricado por numerosas empresas, basado en tecnología bipolar.

El A.O. ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda también infinito, una impedancia de salida nula, un tiempo de respuesta nulo y ningún ruido. Como la impedancia de entrada es infinita también se dice que las corrientes de entrada son cero.

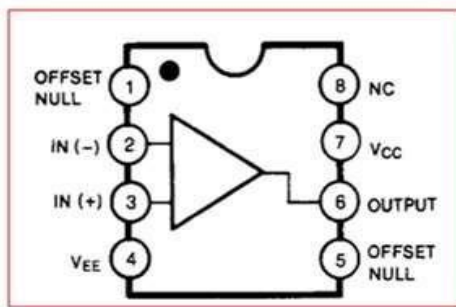
El operacional típico tiene cuatro bloques,



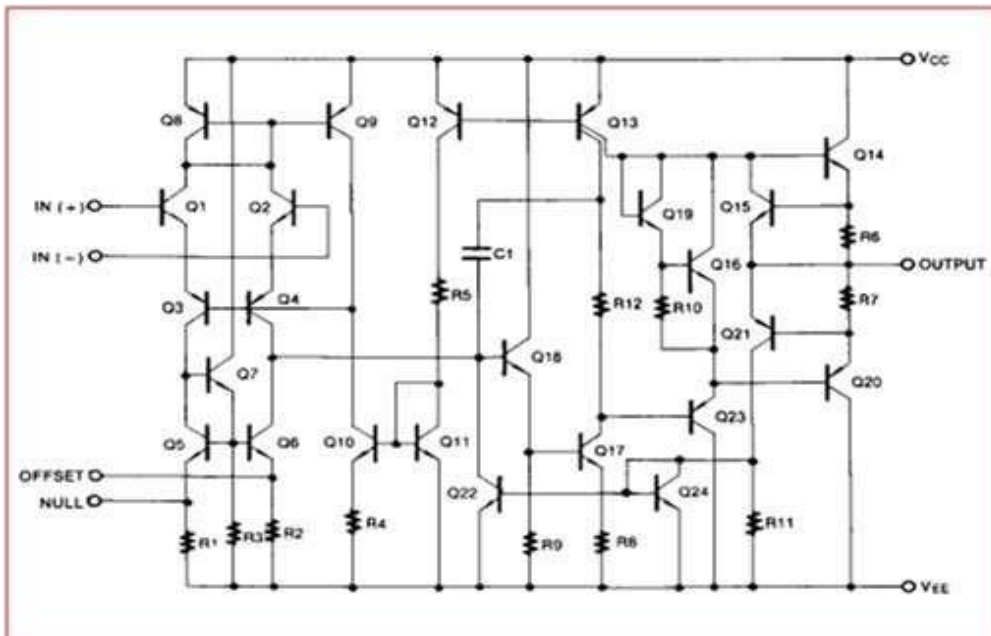
El primero es el amplificador diferencial, seguido de una etapa amplificadora lineal de alta ganancia, generalmente otro amplificador diferencial. Si la tensión de corriente continua existente en la salida del amplificador de alta ganancia, no es cero voltios cuando $v_1=v_2=0V$ se emplea un circuito desplazador de nivel tal como un amplificador cascode. La última etapa es un amplificador de salida, habitualmente uno de simetría complementaria.

4.2 LM741: UN SOLO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

El amplificador operacional LM741 es el más popular y utilizado en circuitos relacionados con la electrónica analógica. Se presenta a continuación, su diagrama de pines y su configuración interna.



Estructura interna:

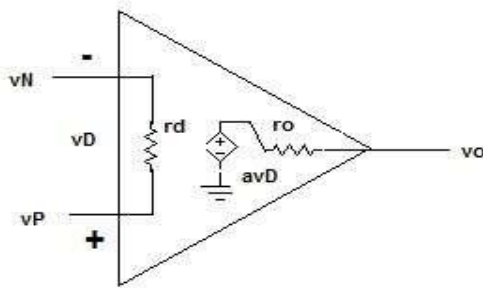


Rangos eléctricos máximos:

Absolute Maximum Ratings ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	LM741	Unit
Supply Voltage	VCC	± 18	V
Differential Input Voltage	$V_{I(\text{DIFF})}$	30	V
Input Voltage	V_I	± 15	V
Output Short Circuit Duration	-	Indefinite	-
Power Dissipation	P_D	500	mW
Operating Temperature Range	TOPR	$0 \sim + 70$	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	TSTG	$-65 \sim + 150$	$^\circ\text{C}$

Circuito equivalente:



Parámetros del operacional:

r_d : Resistencia de entrada diferencial

a : Ganancia de voltaje en lazo abierto

r_o : Resistencia de salida

v_D : Voltaje de entrada diferencial

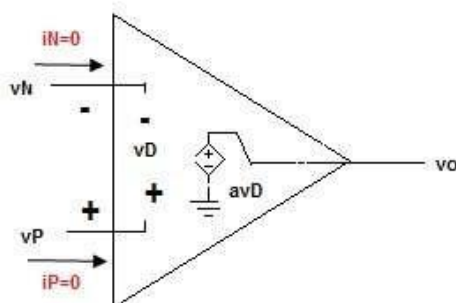
Ecuación básica:

$$V_d = v_P - v_N, v_o = av_D = a(v_P - v_N) \quad V_d = v_o / a$$

Por ejemplo, para el AO 741, $a=200.000$, si $v_o=6\text{V}$, entonces $v_D = 6/200.000=30\mu\text{V}$

El voltaje de entrada diferencial v_D es muy pequeño.

Amplificador operacional ideal:



Un AO se considera ideal si:

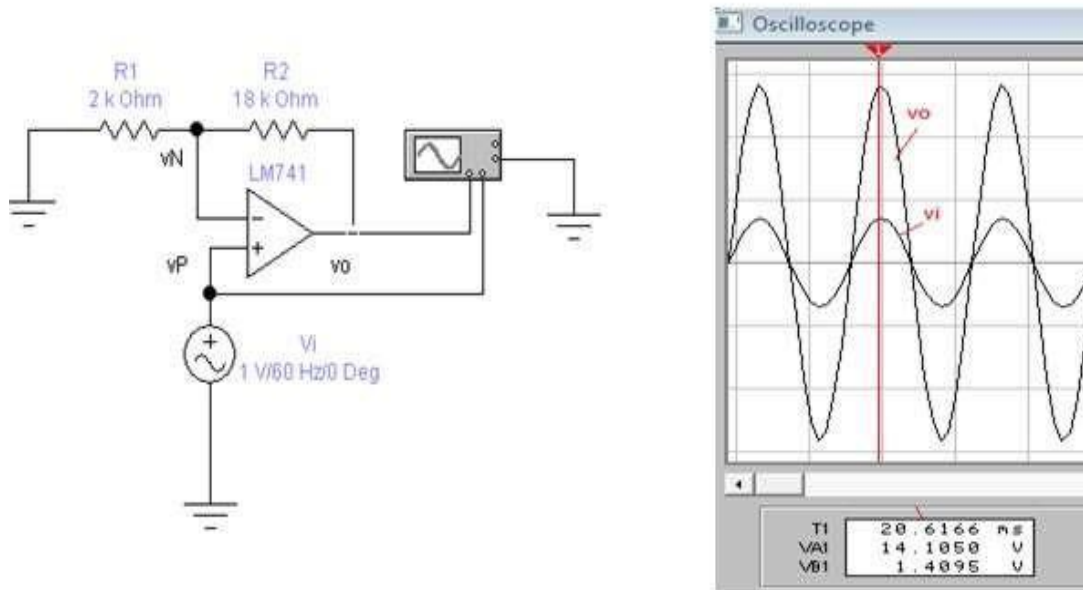
$a \rightarrow \infty, r_D \rightarrow \infty, r_o = 0, i_P = i_N = 0$

$v_N = v_P, v_D = 0$

4.3 CONFIGURACIONES BÁSICAS DE AO

A) AMPLIFICADOR NO INVERSOR

En esta configuración la señal de entrada es por vP (entrada no inversora, terminal +)



A: Amplificación de lazo cerrado a: Amplificación de lazo abierto

Ecuaciones:

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}}, \quad A_{ideal} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \quad \text{porque } a = \infty$$

Como la amplificación es positiva entonces el signo de la salida v_o es igual al signo de la señal de entrada v_i por lo tanto no invierte la polaridad, por eso se llama amplificador No inversor.

EJEMPLO

La señal de entrada $v_i=1V$, $R_1=2K$, $R_2=18K$, $a=10^4$ (o sea, 10.000) Hallar la salida real y la salida ideal.

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{\frac{1}{10^4} + \frac{2}{2+18}} = 9,99 \quad A_{ideal} = \frac{2+18}{2} = 10$$

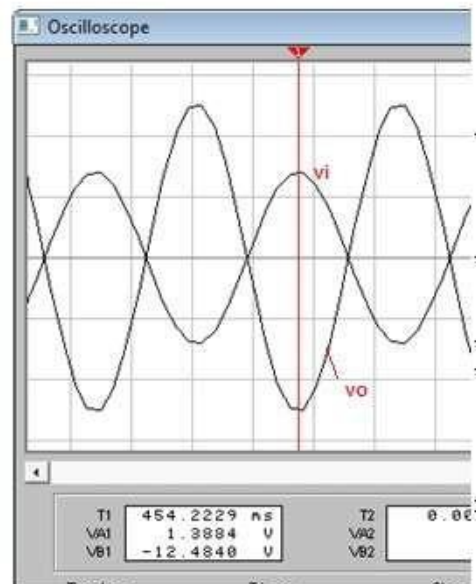
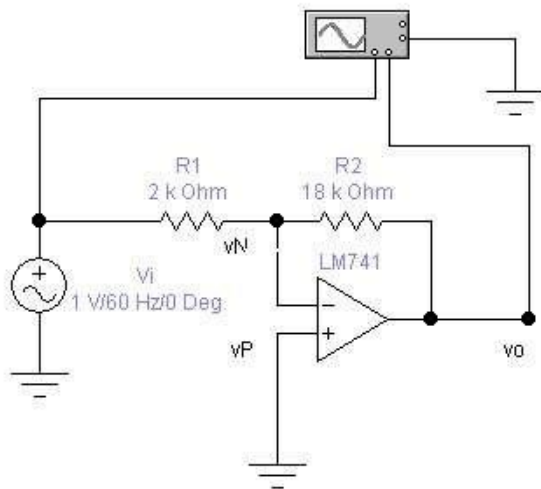
Se obtienen resultados muy aproximados. Observen la simulación.

$$A = \frac{14,1}{1,41} = 10$$

La amplificación es positiva, o sea, que la salida está en fase con la señal de entrada.

B) AMPLIFICADOR INVERSOR

En esta configuración la señal de entrada es por vN (entrada inversora, terminal -)



Ecuaciones:

$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R2}{R1 + \frac{R2}{a}}, \quad A_{ideal} = -\frac{R2}{R1}, \quad \text{porque } a = \infty$$

La amplificación ahora es negativa, lo que quiere decir que la polaridad de la salida es inversa a la de la entrada v_i (desfase de 180 grados), por tal razón se le llama Inversor.

EJEMPLO

La señal de entrada $v_i=1V$, $R_1=2K$, $R_2=18K$, $a=104$ (o sea, 10.000) Hallar la salida real y la salida ideal.

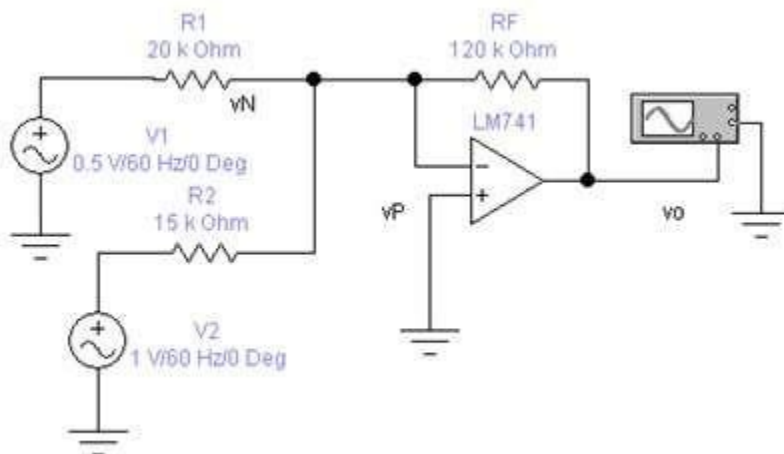
$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{18}{2 + \frac{18}{10^4}} = -8,99 \quad A_{ideal} = -\frac{18}{2} = -9$$

Observe la simulación

$$A = -\frac{12,48}{1,39} = -8,98$$

C) AMPLIFICADOR SUMADOR

Tiene dos o más entradas y una salida. Se utiliza para obtener a la salida una señal que es la suma ponderada de las entradas.



Ecuaciones:

$$v_o = -\frac{R_F}{R_1} v_1 - \frac{R_F}{R_2} v_2$$

La salida es una suma ponderada de las entradas.

EJEMPLO

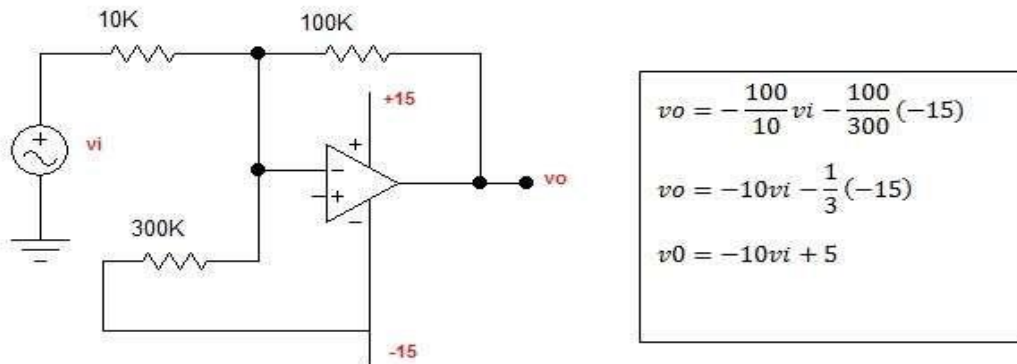
$R_1=20K$, $R_2=15K$, $R_F=120K$, $v_1=0.5V$, $v_2=1.0V$

$$v_o = -\frac{120}{20}v_1 - \frac{120}{15}v_2 = -6v_1 - 8v_2, \text{reemplazando los voltajes de entrada}$$

$$v_o = -\frac{120}{20}(0,5) - \frac{120}{15}(1,0) = -6(0,5) - 8(1,0) = -3,0 - 8,0 = -11,0V$$

EJEMPLO. Aplicación del sumador

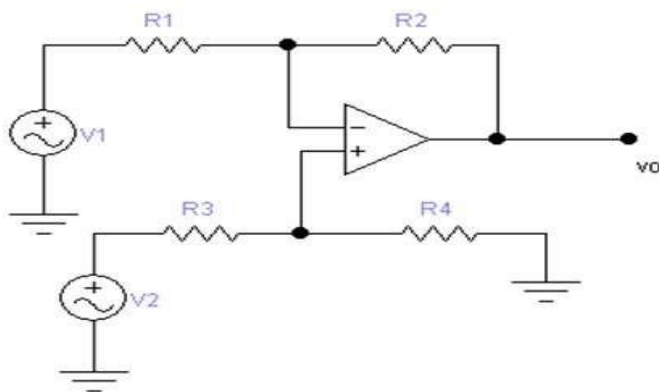
Dar un offset DC de 5V a una señal de entrada v_i .



4.4 AMPLIFICADOR DE DIFERENCIAS

Tiene una salida y dos entradas. Una se aplica a la entrada No inversora y la otra a la entrada Inversora. La salida es la diferencia de las entradas ponderadas.

$$v_o = -k_1v_1 + k_2v_2$$



Ecuación:

$$\text{Salida debida a } v_1, \quad v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} v_1$$

$$\text{Salida debida a } v_2, \quad v_{o2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} * \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

Por superposición, la salida es igual a:

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} v_1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1} * \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

EJEMPLO

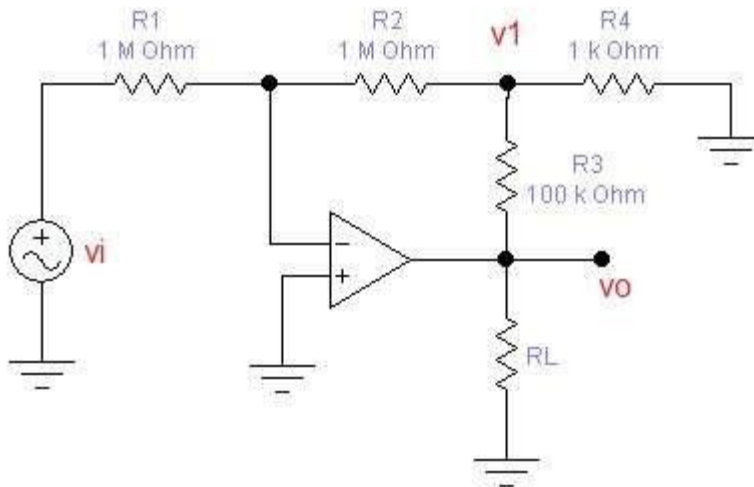
$R_1 = 100K$, $R_2 = 300K$, $R_3 = 75K$, $R_4 = 25K$, Hallar la salida del amplificador

$$v_o = -\frac{300}{100} v_1 + \frac{100 + 300}{100} * \frac{25}{25 + 75} v_2$$

$$v_o = -3v_1 + 4 * 0,25v_2, \quad v_o = -3v_1 + v_2$$

EJEMPLO

Hallar la amplificación o ganancia del siguiente amplificador.



$$v_1 = -\frac{R_2}{R_1} v_i \quad \text{Nodo } v_1: \quad v_1 \left[\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right] - v_o \left[\frac{1}{R_3} \right] = 0$$

Con estas ecuaciones se tiene:

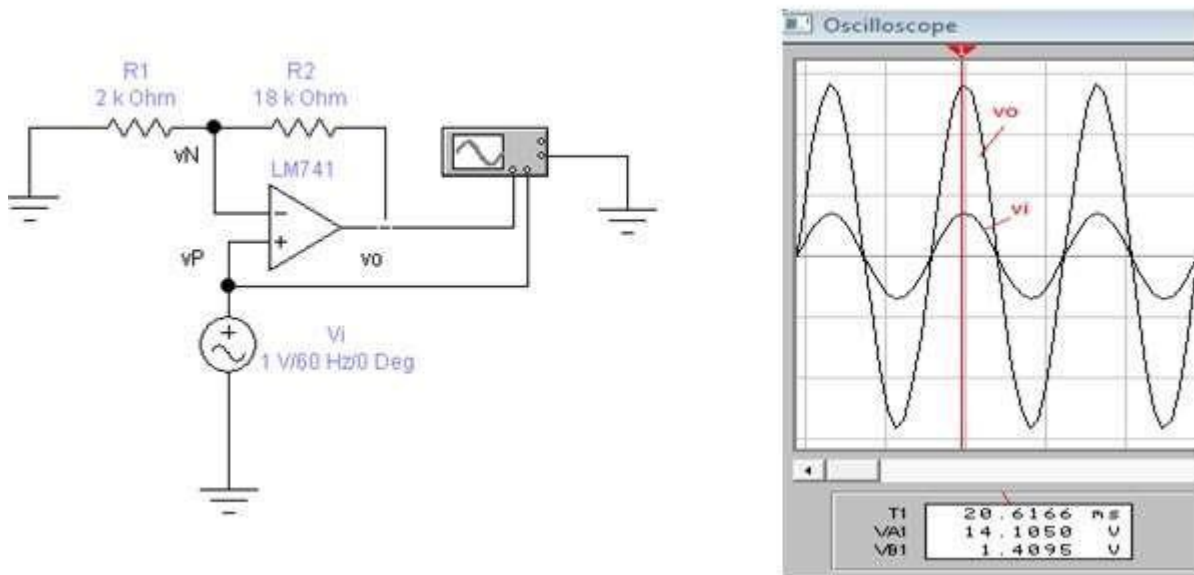
$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left[1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_4} \right] = -\frac{1M}{1M} \left[1 + \frac{100K}{1M} + \frac{100K}{1} \right]$$

$$A = -1(1 + 0,1 + 100) = -101,1$$

CAPÍTULO 5. A. OPERACIONAL- SIMULACIÓN

5.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL NO-INVERSOR

Utilizando el simulador Worbench, simule el circuito de la figura.



Según lo observado de las señales que nos muestra el osciloscopio, la amplificación es igual a:

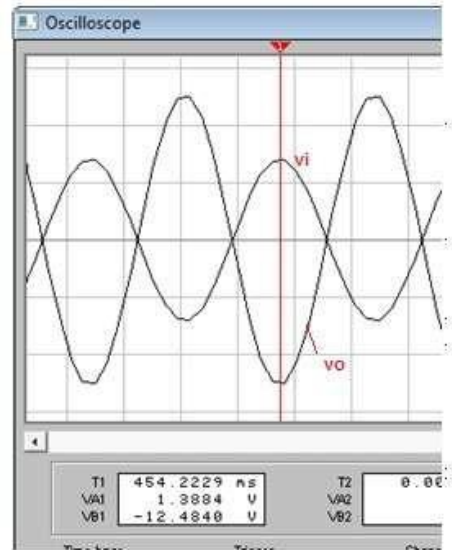
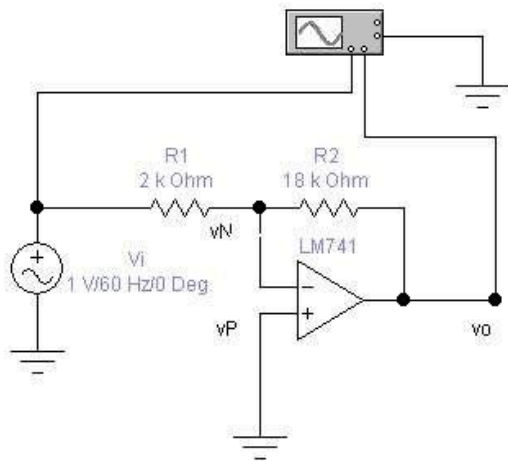
$$A_v = v_o / v_i = 14.1V / 1.4V = 10$$

Observe que la salida está en fase con la entrada.

Compruebe este resultado teóricamente.

5.2 AMPLIFICADOR OPERACIONAL INVERSOR

Simule el amplificador inversor de la figura y obtenga la amplificación.



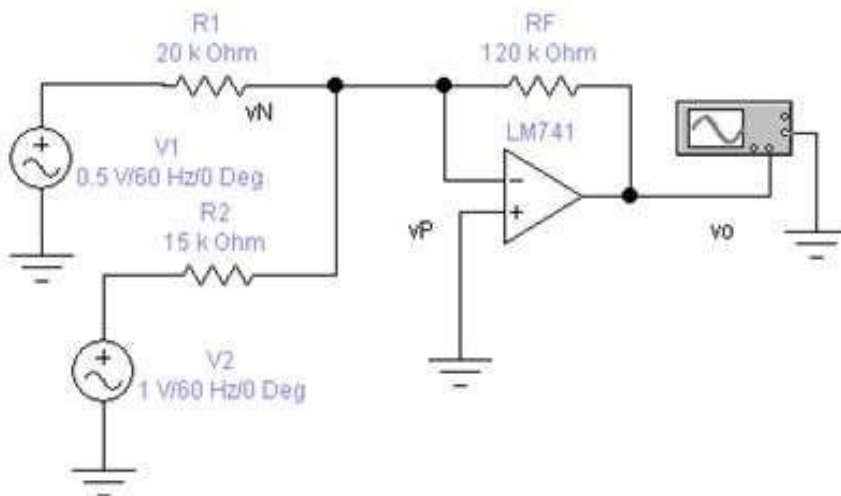
Según gráfica dada por el osciloscopio simulado, la amplificación es:

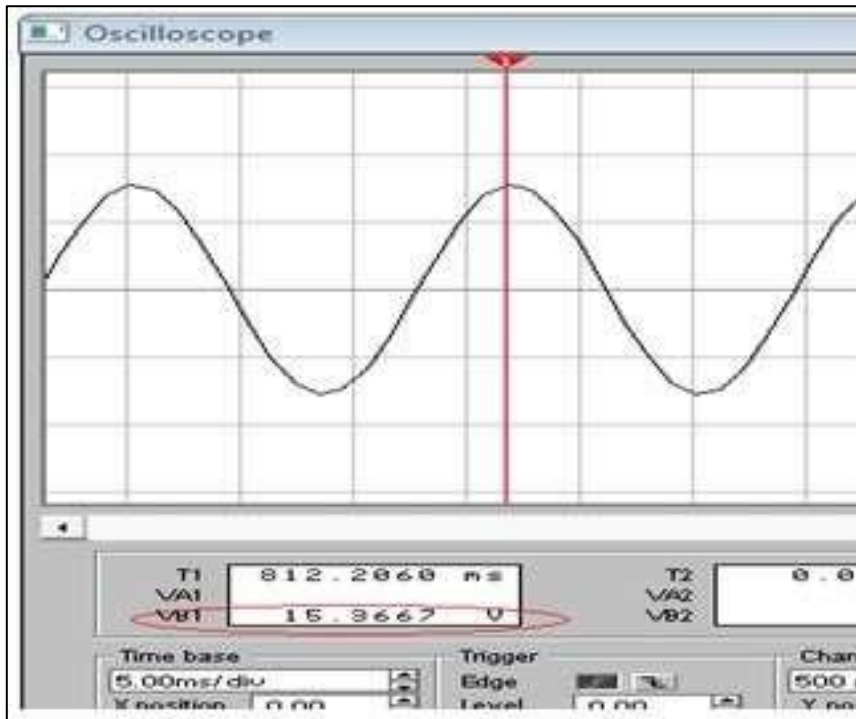
$$A_v = v_o / v_i = -12.48V / 1.38V = -9.04$$

La salida está desfasada 180 grados con respecto a la entrada (observe la gráfica) por esa razón es que la amplificación es negativa y se llama amplificador inversor.

5.3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL SUMADOR

Simule el circuito de la figura. Encuentre la señal de salida vo, si v1=0.5V y v2=1.0V





De la figura se observa que la salida es aproximadamente de 15.4 Vp. Compruebe este resultado.

CAPÍTULO 6. A. OPERACIONAL- LABORATORIO

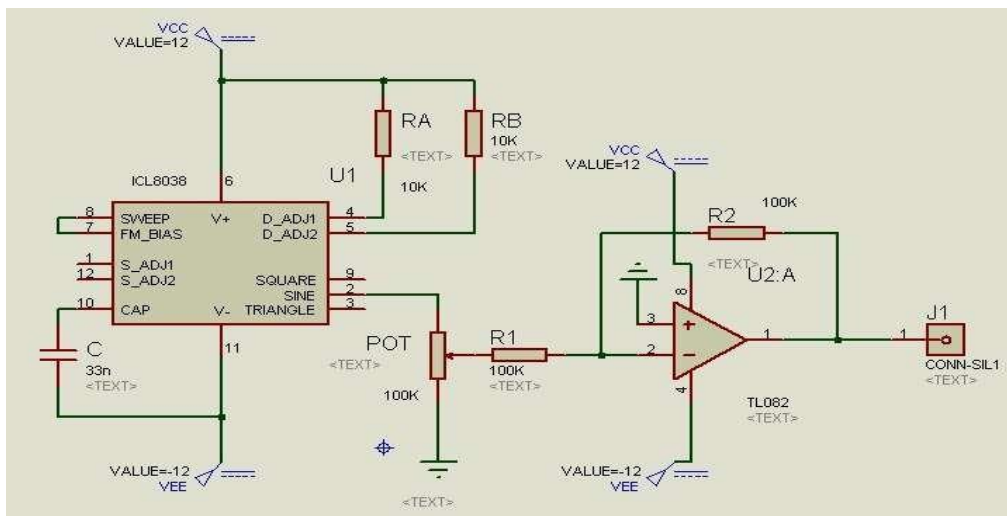
En esta práctica primero vamos a implementar el generador de señales senoidales usando el circuito integrado ICL8038 y el amplificador operacional TL082. Implementado y probado el generador se realizarán los montajes para el Amplificador No inversor, el Amplificador Inversor y el Amplificador Sumador. Este laboratorio tiene como objetivo aprender a diseñar estos amplificadores y probar la teoría que los rige después de haber comprobado su funcionamiento en las simulaciones realizadas.

EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

- Osciloscopio
- Generador de señales
- Fuente de $\pm 12V$
- Multímetro
- Protoboard
- Circuitos integrados: ICL8038, 741
- Potenciómetro de $100K\Omega$
- 1 condensador de $33nF$
- Resistencias a $1/4W$ de: $1K\Omega$, $5.1K$, $3x10K$, $2x100K$
- Conectores

6.1 GENERADOR DE SEÑAL SENO.

Realice el montaje del siguiente circuito para la generación de la señal senoidal que se va a utilizar en las prácticas. El potenciómetro permite variar la amplitud de la señal.



6.2 AMPLIFICADOR NO INVERSOR

En este amplificador usando el operacional 741 se aplica la señal por la entrada no inversora (+) y la ganancia se define por las resistencias R1 y R2 en la entrada inversora (-). Implemente el circuito en el protoboard con alimentación de $\pm 12V$.

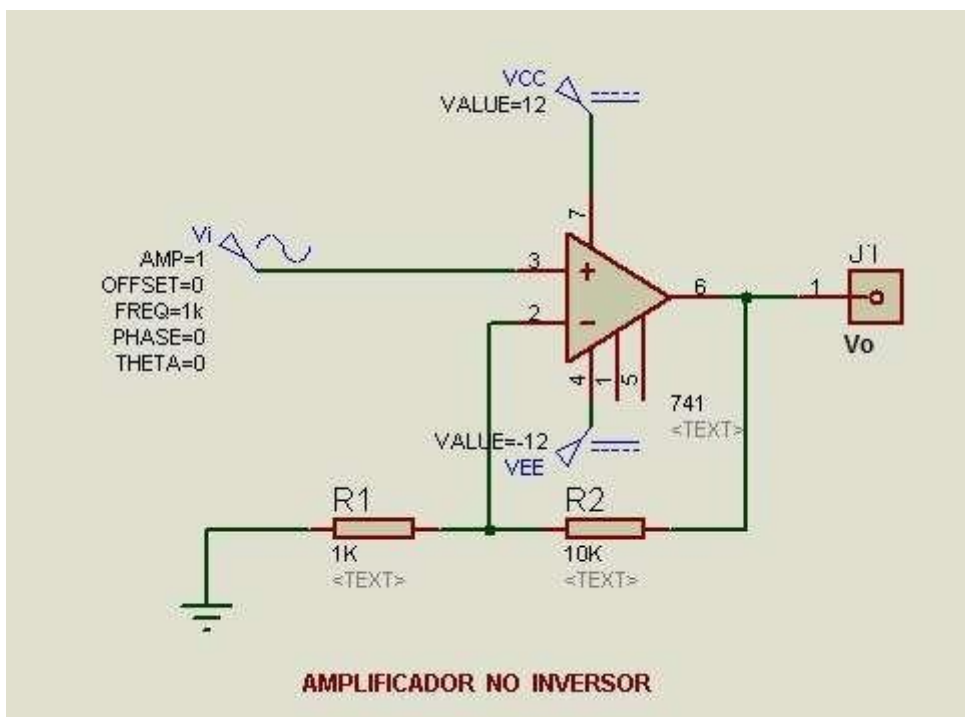
Inyecte la señal de entrada y mida su amplitud pico a pico con el osciloscopio. Ahora mida la señal de salida V_o y calcule la ganancia del amplificador.

$V_i =$ _____

$V_o =$ _____

$A_v =$ _____

Compruebe los resultados teóricamente.



6.3 AMPLIFICADOR INVERSOR

En este amplificador usando el operacional 741 se aplica la señal por la entrada inversora (-) y la ganancia se define por las resistencias R1 y R2. La entrada no

inversora (+) se conecta a tierra. Implemente el circuito en el protoboard con alimentación de $\pm 12V$.

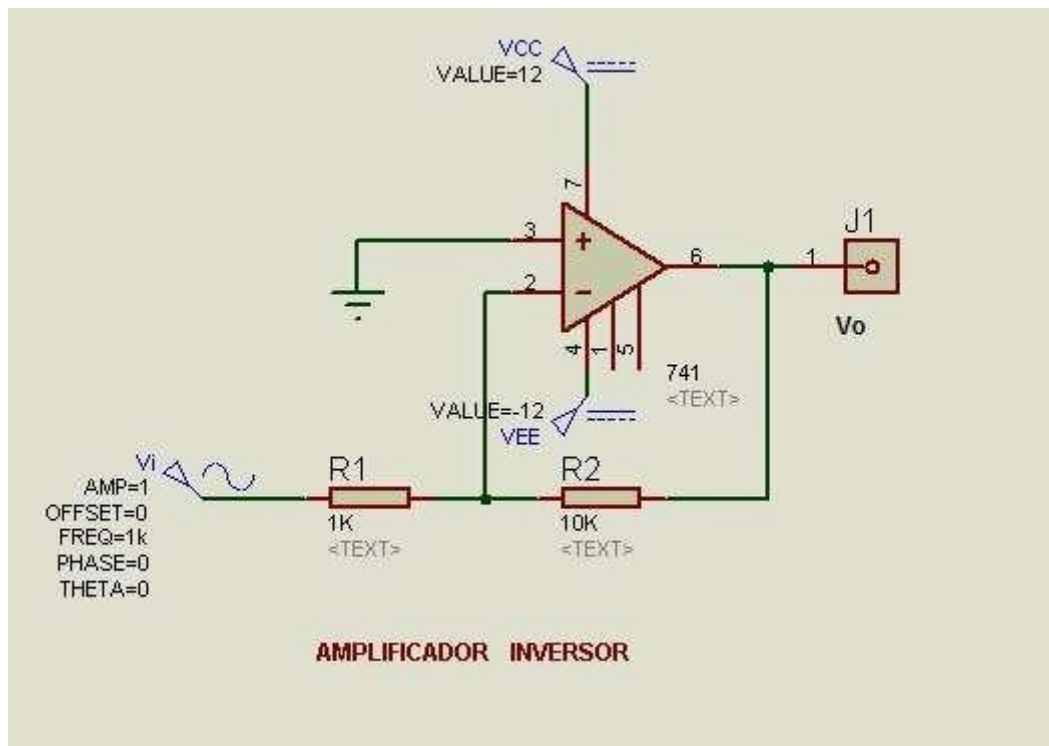
Inyecte la señal de entrada y mida su amplitud pico a pico con el osciloscopio. Ahora mida la señal de salida V_o y calcule la ganancia del amplificador.

$V_i =$ _____

$V_o =$ _____

$A_v =$ _____

Compruebe los resultados teóricamente.



6.4 AMPLIFICADOR SUMADOR

En este amplificador usando el operacional 741 se aplican las señales V_1 y V_2 por la entrada inversora (-) y las ganancias se definen por las resistencias R_1 , R_2 y R_F . La entrada no inversora (+) se conecta a tierra. Implemente el circuito en el protoboard con alimentación de $\pm 12V$.

Por simplificación del circuito inyecte la misma señal de entrada $V_1=V_2$ y mida su amplitud pico a pico con el osciloscopio. Ahora mida la señal de salida V_o y calcule la ganancia del amplificador.

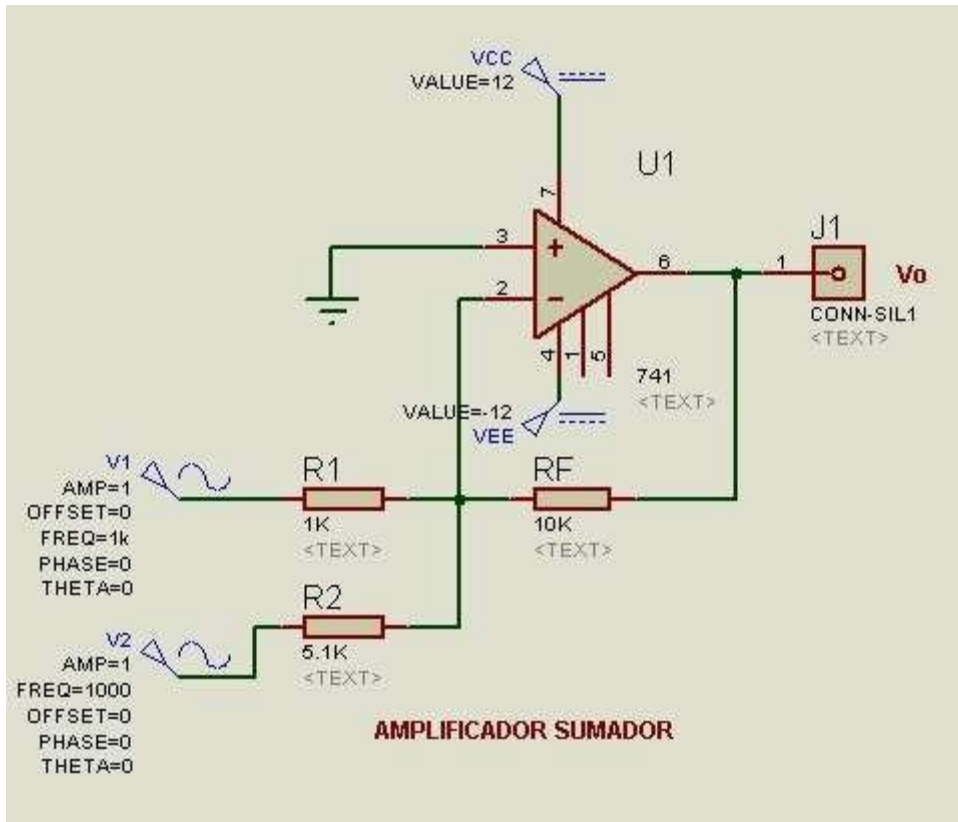
V1 = _____

V2 = _____

Vo = _____

Av = _____

Compruebe los resultados teóricamente.



7. APLICACIONES DEL A. OPERACIONAL

En esta unidad se presentarán algunas aplicaciones del amplificador operacional - AO, que son muy importantes en el diseño de dispositivos de control y automatización. Se estudiará: El convertidor de corriente a voltaje I-V, el convertidor de voltaje a corriente V-I, el amplificador de corriente, el amplificador de diferencias, el comparador de voltajes, el temporizador 555 y el generador de señales 8038

Gran parte de estas aplicaciones se han tomado del libro: FRANCO S. Diseño con amplificadores operacionales. Mc Graw Hill. 2005, que considero es el mejor sobre esta área.

La metodología para seguir es la siguiente: Teoría, Simulación, Laboratorio y Evaluación.

7.1 CONVERTIDOR CORRIENTE A VOLTAJE

Convierte una corriente de entrada al AO lin a un voltaje de salida V_o .

Convierte una corriente de entrada al AO i_{in} a un voltaje de salida v_o .

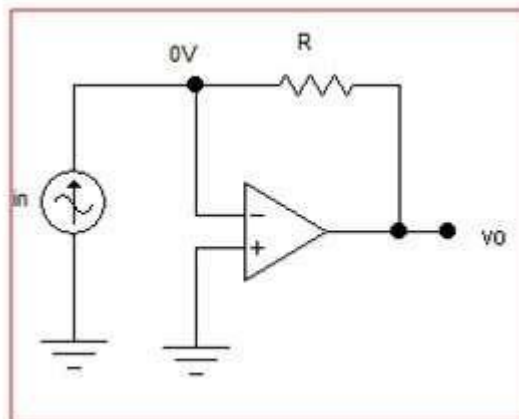
Ecuación:

$$V_o = -i_{in} * R$$

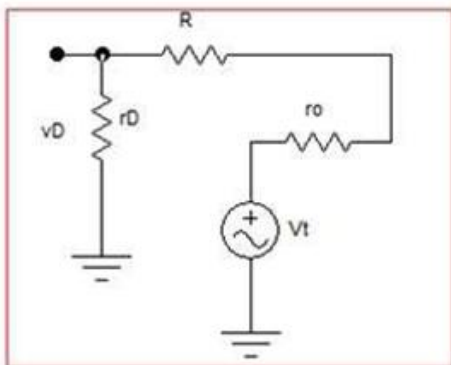
R: Ganancia

R: Sensibilidad

Por ejemplo, para una sensibilidad de 1V/mA se requiere una $R = v_o / i_{in} = 1V / 1mA = 1K\Omega$



A continuación, se presenta su circuito equivalente y un ejemplo para calcular el factor de realimentación.



v_D : Voltaje diferencial

r_D : Resistencia diferencial

r_o : resistencia de salida del operacional

V_t : Voltaje Thevenin a la salida

β : Factor de realimentación

$$\beta = \frac{v_D}{v_T} = \frac{r_D}{r_D + R + r_o}$$

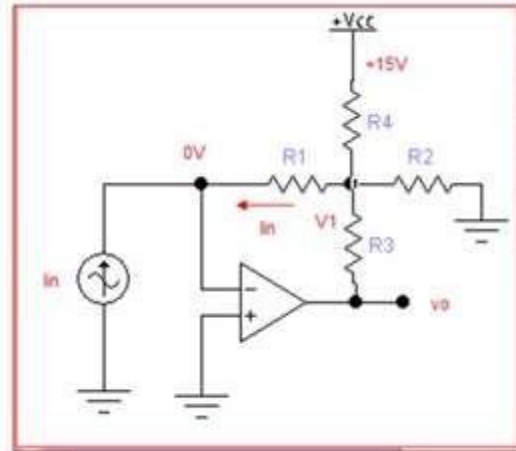
EJEMPLO:

El AO 741 tiene un $r_D=2M\Omega$, $r_o=75\Omega$, $a=200.000$, si $R=1M\Omega$

$$\beta = \frac{2000K}{2000K + 1000K + 0.075K} = \frac{2000}{3000.075} = 0.67$$

EJEMPLO DE DISEÑO

Diseñe un amplificador fotodetector, de tal forma que cuando cambie la corriente de entrada de 0 a 1 μA el voltaje de salida cambie de -5V a 5V.



a) Para $I_{in}=0$, $v_o=-5V$, entonces, $v_1=0$. Salida de un AO, v_o :

$$v_o = -5 = 15 \left[-\frac{R_3}{R_4} \right], \text{ por tanto, } R_4 = \frac{-15R_3}{-5} = 3R_3$$

$$R_4 = 3R_3$$

b) Para $I_{in}=1\mu A$, $v_o=5V$, suponemos que $v_1=1V$. Convertidor de I-V:

$$v_1 = R_1 * I_{in}, \quad R_1 = \frac{V_1}{I_{in}} = \frac{1V}{1\mu A} = 1M\Omega,$$

$$R_1=1M\Omega$$

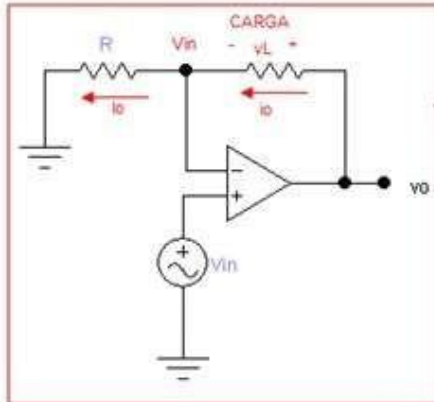
Ecuación de corrientes en nodo v_1 :

$$v_1 \left[\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right] - v_o \left[\frac{1}{R_3} \right] - 15 \left[\frac{1}{R_4} \right] = -I_{in}$$

Si $R_2 = 1K$, reemplazando $R_4 = 3R_3$, $v_1 = 1V$, $v_o = 5V$, $i_{in} = 1\mu A$, se tiene:

$$R_3 = 8.6K, R_4 = 25.8K$$

7.2 CONVERTIDOR DE VOLTAJE A CORRIENTE



Acepta un voltaje de entrada v_{in} y produce una corriente de salida i_o en la carga.

Ecuación:

$$i_o = A \cdot v_{in} = v_{in} / R$$

A: Ganancia o sensibilidad $= 1/R$

Cumplimiento de voltaje en la carga:

$$v_{oL} - v_{in} < v_L < v_{oH} - v_{in}$$

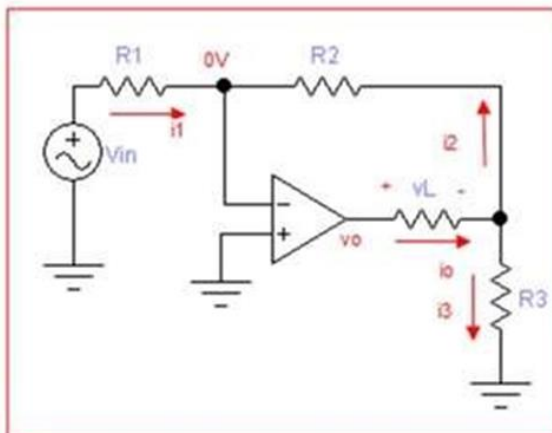
EJEMPLO: Si $v_{in} = 5V$, $R = 10K$, $V_{sat} = \pm 13V$, hallar la corriente de salida y el cumplimiento de voltaje en la carga.

$$i_o = \frac{v_{in}}{R} = \frac{5}{10K} = 0.5mA$$

Cumplimiento de voltaje:

$$-13 - 5 < v_L < 13 - 5, \text{ entonces, } -18V < v_L < 8V$$

EJEMPLO DE DISEÑO



Para el convertidor V-I de la figura, $R_1 = R_2 = 1M\Omega$, hallar el valor de R_3 , si se quiere una sensibilidad o ganancia de $1mA/V$.

SOLUCIÓN

$$i_o = A * v_{in}, \quad A = i_o / v_{in}$$

$$A = 1 \text{ mA/V} = 0.001 \text{ A/V}$$

$$A = 1/R_e, \quad R_e = 1000 \Omega = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R_e = R_1 R_3 / (R_2 + R_3)$$

$$\text{Si } R_2 \gg R_3, \quad R_e \approx R_1 R_3 / R_2$$

$$R_3 \approx R_2 R_e / R_1 = (1 \text{ M} * 1 \text{ K}) / 1 \text{ M}$$

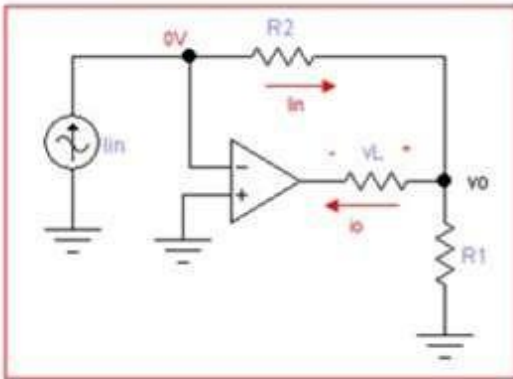
$$R_3 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$i_o = i_2 + i_3, \quad i_2 = -i_1, \quad i_o = -i_1 + i_3$$

$$i_o = -v_{in}/R_1 + v_1/R_3, \quad v_1 = -(R_2/R_1)v_{in}$$

$$i_o / v_{in} = A = 1/R_e,$$

7.3 AMPLIFICADOR DE CORRIENTE



Amplifica una corriente de entrada a la salida.

Ecuación:

$$i_o = A * i_{in}$$

$$A = 1 + (R_2/R_1)$$

A: Ganancia o sensibilidad

Cumplimiento de voltaje en la carga:

$$-(v_{oH} + R_2 i_{in}) < v_L < (v_{oL} + R_2 i_{in})$$

EJEMPLO: Si $R_1 = 2 \text{ K}$, $R_2 = 18 \text{ K}$, $V_{sat} = \pm 13 \text{ V}$, hallar la ganancia y el cumplimiento de voltaje en la carga si $i_{in} = 5 \text{ mA}$

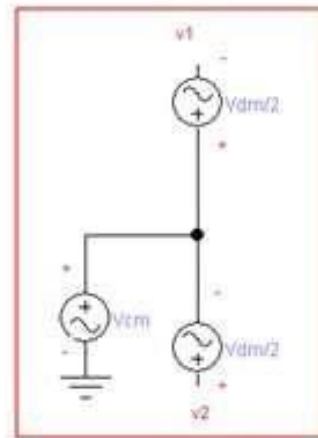
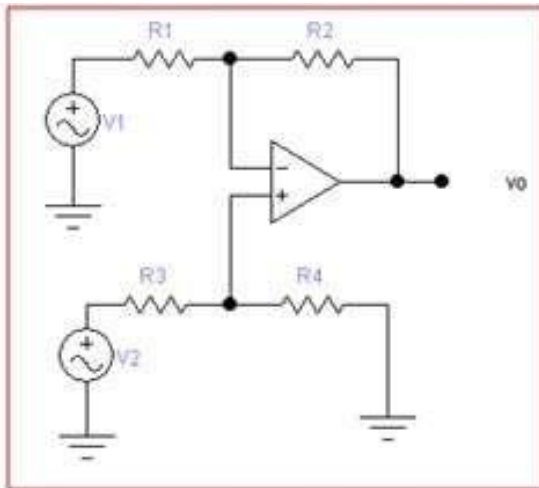
$$A = 1 + (R_2/R_1) = 1 + (18 \text{ K}/2 \text{ K}) = 1 + 9 = 10 \text{ mA/mA}$$

Cumplimiento de voltaje:

$$-(13 + 18 \text{ K} * 5 \text{ mA}) < v_L < (-13 + 18 \text{ K} * 5 \text{ mA}), \text{ entonces, } -22 \text{ V} < v_L < 4 \text{ V}$$

7.4 AMPLIFICADOR DE DIFERENCIAS

El circuito amplifica la diferencia de las dos señales de entrada: $v_o = k (v_2 - v_1)$



$R1=R3$, $R2=R4$, para un puente balanceado:

$$\frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1} \quad v_o = \frac{R2}{R1} (v2 - v1)$$

$V_o = A_{dm} * V_{dm} + A_{cm} * V_{cm}$, Modo diferencial: $V_{dm} = v2 - v1$, Modo común:

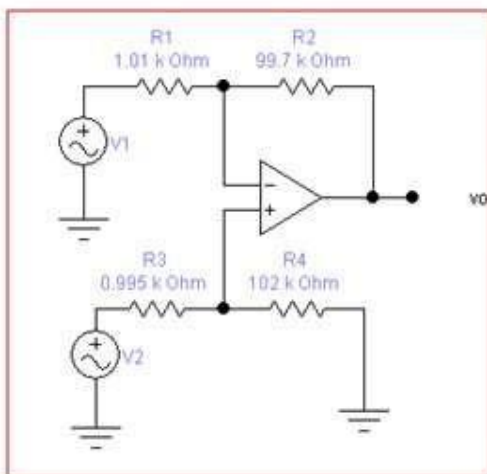
$$V_{cm} = (v1 + v2) / 2$$

O sea, $V_{dm} = R2/R1$, $V_{cm} = 0$

$$v1 = V_{cm} - V_{dm} / 2, \quad v2 = V_{cm} + V_{dm} / 2$$

EJEMPLO

Se tiene un amplificador de diferencias desbalanceado, hallar A_{dm} , A_{cm} y $CMRR$



SOLUCIÓN:

$$A_{dm} = \frac{v_o}{V_{dm}} = \frac{R2}{2R1} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{R4}{R3 + R4}$$

Reemplazando valores: $A_{dm} = 98.7$

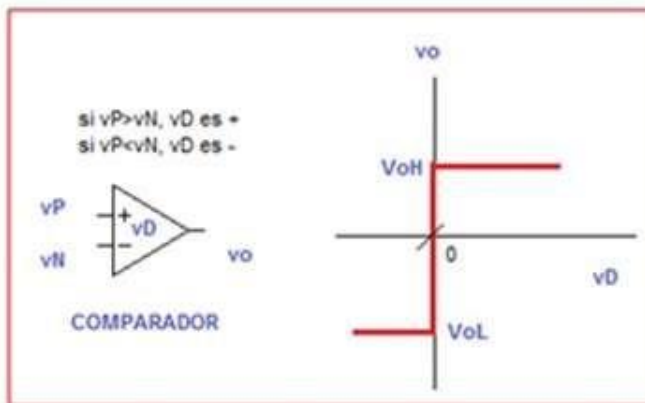
$$A_{cm} = \frac{v_o}{v_{cm}} = -\frac{R2}{R1} + \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{R4}{R3 + R4}$$

Reemplazando valores: $A_{cm} = 0.037$

$$CMRR \text{ dB} = 20 \log \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| = 20 \log \left| \frac{98.7}{0.037} \right|$$

$$= 20 \log(2667.5) = 68.7 \text{ dB}$$

7.5 COMPARADORES DE VOLTAJE: LM311

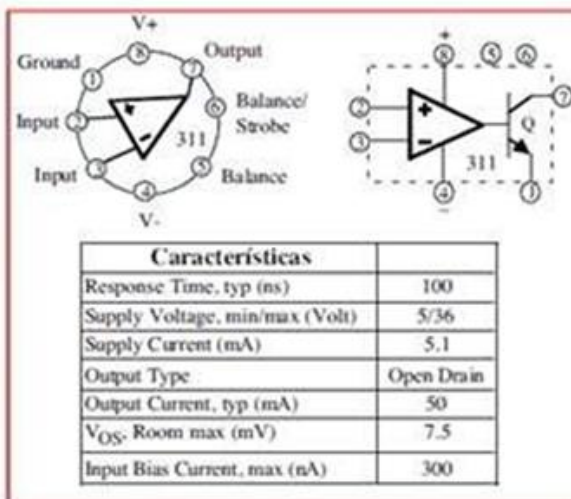
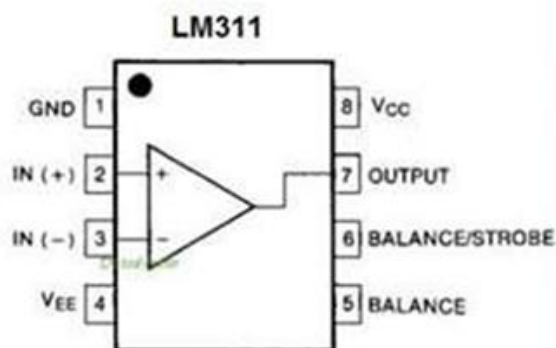


Los comparadores se usan para diseñar Detectores de nivel, Detectores de umbral, Detectores de ventana, Control ON_OFF, etc.. Los circuitos integrados AO más utilizados son el LM311 Y el LM339.

Su función es comparar un voltaje v_P en una de sus entradas con el voltaje v_N de la otra entrada y obtener como salida un voltaje bajo V_{oL} o alto V_{oH} de acuerdo con:

Si $v_P < v_N$, entonces, $v_o = V_{oL}$
 Si $v_P > v_N$, entonces, $v_o = V_{oH}$

DETECTOR DE UMBRAL

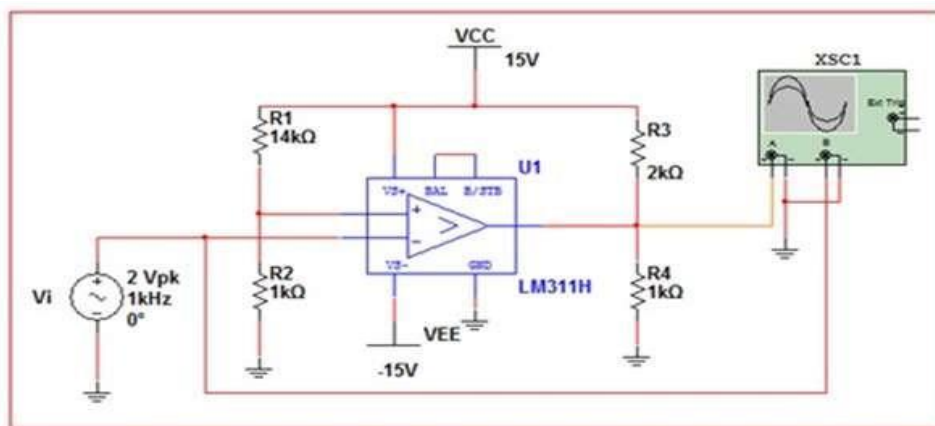


Los comparadores se usan para diseñar Detectores de nivel, Detectores de umbral, Detectores de ventana, Control ON_OFF, etc..

Los circuitos integrados AO más utilizados son el LM311 Y el LM339 que tiene 4 comparadores.

EJEMPLO

Utilizando el comparador LM311 con fuentes reguladas de $\pm 15V$, diseñe un detector de umbral tal que para $V_i > 1V$, la salida $v_o = 0$ y para $V_i < 1V$, la salida sea de $v_o = 5V$.



$I = 1mA$, entonces $R = 15V/1mA = 15K$, se escoge $R1 = 1K$ y $R2 = 14K$
 $R' = R3 + R4$, si $I' = 5mA$, entonces, $v_o = 5V$, $R4 = 1K$, $R3 = 2K$

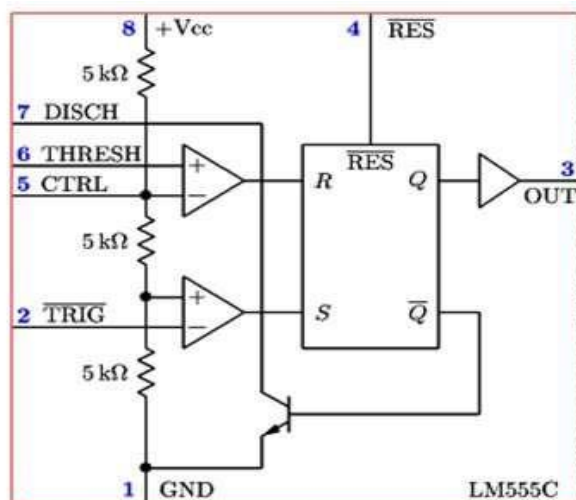
7.6 TEMPORIZADOR: LM 555

Consta de a) Tres resistencias idénticas B) dos comparadores y un interruptor transistorizado. Las resistencias establecen el umbral de comparación entre V_{TH} y V_{TL} .

$$V_{TH} = (2/3)V_{CC}, \quad V_{TL} = (1/3)V_{CC}$$

Por medio del pin 5 se puede variar el valor de V_{TH} , en cualquier caso siempre $V_{TL} = (1/2)V_{TH}$.

Si el voltaje en el pin 2 (disparo) cae por debajo de V_{TL} , el transistor de salida se apaga y si el pin 6 (umbral) se eleva por encima de V_{TH} se enciende. El pin 4 (reset) pone la salida baja sin importar las condiciones de las entradas de los comparadores.



7.7 APLICACIÓN ASTABLE CON 555

Se quiere un multivibrador astable que genere una señal cuadrada de frecuencia 40KHz y un ciclo de trabajo (duty) del 75%

SOLUCIÓN

$$f_o = \frac{1.44}{(RA + 2RB)C}, \quad D\% = 100 \frac{RA + RB}{RA + 2RB}$$

Sea C=1 nF, reemplazando

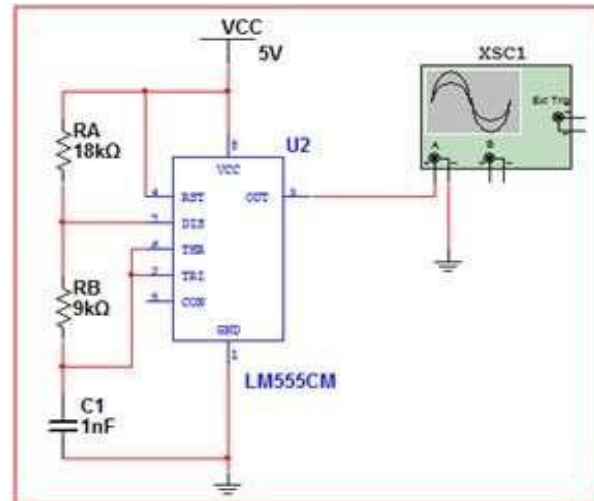
$$RA + 2RB = \frac{1.44}{f_o C} = \frac{1.44}{40 \times 10^3 \times 10^{-9}}$$

$$= 0.036 \times 10^3 = 36K\Omega$$

$$75 = 100 \frac{RA + RB}{RA + 2RB}$$

$$0.75RA + 1.5RB = RA + RB$$

$$RA = 2RB$$



Resolviendo las dos ecuaciones:

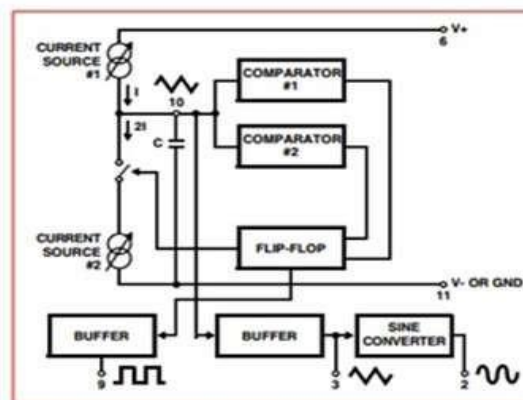
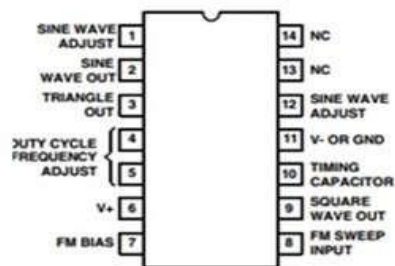
$$RA + 2RB = 36K\Omega \quad y \quad RA = 2RB$$

$$RB = 9K, \quad RA = 18K$$

7.8 GENERADOR DE SEÑALES: 8038

El ICL8038 generador de forma de onda es un circuito integrado por Intersil diseñado para generar señales senoidales, rectangulares y triangulares. La señal triangular son producidas por la carga y descarga de un condensador con corrientes constantes. Las ondas triangulares se convierten en ondas sinusoidales que implican una red no-lineal de transistores y resistencias de película delgada.

La frecuencia de salida se establece por resistencias o condensadores y se cubre un rango de 0,001 Hz a más de 300 kHz. Una tensión de control externa lograría la frecuencia de barrido o modulación de frecuencia.



APLICACIÓN DEL 8038

Generar una señal senoidal de 10 KHz.

La frecuencia de oscilación si $R_A=R_B=R$ se obtiene de:

$$f_o = \frac{0.3}{RC} \quad D\% = 50\%$$

$$R_A = \frac{V_{CC}/5}{I_A}, \quad R_B = \frac{V_{CC}/5}{I_B}$$

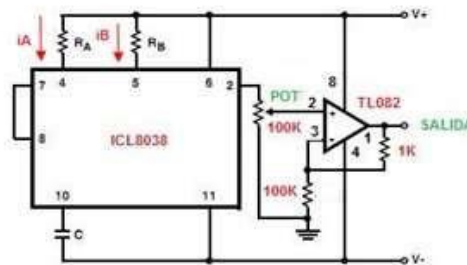
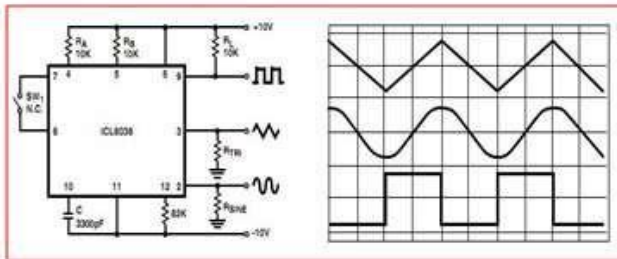
$$I_A = I_B = I \quad (1 \mu A \text{ a } 1 mA)$$

Tomando $I_A=I_B=0.1 \text{ mA}$

$$R = (15/5)V / 0.1mA = 30K$$

Si $f_o = 10KHz$

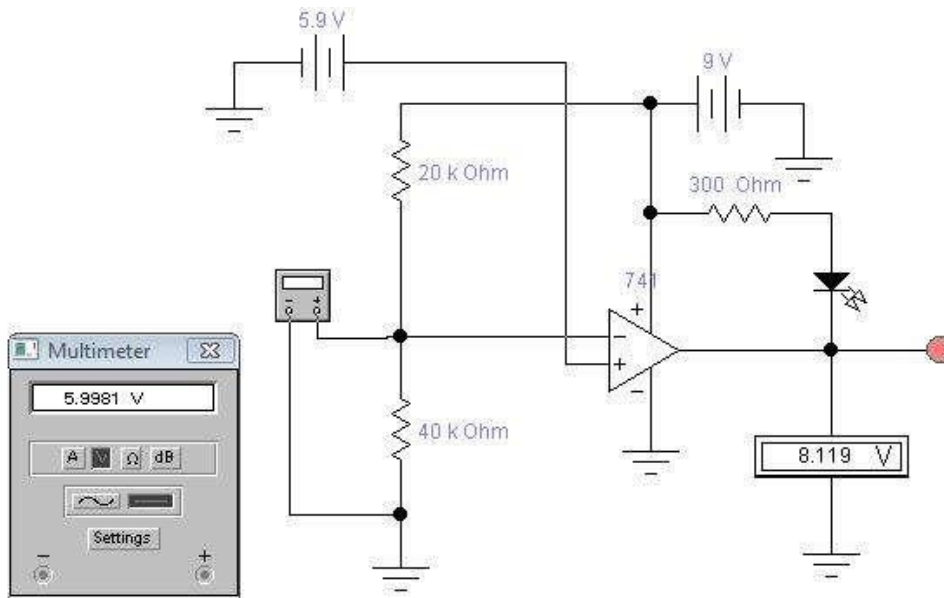
$$C = \frac{0.3}{Rf_o} = \frac{0.3}{30K \times 10K} = 1nF$$



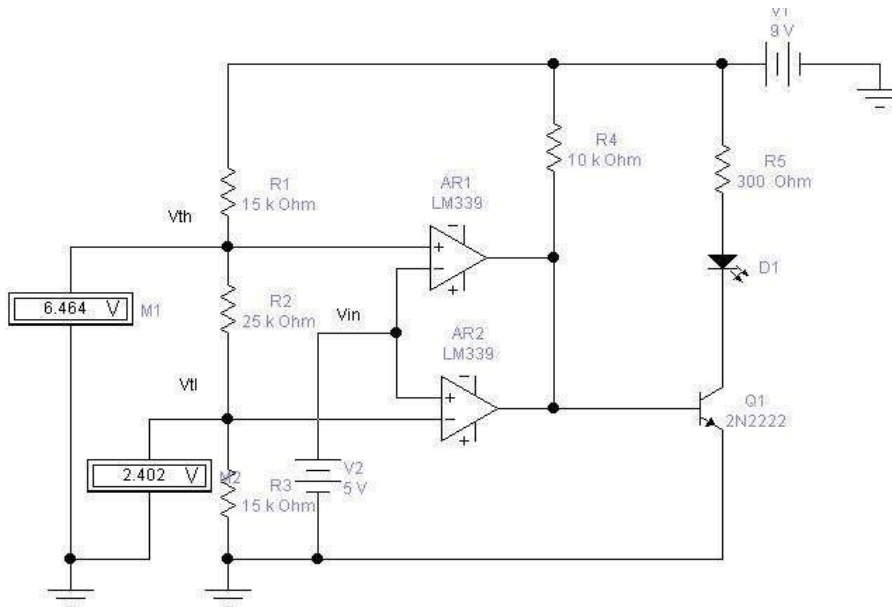
CAPÍTULO 8. APLICACIONES DEL AO - SIMULACIÓN

8.1 DETECTOR DE NIVEL

Simule el circuito de la figura. Mida el voltaje de la entrada inversora $V_{in} (-)$ que hace de voltaje de umbral o voltaje de referencia y varíe el voltaje aplicado a la entrada no inversora $V_{in} (+)$. Observe qué sucede cuando $V_{in} (+)$ es menor a la $V_{in} (-)$ y cuando es mayor. Explique el funcionamiento del circuito.



8.2 DETECTOR DE UMBRAL



Simule el circuito de la figura que corresponde a un Detector de umbral. En este caso, el umbral se encuentra entre V_{th} y V_{tl} . Explique el funcionamiento del circuito y hacer los cálculos teóricos correspondientes.

CAPÍTULO 9. APLICACIONES DEL AO - LABORATORIO

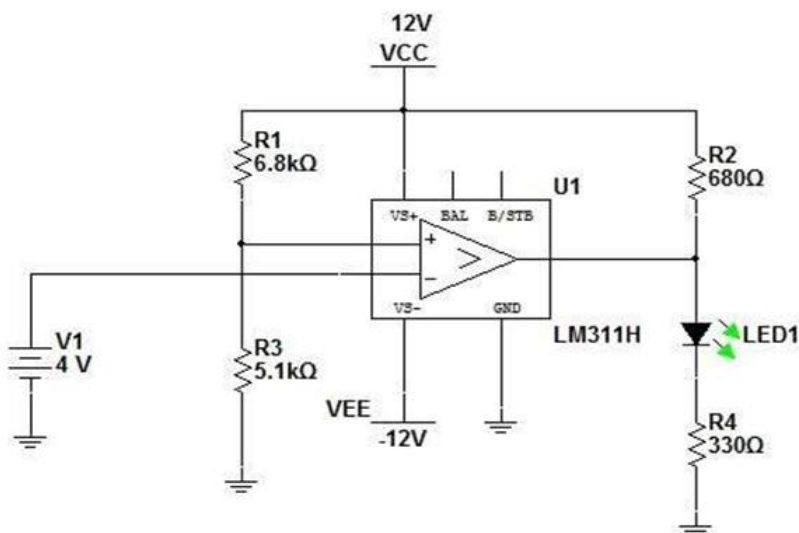
En esta práctica primero vamos a implementar el detector de nivel o umbral y el detector de ventana. Este laboratorio tiene como objetivo aprender a diseñar estos comparadores y probar la teoría que los rige después de haber comprobado su funcionamiento en las simulaciones realizadas.

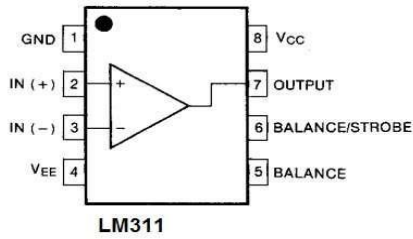
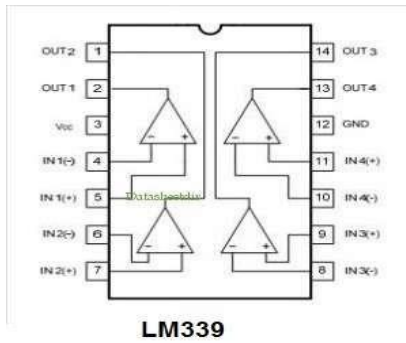
EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

- Fuente de $\pm 12V$
- Fuente DC variable
- Multímetro
- Protoboard
- Circuitos integrados: LM311, LM339
- Transistor 2N2222
- Un LED
- Resistencias a 1/4W de: 10K Ω , 6.8K Ω , 5.1K, 3.9 K Ω , 2.7K Ω , 1K Ω , 680 Ω , 330 Ω , Conectores

9.1 DETECTOR DE NIVEL

Implemente el circuito comparador de la figura. Analizar el circuito calculando las corrientes y voltajes. Varíe la fuente DC de 2 a 8V y observe el LED. Cuál es el valor del V_{ref} ?. Compruebe este resultado teóricamente. Explique el funcionamiento.

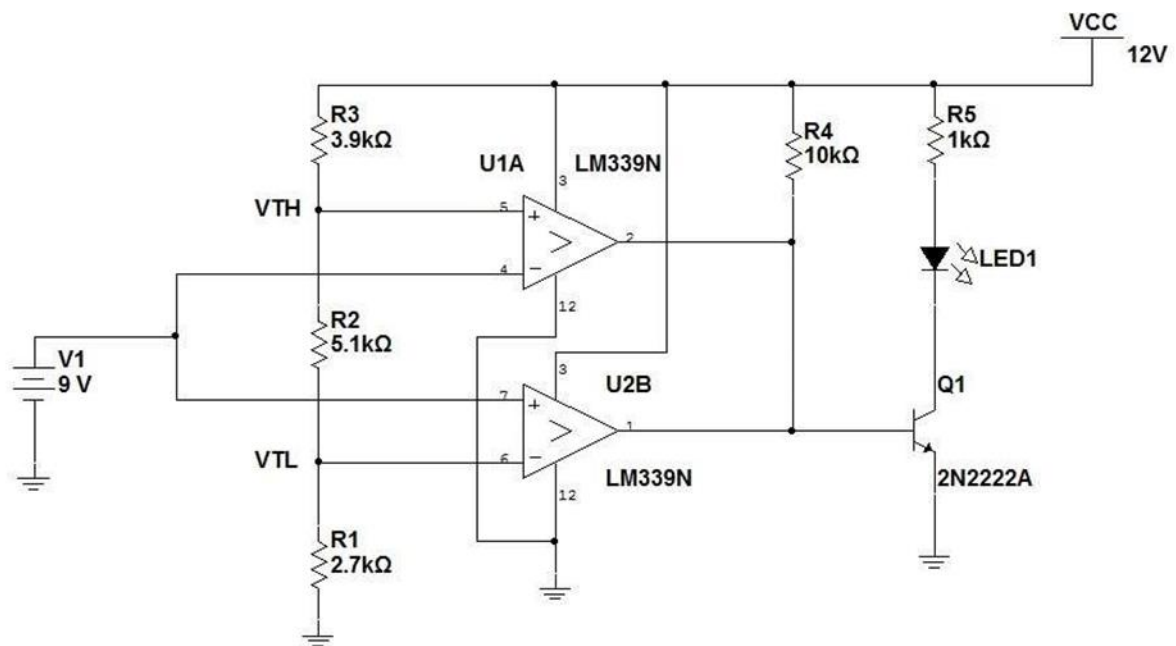




9.2 DETECTOR DE VENTANA

Implemente el circuito comparador de la figura. El LM339 tiene cuatro comparadores de los cuales solamente se van a utilizar dos. La ventana, tiene una sola fuente de polarización.

Analice el circuito calculando las corrientes y voltajes. Varíe la fuente DC de 2 a 8V y observe el LED. Cuáles son los valores límites de la ventana V_{TH} y V_{TL} ?. compruebe teóricamente. Explique el funcionamiento del circuito.



CAPÍTULO 10. FILTROS ACTIVOS

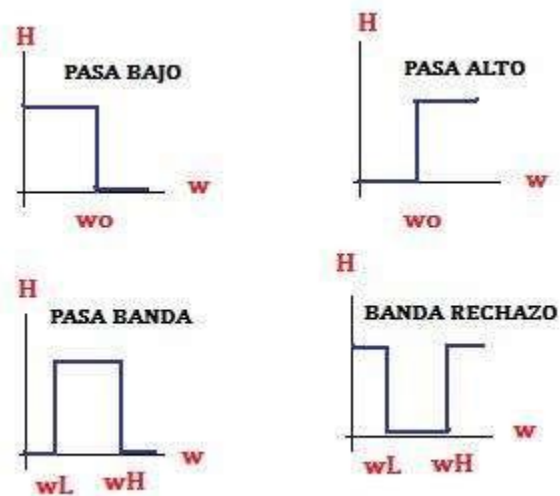
Un filtro analógico es un circuito que procesa señales sobre una base que depende de la frecuencia. Pueden ser filtros pasa bajos, pasa altos, pasa banda o banda rechazo, según deje pasar una gama de frecuencias de una determinada señal. Su comportamiento se llama respuesta en frecuencia y se expresa mediante una función de transferencia.

En esta unidad usted aprenderá a realizar los diferentes tipos de filtros activos con amplificadores operacionales tanto de primero como de segundo orden: Filtros pasa bajas, pasa altos, pasa bandas y banda rechazo (Notch). Los filtros procesan señales que dependen de la frecuencia, su comportamiento se mide por su respuesta en frecuencia y se expresa por una función de transferencia, de la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{a(m) * s^m + a(m - 1) * s^{m-1} + \dots + a(1) * s + a(0)}{b(n) * s^n + a(n - 1) * s^{n-1} + \dots + b(1) * s + b(0)}$$

s es una variable que depende de la frecuencia angular ω , a y b son los coeficientes del filtro.

A continuación, se presentan los diferentes tipos de filtros con su curva de transferencia o respuesta en frecuencia para casos ideales.



El filtro pasa bajo deja pasar las señales con frecuencias hasta ω_0 (frecuencia de corte), el pasa alto las señales que tengan frecuencias superiores a ω_0 , el pasa banda las señales con frecuencias entre ω_L y ω_H y el banda rechazo rechaza las señales entre ω_L y ω_H .

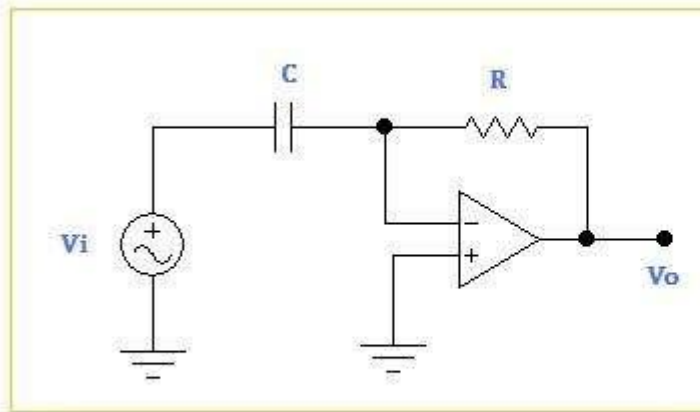
El diseño de filtros de orden mayor es más complejo, utilizan algoritmos como el de Butterworth, Chevyshev, Bessel, entre otros, pero Microchip tiene un software para el diseño de estos filtros y se encuentra en el siguiente enlace:

http://www.microchip.com/pagehandler/en_us/devtools/filterlab-filter-designsoftware.html

10.1 FILTROS DE PRIMER ORDEN

A) DIFERENCIADOR INVERSOR

En el circuito de la figura se tienen un filtro de primer orden pasa alto o diferenciador con sus correspondientes ecuaciones.



$$V_o = RC \cdot s \cdot V_i,$$

Función de transferencia

$$H(s) = V_o / V_i = RC \cdot s$$

$$H(j\omega) = RC \cdot j\omega$$

Si ω_0 = frecuencia de corte

$$\omega_0 = 1 / (RC), \text{ entonces,}$$

$$H(\omega) = -j\omega / \omega_0$$

Magnitud $H = \omega / \omega_0$

Angulo de fase = -90°

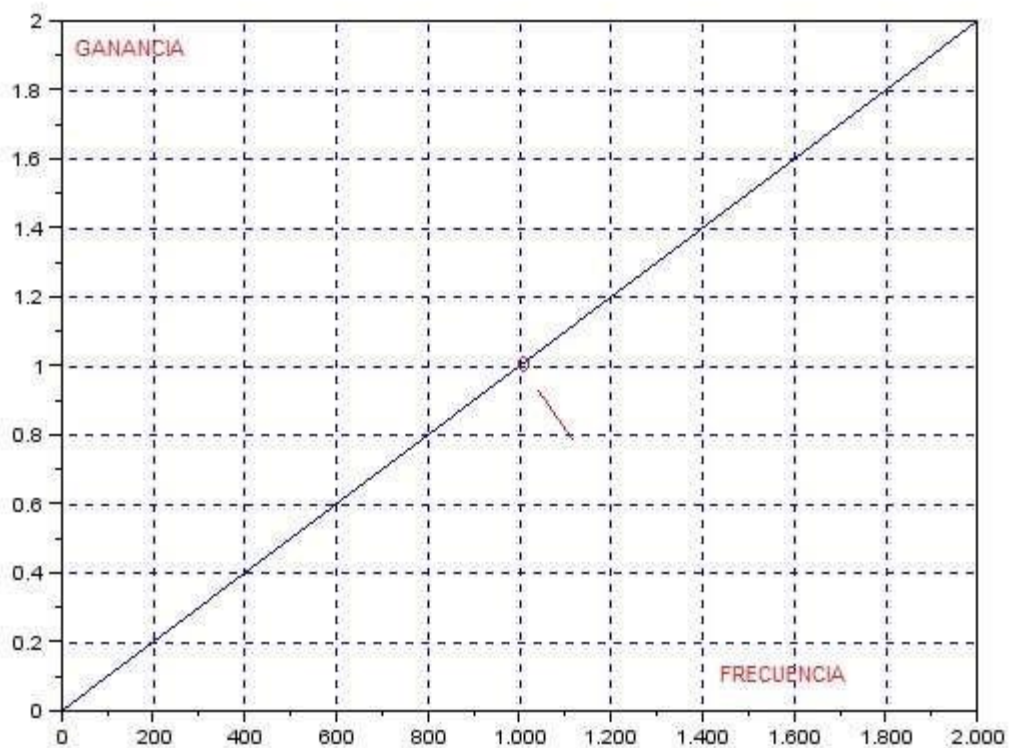
PROGRAMA EN SCILAB

Ejemplo de un diferenciador inversor para una frecuencia de 1Khz, usando una $R=10K\Omega$

```
*DiferenciadorInversor.sce [X]
1 //FILTRO INTEGRADOR
2 fo=1000; //fo=1Khz
3 R=10*10^3; //R=10K
4 //fo=1/(2*pi*R*C), despejando
5 C=1/(2*pi*R*fo);
6 print(%io(2),C,R)
7 // C=1.59D-08=16nF=0.016uF
8
9 //RESPUESTA EN FRECUENCIA
10 f=[0:100:2000];
11 //H=w/wo=f/fo;
12 H=f/fo;
13 plot(f,H)
14 xgrid(2)
```

Como se observa el programa arrojó un resultado de un C=0.016uF

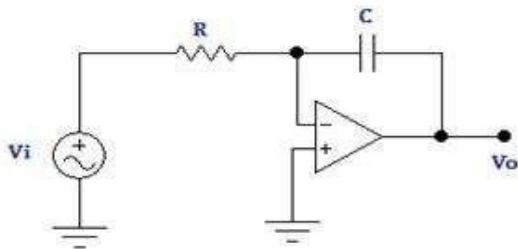
Respuesta en frecuencia.



Observe que, para la frecuencia de 1000 Hz, la ganancia es unitaria.

B) INTEGRADOR INVERSOR

El filtro pasa alto deja pasar las señales que tengan una frecuencia superior a la frecuencia de corte ω_0 . Su circuito y ecuaciones son las siguientes.



$$H(s) = V_o / V_i = -1 / (RC \cdot s)$$

Frecuencia de corte ω_0

$$\omega_0 = 1 / (RC)$$

$$H(\omega) = -1 / (j\omega / \omega_0)$$

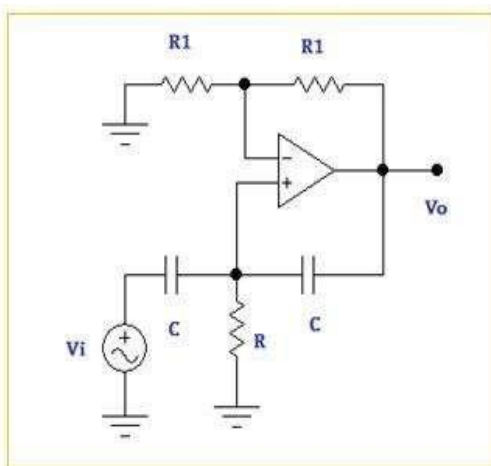
Magnitud: $H = 1 / (\omega / \omega_0)$

Angulo: $\phi = 90^\circ$

En ω_0 la ganancia es unitaria, esto es, $H(\omega_0) = H_0 = 1$

C) DIFERENCIADOR NO - INVERSOR

La señal de entrada está en la entrada no inversora de operacional.



Función de transferencia

$$V_o / V_i = j\omega \cdot 2R \cdot C = j\omega / \omega_0$$

$$\omega_0 = 1 / (2RC)$$

Si se quiere que la ganancia unitaria ocurra en $f = 100$ Hz

Para un $C = 10$ nF

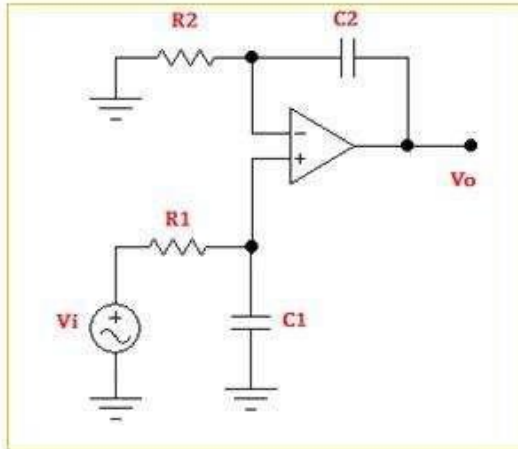
$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 \cdot 3.14 \cdot 100 = 628$$

$$628 = 1 / (2 \cdot R \cdot C) = 1 / (2 \cdot R \cdot 10 \text{ nF})$$

Despejando $R \approx 80$ K Ω

Puede usarse $R1 = 100$ K Ω

D) INTEGRADOR NO - INVERSOR



$$R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2$$

Función de transferencia

$$V_o / V_i = 1 / j(\omega R1 C1) = 1 / j(\omega / \omega_0)$$

Magnitud: $H = \omega_0 / \omega = f_0 / f$

$$\omega_0 = 1 / (R1 \cdot C1)$$

Por Ejemplo si se quiere una Ganancia de 20 dB en $f = 100\text{Hz}$, entonces:

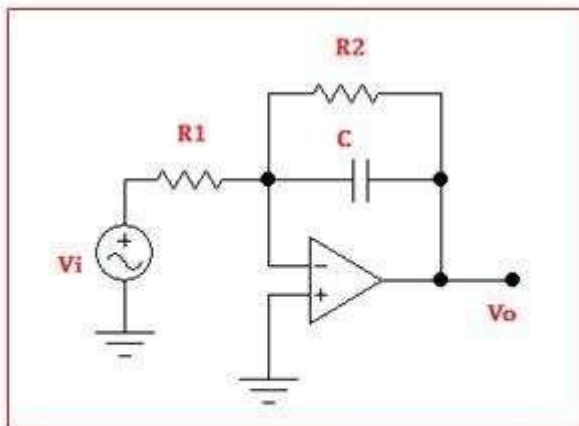
$$H(\text{dB}) = 20 \cdot \log(f_0 / f) = 20$$

$$f_0 / f = 10, f_0 = 1000 \text{ Hz}, \omega_0 = 6280$$

sea $C1 = C2 = 10 \text{ nF}$

despejando en ω_0 , $R1 = R2 \approx 16 \text{ k}\Omega$

E) FILTRO PASA BAJOS (INTEGRADOR



Función De transferencia

$$H(s) = V_o / V_i$$

$$H(s) = H_0 \cdot 1 / (1 + j\omega / \omega_0)$$

$$H_0 = -R2 / R1$$

$$\omega_0 = 1 / (R2 \cdot C)$$

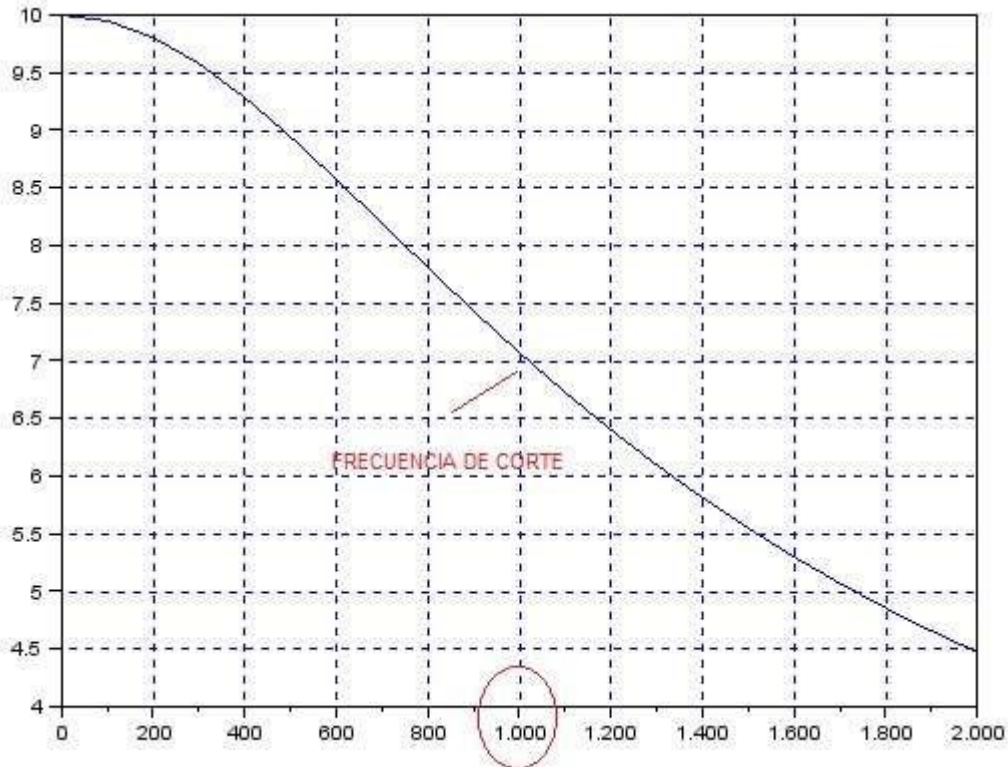
A esta frecuencia la Ganancia cae - 3 dB

EJEMPLO: PROGRAMA SCILAB

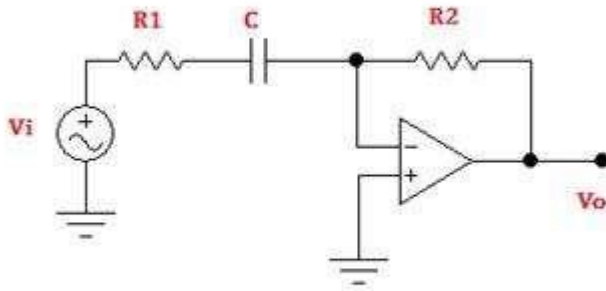
Si para $f_0 = 1\text{Khz}$ la ganancia de un filtro pasa bajas es de 20 dB, $R_1=20\text{K}\Omega$, hallar R_2 y C

```
//FILTRO INTEGRADOR
fo=1000; --- //fo=1Khz
R1=20e3; --- //R1=1K
HodB=20; --- //Ganancia=20DB
Ho=10^(HodB/20)
R2=Ho*R1
//fo=1/(2*pi*R2*C)
C=1/(2*pi*R2*fo)
//Respuesta R2=200000=20K, C=7.958D-10=0.8e(-9)=0.8nF, Ho=10
f=[0:100:2000];
//H=Ho/sqrt(1+(f/fo)^2);
H=pddiv(Ho, sqrt(1+(f/fo)^2))
plot(f, H)
xgrid(2)
```

Respuesta del filtro



F) FILTRO PASA ALTOS (DERIVADOR)



Función De transferencia

$$H(s) = V_o / V_i$$

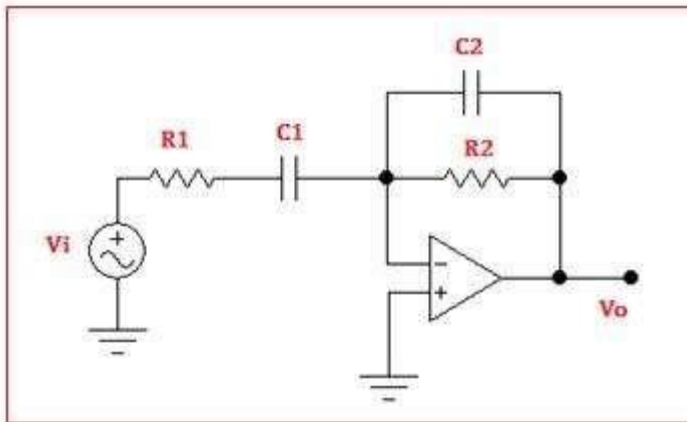
$$H(s) = H_o * j(\omega/\omega_o) / (1 + j\omega/\omega_o)$$

$$H_o = -R_2/R_1$$

$$\omega_o = 1 / (R_1 * C)$$

A esta frecuencia la Ganancia cae - 3 dB

G) FILTRO PASA BANDA



Función De transferencia

$$H(s) = V_o / V_i = -z_2 / z_1$$

$$H(s) = H_o * \frac{j\omega/\omega_L}{(1 + \frac{j\omega}{\omega_L})(1 + \frac{j\omega}{\omega_H})}$$

$$H_o = -R_2/R_1$$

$$\omega_L = 1 / (R_1 * C_1), \omega_H = 1 / (R_2 * C_2)$$

A estas frecuencias la Ganancia cae - 3 dB

ω_L es la frecuencia de corte en bajas ω_H es la frecuencia de corte en altas

EJEMPLO

Encontrar los componentes del filtro pasa banda para el rango de audio, $f_L = 20$ Hz, $f_H = 20$ KHz con ganancia de 20 dB

Solución

$H_o(\text{dB})=20 \text{ dB} = 20 \cdot \log(H_o)$, entonces, $H_o=10$

$H_o=R_2/R_1$, $10=R_2/R_1$, se puede tomar, $R_1=10\text{K}\Omega$ y $R_2=100\text{K}\Omega$,

$f_L=20$, $w_L=1/(R_1 \cdot C_1)$, $2 \cdot 3.14 \cdot 20=1/(10\text{K}\Omega \cdot C_1)$, $C_1=0.8\mu\text{F}$

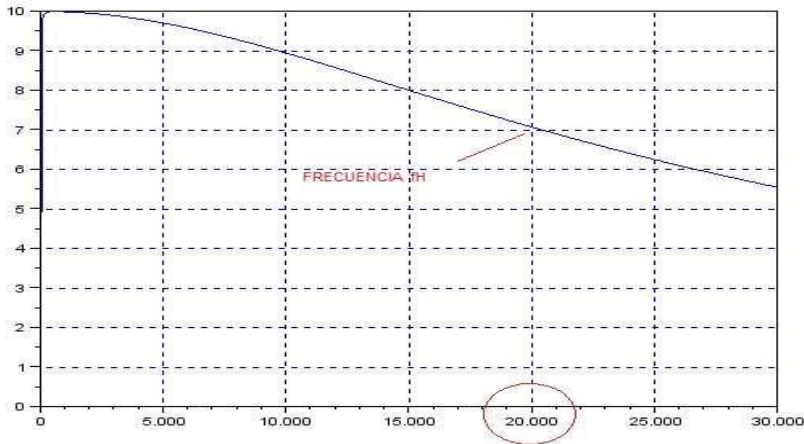
$f_H=20000$, $w_H=1/(R_2 \cdot C_2)$, $2 \cdot 3.14 \cdot 20000=1/(100\text{K}\Omega \cdot C_2)$, $C_2=80 \text{ nF}$

PROGRAMA EN SCILAB

```
//FILTRO PASA-BANDA
fL=20;
fH=20000 //fH0=20Khz
//Ganancia=Ho=-R2/R1
HodB=20;
Ho=10^(20/HodB)
//Ho=10
R1=10^3 //R1=10K
R2=Ho*R1
//R2=100K
//fL=1/(2*pi*R1*C1)
C1=1/(2*pi*fL*R1)
//C1=0.0000080=8*10^-5=0.8uF=800nF
//fH=1/(2*pi*R2*C2)
C2=1/(2*pi*fH*R2)
//C1=7.958D-10=0.08uF=80nF

//Respuesta en frecuencia
f=[0:100:30000];
//H=Ho/sqrt((1+(f/fL)^2)*(1+(f/fH)^2));
H=pdiv(Ho.*f/fL,sqrt((1+(f/fL)^2).* (1+(f/fH)^2)));
plot(f,H)
xgrid(2)
```

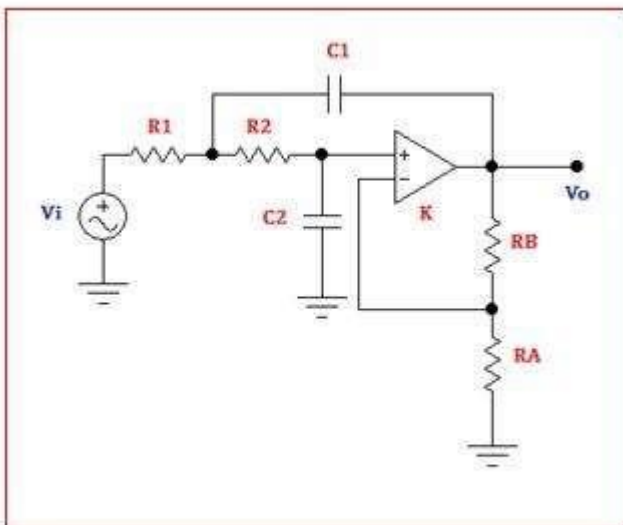
Respuesta del filtro



10.2 FILTROS KRC (SALLEN-KEY) DE SEGUNDO ORDEN

Son filtros cuya función de transferencia es de segundo orden o grado. Utilizan realimentación positiva y usan un operacional de ganancia finita K

A) FILTRO KRC PASA BAJAS



K=Ganancia del AO

$$K=1+R_B/R_A$$

Función De transferencia

$$H(s) = V_o / V_i$$

$$H(s) = H_0 * \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega/\omega_0}{Q}}$$

$$H_0 = K$$

Con componentes iguales:

$$R_1=R_2=R, C_1=C_2=C$$

$$\omega_0=1/(R*C), Q=1/(3-K)$$

EJEMPLO

Encuentre los componentes de un filtro pasa bajos KRC con $f_0=1$ Khz y un factor de calidad del filtro de $Q=5$. Suponer $C=10$ nF= $C_1=C_2$

Solución

$\omega_0=1/RC$, $\rightarrow 2*\pi*f_0=1/R*10nF$, $R\approx 16K\Omega=R_1=R_2$

$K=3 - 1/Q$, $\rightarrow K=3 - 1/5= 2.8$

$K=1+R_B/R_A$, $2.8= 1+R_B/R_A$, $R_B/R_A=1.8$

Si $R_A=10K\Omega$, $R_B=18K\Omega$

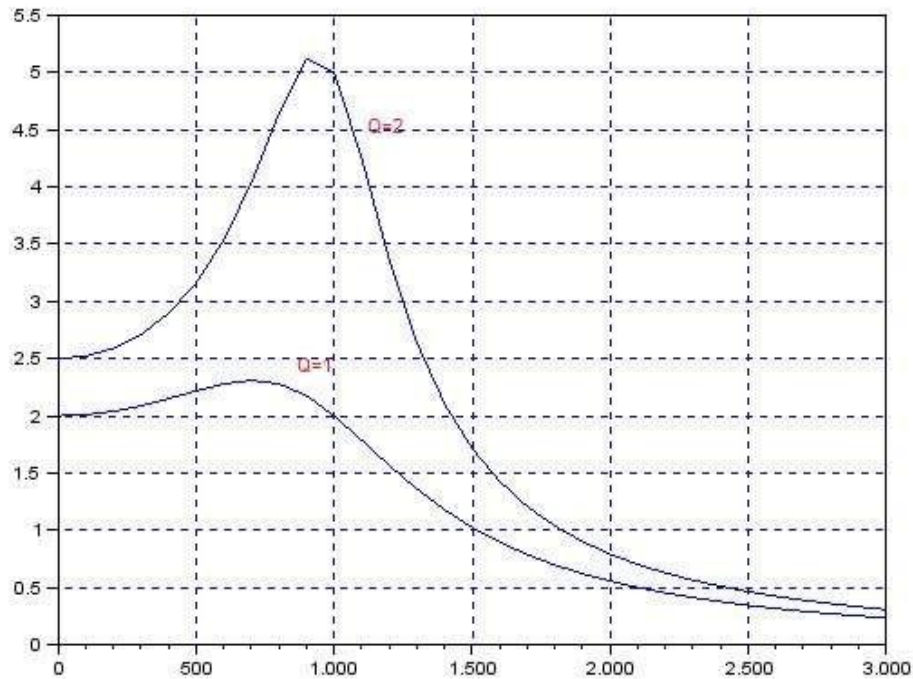
PROGRAMA EN SCILAB

```
//FILTRO KRC PASA BAJAS
fo=1000;
Q=1;
C=10*10^-9; //C=10nF
C1=C; C2=C;
RA=10000; //Ra=10K
//Q=1/(3-K), -despejando
K=3-1/Q;

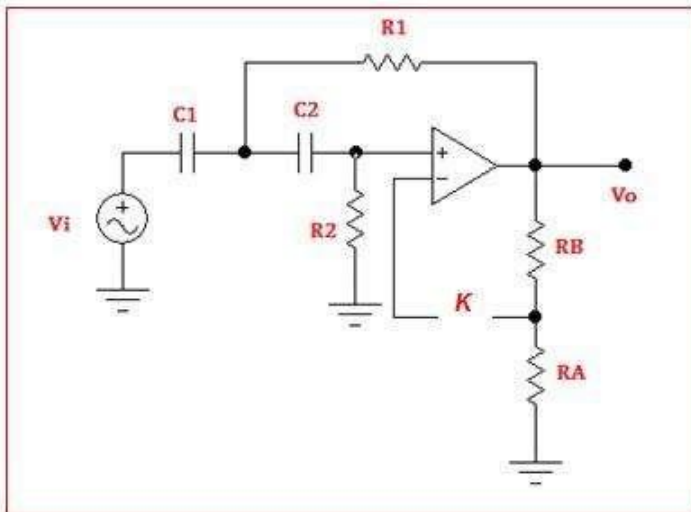
//Ganancia=Ho=K
Ho=K;
//fo=1/(2*pi*R*C), -despejando
R=1/(2*pi*fo*C);
R1=R; R2=R;
//K=1+RB/RA, -despejando
RB=(K-1)*RA;
print(%io(2),R,RA,RB,Ho,Q,fo)
//fo =1000. - Q =1. - Ho =2. - RB =10000. - RA =10000. - R =15915.494 (16K)

//Respuesta en frecuencia Ganancia vs frecuencia
f=[0:100:3000];
//H=Ho/sqrt((1-(f/fo)^2)^2+(f/fo)^2/Q^2);
H=pdv(Ho,sqrt((1-(f/fo)^2)^2+(f/fo)^2/Q^2));
plot(f,H)
xgrid(2)
```

Respuesta en frecuencia del filtro



B) FILTRO KRC PASA ALTAS



K=Ganancia del AO

$$K=1+R_B/R_A$$

Función De transferencia

$$H(s) = V_o / V_i$$

$$H(s) = H_o * \frac{-\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 + j\frac{\omega}{\omega_o} \frac{1}{Q}}$$

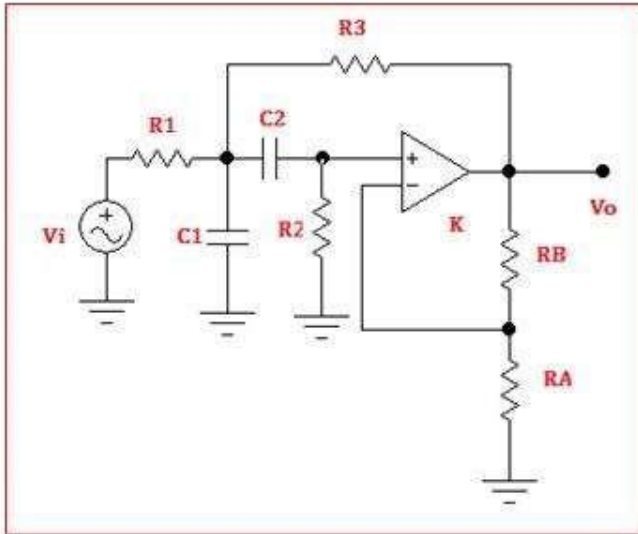
$$H_o = K$$

Con componentes iguales:

$$R_1=R_2=R, C_1=C_2=C$$

$$\omega_o = 1/(R \cdot C), Q = 1/(3-K)$$

C) FILTRO KRC PASA BANDA



$$\omega L = \omega_0 * \left(\sqrt{1 + 1/(4Q^2)} - \frac{1}{2Q} \right)$$

$$\omega H = \omega_0 * \left(\sqrt{1 + 1/(4Q^2)} + 1/2Q \right)$$

K=Ganancia del AO
 $K=1+R_B/R_A$
 Función De transferencia
 $H(s) = V_o / V_i$

$$H(s) = H_o * \frac{j(\frac{\omega}{\omega_0})/Q}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j\frac{\omega}{\omega_0}/Q}$$

$H_o = K / (4-K)$
 Con componentes iguales:
 $R_1=R_2=R_3=R, C_1=C_2=C$
 $\omega_0=1.41/(R*C), Q=1.41/(4-K)$
 BW: ancho de banda $BW=f_0/Q$

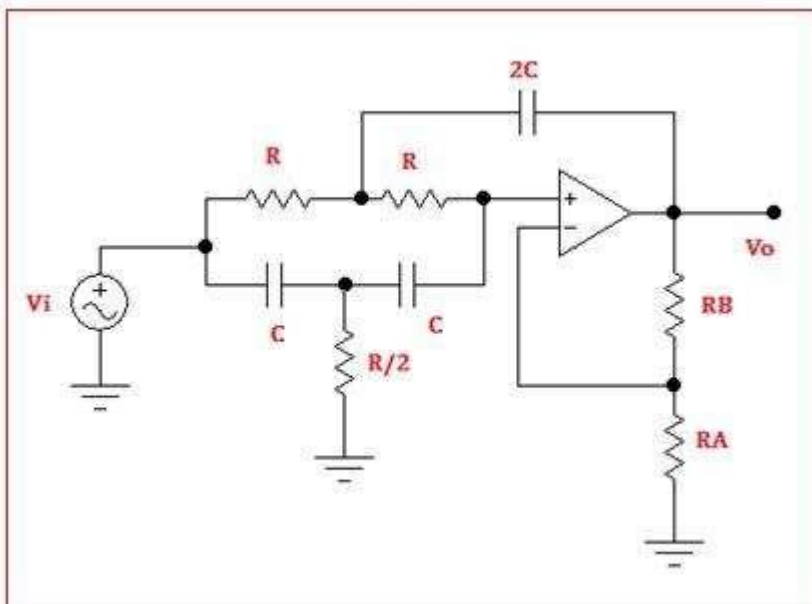
EJEMPLO

Diseñar un filtro pasa banda de segundo orden con $f_0=1$ KHz y $BW=100$ Hz, hallar la ganancia del filtro. Suponer: $C_1=C_2= 10$ nF, $R_A=10K\Omega$

Solución

$\omega_0=1.41 / (R*C) \rightarrow 2*3.14*1000 = 1.41 / (R*10 \text{ nF}), R=22.5K\Omega$
 $BW=f_0 / Q, 100=1000/Q, Q=10$
 $Q=1.41 / (4-K), 10 = 1.41/(4-K), K=3.86$
 $K=1+R_B/R_A, 3.86=1+R_B/10K\Omega, R_B=28.6K\Omega$ ganancia del filtro: $H_o=K / (4-K),$
 $H_o=3.86/(4-3.86)=27.6$

D) FILTRO KRC RECHAZA BANDA-NOTCH



R-R: trayectoria en baja frecuencia

C-C: trayectoria en alta frecuencia

Función de transferencia:

$$H(s) = V_o / V_i$$

$$H(s) = H_o * \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 + \left(\frac{j\omega}{\omega_o}\right)/Q}$$

ω_o : es la frecuencia Notch

$H_o = K$ (Ganancia del operacional)

$$\omega_o = 1/(R \cdot C), \quad Q = 1/(4 \cdot 2 \cdot K)$$

EJEMPLO

Diseñe un filtro Notch de segundo orden que tenga una frecuencia de resonancia de 60 Hz y un ancho de banda de 5 Hz, determinar la ganancia del filtro. Suponga $C = 100 \text{ nF}$

Solución

$f_0 = 60 \text{ Hz}$, $BW = 5 \text{ Hz}$, $\omega_0 = 1 / (R \cdot C)$, \rightarrow

$2 \cdot \pi \cdot f_0 = 2 \cdot 3.14 \cdot 60 = 1 / (R \cdot 100 \text{ nF})$, $R = 26.5 \text{ K}\Omega$

$R/2 = 13.2 \text{ K}\Omega$, $2C = 200 \text{ nF}$

$BW = f_0 / Q$, $5 = 60 / Q$, $\rightarrow Q = 12$ (esta es la selectividad)

$Q = 1 / (4 - 2 \cdot K)$, $\rightarrow 12 = 1 / (4 - 2 \cdot K)$, $K \approx 1.96$, $H_0 = K = 1.96$

$K = 1 + R_B / R_A$, $\rightarrow 1.96 = 1 + R_B / R_A$, $R_B / R_A = 0.96$, Se escoge,

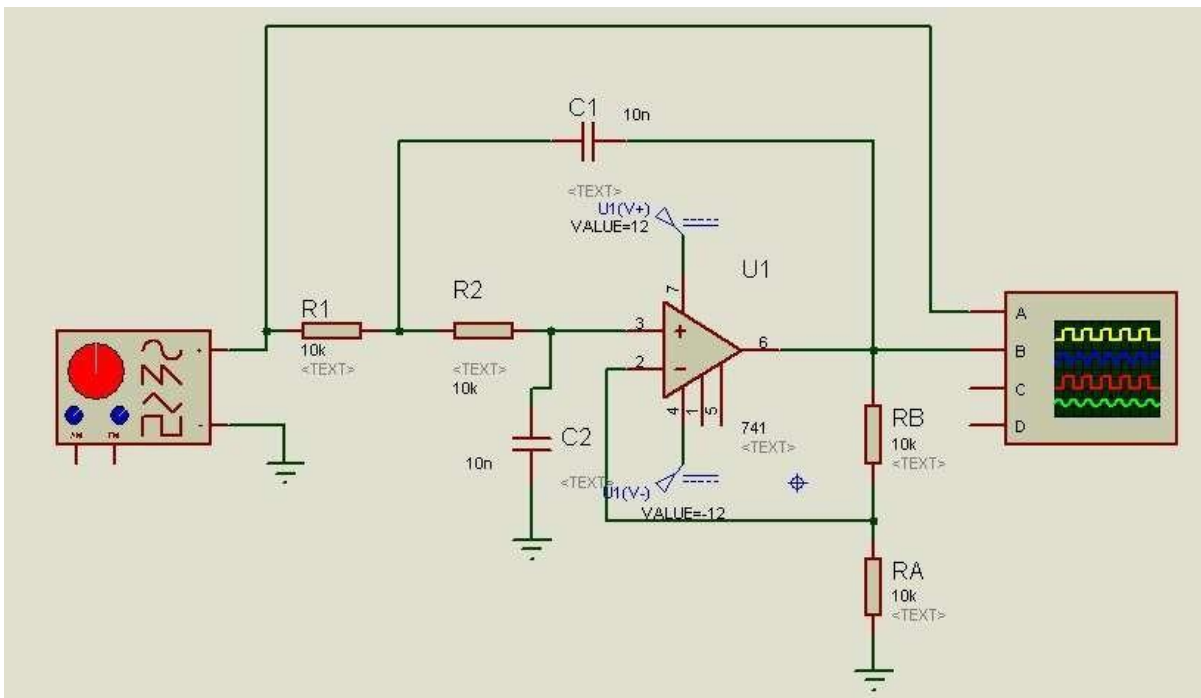
$R_A = 10 \text{ K}\Omega$, $R_B = 9.6 \text{ K}\Omega$

CAPÍTULO 11. FILTROS ACTIVOS - SIMULACIÓN

Se van a simular los tres filtros activos básicos: Filtro pasa bajos, Filtro pasa altos y el Filtro pasa banda usando el amplificador diferencial LM741

11.1 FILTRO PASA BAJO

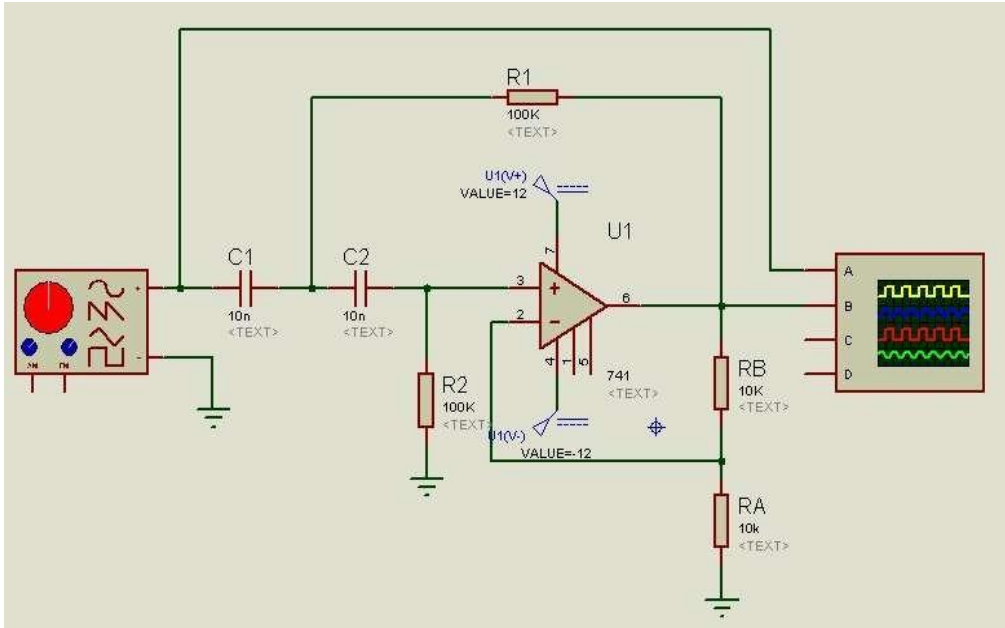
Simule el circuito de la figura en Proteus. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la señal de salida y mida la frecuencia de corte del filtro. Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente.



11.2 FILTRO PASA ALTO

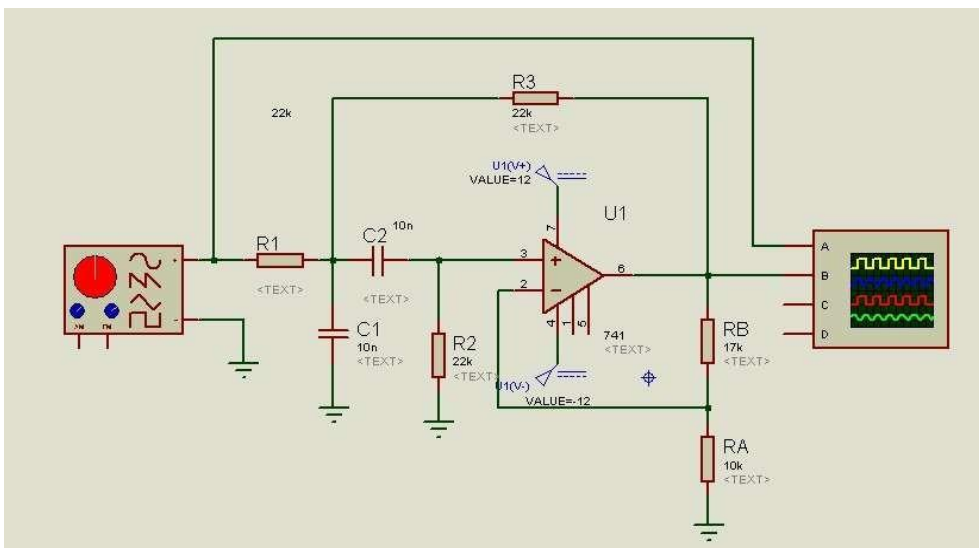
Simule el circuito de la figura en Proteus. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la

señal de salida y mida la frecuencia de corte del filtro. Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente.



11.3 FILTRO PASA BANDA

Simule el circuito de la figura en Proteus. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la señal de salida y mida las frecuencias de corte del filtro, f_L y f_H . Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente. ¿Cuál es el ancho de banda?



CAPÍTULO 12. FILTROS ACTIVOS - LABORATORIO

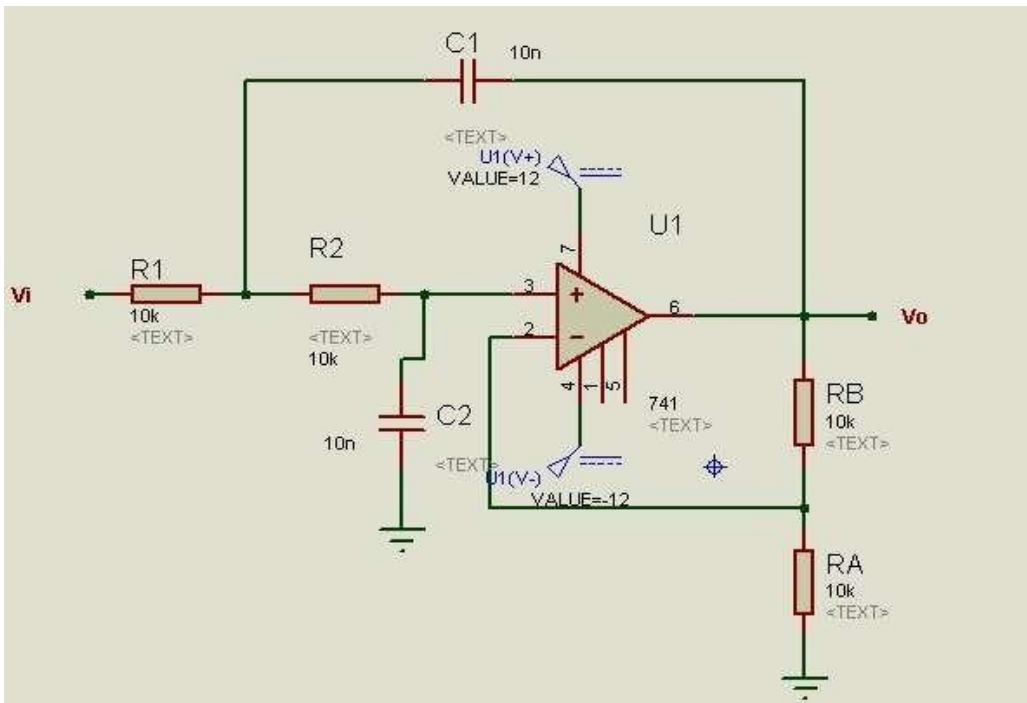
Se van a implementar los tres filtros activos básicos: Filtro pasa bajos, Filtro pasa altos y el Filtro pasa banda usando el amplificador diferencial LM741.

EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

- Fuente de $\pm 12V$
- Generador de señales
- Osciloscopio
- Multímetro
- Protoboard
- Circuitos integrados: LM741
- Condensadores: dos de 10 nF
- Resistencias a 1/4W de: 4x10K Ω , 2x100k Ω , 3x22K Ω , 18K Ω
- Conectores

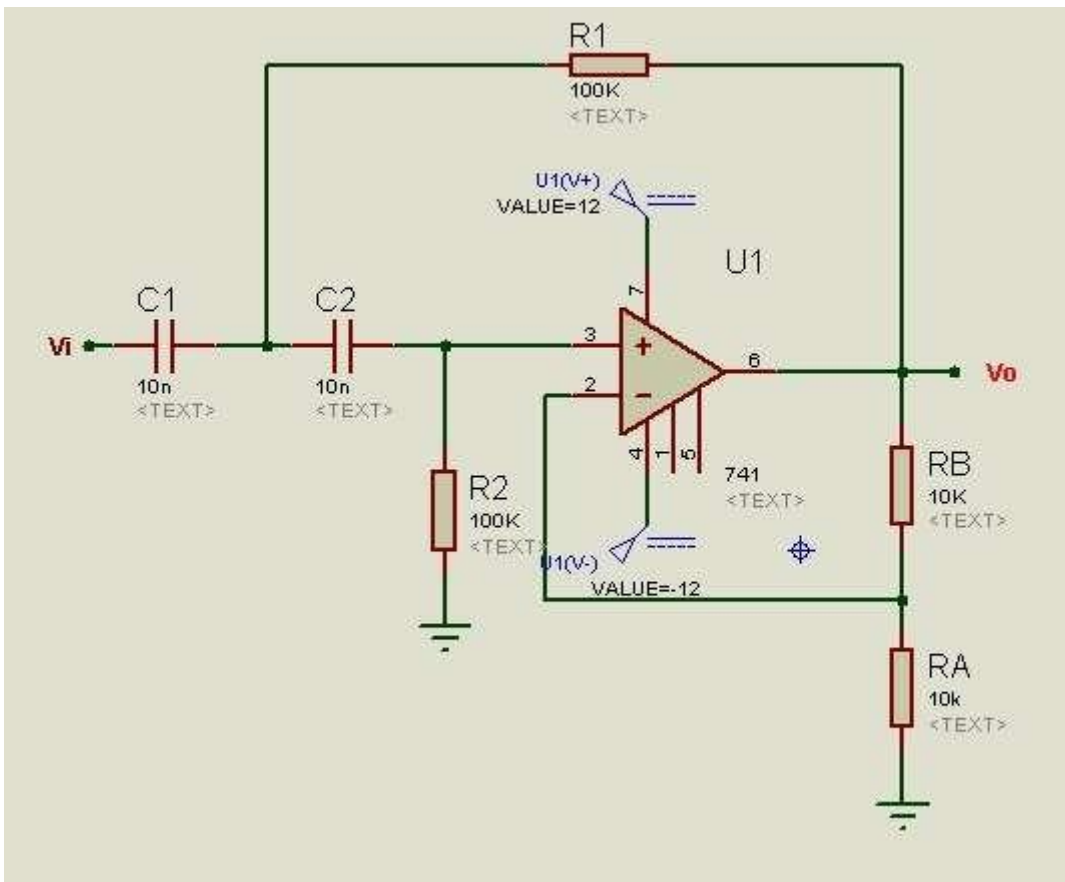
12.1 FILTRO PASA BAJO

Implemente el circuito de la figura en protoboard. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la señal de salida y mida la frecuencia de corte del filtro. Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente.



12.2 FILTRO PASA ALTO

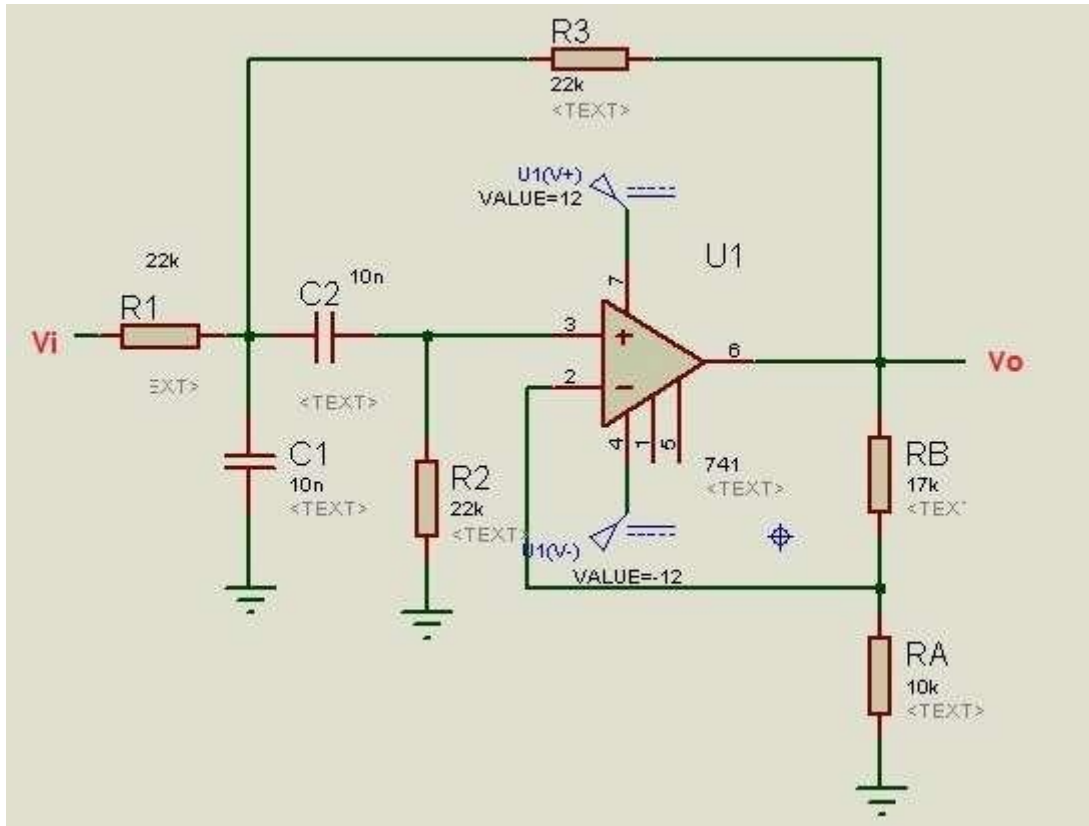
Igual que el paso anterior, implemente el circuito de la figura en protoboard. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la señal de salida y mida la frecuencia de corte del filtro. Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente.



12.3 FILTRO PASA BANDA

Implemente el circuito de la figura. Introduzca una señal senoidal de 1V y aumente la frecuencia de la señal a partir de 100Hz. Observe en el osciloscopio la señal de

salida y mida las frecuencias de corte del filtro, f_L y f_H . Encuentre la ganancia del filtro en frecuencias medias. Compruebe estos resultados teóricamente. ¿Cuál es el ancho de banda?



BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

LIBROS DE TEXTO CLÁSICOS Y REFERENCIAS TÉCNICAS

Franco, Sergio. (2005). Diseño con Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Analógicos (4ª ed.). Madrid: McGraw-Hill. Referencia fundamental mencionada en el texto para aplicaciones de control y automatización.

Sedra, Adel S. & Smith, Kenneth C. (2015). Microelectronic Circuits (7th ed.). New York: Oxford University Press. Texto de referencia mundial para el análisis de amplificadores diferenciales y operacionales.

Boylestad, Robert L. & Nashelsky, Louis. (2009). Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos (11ª ed.). México: Pearson Educación. Estándar en universidades de habla hispana para amplificadores operacionales y aplicaciones.

Floyd, Thomas L. (2017). Dispositivos Electrónicos (10ª ed.). México: Pearson Educación. Enfoque pedagógico con numerosos ejemplos sobre amplificadores operacionales y filtros.

Millman, Jacob & Halkias, Christos C. (2009). Electronic Devices and Circuits (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. Clásico sobre dispositivos y circuitos electrónicos, incluyendo amplificadores diferenciales.

Williams, Jim. (2010). Analog Circuit Design: Art, Science and Personalities. Newnes. Diseño de circuitos analógicos y aplicaciones prácticas de amplificadores.

Jung, Walter G. (2005). Op Amp Applications Handbook. Newnes. Manual completo de aplicaciones de amplificadores operacionales.

Van Valkenburg, M. E. (1982). Analog Filter Design. Oxford University Press. Diseño de filtros analógicos y circuitos resonantes.

Williams, Arthur B. & Taylor, Fred J. (2006). Electronic Filter Design Handbook (4th ed.). McGraw-Hill. Manual completo de diseño de filtros activos y pasivos.

Microchip Technology Inc. (2023). FilterLab® Software User's Guide. Chandler, AZ: Microchip. Software mencionado en el texto para el diseño de filtros activos de orden superior.

PUBLICACIONES DEL AUTOR EN AMAZON KDP

Esta serie de libros complementa el contenido técnico, ofreciendo una formación integral desde los fundamentos hasta la simulación avanzada.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Fundamentos de Circuitos Eléctricos: Teoría y Práctica. Amazon KDP. Ley de Ohm, Kirchhoff, teoremas de circuitos y corriente alterna.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Medidores Eléctricos: Voltímetros, Amperímetros y Óhmetros. Amazon KDP. Diseño y uso de instrumentos de medición eléctrica.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Fundamentos de Electrónica: Semiconductores, Diodos y Transistores. Amazon KDP. Dispositivos semiconductores, rectificadores y circuitos transistorizados.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Amplificadores Transistorizados: Multietapas, Video y Sintonizados. Amazon KDP. Diseño de amplificadores analógicos y de potencia con transistores discretos.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Dispositivos de Control Electrónico: FET, MOSFET, SCR, TRIAC, UJT y Optoelectrónica. Amazon KDP. Dispositivos semiconductores de potencia y control.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Osciladores y Multivibradores Transistorizados: Colpitts, Hartley, Monostables y Astables. Amazon KDP. Generación de señales y circuitos de conmutación.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Circuitos Transistorizados: Aplicaciones. Amazon KDP. Amplificadores, osciladores y multivibradores.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Señales y Sistemas Continuos: Transformada de Laplace y Función de Transferencia. Amazon KDP. Análisis de sistemas continuos, respuesta transitoria y diagramas de Bode.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Señales y Sistemas Discretos: Representación, Transformada Z y Fourier. Amazon KDP. Análisis de sistemas discretos, convolución y FFT.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Aprende Control con MATLAB: Representación de Señales, Sistemas Continuos y Discretos. Amazon KDP. Implementación práctica de sistemas de control con MATLAB.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Control de Motores con MATLAB: Tipos de motores, controles electrónicos y simulación en Matlab y Simulink. Amazon KDP. Modelado y control de motores eléctricos con herramientas computacionales.

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2025). Instalaciones Eléctricas Residenciales: Circuitos, Normas NTC 2050 y Seguridad. Amazon KDP. Diseño de instalaciones eléctricas domiciliarias y normatividad.

CURSOS VIRTUALES PUBLICADOS

Polanía Puentes, Jorge Antonio. (2007-2023). Cursos Virtuales de Ingeniería Electrónica. www.ceduvirt.com

Circuitos eléctricos, semiconductores, electrónica básica, electrónica industrial, electrónica digital, microcontroladores, señales y sistemas, control digital con MATLAB, procesamiento de señales, procesos con MATLAB y Simulink, teoría de sistemas, energía solar, aplicaciones en ingeniería ambiental.

REVISTAS ESPECIALIZADAS

IEEE Transactions on Circuits and Systems

IEEE Journal of Solid-State Circuits

IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement

Analog Dialogue (Analog Devices)

Electronics World

SOBRE EL AUTOR

1. FORMACIÓN ACADÉMICA

Secundaria: Bachiller, 1969. Colegio Nacional Santa Librada de Neiva Pregrado: Ingeniero Electrónico, 1976. Universidad Distrital de Santafé de Bogotá. Tesis Meritoria. Matrícula profesional: CN206-45500 del Consejo Profesional Nacional de Ingenierías Eléctrica, Mecánicas y Profesiones afines. Postgrado: Magister en Ingeniería Electrónica, 1991. Universidad Nacional Autónoma de México. Mención Honorífica. Convalidación Resolución No 823 de 1994 del ICFES. Cursos de postgrado: Microprocesadores y sistemas de desarrollo. Sistemas de comunicación de datos. Interconexión de redes usando TCP/IP. Sistemas de telecomunicaciones por satélite. HTML Scripting. Autoevaluación institucional. Programación Turbo Pascal. Planeación institucional. Planeación y desarrollo institucional.

2. EXPERIENCIA ACADÉMICA

Experiencia académica de 30 años como Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Surcolombiana adscrito a la Facultad de Ingeniería, del 7 de febrero de 1977 al 30 de marzo de 2007. Profesor Titular desde el 1 de diciembre de 1993. Profesor de Pregrado en el Programa de Ingeniería Electrónica de las asignaturas: Electrónica Analógica, Arquitectura de computadores. Electrónica Digital, Microcontroladores. Programación en Matlab. Control digital. Señales y sistemas. Procesamiento digital de señales. Energías Alternativas. Profesor de Postgrado en la Maestría de Gestión e Ingeniería Ambiental de las asignaturas: Energética Ambiental y Simulación de Sistemas Ambientales.

3. EXPERIENCIA ADMINISTRATIVA

Experiencia administrativa de más de 10 años en los siguientes cargos: Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana. 1984-1986 Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana. 1987-1988 Jefe de la Oficina de Planeación, Universidad Surcolombiana. 1988 - 1989 Rector de la Universidad Surcolombiana. 1997 - 2000 Director del Postgrado de Automatización industrial. 2000 Jefe de Programa de Ingeniería Electrónica. 2000 - 2001 Director del Departamento de Ingeniería Electrónica. 2006

4.EXPERIENCIA INVESTIGATIVA

Coordinador del grupo de investigación Nuevas tecnologías. Categoría C Colciencias. 2005. Proyectos de investigación: "Simulación de algoritmos de control digital con Matlab". 2005. "Diseño y construcción de un electrocardiógrafo digital inalámbrico". 2006. Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente para un cultivo de mango". 2007. Hoja de vida CvLAC COLCIENCIAS

5. PRODUCCIÓN INTELECTUAL

Cursos publicados en forma virtual en la web www.ceduvirt.com: Circuitos eléctricos. Semiconductores. Electrónica básica. Electrónica industrial. Electrónica digital. Microcontroladores. Señales y sistemas. Control digital con Matlab, Procesamiento de señales. Procesos con Matlab y Simulink. Teoría de sistemas. Energía solar. Aplicaciones en Ingeniería ambiental.