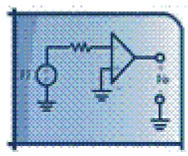
5. AMPLIFICADOR OPERACIONAL



5.1. INTRODUCCIÓN

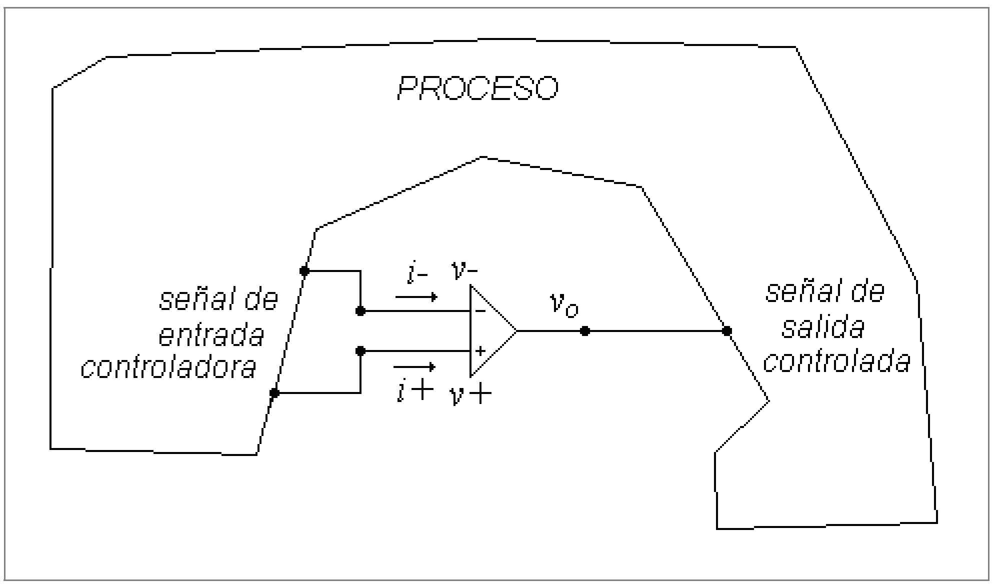


Figura 5-1

En la actualidad la mayoría de procesos en la industria o en nuestros hogares están controlados por dispositivos electrónicos. Estos procesos se controlan por medio de circuitos analógicos o digitales, o combinaciones de ambos. En cualquier caso es usual tener una o varias señales de entrada medidas en alguna parte del circuito - señales controladoras - que se usan para calcular el valor de una señal de salida o señal controlada:

señal de salida = función de control(señales de entrada)

Los amplificadores operacionales permiten implementar la función de control realizando diversas operaciones matemáticas, como sumas, restas, multiplicaciones, derivadas e integrales. De allí su nombre de *amplificadores operacionales*.

La Figura 5-1 muestra la idea del uso del amplificador conectado a un circuito cualquiera en el cual se tiene una *señal* de entrada que permitirá realizar el *control* de una señal de salida. La señal de entrada está dada por los voltajes de los terminales llamados inversor y no inversor, v- y v + respectivamente. La señal de salida está dada por el voltaje v_o. El amplificador operacional suela ser denominado OPAM, por sus siglas en inglés.

5.2. MODELO "REAL" DEL AMPLIFICADOR

La Figura 5-2 muestra un modelo "real" del amplificador operacional conectado a un circuito en el cual la señal de entrada alimenta una resistencia de entrada *Rin*, la cual representa la resistencia de entrada del instrumento de medición de la señal de entrada v_d. Esta señal de entrada v_d= (v+ - v-) se convierte en la variable controladora de una fuente controlada que determina el voltaje a la salida, que toma el valor de A(v+ - v-), donde A es la ganancia del amplificador, también llamada *ganancia de lazo abierto*. Esta fuente controlada alimenta la carga conectada en el terminal de salida v_o y dado que hay una resistencia de salida *Ro* (que representa la resistencia interna de la fuente) se produce allí una caída de voltaje.

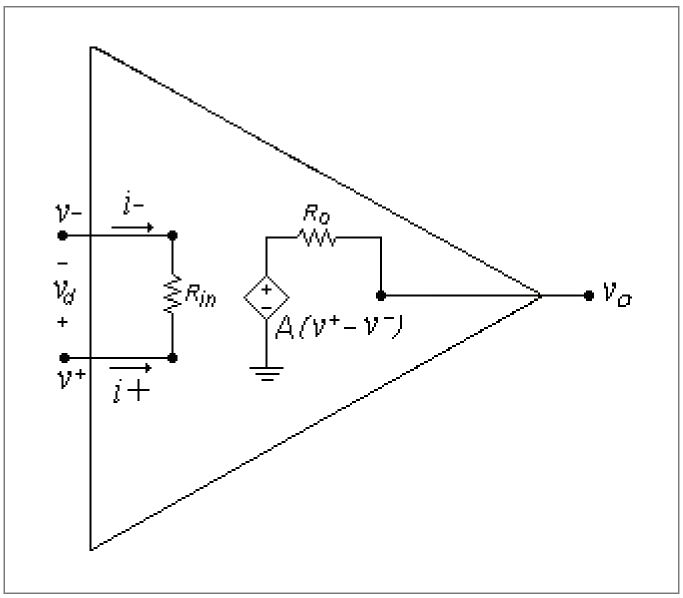


Figura 5-2

5.3. MODELO DE RESISTENCIAS IDEALES DEL AMPLIFICADOR

El modelo de resistencias ideales del amplificador asume que no hay pérdidas resistivas de energía ni en la entrada ni en la salida del amplificador. Esto implica adicionalmente que no se altera la corriente en el circuito al que se conecta ($i^- = 0$). Para esto se requiere que la resistencia de entrada *Rin* sea lo más grande posible, llegando a ser infinita (circuito abierto), de manera que no haya corriente entrando o saliendo por los terminales v+ y v-. De esta manera el voltaje de la señal de entrada no se ve afectado por la medición de la misma, como ocurre cuando la *Rin* es finita. Igualmente para que no haya pérdidas de energía en la salida del amplificador por disipación en la resistencia de salida *Ro* se requiere que esta resistencia sea cero, de manera que $v_0 = A(v^+ - v^-)$, independiente de la corriente que solicite la carga conectada a la salida del amplificador.

Resumiendo, para modelo de resistencias ideales del amplificador se tiene:

$$R_{in} = \infty \;\Rightarrow \textit{Circuito Abierto en los terminales de entrada} \Rightarrow i^+ = i^- = 0$$

$$R_0 = 0 \;\Rightarrow \textit{Corto Circuito en la resistencia de salida} \Rightarrow v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$$

Estas características del amplificador ideal se muestran en la Figura 5-3.

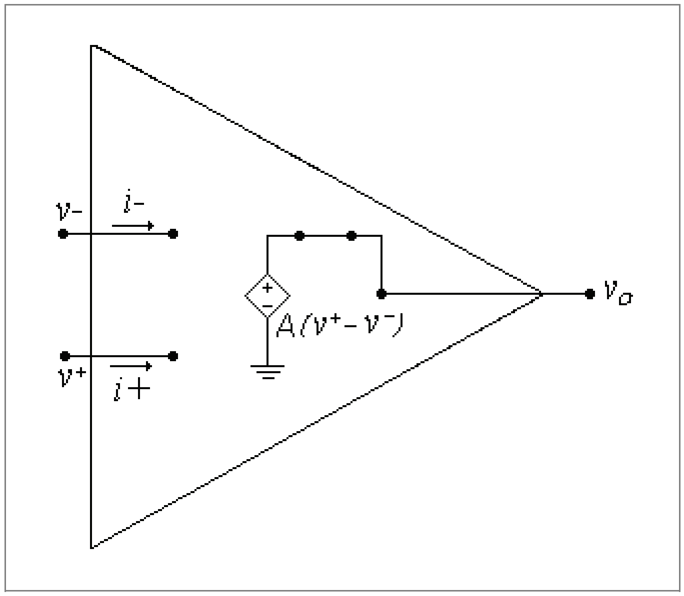


Figura 5-3

Este amplificador ideal puede tener algunas variantes, debidas al valor que tenga la ganancia A y la existencia o no de un voltaje de saturación que se explican a continuación.

Nota: en algunos textos se indica que el amplificador ideal tiene ganancia A infinita. Aquí vamos a separar los dos casos (A finita e infinita), manteniendo las condiciones sobre las resistencias ideales de entrada y salida.

5.4. MODELO IDEAL DEL AMPLIFICADOR – MODELO DE CORTO CIRCUITO VIRTUAL

El modelo de resistencias ideales del amplificador presentado en la Figura 5-3 puede tener una ganancia A de valor finito o infinito. Aquí infinito quiere decir tan exageradamente grande que se comporta como infinita. Esto es útil pues simplifica mucho los cálculos y al comparar con los valores obtenidos con ganancias A finitas muy grandes los resultados son casi idénticos. De hay la utilidad de este modelo, que puede tener o no saturación.

El valor de v_o siempre tiene un valor finito en la salida y dado que v_o = A(v+ - v-) se requiere que si A tiende a ser muy grande, (v+ - v-) tienda a ser muy pequeño para mantener en voltaje de salida v_o en un valor estable.

Así en el límite:

$$A \to \infty \Rightarrow (v+ - v-) \to 0 \Rightarrow v+ = v-$$

Otra manera de verlo es la siguiente: Para que en una configuración dada el valor de v_o se mantenga estable, el amplificador ajustará la corriente de salida para que el voltaje de salida se mantenga estable, para lo cual requiere por un lado que haya una realimentación (medida) de la señal de salida en la entrada y por otro lado que (v+ - v-) sea muy pequeño, para lo cual al circuito hace que el voltaje en los terminales v+ y v- se igual. Como el voltaje en los dos terminales será el mismo se dice que están en corto circuito virtual, y si uno de ellos, por ejemplo el no inversor está conectado a tierra v+ = 0V y por tanto el terminal inversor tendrá un voltaje v- = 0V. En este caso se dice que el terminal inversor del amplificador tiene una *tierra virtual* (ya que v- = 0V).

En resumen el Modelo Ideal del Amplificador es entonces un caso particular del modelo de resistencias ideales, en el cual se tiene:

$$R_{in} = \infty \Rightarrow i^+ = i^- = 0$$

$$R_0 = 0$$
$$A \to \infty \Rightarrow v+ = v-$$

Estos resultados se muestran en la Figura 5-4.

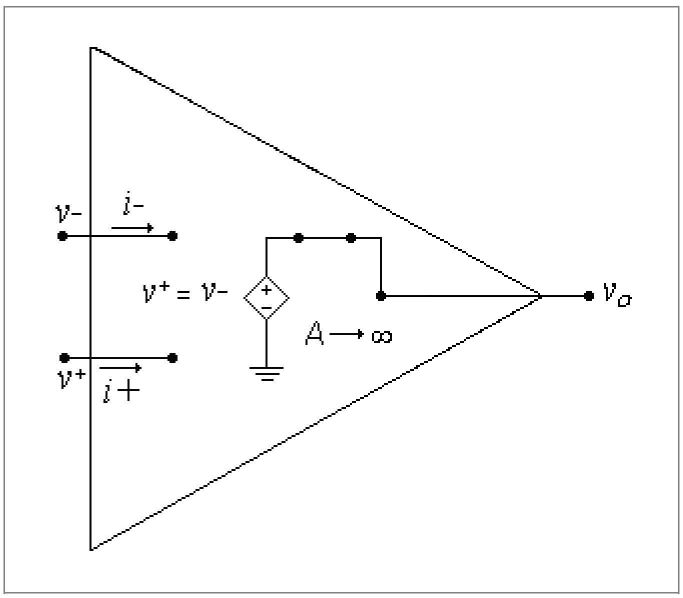


Figura 5-4

5.5. MÉTODO DE CÁLCULO CON AMPLIFICADOR IDEAL CON GANANCIA A INFINITA

El hecho de que v+ = v- y de que i+ = i- = 0 fija las restricciones para el cálculo del circuito. Se escribe las ecuaciones de nodos para los terminales de entrada en función de los voltajes de entrada y el voltaje de salida teniendo en cuenta que no hay corriente entrando en dichos terminales y dado que v+ = v- se igualan los voltajes de los terminales de entrada y de allí se tienen las ecuaciones necesarias para calcular el voltaje de salida en función de las señales de entrada y de la topología del circuito.

5.6. CONFIGURACIONES DE LAZO CERRADO DEL AMPLIFICADOR

Ya se ha mencionado el concepto ganancia de lazo abierto A. Ahora introducimos el concepto de ganancia de lazo cerrado, la cual corresponde a la relación entre la señal de salida y la señal de entrada del amplificador, al cual se le han realizado unas conexiones adicionales que permitirán realizar funciones muy específicas al circuito que incorpora al amplificador: inversiones, sumas, restas, etc. En estas configuraciones el amplificador siempre tendrá una realimentación negativa, por lo cual se dice que el lazo está cerrado. Para ilustrar este concepto lo mejor es analizar los distintos ejemplos que se presentan a continuación.

Las configuraciones más conocidas son: Inversor, No-inversor, Sumador, Restador, Seguidor o aislador.

Existe otro tipo de configuración que realiza una tarea muy especial conocida como Comparador, pero esta no corresponde a una configuración de lazo cerrado ya que no tienen realimentación

Ejemplo 5-1. Amplificador Ideal en configuración Inversor.

Para el circuito de la Figura 5-5, con amplificador ideal, encontrar:

a. la señal de salida en función de las señales de entrada.
b. la ganancia de lazo cerrado.

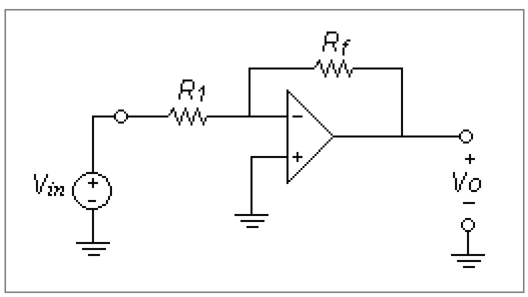


Figura 5-5

Solución

Parte a)

Sabiendo que el amplificador es ideal tenemos v+ = v-, y dado que el terminal no inversor está conectado a tierra tenemos:

$$v^{+} = 0 = v^{-}$$

Ahora hacemos KCL en el terminal inversor, recordando que por ser un modelo ideal i^{-} es cero:

$$\frac{v_{in} - v^{-}}{R_1} + \frac{v_0 - v^{-}}{R_f} = 0$$

$$\frac{v_{in}}{R_1} + \frac{v_0}{R_f} = 0$$

$$\boxed{v_0 = -\frac{R_f}{R_1} v_{in}}$$

Parte b)

La relación entre la señal de salida y la señal de entrada nos da la ganancia de lazo cerrado:

$$\frac{v_0}{v_{in}} = -\frac{R_f}{R_1}$$

Ejemplo 5-2. Amplificador Ideal en configuración Restador.

Para el siguiente circuito con amplificador ideal encontrar la señal de salida en función de las señales de entrada. ¿Existe ganancia de lazo cerrado?

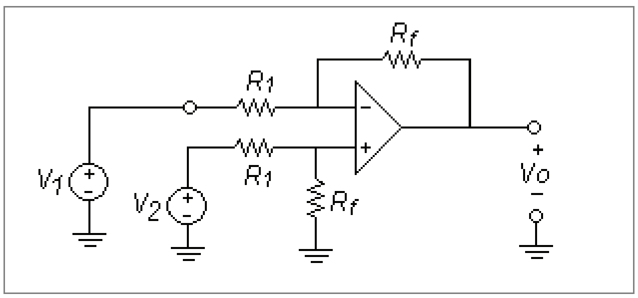


Figura 5-6

Solución

Sabiendo que el amplificador es ideal tenemos v+ = v- procedemos a encontrar primero el valor de v+. Dado que no entra corriente por el terminal no inversor podemos aplicar el divisor de voltaje para calcular fácilmente el valor de v+:

$$v^+ = \left(\frac{R_f}{R_1 + R_f}\right) v_2 = v^-$$

Ahora hacemos KCL en el terminal inversor, recordando que por ser un modelo ideal i^- es cero:

$$\frac{v_1 - v^-}{R_1} + \frac{v_0 - v^-}{R_f} = 0$$

$$\frac{v_1 - v^+}{R_1} + \frac{v_0 - v^+}{R_f} = 0$$

Reemplazando el valor de v+ y despejando *V*o tenemos:

$$v_0 = \frac{R_f}{R_1}(v_2 - v_1)$$

Este resultado nos muestra que la señal de salida es igual la diferencia de las señales de entrada. Esto representa que se está eliminando lo que es común a las dos señales. Por tal motivo esta configuración se conoce con el nombre de rechazo de modo común.

Adicionalmente la salida está siendo amplificada por una ganancia positiva $\frac{R_f}{R_1}$ que se podría considerar como la ganancia de lazo cerrado, respecto a la diferencia de las señales de entrada.

Ejemplo 5-3. Amplificador Ideal en configuración Seguidor.

Para el circuito de la Figura 5-7, con amplificador ideal, encontrar:

a. La señal de salida en función de la señal de entrada.
b. La ganancia del lazo cerrado.
c. El origen de la corriente por la carga.

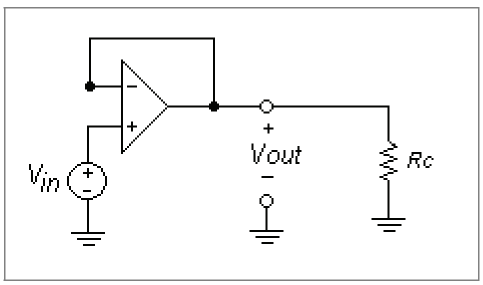


Figura 5-7

Solución

Parte a)

Sabiendo que el amplificador es ideal tenemos v+ = v-, y dado que el terminal no inversor está conectado a la fuente de entrada tenemos:

$$v^+ = v^- = v_{in}$$

Adicionalmente se tiene que $v^- = v_o$, de manera que

$$v_o = v_{in}$$

Como la señal de salida es igual a la de entrada se dice que el circuito se comporta como un seguidor de voltaje. El interés de esto se ve en la parte (c) de este ejemplo.

Parte b)

Directamente tenemos que la ganancia de lazo cerrado es:

$$\frac{v_o}{v_{in}} = 1$$

Parte c)

Como el amplificador es ideal no entra corriente por el terminal no inversor, de manera que la fuente de entrada no inyecta corriente al circuito. Lo mismo ocurre por el terminal inversor. De manera que la corriente debe venir de la salida del amplificador. Esta corriente proviene por supuesto de la alimentación del amplificador, la cual no está representada en el circuito.

Lo anterior implica que al conectar una resistencia de carga recibe el mismo voltaje de la señal de entrada, pero con una corriente que viene del amplificador y no de la fuente de entrada. Esto permite aislar la señal de entrada del circuito de la salida. Por tal motivo esta configuración también se llama aislador.

Ejemplo 5-4. Amplificador "Real" con equivalentes de Thévenin.

Encontrar *Vo* en el circuito de la Figura 5-8 con OPAM ideal.

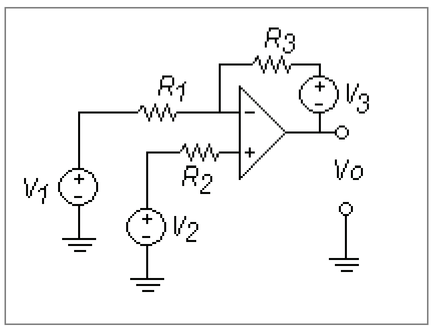
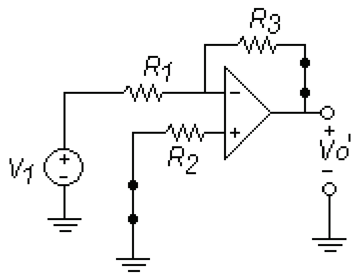


Figura 5-8

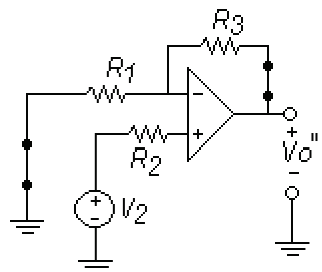
Solución

Usamos superposición para cada una de las fuentes como se indica en la siguiente Figura 5-9:



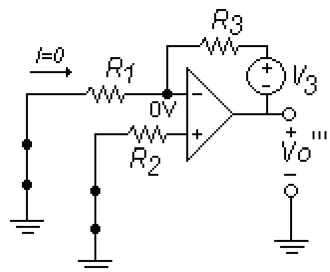
Inversor:

$$Vo' = -V_1\left(\frac{R_3}{R_1}\right)$$



No-Inversor:

$$Vo'' = V_2\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)$$



$$v^+ = v^- = 0$$

$$Vo''' = 0 - V_3 = -V_3$$

Figura 5-9

Sumando las tres respuestas tenemos:

$$Vo = Vo' + Vo'' + Vo''' = -V_1\left(\frac{R_3}{R_1}\right) + V_2\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right) - V_3$$

5.7. MODELO IDEAL DEL AMPLIFICADOR CON SATURACIÓN

Un amplificador ideal puede es capaz de suministrar en la salida cualquier valor de voltaje positivo o negativo, de acuerdo a lo previsto por las ecuaciones encontradas con el modelo ideal. El modelo ideal del amplificador presentado anteriormente asume que la fuente de voltaje controlada de la salida es ideal y que puede suministrar cualquier valor de voltaje de salda v_o, dado por la expresión $v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$.

Sin embargo en un modelo más realista ocurre que esta fuente controlada no está en capacidad de suministrar un voltaje de salida v_o por fuera de cierto rango:

$$V_{sat-n} \geq v_o \geq V_{sat-p}$$

Donde V_{sat-n} es el voltaje de saturación negativa, que corresponde al valor mínimo que puede tomar el voltaje de salida; V_{sat-p} es voltaje de saturación positiva, que corresponde al valor máximo que puede tomar el voltaje de salida.

En este caso, cuando las condiciones del circuito hacen que $v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$ se acerque al valor v_o = V_{sat-p} y trate de aumentar, el valor de v_o será siempre V_{sat-p}. Así mismo, cuando las condiciones del circuito hacen que v_o se acerque a valores negativos cercanos a v_o = V_{sat-n} y trate de ser aún menor, el valor de v_o permanecerá en V_{sat-n}.

El fenómeno descrito anteriormente es el que se denomina **Saturación**. El valor del voltaje de saturación con frecuencia es muy similar al voltaje de alimentación del amplificador y en general se asume que la saturación para los valores positivos y negativos es igual: $|V_{sat-n}| = V_{sat-p} = V_{sat}$. Este valor V_{sat} se denomina simplemente *Voltaje de Saturación*.

Otra caso muy importante que puede producir saturación en un amplificador es cuando no existe ningún tipo de realimentación o cuando la realimentación se hace por el terminal inversor – *realimentación positiva* – en vez de hacerlo por el terminal no inversor – realimentación negativa – (como se verá en los cursos de electrónica y que está fuera del alcance de este curso). En estos casos por definición el amplificador siempre estará saturado, independientemente de las demás condiciones del circuito.

En resumen, el OPAM estará saturado en estos tres casos:

- Si el amplificador tiene a un voltaje de salida por fuera del rango $V_{sat-n} \geq v_o \geq V_{sat-p}$
- Si no hay ningún tipo de realimentación.
- Si hay realimentación positiva pero no hay realimentación negativa.

5.8. AMPLIFICADOR CON VD NO NULO

Si V_d vale cero el comportamiento del amplificador es como se describió en la sección anterior. Sin embargo existen varios casos en los cuales *Vd* puede ser diferente de cero: cuando la ganancia del amplificador A es finita y cuando el amplificador se encuentra *saturado*.

5.9. MODELO IDEAL DEL AMPLIFICADOR CON GANANCIA A FINITA

Si la ganancia A del amplificador tiene un valor finito ($A \neq \infty$) ya no es válido que $v+ = v-$ y por tanto $(v+ - v-) = v_d \neq 0$. Sin embargo sigue siendo válido que $v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$ y que $i+ = i- = 0$. Además del hecho de que puede haber o no fenómeno de saturación.

En este caso se debe analizar el circuito calculando $v+$ y $v-$ en forma independiente y relacionándolos con v_o mediante la ecuación $v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$.

Ejemplo 5-5. Amplificador de resistencias ideales en configuración Inversor.

Para el circuito de la Figura 5-10 con amplificador de resistencias ideales encontrar:

a. la señal de salida en función de las señales de entrada.

b. la ganancia de lazo cerrado.

c. analizar el comportamiento de la ganancia de lazo cerrado cuando A tiende a infinito.

d. la relación entre las ganancias de lazo cerrado para un amplificador real y el ideal, tomando como valore de A un valor típico de un amplificador comercial como el LF411 con ($R_f = 50k\Omega$, $R_1 = 25k\Omega$ y $A = 10^5$). Sacar una conclusión al respecto.

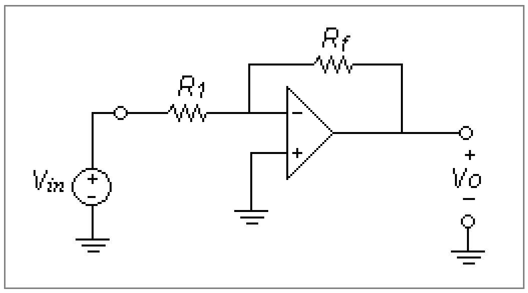


Figura 5-10

Solución

Parte a)

Dado que el valor de A no es infinito, no se necesariamente se cumple el hecho de que $v^+ = v^-$, de manera que se debe calcular v^- a partir de la relación $v_0 = A\left(v^+ - v^-\right)$, la cual es válida para la salida dado que $R_0 = 0$.

Como el terminal no inversor esta conectado a tierra $v^+ = 0$, de manera que $v_0 = A\left(-v^-\right)$. Despejando v^- tenemos:

$$v^- = -\frac{v_0}{A}$$

Por otra parte como $R_{in} = \infty$ se sigue cumpliendo que $i^+ = i^- = 0$, de manera que al aplicar KLC en el terminal inversor tenemos:

$$\frac{v_{in} - v^-}{R_1} + \frac{v_0 - v^-}{R_f} = 0$$

Reemplazando el valor calculado para v^-:

$$\frac{v_{in}-\left(-\frac{v_0}{A}\right)}{R_1}+\frac{v_0-\left(-\frac{v_0}{A}\right)}{R_f}=0$$

$$\frac{Av_{in}+v_0}{R_1}+\frac{Av_0+v_0}{R_f}=0$$

$$\frac{Av_{in}+}{R_1}+v_0\left(\frac{1}{R_1}+\frac{A}{R_f}+\frac{1}{R_f}\right)=0$$

$$\frac{v_{in}+}{R_1}+v_0\left(\frac{1}{AR_1}+\frac{1}{R_f}+\frac{1}{AR_f}\right)=0$$

$$v_0=-\frac{v_{in}}{R_1}\frac{1}{\left(\frac{1}{AR_1}+\frac{1}{R_f}+\frac{1}{AR_f}\right)}$$

Finalmente multiplicando por R_f tenemos la expresión buscada:

$$v_0=-v_{in}\frac{R_f}{R_1}\frac{1}{\left(1+\frac{R_f}{AR_1}+\frac{1}{A}\right)}$$

Parte b)

La relación entre la señal de salida y la señal de entrada nos da la ganancia de lazo cerrado:

$$\frac{v_0}{v_{in}}=-\frac{R_f}{R_1}\frac{1}{\left(1+\frac{R_f}{AR_1}+\frac{1}{A}\right)}$$

Parte c)

Cuando A tiene a infinito, que sería como tener un amplificador ideal, el comportamiento debe ser el que hemos encontrado anteriormente cuando se desarrolló esta configuración para el amplificador ideal. Para encontrar este resultado debemos calculas el límite cuando A tiende a infinito:

$$\lim_{A\to\infty}\frac{v_0}{v_{in}}=\lim_{A\to\infty}\left\{-\frac{R_f}{R_1}\frac{1}{\left(1+\frac{R_f}{AR_1}+\frac{1}{A}\right)}\right\}$$

$$\lim_{A\to\infty}\frac{v_0}{v_{in}} = -\frac{R_f}{R_1}\lim_{A\to\infty}\left\{\frac{1}{\left(1+\dfrac{R_f}{AR_1}+\dfrac{1}{A}\right)}\right\} = -\frac{R_f}{R_1}\left\{\frac{1}{\left(1+0+0\right)}\right\} = -\frac{R_f}{R_1}$$

De manera que la ganancia de lazo cerrado cuando A tiende a infinito es la misma que en el caso del amplificador ideal del Ejemplo 5-1.

Parte d)

La relación entre las dos ganancias de lazo cerrado RG (o las dos salidas) es:

$$RG = \frac{v_{0-real}/v_{in}}{v_{0-ideal}/v_{in}} = \frac{v_{0-real}}{v_{0-ideal}} = \frac{1}{\left(1+\dfrac{R_f}{AR_1}+\dfrac{1}{A}\right)}$$

Al reemplazar los valores específicos ($R_f = 50k\Omega$, $R_1 = 25k\Omega$ y $A = 10^5$) tenemos:

$$RG = \frac{v_{0-real}}{v_{0-ideal}} = \frac{1}{\left(1+\dfrac{50k\Omega}{10^5\cdot 25k\Omega}+\dfrac{1}{10^5}\right)} = 0.99997$$

$$v_{0-real} = 0.99997 v_{0-ideal}$$

Se puede concluir que el comportamiento del amplificador con ganancia real finita (que es muy grande, sin ser infinita) es muy similar al del amplificador ideal. Esto justifica que se use frecuentemente el modelo ideal.

Ejemplo 5-6. Amplificador “Real” en configuración Inversor.

Para el circuito de la Figura 5-11 con amplificador “real” encontrar la señal de salida en función de la señal de entrada.

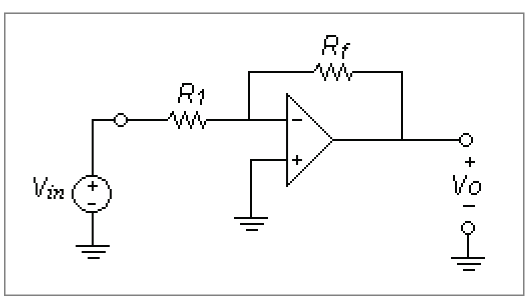


Figura 5-11

Solución

Como el modelo a utilizar es el modelo "real" utilizamos el circuito de la Figura 5-12:

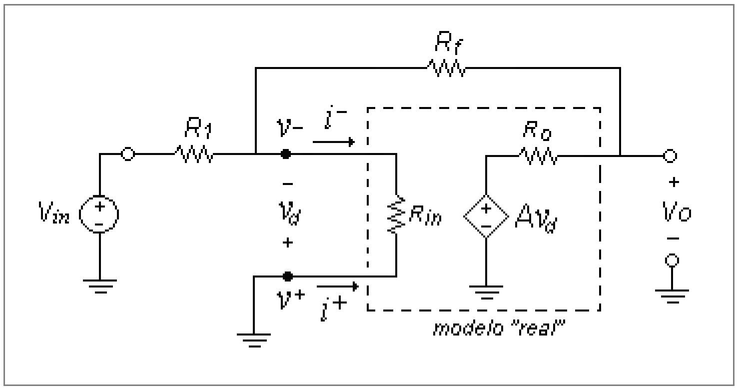


Figura 5-12

Como el terminal no inversor está conectado a tierra $v^+ = 0$. De manera que tenemos dos incógnitas: v^- y v_o. El voltaje en la fuente controlada es $Av_d = A(v^+ - v^-) = -Av^-$. Para encontrar un sistema que involucre estas dos incógnitas vamos a aplicar el método de análisis de nodos en los nodos v^- y v_o.

KCL en nodo v^-:

$$\left(\frac{v_{in} - v^-}{R_1}\right) + \left(\frac{v_o - v^-}{R_f}\right) + \left(\frac{0 - v^-}{R_{in}}\right) = 0$$

$$\left(\frac{1}{R_f}\right)v_o - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{in}}\right)v^- = -\frac{v_{in}}{R_1}$$

KCL en nodo v_o:

$$\left(\frac{Av_d - v_o}{R_o}\right) + \left(\frac{v^- - v_o}{R_f}\right) = 0$$

$$\left(\frac{A(0 - v^-) - v_o}{R_o}\right) + \left(\frac{v^- - v_o}{R_f}\right) = 0$$

$$-\left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_f}\right)v_o + \left(\frac{1}{R_f} - \frac{A}{R_o}\right)v^- = 0$$

Poniendo estas ecuaciones en forma matricial tenemos:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & -\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{Rf}+\frac{1}{R_{in}}\right) \\ -\left(\frac{1}{R_o}+\frac{1}{R_f}\right) & \left(\frac{1}{R_f}-\frac{A}{R_o}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_o \\ v^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{v_{in}}{R_1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ahora calculamos v_o usando la regla de Cramer:

$$v_o = \begin{vmatrix} -\frac{v_{in}}{R_1} & -\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{Rf}+\frac{1}{R_{in}}\right) \\ 0 & \left(\frac{1}{R_f}-\frac{A}{R_o}\right) \end{vmatrix} \Bigg/ \begin{vmatrix} \frac{1}{R_f} & -\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{Rf}+\frac{1}{R_{in}}\right) \\ -\left(\frac{1}{R_o}+\frac{1}{R_f}\right) & \left(\frac{1}{R_f}-\frac{A}{R_o}\right) \end{vmatrix}$$

$$v_o = -v_{in}\frac{\left(\frac{1}{R_1}\right)\left(\frac{1}{R_f}-\frac{A}{R_o}\right)}{\left(\frac{1}{R_f}\right)\left(\frac{1}{R_f}-\frac{A}{R_o}\right)-\left(\frac{1}{R_o}+\frac{1}{R_f}\right)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{Rf}+\frac{1}{R_{in}}\right)}$$

Luego de algunas simplificaciones llegamos a la siguiente expresión para la configuración del Inversor con modelo “real” del amplificador:

$$v_o = -v_{in}\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\frac{1}{\left[1+\frac{(R_f+R_o)}{(AR_f+R_o)}\left(1+\frac{Rf}{R_1}+\frac{Rf}{R_{in}}\right)\right]}$$

Nótese que si hacemos que si hacemos que las resistencias sean ideales ($R_{in}=\infty$ y $R_0 = 0$) debemos llegar a la expresión obtenida en el Ejemplo 5-5. Primero hagamos $R_0 = 0$:

$$v_o\Big|_{R_0=0} = -v_{in}\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\frac{1}{\left[1+\frac{(R_f+0)}{(AR_f+0)}\left(1+\frac{Rf}{R_1}+\frac{Rf}{R_{in}}\right)\right]} = -v_{in}\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\frac{1}{\left[1+\frac{1}{A}\left(1+\frac{Rf}{R_1}+\frac{Rf}{R_{in}}\right)\right]}$$

$$v_o\Big|_{R_0=0} = -v_{in}\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\frac{1}{\left[1+\frac{1}{A}+\frac{Rf}{AR_1}+\frac{Rf}{AR_{in}}\right]}$$

Ahora calculamos el límite cuando la resistencia de entrada tiende a infinito:

$$\lim_{R_{in}\to\infty} v_o\Big|_{R_0=0} = -v_{in}\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\frac{1}{\left[1+\frac{1}{A}+\frac{Rf}{AR_1}+\frac{Rf}{AR_{in}}\right]} = -v_{in}\frac{R_f}{R_1}\frac{1}{\left(1+\frac{R_f}{AR_1}+\frac{1}{A}\right)}$$

Este último resultado corresponde exactamente a lo encontrado anteriormente cuando se usó el modelo de resistencias ideales en el Ejemplo 5-5.

5.10. REGIÓN ACTIVA Y REGIÓN DE SATURACIÓN

La saturación es un fenómeno por el cual el amplificador no puede poner en la salida un voltaje por fuera del rango de los voltajes de alimentación del propio amplificador (V_{DC}+ y V_{DC}- que no hemos representado en las gráficas de los modelos) en cualquier instante de tiempo. En general el voltaje de saturación es cercano a un voltio por debajo del voltaje de alimentación. Dado que hay dos alimentaciones, positiva y negativa, existen dos voltajes de saturación: saturación positiva V_{sat}+ y saturación negativa V_{sat}+. Los valores de alimentación positiva y negativa, así como los voltajes de saturación positiva y saturación negativa no necesariamente son simétricos (iguales en valor absoluto). Esto se puede apreciar en la Figura 5-13. Lo anterior implica que el voltaje de salida v_0 se ve limitado o acotado por los límites que impone los voltajes de saturación positiva y negativa.

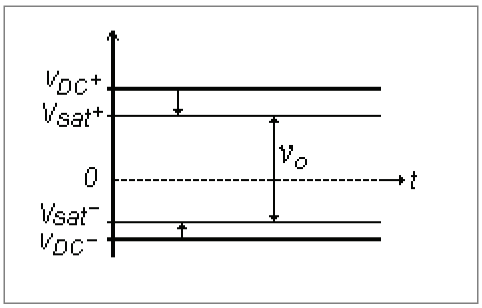


Figura 5-13

Cuando el amplificador no tiene saturación el valor de al salida v_o es el previsto por la ecuación de v_0 resultante de aplicar alguno de los modelos vistos anteriormente (ideal, resistencias ideales, “real”).

Si el amplificador tiene voltajes de saturación definidos (para cualquiera de los modelos) la situación es diferente: si la salida se encuentra entre el voltaje de saturación positiva y el voltaje de saturación negativa, se dice que el amplificador está operando en Región Activa, y la salida será la prevista por las ecuaciones resultantes de aplicar el modelo deseado (ideal, resistencias ideales, “real”) y la configuración específica (inversor, no-inversor, seguidor, etc.). Si el voltaje de salida está fuera de este rango se dice que el amplificador está saturado y que opera en la Región de Saturación. Existen dos regiones de saturación: positiva y negativa, dependiendo si la salida toma el voltaje de saturación positivo o el voltaje de saturación negativo respectivamente.

Adicionalmente, por la manera que en que se fabrican los amplificadores (tema de cursos más avanzados) cuando no existe realimentación negativa el amplificador se satura (se podría decir que es “por definición”).

5.11. MÉTODO DE CÁLCULO CON AMPLIFICADOR IDEAL CON SATURACIÓN Y REALIMENTACIÓN NEGATIVA

El método es el de prueba y error. Consiste en asumir que el circuito se encuentra con el amplificador operando en región activa y hacer los cálculos del voltaje de salida correspondientes a la configuración y modelos deseados.

Para determinar los valores de las entradas para los cuales se alcanza la saturación se hace lo siguiente:

1. Se asume que el amplificador opera en región activa (sin saturación) y se calcula v_o en función de las entradas $v_0 = f(v_1, \ldots, v_n)$ teniendo en cuenta la configuración y modelo específico. El valor de $f(v_1, \ldots, v_n)$ será entones el valor de la salida v_o en región activa.
2. Luego se encuentran las condiciones de las entradas v_1, … , v_n para las cuales se tiene saturación positiva: $f(v_1, \ldots, v_n) \geq V_{sat+}$. Para estas condiciones la salida será $v_o = V_{sat+}$.
3. Luego se encuentran las condiciones de las entradas v_1, … , v_n para las cuales se tiene saturación negativa: $f(v_1, \ldots, v_n) \leq V_{sat-}$. Para estas condiciones la salida será $v_o = V_{sat-}$.

En resumen, cuando hay saturación se tiene:

$$v_o = \begin{cases} f(v1,\ \ldots\ ,\ vn) & \text{, si } V_{sat-} \leq f(v1,\ \ldots\ ,\ vn) \leq V_{sat+} & \text{, región activa} \\ V_{sat+} & \text{, si } f(v1,\ \ldots\ ,\ vn) > V_{sat+} & \text{, región saturación positiva} \\ V_{sat-} & \text{, si } f(v1,\ \ldots\ ,\ vn) < V_{sat+-} & \text{, región saturación negativa} \end{cases}$$

5.12. MÉTODO DE CÁLCULO CON AMPLIFICADOR IDEAL CON SATURACIÓN Y SIN REALIMENTACIÓN NEGATIVA

Cuando no hay realimentación negativa, el amplificador no puede controlar el voltaje de salida v_o a un valor estable y automáticamente se satura, de manera que para el caso ideal tenemos:

$$v_o = \begin{cases} V_{sat+} \text{, si } (v+\ \text{-}\ v\text{-}) = vd > 0 & \text{, región saturación positiva} \\ V_{sat-} \text{, si } (v+\ \text{-}\ v\text{-}) = vd < 0 & \text{región saturación negativa} \end{cases}$$

Ejemplo 5-7. Amplificador Ideal Comparador.

En el siguiente circuito el amplificador es ideal con voltajes de saturación positiva y negativa definidos (los cuales no se conocen directamente, pero se pueden aproximar a un voltio de los voltajes de alimentación del amplificador). Graficar la señal de entrada y la señal de salida si la señal de entrada es $v_{in}(t) = 3V + 2sen(80\pi \cdot t)V$, el voltaje de referencia es 3V, la alimentación positiva es de 6V y la alimentación negativa es de -1V.

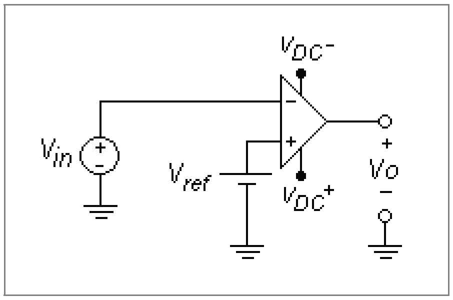


Figura 5-14

Solución

Nótese que en este caso no existe ganancia de lazo cerrado ya que no existe realimentación. De manera que el método de solución se basa en saber si el amplificador está en saturación positiva o negativa. El voltaje de salida deberá tomar entonces uno de los valores de saturación. Esto dependerá del valor de v_d. De manera que debemos conocer los voltajes de saturación y determinar para qué condiciones v_d es positivo o negativo.

Los voltajes de saturación los calculamos con buena aproximación a partir de los voltajes de alimentación:

$$V_{sat+} = V_{DC+} - 1V = 6V - 1V = 5V$$
$$V_{sat-} = V_{DC-} + 1V = -1V + 1V = 0V$$

Como se aprecia en la siguiente figura los voltajes de saturación están acotados por los voltajes de alimentación del amplificador. La señal de salida *Vo* será una señal binaria que tomará uno de los dos valores de saturación: 0V ó 5V. El valor de 0V se tiene cuando $v_d < 0$ (saturación negativa) y el de 5V cuando $v_d > 0$ (saturación positiva).

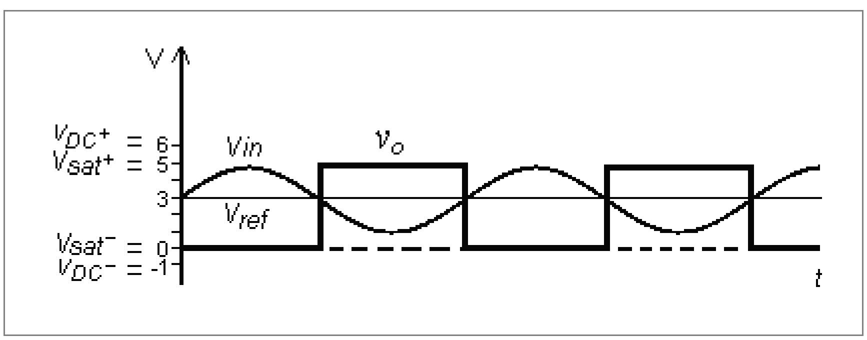


Figura 5-15

Como
$$v_d = \left(v^+ - v^-\right) = V_{ref} - V_{in} = 3V - \left[3V + 2sen(80\pi \cdot t)V\right] = -2sen(80\pi \cdot t)V$$
tenemos:

$$v_o = \begin{cases} Vsat^+ = 5V \text{, si } -2sen(80\pi \cdot t)V > 0 & \text{, región saturación positiva} \\ Vsat^- = 0V \text{, si } -2sen(80\pi \cdot t)V < 0 & \text{región saturación negativa} \end{cases}$$

Adicionalmente se podría calcular para qué valores de *t* se dan tales condiciones.

5.13. SIMULACIONES

5.13.1. AMPLIFICADOR OPERACIONAL

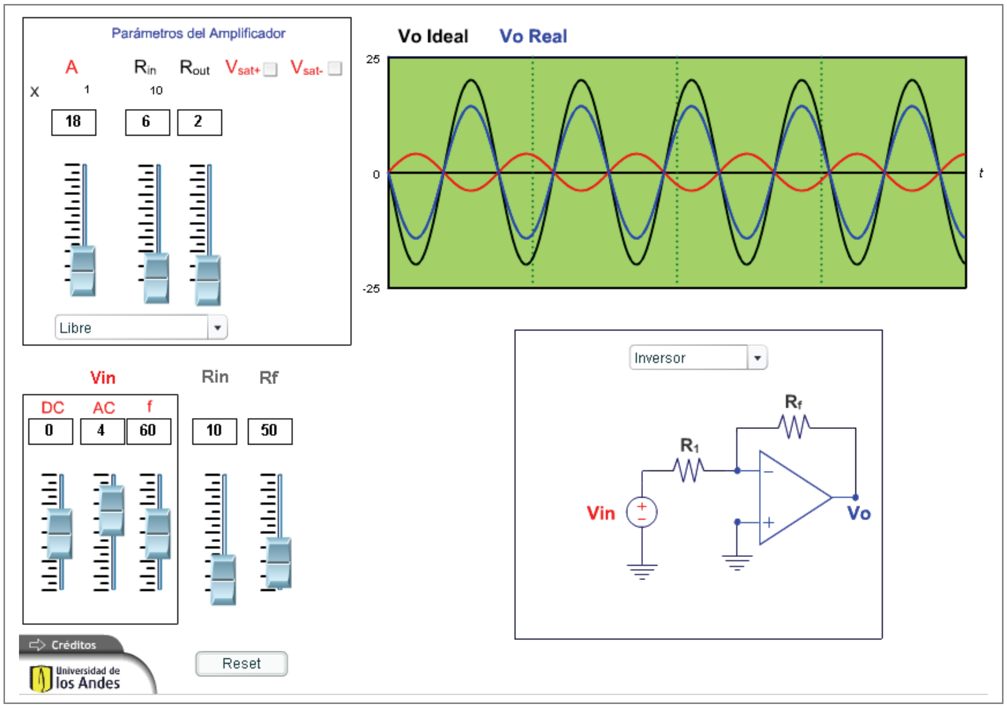


Figura 5-16

Descripción

Esta simulación muestra distintas configuraciones de amplificadores operacionales (Inversor, No Inversor, Seguidor, Sumador, Restador, Comparador) y los efectos en la señal de salida respecto a los parámetros del amplificador como son la ganancia de lazo abierto, las resistencias de entrada y salido o el voltaje de saturación.

Uso educativo

Esta simulación se presenta como un complemento a la clase presencial, para estudiantes de primeros semestres de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Mecánica. Una vez los estudiantes manejan los conceptos de fuentes controladas, resistencia de entrada, resistencia equivalente, KCL y los conceptos básicos del amplificador operacional, como su modelo ideal y real y el de saturación, podrán seleccionar distintas configuraciones (Inversor, No Inversor, Seguidor, Sumador, Restador, Comparador), varias los parámetros propios del amplificador o seleccionar un amplificador del mercado y ajustar las señales de entrada (nivel DC, amplitud AC y la frecuencia) para ver el comportamiento de la señal de salida en cada caso. Pueden comparar la señal de salida del modelo ideal contra la señal de salida del modelo real (A finito, resistencia de entrada finita y resistencia de salida no nula).