



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Configuraciones básicas de un amplificador operacional

Tomás Ricardo Basile Álvarez
316617194

ASIGNATURA

Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285

8 de diciembre de 2021

Introducción

Los amplificadores operacionales son circuitos electrónicos que se usan comúnmente en la instrumentación electrónica porque permite amplificar, acondicionar las señales, filtrarlas o compararlas.^[1]

El objetivo de esta actividad es implementar en el simulador de TINA-TI circuitos con amplificadores operacionales. Dichos circuitos corresponden a algunas de las aplicaciones típicas de estos amplificadores. Los circuitos serán simulados implementados en TINA-TI y se muestran las gráficas de resultados en este trabajo.

Primero resumimos algunos conceptos generales de los amplificadores operacionales. Estos son dispositivos electrónicos que en general cuentan con 5 terminales como se ve en la figura 1.

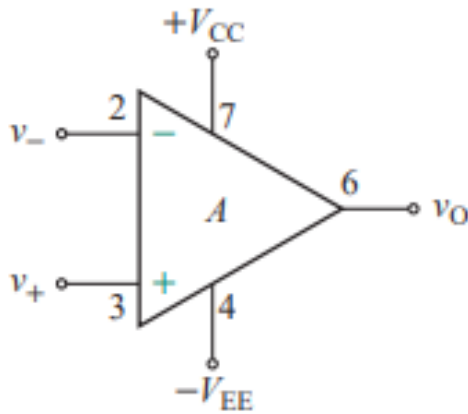


Figura 1: Símbolo de un amplificador operacional. Obtenido de [3]

El dispositivo posee dos entradas: la entrada no inversora (denotada con un +) y la entrada inversora (denotada con un -). Lo que hace un amplificador operacional es tomar las dos señales de entrada V_+ y V_- y amplificar su diferencia $V_+ - V_-$. Es decir, en la terminal de salida se crea un voltaje $V_o = A(V_+ - V_-)$ (1) Donde A es una constante que representa la ganancia del amplificador y suele ser un número muy grande (del orden de 10^5).^[1]

Además, cuenta con dos terminales por donde se proporciona la fuente de energía. En una de estas terminales se suministra un voltaje positivo $+V_{CC}$ y en la otra un voltaje negativo $-V_{EE}$. Resulta que la terminal de salida V_o del amplificador no puede generar cualquier voltaje, sino que su valor seguirá la relación (1) siempre y cuando $-V_{EE} \leq V_o \leq V_{CC}$. Si se tiene que $A(V_+ - V_-) > V_{CC}$ entonces se dice que está saturado y la salida ya no cumplirá la relación (1), sino que será $V_o = V_{CC}$. Similarmente, si $A(V_+ - V_-) < -V_{EE}$, ya no se seguirá la relación (1)

y la salida será $V_o = -V_{EE}$.^[1]

Formas de funcionamiento:

- **Lazo Abierto:** Se dice que el amplificador está conectado en lazo abierto si no hay alguna conexión entre las terminales de entrada y la terminal de salida del amplificador. Es decir, la salida del amplificador no interfiere posteriormente con la entrada, no hay retroalimentación. En este caso, el amplificador funciona como se mencionó, la salida será igual a $V_o = A(V_+ - V_-)$ a menos se encuentre saturado, en cuyo caso V_o será igual a un voltaje de saturación V_{S+} o igual a V_{S-} dependiendo de en qué dirección se saturó.

El problema es que como A es un número muy grande, el amplificador se encontrará casi siempre saturado, pues no se cumplirá que $-V_{EE} \leq A(V_+ - V_-) \leq V_{CC}$. Por lo tanto, funcionará más bien como un comparador, si $V_+ > V_-$, entonces $A(V_+ - V_-)$ será positivo y seguramente mayor a V_{CC} por la gran magnitud del factor A y entonces la salida será $V_o = V_{CC}$. Mientras que si $V_+ < V_-$, entonces $A(V_+ - V_-)$ será negativo y seguramente menor a $-V_{EE}$, por lo que la salida será $V_o = -V_{EE}$.^[2]

- **Lazo Cerrado:** Se dice que el amplificador está funcionando en lazo cerrado si una parte del voltaje de salida se aplica nuevamente a una de las entradas. Es decir, existe una retroalimentación. Generalmente usaremos así al amplificador operacional, por lo que veremos más detalles de este tipo de funcionamiento a lo largo de este trabajo.

Amplificadores operacionales con retroalimentación negativa

Responda las siguientes preguntas.

1. ¿Qué es un amplificador operacional ideal?

Es un modelo idealizado de un amplificador con características que lo hacen más fácil de estudiar. Se considera un amplificador ideal si tiene las siguientes características:^[3]

- Tienen una ganancia infinita cuando se utilizan en modo de lazo abierto. Es decir, $A = V_{out}/V_{in} = \infty$
- La ganancia cuando se utiliza en modo de lazo cerrado es constante y no depende de la frecuencia de la señal de entrada.
- No tiene corriente de entrada. Es decir, en las terminales de entrada inversora y de entrada no inversora la corriente es 0.

- El voltaje de salida tiene un rango infinito, es decir, no está confinado a quedarse en un valor entre la fuente DC negativa y la positiva.

2. ¿Qué hace un la retroalimentación negativa en un amplificador operacional?

Para un amplificador operacional, la retroalimentación negativa se consigue con circuitos como el de la figura 4 (aunque hay muchas formas de hacerlo).

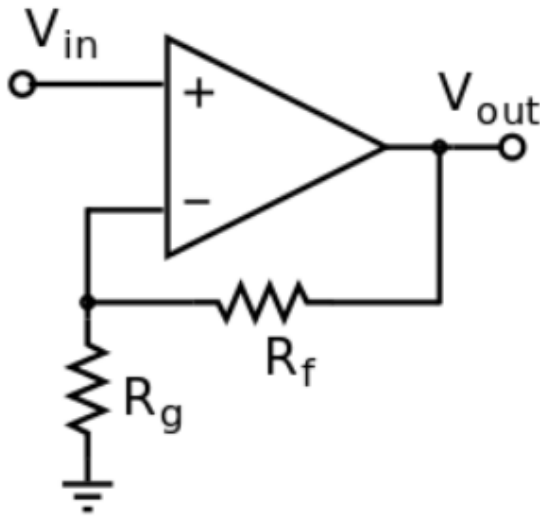


Figura 4: Amplificador operacional con retroalimentación negativa. Obtenido de [3]

En el circuito de la figura 4 se puede observar como parte del voltaje de la salida se regresa para aplicarse en la entrada inversora (aunque podría aplicarse a la no inversora en otro tipo de circuitos).

Podemos estudiar a grandes razgos como funcionaría este circuito y de dónde viene que sea una retroalimentación negativa analizando dos casos:

- El voltaje V_+ aplicado a la entrada no inversora es mayor al voltaje en la entrada no inversora V_- : En este caso el voltaje de salida será positivo, porque $A(V_+ - V_-) > 0$. Luego, por medio de la resistencia R_f , este voltaje de salida se regresa al amplificador por medio de la entrada inversora. Esta retroalimentación hace que el voltaje V_- aumente, lo que hace que la diferencia $V_+ - V_-$ sea menor y por tanto el voltaje de salida disminuye.
- El voltaje V_+ aplicado a la entrada no inversora es menor al voltaje en la entrada no inversora V_- : En este caso el voltaje de salida será negativo, pues $A(V_+ - V_-) < 0$. Luego, la resistencia R_f lleva este voltaje negativo de regreso a la entrada inversora. Esto hace que V_- disminuya, lo

que hace que la diferencia $|V_+ - V_-|$ sea menor y por tanto el voltaje de salida $V_o = A(V_+ - V_-)$ se acerca más al cero.

Como vemos, en cualquiera de los dos casos, el valor de $|V_+ - V_-|$ se acerca más al cero debido a la retroalimentación negativa. Entonces, en un amplificador ideal se puede aplicar la siguiente suposición:

- La diferencia de tensión entre las dos entradas es insignificante $V_+ \simeq V_-$

Esta suposición y la idealización de que no entra ni sale corriente por las entradas del amplificador hacen que sea más fácil estudiar circuitos con amplificadores.

3. ¿Qué es un circuito comparador?

Un comparador es un circuito que nos permite comparar señales de voltaje de dos entradas y dar una salida que depende de cuál sea la entrada de mayor voltaje.^[1] Para hacer un comparador usamos un amplificador operacional en lazo abierto (es decir, sin retroalimentación).

De esta forma, si el voltaje de la entrada no inversora V_+ es mayor al de la entrada inversora V_- , entonces $A(V_+ - V_-)$ será positiva. Si este valor $A(V_+ - V_-)$ es mayor a V_{CC} (que lo es casi siempre porque A es muy grande), entonces el voltaje de salida será el voltaje de saturación V_{S+} .

Alternativamente, si el voltaje de la entrada inversora V_- es mayor al de la entrada no inversora V_+ , entonces $A(V_+ - V_-)$ será negativo. Si este valor $A(V_+ - V_-)$ es menor a V_{EE} que lo es casi siempre porque A es muy grande), entonces el voltaje de salida será el voltaje de saturación V_{S-} .

Por lo tanto, el comportamiento del comparador se puede resumir como:

$$V_o = \begin{cases} V_{S+} & , V_+ > V_- \\ V_{S-} & , V_- > V_+ \end{cases}$$

Lo que nos permite comparar las señales V_+ y V_- en cada momento de tiempo.

Amplificadores

Simularemos ahora algunos circuitos que muestran aplicaciones específicas del amplificador operacional.

Amplificador seguidor de voltaje

Un seguidor de voltaje es un circuito amplificador que tiene ganancia de voltaje igual a 1.

- 4.1 Ajuste la señal V_{G1} para que sea una señal triangular con una amplitud que puede variar en un rango de $0,5V$ a $1,5V$ con una frecuencia entre $100Hz$ y $2kHz$.

En la figura 5 se ve el circuito de un amplificador seguidor de voltaje implementado en TINA-TI.

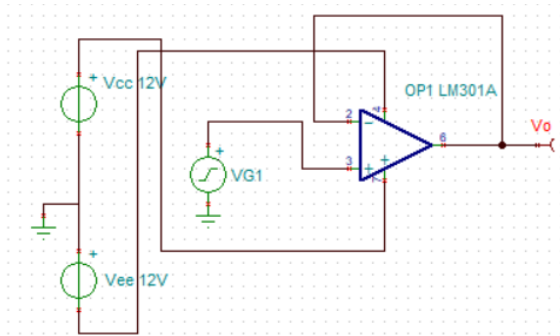


Figura 5: Circuito de amplificador seguidor de voltaje

La señal de voltaje V_{G1} es una señal triangular con frecuencia de $500Hz$ con una amplitud de $1V$. Como se ve en el circuito, los voltajes de las fuentes son $V_{CC} = 12V$ y $-V_{EE} = -12V$.

- 4.2 Para el circuito seguidor de voltaje explique cómo funciona el circuito y para qué podría usar este circuito.

Para ver cómo funciona, usamos que como vimos en el foro anterior a esta actividad y en la pregunta 2 de este trabajo, para un amplificador operacional con retroalimentación, se puede suponer que el voltaje de salida V_o será el necesario tal que haga que los voltajes de entrada V_+ y V_- sean iguales y también que no hay corriente en las terminales de entrada.

Entonces, debido a la retroalimentación, los voltajes de entrada V_+ y V_- deben de ser iguales, y entonces el voltaje V_- también tendrá la misma señal que proporciona V_{G1} . Pero la entrada V_- está directamente conectada con la salida V_o (por un cable sin resistencias), por lo que esta salida debe de tener también un voltaje con dicha señal.

Estos circuitos no cambian la señal de voltaje, pero se utilizan porque tienen una impedancia de entrada muy alta. Esto significa que extraen poca corriente y aún así mantiene la señal de voltaje.

- 4.3 Haga la simulación transitoria de los circuitos y presente las formas de onda de entrada y salida. Con ayuda de los cursores mida las amplitudes de las señales de salida de cada uno de los circuitos y calcule las ganancias de los circuitos.

Se realizó una simulación transitoria con duración de $10ms$. En la figura 6 se muestran los resultados con gráficas de V_{G1} (el voltaje de entrada) y de V_o (el voltaje de salida).

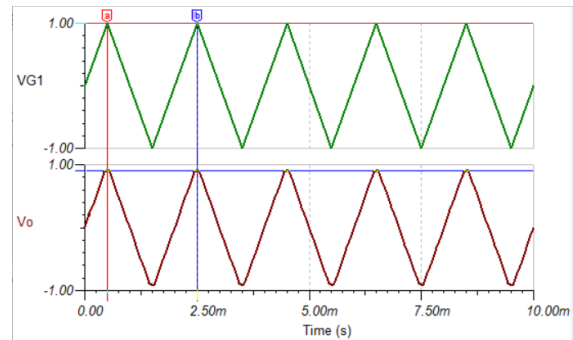


Figura 6: Análisis de seguidor de voltaje

La curva verde representa la señal de entrada proporcionada por V_{G1} y la curva roja el voltaje de salida V_o . Se midió la amplitud de la señal de entrada y de salida usando los cursores de TINA-TI para llegar a los siguientes resultados:

Amplitud de entrada(V_{G1}) : $1V$

Amplitud de salida(V_o) : $0,919V$

- 4.4 Cuantifique los errores entre las ganancias teóricas y aquellas otras obtenidas con las simulaciones.

Teóricamente, el amplificador de voltaje debería de producir el mismo voltaje de salida que el que recibe de entrada. Como vemos en la figura 6, las señales de entrada y salida efectivamente se parecen mucho. Entonces, teóricamente la amplitud del voltaje de salida debería de ser $1V$. Por lo que tenemos la siguiente comparación:

Voltaje de salida teórico: $1V$

Voltaje de salida simulado: $0,919V$

Por lo que el error de los resultados obtenidos y el teórico es:

$$\text{Error: } \frac{|1 - 0,919|}{1} \times 100\% = \boxed{8,1\%}$$

Amplificador Inversor

El amplificador inversor es un circuito con el objetivo de cambiar de signo la señal de voltaje de entrada V_i y además amplificarla por algún factor para producir una señal de salida V_o .

- 4.1 Ajuste la señal V_{G1} para que sea una señal triangular con una amplitud que puede variar en un rango de $0,5V$ a $1,5V$ con una frecuencia entre $100Hz$ y $2kHz$.

En la figura 7 se ve el circuito de un amplificador inversor implementado en TINA-TI.

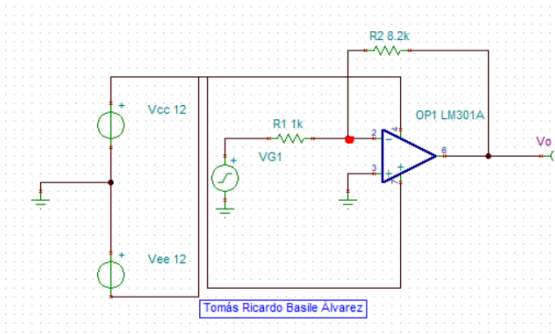


Figura 7: Circuito Amplificador Inversor

La señal de voltaje V_{G1} es una señal triangular con frecuencia de $500Hz$ con una amplitud de $1V$. Como se ve en el circuito, los voltajes de las fuentes son $V_{CC} = 12V$ y $-V_{EE} = -12V$.

- 4.2 Usando valores de resistencias comerciales mayores o iguales a $1k\Omega$, calcule los valores de R_1, R_2 para que la señal de salida tenga una amplitud entre $5V$ y $10V$. Incluya los cálculos que efectuó.

Estudiemos cómo funciona este circuito. Como se dijo antes, en un amplificador operacional con retroalimentación negativa, el voltaje de ambas entradas V_+ y V_- son iguales. En el circuito de la figura 7 vemos que la entrada $+$ se encuentra a $0V$, lo que implica que la otra entrada también debe de estar a $0V$. Esto significa que el nodo marcado en rojo se encuentra a $0V$.

Además, siendo un amplificador operacional ideal, las entradas no toman ni expulsan corriente, por lo que la corriente I que fluye por R_1 es igual a la de R_2 . Por lo tanto, si aplicamos la ley de Ohm a la resistencia R_1 tenemos que $I = -V_i/R_1$. Y para la segunda resistencia tenemos que $I = V_o/R_2$. Igualando estas expresiones y despejando llegamos a que:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

Por lo que el factor de amplificación es $-\frac{R_2}{R_1}$. Decidí que el voltaje de salida tuviera una amplitud de aproximadamente $8V$, por lo que escogí las resistencias (con valores comerciales) como $R_1 = 1k\Omega$ y $R_2 = 8,2k\Omega$, para que el factor sea de $-8,2$.

- 4.3 Haga la simulación transitoria de los circuitos y presente las formas de onda de entrada y salida. Con ayuda de los cursores mida las amplitudes de las señales de salida de cada uno de los circuitos y calcule las ganancias de los circuitos.

Se realizó una simulación transitoria con duración de $10ms$. En la figura 8 se muestran los resultados con las gráficas de V_{G1} (el voltaje de entrada) y V_o (el voltaje de salida).

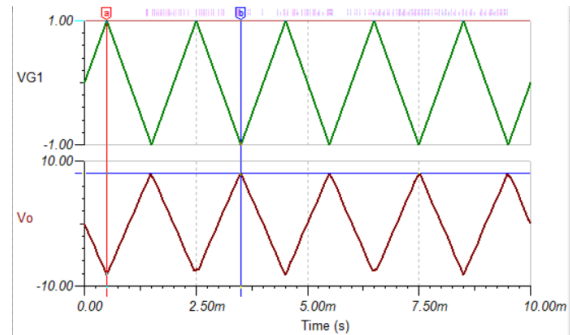


Figura 8: Análisis amplificador inversor

La gráfica verde representa la señal de voltaje de entrada y la roja la señal del voltaje de salida. Se puede ver que efectivamente se invirtió la señal y que fue amplificada.

Con ayuda de los cursores se midió la amplitud de cada señal:

Amplitud de entrada (V_{G1}): $1V$

Amplitud de salida (V_o): $8,03V$

- 4.4 Cuantifique los errores entre las ganancias teóricas y aquellas otras obtenidas con las simulaciones.

Como se mencionó antes, este circuito debería de generar una amplificación con factor de $-\frac{R_2}{R_1} = \frac{8,2k}{1k} = -8,2$. Sin embargo, se obtuvo una amplificación de $-8,03$:

Voltaje de salida teórico: $8,2V$

Voltaje de salida simulado: $8,03V$

Por lo que se tiene un error porcentual de:

$$\text{Error: } \frac{|8,2V - 8,03V|}{8,2} \times 100\% = \boxed{2,07\%}$$

Amplificador no-inversor

El amplificador no inversor es un circuito con el objetivo de tomar una señal de voltaje de entrada V_i y amplificarla por algún factor para producir una señal de salida V_o .

- 4.1 **Ajuste la señal V_{G1} para que sea una señal triangular con una amplitud que puede variar en un rango de 0,5V a 1,5V con una frecuencia entre 100Hz y 2kHz.**

En la figura 9 se ve el circuito de un amplificador no inversor implementado en TINA-TI.

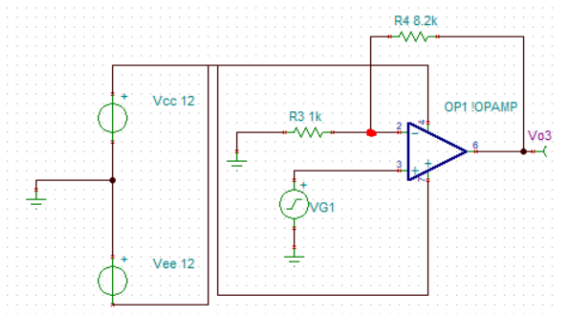


Figura 9: Circuito Amplificador no Inversor

La señal de voltaje V_{G1} es una señal triangular con frecuencia de 500Hz con una amplitud de 1V. Como se ve en el circuito, los voltajes de las fuentes son $V_{CC} = 12V$ y $-V_{EE} = -12V$.

- 4.2 **Usando valores de resistencias comerciales mayores o iguales a 1 kΩ, calcule los valores de R_3, R_4 para que la señal de salida tenga una amplitud entre 5V y 10V. Incluya los cálculos que efectuó.**

Estudiemos cómo funciona este circuito. Como se dijo antes, en un amplificador operacional con retroalimentación negativa, el voltaje de ambas entradas V_+ y V_- son iguales. En el circuito de la figura 9 vemos que la entrada + se encuentra con un voltaje V_{G1} (el voltaje de entrada V_i), lo que implica que la otra entrada también debe de estar a ese voltaje. Esto significa que el nodo marcado en rojo se encuentra a dicho voltaje.

Además, las entradas no toman ni expulsan corriente, por lo que la corriente I que fluye por R_3 es igual a la de R_4 . Pero por lo mencionado en el párrafo anterior, el salto de voltaje de la resistencia R_3 es V_i , por lo que la corriente que pasa por ella es $I = V_i/R_3$. Dicha corriente también pasa por R_4 , por lo que el salto de voltaje en la resistencia R_4 es de $IR_4 = \frac{R_4}{R_3}V_i$.

Entonces podemos calcular el voltaje de V_o tomando el voltaje del punto rojo, que es V_i y sumando

el salto de voltaje de R_4 que es $\frac{R_4}{R_3}V_i$. Entonces el voltaje de salida es:

$$\begin{aligned} V_o &= V_i + \frac{R_4}{R_3}V_i \\ &= \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)V_i \end{aligned}$$

Por lo que el factor de amplificación es $\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$.

En este caso decidí que el voltaje de salida tuviera una amplitud de aproximadamente 9V, por lo que escogí las resistencias (con valores comerciales) como $R_3 = 1k\Omega$ y $R_4 = 8,2k\Omega$, para que el factor sea de $1 + \frac{R_4}{R_3} = 1 + \frac{8,2k}{1k} = 9,2$.

- 4.3 **Haga la simulación transitoria de los circuitos y presente las formas de onda de entrada y salida. Con ayuda de los cursores mida las amplitudes de las señales de salida de cada uno de los circuitos y calcule las ganancias de los circuitos.**

Se realizó una simulación transitoria con duración de 10ms. En la figura 10 se muestran los resultados con las gráficas de V_{G1} (el voltaje de entrada) y V_o (el voltaje de salida).

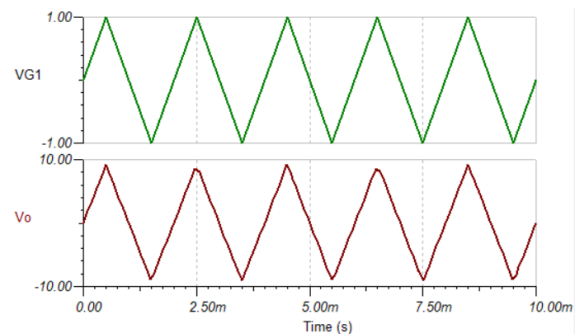


Figura 10: Análisis amplificador no inversor

La gráfica verde representa la señal de voltaje de entrada y la roja la señal del voltaje de salida. Se puede ver que efectivamente se amplificó la señal.

Con ayuda de los cursores se midió la amplitud de cada señal:

Amplitud de entrada (V_{G1}): 1V

Amplitud de salida (V_o): 8,94V

- 4.4 **Cuantifique los errores entre las ganancias teóricas y aquellas otras obtenidas con las simulaciones.**

Como se mencionó antes, este circuito debería de generar una amplificación con factor de $1 + \frac{R_2}{R_1} =$

$1 + \frac{8,2k}{1k} = 9,2$. Sin embargo, se obtuvo una ampli-
ficación de 8,94:

Voltaje de salida teórico: 9,2V

Voltaje de salida simulado: 8,94V

Por lo que se tiene un error porcentual de:

$$\text{Error: } \frac{|9,2V - 8,94V|}{9,2} \times 100\% = \boxed{2,83\%}$$

Integrador y derivador

Simularemos ahora circuitos que son capaces de inte-
grar o derivar señales de voltaje.

Integrador

El integrador es un circuito que dada una señal de
entrada V_i , regresa una señal de salida V_o cuya forma
es proporcional a la integral de V_i . En particular^[2]
 $V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i(t')dt' + k$ con R y C valores de
una resistencia y un capacitor que ocupa el circuito
y k una constante de integración. Notar que a parte
de integrar, el circuito multiplica a la señal por un
signo negativo.

5.1 Obtenga el diagrama de Bode de los circui- tos. Con ayuda de los circuitos obtenga los rangos de frecuencias en los que el circuito opera como integrador o derivador.

El circuito para el integrador compensado se mues-
tra en la figura 11.

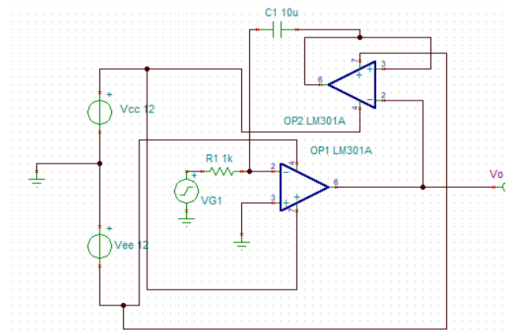


Figura 11: Circuito de integrador compensado

La entrada de voltaje en el circuito que propor-
ciona el voltaje V_i es la fuente V_{G1} . Además, la
resistencia tiene un valor de $1k\Omega$ y el capacitor un
valor de $10\mu F$.

Luego se aplicó el AC transfer characteristic que
viene incluido en TINA-TI con lo que se obtiene el
diagrama de Bode para el circuito, que se muestra
en la figura 12.

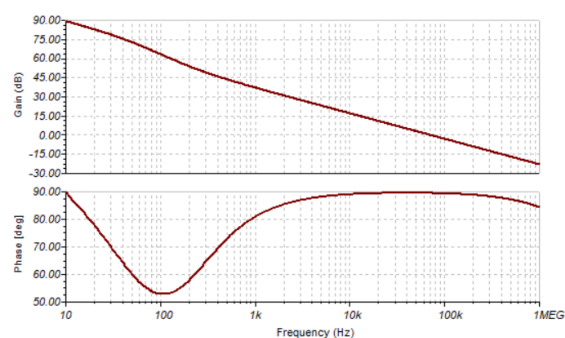


Figura 12: Diagrama de Bode del integrador

En la figura se muestra la ganancia y desfase que tiene el circuito para distintas frecuencias de ondas senoidales en la señal de voltaje de entrada. La señal de salida, que es la integral de la entrada debería de ser un coseno, por lo que el desfase debería de ser de 90 grados. Vemos que esto se cumple en el rango de frecuencias de entre $10kHz$ y $100kHz$.

5.2 Ajuste la señal V_{G1} como una señal senoidal con una frecuencia dentro del rango de operación de los circuitos. Haga la simulación de la respuesta transitoria del circuito y repórtela.

Siguiendo lo mencionado en el paso anterior, para V_{G1} se escogió una señal senoidal con frecuencia de $60kHz$ (en el que ya vimos que actúa como un integrador). Se realizó un análisis transitorio de $200\mu s$ y se obtuvieron los resultados de la figura 13.

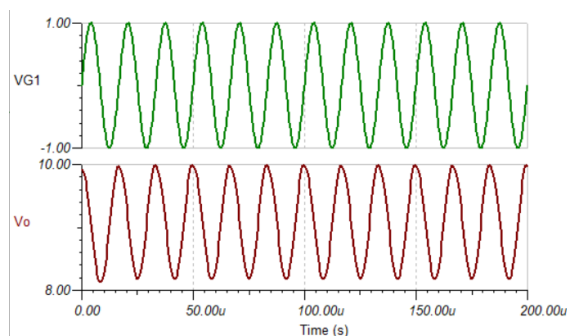


Figura 13: Análisis del integrador

La curva verde representa el voltaje de entrada V_i (que es un seno de frecuencia $60kHz$) y amplitud $1V$ y la curva roja el voltaje de salida, que debería de ser la integral de la entrada.

5.3 Repita el paso anterior para una señal cuadrada y una señal triangular.

Lo hacemos primero para una señal triangular de frecuencia $60kHz$ y amplitud $1V$. El resultado se muestra en la figura 14.

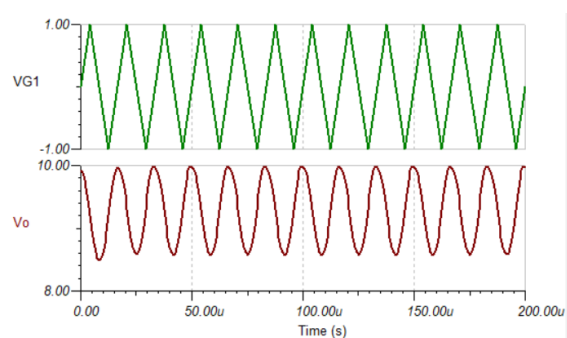


Figura 14: Análisis del integrador con onda triangular

La curva verde representa el voltaje de entrada, que es una curva triangular con frecuencia $60kHz$ y amplitud de $1V$, mientras que la curva roja representa el voltaje de salida, que debería de ser su integral.

Lo hacemos ahora para una señal cuadrada de frecuencia $60kHz$ y amplitud $1V$. El resultado se muestra en la figura 15.

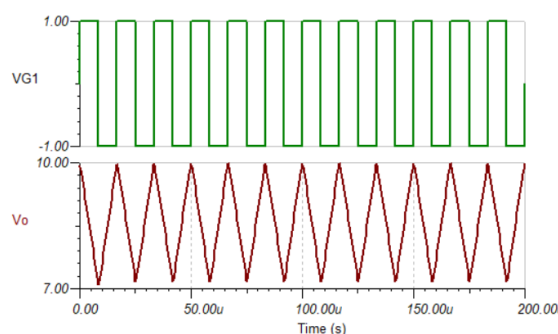


Figura 15: Análisis del integrador con onda triangular

La curva verde representa el voltaje de entrada, que es una curva cuadrada con frecuencia $60kHz$ y amplitud de $1V$, mientras que la curva roja representa el voltaje de salida, que debería de ser su integral.

5.4 Explique sus resultados.

En todas las simulaciones el voltaje de salida es efectivamente la integral del voltaje de entrada como se esperaba. Para el voltaje senoidal de entrada de la figura 13, vemos que el voltaje de salida tiene la misma forma pero con un desplazamiento de 90 grados, es decir, un coseno con la misma frecuencia. Vemos entonces que la curva roja es menos la integral de la curva verde. Además, la curva roja se encuentra desplazada verticalmente por una constante de integración.

Para la simulación de la onda triangular de la figura 14 también podemos ver que la curva roja es menos la integral de la verde. Y finalmente, para la onda cuadrada de la figura 15 notamos lo mismo, pues es fácil ver que la integral de una onda cuadrada debe de ser una función que aumenta linealmente cuando la onda cuadrada se encuentra en la región positiva y disminuye linealmente cuando se encuentra en la región negativa. Multiplicando una curva con estas características por un signo menos (y sumando alguna constante de integración), obtenemos la curva roja, por lo que efectivamente da el resultado que esperábamos del circuito.

En todos los resultados no obtenemos precisamente la integral, pues también es multiplicada por

$-1/RC$ y además se le suma una constante de integración.

Derivador

El derivador es un circuito que dada una señal de entrada V_i , regresa una señal de salida V_o cuya forma es proporcional a la derivada de V_i . En particular^[2] $V_o(t) = -RC \frac{d}{dt} V_i(t)$ con R y C valores de una resistencia y un capacitor que ocupa el circuito. Notar que a parte de integrar, el circuito multiplica a la señal por un signo negativo.

- 5.1 Obtenga el diagrama de Bode de los circuitos. Con ayuda de los circuitos obtenga los rangos de frecuencias en los que el circuito opera como integrador o derivador.

El circuito para el derivador se muestra en la figura 16.

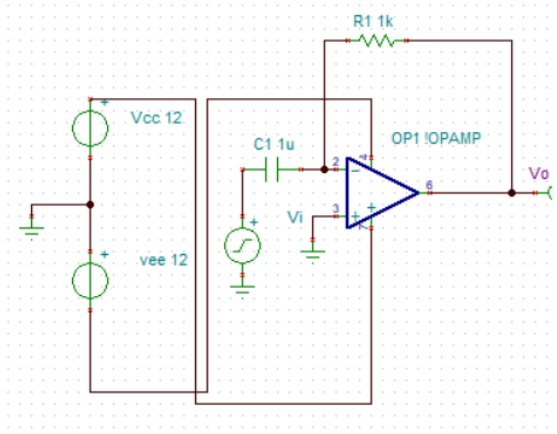


Figura 16: Circuito de derivador

La entrada de voltaje en el circuito que proporciona el voltaje V_i es la fuente V_{G1} . Además, la resistencia tiene un valor de $1k\Omega$ y el capacitor un valor de $10\mu F$.

Luego se aplicó el AC transfer characteristic que viene incluido en TINA-TI con lo que se obtiene el diagrama de Bode para el circuito, que se muestra en la figura 17.

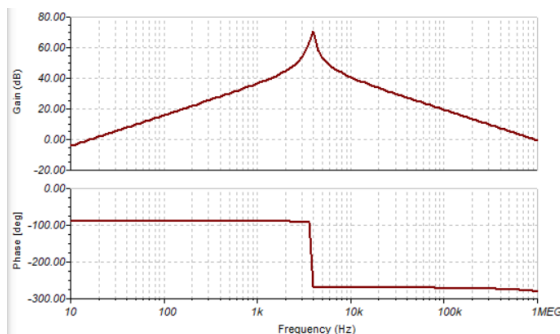


Figura 17: Diagrama de Bode del derivador

En la figura se muestra la ganancia y desfase que tiene el circuito para distintas frecuencias de ondas senoidales en la señal de voltaje de entrada. La señal de salida, que es menos la derivada de la entrada debería de ser un menos coseno, por lo que el desfase debería de ser de -90 grados. Vemos que esto se cumple en el rango de frecuencias de entre $10Hz$ y $3kHz$. Sin embargo, para frecuencias mayores a $3kHz$, notamos que el desfase es de -270 grados, lo cual corresponde a derivar la función de entrada (pero sin multiplicar por menos).

- 5.2 Ajuste la señal V_{G1} como una señal senoidal con una frecuencia dentro del rango de operación de los circuitos. Haga la simulación de la respuesta transitoria del circuito y repórtela.

Siguiendo lo mencionado en el paso anterior, para V_{G1} se escogió una señal senoidal con frecuencia de $1kHz$ (en el que ya vimos que el circuito actúa como esperamos). Se realizó un análisis transitorio de $10ms$ y se obtuvieron los resultados de la figura 18.

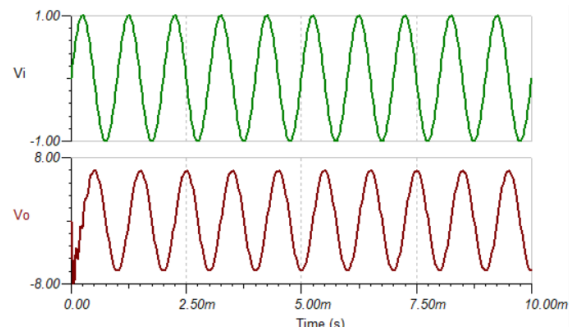


Figura 18: Análisis del derivador para señal sinoidal

La curva verde representa el voltaje de entrada V_i (que es un seno de frecuencia $1kHz$ y amplitud $1V$) y la curva roja el voltaje de salida, que debería de ser menos la derivada del de entrada.

- 5.3 Repita el paso anterior para una señal cuadrada y una señal triangular.

Lo hacemos primero para una señal triangular de frecuencia $1kHz$ y amplitud $1V$. El resultado se muestra en la figura 19.

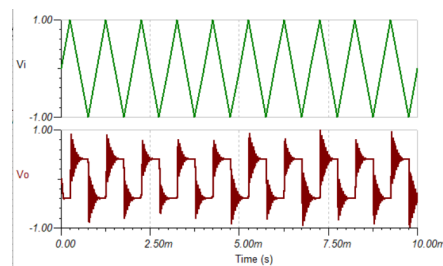


Figura 19: Análisis del derivador con onda triangular

La curva verde representa el voltaje de entrada, que es una curva triangular con frecuencia $1kHz$ y amplitud de $1V$, mientras que la curva roja representa el voltaje de salida, que debería de ser menos su derivada.

Lo hacemos ahora para una señal cuadrada de frecuencia $1kHz$ y amplitud $1V$. El resultado se muestra en la figura 15.

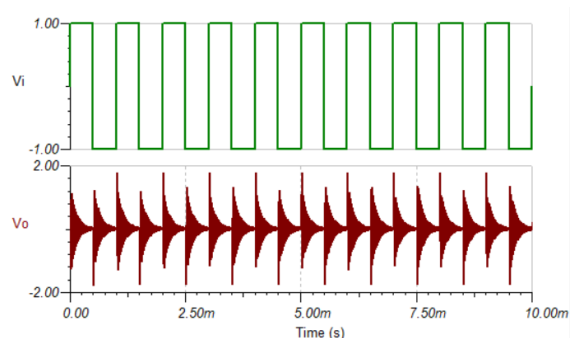


Figura 20: Análisis del integrador con onda triangular

La curva verde representa el voltaje de entrada, que es una curva cuadrada con frecuencia $1kHz$ y amplitud de $1V$, mientras que la curva roja representa el voltaje de salida, que debería de ser menos su derivada.

5.4 Explique sus resultados.

En la simulación de la señal sinoidal de la figura 18 vemos que la señal de entrada es un seno y que la salida tiene la misma forma pero con un desfase de -90 grados, lo que implica que es un menos coseno. Esto coincide con lo que esperábamos de que el derivador regrese menos la derivada de la función original (y además multiplicada por un factor RC que cambia su amplitud).

Para la onda triangular de la figura 19 se pone más complicado. La derivada (multiplicada por un signo menos) de la señal triangular debería de ser una función que tenga un valor negativo y constante cuando la señal triangular sube y que tenga un valor positivo constante cuando la señal triangular baja. Vemos en la figura 19 que esto casi se cumple, pero que tenemos zonas con ruido en los tiempos en los que la señal triangular alcanza un pico. Esto se explica porque en dichos puntos la derivada de la señal triangular ni siquiera está definida, que es lo que causa problemas en el circuito y genera el ruido.

Por último, para la señal cuadrada de la figura 20 esperaríamos que la derivada tuviera un valor de

0 en todo momento excepto cuando la señal cuadrada hace un salto, donde la derivada vale infinito o menos infinito. Vemos que la señal de salida obtenida por el circuito efectivamente es como una constante igual a 0 pero tiene mucho ruido en los momentos en los que la señal cuadrada da un salto. Esto es debido a que en dichos momentos la derivada es infinita, por lo que causa problemas con el circuito y genera el ruido.

Comparadores

Como se explicó en la pregunta 3, un comparador es un circuito que determina en cada momento del tiempo cuál de entre dos señales tiene un mayor voltaje. Analizaremos ahora un comparador.

7.1 Seleccione una señal V_{G1} triangular con una frecuencia entre $100Hz$ y $1kHz$ y amplitud mayor o igual a $3V$

En la figura 21 se muestra el circuito comparador.

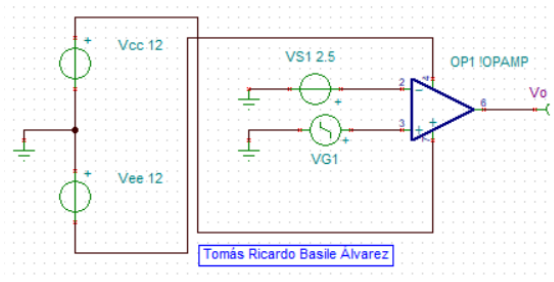


Figura 21: Circuito del comparador

En V_{G1} se seleccionó una señal triangular con frecuencia de $500Hz$ y amplitud de $5V$.

7.2 Haga la simulación transitoria y reporte las formas de onda

Se realizó un análisis transitorio con duración de $10ms$. Los resultados se muestran en la figura 22.

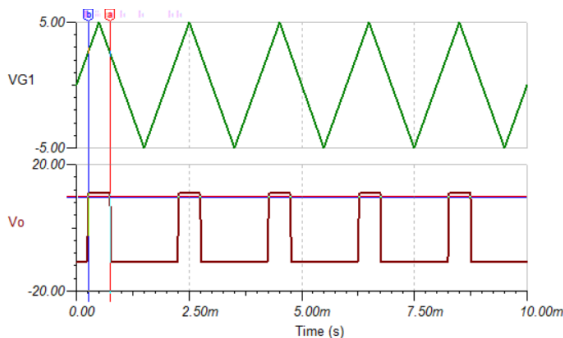


Figura 22: Análisis del comparador

La curva verde de la figura 22 representa el voltaje de entrada V_{G1} , que es un voltaje triangular de amplitud $5V$ y frecuencia $500Hz$. La curva roja representa el voltaje de salida del comparador.

7.3 Explique qué hace el circuito

Como se explica en la pregunta 3, para cada momento del tiempo, el voltaje de salida toma un valor positivo V_{S+} si el voltaje de la entrada no inversora es mayor al de la entrada inversora y toma un valor negativo V_{S-} si el voltaje de la entrada

inversora es el mayor.

En este caso la entrada inversora tiene un voltaje $2.5V$ mientras que la no inversora es la onda triangular. Por lo tanto, el voltaje de salida tendrá un valor constante positivo cuando la onda triangular supera los $2.5V$ y uno negativo cuando no supera los $2.5V$. Vemos en la figura 22 que esto efectivamente se cumple, por ejemplo, la zona entre los cursores tiene un voltaje mayor a $2.5V$ y vemos que efectivamente esa zona tiene un voltaje de salida positivo V_{S+} .

7.4 Explique en dónde podría usar este circuito.

Un comparador como éste se puede usar como convertidor de A.C. a D.C. Como vemos en la figura 22, los comparadores convierten señales analógicas en señales que sólo pueden tomar dos valores posibles. Esta conversión corresponde a transformar la señal analógica en una señal de un bit, donde el valor 1 es representado por uno de los voltajes resultantes y el valor 0 es representado por el otro voltaje.

Comparador de Histéresis

Ahora simulamos el comparador de histéresis.

7.1 Seleccione una señal V_{G1} triangular con una frecuencia entre $100Hz$ y $1kHz$ y amplitud mayor o igual a $3V$

En la figura 23 se muestra el circuito comparador.

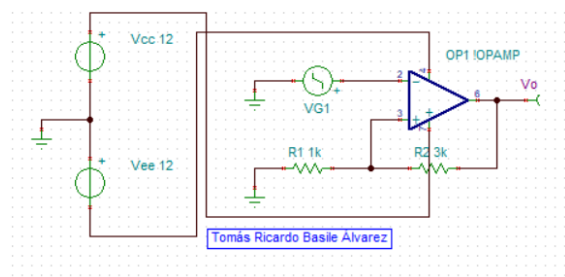


Figura 23: Circuito del comparador de histéresis

En V_{G1} se seleccionó una señal triangular con frecuencia de $1000Hz$ y amplitud de $5V$.

7.2 Haga la simulación transitoria y reporte las formas de onda

Se realizó un análisis transitorio con duración de $10ms$. Los resultados se muestran en la figura 24.

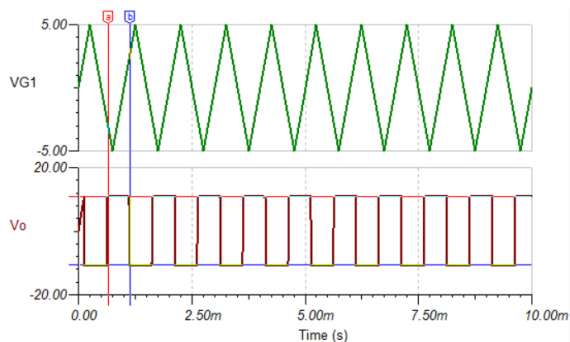


Figura 24: Análisis del comparador de histéresis

La curva verde de la figura 24 representa el voltaje de entrada V_{G1} , que es un voltaje triangular de amplitud $5V$ y frecuencia $500Hz$. La curva roja representa el voltaje de salida del comparador.

7.3 Explique qué hace el circuito

Los comparadores con histéresis funcionan de una forma similar a los que no la tienen pero ahora dos valores de voltaje de umbral V_H y V_L con $V_H > V_L$. El voltaje de salida tendrá un valor de salida V_{S+} si el voltaje de la señal es mayor a V_H y tendrá un valor de salida V_{S-} si la señal es menor a V_L .^[4]

Sin embargo si la señal se encuentra debajo de V_L y luego lo supera, no hay cambio en el voltaje de salida hasta que supere el valor V_H . Y si se encuentra arriba de V_H y disminuye por abajo de ese valor, no hay cambio hasta que pase por abajo de V_L . Esta propiedad permite que si la señal es ruidosa y la separación entre V_L y V_H es mayor al ruido, entonces dicho ruido no causará que la señal de salida cambie varias veces debido al ruido.

El ejemplo de la figura 24 no muestra explícitamente esto, pero si lo hacemos con una señal más ruidosa se ve clara la utilidad de la histéresis. En la curva verde de la figura 25 se tiene una señal ruidosa de entrada V_{in} y los dos valores umbrales. Se puede ver que a pesar del ruido de la señal, el voltaje de salida sólo cambia de valor en dos momentos debido, como se explicó antes, a la histéresis.

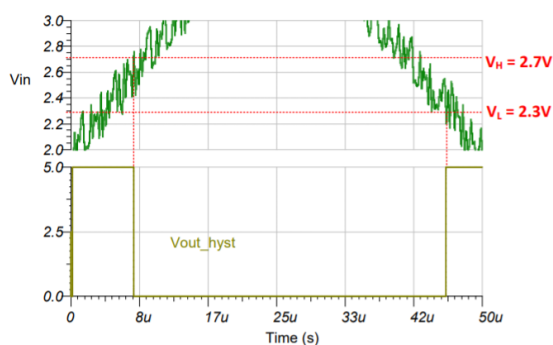


Figura 25: Comparador con histéresis para señal ruidosa. Obtenida de [4]

7.4 Explique en dónde podría usar este circuito.

La utilidad de este circuito es la misma que la del circuito sin histéresis que se mencionó antes, pero con la ventaja de que no se activa debido al ruido. Por lo tanto, es mucho más útil para aplicaciones reales, en las que el ruido casi siempre está presente.

Conclusiones

Se lograron los objetivos de implementar y analizar circuitos sencillos utilizando amplificadores operacionales. Nos fue posible construir un seguidor de voltaje, un amplificador inversor, un amplificador no inversor, un integrador, un derivador y un comparador y simularlos para ver que tuvieran el comportamiento esperado.

Además, con las simulaciones en TINA obtuvimos resultados muy similares a los esperados teóricamente. Para el seguidor de voltaje esperábamos una amplitud de salida de $1V$, pero obtuvimos en la simulación un valor de $0,919V$, por lo que se tuvo un error de $8,1\%$. En el amplificador inversor obtuvimos un mejor resultado, pues se esperaba una amplitud de $8,2V$ y se obtuvo una de $8,03V$, siendo un error de $2,07\%$. Y por último, en el amplificador no inversor, se esperaba una amplitud de voltaje de salida de $9,2V$ y se obtuvo un resultado de $8,94V$, lo que indica un error de $2,83\%$.

Estos errores porcentuales cuantificados indican que los amplificadores funcionaron de una forma muy cercana a la esperada teóricamente, con el mayor error siendo de $8,1\%$ en el seguidor de voltaje.

Por otro lado, en el derivador, integrador y los comparadores no hay un análisis cuantitativo para ver la diferencia entre el resultado obtenido y el esperado. Sin embargo, en estos circuitos sí se revisó cualitativamente que los resultados tuvieran sentido y tuvieran el comportamiento descrito teóricamente.

Por ello, concluimos que estos circuitos funcionaron de la forma esperada en el simulador y modificaron las señales de entrada de la forma esperada.

Bibliografía

1. Rashid, Muhammad H. Microelectronic Circuits Analysis and Design Second edition. Cengage Learning, 2011
2. Jaeger, Richard C., and Travis N. Blalock. Micro-electronic circuit design. New York: McGraw-Hill, 2010.
3. Horowitz, Paul and Hill Winfield. The art of electronics - 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
4. Kay, Art. Comparator with Hysteresis Reference Design. Texas Instruments.
<https://www.ti.com/lit/ug/tidu020a/tidu020a.pdf?ts=1638069557507>