



Tema 2: Acondicionamiento de señal

Susana Borromeo López

Ingeniería de Telecomunicación



Contenido

1. Circuitos de amplificación
2. Circuitos de linealización
3. Filtrado analógico



Introducción: hardware de acondicionamiento

PROPÓSITOS

- Mejorar su *calidad*.
- Adecuarla a un nuevo formato para su procesamiento posterior.

IMPLEMENTACIÓN

• Analógica

- Siempre es necesario un primer procesado analógico, aún cuando la mayor parte del procesado sea digital.
- Circuitos pasivos (con resistencias, condensadores y bobinas).
- Circuitos activos (con amplificadores operacionales).
- Menor coste.
- Menor tiempo de procesado.

• Digital

- Menor incertidumbre (menor influencia de ruidos, impedancias, etc.).
- Aprovecha el aumento del uso de ordenadores, PDA, etc para monitorización, control o medida.
- Posibilidad de implementar procesamientos más complejos.



Introducción: hardware de acondicionamiento

TAREAS DE LOS CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO:

- Amplificación / atenuación
- Cambio de nivel: eliminación del offset.
- Filtrado: eliminación de ruido y frecuencias de detección.
- Ajuste de la impedancia.
- Linealización
- Transformación para su transmisión: modulación, conversiones tensión-corriente o tensión-frecuencia.
- Otros procesos para interfaz digital: muestreo-retención, multiplexación...

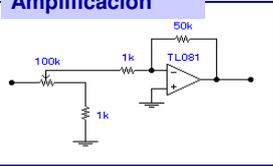
Niveles de señal estándar en instrumentación electrónica (protocolos de comunicación industrial)

- **Tensión:** 0~5 VDC , 1~5 VDC, -10~+10VDC, etc.
- **Corriente:** 4~20mA DC "lazo de corriente" (transmisión de largo alcance, evitar caídas de tensión en cables), 0-20 mA DC, 0 ~ 5 mA DC.

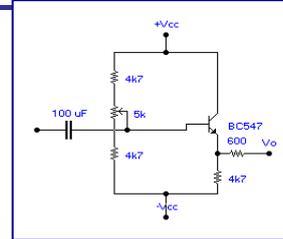
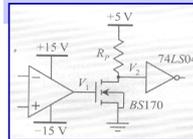


Introducción: *hardware* de acondicionamiento

Amplificación

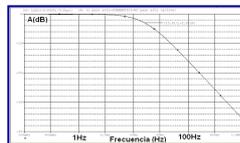
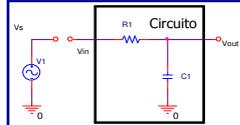


Cambio de nivel, adaptación de impedancias

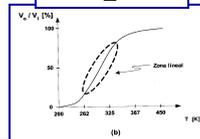
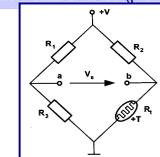


Filtrado analógico

(filtros activos y pasivos)

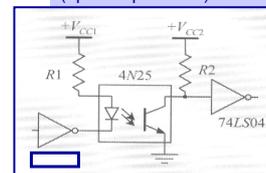


Linealización (puentes...)



Acoplamiento de señales sin interferencias

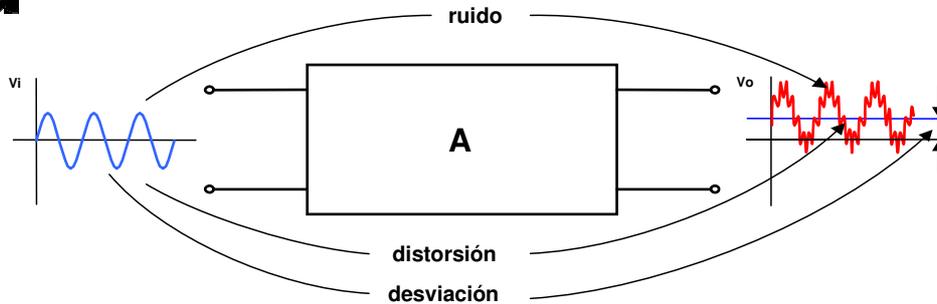
(optoacopladores)



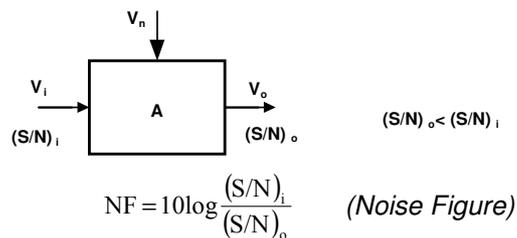
AMPLIFICACIÓN



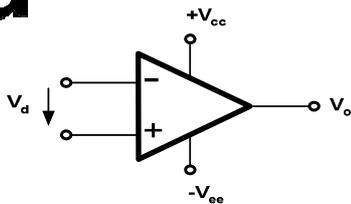
No idealidades de los amplificadores



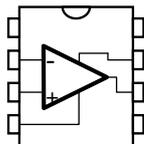
- Ganancia no lineal
- **Generación interna de ruido**
- Desviaciones
- Distorsión armónica y de fase debido a un ancho de banda limitado



Amplificador Operacional Ideal



$$v_o = A_d v_d$$
$$-V_{ee} \leq v_o \leq +V_{cc}$$

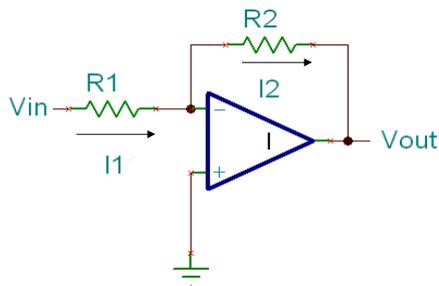


1. **Impedancia de entrada Infinita:** la corriente de entrada por cualquiera de sus terminales (V_+ or V_-) es nula
2. **Ganacia de tensión infinita.** Si su salida es finita, la tensión diferencial de entrada es nula. Es decir, misma tensión en los terminales de entrada.
3. **Impedancia de salida nula:** "infinita" capacidad de proporcionar corriente sobre cualquier carga (incluso con muy baja resistencia)



Amplificador Operacional: análisis

1. Los terminales de entrada deben tener la misma tensión.
2. La corriente de entrada por cualquiera de sus terminales es cero (impedancia de entrada infinita).



Inversor

$$(1) V_- = V_+ (V_+ = 0, V_- = 0)$$

$$(2) I_1 = I_2$$

$$I_1 = (V_{IN} - V_-)/R_1 = V_{IN}/R_1$$

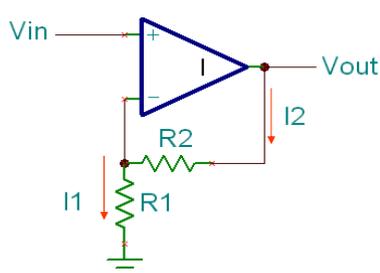
$$I_2 = (0 - V_{OUT})/R_2 = -V_{OUT}/R_2 \Rightarrow V_{OUT} = -I_2 R_2$$

$$V_{OUT} = -I_2 R_2 = -I_1 R_2 = -V_{IN} (R_2/R_1)$$

$$V_{OUT} = (-R_2/R_1)V_{IN}$$



Amplificador no inversor



$$(1) V_- = V_+ (V_+ = 0, V_- = 0)$$

$$(2) I_1 = I_2$$

$$I_1 = V_{IN}/R_1$$

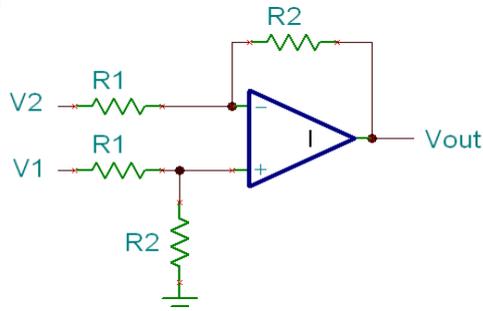
$$I_2 = (V_{OUT} - V_{IN})/R_2 \Rightarrow V_{OUT} = V_{IN} + I_2 R_2$$

$$V_{OUT} = I_1 R_2 + I_2 R_2 = I_1 (R_1 + R_2) = (R_2 + R_1) V_{IN}/R_1$$

$$V_{OUT} = (1 + R_2/R_1)V_{IN}$$



Amplificador Diferencial



$$V_{OUT} = (V_1 - V_2)R_2/R_1$$

$$V_{OUT} = A_C(V_1 + V_2) + A_D(V_1 - V_2)$$

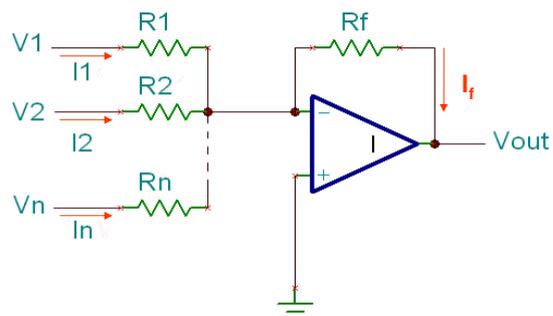
A_D : ganancia diferencial (señal)

A_C : ganancia en modo común (ruido)

A_D/A_C (*Common Mode Rejection Ratio – CMRR*) Ideal: $CMRR \rightarrow \infty$



Sumador



$$I_f = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$V_{OUT} = -R_f (V_1/R_1 + V_2/R_2 + \dots + V_n/R_n)$$

¿Cuál es la tensión de salida si $R_1=R_2=\dots=R_f$?



Amplificador Operacional

Nombre	Circuito	Aplicaciones y comentarios
Amplificador inversor $v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i$		Ganancia negativa con cualquier valor absoluto.
Amplificador no inversor $v_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i$		Ganancia positiva siempre mayor que 1.
Amplificador genérico $v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_3 + v_4 - v_2 - v_1)$		Es un sumador/restador con ganancia. Se pueden hacer sumadores y restadores eliminando algunas entradas.
Seguidor de emisor o seguidor de tensión $v_o = v_i$		No implica carga para la fuente de señal y admite cualquier carga en su salida.
Amplificador diferencial $v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$		Es un caso particular del amplificador genérico de utilidad en instrumentación.
Convertidor corriente-tensión $v_o = -R i$		Circuito básico para obtener una salida de tensión correspondiente a una entrada en corriente.



Amplificador Operacional

Nombre	Circuito	Aplicaciones y comentarios
Convertidor tensión-corriente $i_o = v_i / R$		Circuito básico para obtener una salida de corriente correspondiente a una entrada en tensión.
Integrador $v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$		Circuito para calcular la integral de una señal de tensión de entrada.
Derivador $v_o = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$		Circuito para calcular la derivada de una señal de tensión de entrada.
Rectificador de precisión $v_o = v_i $		Circuito de precisión, capaz de rectificar eliminando la tensión de codo del diodo.



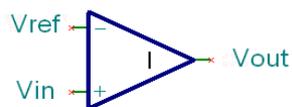
Amplificador Operacional

Nombre	Circuito	Función	Aplicaciones y comentarios
Comparador básico			Circuito básico de comparación con una tensión referencial.
Comparador con histéresis			Circuito para evitar los cambios múltiples en los instantes de cambio del comparador mediante una tensión de histéresis H.
Comparador con histéresis II			Como el anterior pero la histéresis tiene lugar alrededor de la tensión de referencia.

Aplicaciones no lineales: realimentación positiva o trabajando en bucle abierto



Comparador

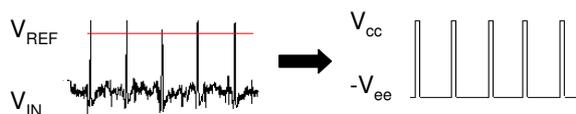


$$V_{out} = A(V_{in} - V_{ref})$$

$$\text{Si } V_{in} > V_{ref}, V_{out} = V_{cc}$$

$$\text{Si } V_{in} < V_{ref}, V_{out} = -V_{ee}$$

Aplicación: detección del complejo QRS en ECG



Etapa de entrada:

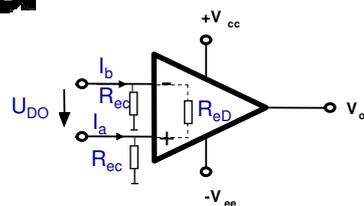
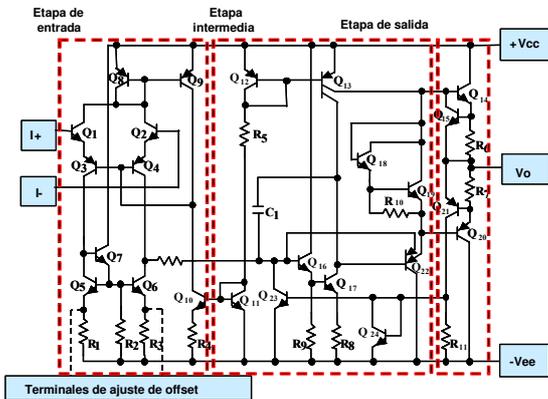
- Aporta la ganancia
- Necesidad de corrientes de polarización
- Asimetría en las tensiones: *Input offset voltage*

Etapa Intermedia:

- Adaptación de niveles
- Acoplamiento entre etapas en continua
- Compensación en frecuencia

Etapa de salida:

- Impedancia de salida no nula
- Excursión de la tensión de salida

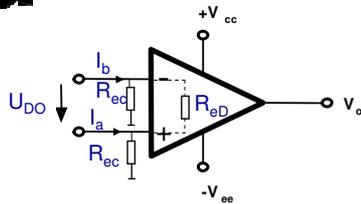


- **OFFSET VOLTAGE (Tensión de desviación U_{DO}):** Diferencia de tensión en la entrada para tener una salida nula. Valor típico 1 mV. (t^{a} , alimentación, tiempo)
- **OFFSET VOLTAGE DRIFT (Deriva Tensión de desviación dU_{DO}/dT):** Valor típico $5\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

- **SUPPLY VOLTAGE REJECTION RATIO (Razón de rechazo a la tensión de alimentación $\Delta V_{cc} / \Delta U_{DO}$):** Valor típico 100 dB
- **INPUT BIAS CURRENT (Corriente de entrada de polarización I_b):** $(I_a + I_b)/2$ Valor típico 200nA. (t^{a} , alimentación, tiempo)
- **INPUT OFFSET CURRENT (Corriente de desviación i_{DO}):** $(I_a - I_b)$ Valor típico 50nA. (Temperatura)
- **OFFSET CURRENT DRIFT (Deriva Corriente de desviación di_{DO}/dt):** Valor típico -100pA/ $^{\circ}\text{C}$.



Características del AO real



- **DIFFERENTIAL INPUT RESISTENCE** (Resistencia diferencial de entrada R_{eD}): Resistencia entre los terminales + y -. Valor típico 1 M Ω .
- **COMMON MODE INPUT RESISTENCE** (Resistencia de entrada en modo común R_{ec}): resistencia entre cada uno de los terminales y masa): Valor típico 100 M Ω .
- **COMMON MODE INPUT VOLTAGE**: Margen de tensión de entrada en modo común. 70% V_{cc} .

CARACTERÍSTICAS DE SALIDA

- **OUTPUT RESISTENCE** (resistencia de salida): Valor típico 75 Ω
- **OUTPUT VOLTAGE SWING** (excursión de la tensión de salida): máximo nivel de salida sin distorsión con una cierta carga y ganancia unidad
- **SLEW RATE** (Máxima deriva de la tensión de salida): V/ μ s Valor típico 1V/ μ s



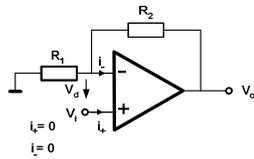
Características del AO real

- **Características estáticas**
 - Ganancia en continua y en modo común
 - Resistencias de entrada y de salida
 - Tensión de desviación de entrada y corrientes de polarización
 - Tensión de alimentación
- **Características dinámicas**
 - Ancho de banda
 - $A_d(f)$
 - *Slew rate*
- **Ruido**



Características del AO real: Características estáticas

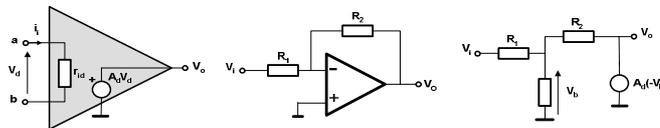
- Ganancia en continua



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

E2.1

- Resistencia de entrada (r_{id})

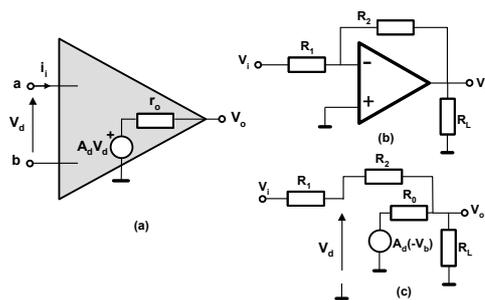


E 2.2



Características del AO real: Características estáticas

- Ganancia en salida



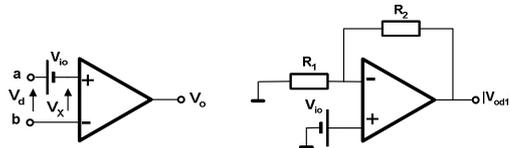
E2.3

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



Características del AO real: Características estáticas

- Tensión de la desviación de la entrada



E2.4

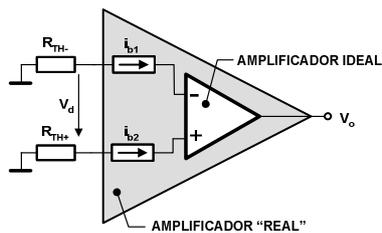
$$|V_o| = |V_{io}| \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

- Alterna: Eliminar la tensión de desviación mediante un C
- Continua
 - Pines
 - Red de compensación



Características del AO real: Características estáticas

- Corrientes de polarización



$$V_d = R_{Th+} i_{b1} - R_{Th-} i_{b2}$$

$$I_B = \frac{|i_{B1} + i_{B2}|}{2} \quad \text{Input bias current}$$

$$I_{io} = |i_{B1} - i_{B2}| \quad \text{Input offset current}$$

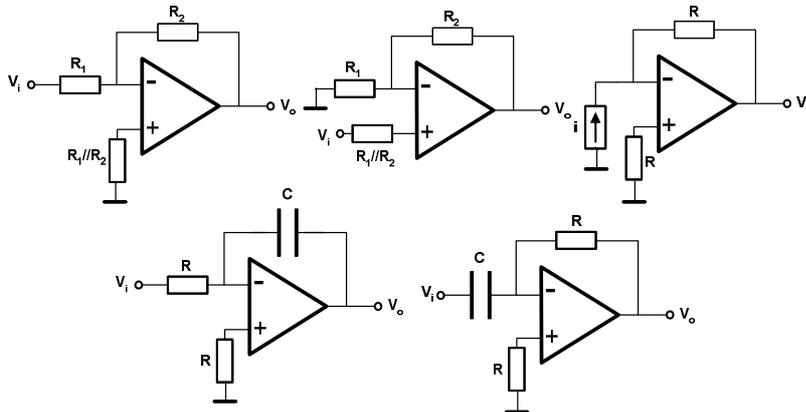
$$V_{dB} = I_B (R_{Th+} - R_{Th-}) + I_{io} (R_{Th+} + R_{Th-})/2$$

E2.7



Características del AO real: Características estáticas

- Corrientes de polarización



E2.7

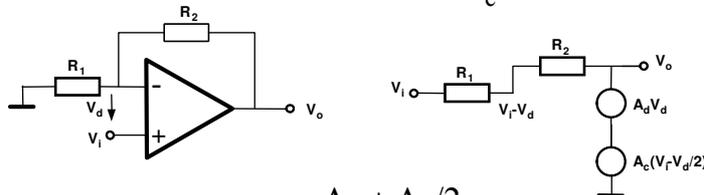


Características de transferencia

- Razón de rechazo en modo común

$$v_o = A_d v_d + A_c v_c \quad \text{with } v_c = \frac{V_- + V_+}{2}$$

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

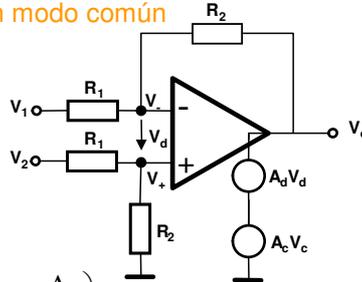


$$v_o = \frac{A_d + A_c/2}{1 + \left(A_d + \frac{A_c}{2} \right) \frac{R_1}{R_1 + R_2}} v_i$$



Características de transferencia

Razón de rechazo en modo común



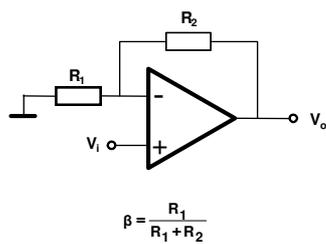
$$v_o = \frac{R_2}{R_1} \frac{\left(A_d - \frac{A_c}{2}\right)}{A_d - \frac{A_c}{2} + \frac{R_1 + R_2}{R_1}} (v_2 - v_1) + \frac{R_2}{R_1} \frac{A_c}{A_d - \frac{A_c}{2} + \frac{R_1 + R_2}{R_1}} v_2$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) + \frac{R_2}{R_1} \text{CMRR} v_2$$

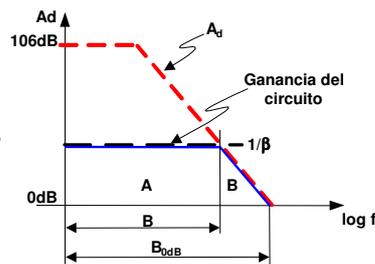
E2.9



Respuesta en frecuencia



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



$A_d \gg 1/\beta$

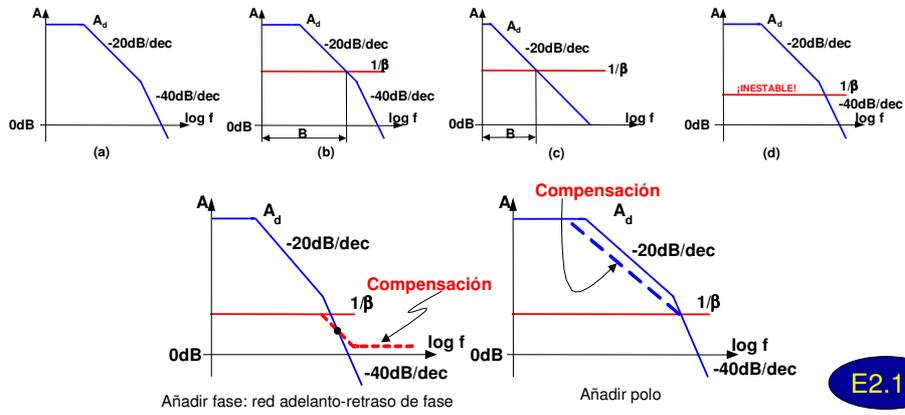
$$G = \frac{A_d}{1 + A_d \beta}$$

$$B = B_o (1 + A_d \beta)$$

Ancho de banda crece con el valor de la realimentación

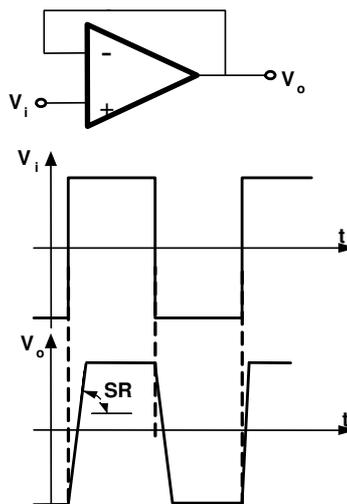


Respuesta en frecuencia



Respuesta en frecuencia: *slew rate*

SLEW RATE (Máxima deriva de la tensión de salida): $V/\mu s$ Valor típico $1V/\mu s$



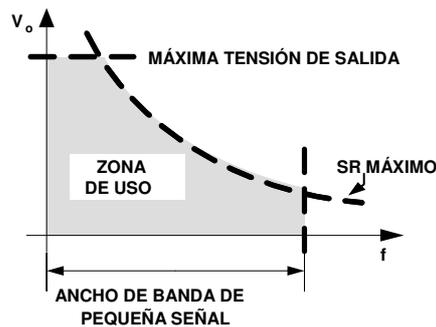


Respuesta en frecuencia: *slew rate*

$$\frac{dv_o}{dt} = 2\pi f V \cos(2\pi f t) \Rightarrow \left(\frac{dv_o}{dt} \right)_{\text{máx}} = 2\pi f V$$

$$2\pi f V < SR \Rightarrow f_{\text{máx}} = \frac{SR}{2\pi V}$$

V = Tensión de salida



E2.13



No-idealidades del AO en configuración no inversora

Efectos de las no-idealidades estáticas sobre el amplificador operacional en configuración no inversora		
Parámetro	Influencia	Cuando hay que tenerlo en cuenta y otras consideraciones...
$-V_{\text{omáx}}$ $+V_{\text{omáx}}$	Excursión de la tensión de salida (<i>output voltage swing</i>) $-V_{\text{omáx}} \leq v_o \leq +V_{\text{omáx}}$	<ul style="list-style-type: none"> – Siempre es una limitación – Importante si la tensión de alimentación es baja (equipos portátiles) – En los operacionales <i>rail-to-rail</i> $V_{\text{omáx}}$ es casi igual a V_{CC}
A_d	Ganancia diferencial en lazo abierto (<i>Open loop gain</i>) $v_o = \frac{A_d}{1 + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} v_i$	<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 (<i>Input resistance</i>) $v_o = \frac{A_d}{1 + \frac{R_1 // R_2}{R_{\text{id}}} + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}} v_i$	<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 (<i>Output resistance</i>) $v_o = v_i \frac{A_d}{1 + \frac{R_o}{R_L} + \frac{R_o}{R_1 + R_2} + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$	<ul style="list-style-type: none"> – Con niveles de carga en la salida elevados – Es un parámetro poco importante, en general



No-idealidades del AO en configuración no inversora

Efectos de las no-idealidades estáticas sobre el amplificador operacional en configuración no inversora		
Parámetro	Influencia	Cuándo hay que tenerlo en cuenta y otras consideraciones...
V_{io}	Tensión de desviación (Input offset voltage) $V_o = V_{ideal} + V_{io} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ (expresión válida para la configuración inversora y para la diferencial)	<ul style="list-style-type: none"> - Casi siempre que se tengan entradas con niveles de continua - Cuando la tensión de entrada es baja o muy baja - Puede ser preciso realizar ajustes - Uno de los parámetros más importantes a la hora de seleccionar - Hay que cuidar la saturación por <i>offset</i> en casos de ganancia alta
I_B I_{io}	Corrientes de desviación y polarización (Input bias and offset currents) $V_{ioTOTAL} = V_{io} + V_{dB}$ $V_{dB} = I_B [R_{Tb+} - R_{Tb-}] + I_{io} (R_{Tb+} + R_{Tb-}) / 2$ (se añade a la tensión de desviación)	<ul style="list-style-type: none"> - Las mismas que en el caso de la tensión de desviación - Aunque se puede eliminar el efecto de I_B, no siempre interesa - Con valores altos de resistencias R_1 y R_2
CMRR	Razón de rechazo del modo común $V_o = \frac{A_d + A_c / 2}{1 + (A_d + A_c / 2) \frac{R_1}{R_1 + R_2}} V_i$	<ul style="list-style-type: none"> - Efecto sobre el valor de la ganancia - No tiene mucha importancia en el amplificador no inversor
A_d/A_c	(Common mode rejection ratio) $V_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) + \frac{R_2}{R_1} \frac{v_2}{CMRR}$ (sólo para el amplificador diferencial)	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando hay valores elevados de la tensión de modo común - Cuando se pretende eliminar ruido de modo común - ¡Cuidado con su comportamiento en frecuencia!
PSRR	Razón de rechazo a la alimentación (Power supply rejection ratio) $PSRR = 20 \log \frac{\Delta V_{alimentación}}{\Delta V_o}$	<ul style="list-style-type: none"> - En sistemas portátiles (alimentados a baterías) - Puede ser conveniente incluir reguladores de tensión en la alimentación - Sólo tiene en cuenta variaciones lentas



Ruido interno

Expresado en términos de densidad espectral

$$V/\sqrt{\text{Hz}}$$

• Ruido interno

- Ruido térmico, ruido Johnson o ruido blanco
- Ruido de parpadeo, ruido flicker o ruido 1/f
- Shot noise
- Burst noise
- Ruido de transición
- Ruido de avalancha
- Interferencias externas

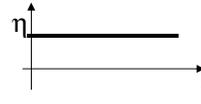
$$V_t^2 = \int_{f_1}^{f_s} 4kTR df$$



Tipos fundamentales de ruido intrínseco

RUIDO BLANCO \equiv THERMAL NOISE \equiv JOHNSON NOISE

- ✓ Producido fundamentalmente en **RESISTENCIAS** por agitación **TÉRMICA** de los portadores de carga. Tiene densidad espectral plana.



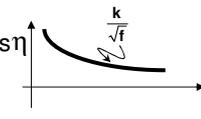
RUIDO DE FLUCTUACIÓN \equiv SHOT NOISE

- ✓ Producido por movimientos aleatorios de los portadores de carga en **SEMICONDUCTORES ATRAVESADOS POR UNA CORRIENTE CONTINUA**. Se presenta como **FUENTE DE CORRIENTE (I_{dc})** con densidad espectral plana



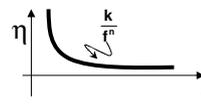
RUIDO ROSA \equiv 1/F NOISE \equiv CONTACT NOISE

- ✓ Producido por variación de resistencia sobre todo en las **UNIONES METAL-SEMICONDUCTOR y METAL-METAL**. Tiene densidad espectral de la forma **k/\sqrt{f}**



PORCORN NOISE \equiv BURST NOISE

- ✓ Producido por defectos en los procesos de fabricación debidos a **impurezas metálicas en semiconductores**. Tiene densidad espectral de la forma **k / f^n**



AMPLIFICADORES DE INSTRUMENTACIÓN

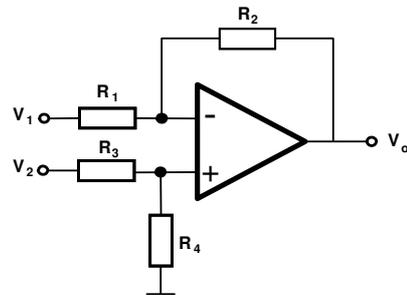


Amplificador diferencial

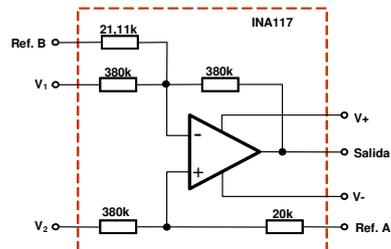
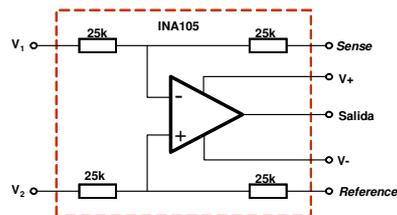
$$v_o = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

Si $R_2 = R_4$ y $R_1 = R_3$,

$$v_o = \frac{R_4}{R_3} (v_2 - v_1)$$

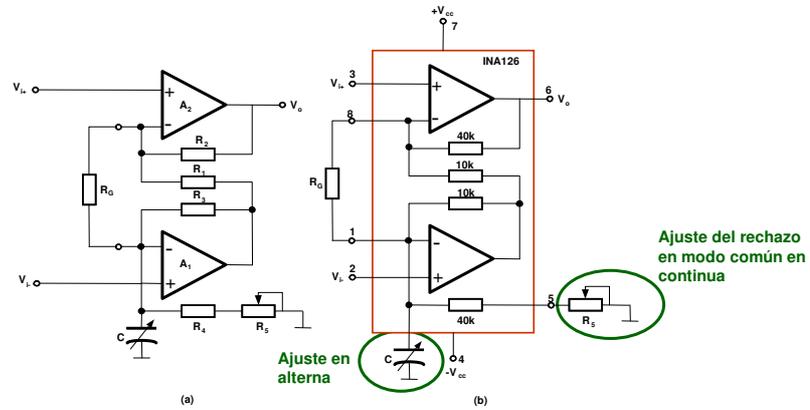


Circuitos prácticos





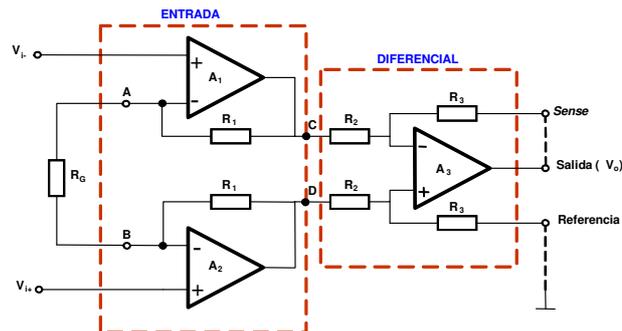
Amplificador de dos operacionales (ejemplo práctico)



$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + 2 \frac{R_2}{R_G} \right) (v_{i+} - v_{i-}) \quad 1 + \frac{R_2}{R_1} + 2 \frac{R_2}{R_G} = G \Rightarrow G = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_G}$$



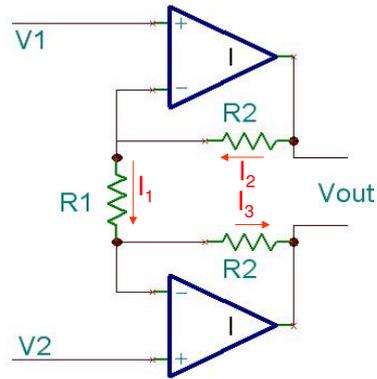
Amplificador de tres operacionales



$$v_o = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) (v_{i+} - v_{i-}) \quad \text{Si } R_2=R_3 \Rightarrow A_d = 1 + \frac{2R_1}{R_G}$$



Amplificador de instrumentación (etapa 1)



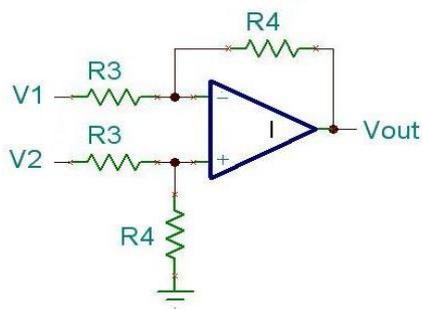
$$I_1 = (V_1 - V_2)/R_1$$

$$I_2 = I_3 = I_1$$

$$V_{OUT} = (R_1 + 2R_2)(V_1 - V_2)/R_1$$
$$= (V_1 - V_2)(1 + 2R_2/R_1)$$



Amplificador de instrumentación (etapa 2)



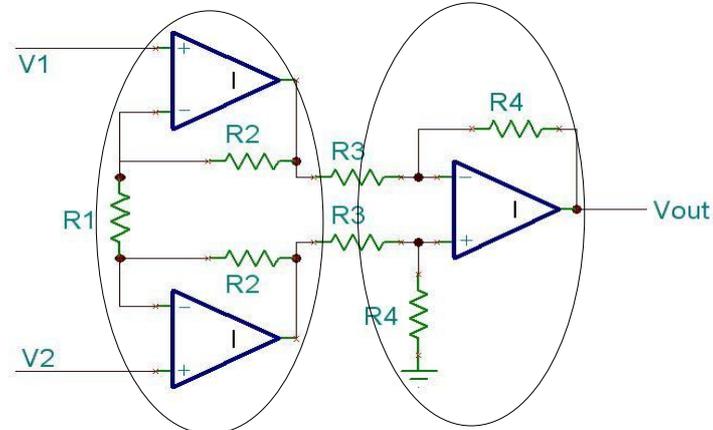
$$V_- = V_+ = V_2 R_4 / (R_3 + R_4)$$

$$(V_1 - V_-) / R_3 = (V_- - V_{OUT}) / R_4$$

$$V_{OUT} = - (V_1 - V_2) R_4 / R_3$$



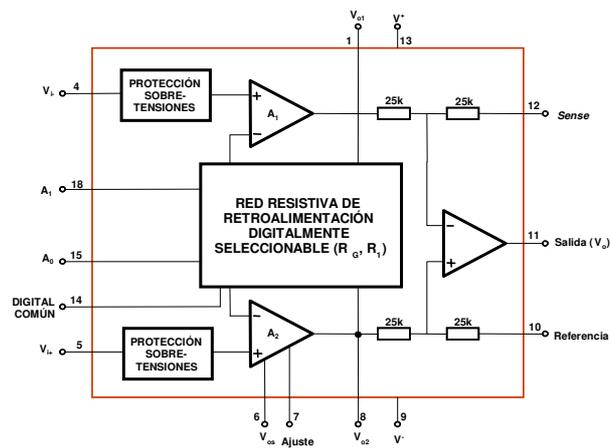
Amplificador de instrumentación



$$V_{OUT} = -(V_1 - V_2)(1 + 2R_2/R_1)(R_4/R_3)$$



Amplificador de ganancia programable por pin

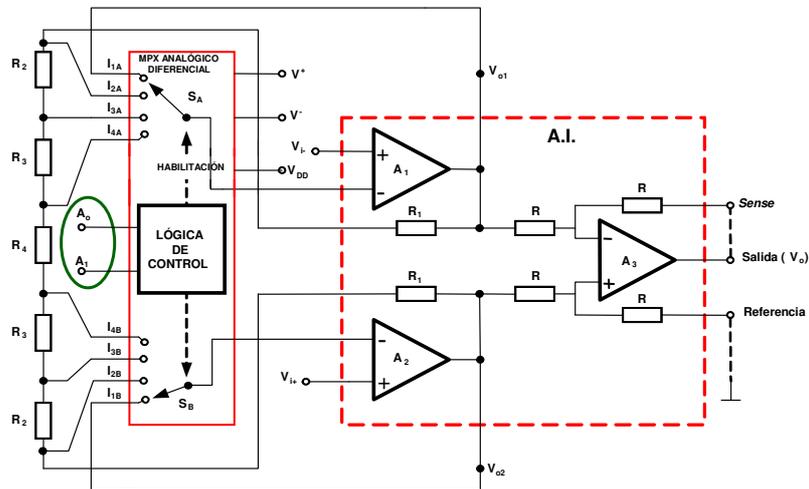


GANANCIA		SELECCIÓN	
PGA204	PGA205	A ₁	A ₂
1	1	0	0
10	2	0	1
100	4	1	0
1000	8	1	1



Amplificador de ganancia programable por software

A.O + Circuito de detección analógico que conmuta distintas resistencias

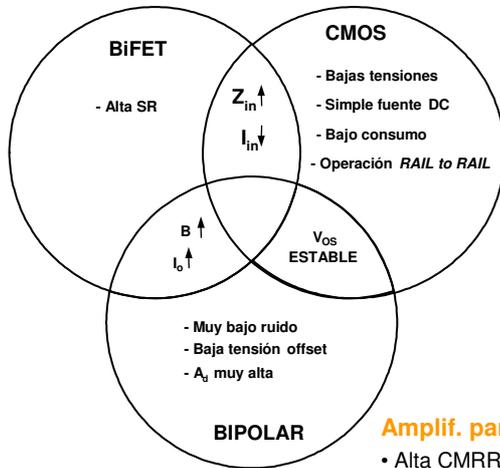


Amplificador de instrumentación. Parámetros

PARÁMETROS	GANANCIA				
	1	2	4	8	16
Error de ganancia (%)	0.05	0.05	0.1	0.15	0.15
No linealidad a 25°C (%)	0.05	0.05	0.1	0.15	0.15
Deriva del error de ganancia (ppm/°C)	0.5	0.5	0.5	0.5	1
Tensión de ruido (RTI) @ 0,1 - 10Hz (mV _{pp})	5	5	5	4	3
Corriente de ruido @ 0,1 - 10Hz (nA _{pp})	60	60	60	60	60
Ancho de banda a 3dB (MHz)	4	2	1.1	0.65	0.35
Ancho de banda de potencia (MHz)	0.1	0.1	0.1	0.35	0.35
Slew rate, (V/ms)	6	6	6	24	24



Diseño con A.O para instrumentación



ASPECTOS A CONSIDERAR:

- Características de la fuente de señal y de la carga
- Respuestas en amplitud (Ganancia), frecuencia y fase (ancho de banda)
- Relación S/N
- Estabilidad térmica

Amplif. para señales referidas a masa:

Etapa de entrada:

- Generar poco ruido a la salida
- Tensiones y corrientes de desviación muy pequeñas
- Alta estabilidad térmica
- No necesaria alta ganancia

Amplif. para señales diferenciales con modo común:

- Alta CMRR
- La configuración elegida depende de los niveles máximos de modo común y del desequilibrio de la resistencia de la funete



Diseño con A.O para instrumentación

ASPECTOS A CONSIDERAR:

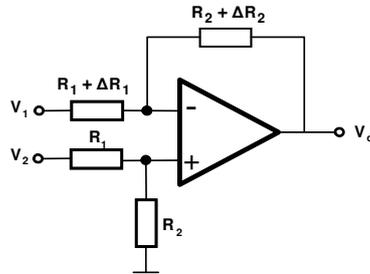
- La aplicación. Ejemplo: Sensor de temperatura
- Características de la fuente de señal y de la carga
- Respuestas en amplitud (Ganancia), frecuencia y fase (ancho de banda)
- Relación S/N
- Estabilidad térmica

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

- Bipolar
 - Bajos niveles de tensión de desviación y ruido en la entrada
 - Alto nivel de corriente de ruido I_o
 - Alta A_d y *slew rate*
- BiFET (FET en el circuito de entrada y bipolares en el resto)
 - Resistencia de entrada y *slew rate* mejores que los bipolares
 - Tensiones de desviación y derivas térmicas mayores que los bipolares
- CMOS
 - Bajo consumo y aplicaciones con una única fuente de alimentación: aplicaciones portátiles
 - Muy altas derivas térmicas
 - Corrientes y tensiones de ruido muy pequeñas



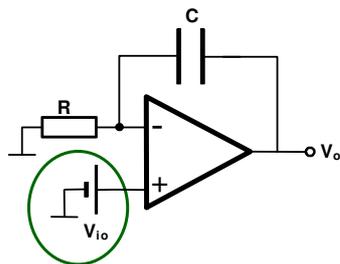
Resistencias reales



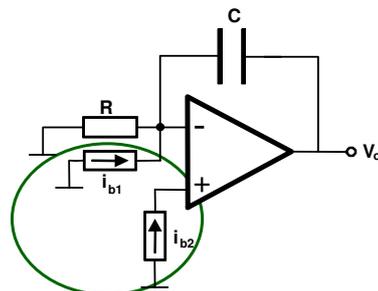
$$v_o = \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1} (v_2 - v_1) + \underbrace{\frac{R_2 \Delta R_1 + R_1 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)(R_1 + \Delta R_1)}}_{T^{\text{mo}} \text{ en modo común}} v_2$$



Integrador. Resistencias reales



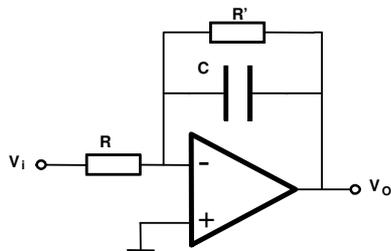
Tensión de desviación



Corrientes de polarización

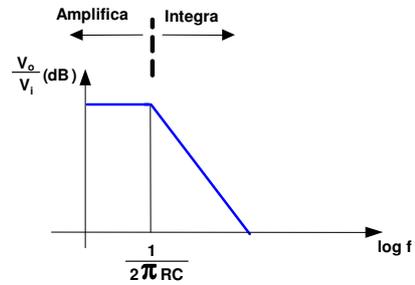


Integrador. Resistencias reales



(a)

$$v_{od} = \frac{R + R'}{R} v_d$$

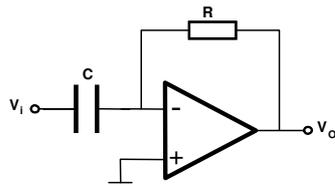


(b)

$$f_{\text{mín}} = \frac{1}{2\pi R' C}$$

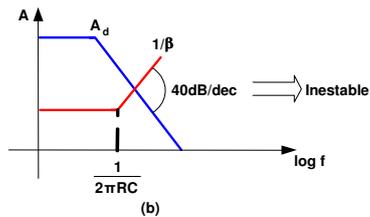


Derivador. Resistencias reales

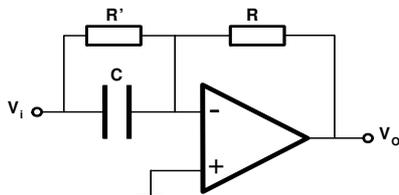


(a)

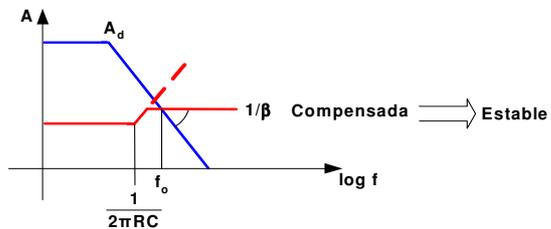
$$1/\beta = 1 + j\omega RC$$



(b)



$$R' > \frac{1}{2\pi C f_o}$$



$$f_{\text{máx}} = \frac{1}{2\pi R' C}$$



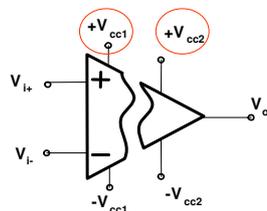
Valores de resistencias

Tolerancia: 10 %	Tolerancia: 5 %	Tolerancia: 2 %
1.0	1.0 - 1.1	1.00 - 1.05 - 1.1 - 1.15
1.2	1.2 - 1.3	1.21 - 1.27 - 1.33 - 1.40 - 1.47
1.5	1.5 - 1.6	1.54 - 1.62 - 1.69 - 1.78
1.8	1.8 - 2.0	1.87 - 1.96 - 2.00 - 2.05 - 2.15
2.2	2.2 - 2.4	2.26 - 2.37 - 2.49 - 2.61
2.7	2.7 - 3.0	2.74 - 2.87 - 3.01 - 3.16
3.3	3.3 - 3.6	3.32 - 3.48 - 3.65 - 3.83
3.9	3.9 - 4.3	4.02 - 4.22 - 4.42 - 4.64
4.7	4.7 - 5.1	4.87 - 5.11 - 5.36
5.6	5.6 - 6.2	5.62 - 5.90 - 6.19 - 6.49
6.8	6.8 - 7.5	6.81 - 7.15 - 7.50 - 7.87
8.2	8.2 - 9.1	8.25 - 8.66 - 9.09 - 9.53

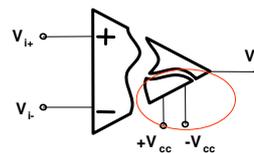


Amplificadores aislados (I).

- Aislamiento Galvánico entre sus circuitos de entrada y salida
- Aplicaciones con tensiones de modo común a la entrada del Amplificador altas
- Aplicaciones con señales provenientes de sensores en los que no exista aislamiento galvánico con tierra física en el punto de medición.
- Aplicaciones biomédicas
- Limitación: Poco ancho de banda.



(a) Aislamiento de dos puertos



(b) Aislamiento de tres puertos



Amplificadores aislados (II).

- Aislamiento: paso de información de la entrada a la salida sin circulación de corriente
- Tipos de aislamiento:
 - Eléctrico
 - Magnético
 - Electromagnético
- Técnicas capacitivas, Inductivas u ópticas

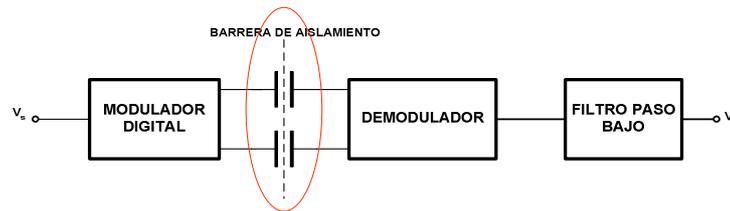
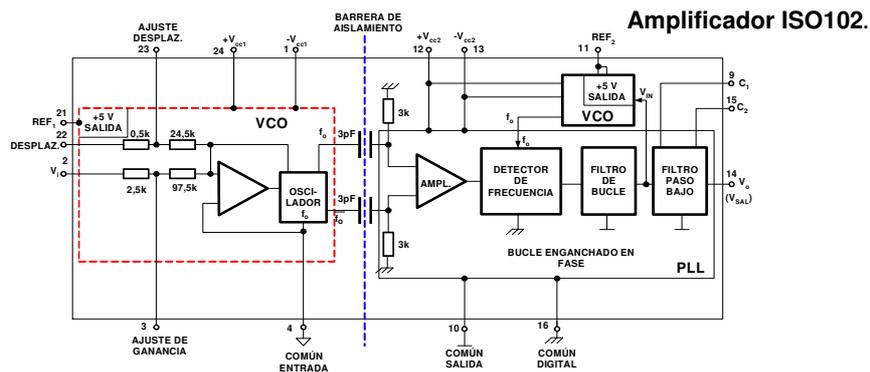


Diagrama simplificado de un amplificador aislado capacitivamente



Amplificadores aislados (III).

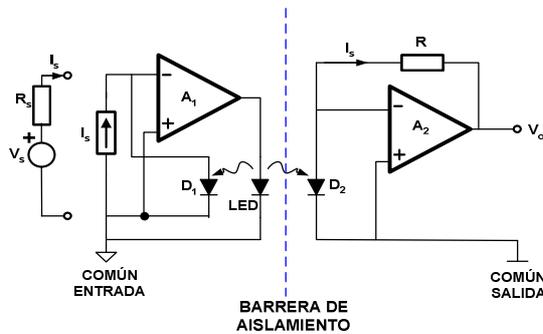


VCO: Oscilador controlado por tensión
PLL: Phase Locked Loop

- ✓ Altas tensiones de aislamiento 1500-2000V
- ✓ Buena precisión en la ganancia
- ✓ Ancho de banda de peq. Señal grandes (70-80Khz)
- × Rizado de la portadora en la salida
- × Aparición de ruido de banda ancha



Amplificadores aislados (IV).

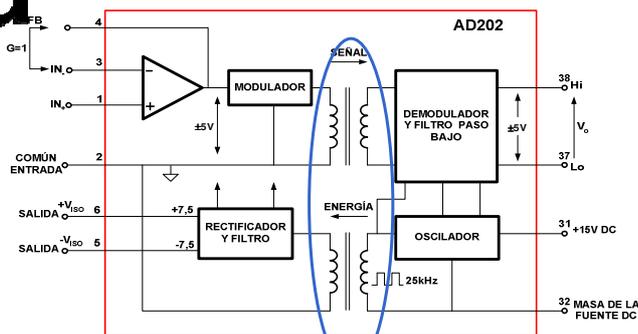


- ✓ Buena linealidad
- ✓ Gran rapidez de respuesta
- ✓ Ancho de banda moderadamente alto

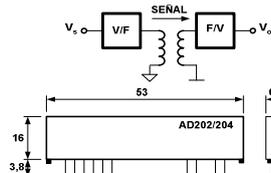
Diagrama simplificado de un amplificador **aislado ópticamente**



Amplificadores aislados (V).



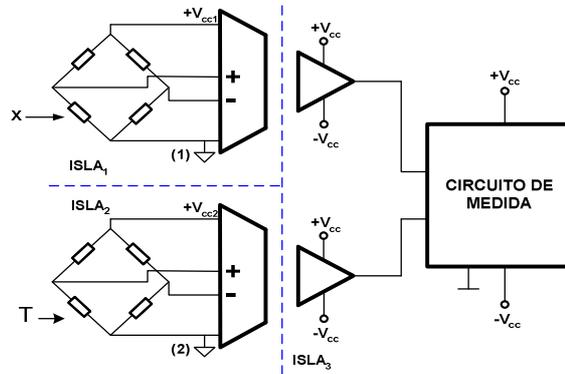
Amplificador **aislado a transformador AD202**



- ✓ Altas tensiones de aislamiento 1500-2000V
- ✓ Buena linealidad
- ✓ Ancho de banda de peq. Señal grandes (70-80Khz)
- × Limitación en el ancho de banda (5KHz con ganancia unitaria)



Amplificadores aislados (VI).



Aplicación de amplificadores aislados alimentando puentes de sensores



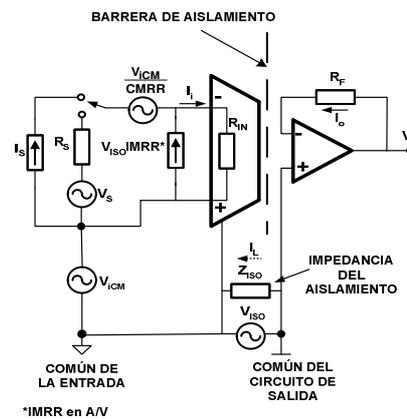
Amplificadores aislados (VII).

IMRR: Razón de rechazo del modo de aislamiento (*Isolated Mode Rejection Ratio*)

$$v_o = i_s \cdot R_F \pm \frac{V_{ISO}}{IMRR}$$

$$v_o = \left(v_s \pm \frac{v_c}{CMRR} \right) \cdot \frac{R_F}{R_s} \pm V_{ISO} \cdot IMRR \cdot R_F$$

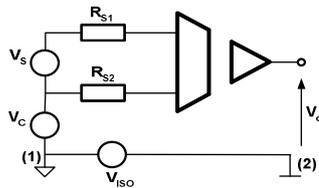
$$v_o = \left(v_s \pm \frac{v_c}{CMRR} \right) \cdot \frac{R_F}{R_s} \pm \frac{V_{ISO}}{IMRR}$$



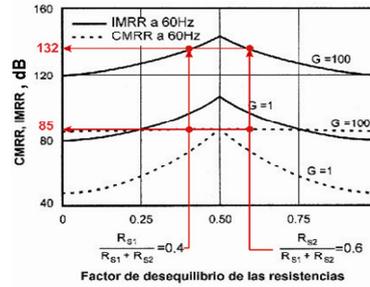
*IMRR en A/V



Amplificadores aislados (VIII).



(a)



(b)

$$v_o = \left(v_s \pm \frac{v_c}{\text{CMRR}} \right) \cdot \frac{R_F}{R_S} \pm \frac{V_{\text{ISO}}}{\text{IMRR}}$$

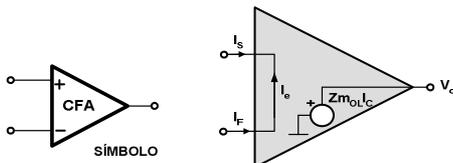
E3.8



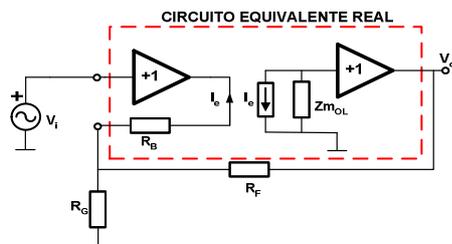
Amplificador de transimpedancia (I).

Amplificador de Transimpedancia o CFA (*Current Feedback Amplifier* o amplificador realimentado en corriente)

$Z_{m_{OL}}$ [Ω]: ganancia de trasimpedancia



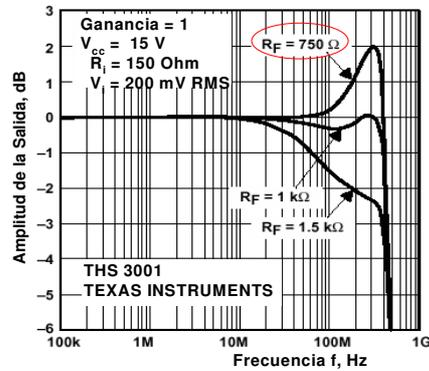
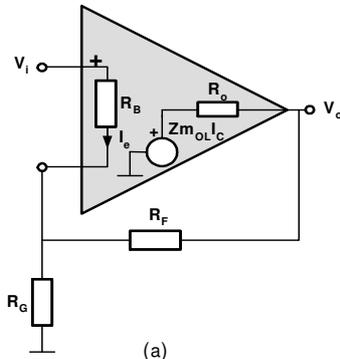
CIRCUITO EQUIVALENTE IDEAL



CIRCUITO EQUIVALENTE REAL



Amplificador de transimpedancia (II).



$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_{m_{OL}} \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right)}{R_F + Z_{m_{OL}}}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$



Amplificador de transconductancia

Amplificador de Transconductancia o CSVC (*Current Source Voltage Controlled*) o fuente controlada por tensión

Amplificador en el que la señal de entrada es una tensión y su salida una corriente

g_m [S]: ganancia de transconductancia

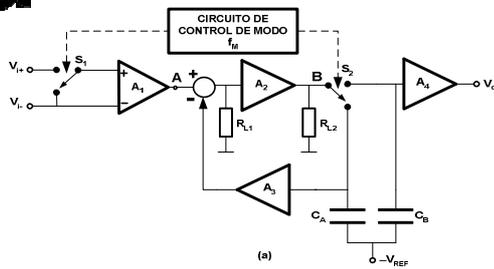
$$I_o = g_m \cdot (v_{i+} - v_{i-})$$

Aplicaciones:

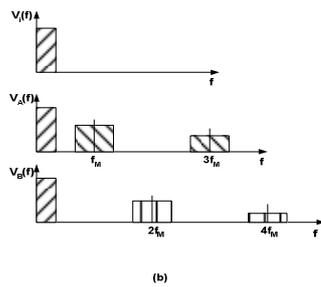
- Multiplicadores analógicos
- Moduladores de amplitud
- Filtros activos



Amplificadores troceadores.

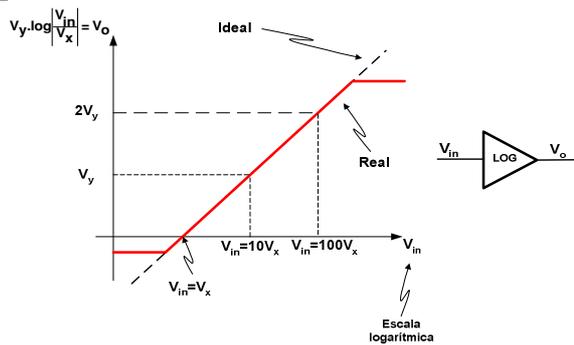


Amplificador operacional con autocero
Se realiza la medición alternada de la señal y de los "errores".
Ejemplo: TLC2652



Amplificadores Logarítmicos

$$y = \log x$$



$$v_o = V_y \cdot \log_{10} \left| \frac{v_i}{V_x} \right|$$

V_x : tensión de corte en cero

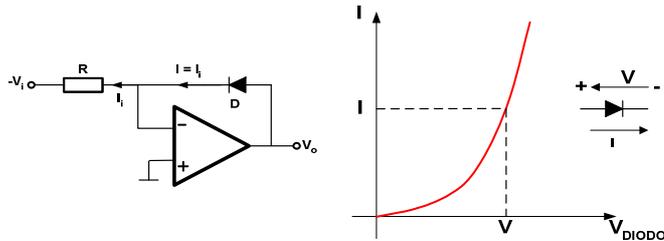
V_y : *slope voltage* o factor de voltios por década [V/dB]



Amplificadores logarítmicos (II).

Arquitecturas básicas:

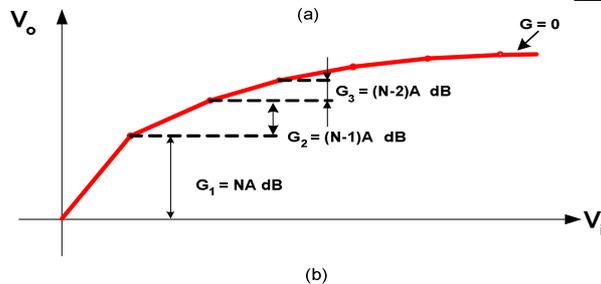
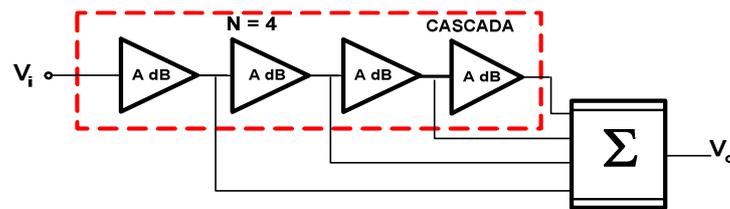
- Amplificador logarítmico con diodo
- Amplificador logarítmico de video
- Amplificador logarítmico de detección sucesiva



$$v_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{i_i}{I_o} \cong 0,06 \log \frac{v_i}{R \cdot I_o}$$



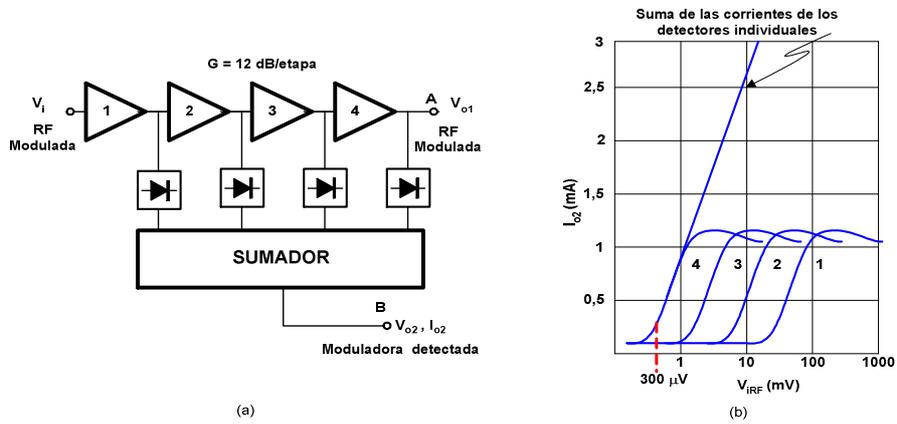
Amplificadores logarítmicos (III).



Amplificador Logarítmico para señales unipolares



Amplificadores logarítmicos (IV).



Amplificador Logarítmico de detección sucesiva de 4 etapas de 12 dB