



SENSORES Y ACONDICIONADORES

TEMA 13

AMPLIFICADORES PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES

Profesores: Enrique Mandado Pérez
Antonio Murillo Roldan

Tema 13 - 1



INTRODUCCIÓN

Consideraciones generales

- Numerosos sensores proporcionan variaciones porcentuales muy pequeñas de un parámetro eléctrico en función de una variable física de entrada.
Ejemplo: Las galgas extensométricas
- Es más fácil medir tensiones pequeñas que tener una gran resolución en la medida de tensiones grandes.
- La mayoría de los sensores proporcionan señales continuas que pueden permanecer en un determinado nivel durante un tiempo indefinido.

Tema 13 - 2

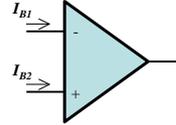


CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Amplificador operacional (AO) ideal

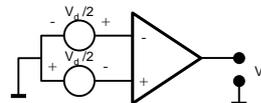
Características [PERE pagina 41]

- $A_d = \infty$
- $Z_i = \infty$
- $Z_o = 0$
- Anchura de banda = ∞
- Relación de rechazo de modo común CMRR (Common Mode Rejection Ratio) infinita



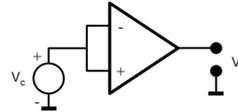
$$A_d = \frac{V_o}{V(-) - V(+)}$$

Con $V_c = 0$



$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

Con $V(-) - V(+) = 0$

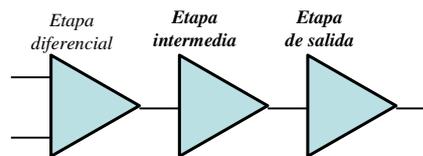


$$A_c = \frac{V_o}{V_c}$$

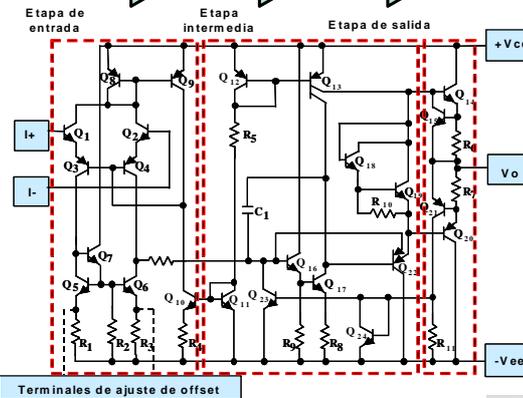
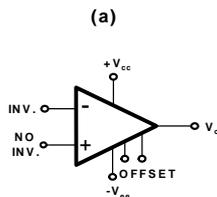
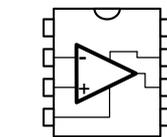
Tema 13 - 3



DIAGRAMA DE BLOQUES DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



Ejemplo: AO 741



Terminales de ajuste de offset

Tema 13 - 4



DIAGRAMA DE BLOQUES DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

AO ideal

[PERE pagina 41]

Como consecuencia de las características antes citadas:

- Las corrientes a través de los dos terminales de entrada del AO, denominadas corrientes de polarización (*Bias currents*), son nulas.
- El AO no carga al circuito que se conecta a cualquiera de sus entradas.
- La tensión de salida del AO no se modifica al conectar una carga a la salida, independientemente del valor de la misma.
- El AO no atenúa ninguna señal de entrada independientemente de su frecuencia.

Tema 13 - 5



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AO ideal (operadores analógicos básicos) [PERE pagina 50]

NOMBRE	Amplificador inversor	Amplificador no inversor	Amplificador genérico
	$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$	$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_i$	$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_3 + V_4 - V_2 - V_1)$
CIRCUITO			
APLICACIONES Y COMENTARIOS	Amplificador que invierte la señal de entrada.	Amplificador que no invierte la señal de entrada. Su ganancia es siempre superior a la unidad.	Amplificador sumador/restador.

Tema 13 - 6



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AO ideal (operadores analógicos básicos)

NOMBRE	Seguidor de tensión	Amplificador de modo diferencial o restador	Convertidor corriente-tensión
	$V_o = V_i$	$V_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$	$V_o = -R \cdot i$
CIRCUITO			
APLICACIONES Y COMENTARIOS	Circuito adaptador de impedancias. Posee una elevada impedancia de entrada y una baja impedancia de salida.	Amplificador utilizado para restar. Es el elemento básico de los amplificadores de instrumentación (AI).	Circuito básico que proporciona una tensión de salida a partir de una corriente de entrada.

Tema 13 - 7



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AO ideal (operadores analógicos básicos)

NOMBRE	Convertidor tensión-corriente	Integrador	Derivador
	$i_o = \frac{v_i}{R_1}$	$v_o = \frac{1}{R \cdot C} \int v_i(t) dt$	$v_o = -R \cdot C \frac{dv_i(t)}{dt}$
CIRCUITO			
APLICACIONES Y COMENTARIOS	Circuito básico que genera una corriente a partir de una tensión.	Circuito que calcula la integral de una tensión de entrada.	Circuito que calcula la derivada de una tensión de entrada.

Tema 13 - 8



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AO ideal (operadores analógicos básicos)

NOMBRE	Rectificador de precisión $V_o = V_i $
CIRCUITO	
APLICACIONES Y COMENTARIOS	<p>Circuito que rectifica la tensión de entrada y elimina la influencia de la caída de tensión en el diodo.</p>

Tema 13 - 9



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AO ideal (Comparadores)

Comparador básico			<p>Circuito que compara una tensión de entrada con una tensión de referencia.</p>
Comparador con histéresis		$H = \frac{2 R_2 V_{cc}}{R_1 + R_2}$	<p>Circuito que compara la tensión V_i con el nivel cero e introduce una histéresis para evitar la conmutación de la salida cuando V_i varía alrededor de cero</p>
Comparador con histéresis		$H = \frac{2 R_2 V_{cc}}{R_1 + R_2}$	<p>Como el anterior pero la histéresis se introduce alrededor de la tensión de referencia $V_{ref} \neq 0$</p>

Tema 13 - 10

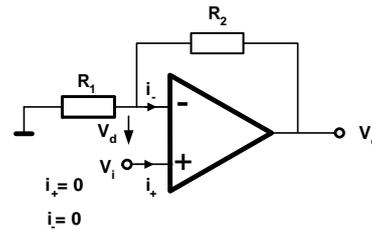


IMPERFECCIONES ESTÁTICAS [PERE página 55] DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Influencia de la ganancia diferencial en bucle abierto A_d (Open Loop Gain)

En la práctica la ganancia A_d no es infinita. Los AO de aplicación general como el AO-741 tienen una ganancia típica (A_d) del orden de 100 dB (10^5).

$$V_o = \frac{A_d}{1 + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_i$$



si $A_d = \infty$, resulta:
$$V_o = 1 + \frac{R_2}{R_1} V_i$$

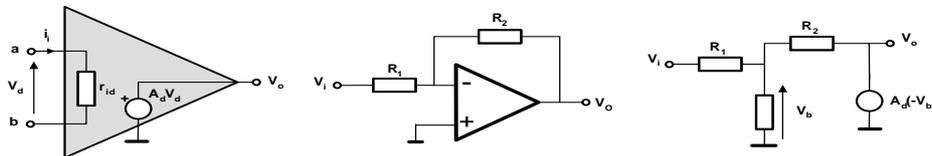
Tema 13 - 11



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Influencia de la resistencia de entrada (Input Resistance)

La resistencia de entrada es de algunas centenas de K Ω en los AO cuya etapa de entrada utiliza transistores bipolares y alcanza los 10⁶ M Ω en los AO con etapa de entrada implementada con transistores de efecto de campo (FET).



Efecto de la resistencia de entrada en un circuito inversor

$$V_o = -V_i \frac{A_d}{\frac{R_1}{R_2} (1 + A_d) + 1 + \frac{R_1}{r_{id}}}$$

si $A_d = r_{id} = \infty$, resulta:
$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

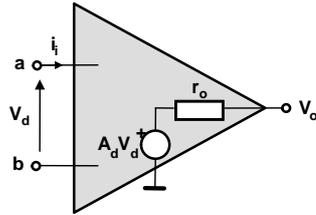
Tema 13 - 12



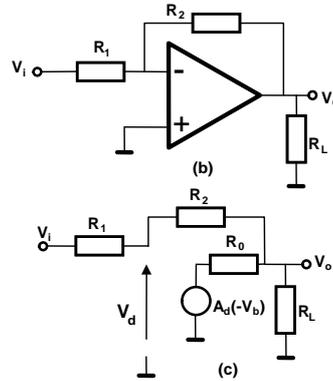
IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Influencia de la resistencia de salida r_o (Output Resistance)

Su influencia en V_o es pequeña



$$V_o = - \frac{-A_d \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{r_o}{R_1 + R_2}}{1 + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{r_o}{R_1 + R_2} + \frac{r_o}{R_L}} V_i$$



si $r_o = 0$ y $A_d = \infty$, resulta: $V_o = - \frac{R_2}{R_1} V_i$

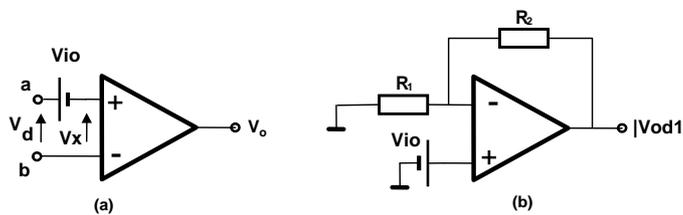
Tema 13 - 13



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Tensión de asimetría (desviación o desequilibrio) de entrada (Input Offset Voltage) [V_{io}/V_{os}]

Nivel de la tensión que hay que aplicar entre ambas entradas cuando la tensión externa es nula, para que lo sea también la tensión de salida.



$$|V_{od1}| = |V_{io}| \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Su influencia es mayor cuanto menor es el nivel de la señal a amplificar.

Tema 13 - 14



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Corrientes de polarización i_{B1} e i_{B2} (Input Bias Currents)

Corrientes i_{B1} e i_{B2} que circulan a través de los dos terminales de entrada.

Corriente de asimetría (desviación o desequilibrio) de entrada (Input Offset Current)

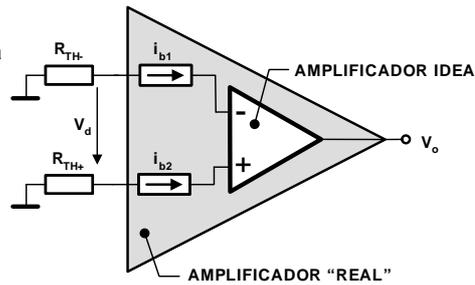
Diferencia entre i_{B1} e i_{B2} .

Las corrientes i_{B1} e i_{B2} generan una tensión diferencial de entrada:

$$V_d = R_{Th+} i_{B1} - R_{Th-} i_{B2}$$

Los fabricantes proporcionan:

$$i_B = \frac{i_{B1} + i_{B2}}{2} \quad i_{io} = |i_{B1} - i_{B2}|$$



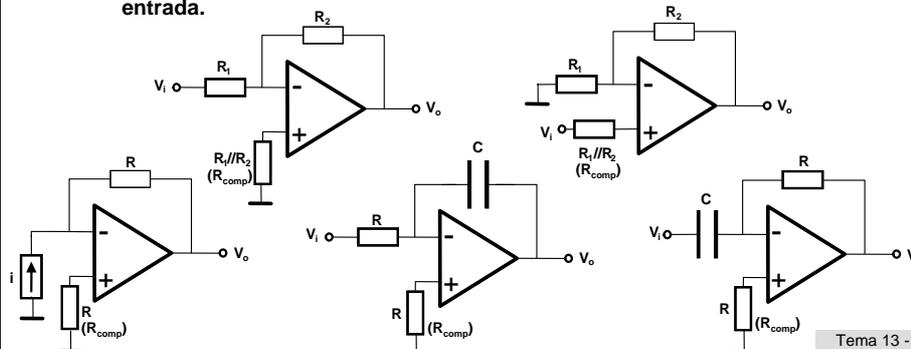
Tema 13 - 15



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Influencia de las corrientes de polarización

- Para disminuir la influencia de las i_B se utiliza R_{comp} que iguala las resistencias equivalentes conectadas a ambas entradas.
- Para disminuir la influencia de i_{io} no se deben utilizar resistencias de valores elevados (superiores a algunos $k\Omega$).
- No se puede eliminar de esta forma el efecto de la corriente de asimetría de entrada.

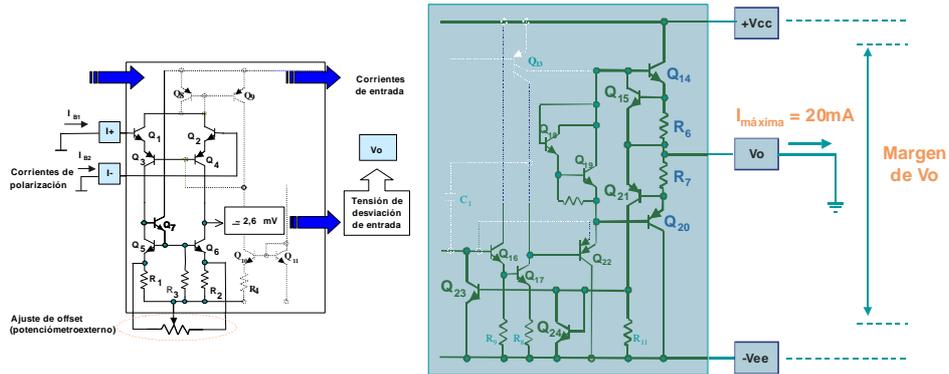


Tema 13 - 16



CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

AMPLIFICADOR 741



Imperfecciones estáticas del AO 741

Tema 13 - 17

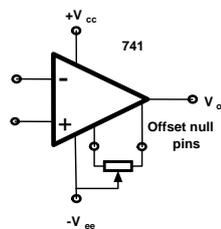


IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

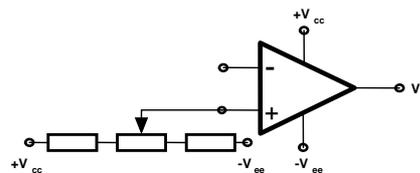
Compensación de la tensión de asimetría (Offset) de salida

La tensión de salida debida a la tensión de asimetría de entrada y a la diferencia entre las dos corrientes de polarización de entrada recibe el nombre de tensión de asimetría de salida.

Algunos AO poseen terminales para anular la tensión de asimetría de salida (*offset null pins* / V_{os} TRIM) mediante un potenciómetro. Si el AO no posee dichos terminales, el ajuste se puede realizar a través de la entrada no inversora.



Afecta negativamente
al ancho de banda
(a)



(b)

Tema 13 - 18



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Relación de rechazo de modo común CMRR (Common Mode Rejection Ratio)

Además de tener una ganancia diferencial A_d , los AO reales amplifican la señal aplicada simultáneamente a ambas entradas y la multiplican por un factor A_c

$$V_o = A_d v_d + A_c v_c$$

$$V_d = V_2 - V_1; \quad V_2 = V_c + V_d/2; \quad V_1 = V_c - V_d/2$$



Se define la relación de rechazo de modo común CMRR como:

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{A_d}{A_c} \right) \text{ dB}$$



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Relación de rechazo de modo común CMRR (Common Mode Rejection Ratio)

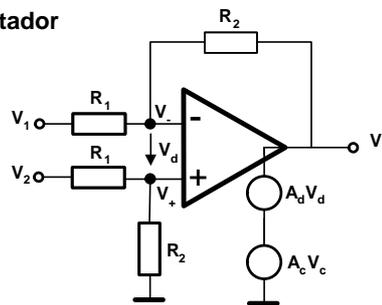
Amplificador en modo diferencial o restador

Si se considera:

$$A_d \gg \frac{A_c}{2} + \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

se tiene:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) + \frac{R_2}{R_1} \frac{V_2}{CMRR}$$



Esta expresión indica que la salida del amplificador de modo diferencial es igual al valor ideal más un término que es tanto mayor cuanto menor es el CMRR.



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Resumen (I)

EFECTOS DE LAS IMPERFECCIONES ESTÁTICAS SOBRE EL AO EN CONFIGURACIÓN NO INVERSORA		
Parámetro	Influencia	Cuándo hay que tenerlo en cuenta y otras consideraciones
$-V_{omax}$ $+V_{omax}$ Rango de la tensión de salida (Output Voltage Swing)	$-V_{omax} \leq V_o \leq +V_{omax}$	<ul style="list-style-type: none"> • Siempre es una limitación • Importante si la tensión de alimentación es baja (equipos portátiles) • En los AO de punta a punta (rail-to-rail) V_{omax} es casi igual a V_{CC}
A_d Ganancia diferencial en bucle abierto (Open Loop Gain)	$V_o = \frac{A_d}{1 + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_i$	<ul style="list-style-type: none"> • Con ganancias elevadas (R_2 grande en relación con R_1) • Con valores bajos de A_d • Cuando se tengan en cuenta la mayoría de los demás parámetros
r_{id} Resistencia de entrada (Input Resistance)	$V_o = \frac{A_d}{1 + \frac{R_1 // R_2}{r_{id}} + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_i$	<ul style="list-style-type: none"> • Con valores altos de resistencias R_1 y R_2 • Cuando la fuente de tensión de entrada tiene alta resistencia de salida
r_o Resistencia de salida (Output Resistance)	$V_o = \frac{A_d}{1 + \frac{r_o}{R_2} + \frac{r_o}{R_1 + R_2} + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_i$	<ul style="list-style-type: none"> • Con niveles de carga en la salida elevados • Es un parámetro poco importante en general

Tema 13 - 21



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Resumen (II)

EFECTOS DE LAS IMPERFECCIONES ESTÁTICAS SOBRE EL AMPLIFICADOR NO INVERSOR		
Parámetro	Influencia	Cuándo hay que tenerlo en cuenta y otras consideraciones
V_{io} (V_{so}) Tensión de asimetría (Input Offset Voltage)	$V_o = V_{oideal} + V_{io} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ (expresión válida para la configuración inversora y para la diferencial)	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando las entradas tienen un nivel de CC. • Cuando la tensión de entrada es pequeña. • Puede ser preciso realizar ajustes. • Es uno de los parámetros más importantes al seleccionar el AO. • Hay que evitar la saturación debida a la tensión de asimetría de salida en casos de ganancia alta.
I_B I_{io} Corrientes de polarización y asimetría (Input Bias and Offset Currents)	$V_{ioTOTAL} = V_{io} + V_{dB}$ $V_{dB} = I_B / R_{TH+} - R_{TH-} + I_{io} / R_{TH+} - R_{TH-} / 2$ (Se añade a la tensión de desviación)	<ul style="list-style-type: none"> • Igual que en el caso de la tensión de asimetría. • I_B se puede eliminar pero a veces no es necesario. • Con valores altos de las resistencias R_1 y R_2
Relación de rechazo de modo común (Common Mode Rejection Ratio) (CMRR) A_d / A_c	$V_o = \frac{A_d + A_c / 2}{1 + (A_d + A_c / 2) \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_1$ $V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) + \frac{R_2}{R_1} \text{CMRR} V_2$ (Sólo para el amplificador en modo diferencial)	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta al valor de la ganancia. • No tiene mucha influencia en el amplificador no inversor • Cuando la tensión de modo común tiene un valor elevado. • Cuando se pretende eliminar ruido de modo común • ¡Cuidado con su comportamiento en frecuencia!

Tema 13 - 22



IMPERFECCIONES ESTÁTICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Resumen (III)

EFECTOS DE LAS IMPERFECCIONES ESTÁTICAS SOBRE EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL EN CONFIGURACIÓN NO INVERSORA		
Parámetro	Influencia	Cuándo hay que tenerlo en cuenta y otras consideraciones
PSRR	$PSRR = 20 \log \frac{\Delta V_{\text{Alimentación}}}{\Delta V_o}$	<ul style="list-style-type: none"> • En sistemas portátiles (Alimentados con baterías) • Puede ser conveniente incluir reguladores de tensión en la alimentación • Sólo se tiene en cuenta para variaciones lentas
Relación de rechazo de la alimentación (Power Supply Rejection Ratio)		

Tema 13 - 23

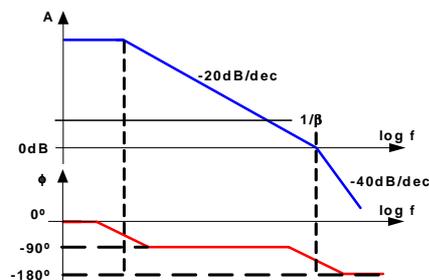


IMPERFECCIONES DINÁMICAS [PERE página 76] DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Ancho de banda (*Bandwidth*)

Definición: Rango de frecuencias para el que la disminución de la ganancia es inferior a 3 dB ($\sqrt{2}$). Por ejemplo en el 741 es 4Hz.

Debido a las capacidades parásitas la ganancia de un AO disminuye al elevarse la frecuencia de las señales que se le aplican. Los AO en cuyo circuito no se conectan condensadores se comportan como sistemas lineales de segundo orden que tienen dos polos en su diagrama ganancia-frecuencia.



Tema 13 - 24

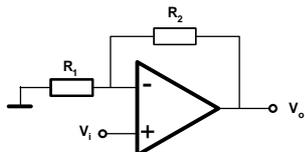


IMPERFECCIONES DINÁMICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Ancho de banda (*Bandwidth*) de un circuito implementado con un AO

Se obtiene a partir de la curva de ganancia en bucle abierto del AO y de la ganancia del circuito.

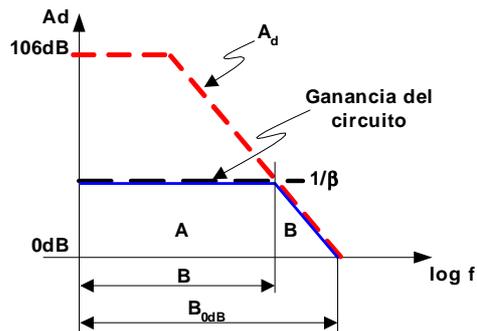
Ejemplo: AO741



$$G = \frac{A_d}{1 + A_d \beta}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Circuito amplificador no inversor
realimentado con un factor β



Ganancia del amplificador no
inversor

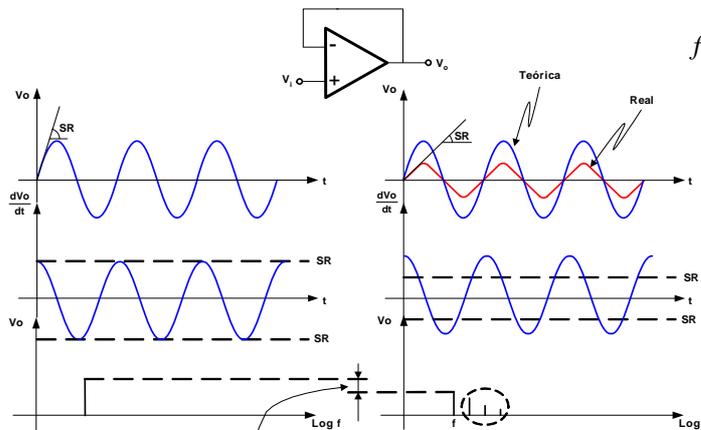
Tema 13 - 25



IMPERFECCIONES DINÁMICAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Pendiente de cambio (*Slew Rate*)

Máxima pendiente de cambio de la señal de salida (se suele indicar en $V/\mu s$).



$$f_{\max} = \frac{S.R.}{2\pi V_{o\max}}$$

Pérdida de

Armónicos
generados

Tema 13 - 26



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Principales parámetros que caracterizan a los AO reales

- La corriente de polarización de entrada I_B (*Input bias current*).
- La corriente de asimetría de entrada I_{IO} (*Input offset current*).
- La tensión de asimetría de entrada V_{IO} (*Input offset voltage*).
- La máxima corriente de salida I_{OMAX} (*Maximum output current*).
- La ganancia de tensión en bucle abierto A_O (*Open loop voltage gain*).
- La relación de rechazo de modo común denominada CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*).
- La máxima pendiente de cambio de la tensión de salida, denominada SR (*Slew Rate*).
- La resistencia de entrada R_i (*Input resistance*).
- La resistencia de salida R_o (*Output resistance*).
- El producto ganancia/ancho de banda (*Gain bandwidth product*).

Tema 13 - 27



AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

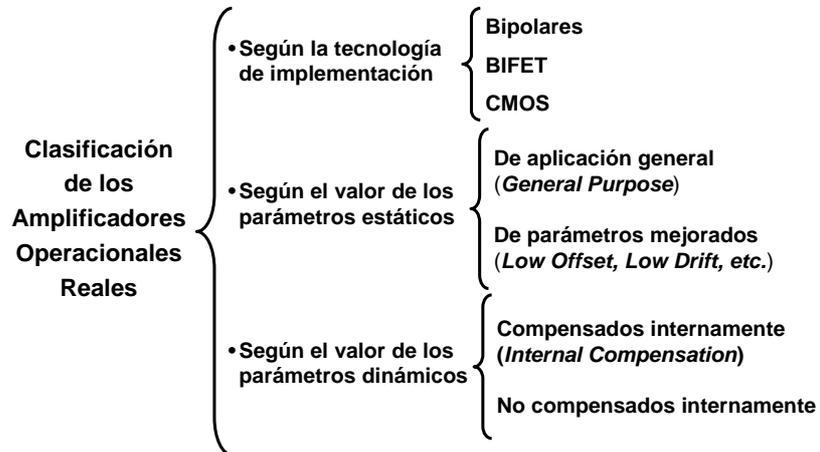
Como resumen de todo lo expuesto anteriormente se puede decir que el AO ideal se caracteriza por tener los siguientes valores de los diferentes parámetros de un AO real:

- Corrientes de polarización y de asimetría de entrada nulas.
- Tensión de asimetría de entrada nula.
- Ganancia de tensión en bucle abierto infinita.
- Relación de rechazo de modo común infinita.
- Máxima pendiente de cambio de la tensión de salida, infinita.
- Resistencia de entrada infinita.
- Resistencia de salida nula.
- Producto ganancia ancho de banda infinito.

Tema 13 - 28



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL



Tema 13 - 29



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

Tecnologías de implementación

- **Amplificadores operacionales bipolares**
Son AO en los que todos los transistores son bipolares NPN y PNP. Pueden ser de aplicación general o de parámetros estáticos mejorados. Según la respuesta dinámica pueden estar compensados internamente o no.
- **Amplificadores operacionales BIFET**
Poseen transistores de efecto de campo en la etapa de entrada y bipolares en el resto. Tienen corrientes de polarización reducidas pero en general mayor tensión de asimetría de entrada y mayor deriva térmica.
- **Amplificadores operacionales CMOS**
Realizados con transistores MOS de canal P y canal N. Se caracterizan por su bajo consumo y por tener corrientes de polarización prácticamente nulas.

Tema 13 - 30



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

AO de aplicación general

Se caracterizan por tener los siguientes valores de sus parámetros mas característicos:

- Corrientes de polarización y de asimetría del orden de decenas de nA.
- Tensión de asimetría de entrada del orden de algunos mV.
- Ganancia en bucle abierto del orden de 100dB.
- Resistencia de entrada del orden de varios M Ω .
- Resistencia de salida del orden de las centenas de Ω .
- Relación de rechazo en modo común del orden de 90 dB.
- Producto de la ganancia por el ancho de banda comprendido entre 1 y 10 MHz según estén o no compensados internamente.

Tema 13 - 31



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL

AO de aplicación general

Se suelen realizar con transistores bipolares y se pueden considerar ideales si se les aplican señales cuya amplitud no es inferior a algunas unidades de mV y su frecuencia no supera las decenas de KHz.

Según su respuesta en frecuencia se dividen en dos categorías:

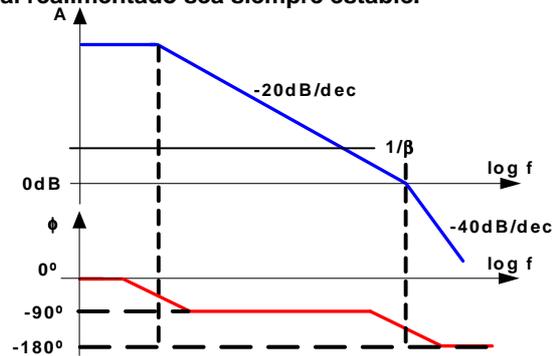
- AO de aplicación general compensados internamente.
- AO de aplicación general no compensados internamente.

Tema 13 - 32



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE APLICACIÓN GENERAL COMPENSADO INTERNAMENTE

Incorpora en su etapa intermedia un condensador que hace que su segundo polo esté situado en el punto en el que la curva de respuesta en frecuencia se corta con el eje de abscisas del diagrama que representa la ganancia en bucle abierto en función de la frecuencia. Se suele decir que el primer polo es dominante. Se logra así que el amplificador operacional realimentado sea siempre estable.

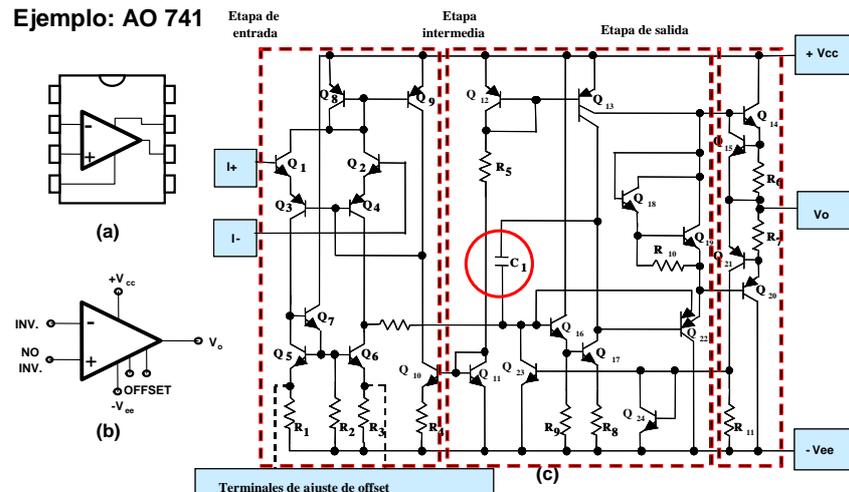


Tema 13 - 33



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE APLICACIÓN GENERAL COMPENSADO INTERNAMENTE

Ejemplo: AO 741



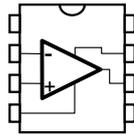
El condensador C1 hace que el primer polo sea el dominante.

Tema 13 - 34

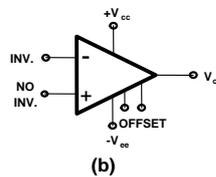


AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE APLICACIÓN GENERAL COMPENSADO INTERNAMENTE

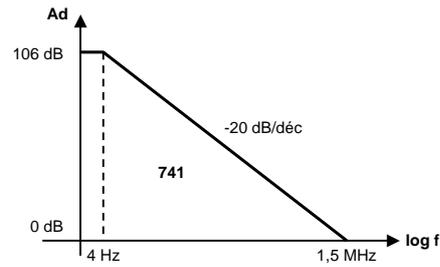
Respuesta en frecuencia del AO 741



(a)



(b)

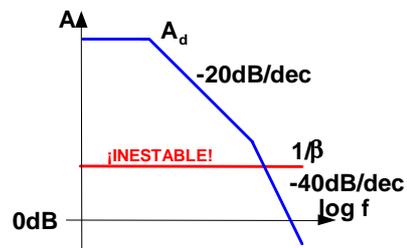
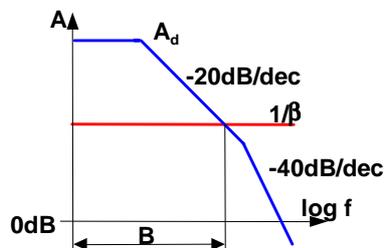


(c)



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE APLICACIÓN GENERAL NO COMPENSADO INTERNAMENTE

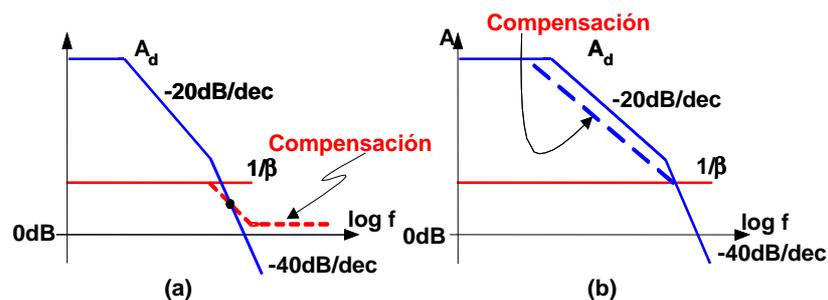
Al realimentar un amplificador operacional no compensado internamente se puede tener una ganancia superior a 1 con un desfase de 180° (realimentación positiva) y el amplificador oscila.





AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE APLICACIÓN GENERAL NO COMPENSADO INTERNAMENTE

Permiten que el diseñador pueda compensar el circuito externamente mediante la utilización de un condensador conectado de acuerdo con las indicaciones del fabricante.



Tema 13 - 37



AMPLIFICADOR OPERACIONAL REAL DE CARACTERÍSTICAS MEJORADAS

Se pueden denominar amplificadores operacionales de características mejoradas los que poseen características estáticas o dinámicas mejores que las de los amplificadores de aplicación general.

Su denominación varía de unos fabricantes a otros según el parámetro característico que desean destacar. Como ejemplo se puede citar:

- **NE5512:** se denomina AO de prestaciones elevadas (*Dual High-Performance*) porque su I_B es inferior a 20 nA y su V_{OS} (V_{IO} es inferior a 1 mV) y la deriva de temperatura de V_{OS} (V_{IO}) es inferior a 5 $\mu V/^\circ C$.
- **OP07:** se denomina AO de pequeña asimetría y deriva (*Low Offset, Low Drift*) porque su V_O es inferior a 75 μV y la deriva de temperatura de V_{OS} (V_{IO}) es inferior a 0,6 $\mu V/^\circ C$.
- **TL082:** se denomina AO JFET de elevado ancho de banda (*Wide Bandwidth*) porque su ancho de banda es de 4 MHz, pero también tiene una corriente de polarización de entrada de 50 pA y una elevada pendiente de cambio SR de 13 V/ μs .

Tema 13 - 38



FILTROS ANALÓGICOS [PERE página 145]

Son cuadripolos que atenúan determinadas frecuencias del espectro de la señal que se les aplica y permiten el paso de las demás sin atenuarlas.

Función de transferencia

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}$$

Sacando factor común:

$$H(s) = \frac{a_m (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)} \quad n: \text{orden del filtro}$$

p_n : polos

z_m : ceros

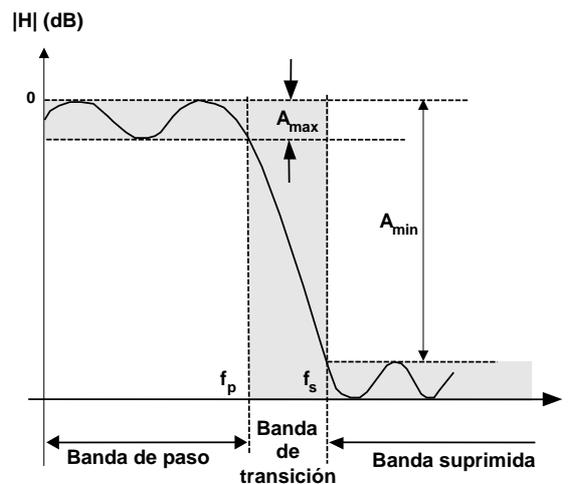
Para que el filtro sea realizable $n \geq m$

Tema 13 - 39



FILTROS ANALÓGICOS

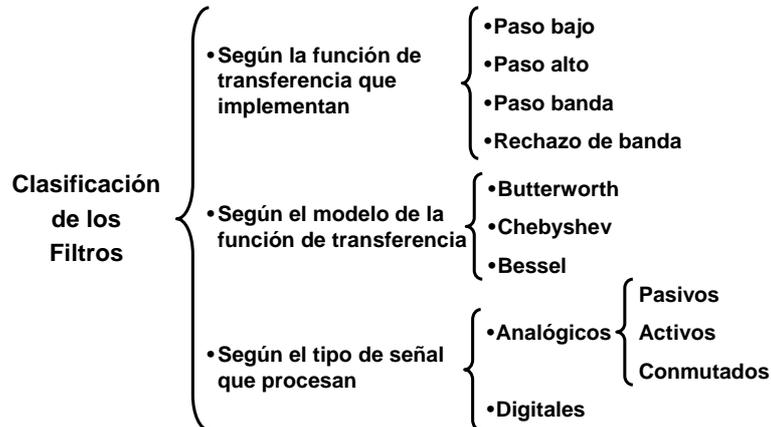
Parámetros de diseño



Tema 13 - 40



CLASIFICACIÓN DE LOS FILTROS

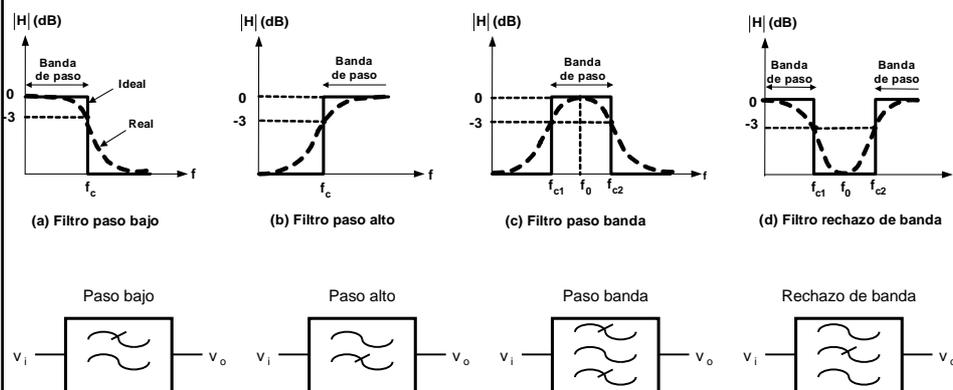


Tema 13 - 41



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Función de transferencia



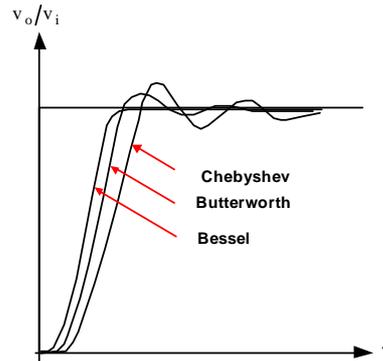
Tema 13 - 42



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Modelos matemáticos

Butterworth, Chebyshev y Bessel



Respuestas temporales a una entrada en escalón

Tema 13 - 43



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Modelos matemáticos

Ejemplo: Filtro paso bajo.

Modelo de Butterworth

Función de transferencia

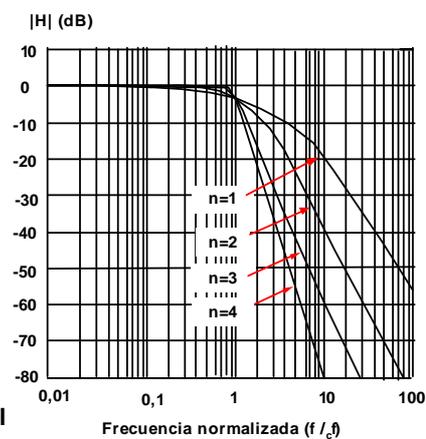
$$H(jf) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{f}{f_p}\right)^{2n}}}$$

en la cual:

n es el orden del filtro.

ε es el parámetro que determina el rizado.

f_p es la frecuencia extrema de la banda de paso.



Tema 13 - 44



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Modelos matemáticos

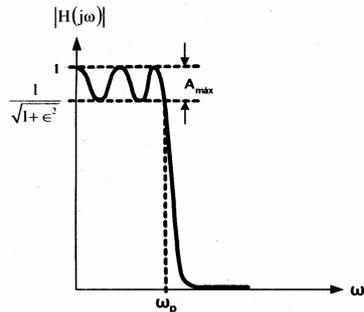
Ejemplo: Filtro paso bajo.

Modelo de Chebyshev

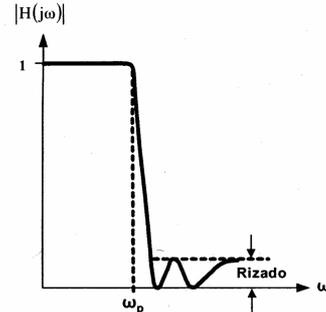
Función de transferencia de Chebyshev de tipo I

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cos^2 \left[n \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right) \right]}} \quad \text{para } \omega \leq \omega_p$$

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cos^2 \left[n \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right) \right]}} \quad \text{para } \omega > \omega_p$$



(a) Chebyshev Tipo I



(b) Chebyshev Tipo II

Tema 13 - 45



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Modelos matemáticos

Ejemplo: Filtro paso bajo.

Modelo de Bessel

Función de transferencia

$$H(s) = \frac{1}{B_n(s)}$$

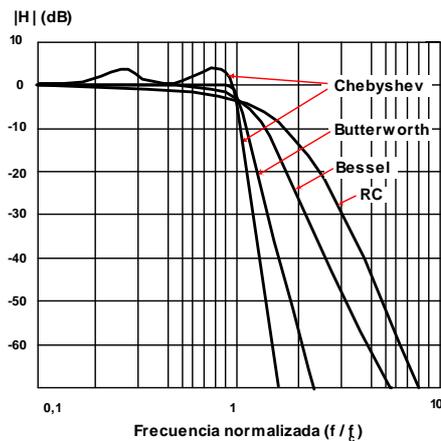
en la cual:

- $B_n(s)$ es el polinomio de Bessel de orden n :

$$B_n(s) = \sum_{k=0}^n a_k s^k$$

en la cual:

$$a_k = \frac{(2^n - k)!}{2^{n-k} \cdot k! \cdot (n-k)!} \quad \text{para } k = 0, 1, \dots, n$$



Tema 13 - 46



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Filtros pasivos RC (I)

Filtros que utilizan solamente resistencias y condensadores.

Tipo de filtro	Respuesta frecuencial	Relaciones de interés
<p>Paso bajo</p>		$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$ <p>Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$</p> <p>Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c \cdot \sqrt{2^{1/n} - 1}$</p>
<p>Paso alto</p>		$H(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$ <p>Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$</p> <p>Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c / \sqrt{2^{1/n} - 1}$</p>



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Filtros pasivos RC (II)

Filtros que utilizan solamente resistencias y condensadores.

Tipo de filtro	Respuesta frecuencial	Relaciones de interés
<p>Paso banda</p>		$H(j\omega) = \frac{j\omega \tau_2}{1 + j\omega(\tau_1 + \tau_2 + a\tau_2) - \omega^2 \tau_1 \tau_2}$ <p>$\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $a = R_1 / R_2$ $\omega_1 = 1/\tau_1$; $\omega_2 = 1/\tau_2$ Pulsación central: $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$</p>
<p>Rechazo de banda</p>		$H(j\omega) = \frac{j\beta}{4 + j\beta}$ <p>$\beta = \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega$ Pulsación central: $\omega_0 = 1/RC$</p>



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Son filtros que utilizan amplificadores operacionales, condensadores y resistencias.

Topologías o estructuras más comunes

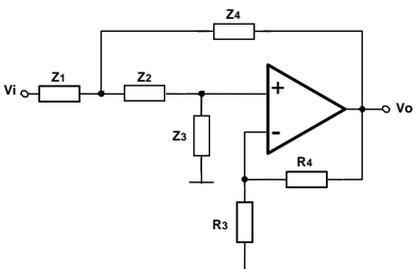
- Sallen-Key
- Realimentación múltiple [*Multiple FeedBack (MFB)*]
- Variables de estado (*State Variables*)

Tema 13 - 49



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Topología Sallen-Key

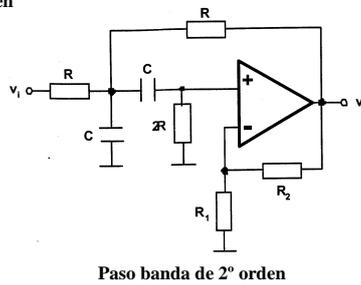
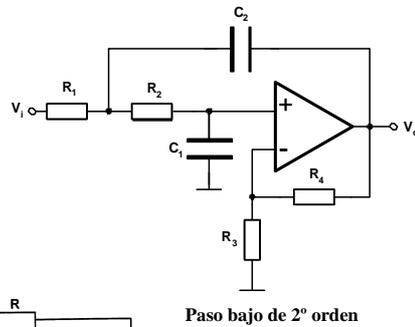
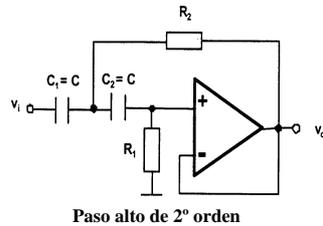
Estructuras para la realización de filtros activos	Características
<p>Sallen-Key</p> 	<ul style="list-style-type: none">• No invierte la fase de la señal.• La menos dependiente de las características del operacional.• Es preferible cuando:<ul style="list-style-type: none">– La exactitud en la ganancia es importante.– Filtros de ganancia unidad.– Los valores de Q son pequeños ($Q < 3$).• En un filtro paso bajo: Z_1 y Z_2 resistencias; Z_3 y Z_4 condensadores.• En un filtro paso alto: Z_1 y Z_2 condensadores; Z_3 y Z_4 resistencias.

Tema 13 - 50



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Topología Sallen-Key



Tema 13 - 51



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Topología de realimentación múltiple (*Multiple Feedback*)

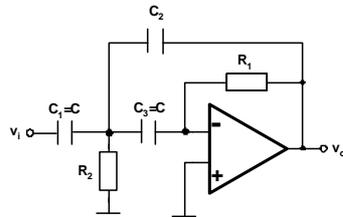
Estructuras para la realización de filtros activos	Características
<p>Realimentación múltiple (MFB)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Invierte la fase de la señal. • Poco sensible⁴ a la variación de los componentes pasivos. • No es adecuada para filtros de Q alto debido a las limitaciones de ganancia del operacional en bucle abierto. • En un filtro paso bajo: Z₁, Z₃ y Z₄ resistencias; Z₂ y Z₅ condensadores. • En un filtro paso alto: Z₁, Z₃ y Z₄ condensadores; Z₂ y Z₅ resistencias.

Tema 13 - 52

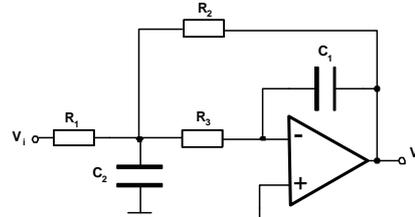


FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

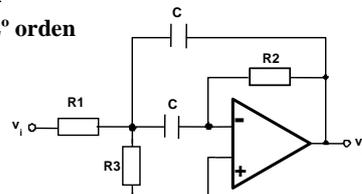
Topología de realimentación múltiple (*Multiple Feedback*)



Paso alto de 2º orden



Paso bajo de 2º orden



Paso banda de 2º orden

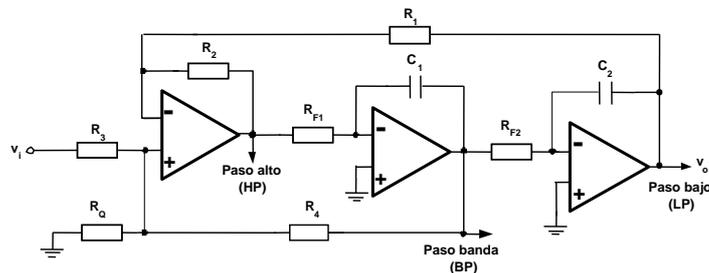
Paso banda de 2º orden

Tema 13 - 53



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS

Topología de variables de estado (*State Variables*)



- Permiten ajustar todos los parámetros del filtro de forma independiente
- Se logran valores de Q más elevados.
- Las salidas están disponibles de forma simultánea

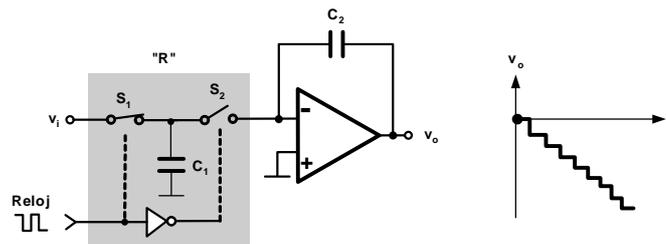
Tema 13 - 54



FILTROS ANALÓGICOS ACTIVOS DE CAPACIDADES CONMUTADAS

Son filtros que reemplazan las resistencias de los filtros activos por interruptores MOS que las emulan.

Ejemplo: Circuito integrador



Durante el semiperiodo en el que S_1 esta cerrado la carga que se almacena en C_1 es $v_i C_1$.



PROGRAMAS DE DISEÑO DE FILTROS ASISTIDO POR COMPUTADOR

PROGRAMA	FABRICANTE	CARACTERÍSTICAS	LIMITACIONES
FilterLab	Microchip (www.microchip.com)	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de filtros hasta de 8º orden • Diseño de filtros <i>anti-aliasing</i> • Genera salida para Spice 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo filtros activos paso bajo Sallen-Key o MFB • No permite respuesta temporal
FilterCAD	Linear Technology (www.linear.com)	<ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de filtros, respuestas y estructuras • Respuesta frecuencial y temporal 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo para circuitos integrados de lineal • No genera salida para Spice
MAX274	Maxim (www.maxin-ic.com)	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los modelos • Filtro de variables de estado universal 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo para DOS • Solo para el MAX274 y MAX275
Filter2	Texas Instruments (www.ti.com)	<ul style="list-style-type: none"> • Permite las cuatro funciones y los tres modelos • Estructuras Sallen-Key y MFB 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo para DOS
Filter2	Texas Instruments (www.ti.com)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro Universal UAF42 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo para DOS