

CAPITULO 3

Diseño con OTAs

En la actualidad el área procesamiento analógico de señales ha sido desarrollada ampliamente, debido a que vivimos en un mundo inherentemente analógico y se requiere alguna forma de procesado tal que sirva para la conversión de datos, es decir, como interfaz para sistemas digitales. [10,11] Una explicación de por qué los circuitos analógicos son tan usados es porque estos suelen ser muy simples para ser usados a altas frecuencias y son idóneos para aplicaciones de muy baja potencia.

El amplificador de transconductancia con BJTs fue comercialmente introducido en 1969 por RCA. Con el auge del transistor CMOS los diseñadores comenzaron a usar OTAs CMOS a mediados de los 80s, convirtiéndolo en un componente vital en un gran número de circuitos eléctricos destinados al procesamiento analógico de señales. [13] Es por eso que en este capítulo se abordan algunos temas de la teoría de OTAs, ya que parte de este trabajo propone la realización de filtros activos usando este tipo de componentes.

3.1 Amplificadores Operacionales de Transconductancia

Un OTA es un amplificador operacional semejante a un op-amp con la particularidad de proporcionar una corriente de salida, de ahí su nombre, porque dado que la respuesta en el puerto de salida es una corriente y la señal en el puerto de entrada es un voltaje; su función

de transferencia será $H(j\omega) = \frac{I_{out}}{V_{in}}$, o sea una transconductancia, su símbolo se aprecia

en la Fig. 3.1 y su macromodelo en la Fig. 3.2.

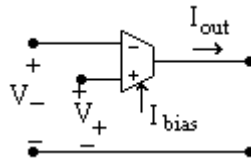


Fig. 3.1 Símbolo para el OTA.

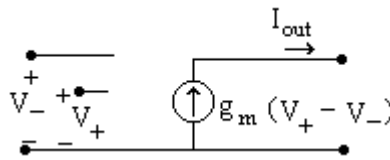


Fig. 3.2 Macromodelo para el amplificador operacional de transconductancia.

Usualmente, el OTA tiene una frecuencia de operación mayor que los op-amps convencionales que trabajan en modo de voltaje, de ahí que sea usado en circuitos de alta frecuencia.

La corriente de salida I_{out} está dada por la siguiente ecuación:

$$I_{out} = g_m (V_+ - V_-) \quad (3.1)$$

Es importante notar que ahora la impedancia de salida es infinita, esto es porque el elemento de salida tiene una fuente de corriente. El valor de la transconductancia g_m está en función de la corriente de alimentación I_{bias} (Ec. 3.2). Tal que,

$$g_m = g_m(I_{bias}) \quad (3.2)$$

El desempeño de estas estructuras de una sola salida puede ser mejorado usando topologías totalmente diferenciales (Fully Differential), la señal es dirigida a trayectorias diferenciales en lugar de ser enviada a la muy comúnmente usada tierra analógica. Los circuitos totalmente diferenciales son completamente simétricos, y sus ventajas principales se deben a esta característica. La fuente de ruido es inyectada a ambas salidas del op-amp/OTA con la misma amplitud y fase, de ahí que se pueda considerar como ruido en modo común. Las componentes impares de distorsión armónica aparecen en las salidas con la misma amplitud y fase, e idealmente se cancelan las unas con las otras cuando la corriente de la salida diferencial es procesada [9]. Se puede ver que los op-amps y OTAs diferenciales preservan las propiedades de impedancia de entrada y salida de sus contrapartes de una sola salida. Las Figs. 3.3 y 3.4 muestran los símbolos para los circuitos diferenciales y sus macromodelos respectivamente.

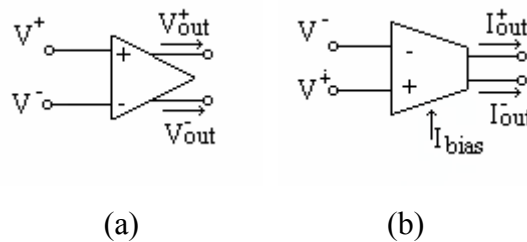


Fig. 3.3 Estructuras diferenciales a) símbolo para el Op-amp; b) símbolo para el OTA.

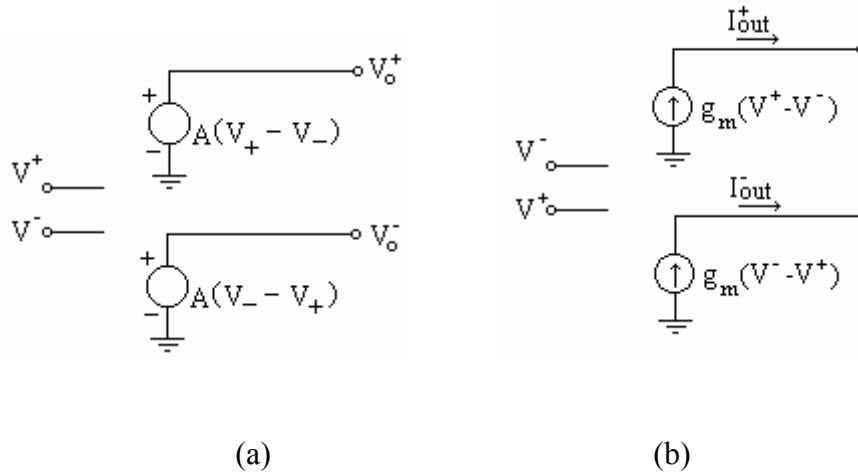


Fig. 3.4 Estructuras diferenciales a) macromodelo para el Op-amp; b) macromodelo para el OTA.

Para los macromodelos con OTAs, las corrientes de salida para las salidas inversora y no inversora son como sigue

$$I_{out}^- = g_m (V_- - V_+) \quad (3.3)$$

$$I_{out}^+ = g_m (V_+ - V_-) \quad (3.4)$$

A continuación se listan algunas características del op-amp y del OTA:

Tabla 3.1 Comparación entre Op-amps y OTAs.

Op-amp	OTA
<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de voltaje a la salida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de corriente a la salida.
<ul style="list-style-type: none"> • Baja impedancia de salida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta impedancia de salida.
<ul style="list-style-type: none"> • Su buffer incrementa la disipación de potencia, ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene buffer de salida, menor disipación de potencia.
<ul style="list-style-type: none"> • En su construcción comúnmente se usan resistencias y capacitores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede construir solamente con transistores.

Estas características nos llevan a escoger al OTA como el componente indicado para ser usado en la construcción de filtros activos, debido a que algunas implicaciones de las características listadas son: al construirse solamente con transistores se reduce la capacitancia total, ayudando a su mejor desempeño a altas frecuencias, al carecer de buffer de salida disipa menos potencia que el op-amp y el tener una alta impedancia de salida lo hace más viable para ser conectado con otros circuitos.

3.2 Amplificador inversor

Para ejemplificar como pueden ser utilizados los OTAs, tomaremos en cuenta la Fig. 3.5 que corresponde a un amplificador inversor hecho con un op-amp, que es el circuito más simple usado en procesamiento lineal de señales. Debido a su gran impedancia de entrada no fluye corriente hacia la entrada inversora del op-amp y por ley de corrientes de Kirchhoff

$$i_1 + i_F = 0 \quad (3.5)$$

Además, ya que $V_+ = 0$ debido a la ganancia teórica infinita del op-amp

$$i_1 = \frac{v_{in}}{R_{in}} \quad (3.6)$$

y

$$i_F = \frac{v_{out}}{R_F} \quad (3.7)$$

tal que,

$$\frac{v_{in}}{R_1} + \frac{v_{out}}{R_F} = 0 \quad (3.8)$$

despejando V_{out} de 3.8 tenemos:

$$v_{out} = -\frac{R_F}{R_1} v_{in} \quad (3.9)$$

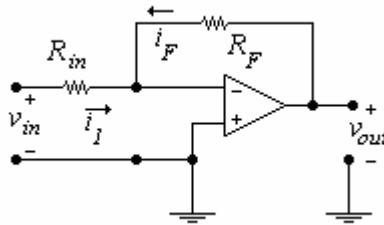


Fig. 3.5 Amplificador inversor hecho con un op-amp.

Similarmente vemos que el voltaje de salida está dado por el producto del voltaje de entrada por la ganancia del amplificador operacional $-R_F / R_1$. Un amplificador inversor de ganancia unitaria puede obtenerse haciendo $R_1 = R_F = R$ como se muestra en la Fig. 3.6. Un amplificador inversor hecho con un OTA se muestra en la Fig. 3.7.

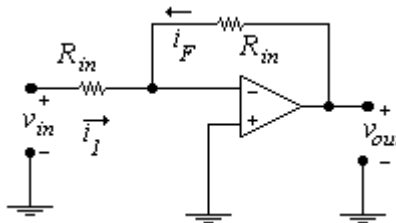


Fig. 3.6 Amplificador de ganancia unitaria.

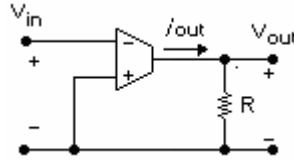


Fig. 3.7 Amplificador inversor hecho con un OTA.

Dado que la corriente de salida es $i_{out} = -g_m V_{in}$, el voltaje de salida estará dado por:

$$V_{out} = i_{out} R = -g_m V_{in} R \quad (3.10)$$

Nótese que el voltaje de salida es negativo debido a que la señal de entrada es inyectada en la terminal inversora de manera que la función de transferencia será:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m R \quad (3.11)$$

3.3 Resistencia a tierra

En la Fig. 3.8 se muestra el circuito equivalente con un OTA para implementar una resistencia con un extremo conectado a tierra.

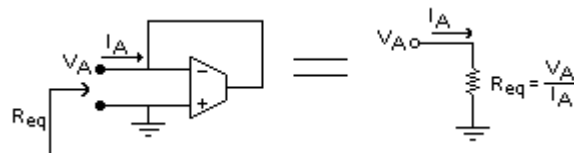


Fig. 3.8 Circuito equivalente con un OTA para una resistencia con un punto a tierra.

Usando el macromodelo del OTA tenemos que, según la Fig. 3.8, en la terminal inversora está conectado V_A tal que $V^- = V_A$, también si se considera que V_A es la señal de entrada entonces se tendrá que $V^- = V_A$, $V_0 = V_A$, luego debido a que la terminal no inversora está conectada a tierra entonces se tiene que $V^+ = 0$.

Entonces según la ecuación 3.1 se tendrá que:

$$I_o = g_m(0 - V^-) = -g_m V^- = -g_m V_A \quad (3.12)$$

pero debido a que el OTA está retroalimentado,

$$I_A = -I_o \quad (3.13)$$

y según la Fig. 3.8

$$R_{eq} = \frac{V_A}{I_A} \quad (3.14)$$

entonces reescribiendo la Ec. 3.12 con la consideración de la Ec. 3.13 se tendrá que:

$$I_A = g_m V_A \quad (3.15)$$

despejando g_m en la Ec. 3.15 de tal forma que $\frac{V_A}{I_A}$ y sustituyéndola en la Ec. 3.14 se

obtendrá:

$$R_{eq} = \frac{V_A}{I_A} = \frac{1}{g_m} \quad (3.16)$$

3.4 Resistencia flotante

La Fig. 3.9 muestra el circuito equivalente para una resistencia flotante. Esta aproximación está basada en el método de Gorski-Popiel. [20] Para su análisis suponemos que ambos OTAs son idénticos, esta suposición es sencilla de implementar debido a que ambos componentes están hechos sobre el mismo sustrato, en el mismo proceso. Y el valor de R_{eq} se obtiene también con la Ec. 3.16.

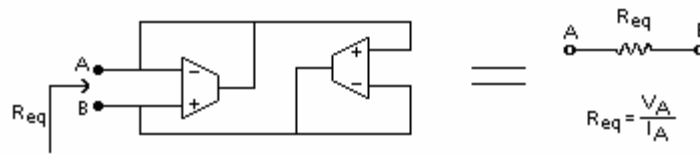


Fig. 3.9 Circuito equivalente con un OTA para una resistencia flotante.

3.5 Inductor a tierra

La implementación con OTAs para un inductor con un punto a tierra se muestra en la Fig. 3.10. [17]

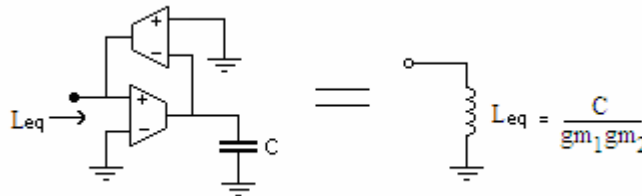


Fig. 3.10 Circuito equivalente con OTAs para un inductor con un punto a tierra.

La impedancia de entrada Z_{eq} está dada por

$$Z_{eq} = \frac{V_e}{I_e} \quad (3.17)$$

Donde $I_e = -I_{O2}$. La corriente de salida del primer OTA es $I_{O1} = g_{m1}(-V_e)$. Esta corriente fluye a través del capacitor dando el siguiente voltaje:

$$V_2^+ = \frac{I_{O1}}{sC_1} = -\frac{V_e g_{m1}}{sC_1} \quad (3.18)$$

lo cual hace que I_{O2} este dada por

$$I_{O2} = g_{m2}V_2^+ = -g_{m2} \frac{V_e g_{m1}}{sC_1} \quad (3.19)$$

ya que $I_e = -I_{O2}$,

$$Z_{eq} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{sC_1}{g_{m1}g_{m2}} = sL_{eq} \quad (3.20)$$

Entonces el inductor equivalente está dado por:

$$L_{eq} = \frac{C_1}{g_{m1}g_{m2}} \quad (3.21)$$

3.6 Inductor flotante

Utilizando nuevamente el método de Gorski-Popiel [20] pero ahora para el circuito de la Fig.3.10, obtendremos el circuito equivalente para un inductor flotante (Fig. 3.11), y al igual que en el caso anterior suponemos que todos los OTAs son idénticos, el valor de L_{eq} se obtiene con la Ec. 3.21.

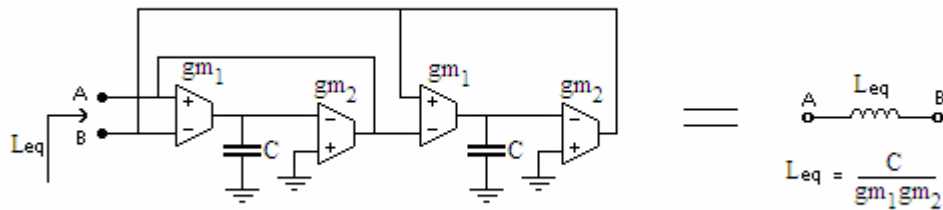


Fig. 3.11 Circuito equivalente con OTAs para un inductor flotante.

En la Fig. 3.12 se muestra otra realización para el inductor flotante pero ahora utilizando 3 OTAs. [16]

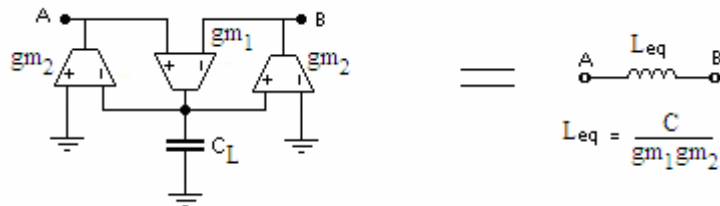


Fig. 3.12 Circuito equivalente con 3 OTAs para un inductor flotante.

3.7 Circuito resonante con inductancia a tierra

La inductancia de la Fig. 3.10 puede ser usada para obtener un circuito resonante como el que se muestra en la Fig. 3.13a y sustituyendo la resistencia y el inductor por OTAs obtenemos el circuito de la Fig. 3.13b. [9]

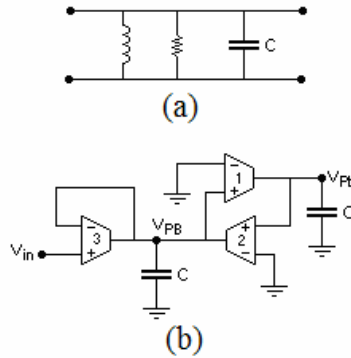


Fig. 3.13 a) Filtro pasivo pasa-banda, b) Implementación con OTAs.

De la Fig.3.13b podemos obtener un filtro pasa-banda más un filtro pasa-bajas en la salida del OTA No. 1.

Las funciones de transferencia resultantes son, para el filtro pasa-banda:

$$\frac{V_{PB}(s)}{V_e(s)} = \frac{sg_{m3}/C}{s^2 + s\frac{g_{m3}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} \quad (3.22)$$

y para el filtro pasa-bajas:

$$\frac{V_{Pb}(s)}{V_e(s)} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m3}}{C}}{s^2 + s\frac{g_{m3}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} \quad (3.23)$$

Los valores para ω_n , Q y H_0 están dados por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} = \frac{\sqrt{g_{m1}g_{m2}}}{C} \quad (3.24)$$

$$Q = \frac{\sqrt{g_{m1}g_{m2}}}{g_{m3}} \quad (3.25)$$

$$H_{0BP} = 1 \quad (3.26)$$

$$H_{0Pb} = \frac{Cg_{m3}}{g_{m2}} \quad (3.27)$$

En este capítulo se dio una breve introducción de lo que son los amplificadores operacionales de transconductancia (OTAs) y cómo pueden ser usados en circuitos para emular el comportamiento de inductores, resistencias e incluso circuitos más complicados como son los filtros. Estos conceptos serán útiles más adelante cuando se aborde el tema de filtros activos, ya que como se mencionó anteriormente, las características de estos dispositivos los hacen útiles en dicho tipo de filtros.