

# COMPORTAMIENTO DE LOS AMPLIFICADORES

## INTRODUCCIÓN

Los amplificadores constituyen sin duda uno de los dispositivos electrónicos más importantes. Los amplificadores pueden ser construidos con transistores de distinto tipo o ser circuitos integrados. Hay una gran variedad de amplificadores, muchos de ellos diseñados especialmente para una determinada aplicación, pero los de mayor importancia son aquellos de uso general conocidos como Amplificadores Operacionales. Son circuitos integrados frecuentemente utilizados en el procesamiento de señales cuya función es amplificar una señal. La amplificación surge de la necesidad de poder adaptar y procesar señales de pequeña amplitud a sistemas de medida o registro.

El objetivo final de la materia es el estudio y análisis de un sistema de medición o adquisición de datos provenientes de un experimento. En la Fig.1 se muestra un esquema genérico donde se procesa la señal proveniente de un transductor para adecuarla a un dispositivo de salida, sea este un transductor de salida, un instrumento de lectura, o un sistema de almacenamiento de la información o registro de la misma.

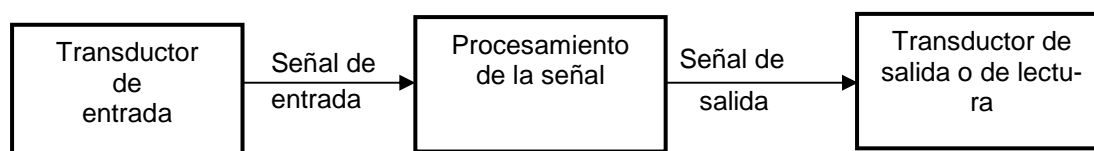


Fig 1 Diagrama en bloques de un sistema Electrónico simple

Se entiende por transductor de entrada todo dispositivo que convierte un tipo de energía (o señal) en otro, y en nuestro caso en una señal eléctrica. Como ejemplos, pueden mencionarse el termopar, que convierte calor en una tensión eléctrica; la fotocélula que convierte luz en una corriente eléctrica.

Generalmente la señal entregada por el transductor no es la adecuada para actuar los dispositivos de salida o de lectura y es necesario un procesamiento de la misma a los fines de adecuarla.

Dependiendo de las características de la señal de entrada y la salida requerida el procesamiento puede ser muy simple o extremadamente complejo.

Una de las funciones más importantes del procesamiento de señales es la amplificación. Estudiaremos y analizaremos los modelos de amplificadores lineales de tensión y su respuesta a señales, por ello haremos algunas consideraciones sobre las mismas.

La amplificación debe realizarla un dispositivo que sea *lineal* para que la señal de salida sea una copia fiel de la de entrada pero ampliada. Si lo anterior no se cumple decimos que el amplificador introduce *distorsión no lineal*. En la Fig. 2 se muestran ejemplos de distintos tipos de distorsión producida por un amplificador no lineal al que se le aplica una onda senoidal de entrada.

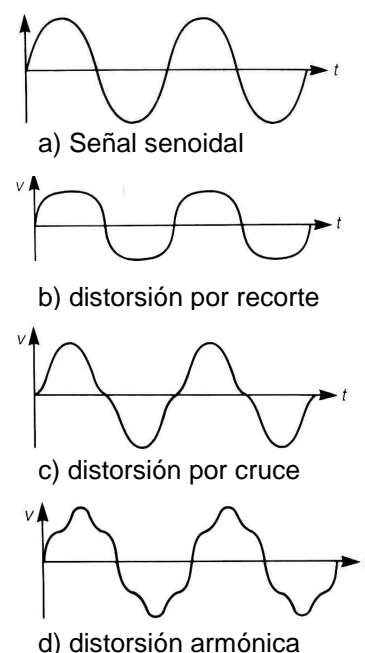
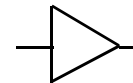


Fig. 2 Distintos tipos de distorsión

## ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LAS SEÑALES

Las señales provenientes de los transductores las representaremos por un generador ya sea con el modelo de Thévenin o Norton sobrentendiendo que se trata de una magnitud que varía en el tiempo, como puede ser la representada en la Fig.3. Esta señal presenta una forma de onda arbitraria pero es necesario poderla describir completamente con el objeto de seleccionar el amplificador adecuado a la misma.

Una caracterización muy útil de una señal es describirla en términos de su *espectro de frecuencia*, esta descripción se obtiene por medio de la serie de Fourier y la transformada de Fourier, herramientas matemáticas que no detallaremos. Por el momento solo nos interesa saber que estas transformaciones nos permiten representar una onda de tensión o corriente variable como la



suma de señales senoidales de diferentes amplitudes y frecuencias teniendo en cuenta las fases relativas.

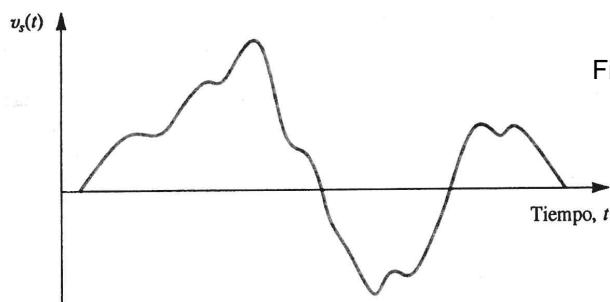


Fig. 3: Señal arbitraria

Esto hace que la onda senoidal, cuyas características ya han sido estudiadas, sea una señal muy importante para el estudio de los amplificadores ya sea para su análisis, diseño y prueba. La serie de Fourier nos permite expresar una función periódica de tiempo dada como la suma de un número infinito de senoides cuyas frecuencias están armónicamente relacionadas. Por ejemplo, la onda cuadrada de la Fig.4 a) se puede expresar como

$$v(t) = \frac{4V}{\pi} \left( \sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right)$$

donde V es la amplitud de la onda cuadrada y  $\omega_0 = 2\pi/T$  (T es el periodo de la onda cuadrada) recibe el nombre de **frecuencia fundamental** (Fig.4 b). Obsérvese que debido a que las amplitudes de las armónicas disminuyen progresivamente, se puede truncar la serie infinita, dando la serie truncada una aproximación de la onda cuadrada. En la parte izquierda de la Fig.4 b) se muestra la frecuencia fundamental y las primeras armónicas y en la parte derecha el resultado de las sumas sucesivas.

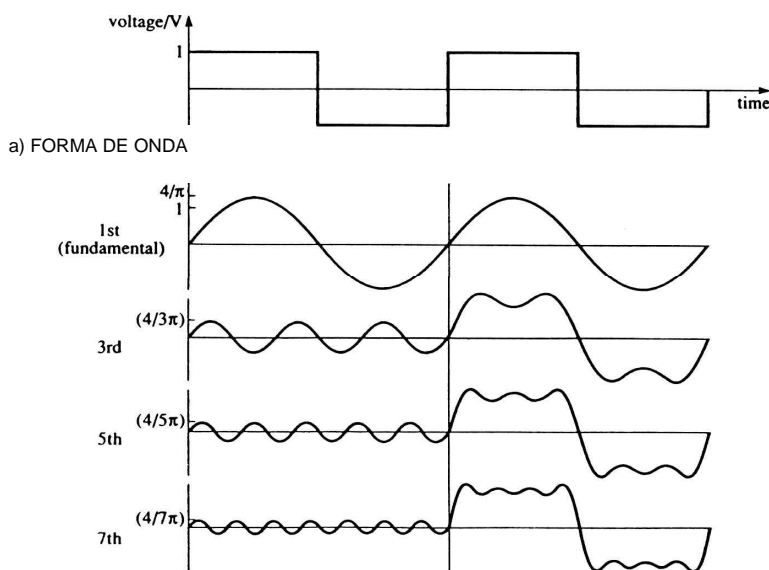


Fig. 4: Onda cuadrada, fundamental y algunas armónicas

Los componentes senoidales de la serie de la ecuación anterior constituyen el espectro de frecuencias de la señal de onda cuadrada. Tal espectro se puede representar gráficamente como en la Fig.5, donde el eje horizontal representa la frecuencia angular  $\omega$  en radianes por segundo.

La transformada de Fourier se puede aplicar a una función de tiempo no periódica, como la descrita en la figura 3 y proporciona su espectro de frecuencias como una función continua de frecuencia, como se indica en la Fig. 6. A diferencia del caso de señales periódicas, donde el espectro está formado por frecuencias discretas (en  $\omega_0$  y sus armónicas), el espectro de una señal no periódica contiene en general todas las frecuencias posibles. No obstante, las partes esenciales de los espectros de señales prácticas suelen estar confinadas a segmentos relativamente pequeños del eje de la frecuencia ( $\omega$ ),

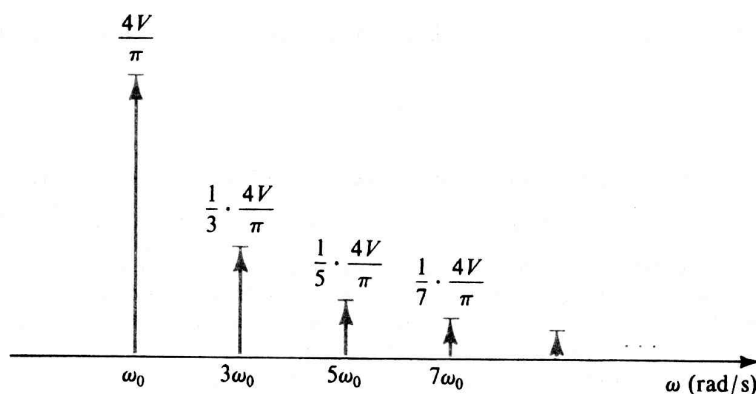
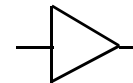


Fig. 5: Espectro de frecuencia de una onda periódica (cuadrada)

observación que es muy útil en el procesamiento de estas señales. Por ejemplo, el espectro de sonidos audibles como son la voz y la música se extiende de unos 20 Hz a alrededor de 20 KHz, intervalo de frecuencia conocido como **banda de audio**. Aquí debemos observar que aún cuando algunos tonos musicales tienen frecuencias arriba de 20 KHz, el oído humano no puede percibir frecuencias que estén muy por arriba de los 20 KHz.

Resumiendo: una señal se puede representar ya sea por el modo en que su forma de onda varía con el tiempo, como la señal de tensión  $v_i(t)$  que se muestra en la Fig.2, o en términos de su espectro de frecuencias, como en la Fig. 5. Las dos representaciones se conocen como *representación en el dominio del tiempo* y *representación en el dominio de la frecuencia*, respectivamente podemos usar cualquiera de ellas indistintamente. La representación en el dominio de la frecuencia de  $v_i(t)$  lo estará por el símbolo  $V_i(\omega)$ .

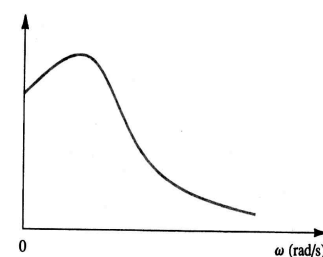


Fig- 6: Espectro de frecuencia de la onda arbitraria de Fig 3

### MODELO DE CAJAS NEGRAS

Retomando el diagrama en bloques de la Fig.1 representaremos cada uno de los elementos por "cajas negras" que son el modelo eléctrico del transductor de entrada, el amplificador y el transductor de salida mostrados en la Fig. 7

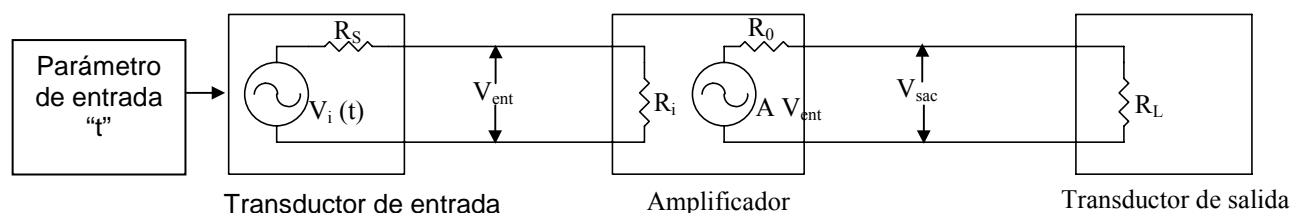


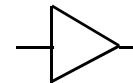
Fig. 7. Modelo de Cajas Negras de un sistema

El transductor de entrada lo podemos representar como una caja negra conteniendo un generador de tensión en serie con un resistor con cierta resistencia denominada *impedancia de salida* del transductor  $R_s$ . La fuente de tensión  $v_s(t)$  depende del sistema bajo estudio y su magnitud es proporcional a parámetros a medir, en este caso  $t$  es una temperatura.

Luego, tenemos el *amplificador* que posee dos terminales llamado *puerto de entrada* al que está conectada una *resistencia de entrada*  $R_{in}$ , también llamada genéricamente *impedancia de entrada*. El amplificador monitorea la tensión  $v_i$  que hay en los extremos de la resistencia de entrada  $R_{in}$  y genera una tensión  $A_v$  veces mayor.  $A_v$  es la *ganancia de tensión a lazo abierto* del circuito o la *ganancia del amplificador*. La antedicha tensión es representada por un generador de tensión  $A_v v_i$  al que se conecta un resistor en serie cuya *resistencia de salida* es  $R_o$ . El generador  $A_v v_i$  y la resistencia  $R_o$  están conectados a los terminales de salida que constituyen el *puerto de salida* del amplificador. Observar que el circuito de salida es el equivalente de Thévenin.

Finalmente el amplificador es conectado al transductor de salida, que constituye la *carga* del amplificador. Esta carga tiene una cierta resistencia  $R_L$ . La tensión sobre la carga desarrolla una potencia que se disipa en la misma.

Todo el proceso comenzó con una potencia entregada por el transductor de entrada  $P_{in}$  al amplificador y éste genera una potencia  $P_o$  mayor en el trans-



ductor de salida. Generalmente -pero no siempre- un incremento en el nivel de tensión de la señal de salida respecto de la de entrada. La *ganancia de potencia* o la *amplificación de potencia*  $A_p$  es definida como:

$$A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

Expresada en decibels tenemos:  $\text{dB} = 10 \log A_p$

Para determinar la tensión sobre  $R_L$  debemos conocer: la fuente de tensión  $v_s$ , las cuatro resistencias  $R_s$ ,  $R_{in}$ ,  $R_o$  y  $R_L$  y la ganancia de tensión  $A_v$ . Veamos un ejemplo sobre esto.

En la Fig.8 se muestra un sistema amplificador de audiofrecuencia. El transductor de entrada es un micrófono con una impedancia de salida de 10.000 ohms conectado al amplificador cuya resistencia de entrada es de 1.000 ohms. La ganancia de tensión del amplificador es de 2.000 y su impedancia de salida de 200 ohms. La salida del amplificador se conecta al transductor de salida, un altoparlante que transforma la potencia eléctrica en acústica. Si el micrófono produce una tensión a circuito abierto de 0,2 volt, Qué tensión habrá sobre el parlante? Qué potencia disipa el parlante? Cuáles son las ganancias de tensión y de potencia del sistema?

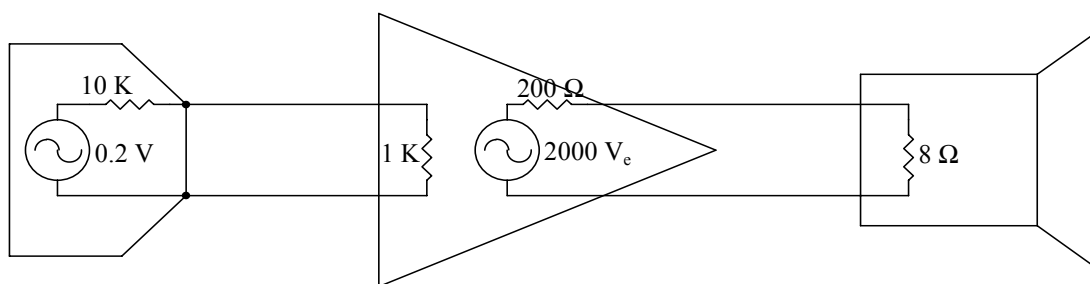


Fig. 8 Ejemplo de “Cajas Negras” de un amplificador de audiofrecuencia

Supongamos que un micrófono tiene una impedancia de salida de 10.000 ohms y se conecta a un amplificador cuya resistencia de entrada es de 1.000 ohms. La ganancia de tensión del amplificador es de 2.000 y su impedancia de salida de 200 ohms. El amplificador es conectado a un altoparlante cuya resistencia es de 8 ohms. Para un determinado nivel de sonido el micrófono entrega una tensión de 0.2 V ( $V_{ef.}$ ) ¿Qué tensión habrá sobre el altoparlante y cuál es la potencia que se le entrega?

**Solución:** Plantearemos los pasos correspondientes desde la entrada a la salida del sistema.

1.-La tensión que aparece en los terminales de entrada del amplificador es menor que 0.2 V.

$$V_{in} = 0.2V_{rms} \left( \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 10k\Omega} \right) = 0.0182V_{rms}$$

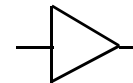
2.- El generador del amplificador entrega una tensión

$$2000V_{in} = 2000 \times 0.018V_{rms} = 36.4V_{rms}$$

3.- La tensión sobre el altoparlante es menor de 36.4 V

$$V_{out} = 36.4V_{rms} \frac{8\Omega}{8\Omega + 200\Omega} = 1.4V_{rms}$$

4.-La potencia entregada al altoparlante es:



$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(1.4V_{rms})^2}{8\Omega} = 0.245W$$

5.-La potencia generada por la fuente de tensión del micrófono es:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(0.2V_{rms})^2}{(10,000 + 1000)\Omega} = 3.6 \times 10^{-6} W$$

6. La ganancia de tensión del sistema

$$G_v = 1.4 / 0.2 = 7$$

7.-La ganancia de potencia del sistema:

$$G_p = \frac{0.245W}{3.6 \times 10^{-6} W} = 68.000$$

en dB es

$$10 \log 68,000 = 48dB$$

8.- La potencia de entrada al amplificador es:

$$P_{in} = V_{in} I_{in} \text{ or } \frac{V_{in}^2}{R_{in}} = \frac{(0.0182V_{rms})^2}{1000\Omega} = 3.31 \times 10^{-7} W$$

la ganancia de potencia del amplificadores.

$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{0.245W}{3.3 \times 10^{-7} W} = 7.42 \times 10^5$$

expresada en dB

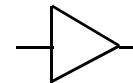
$$dB = 10 \log(7.42 \times 10^5) = 10(5 + \log 7.42)$$

$$= 10 \times 5.87 = 58.7dB$$

Note que en la resistencia interna del generador se disipa una potencia muy superior a la de la carga (25 veces).

Algunas consecuencias importantes del sistema electrónico del ejemplo son evidentes.

- ✓ En primer lugar la tensión  $V_{in}$  que existe a la entrada del amplificador se ve muy reducida por la acción del divisor de tensión que actúa sobre la tensión de salida de 0.2 V que genera el micrófono; y el amplificador solo puede amplificar esa señal que hay sobre sus terminales de entrada. Este es un claro ejemplo de *desadaptación de impedancia*.  
En lugar de tener una  $R_{in}$  mucho menor que  $R_s$  ( 1.000 ohms y 10k respectivamente, en el ejemplo)  $R_{in}$  debería ser mucho mayor que  $R_s$ . Si no existiera la acción del divisor de tensión el amplificador ganaría  $2.000 \times 0.2 = 400 V$  ( en lugar de 36.4 V). Está claro que el *amplificador ideal de tensión debe tener una impedancia de entrada infinita* (similar a un voltímetro)
- ✓ En segundo lugar debemos destacar que en el ejemplo la tensión de salida sobre el altoparlante es muy reducida por la acción del divisor de tensión que tiene lugar entre la  $R_{out}$  de 200 ohms y  $R_L$  de 8 ohms del altoparlante. Decimos que el altoparlante *carga mucho* al amplificador tirando abajo su salida. Si la impedancia de salida del amplificador fuese muy baja, próxima a cero, toda la tensión del generador aparecería sobre  $R_L$  inde-



pendientemente de cuál sea su valor. Por lo tanto podemos ver que *el amplificador ideal debe tener una impedancia de salida igual a cero*.

- ✓ El tercer punto que debemos tener en cuenta es que la ganancia de tensión del sistema es del ejemplo es de 7 y que la ganancia de potencia es mucho mayor, 68.000. Ello se debe a que las impedancias del micrófono y del altoparlante son muy diferentes. En efecto, debido a la alta impedancia del micrófono este es capaz de generar muy poca corriente y por lo tanto entregar muy poca potencia a un elemento externo. Par demostrar esto supongamos que conectamos el micrófono directamente al altoparlante. La corriente que circula por dichos elementos es:

$$I = \frac{0.2V}{10K\Omega + 8\Omega} \cong \frac{0.2V}{10K\Omega}$$

La potencia liberada en el altoparlante es

$$P_{alt} = I^2 R = \left( \frac{0.2V}{10K\Omega} \right)^2 8\Omega = 3.2 \times 10^{-9} W$$

Esta es despreciable comparada con la que le entrega el amplificador (0.234 W antes calculada). Decimos que existe una gran *desadaptación de impedancia* entre el micrófono y el altoparlante.

### Ganancia De Potencia Con El Seguidor De Tensión Ideal

El hecho de que exista ganancia de potencia con una ganancia de tensión muy pequeña en el sistema micrófono/amplificador/altoparlante puede causar sorpresa. En realidad es posible conseguir ganancia de potencia aún cuando no exista ganancia de tensión con el seguidor de tensión. El *amplificador seguidor de tensión* (o simplemente *seguidor de tensión*) es un amplificador que tiene una ganancia de tensión a circuito abierto  $A_v$  igual a la unidad. La tensión de salida es exactamente igual a la de entrada (se entiende si el amplificador no está *cargado*). La salida sigue en todo instante la tensión aplicada a los terminales de entrada produciendo una copia de esta a la salida.

Consideremos el caso que intercalamos un seguidor de tensión ideal entre el micrófono y el altoparlante de la Fig. 8. Recordemos que la impedancia de entrada  $R_{in}$  ideal es muy grande ( $\approx \infty$ ) y la resistencia de salida muy pequeña ( $\approx 0$ ) Este sistema se muestra en el diagrama de la Fig. 9.

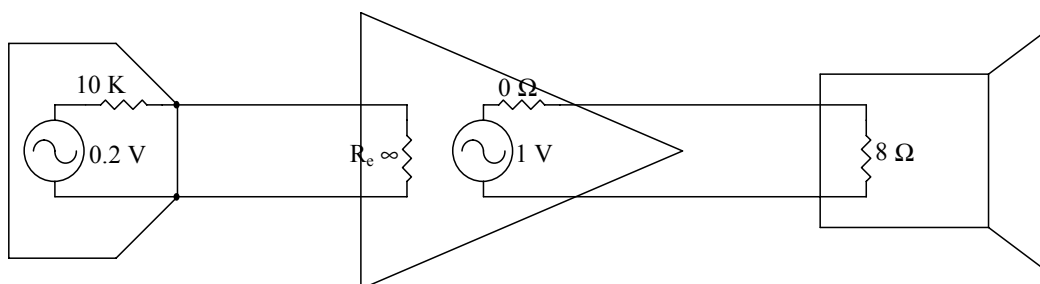
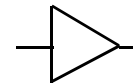


Fig.9 Sistema con amplificador seguidor emisor ideal

Debido a que el amplificador tiene impedancia de entrada muy alta la acción del divisor de entrada es despreciable y los 0.2 volt del micrófono aparecen como  $V_{in}$  a la entrada del seguidor de tensión. Esta tensión es duplicada a la salida y se desarrolla sobre los 8 ohms de la resistencia del altoparlante. La potencia entregada al altoparlante es:

$$P_{alt.} = \frac{V^2}{R} = \frac{0.2^2}{8} = 5 \times 10^{-3} W$$



El resultado es que la potencia es mayor de un millón de veces que la potencia desarrollada en el altoparlante si el micrófono se conectase directamente al altoparlante. Vemos que no hay ganancia de tensión, hay gran ganancia de potencia, y justifica ampliamente que llamemos “amplificador” al seguidor de tensión.

### Adaptación De Impedancia Y Máxima Transferencia De Potencia

Supongamos que tenemos un cierto amplificador con una dada tensión de salida y una cierta impedancia de salida y podamos elegir varias impedancias para la carga. Por ejemplo, supongamos que el amplificador de la Fig. 10 cuya impedancia de salida es de 200 ohms lo debemos conectar a un altoparlante cuya impedancia la podemos escoger( esto no es muy real en el caso del altoparlante pero sucede con otras cargas). La cuestión ahora es ¿cuál es la impedancia de la carga que maximiza la potencia en la misma? Debemos obtener la *máxima transferencia de potencia* a la carga.

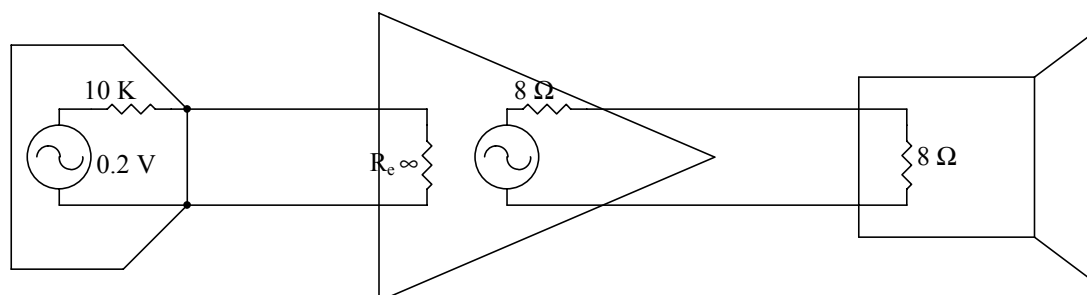


Fig.10 Sistema con amplificador seguidor emisor ideal

Según se ilustra en la Fig. 10 la potencia liberada en la carga es:

$$P(R_L) = \frac{V_{RL}^2}{R_L} = \frac{\left[ \frac{VR_L}{R_L + R_{Out}} \right]^2}{R_L} = \frac{V^2 R_L}{(R_L + R_{Out})^2}$$

Téngase en cuenta en que en el límite para una resistencia de carga muy pequeña ( $R_L \rightarrow 0$ ) la potencia tiende a cero debido a que  $R_L$  está en el numerador; toda la potencia se desarrolla en la resistencia interna del generador  $R_{out}$ . En el otro extremo, si  $R_L$  es muy grande ( $R_L \rightarrow \infty$ ) la potencia es cero debido a que el denominador se hace infinito; la potencia liberada en la carga es cero porque no circula corriente. Aparentemente existirá un valor intermedio entre estos extremos que cumplirá con la condición de máxima transferencia de potencia.

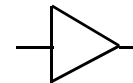
Del cálculo sabemos que la pendiente de una función es cero en un máximo de la misma. Luego para encontrar el máximo de la función  $P(R_L)$  derivamos la ecuación anterior con respecto de  $R_L$ , hacemos el resultado igual a cero y resolvemos

$$\frac{d}{dR_L} P(R_L) = \frac{V^2}{R_L + R_{Out}} - 2V^2 R_L (R_L + R_{Out})^{-3} = 0$$

Anulando las V y multiplicando por  $(R_L + R_{Out})^{-3}$  obtenemos

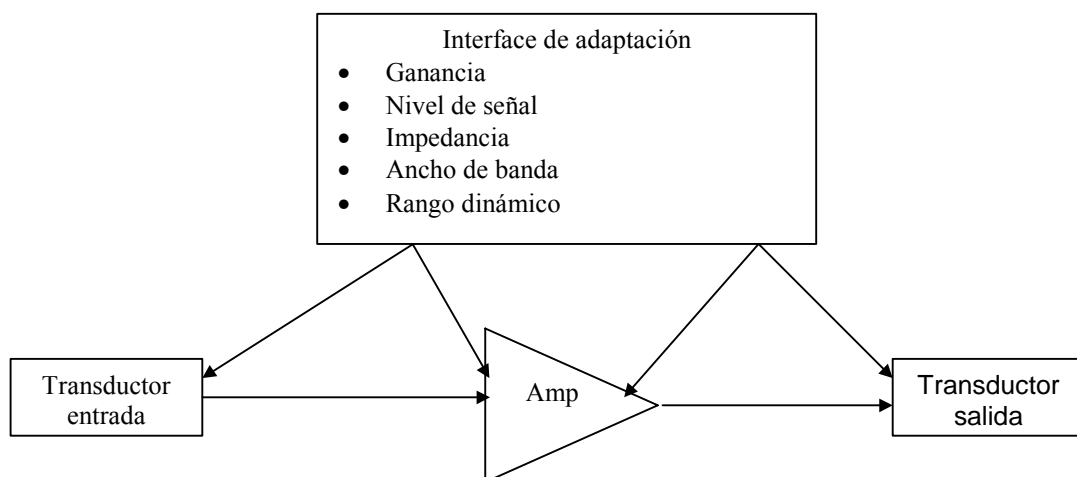
$$R_L + R_{Out} - 2R_L = 0 \quad \text{o} \quad R_L = R_{Out}$$

Esta es la condición de máxima transferencia de potencia, cuando la resistencia de carga es igual o se *adapta* a la resistencia de la fuente. Está claro que en estas condiciones la mitad de la potencia se disipa en la carga y la otra mitad en la resistencia interna del generador.



CONCLUSIONES : en el ejemplo anteriormente desarrollado debemos destacar lo siguiente:

Si bien el amplificador tiene una determinada ganancia cuando al mismo se le conecta una señal a la entrada proveniente de un generador que posee una determinada impedancia característica y a la salida se conecta una carga con su correspondiente impedancia el conjunto pasa a formar un sistema que tiene una ganancia **diferente** de la del amplificador. El amplificador es un elemento integrante muy importante del sistema pero todos los elementos son los que fijan el comportamiento del conjunto. Tienen especial importancia las impedancias relativas entre los elementos interconectados entre otros parámetros a tener en cuenta como se muestra en la Fig. 11 que pronto veremos



Parámetros a tener en cuenta en la elección del Amplificador.

- Distorsión armónica total
- Aislación
- Ruido

### AMPLIFICADORES EN CASCADA

Supongamos que tenemos varios amplificadores, que cada uno de ellos tenga una ganancia a circuito abierto de 10, pero necesitamos una ganancia de tensión de 1.000. ¿Qué podemos hacer? La respuesta es casi obvia, conectar la salida de un amplificador a la entrada de un segundo y la salida de este a un tercer y así siguiendo. El resultado se muestra en la Fig. 12 donde se han conectado los *amplificadores en cascada*.

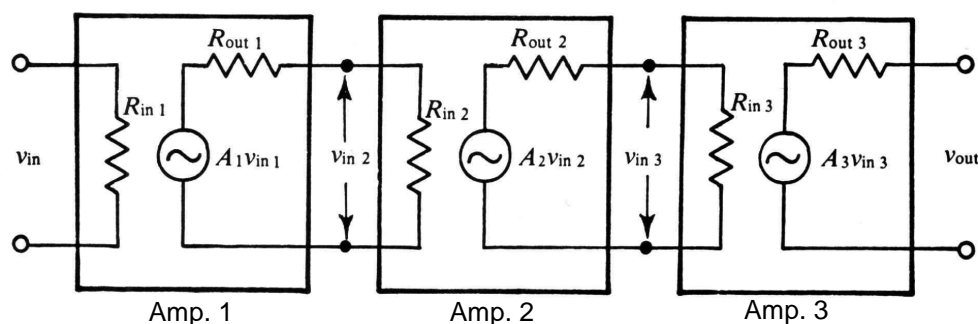
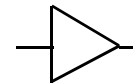


Fig. 12: Amplificadores en cascada

La salida del primer amplificador se convierte en la entrada del segundo y así siguiendo. En general lo que a nosotros nos interesa es saber como el segundo amplificador carga la salida del primer amplificador con el objeto de conocer la salida de tensión del primero que es la tensión de entrada que es la amplificada por el segundo amplificador. De esta forma se sigue con el resto de la cadena.

Si cada amplificador fuera ideal ( $R_{in} = 0$ ;  $R_{out} = \infty$ ) la ganancia de tensión del sistema es la ganancia de la cascada de amplificadores. La ganancia de tensión del primer amplificador es  $v_1 = A_1 v_{in}$ . Esta tensión es amplificada por el segundo amplificador  $v_2 = A_2 (A_1 v_{in})$ . Finalmente el tercer amplificador recibe esta entrada





y produce una salida  $v_3 = A_3 (A_2 A_1 v_{in})$ . Vemos que la ganancia total de la cascada de amplificadores ideales es el producto de las ganancias individuales de los amplificadores:

$$A_{total\ ideal} = v_{out}/v_{in} = A_3 A_2 A_1$$

Si se trata de casos reales se deben considerar las impedancias de entradas y salidas de cada amplificador que integra la cascada.

## RESPUESTA EN FRECUENCIA DE AMPLIFICADORES:

Sabemos que la señal de entrada a un amplificador siempre se puede expresar como la suma de señales senoidales. Se concluye que una característica importante de un amplificador es en términos de su respuesta a senoides de entrada de frecuencia diferentes. Tal caracterización de la operación de un amplificador se conoce como *respuesta en frecuencia*.

### Determinación de la respuesta en frecuencia de un amplificador:

Introduciremos el tema de la respuesta en frecuencia de un amplificador al mostrar la forma en que ésta se puede determinar. En la Fig.13 se muestra un amplificador lineal de tensión alimentado en su entrada con una señal senoidal de amplitud  $V_i$  y frecuencia  $\omega$ . Como se indica en la Fig 13, la señal a la salida del amplificador es senoidal con exactamente la misma frecuencia  $\omega$ . Este es un punto importante que se debe tener en cuenta: siempre que una señal de onda senoidal sea aplicada a un circuito lineal, la salida resultante es senoidal con la misma frecuencia que la de la entrada. En realidad, la onda senoidal es la única señal que no cambia de forma a medida que pasa por un circuito lineal. Observemos, sin embargo, que la senoide de la salida tendrá en general amplitud diferente y estará desfasada en relación con la entrada. La razón entre la amplitud de la senoide de salida ( $V_o$ ) y la amplitud de la senoide de entrada ( $V_i$ ) es la magnitud de la ganancia del amplificador (o transmisión) a la frecuencia de  $\omega$ . Del mismo modo, el ángulo  $\phi$  es la fase de la transmisión del amplificador a la frecuencia de  $\omega$ . Si llamamos *función de transferencia* o *ganancia*,  $T(\omega)$ , a la relación entre la tensión de salida y la de entrada, entonces

$$|T(\omega)| = \frac{V_o}{V_i}$$

$$\angle T(\omega) = \phi$$

La respuesta del amplificador a una senoide de frecuencia  $\omega$  está descrita completamente por  $|T(\omega)|$  y  $\angle T(\omega)$ . Ahora, para obtener la respuesta completa en frecuencia del amplificador simplemente barremos la frecuencia de la senoide de entrada y determinamos los correspondientes valores para  $|T|$  y  $\angle T$ . Obtendremos así un gráfico de ganancia  $|T(\omega)|$  contra frecuencia y otro para  $\angle T(\omega)$ . Estas dos gráficas juntas constituyen la respuesta en frecuencia del amplificador; la primera se conoce como *respuesta en magnitud o amplitud*, y la segunda es la *respuesta en fase*.

### Ancho de banda del amplificador:

En la Fig. 14 se muestra la respuesta en magnitud de un amplificador. Se puede observar que la ganancia es casi constante sobre una amplia gama de frecuencia, aproximadamente entre  $\omega_1$  y  $\omega_2$ . Las señales cuyas frecuencias estén debajo de  $\omega_1$  o arriba de  $\omega_2$  experimentan menor ganancia, con la ganancia disminuyendo a medida que nos alejamos de  $\omega_1$  y  $\omega_2$ . La banda de frecuencias sobre la que la ganancia del amplificador es casi constante, a

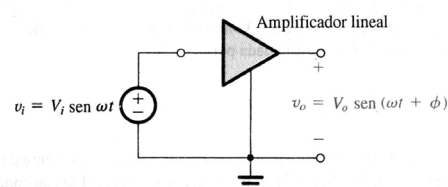


Fig. 13: Determinación de la respuesta en frecuencia

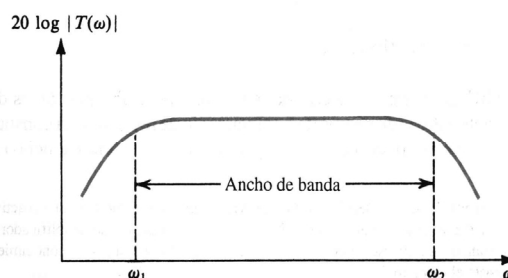
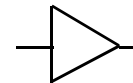


Fig. 14: Respuesta típica



menos de cierto número de decibels (por lo general 3 dB), se llama *ancho de banda de amplificador*. Normalmente el amplificador está diseñado de modo que su ancho de banda coincida con el espectro de las señales que es necesario amplificar. Si éste no fuera el caso, el amplificador *distorsionaría* los diferentes componentes del espectro de frecuencias de la señal de entrada, serían amplificados en forma diferente

### Clasificación de amplificadores basándose en la respuesta en frecuencia:

Los amplificadores se pueden clasificar sobre la base de la forma de su curva de respuesta en magnitud respecto a la frecuencia. En la Fig. 15 se muestran curvas típicas de respuesta en frecuencia para varios tipos de amplificadores. En la Fig. 15 (a) la ganancia permanece constante en una amplia gama de frecuencias pero cae a frecuencias bajas y altas. Éste es un tipo común de respuesta en frecuencia que se encuentra en amplificadores de audio.

Ello se debe a las **capacitancias internas** en los elementos constitutivos del amplificador (por ejemplo transistores) que producen una caída de ganancia a altas frecuencias. Por otra parte, la pérdida de ganancia a bajas frecuencias suele ser ocasionada por **condensadores de acoplamiento** que se utilizan para conectar una etapa amplificadora con otra, como se indica en la Fig. 16. Esta práctica se adopta por lo general para simplificar el proceso de diseño de las diferentes etapas. Los capacitores de acoplamiento suelen escogerse bastante grandes (desde una fracción de microfarad hasta varias decenas de microfarads) para que su reactancia sea pequeña a las frecuencias de interés. No obstante, a frecuencias suficientemente bajas, la reactancia de un capacitor de acoplamiento se hará tan grande que ocasiona que parte de la señal que debe acoplarse aparezca como caída de voltaje en los terminales del capacitor de acoplamiento, por lo que esa parte no llega a la etapa subsiguiente. Los capacitores de acoplamiento y la resistencia de entrada del amplificador forman un filtro pasa bajo y producen de este modo una pérdida de ganancia a bajas frecuencias y ocasionan que la ganancia sea cero a cc.

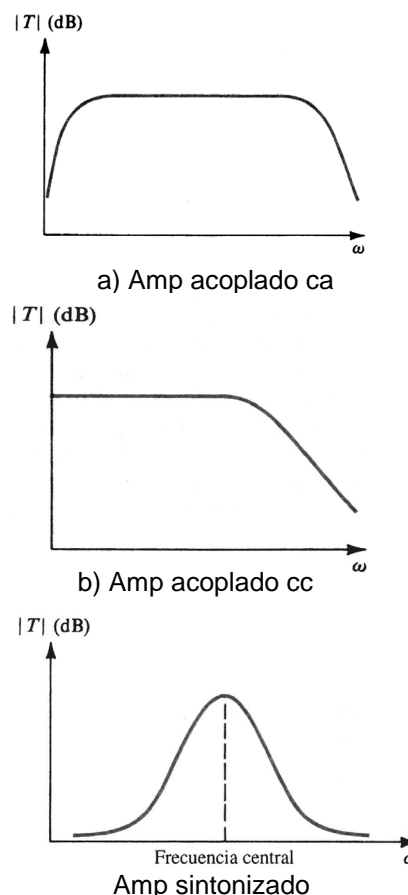


Fig. 15: respuesta en frecuencia

Hay muchas aplicaciones en las que es importante que el amplificador mantenga ganancia a bajas frecuencias incluida la cc. Además, la tecnología de circuitos integrados monolíticos (IC) no permite la fabricación de condensadores de acoplamiento grandes. Entonces, los amplificadores integrados monolíticos se diseñan en general como *amplificadores acoplados directamente o de cc* (al contrario de los *amplificadores acoplados capacitivamente o de ca*). En la Fig.16(b) se muestra la respuesta en frecuencia de un amplificador de corriente continua. Esta respuesta en frecuencia caracteriza lo que se conoce como un *amplificador de paso bajo*.

En diversas aplicaciones, como es el caso de receptores de radio y de TV, surge la necesidad de un amplificador cuya respuesta en frecuencia sea solo alrededor de cierta frecuencia (llamada *frecuencia central*) y caiga en ambos lados de esta frecuencia, como se muestra en la Fig.16(c). Los amplificadores que tienen esta respuesta se llaman *amplificadores sintonizados*, *amplificadores pasabanda*. Un amplificador sintonizado forma el corazón de la etapa de sintonía de un receptor; al ajustar su frecuencia central para que coincida con la frecuencia de una radioemisora deseada, la señal de esa radioemisora en particular se puede recibir mientras que las otras canales son muy atenuadas y no se escuchan.

### Otros tipos de amplificadores

Hasta el presente nos hemos referido generalmente al amplificador de tensión. En muchas ocasiones no solo la tensión es la variable de interés también lo puede ser la corriente ya sea a la entrada o a la salida. En otras oportunidades la variable de entrada puede ser una de ella y la salida la otras. Por ejemplo

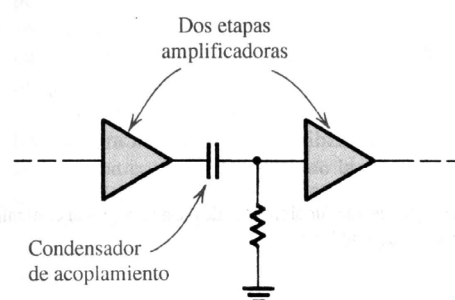
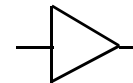


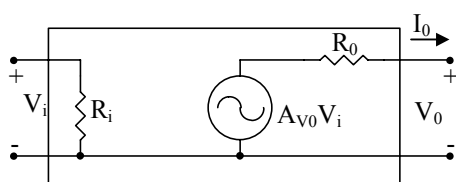
Fig. 16: acoplamiento con capacitor



algunos transductores tienen una resistencia de salida muy alta y el modelo mas apropiado es el de un generador de corriente. Hay aplicaciones en que es de interés la corriente de salida en ves de la tensión. Por lo tanto, aún cuando el amplificador de tensión es el más usado es uno de los cuatro tipos de amplificadores posibles. Los restantes tres amplificadores son: el amplificador de corriente, el amplificador de transconductancia y el amplificador de transresistencia. En la Fig 17 se muestran los modelos de los cuatro tipos de amplificadores con la definición de sus respectivas ganancias.

Aún cuando el modelo de uno de los cuatro amplificadores es más adecuado para resolver un problema, cualquiera de ellos puede usarse a tal fin. Relaciones sencillas permiten pasar de un modelo a otro.

#### AMPLIFICADOR DE TENSIÓN

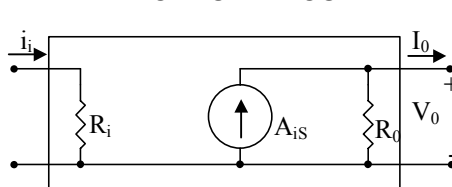


**Ganancia de tensión a circuito abierto:**

$$A_{vo} = \frac{v_o}{v_i} \Big|_{i_o=0} \quad \text{volt/volt}$$

**Amplificador ideal:  $R_i = \infty$   $R_o = 0$**

#### AMPLIFICADOR DE CORRIENTE

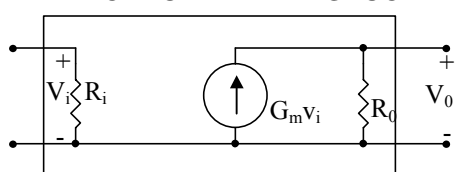


**Ganancia de corriente a cortocircuito**

$$A_{is} = \frac{i_o}{i_i} \Big|_{v_o=0} \quad \text{Amp/Amp}$$

**Amplificador ideal:  $R_i = 0$   $R_o = \infty$**

#### AMPLIFICADOR DE TRANSDUCTANCIA

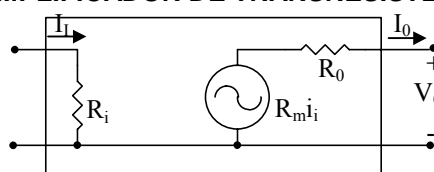


**Transductancia a cortocircuito**

$$G_m = \frac{i_o}{v_i} \Big|_{v_o=0} \quad \text{Amp/volt}$$

**Amplificador ideal:  $R_i = \infty$   $R_o = \infty$**

#### AMPLIFICADOR DE TRANSRESISTENCIA



**Transresistencia a circuito abierto**

$$R_m = \frac{v_o}{i_i} \Big|_{i_o=0} \quad \text{volt/Amp}$$

**Amplificador ideal:  $R_i = 0$  ,  $R_o = 0$**

Fig. 17: Cuatro tipos de amplificadores

## RUIDO

Cuando la magnitud de la tensión de salida de un transductor es pequeña, por ejemplo menor de un milivol, el ruido eléctrico es un problema.

Existe un límite en la amplificación que se puede obtener de un amplificador; la causa del mismo es la aparición de una pequeña señal en la salida aún cuando no la haya en la entrada; a este fenómeno se le denomina *ruido del amplificador*. Algunos casos de ruido son familiares a la mayoría de nosotros. En caso de recepción de pequeñas tensiones, tales como las señales débiles de radio o televisión puede ocurrir que sea imposible distinguirlas del ruido de fondo. El término *ruido* proviene de que, en ausencia de señal de entrada, la salida al altavoz de un amplificador de audio con el control de ganancia puesto al máximo deja oír un chasquido o soprido. En el caso de un amplificador de vídeo, suele emplearse la palabra nieve en lugar de ruido, debido a la aparición de una imagen parecida a la nieve en la pantalla de televisión cuando se sintoniza a una señal muy débil.

En la figura 18 se puede observar los efectos del ruido sobre una señal.

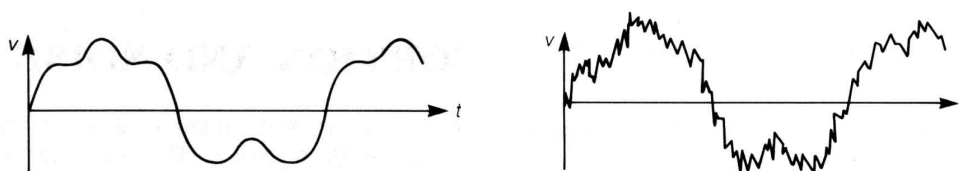
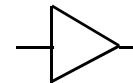


Fig. 18: Efecto del ruido sobre una señal

El ruido eléctrico es toda señal de tensión o corriente no deseada o espuria que aparece en un circuito. En general el ruido es de dos tipos: el que se genera internamente en el sistema electrónico (propio del transductor o del amplificador) y el que es generado por fuentes externas y es introducido en el sistema por acoplamiento ya sea por acoplamiento electrostático o electromagnético.

El ruido generado externamente es denominado generalmente *interferencia*. Para reducir estos problemas se usan conexiones con cables blindados, por ejemplo cables coaxiales, así como blindajes metálicos.

Vamos a considerar ahora las diversas causas internas que pueden generar ruidos.

**Ruido térmico o de Johnson.** Los electrones de un conductor poseen distintos valores de energía debido a la temperatura del conductor. Las ligeras fluctuaciones de energía en torno a los valores de la distribución más probable son muy pequeñas, pero suficientes para producir pequeños potenciales de ruido dentro del conductor. Estas fluctuaciones fortuitas producidas por la agitación térmica de los electrones, se denominan ruido *térmico* o *de Johnson*.

Es posible demostrar que la potencia de ruido  $P_n$  disipada en una resistencia  $R$  ( $\Omega$ ) es:

$$P_n = 4kTB$$

siendo  $k$  = constante de Boltzmann,  $J/^{\circ}K$

$T$  = temperatura de la resistencia,  $^{\circ}K$

$B = f_H - f_L$  = anchura de banda, Hz

Podemos expresar  $P_n$  como:

$$P_n = V_n^2/R$$

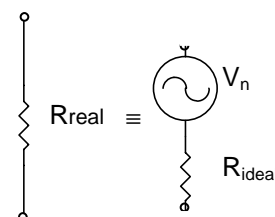
Por lo tanto el valor eficaz de la tensión de ruido  $V_n$  sobre la resistencia  $R$  está dado por:

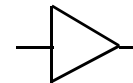
$$V_n = (4kTRB)^{1/2} \quad (12-51)$$

Por lo tanto se puede modelar un resistor real como un circuito equivalente constituido por una resistencia ideal del mismo valor ohmico del resistor, en serie con un generador de tensión de valor  $V_n$ , como se muestra en la figura.

Debe tenerse en cuenta que la misma potencia de ruido existirá en un ancho de banda dado independientemente de cual sea la frecuencia central. Tal distribución, que da el mismo ruido por unidad de anchura de banda en cualquier lugar del espectro, se denomina *ruido blanco* y el espectro de componentes va desde corriente continua a  $10^{13}$  Hz.

Si el conductor que estamos considerando es el resistor de entrada de un amplificador ideal (sin ruido), la tensión de ruido a la entrada del amplificador vendrá dada por la ecuación anterior. Se obtiene una idea del orden de magnitud de la tensión que entra en juego, calculando la tensión de ruido generada en una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  a la temperatura ambiente con ancho de banda de  $10\text{ kHz}$ . Obtendremos para  $V_n$  el valor de  $13\text{ }\mu\text{V}$ . Naturalmente, si la anchura de banda del amplificador es grande, la resistencia de entrada debe ser menor, pues de lo contrario tendríamos excesivo ruido. Por lo tanto, si el amplificador que consideramos es de  $10\text{ MHz}$  de anchura, su resistencia de entrada no puede exceder de  $1000\text{ }\Omega$  si el ruido no debe rebasar el del amplificador de audio de  $10\text{ kHz}$ .





Resulta entonces evidente que la banda de paso de un amplificador debe ser lo más estrecha posible (sin introducir excesiva distorsión de frecuencia), ya que la potencia del ruido es directamente proporcional a la anchura de banda.

**Efecto Shot o Schottky.** El ruido de Schottky se atribuye a la naturaleza discreta de los portadores de corriente en los semiconductores. Normalmente, se supone que la corriente continua en los componentes que integran un amplificador – transistor, FET etc-es constante en todo instante. Sin embargo, la corriente está constituida por un flujo discreto de electrones individuales o huecos, y solamente es constante el flujo medio. La fluctuación instantánea en el número de portadores se denomina *efecto Schottky*. El valor cuadrático medio de la corriente de ruido en un elemento será:

$$I_n = (2q I_{dc} B)^{1/2} \quad (12-53)$$

Donde:  $q$  = carga de un electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  coulombs )

$I_{dc}$  = corriente continua

$B$  = anchura de banda

Si la resistencia de carga es  $R_L$ , aparecerá una tensión de ruido de valor  $I_n R_L$  a sobre la carga.

Como en el ruido térmico la magnitud del ruido shot crece con el ancho de banda del sistema de medida y ambos son de naturaleza Gaussiana y ruido blanco. Como el ruido *Schottky* crece con la raíz cuadrada del valor medio de la corriente, el cantidad relativo a de ruido decrece con el incremento de la corriente continua. Para ilustrar este efecto consideremos el ruido shot asociado con una corriente que fluye en un circuito con un ancho de banda de 20 kHz. Para una corriente de 1 A, el ruido eficaz es de 80nA, o el 0.000008% de la corriente media. Con una corriente de 1μA el ruido es de 80 pA y representa el 0.008% de la corriente media. Una corriente de 1pA produce un ruido de aproximadamente 8%.

### Ruido 1/f

También llamado centelleo o ruido en exceso es un ruido que predomina en bajas frecuencias . su valor eficaz sobre un limitado rango de frecuencias es proporcional a  $\sqrt{\Delta f/f}$  . Por lo tanto no se trata de un ruido blanco ya que su densidad espectral se incrementa a medida que disminuye la frecuencia por ello también se lo conoce como *ruido rosado*..

El ruido 1/f está presente en los dispositivos activos tales como transistores y FET no estando bien conocida la naturaleza del fenómeno.

### Relación señal- ruido

Frecuentemente se usa un método cuantitativo para describir la magnitud de una señal en términos del ruido que contiene. Esto se consigue midiendo la *relación señal-ruido* ( **S/N** ) comúnmente expresada como el cociente entre la potencia de la señal  $P_s$  y la potencia del ruido  $P_n$  y generalmente se expresa en dB. Por definición la *relación señal-ruido* es:

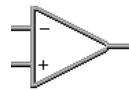
$$S/N = 10 \log_{10} (P_s/P_n) \quad (\text{dB})$$

Si ambas la señal y el ruido están presentes en un mismo punto del circuito, están aplicadas sobre una misma impedancia y la relación puede ser expresada como la relación de las tensiones eficaces de la señal  $V_s$  y del ruido  $V_n$ .

$$S/N = 20 \log_{10} ( V_s/V_n ) \quad (\text{dB})$$

La relación señal-ruido, para un dado sistema, varía con la amplitud de la señal.

Si la señal es muy pequeña, la magnitud relativa del ruido se incrementa y la relación señal-ruido se vuelve menor. Por debajo de un cierto valor la señal es indistinguible del ruido, por lo tanto la información que transporta deja de ser útil. El valor optimo de la relación señal-ruido depende del tipo de señal que se trate.



# AMPLIFICADORES

## Introducción

Los amplificadores constituyen sin duda uno de los dispositivos electrónicos activos más importantes. Hay una gran variedad de amplificadores, muchos de ellos diseñados especialmente para una determinada aplicación, pero los de mayor importancia son aquellos de uso general conocidos como Amplificadores Operacionales. Son circuitos integrados frecuentemente utilizados en el procesamiento de señales cuya función es amplificar una señal. La amplificación surge de la necesidad de poder adaptar y procesar señales de pequeña amplitud a sistemas de medida o registro.

La amplificación debe realizarla un dispositivo que sea *lineal* para que la señal de salida sea una copia fiel de la de entrada pero agrandada. Si lo anterior no se cumple decimos que el amplificador introduce *distorsión no lineal*.

## SÍMBOLO DE UN AMPLIFICADOR

Un amplificador tiene terminales de entrada y salida, hablamos de que posee dos puertos: uno de entrada y otro de salida tal como se muestra en la Fig. 1 donde el triángulo esquematiza el circuito amplificador e indica la dirección de la señal.

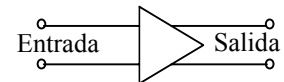


Fig. 1: Símbolo de un amplificador

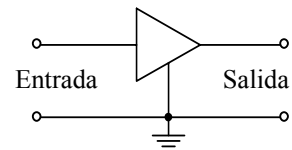


Fig. 2: Amp. Con terminal de entrada y de salida común

La Fig. 2 muestra el caso muy frecuente en que uno de los terminales de entrada es común con uno de salida. Este terminal común es la referencia y la denominamos *tierra del circuito*.

Para que el amplificador pueda entregar una señal de salida mayor que la de entrada, el mismo debe ser alimentado por una fuente de tensión externa para su operación. Debido a ello se los denomina circuitos activos, en contraposición con los resistores y diodos que son elementos pasivos por no requerir de fuentes externas para su funcionamiento.

En la Fig. 3 se muestran las baterías que alimentan al amplificador,  $+V_{CC}$  y  $-V_{CC}$  típicamente 15V y -15V. Las tensiones positivas y negativas son necesarias para permitir obtener señales de salida tanto positivas como negativas. La Fig. 2 muestra la forma simplificada habitual de representar un amplificador sobreentendiéndose que está alimentado adecuadamente.

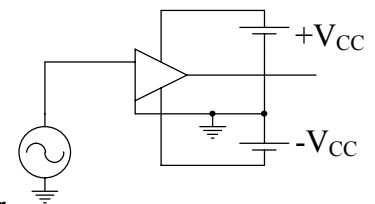


Fig. 3: Amplificador con fuentes alimentación explícitas

## GANANCIA DE UN AMPLIFICADOR

Un amplificador puede amplificar tensión, corriente o potencia a expensas de las fuentes de alimentación. Depende cuál sea la señal de nuestro interés. Existen varios tipos de amplificadores, pero nuestra atención la centraremos en los *amplificadores de tensión*.

Un amplificador *lineal* de tensión acepta una señal de entrada  $v_i(t)$  y proporciona a la salida una señal  $v_o(t)$ , sobre los terminales de la resistencia de carga  $R_L$ , que es una réplica ampliada de la señal de entrada  $v_i(t)$ . Ver Fig. 4 a).

La ganancia de tensión de un amplificador está definida como:

$$\text{Ganancia de tensión } A(v) \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

La ganancia de tensión la podemos determinar a partir de la *curva característica* del amplificador (Fig. 4 b) determinando la pendiente de dicha curva.

## SATURACIÓN DE UN AMPLIFICADOR

En la práctica, la curva característica de transferencia del amplificador es solo lineal en un cierto intervalo que está limitado por la tensión de salida y por la señal de entrada. La tensión de salida no puede ir más allá de las tensiones de las fuentes de alimentación.

La curva de transferencia teniendo en cuenta los límites de saturación positivo  $L+$  y negativo  $L-$  se muestra en la Fig. 5. Los niveles de saturación están unos 2 volts por debajo de las fuentes de alimentación. En la figura se ilustra la

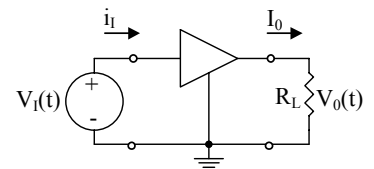


Fig. 4 - a): Amplificador de tensión

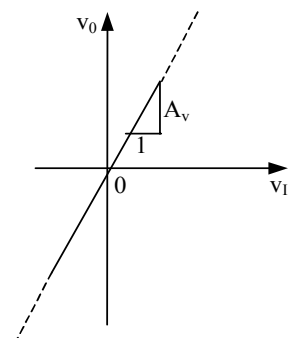


Fig. 4 b): Característica de transferencia con ganancia  $A_v$

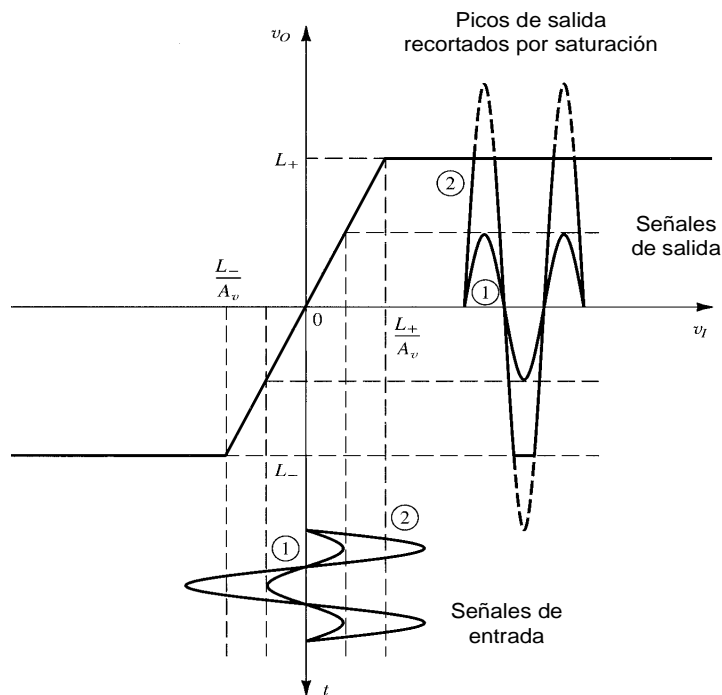
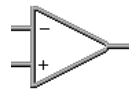


Fig. 5: Amplificador es lineal salvo en zona de saturación

entrada de dos señales que proyectadas sobre la curva de transferencia nos permiten obtener las correspondientes señales de salida. Como la tensión pico a pico de la señal (2) supera los límites de la zona lineal de transferencia, es recortada debido a la saturación del amplificador, cosa que no ocurre con la señal (1).

Téngase en cuenta que para mayor claridad en la Fig. 5 no se muestran las escalas de  $v_i$  y  $v_o$ , correspondiendo la primera a tensiones mucho menores que la de  $v_o$ .

Resumiendo, para que el amplificador opere como dispositivo lineal se deben satisfacer dos condiciones:

- La tensión de entrada debe operar entre las tensiones de polarización

$$-(V_{cc}-2)/A_v \leq v_1 - v_2 \leq +(V_{cc}-2)/A_v$$

- Para que no se recorte la señal de salida la tensión  $v_o$  se debe restringir a:

$$-(V_{cc}-2) \leq v_o \leq +(V_{cc}-2)$$

## MODELO DE CIRCUITO DE UN AMPLIFICADOR

Para el estudio de los amplificadores, siguiendo con la filosofía adoptada para este curso, los trataremos como un bloque independientemente de la complejidad interna del dispositivo. No obstante ello, necesitamos un *modelo* del amplificador, que como elemento de un sistema nos permita analizar el comportamiento de un circuito. Los valores de los parámetros de los componentes del *modelo* se pueden determinar por el análisis del circuito del amplificador o por mediciones en los terminales de entrada y salida.

Un modelo elemental o una primera aproximación del amplificador, es suponer que es un elemento de circuito ideal. En la Fig.6 se muestra el circuito equivalente. El modelo consiste en una impedancia de entrada  $R_i$  conectada entre los dos terminales de entrada, que tiene en cuenta la corriente de entrada. La salida está constituida por una fuente de tensión controlada por la tensión de entrada afectada por la ganancia  $A_v$ , en serie con ella está la resistencia de salida  $R_o$  conectada al terminal de salida que tiene en cuenta la caída de tensión interna cuando se conecta una carga  $R_L$ .

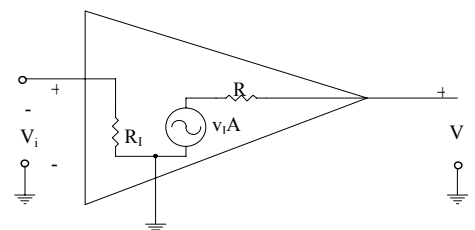
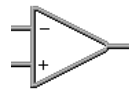


Fig. 6: modelo de un amplificador de tensión

## RESPUESTA EN FRECUENCIA Y ANCHO DE BANDA

Cualquiera sea la forma de onda de una señal eléctrica, la podemos representar como la suma de una serie de ondas senoidales. Una característica impor-



tante del amplificador que la debe amplificar, es la respuesta del mismo a senoides de entrada de distintas frecuencias, característica que se conoce como *respuesta en frecuencia* de un amplificador.

Si a la entrada de un amplificador lineal aplicamos una señal senoidal, a la salida del mismo tendremos una señal senoidal de la misma frecuencia  $\omega$ , generalmente de amplitud diferente debido a la ganancia del amplificador y tendrá un corrimiento de fase  $\phi$  con respecto a la entrada que en general no será igual para distintas frecuencias.

El comportamiento del amplificador, en lo que a respuesta de frecuencia se refiere, conocido como *función de transferencia*  $T(\omega)$ , queda completamente definido por medio de la *respuesta en amplitud* y *respuesta en fase* a las que lo podemos expresar matemáticamente como:

$$\text{Respuesta en amplitud} \quad |T(\omega)| = \frac{V_o}{V_i}$$

$$\text{Respuesta en fase} \quad \angle T(\omega) = \phi$$

En la Fig. 7 se muestra la respuesta en amplitud de un amplificador. Se puede observar que la ganancia se mantiene constante en una amplia zona de frecuencias para luego disminuir hacia las bajas y altas frecuencias. En la figura se han señalado dos frecuencias particulares  $\omega_1$  y  $\omega_2$  donde la amplificación ha disminuido 3dB respecto de la parte plana. La diferencia entre los valores de dichas frecuencias se llama *ancho de banda* del amplificador. Las frecuencias  $f_2$  y  $f_1$  se denominan frecuencia cuadrantal superior y frecuencia cuadrantal inferior respectivamente.

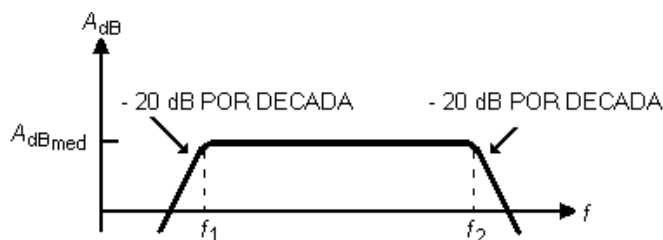


Fig. 7: Respuesta de amplitud típica de un amplificador

La señal a amplificar debe tener componentes de frecuencias comprendidas dentro de dichos límites, caso contrario el amplificador *distorsionaría* ya que no todas las componentes de la señal de entrada son amplificadas por el mismo factor.

## RAPIDEZ DE RESPUESTA

Aún cuando un amplificador sea lineal puede causar *distorsión* no lineal, es decir cambiar la forma de onda de la señal de salida respecto de la entrada, cuando se requieren grandes variaciones en la tensión de salida. Ello se debe a que está limitada la rapidez de la salida a un valor máximo que depende de cada amplificador. Este parámetro se conoce como rapidez de respuesta (slew rate **SR**) del amplificador y está definido por:

$$SR = \frac{dV_o}{dt}$$

La idea se ilustra en la Fig. 8, si a un amplificador se le aplica un escalón de tensión de entrada, si el amplificador fuera perfecto, respondería como está indicado en lugar de ello la salida aumenta exponencialmente. La pendiente de la exponencial es la rapidez de respuesta cuya unidad usual es V/  $\mu$ s.

Podemos encontrar como el SR limita a una señal senoidal.

Si aplicamos una señal de entrada

$$v_i = V_i \sin \omega t$$

La rapidez de cambio está dada por  $\frac{dv_i}{dt} = SR = \omega V_i \cos \omega$



Fig. 8 a): Rapidez de res-

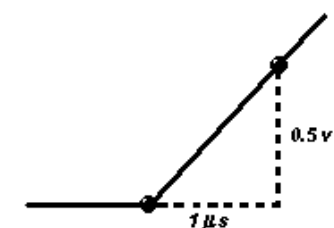
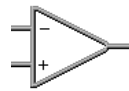


Fig. 8 b) Determinación de SR





Que tiene un valor máximo  $\omega V_i$

Luego la frecuencia máxima de la señal admitida por el amplificador para que no exista distorsión debida al SR, es:

$$f_{\max.} = \frac{SR}{2\pi V_{\max.}}$$

En la Fig. 9 se muestra el efecto de limitación de la rapidez de respuesta en una onda senoidal a la salida de un amplificador.

## AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional (*operational amplifier* u OA u *op amp*) fue diseñado para realizar operaciones matemáticas muy importantes dentro de la computación analógica de los años 40.

A pesar que su función en general ha sido sustituida por cálculos realizados por las computadoras digitales, los OA tienen gran aplicación en electrónica analógica sobre todo desde que están disponibles como componentes integrados.

Los OA integrados están contruidos con varias etapas de transistores, conformando complejas configuraciones de las que dependen sus prestaciones.

El OA es un amplificador de tensión lineal de cc y alta ganancia, es decir la tensión de salida es proporcional a la de entrada. La ganancia de c.c. típica está entre  $10^5$  y  $10^7$ . Dicha ganancia es muy grande para las aplicaciones prácticas, por lo que se usa realimentación para obtener una función específica de transferencia y controlar la estabilidad.

Veamos algunas definiciones de términos que usaremos:

- **Realimentación negativa**

Se conecta la salida con el terminal de entrada negativo, usualmente por medio de un resistor, formando el lazo de realimentación.

- **Ganancia a lazo abierto,  $A_v$ :**

La ganancia de tensión sin realimentación

- **Ganancia a lazo cerrado,  $G$**

La ganancia de tensión con realimentación negativa.

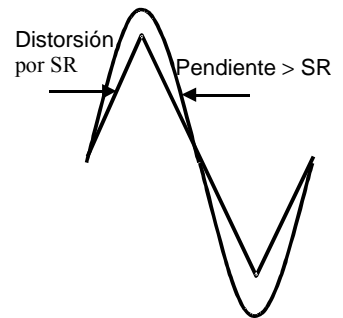
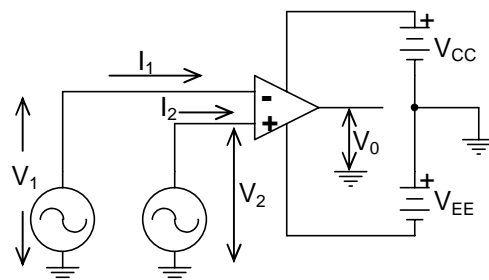


Fig. 9: Efecto de la limitación de rapidez de respuesta.

## AMPLIFICADOR A LAZO ABIERTO

La Fig. 10 muestra un diagrama completo de un amplificador operacional. El OA posee como mínimo dos terminales de entrada, uno de salida y los nece-

Fig. 10: Símbolo de un Amp. Op con alimentación



sarios para la alimentación. La entrada  $V_1$  se denomina *inversora* y se simboliza con el signo -; mientras que  $V_2$  se denomina entrada *no-inversora* y se indica con +. Que la entrada sea inversora significa que la señal de salida está  $180^\circ$  fuera de fase respecto de la de entrada, mientras en la no inversora la señal está en fase con la salida. Se muestran las baterías que alimentan al OA,  $+V_{cc}$  y  $-V_{cc}$ . Es importante observar que la referencia de tierra en el OA es el terminal común de las dos fuentes de alimentación.

La Fig.11 muestra la forma simplificada habitual de representar un OA donde sobreentiende que está alimentado adecuadamente.

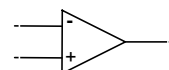
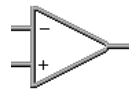


Fig.11 Representación común de un OA

El amplificador operacional está diseñado para que la salida sea una señal amplificada de la diferencia de tensión aplicada entre las dos entradas, por lo tanto la tensión a la salida del OA es:

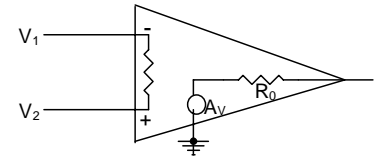


$$V_o = A_v (V_1 - V_2)$$

Donde  $A_v$  es la ganancia de tensión del OP

Téngase en cuenta que las tensiones de entrada  $V_1$  y  $V_2$  están referidas a tierra y que la salida del Amp. Op. Depende únicamente de la diferencia entre las tensiones de entrada en otras palabras es un amplificador diferencial.

En la Fig.12 se muestra el circuito equivalente o el modelo muy simplificado del Amp. Op.



Fig, 12 Circuito Equivalente del Amp - Op

## AMP. OP. IDEAL

Para simplificar los cálculos y por ser una buena aproximación para muchos casos suponemos que el amplificador ideal tiene las siguientes características:

- Ganancia a lazo abierto  $A_v \rightarrow$  infinita
- Impedancia de entrada  $R_D \rightarrow$  infinita
- Impedancia de salida  $R_O \rightarrow$  cero
- Ancho de banda  $\rightarrow$  infinito (respuesta a frecuencia infinita)
- $v_o = 0$  cuando  $v_1 = v_2$  (no hay tensión de offset)
- Función transferencia inversa  $\rightarrow$  cero

Si lo anterior se cumple, podemos obtener dos consecuencias muy importantes para analizar circuitos con Amp. Op., que las resumimos en:

### Regla 1.- Las tensiones de las dos entradas son iguales.

Como  $A_v = v_o / v_i$  luego  $v_1 - v_2 = v_o / A_v$ . Como  $v_o$  es finito y  $A_v$  infinito luego

$$v_1 - v_2 = 0 \quad \text{y} \quad v_1 = v_2$$

### Regla 2.- Las corrientes de entrada son cero

Siendo  $R_D$  la impedancia diferencial entre las dos entradas infinita y los potenciales

$v_1 = v_2$  la corriente de entrada será cero.

Para que dichas reglas sean aplicables se requiere que Amp. Op. esté realimentado negativamente.

## CIRCUITOS BÁSICOS CON AMP. OP.

En lo que sigue supondremos que el Amp. Op. es ideal y veremos una serie de circuitos de mucha utilidad. En muchos casos se puede encontrar el amplificador real con parámetros suficientemente próximos a los ideales, para una dada aplicación, que se pueden calcular con los postulados del amplificador ideal.

### AMPLIFICADOR INVERSOR

En la Fig.13 se muestra el circuito de un amplificador inversor. La realimentación provista por la impedancia  $R_2$  confiere al circuito características importantes como son el incremento del ancho de banda y una baja resistencia de salida.

La ganancia de tensión del circuito es fácil de calcular.

Estando la entrada no inversora al potencial de tierra 0 V, por la Regla 1 la entrada inversora estará también a 0V. Por ello se dice que esta entrada es una tierra virtual.

La ley de Kirchhoff establece que la suma de las corrientes entrantes y salientes de un nodo debe ser cero. Por la regla 2 no fluye corriente por la entrada del amplificador, luego:

$$i_i + i_2 = 0 \quad \text{y}$$

$$i_i = - i_2 \quad (1)$$

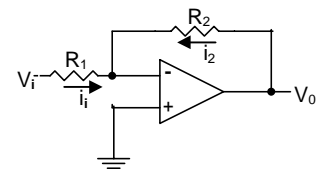
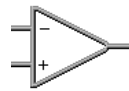


Fig.13 Amp. Inversor



Como la entrada inversora está al potencial de tierra (0V) lo están los extremos de los resistores conectados a ella, luego  $i_1 = v_i / R_1$  e  $i_2 = v_o / R_2$  sustituyendo en (1)

$$v_i / R_1 = - v_o / R_2 \Rightarrow v_o / v_i = A_v = - R_2 / R_1$$

Por lo tanto el circuito invierte la señal de entrada y la ganancia está dada por la relación de las resistencias externas  $R_2 / R_1$  independientemente del amplificador. El término inversor es debido al signo negativo de esta expresión que indica un desfase de  $180^\circ$  entre la entrada y salida.

La impedancia de entrada del amplificador inversor es baja. Ya que la entrada inversora está a tierra virtual la impedancia de entrada al amplificador, donde se aplica la señal, es  $R_1$ . Incrementando  $R_1$  se incrementa la impedancia pero decrece la ganancia. Aumentar  $R_2$  para mantener la ganancia tiene un límite práctico.

### AMPLIFICADOR NO-INVERSOR

En la Fig.14 se muestra otro circuito básico con Amp. Op., el amplificador no-inversor. Por la regla 1, la entrada inversora se encuentra al mismo potencial que la no inversora, es decir  $v_i$ . Por la regla 2 toda la corriente  $i_2$  circula por  $R_1$  ya que no hay corriente de entrada en el Amp. Op. Los resistores  $R_2$  y  $R_1$  forman un divisor de tensión donde

$$v_i = v_o R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$v_o / v_i = R_1 + R_2 / R_1 = 1 + R_2 / R_1 \Rightarrow A_v = 1 + R_2 / R_1$$

El amplificador no-inversor tiene siempre ganancia mayor o igual a uno y las señales de entrada y salida están en fase. La impedancia de entrada es infinita, si se trata de un amplificador real depende de sus características.

### AMPLIFICADOR SEGUIDOR.

En el amplificador no-inversor si hacemos  $R_1$  infinito y  $R_2$  igual a cero, el circuito se reduce al de la Fig.15 Dada la Regla 1 la señal de entrada también está presente en la entrada inversora y como el potencial en ésta es el mismo de salida ya que están conectadas directamente  $v_i = v_o$  y la salida sigue a la tensión de entrada, tenemos un amplificador de ganancia 1.

La importancia que tiene este tipo de amplificador, está dada por su característica de conversión de impedancia o como amplificador separador (buffer), ya que presenta muy alta impedancia de entrada y baja de salida. Este amplificador aísla un circuito de los efectos de carga de la etapa siguiente.

### OPERACIONES MATEMÁTICAS

Con los Amp. Op. se pueden realizar operaciones matemáticas y computacionales. No obstante la tendencia es usar el procesamiento digital de las señales dada su flexibilidad y la eliminación de circuitería. El procesamiento analógico de señales tiene ventajas cuando el digital requiere mucho tiempo, dada la velocidad de los nuevos procesadores se restringe cada vez más el procesamiento analógico.

Dado el objetivo del curso restringiremos las aplicaciones de los Amp. Op. a unos pocos ejemplos más que se estima pueden ser de utilidad en el transcurso del mismo.

### AMPLIFICADOR SUMADOR

El amplificador inversor puede sumar varias entradas de tensión. Cada entrada se conecta al terminal inversor por medio de un resistor cuyo valor determina el peso que dicha señal tendrá en la suma.

En la Fig.16 se muestra un amplificador sumador básico. El terminal inversor es una tierra virtual y la corriente que fluye en la entrada del Amp.Op es cero. Luego:

$$i_r = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

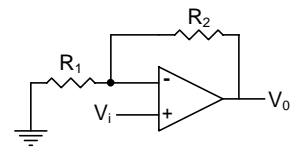


Fig 14 Amp. no inversor

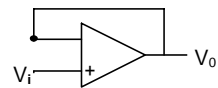


Fig.15 Amp. Seguidor

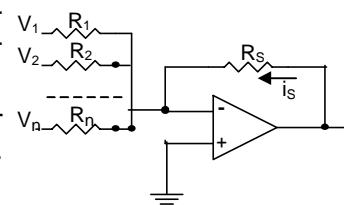
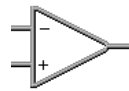


Fig.16 Sumador



$$y \quad i_1 = v_1 / R_1, \quad i_2 = v_2 / R_2, \dots, \quad i_n = v_n / R_n$$

Si la entrada inversora está a potencial cero  $v_o = -i_r / R_r$ , por sustitución

$$v_o = -R_r (v_1 / R_1 + v_2 / R_2 + \dots + v_n / R_n)$$

El resistor  $R_r$  determina la ganancia de todo el circuito; y  $R_1, R_2, \dots, R_n$  determina el factor de peso y la impedancia de cada entrada.

## INTEGRADOR

El integrador es un circuito que entrega una tensión de salida proporcional a la integral de la señal de entrada. En la Fig.17 se muestra el circuito. El capacitor se encuentra conectado entre la salida y la entrada inversora que es una tierra virtual; por lo tanto la tensión del capacitor es la misma que la de salida. No se puede describir la salida del integrador con una simple relación algebraica dado que para una tensión fija de entrada, la salida cambiará a una velocidad que depende de  $v_i, R$ , y  $C$ . Además se debe saber cuanto tiempo se aplica la tensión de entrada para determinar el valor de la salida  $v_o$ .

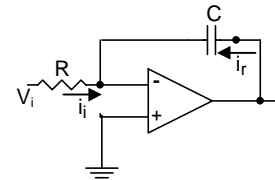


Fig. 17 Integrador

La relación que existe entre la tensión y corriente a través de un capacitor es

$$I = C \, dV/dt \Rightarrow i_r = C \, dv_o / dt$$

Al ser la entrada inversora una tierra virtual

$$i_i = v_i / R$$

Como  $i_i = -i_r$  luego

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} v_i dt + v_{ic}$$

Esto muestra que la salida  $v_o$  es igual al valor invertido de la integral de la señal de entrada sobre el tiempo transcurrido entre 0 y  $t_1$  escalado por el factor  $1/RC$ . La tensión  $v_{ic}$  es la carga inicial del capacitor.

## DIFERENCIADOR

El diferenciador entrega una tensión de salida proporcional a la velocidad de cambio de la señal de entrada. La Fig.18 muestra el circuito. La corriente a través del capacitor es

$$i_i = C \, (dv_i / dt)$$

como  $i_i = -i_r$  tenemos

$$v_o = -RC \, dv_i / dt$$

## AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Veamos algunas definiciones de términos que usaremos antes de tratar este tipo de amplificadores:

**tensión de entrada en modo diferencial ( $V_d$ ):**

$$V_D = V_2 - V_1$$

**tensión de entrada en modo común ( $V_c$ ):**

$$V_c = \frac{V_2 - V_1}{2}$$

Una configuración muy importante con Amp. Op. es el amplificador diferencial: una combinación de amplificador inversor y no-inversor con características particulares.

En la fig.19 se muestra un esquema básico. Por la regla 2 no circula corriente en las entradas del Amp.Op., por lo tanto la corriente debida a  $v_2$  solo circula por  $R_1$  y  $R_2$  a tierra, siendo la tensión  $v_3$  en la entrada no-inversora igual a:

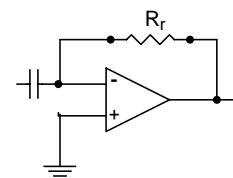


Fig. 18 Diferenciador

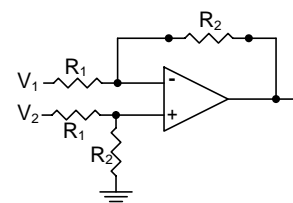
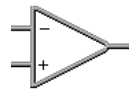


Fig. 19 Amp. Diferencial



$$v_3 = R_2 v_2 / R_1 + R_2 \quad (1)$$

Como las tensiones en ambas entradas son iguales, regla 1, podemos encontrar la corriente en las resistencias de la parte inversora

$$i = v_1 - v_3 / R_1 = v_3 - v_o / R_2 \quad (2)$$

sustituyendo (1) en (2)

$$v_o = (v_2 - v_1) R_2 / R_1 \quad (3)$$

La **ganancia diferencial** será:

$$A_D = v_o / (v_2 - v_1) = R_2 / R_1$$

La ecuación anterior muestra que en un amplificador diferencial si conectamos ambas entradas a un mismo generador, es decir, aplicamos una tensión de **modo común** a ambas entradas ( $v_1 = v_2$ ) la salida  $v_o = 0$ .

La **ganancia de modo común**  $A_C$  en un amplificador diferencial ideal es cero.

Si  $v_1 \neq v_2$  la salida del amplificador diferencial será:

$$v_o = A_D (v_2 - v_1) = (v_2 - v_1) (R_2 / R_1)$$

En la práctica el amplificador diferencial no es perfecto, tiene una ganancia de modo diferencial ( $A_{MC}$ ) distinta de cero. Decimos que el rechazo de modo común no es total por lo tanto la ganancia de un amplificador real es:

$$V_o = A_D V_d + A_C V_c$$

Una medida de la habilidad del amplificador diferencial de rechazar el modo común es el denominado "relación de rechazo de modo común" CMRR (common-mode rejection ratio)

$$CMRR = A_D / A_{MC}$$

La CMRR comúnmente se expresa en dB.

## LIMITACIONES DEL AMP. OP. REAL

El OA real tiene unas limitaciones y especificaciones que pueden ser importantes en algunas aplicaciones.

En este apartado se presentan las limitaciones más importantes que presentan en c.c., transitorio y frecuencia propias de los Amp. Op.

### Tensiones y corrientes "off-set" de entrada

Un Amp. Op. debe tener 0V a su salida cuando la entrada vale 0V. Sin embargo, en amplificadores reales no es cierto y aparece una tensión de salida en ausencia de señal de entrada. Este efecto es debido a las asimetrías de la etapa diferencial y a las corrientes de entrada. Este comportamiento se tiene en cuenta a través de los siguientes parámetros: tensión *off-set* de entrada o VOS (*input offset voltage*), corriente *offset* de entrada IOS (*input offset current*) y corriente de polarización de entrada IB (*input bias current*) que agregan elementos al modelo de Amp. Op. ideal.

La tensión *off-set* de entrada es la tensión necesaria que se debe aplicar a la entrada para que la tensión de salida sea 0 V.

Las técnicas más utilizadas para la cancelación de VOS se basan en aplicar una tensión de entrada determinada y ajustable a través de un potenciómetro externo conectado a la alimentación del Amp. Op. que permite obtener la salida a 0 en ausencia de señal y anular los efectos de *offset*.

Existen muchos Amp. Op. que disponen de dos salidas denominadas *offset null* en donde se conecta un potenciómetro que permite la eliminación del *offset* (Fig.20).

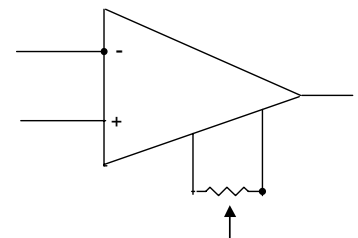
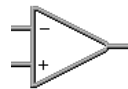


Fig.20 Corrección del "offset"



La corriente offset de entrada  $I_{OS}$  y la corriente de polarización de entrada  $I_B$  se definen a partir de las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  de entrada del Amp. Op. como:

$$I_{OS} = I_2 - I_1 \quad \text{e} \quad I_B = (I_1 + I_2) / 2$$

Existen versiones de Amp. Op. que reducen al mínimo estos parámetros aunque a veces implique degradar otros aspectos y encarecer su precio.

### Parámetros de frecuencia

Los OA son diseñados para tener alta ganancia con un ancho de banda elevado, características que les hacen ser inestables con tendencia a la oscilación. Para asegurar estabilidad en su operación es preciso utilizar técnicas de compensación internas y/o externas que limitan su operación.

En la Fig. 21 se muestra la respuesta en frecuencia de un Amp. Op. compensado típico. En el caso ilustrado la frecuencia de corte superior ( $f_b$ ). A la frecuencia en la cual la ganancia tiene el valor 1 se denomina *ancho de banda de ganancia unidad* o  $f_t$ .

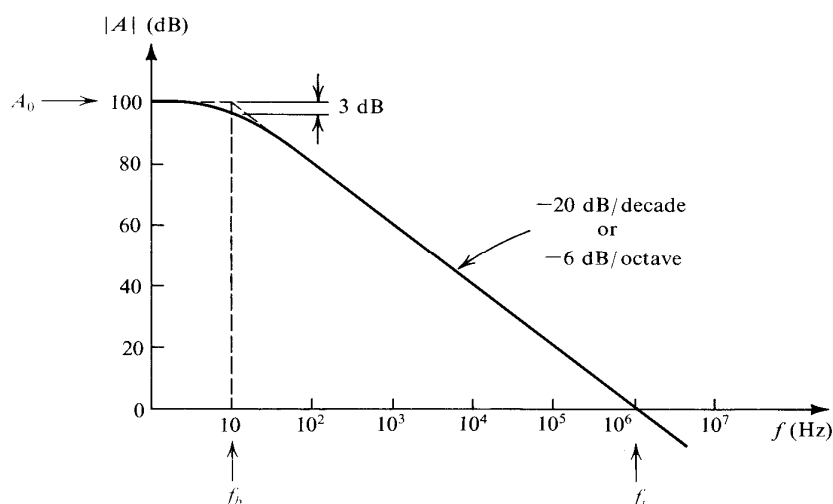


Fig. 21 Ganancia a lazo abierto de un Amp. Op. típico compensado internamente

Una relación importante que verifica en el Amp. Op. es:

$$A_{OL} \cdot f_c = A \cdot f = ft$$

Esta ecuación demuestra que a la frecuencia de ganancia unidad también puede ser denominada producto ganancia-ancho de banda del Amp. Op.

La relación anterior indica que el ancho de banda aumenta en la misma proporción que disminuye su ganancia, siendo el producto de ambas una constante igual a la frecuencia  $ft$ .

### Slew-Rate

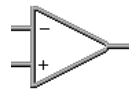
Otro parámetro que refleja la habilidad del Amp. Op. para manejar señales que varían en el tiempo, es el *slew-rate* (SR) definido como la máxima variación de la tensión de salida con el tiempo que puede proporcionar salida del Amp. Op.; se mide en  $V/\mu s$  y se expresa como:

$$SR = \Delta V_0 / \Delta t \quad (V / \mu s)$$

Si se pretende variar la tensión de salida con una velocidad de variación mayor que el SR se producirá una distorsión o recorte de esa señal y el Amp. Op. perdería su linealidad.

### Otros parámetros del Amp. Op.

- Rango de tensión de entrada o *input voltage range*. Máxima diferencia de tensión a la entrada del Amp. Op.
- Máxima variación de rango de tensión de salida o *maximum peak output voltage swing*. Indica para una dada tensión de alimentación, el valor de tensión más alta que se puede esperar a la salida del Amp. Op., generalmente un par de volts menor que la de alimentación.



- Resistencia y capacidad de entrada o *input resistance and capacitance*. Resistencia y capacidad equivalente en lazo abierto vista a través de los terminales de entrada.
- Resistencia de salida o *output resistance*.
- Consumo de potencia o *total power dissipation*. Consumo de potencia DC en ausencia de señal y para una tensión de alimentación especificada.
- Máxima corriente de salida o *output short circuit current*. Corriente máxima de salida limitada por el circuito de protección.
- Variación máxima de la tensión de salida o *output voltage swing*. Es la amplitud pico-pico máxima que se puede conseguir sin que se produzca recorte.

## AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

Un amplificador de instrumentación (Amp. In.) posee dos entradas y una salida. Se distingue del Amp. Op. en que tiene ganancia finita (entre 1 y 1000 V/V), y la habilidad que ambas entradas puede conectarse a fuentes de señal. Ello significa que los componentes de realimentación, no se conectan a las entradas de señal sino en otras partes. Su principal función es de comportarse como un amplificador diferencial de altas prestaciones. Idealmente responde solo a la diferencia de potencial que se aplica entre las entradas y la ganancia de modo común debería ser cero.

Un circuito amplificador que esté optimizado para que se comporte como un Amp. In. deberá tener alta impedancia de entrada, bajo corrimiento, baja deriva térmica, alta linealidad, ganancia estable y una impedancia efectiva de salida baja.

Ejemplos de aplicación que capitalizan estas ventajas, y difíciles de resolver con un único amplificador operacional, incluyen interfases con termocuplas, puentes con galgas de deformación (strain gage), sensores biológicos; preamplificadores de pequeñas señales diferenciales superpuesta con grandes tensiones de modo común.

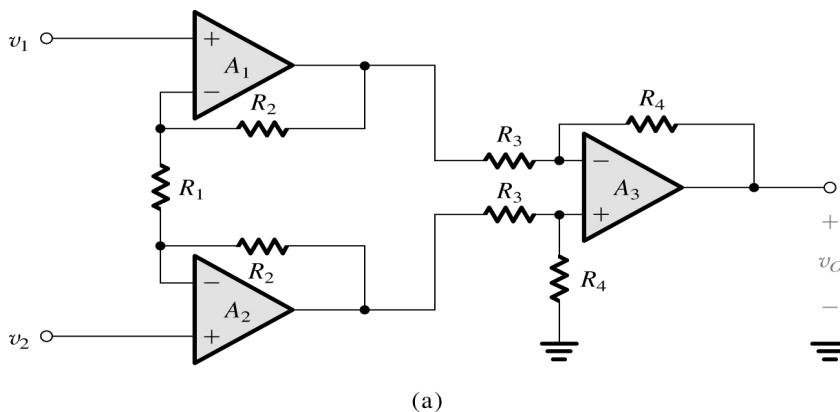


Fig.22 Circuito clásico de un amplificador de instrumentación

En la Fig. 22 se muestra un Amp. In. clásico construido en base a tres amplificadores operacionales. La tensión que hay sobre  $R_a$  es igual a la diferencia de potencial entre los terminales de entrada. Esto nos dice que la corriente en la misma es  $i = \Delta V / R_a$ . Las salidas de los amplificadores operacionales  $U_1$  y  $U_2$  son iguales entre sí pero opuestas en fase. Por lo tanto la etapa de entrada (constituida por  $U_1$  y  $U_2$ ) tiene entrada y salida diferencial. La segunda etapa  $U_3$  convierte la entrada diferencial de la anterior en salida unipolar con ganancia adicional. La ganancia total del Amp.In. es

$$A = \left( 1 + \frac{2R_1}{R_a} \right) \frac{R_3}{R_2}$$

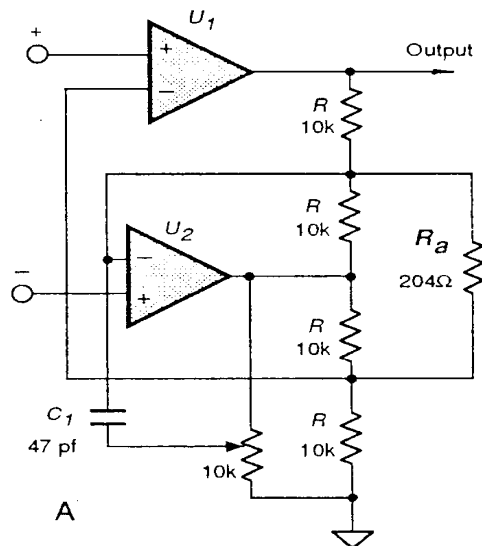
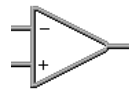


Fig. 23 Amplificador de instrumentación que utiliza dos Amp. Op.

En la Fig. 23 se muestra un Amp.In. basado en dos amplificadores operacionales idénticos y un conjunto de resistores.

El  $U_1$  actúa como amplificador inversor y  $U_2$  como no inversor. Ambas entradas tienen alta impedancia de entrada y pueden conectarse directamente a sensores. La realimentación de cada amplificador fuerza que la tensión sobre el resistor que determina la ganancia  $R_a$  sea igual a la diferencia de tensión entre las entradas. La ganancia del amplificador es

$$A \approx 2 \left( 1 + \frac{R}{R_a} \right)$$

Existen módulos integrados monolíticos de Amplificadores de Instrumentación que son muy fáciles de usar. Poseen un grupo de terminales para fijar la ganancia con resistores externos así como también de ajuste de offset además de los habituales en un Amp. Op.

### AMPLIFICADORES DE GANANCIA PROGRAMABLE (PGA)

Muchos sistemas con un rango dinámico grande necesitan de algún método para poder ajustar los niveles de señal de un sensor a, por ejemplo, un conversor analógico-digital. Estos tienen un rango de entrada fijo y para aprovechar al máximo su precisión es necesario escalar adecuadamente la señal de entrada, para ello se necesitan dispositivos de ganancia controlable. La idea que dicha ganancia sea posible programarla mediante un software. Algunos dispositivos son controlados mediante una tensión continua pero más comunes son los que se controlan digitalmente y se los conoce como *amplificadores de ganancia programable* (PGA).

Usualmente el PGA está conectado entre el sensor y el ADC. Se pueden encontrar otros dispositivos de acondicionamiento de señal precediendo el PGA y/o conectado después de él dependiendo de la aplicación.

En la práctica los PGA no son ideales. Tienen fuentes de errores que hay que tener en cuenta, siendo el problema fundamental a resolver la precisión en la programación de la ganancia.

Existe la posibilidad de seleccionar PGA con distinto número de pasos de ganancia y escalados decimalmente o con peso binario. En la Fig. 24 se muestra el esquema representativo de un amplificador de instrumentación de ganancia programable en forma digital con  $G=1,10,100,1000$  V/V la versión PGA204 y la PGA205 con  $G = 1, 2, 4, 8, \text{ V/V}$



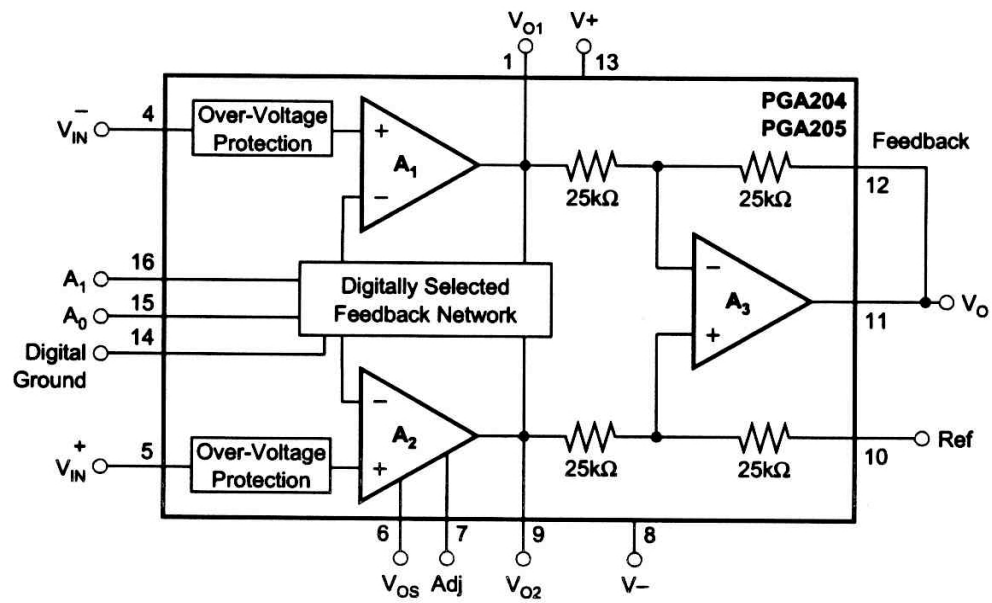
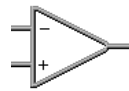
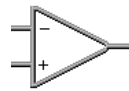


Fig. 24 Esquema de un amplificador de instrumentación programable



## AMPLIFICADORES II

### CIRCUITO COMPARADOR

Un circuito comparador es aquel que compara dos tensiones, generalmente una es la señal de entrada y la otra es una tensión de referencia. En la Figura 1 muestra un circuito comparador básico, mientras que la Fig. 2 nos muestra la señal de entrada y la correspondiente salida del comparador una vez que la entrada ha sido comparada con una tensión positiva en el presente caso. No se emplea retroalimentación en el circuito. Cuando la tensión de la señal es menor que una tensión de comparación  $V_r$ , el op amp está saturado en el valor negativo de la fuente de alimentación. A medida que la señal de entrada se incrementa pasando el valor  $V_r$ , el op amp pasa rápidamente a través de su región lineal y se satura a la tensión de la fuente de alimentación positiva. Como no hay retroalimentación, la transición entre las dos tensiones de saturación requiere un intervalo de tensión de entrada de al menos unos milivoltios. Este circuito, por lo tanto, da una salida digital (dos valores posibles) para una entrada analógica, dependiendo del valor de la tensión de entrada. Los circuitos comparadores tienen muchas aplicaciones, incluyendo circuitos de alarma, de control y convertidores de analógicos a digitales.

Sin embargo, una señal ruidosa causa problemas, como se muestra en la Figura 3. La región de transición es tan angosta que es probable se presente una salida errática en la vecindad del umbral, como podemos apreciar en la gráfica.

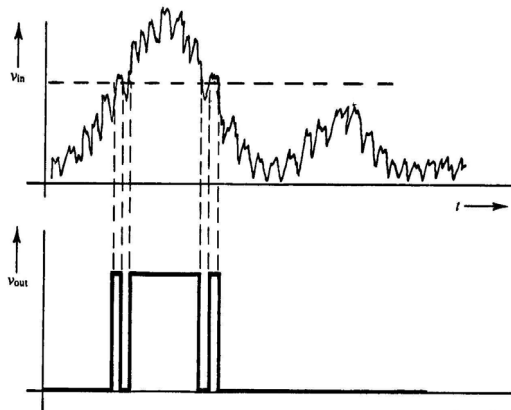


Fig. 3 Salida del circuito comparador debido a los efectos del ruido en la señal de entrada

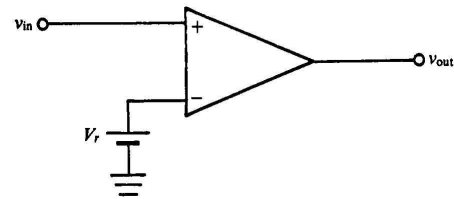


Fig.1.Comparador básico

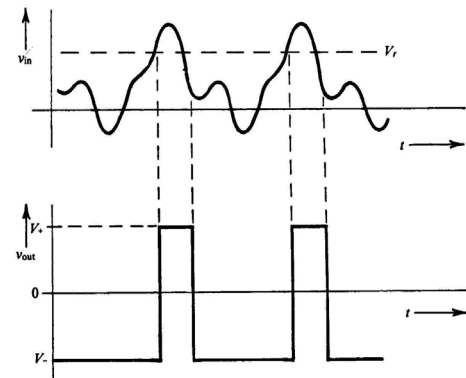


Fig.2 Características entrada y de salida del comparador

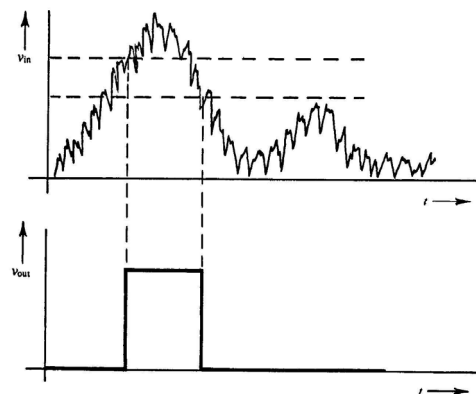
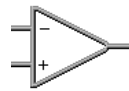


Fig. 5 Salida del circuito comparador con histéresis posee dos niveles de conmutación y elimina los efectos del ruido

El circuito que se muestra en la Figura 4 remedia este problema gracias al uso de retroalimentación positiva que crea una histéresis en el nivel de conmutación. El nivel de la tensión de entrada al cual conmuta la salida de bajo a alto es diferente del nivel al cual la salida cambia de alto a bajo. Esto es muy usado cuando se trabaja con señales con ruido ya que elimina sus efectos indeseados tal cual se ilustra en la figura 5. Este tipo de comparador se conoce como *Schmitt trigger*.

Para obtener la histéresis se agregan dos resistores al amplificador operacional de forma tal que produzcan realimentación positiva; esto se consigue colocando una de ellas entre la salida del amplificador y la entrada no inversora (+), la otra resistencia del divisor de tensión se conecta a una tensión de referencia  $V_r$ . La entrada inversora (-) se usa para inyectar la señal de entrada.

Con los valores del ejemplo ilustrado en la figura 4 supongamos que la señal de entrada viene de un valor negativo, por lo tanto la tensión de salida es la correspondiente al amplificador saturado en sentido positivo (10 V). Como la  $V_r = 0$  (por simplicidad) la tensión en la entrada + es de 1V dado el divisor de



tensión formado por los resistores de  $9\text{ K}\Omega$  y  $1\text{ K}\Omega$ , ver figura 4 (a). Cuando la señal de entrada, que está aumentando, supere la tensión de  $1\text{ V}$  de la entrada no inversora la salida conmutará rápidamente de  $+10\text{ V}$  a  $-10\text{ V}$ .

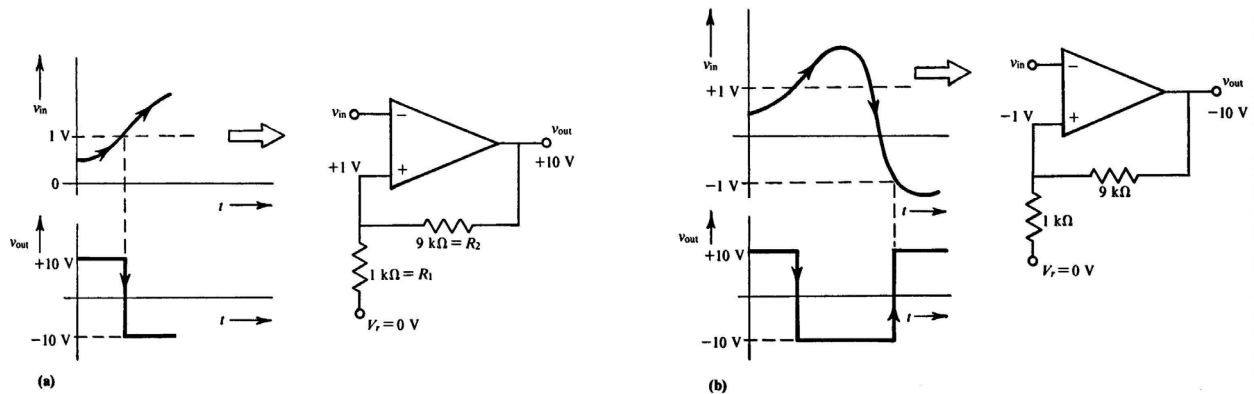


Fig. 4.Comparador Schmitt Trigger.(a) nivel de disparo superior. (b) nivel de disparo inferior

Cuando la salida a conmutado a  $-10\text{ V}$  la tensión que tendrá la puerta no inversora será de  $-1\text{ V}$ , ver fig 4 (b). Solamente cuando el valor de la señal de entrada disminuya por debajo de  $-1\text{ V}$  la salida conmutará nuevamente a saturación positiva ( $+10\text{ V}$ ).

El ancho de la histéresis, es decir la diferencia de tensión entre los dos niveles de conmutación, es de  $2\text{ V}$  o el doble de la tensión del divisor de tensión:

$$\text{Ancho de la histéresis} = \frac{2R_1V_r}{R_1 + R_2}$$

Lo anterior es claro para el caso en que  $V_r = 0$ , pero no es difícil demostrarlo para el caso en que la tensión central de la histéresis  $V_r$ . Tenga otro valor como se ilustra en la figura 6.

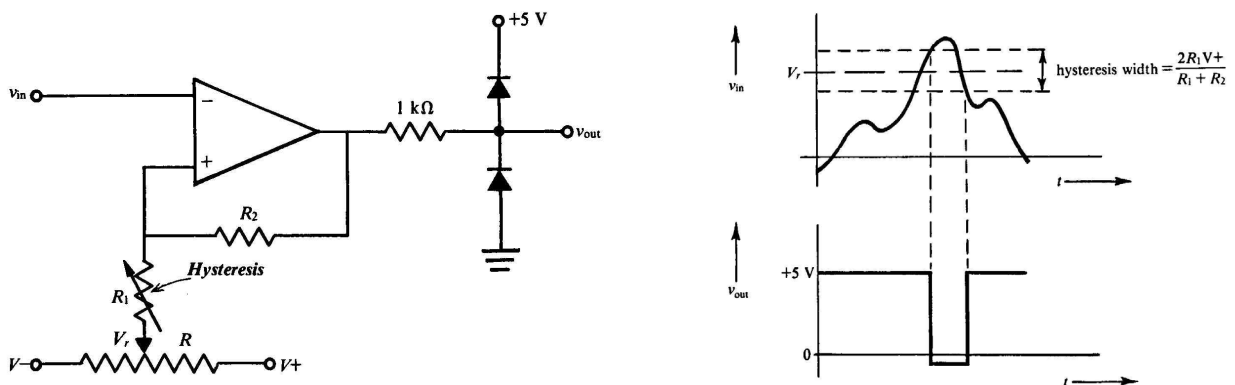
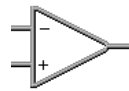


Fig. 6 Schmitt Trigger con ajuste del nivel de histéresis y salida enclavada.

En la figura 6 la tensión de referencia se obtiene del cursor de un potenciómetro conectado entre el  $+$  y el  $-$  ( de la alimentación del amplificador operacional. La resistencia del potenciómetro debe ser pequeña comparada con  $R_1$  y  $R_2$  para que la  $V_r$  no presente variaciones. Incluso  $V_r$  no es exactamente la tensión central de la histéresis cosa que se puede determinar fácilmente. Por medio de  $R_1$  se puede ajustar el ancho de la histéresis. En el caso mostrado en la figura 6 la tensión de salida del Schmitt trigger está limitada a  $+5\text{ V}$  y  $-0.7\text{ V}$  por los diodos enclavadores.

## CONVERTIDOR CORRIENTE A TENSIÓN

Muchos dispositivos o transductores producen señales de corriente, no obstante la mayoría de los circuitos en electrónica requieren señales de tensión. En la figura 7 se muestra un circuito que a partir de un amplificador opera-



cional convierte una señal de corriente en una tensión. Se trata de un amplificador inversor en el cual la resistencia de entrada es igual a cero.

Por lo tanto la impedancia de entrada es cero, La corriente de entrada es igual a la que circula por la resistencia de realimentación y la tensión de salida es:

$$v_o = -R_f i_{ent.}$$

Un voltímetro colocado a la salida indicará un valor proporcional a la corriente de entrada en otras palabras se dispone de un amperímetro ideal ya que tiene una resistencia interna igual a cero.

Una aplicación típica de este circuito es la medida de la corriente en cortocircuito de una celda fotovoltaica (Celda solar). Una celda de silicio fotovoltaica produce una tensión de 0,6 V entre sus extremos cuando incide una luz brillante sobre ella. La corriente en cortocircuito de una celda fotovoltaica es proporcional a la intensidad de luz incidente sobre ella y puede ser usada para medirla. Para medir dicha intensidad de luz en el amperímetro que se debe usar para medir la corriente en cortocircuito debe caer entre sus bornes una tensión mucho menor de 0,6 V; El uso del convertidor corriente en tensión es una buena solución a este problema.

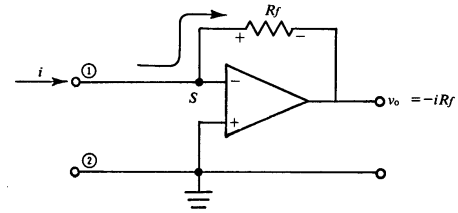


Fig. 7 Convertidor corriente- tensión

## CONVERTIDOR TENSIÓN EN CORRIENTE

En oportunidades necesitamos obtener una corriente controlable y de valor bien definido. Esta corriente puede ser controlada por una tensión de entrada ya sea constante o variable de acuerdo lo requieran las circunstancias. El convertidor tensión en corriente que realiza dicha función se muestra en la figura 8 el cual es básicamente un Amp. Op en configuración inversor fácil de entender.

Simplemente se conecta la carga en el lugar de la resistencia de realimentación. Como la entrada inversora es una tierra virtual, la corriente  $i$  que fluye desde la batería está determinada por :

$$i = \frac{V_s}{R}$$

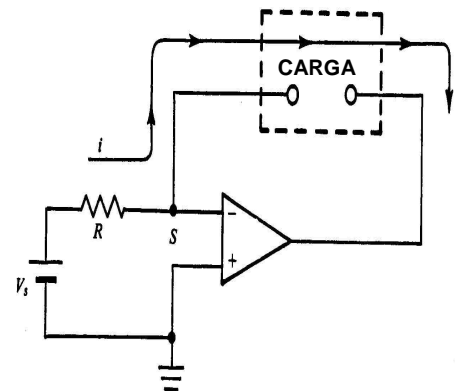


Fig.8 Convertidor Tensión-Corriente

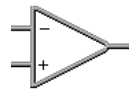
Esta es la corriente que pasa por la carga , dado que la corriente de entrada al amplificador operacional es cero, independientemente de cual sea el valor de la carga ( con límites). La corriente  $i$  generada es proporcional a la tensión de la batería.

## AMPLIFICADOR LOGARITMADOR

En el circuito de la figura 9 se muestra un amplificador operacional en el que se ha sustituido la resistencia de realimentación por un diodo. Este circuito se emplea cuando se necesita una tensión de salida que sea proporcional al logaritmo de la señal de entrada y ello se consigue haciendo uso de las características exponenciales del diodo semiconductor.

La corriente que fluye por el diodo está determinada por la tensión de entrada  $v_{ent}$  y el resistor  $R$  que es  $i = v_{ent} / R$ . Dicha corriente produce una pequeña caída de tensión decididamente no lineal sobre el diodo y el valor negativo de esa tensión es la tensión de salida  $v_o$ .

La corriente directa  $i$  en un diodo está dada por:



$$i = i_R e^{|e|V_D / nkT}$$

donde:

- ✓  $i_R$  la corriente inversa del diodo.
- ✓  $V_D$  a tensión sobre los terminales de un diodo
- ✓  $e$  la carga del electrón
- ✓  $k$  la constante de Boltzmann
- ✓  $T$  la temperatura absoluta
- ✓  $n$  Factor de corrección experimental =2 para el diodo de silicio y 1 para el germanio.

Operando y tomando el logaritmo tenemos

$$\log \frac{i}{i_R} = \left( \frac{|e|V_D}{nkT} \right) \log e$$

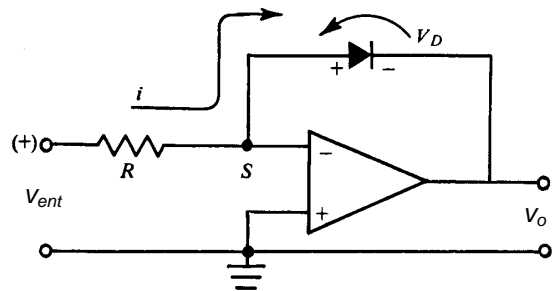


Fig. 9 Amplificador logaritmador

Resolviendo para  $V_D$  ( llamando  $V = kT/e$  )

$$V_D = 0.059n \left( \log \frac{i}{i_R} \right) V$$

Como  $i_R$  es prácticamente constante( del orden de  $10^{-8}$  A para el silicio) y  $i = v_{ent}/R$  además  $v_o = -V_D$  tenemos:

$$v_o = -0.059n \left( \log \frac{v_{ent}}{R i_R} \right) V$$

$$v_o = -0.059 n \log v_{ent} + 0.059 n \log i_R R$$

$$v_o = -0.059 n \log v_{ent} + \text{constante}$$

Este circuito permite trabajar sobre 3 ordenes de magnitud. Circuitos mas elaborados permiten mayor rango y menor dependencia de las temperatura.

## AMPLIFICADOR ANTILIGARITMICO

El amplificador mencionado anteriormente da una salida proporcional al logaritmo de la señal de entrada; a veces se desea una salida proporcional al antilogaritmo para ello en el circuito de la figura 10 simplemente se intercambia el diodo con el resistor obteniéndose el circuito de la figura . La corriente que circula por el diodo es la que corresponde cuando el cátodo está a la tierra virtual. La corriente está dada por la ecuación anteriormente vista (cuando la tensión  $V_D$  es

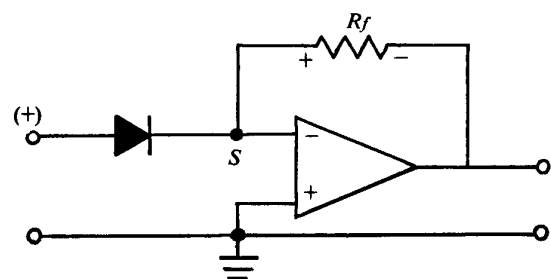
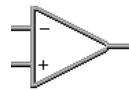


Fig. 10 Amp. antilogarítmico



mayor de 0.25 V) y corresponde a la tensión de entrada  $V_{ent}$ . Tomando como base 10 tenemos

$$\frac{i}{i_R} = 10^{\left(\frac{e}{nkT} \log e\right) V_{ent}} = 10^{K V_{ent}}$$

donde  $K$  es una constante La corriente  $i$  fluye a través de la resistencia de realimentación por tanto la tensión de salida es:

$$V_o = -i_R R_f 10^{K V_{ent}}$$

## FUNCIONES MULTIPLICACIÓN Y RAÍZ CUADRADA

Examinaremos ahora brevemente como podemos multiplicar una tensión por otra y como se puede obtener la raíz cuadrada de una tensión haciendo uso de los amplificadores de las funciones estudiados. Dichas operaciones son básicas en computación analógica y pueden ser necesarias en el laboratorio.

Usando las propiedades de los logaritmos sabemos

$$\log AB = \log A + \log B$$

y

$$\text{antilog}(\log AB) = A \cdot B = \text{antilog}(\log A + \log B)$$

luego podemos obtener el antilogaritmo de la suma de los logaritmos de dos señales para obtener el producto de las mismas como se ilustra en el diagrama de bloques de la figura 11.

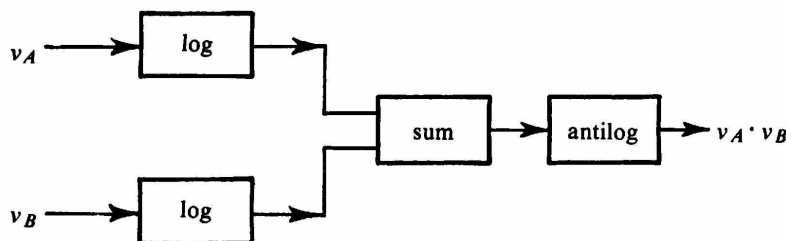


Fig.11 Diagrama en bloques de un multiplicador de señales

Como segundo ejemplo podemos ver como obtener la raíz cuadrada de una tensión. Sabemos

$$\log A^{1/2} = \frac{1}{2} \log A$$

$$A^{1/2} = \text{antilog} \left( \frac{1}{2} \log A \right)$$

La multiplicación por  $\frac{1}{2}$  la puede realizar un amplificador con ganancia  $\frac{1}{2}$  cuando  $R=2R_f$ . En el diagrama en bloques de la figura 12 se muestra el circuito

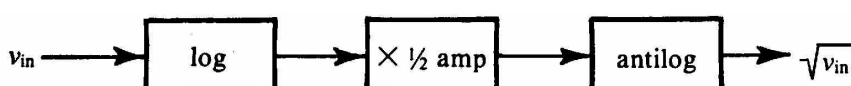
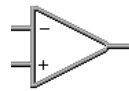


Fig.12 Diagrama en bloques para extraer la raíz cuadrada de una señal



## CÁLCULO ANALÓGICO ELECTRÓNICO

El amplificador operacional es el bloque fundamental de un calculador analógico electrónico. A título de ejemplo, vamos a considerar la programación de la ecuación diferencial:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + K_1 \frac{dv}{dt} + K_2 v - v_1 = 0$$

siendo  $v_1$  una función dada del tiempo, y  $K_1$  y  $K_2$  son constantes reales positivas.

Empecemos por suponer que tenemos  $d^2v/dt^2$  en forma de una tensión. En tal caso, por medio de un integrador se obtiene una tensión proporcional a  $dv/dt$ , mientras un segundo integrador da una tensión proporcional a  $v$ . Entonces, con un sumador (y cambiador de escala) obtendremos:  $-K_1(dv/dt) - K_2v + v_1$ . Si observamos la ecuación diferencial, vemos que esto es igual a  $d^2v/dt^2$  y, por lo tanto, se unirá la salida del sumador al terminal de entrada donde en principio habíamos supuesto que disponíamos de  $d^2v/dt^2$ .

El procedimiento explicado se representa en la Fig. 13. La tensión  $d^2v/dt^2$  se supone disponible en el terminal de entrada. El integrador (1) tiene una constante de tiempo  $RC = 1$  seg, y en consecuencia, la salida en el terminal 1 será  $-dv/dt$ . Esta tensión se aplica a un integrador similar (2), y la tensión en el terminal 2 es  $+v$ . La tensión del terminal 1 se aplica al inversor y cambiador de escala (3) y su salida en el terminal 3 es:  $+K_1(dv/dt)$ . Se emplea el mismo amplificador operacional (3) como sumador; de ahí que si la tensión dada  $v_1(t)$  se aplica también a dicho amplificador tal como se indica, la señal del terminal de (3) contendrá asimismo el término  $-v_1$ , o sea que la salida completa será  $+K_1(dv/dt) - v_1$ . Los términos 2 y 3 suministran señal al sumador cambiador de escala (4) y, por lo tanto, en el terminal 4 habrá una tensión resultante  $-K_2v - K_1(dv/dt) + v_1$ . Por la ecuación, esto debe ser igual a  $d^2v/dt^2$ , que es la tensión que hemos supuesto en el terminal de entrada. En consecuencia, el computador estará completo al conectar el terminal 4 al terminal de entrada. (Esta última premisa está omitida en la Fig. 13, en aras de una explicación más clara.)

Deben ser insertadas en el calculador las condiciones iniciales especificadas (los valores de  $dv/dt$  y de  $v$  para  $t=0$ ), con lo que observamos que las tensiones en los terminales 1 y 2 de la Fig. 13 son proporcionales a  $dv/dt$  y a  $v$ , respectivamente. Por lo tanto, las condiciones iniciales se obtendrán aplicando las tensiones correctas  $V_1$  y  $V_2$  a los condensadores de los integradores 1 y 2 respectivamente.

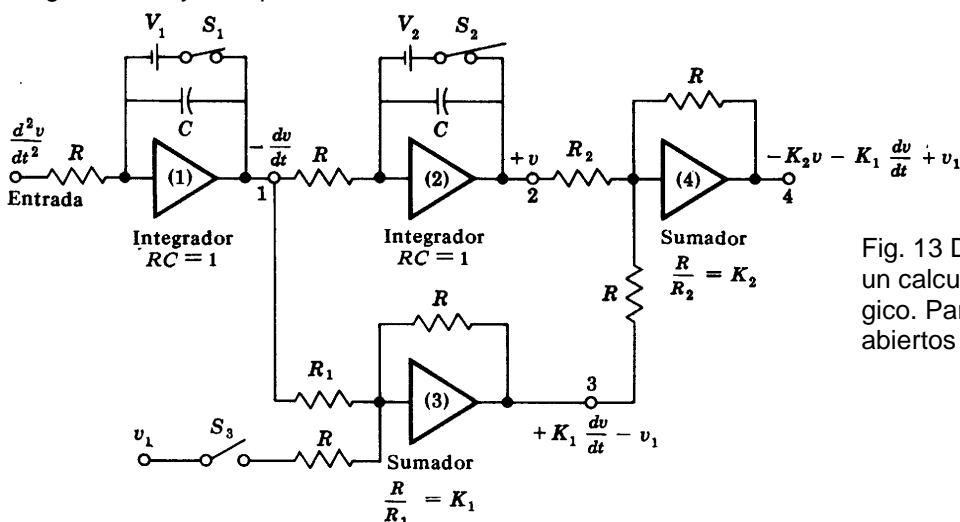


Fig. 13 Diagrama en bloque de un calculador electrónico analógico. Para  $t=0$   $S_1$  y  $S_2$  están abiertos y  $S_3$  cerrado.

La solución se obtiene abriendo los interruptores  $S_1$  y  $S_2$  y cerrando simultáneamente el  $S_3$  (mediante un relé) en el instante  $t = 0$ , y observando la forma de onda en el terminal 2. Si también se desea la derivada  $dv/dt$ . Es posible hallar su forma de onda en el terminal 1. El indicador puede ser un tubo de rayos catódicos (con barrido por disparo), un registrador o, para análisis cualitativos de cantidades con variaciones muy lentas, un voltímetro de alta impedancia.