

## Procesamiento analógico de señales

### Señales, información, interferencia y ruido

- **Señal:** magnitud física detectable cuya amplitud varía con el tiempo y lleva información.
- **Señal eléctrica:** Voltaje o corriente que varía con el tiempo, obtenida de procesos por medio de sensores o transductores y sus acondicionadores.
- **Información:** conocimiento obtenido mediante investigación.
- **Interferencia:** señal ajena al sistema considerado.
- **Ruido:** señal interna indeseable.

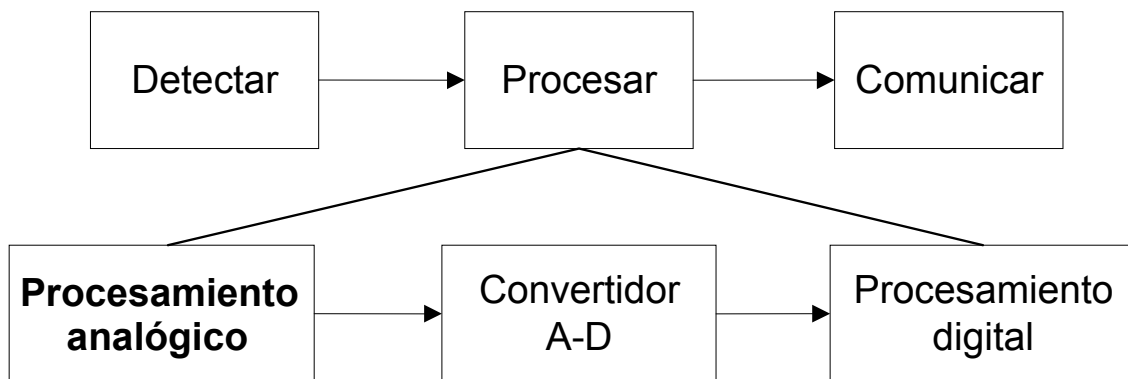
### Instrumentación electrónica

- Ciencia y tecnología de las medidas

Toda magnitud física lleva información sobre el proceso o sistema que la origina.

- Ciencia: algoritmos de medida
- Tecnología: implementación de los algoritmos de medida (CI, circuito impreso, equipo...)
- Instrumentación: imprescindible e interdisciplinaria

### Sistema de medida: Funciones



*"El sistema es el instrumento": integración. (Ramon Pallàs Areny)*

## Introducción a los sistemas de medida

### Sistema

Combinación de 2 o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones.

En **sistemas de medida**, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento de tal forma que la describa. El resultado de la medida debe ser:

- Independiente del observador (*objetiva*)
- Basada en la experimentación (*empírica*)
- Correspondencia entre relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas.

### **Objetivos de la medida:**

- Vigilancia o seguimiento de procesos (*temperatura ambiente, monitorización clínica, contadores de gas y de agua, etc*)
- Control de un proceso (*termostato, control de nivel en un depósito, etc*)
- Ingeniería experimental (*estudio de distribución de temperaturas en una pieza irregular, fuerzas sobre un conductor simulado de un coche cuando éste choca contra un objeto, etc*)

### **Funciones de los sistemas de medida:**

- Adquisición de la información (*sensor o transductor*)
- Procesamiento
- Presentación de resultados

Funciones pueden ser locales o remotas (*transmisión de información*)

**Tipos de señales:**

- Mecánicas
- Térmicas
- Magnéticas
- Eléctricas
- Ópticas
- Moleculares (químicas)

**Transductor:**

Dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.

**Sensor (Transductor de entrada):**

Dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.

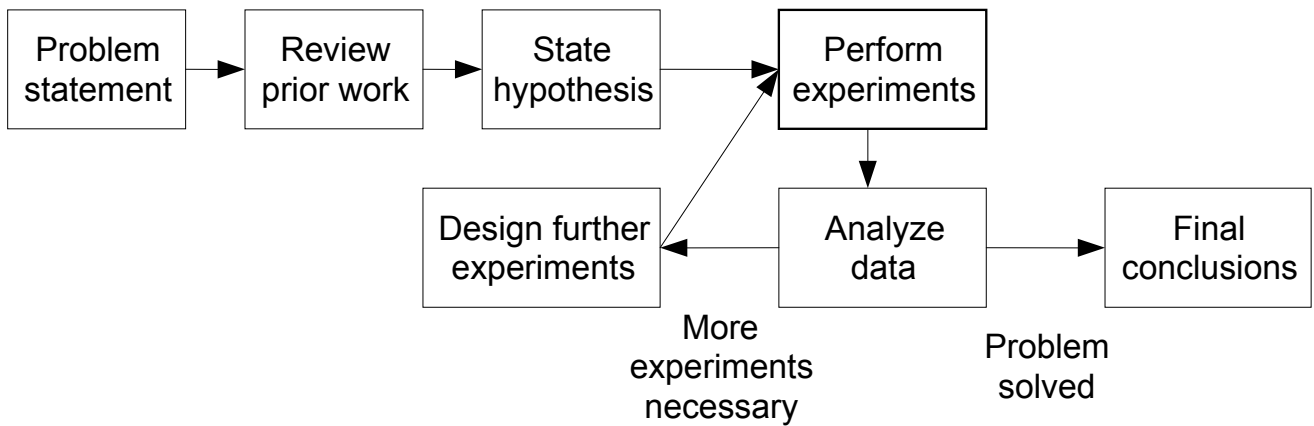
**Actuador (Transductor de salida):**

Conversión de energía.

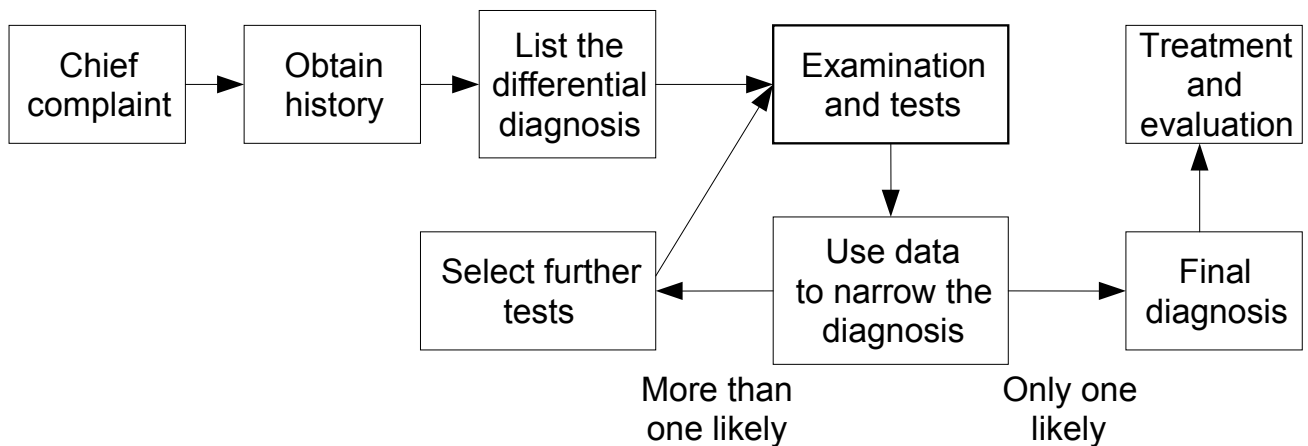
**Sistemas de medida electrónicos (ventajas)**

- Debido a estructura electrónica de la materia:  
↑↓ parámetros no eléctricos de un material  $\rightleftharpoons$  ↑↓ parámetro eléctrico
- Amplificadores electrónicos (*ganancias de potencia 10 (10) a B.F.*)
- Gran variedad de circuitos integrados para acondicionar o modificar señales. Algunos transductores incorporan físicamente en un encapsulado como parte de estos recursos.
- Muchos recursos para presentar o registrar la información, manejo de datos numéricos, textos, gráficos y diagramas.
- Transmisión de señales eléctricas más versátil que señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas (*aunque éstas pueden ser mas convenientes en presencia de radiaciones ionizantes o atmósferas explosivas*)

### Necesidad de la Instrumentación



*En el método científico, una hipótesis es probada por experimentos para determinar su validez. (J.G. Webster, Bioinstrumentation 2003)*



*El médico obtiene la historia, examina al paciente, realiza pruebas para determinar su diagnóstico y recomienda el tratamiento.*

*(J.G. Webster, Bioinstrumentation 2003)*



## Procesamiento analógico

- Adaptación de: amplitud, nivel, ancho de banda e impedancia de señales.
- Asegurar compatibilidad: entre señales unipolares, diferenciales o flotantes y amplificadores con diferentes etapas de entrada.
- Conversión entre dominios:  $V \iff I$ ,  $AC \iff DC$
- Desarrollo de operaciones: linealización, corrección de derivas, detección coherente, etc
- Multiplexado de canales: varias señales comparten un convertidor analógico-digital.
- Minimizar interferencia.
- Reducir ruido.

## Características procesamiento analógico

- Rápido.
- Menos flexible.
- Más caro (componentes), no necesariamente más complejo.
- Inevitable en interfaz con sistema digital (filtrado antialiasing y amplificación)

## Objetivos

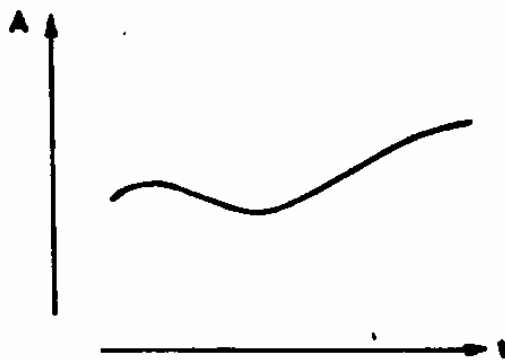
1. Análisis y diseño de circuitos analógicos para procesar señales con circuitos integrados de uso general.
2. Profundizar en el estudio de circuitos con entrada y salida diferencial, y en la estimación y reducción de errores.

## Método de diseño

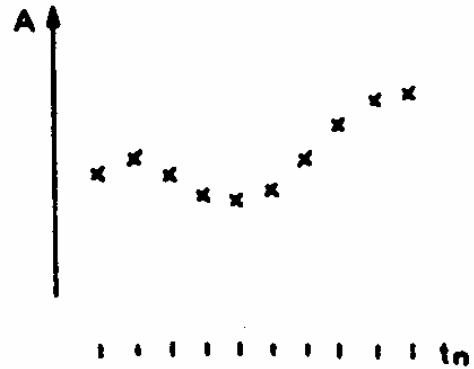
1. Clasificación de las señales a procesar.
2. Definición de las funciones deseadas.
3. Conversiones entre dominios.
4. Clasificación de errores.
5. Reducción de errores.

## Clasificación de señales (amplitud)

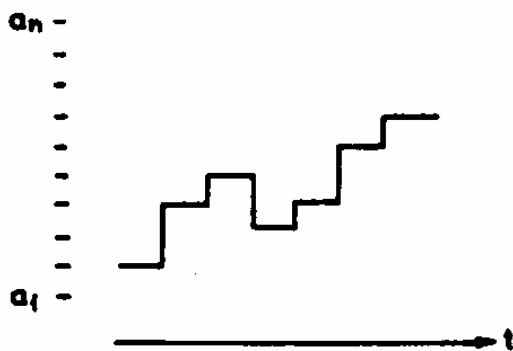
- Analógicas: amplitud de cualquier valor de un margen continuo.
  - Información en: amplitud, fase, frecuencia o duración.
  - El muestreo da una señal analógica discontinua.
- Digitales: amplitud de un conjunto de valores finito.
  - Señales binarias: dos valores (“uno” y “cero”).
  - Información codificada en conjuntos de unos y ceros (palabras).



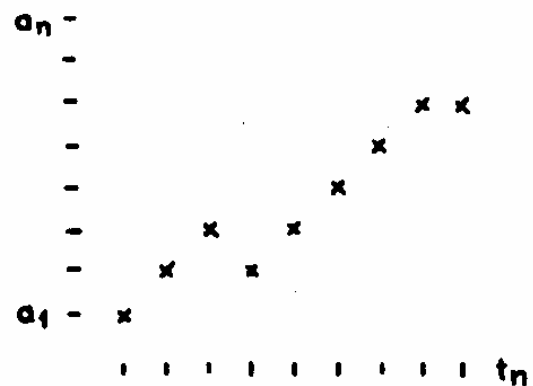
(a) Señal analógica



(c) Señal discreta en el tiempo



(b) Señal de amplitud discreta

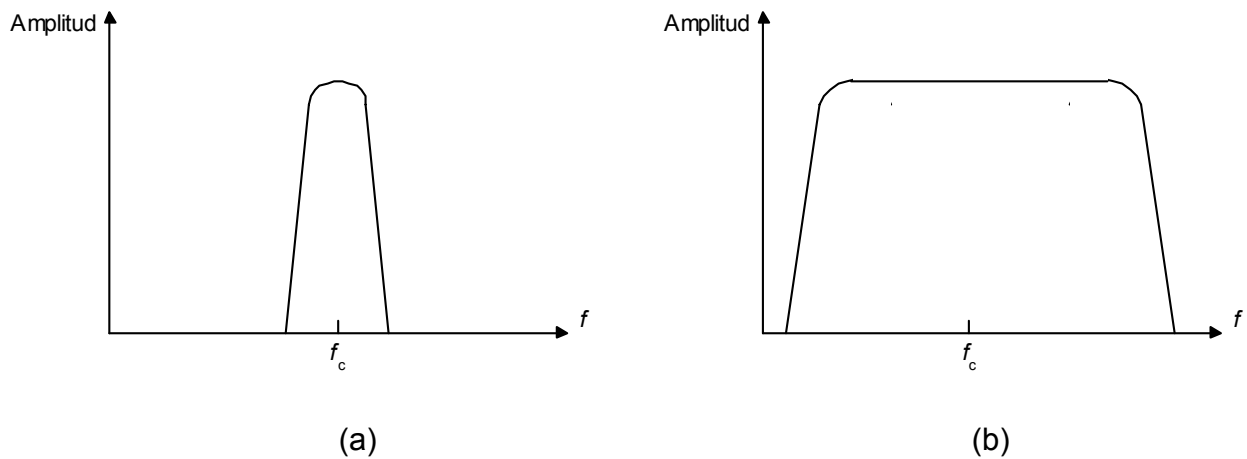


(d) Señal digital

*Tipos de señales. (Los intervalos de tiempo pueden ser iguales o no)*

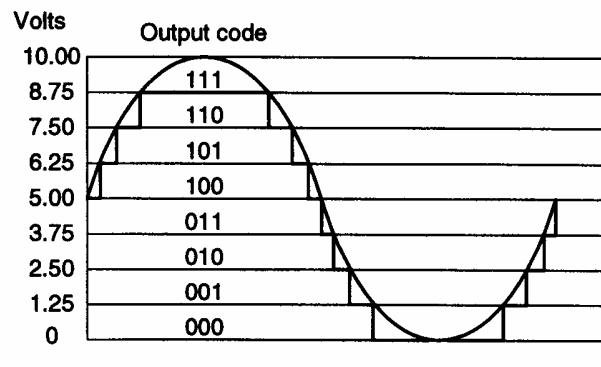
### Clasificación de señales (evolución en el tiempo)

- Señales dc: cambios lentos. (banda estrecha)
- Señales ac: cambios rápidos.
  - Transitorias
  - Periódicas
  - Banda estrecha: margen de frecuencia pequeño respecto a  $f_c$ .
  - Banda ancha: margen de frecuencia grande respecto a  $f_c$ .



*Espectro de frecuencia para señales de:  
(a) banda estrecha y (b) banda ancha*

Conversión analógico-digital (ADC)  $\longrightarrow$  Cuantificación y codificación



*Onda senoidal y su versión digital utilizando un código de 3 bits*

Intervalo de cuantificación:  $q = V_{ir} / 2^n$

donde:  $V_{ir}$  = margen de voltaje de entrada del ADC

$n$  = número de bits de las palabras binarias de salida del ADC

$2^n$  = número de códigos de salida

$q$  = resolución analógica del ADC (1 LSB)

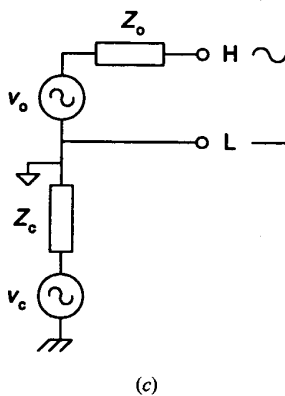
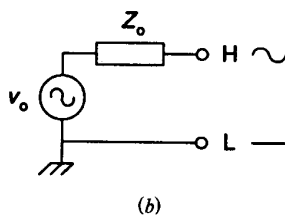
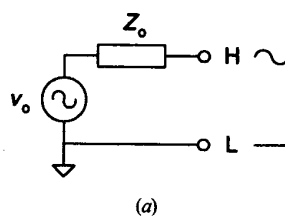
Ruido de cuantificación (error de cuantificación máximo):  $\pm q/2$



## Clasificación de señales analógicas (características eléctricas)

Señales de tensión:  $V_S = V_{\text{HIGH}} - V_{\text{LOW}} = V_H - V_L$

- Asimétricas o diferenciales. (  $V_L = \text{constante o no}$  )
- Flotantes, a masa o aisladas.
- Unipolares o bipolares.



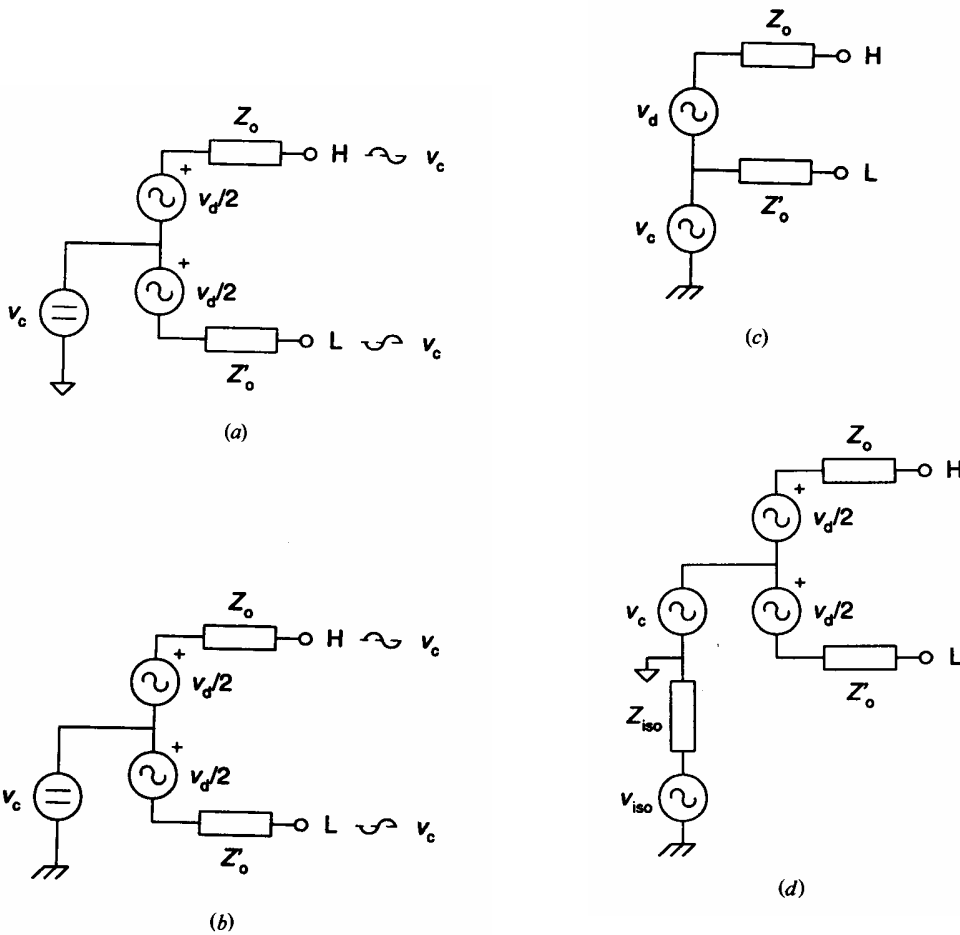
(a) Señal asimétrica flotante. (b) Señal asimétrica puesta a tierra.

(c) Señal asimétrica con tensión en modo común.

Señales diferenciales

$$V_d = V_H - V_L$$

$$V_c = (V_H + V_L) / 2$$



Señales diferenciales. (a) Señal diferencial flotante. (b) Señal diferencial puesta a tierra con voltaje de modo común. (c) Señal pseudodiferencial para (b) cuando  $V_d \ll V_c$ . (d) Señal diferencial aislada.

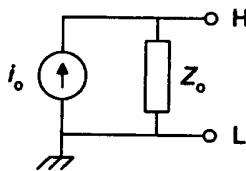
### Clasificación de señales analógicas (impedancia de salida)

- Baja impedancia.
  - (Ejemplo: galgas extensométricas de metal y termopares)
  - Tensión.
  - Corriente.
- Alta impedancia.

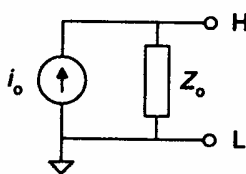
Usualmente se modelan como fuentes de corriente.

(Ejemplo: puentes de capacitores, fotodiodos y transductores piezoeléctricos)

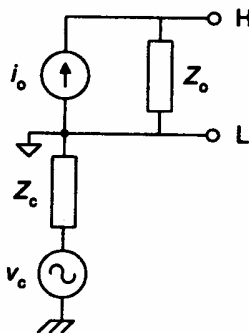
- Tensión.
- Corriente.



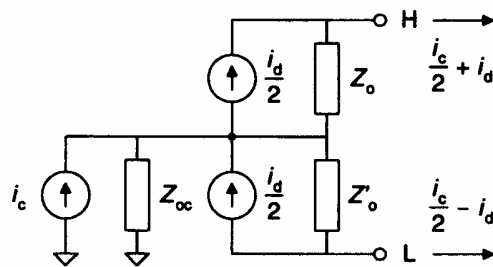
(a)



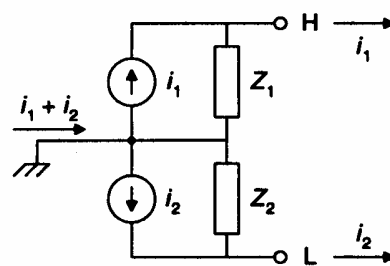
(b)



(c)



(a)



(b)

Señales asimétricas de corriente  
 (a) Señal de corriente aterrizada.  
 (b) Señal de corriente flotante.  
 (c) Señal de corriente flotante con voltaje de modo común.

(a) Señal diferencial de corriente  
 (b) Señal de diferencia de corriente aterrizada.

## Rango dinámico y relación señal a ruido

### Objetivo sistema electrónico de medida:

Obtener una señal de salida correspondiente a una cantidad de entrada.

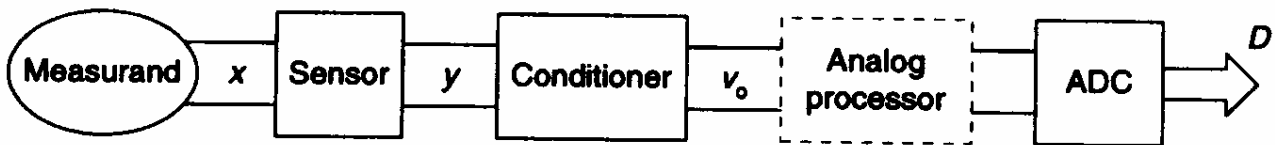
### Margen o Rango de medida:

Diferencia entre las máximas y mínimas amplitudes de una cantidad.

### Resolución de la medida:

Mínima variación que se quiere detectar.

$$\text{Margen dinámico (DR)} = \frac{\text{Margen de medida}}{\text{Resolución}}$$



*Estructura general de un sistema que obtiene un código digital D a partir de un mensurando X.*

### Sensor:

Sensibilidad:

$$S = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Resolución:

$$\Delta y$$

limitada por su diseño mecánico, ruido eléctrico, etc

**Acondicionador y procesador analógico:**

Descritos por su **característica de transferencia** que relaciona la señal de salida y su respectiva señal de entrada, cuya pendiente es la **ganancia**.

Cada circuito electrónico o subsistema acepta un margen específico de señales de entrada llamado **margen de entrada**, y es capaz de detectar una variación mínima de estas señales llamada **resolución**.

Ejemplos:

- *Amplitud de sus señales de salida limitada por los niveles del voltaje de alimentación.*
- *Velocidad del circuito limitada por capacitancia parásita.*
- *Fluctuaciones aleatorias de voltaje o interferencia, impiden la detección de incrementos pequeños de señal limitando la resolución.*

**Convertidor analógico digital (ADC):**

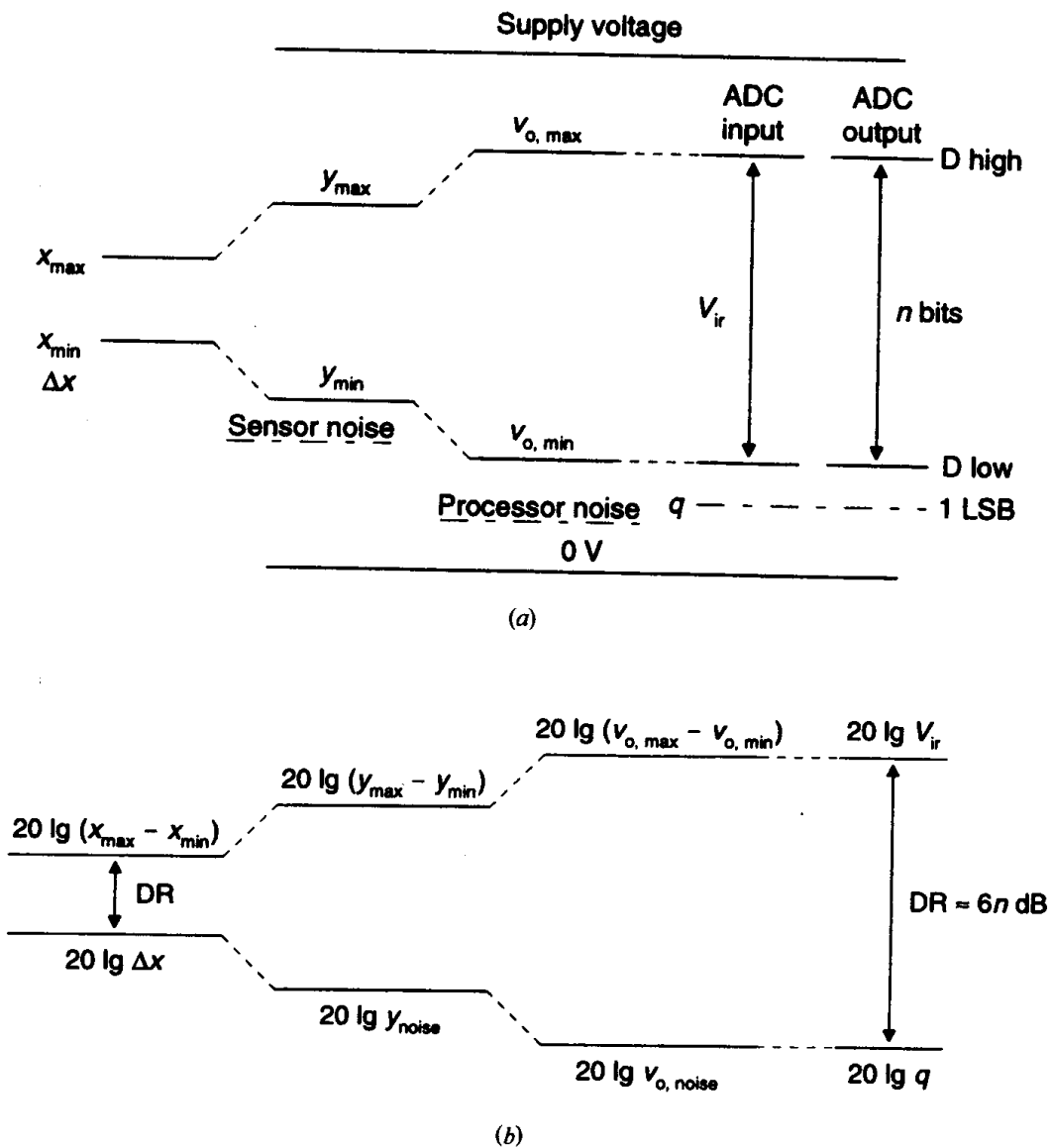
Tiene un **margen de voltaje de entrada  $V_{ir}$**  limitado y no detecta incrementos de voltaje más pequeños que su **intervalo de cuantificación  $q$** , por lo tanto:

$$DR = V_{ir} / q \quad \text{como } V_{ir} = (2^n - 1) q \approx 2^n q, \text{ por lo tanto:}$$

$$DR = 2^n$$

Lo que concuerda con el número de códigos de salida disponible ( $2^n$ ) y la resolución de salida que es el bit menos significativo (LSB) = 1, por lo tanto:

$$DR = 2^n / 1 = 2^n$$



(a) Márgenes de medida y señal.

(b) Margen dinámico para el sistema de medida anterior.

El margen de entrada y los niveles extremos de señal de cualquier etapa deben ser iguales o mayores que el margen de salida y los niveles extremos de señal para la etapa previa. El ruido del sensor limita la resolución.

**Cualquier etapa debería tener un margen dinámico igual o mayor que aquella de la etapa previa.**

DR para cualquier etapa debe ser calculado utilizando las mismas cantidades en el numerador y denominador. Los valores pueden ser pico, pico-pico o rms de voltaje, corriente o potencia (para señales aleatorias). El ruido limita la resolución y puede ser expresado en valores pico-pico o rms.

DR normalmente se expresa en dB, por lo que para un voltaje o corriente es:

$$\text{DR} = 20 \lg \frac{\text{Amplitud máxima} - \text{Amplitud mínima}}{\text{Resolución}}$$

$$\text{Para un ADC: } \text{DR} = 20 \lg \frac{V_{ir}}{Q} = 20 \lg 2^n \approx 6 n \text{ dB}$$

Un parámetro para describir señales aleatorias es su potencia, para estas señales, la relación señal a ruido (SNR) sustituye al margen dinámico. La SNR en dB es:

$$\text{SNR (dB)} = 10 \lg \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}}$$

## Funciones en el procesamiento analógico de señales

Funciones lineales y no lineales:

Cualquier operación desarrollada sobre una señal analógica puede ser descrita por un modelo matemático y puede ser lineal o no lineal. Una función se dice que es lineal si tiene las dos propiedades siguientes:

- Homogeneidad:  $f(ax) = af(x)$  donde  $a$  es una constante.

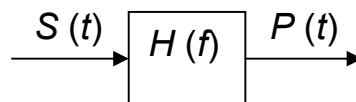
La salida de un circuito lineal es proporcional a su entrada.

- Aditiva:  $f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$

Se mantiene el principio de superposición:

$$\left. \begin{array}{l} S_1(t) \longrightarrow Z_1(t) \\ S_2(t) \longrightarrow Z_2(t) \end{array} \right\} a S_1(t) + b S_2(t) \longrightarrow a Z_1(t) + b Z_2(t)$$

- Invariante en el tiempo:  $S(t) \longrightarrow Z(t)$   
 $S(t - t_0) \longrightarrow Z(t - t_0)$
- Función lineal puede ser resultado de funciones no lineales sucesivas.
- Cualquier sistema lineal invariante en el tiempo, físicamente realizable y estable puede ser descrito por una transmitancia o función de transferencia  $H(f)$ .



**Fig. 10** Sistema lineal descrito por su función de transferencia.

$H(f)$ : cantidad compleja especificada por:

- Módulo (o valor absoluto).
- Fase (o argumento).

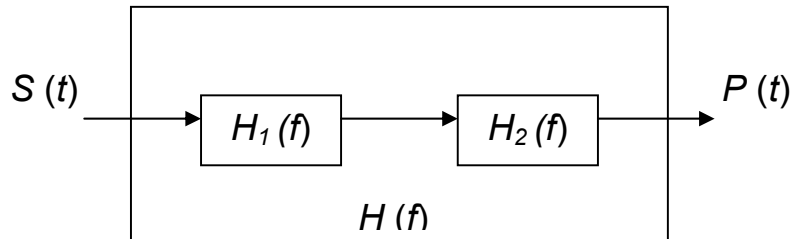
Si el sistema estaba en reposo (condición inicial cero), la transformada de Fourier de la señal de salida  $P(f)$  es:

$$P(f) = H(f) S(f)$$

donde:  $S(f)$  es la transformada de Fourier de la señal de entrada.



Por lo tanto, los sistemas lineales no modifican la frecuencia de senoides, pero pueden modificar su amplitud y fase.



*Función de transferencia de sistemas lineales conectados en cascada.*

En instrumentación:

- No se acepta distorsión en la forma de la señal, pero es aceptable el retardo:

$$P(t) = k S(t - t_0)$$

$$P(f) = k e^{-j 2\pi f t_0} S(f)$$

$$H(f) = k \angle - 2\pi f t_0 \implies \text{Cambio de amplitud y retardo proporcional a la frecuencia (desfase lineal)}$$

- Para señales de muy baja frecuencia, una función se considera lineal, cuando su característica de transferencia es una línea recta con pendiente constante.

- Características de transferencia no lineales son descritas por funciones matemáticas explícitas o gráficamente por una curva, cuya pendiente no es constante.

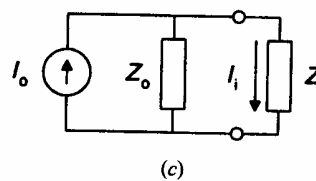
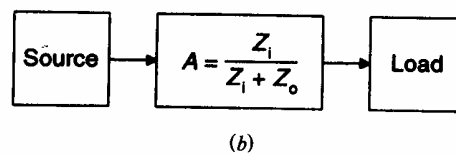
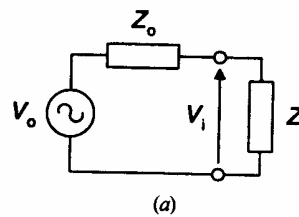
*No linealidad es considerada una fuente de error en circuitos lineales.*

## Adaptación de impedancias

La descripción de un circuito lineal por su función de transferencia asume que el comportamiento del circuito no se altera cuando es conectado a otros circuitos.

Requisito:

Impedancia de entrada del circuito receptor (carga)  $\longleftrightarrow$  Impedancia de salida circuito fuente



(a) Señal de voltaje conectada a un receptor con impedancia de entrada  $Z_i$ . (b) Etapa de conexión añadida para tomar en cuenta la atenuación producida por impedancias no adaptadas. (c) Señal de corriente conectada a un receptor con impedancia de entrada  $Z_i$ .

$$V_i = V_o \frac{Z_i}{Z_i + Z_o} = A V_o$$

donde:  $A = Z_i / (Z_i + Z_o)$  es la atenuación y es función de la frecuencia.

Condición deseada para adaptación de impedancia: (buffering)

$$V_i = V_o \longrightarrow Z_i \gg Z_o$$

*Para señales de banda estrecha:*

$Z_i$  y  $Z_o$  son casi independientes de la frecuencia:  $|Z_i| = k |Z_o|$  donde  $k$  es constante, por lo tanto:

$$|V_i| = |V_o| \frac{|Z_i|}{(|Z_i|^2 + |Z_o|^2)^{1/2}} = \frac{k}{(k^2 + 1)^{1/2}} |V_o| = A |V_o|$$

donde:  $A$  es una atenuación constante.

Si  $Z_o$  y  $V_o$  son función del mensurando  $x$ , el voltaje detectado es una función no lineal de  $x$  aún para señales de banda estrecha.

*Para señales de banda ancha:*

- $Z_i$  disminuye para frecuencias altas debido a capacidad parásita.
- $Z_o$  podría no ser constante.

Si el voltaje a procesar es diferencial, entonces las condiciones requeridas para adaptación de impedancias involucran impedancias de modo común y diferencial.

Cuando la señal de interés es una corriente, la condición para la adaptación de impedancias se deriva a través del análisis de la corriente a través de la impedancia de carga:

$$I_i = I_o \frac{Z_o}{Z_o + Z_i}$$

donde:  $Z_i \ll Z_o$

## Conversiones entre dominios

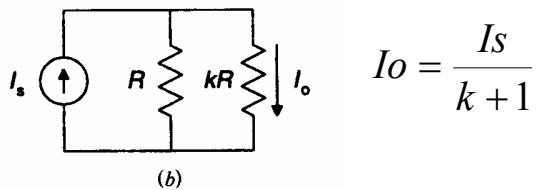
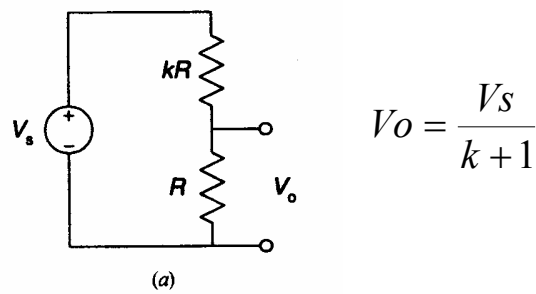
Un dominio de datos es una cantidad física que representa la información.

- *Dominios análogos:* Voltaje y corriente.
- *Dominios del tiempo (análogos):* Frecuencia, ancho de pulso y fase.  
*Manejo de voltajes y corrientes de dc y ac.*

¿Porqué?

*Debido a la naturaleza de las fuentes de señal y receptores, además de la conveniencia de algunas operaciones.*

- Termopares, sensores de efecto Hall, transformadores diferenciales variables lineales (LVDT) y tacómetros de ac. (*salida de voltaje*)
- Fotodiodos, tubos fotomultiplicadores y sensores piezoeléctricos. (*salida de corriente*)
- Sensores resistivos (galgas extensométricas, detectores de temperatura resistivos (RTDs), termistores), se colocan en divisores de voltaje, puentes de Wheatstone con salidas de voltaje o corriente de dc o ac.
- Sensores reactivos (capacitivos e inductivos) proporcionan salidas de voltaje de ac.
- Receptores de señal requieren entradas específicas: la mayoría de ADC solamente aceptan voltajes de entrada de dc, un circuito de corriente para telemetría de 4 mA a 20 mA, requiere una corriente de dc.



(a) divisor de voltaje. (b) divisor de corriente.

**Salida**

Entrada	Voltaje	Corriente
<b>Voltaje</b>	Amplificador de voltaje	Amplificador de transconductancia
	Buffer de voltaje	Amplificador de transadmitancia
	Fuente de voltaje controlada por voltaje (VCVS)	Fuente de corriente controlada por voltaje (VCCS)
<b>Corriente</b>	Amplificador Norton	Espejo de corriente
	Integrador de corriente	Transportador de corriente
	Amplificador de transimpedancia	Amplificador de corriente, bomba de corriente.
	Fuente de voltaje controlada por corriente (CCVS)	Fuente de corriente controlada por corriente (CCCS)

*Terminología común para componentes y circuitos para amplificación de señal y conversión de dominios.*

## Filtrado

El filtrado analógico de señal discrimina señales basado en uno de sus parámetros: amplitud, frecuencia, fase o duración.

La mayoría de los filtros son lineales, y discriminan señales basados en su frecuencia. Son utilizados para:

- *Adaptación de ancho de banda. (Muestreo de señal)*
- *Eliminación de interferencia.*
- *Reducción de ancho de banda. (Reducción de ruido)*

Técnicas de filtrado no lineales para rechazo de ruido e interferencia:

- *Amplitud.*
- *Slew-rate.*

## Linealización

La linealidad expresa hasta que punto es constante la sensibilidad del sistema, y una respuesta lineal es más conveniente debido a que para calcular la entrada correspondiente a una salida para un sistema lineal se requiere solamente restar la salida en cero y dividir por la sensibilidad.

En instrumentos lineales la no linealidad equivale a la inexactitud

- *Relaciones no lineales pueden ser debidas al principio de medición.*
- *El sensor podría ser no lineal.*

*Termistores, magnetoresistores o termopares trabajando en un rango de temperatura amplio.*

- *Un sensor lineal puede dar una salida no lineal cuando se coloca en un divisor de voltaje o puente de Wheatstone.*

## Compensación de interferencias

Una interferencia que da lugar a una señal no deseada  $u(t)$  sumada a la señal de interés  $s(t)$  puede ser cancelada si el sistema se diseña para proporcionar dos señales de salida  $s(t)$  y  $-s(t)$ , cada una con la interferencia sumada, por lo que la resta de ambas señales será:

$$d(t) = s(t) + u(t) - [-s(t) + u(t)] = 2s(t)$$

Esto muestra la ventaja implícita de las señales diferenciales:

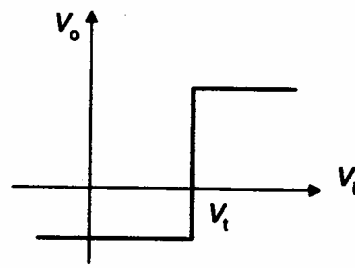
*Cualquier interferencia común a ambas terminales de la señal (voltajes o corrientes) serán canceladas en el extremo receptor.*

De la misma manera, una interferencia que da lugar a una señal no deseada  $u(t)$  multiplicando la señal de interés  $s(t)$ , se puede cancelar si el sistema se diseña para que el valor de  $u(t)$  sea obtenido, de tal forma que dividiendo la señal contaminada entre la interferencia proporciona la señal deseada sin interferencia. (método aplicado en sensores resistivos colocados en divisores de voltaje o puentes de Wheatstone).

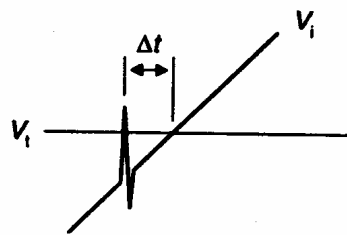
## Comparación de niveles y detección de umbral

La comparación de niveles es una función no lineal que proporciona una señal binaria cuyo valor depende de cual de las dos señales es más grande.

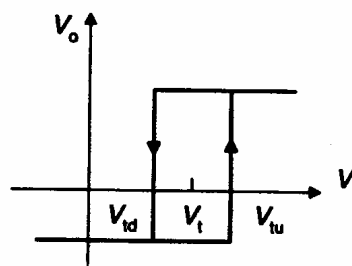
La detección de umbral también es una función no lineal que proporciona una salida binaria cuyo valor cambia cuando la señal de entrada alcanza un cierto nivel. (si el nivel de decisión es cero, el circuito es un detector de polaridad)



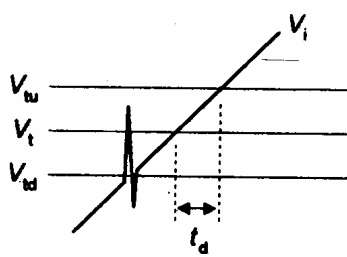
(a)



(b)



(c)

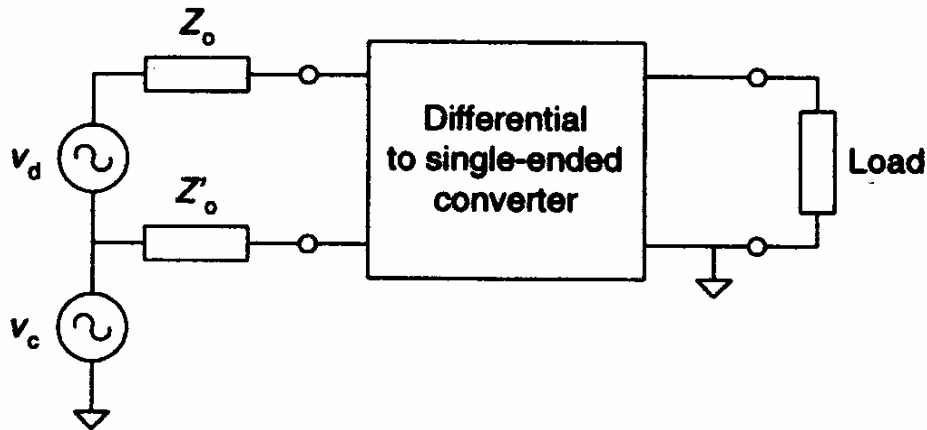


(d)

(a) Comparación de niveles. (b) Problemas de falsos disparos debido a ruido. (c) Histéresis en comparación de niveles en (d) reduce problemas de disparo debido a ruido.



## Adaptación de terminales

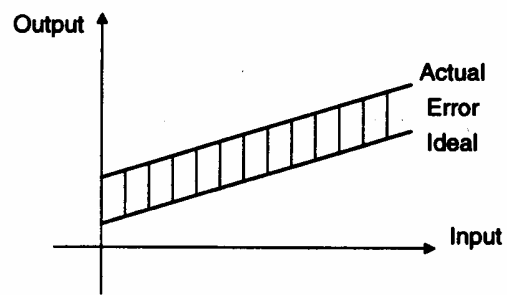


*Adaptar una señal diferencial a un carga asimétrica aterrizada requiere un convertidor diferencial a asimétrico.*

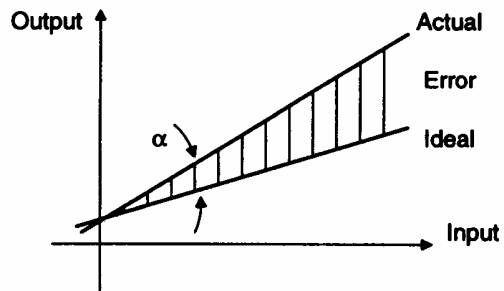
## ERRORES

El criterio de rendimiento para el procesamiento analógico de señal se establece en base a los requerimientos de: *exactitud, resolución y ancho de banda, además del costo.*

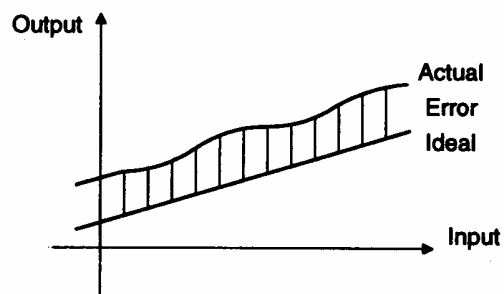
- Absolutos y relativos.
- Aditivos (cero), multiplicativos (ganancia) y no linealidad.
- Sistemáticos y aleatorios. (naturaleza)
- Estáticos y dinámicos. (influencia sobre entradas lentas o rápidas)



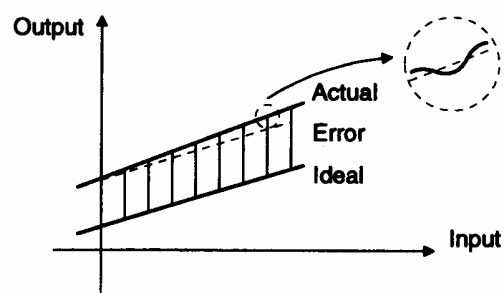
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Error cero. (b) Error de ganancia para un sistema sin error cero. (c) Error de no linealidad. (d) Error total.

**Errores dinámicos estacionarios** (el error depende de la entrada al sistema)

Sistema pasa-bajos de primer orden: (Función de transferencia)

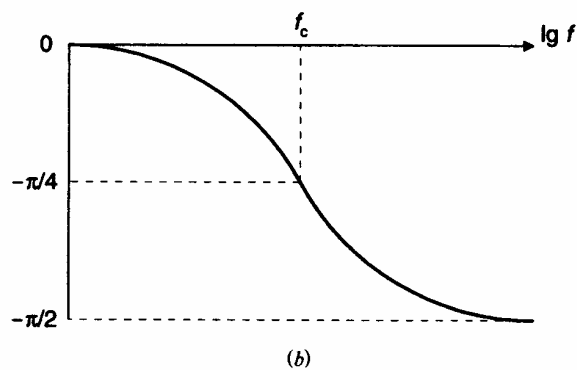
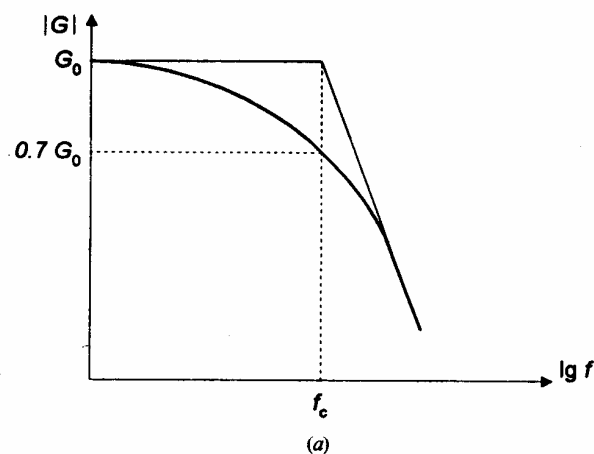
$$G(f) = G_0 \frac{f_c}{jf + f_c}$$

donde:

$G_0$  respuesta en baja frecuencia (ganancia en general)

$f_c$  frecuencia corte: caracteriza su respuesta dinámica,  $2\pi f_c = \frac{1}{\tau}$

Para un error dinámico cero:  $G(f) = G_0$



Respuesta de un circuito pasa-bajos de primer orden. (a) amplitud (b) fase.

El error de amplitud relativo será:

$$\varepsilon_{|G|} = \frac{|G| - |G_0|}{|G_0|}$$

donde:  $|G_0| = G_0$  y:

$$|G| = \frac{G_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Si el error de magnitud relativo máximo aceptado en frecuencias más bajas que  $f_\varepsilon$  es  $\varepsilon$ , entonces la frecuencia de corte debe ser suficientemente alta de tal manera que:

$$1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_\varepsilon}{f_c}\right)^2}} \leq \varepsilon$$

por lo tanto:

$$f_c \geq \frac{f_\varepsilon (1 - \varepsilon)}{\sqrt{2\varepsilon - \varepsilon^2}} \approx \frac{f_\varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} \quad \text{siempre que: } \varepsilon \ll 1$$

$f_c$  para un sistema pasa-bajos de primer orden procesando una señal debe ser de 50 a 100 veces el componente de máxima frecuencia para que el error sea mínimo.

---



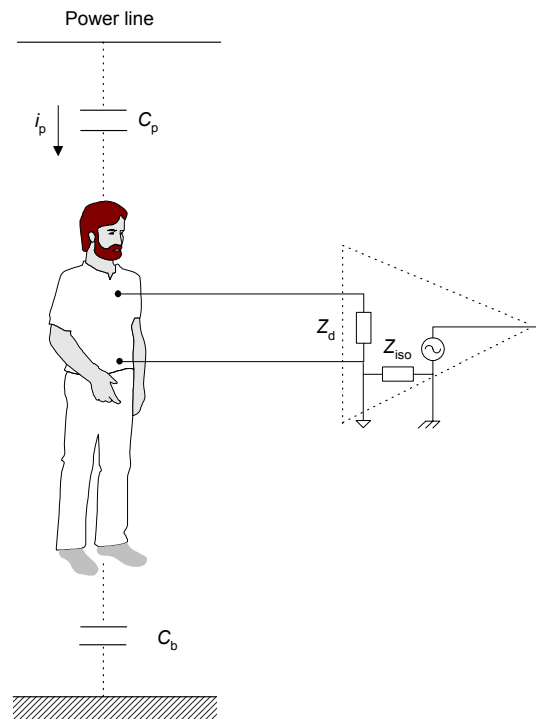
---

$\epsilon$	$f_c / f_\epsilon$	$\epsilon$	$f_c / f_\epsilon$
$10^{-2}$	7	$10^{-4}$	71
$2^{-8}$	11.3	$2^{-14}$	91
$10^{-3}$	22.4	$2^{-16}$	181
$2^{-10}$	22.6	$2^{-18}$	362
$2^{-11}$	32	$2^{-20}$	724
$2^{-12}$	45.5	$2^{-22}$	1448
$2^{-13}$	64		

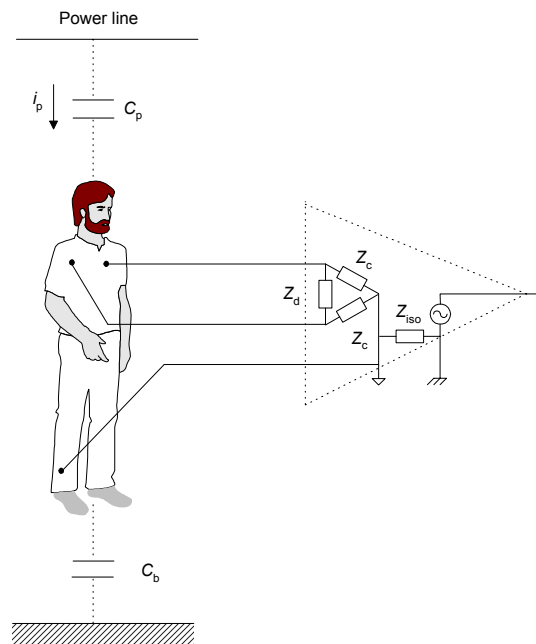
---

*Frecuencia de corte  $f_c$  para un sistema pasa-bajos de primer orden cuando el error de amplitud máxima aceptado para frecuencias debajo de  $f_\epsilon$  es  $\epsilon$ .*

### Amplificación de voltaje

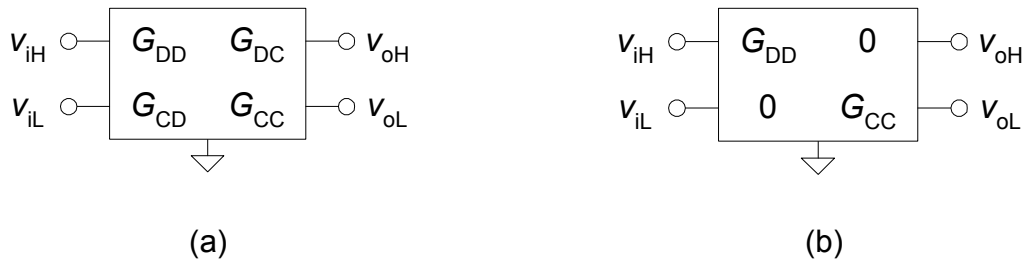


### Interferencia de red en amplificador asimétrico



### Sistema de medida diferencial

### Amplificador diferencial ideal



- (a) Funciones de transferencia para un amplificador diferencial completo.  
 (b) Para un amplificador ideal éstas se reducen a dos.

$$\begin{aligned}
 v_{iD} &= v_{iH} - v_{iL} \\
 v_{iC} &= \frac{v_{iH} + v_{iL}}{2} \\
 v_{oH} &= v_{oC} + \frac{v_{oD}}{2} \\
 v_{oL} &= v_{oC} - \frac{v_{oD}}{2}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 G_{DD} &= \left. \frac{V_{oD}}{V_{iD}} \right|_{v_{iC}=0} \\
 G_{CD} &= \left. \frac{V_{oC}}{V_{iD}} \right|_{v_{iC}=0} \\
 G_{CC} &= \left. \frac{V_{oC}}{V_{iC}} \right|_{v_{iD}=0} \\
 G_{DC} &= \left. \frac{V_{oD}}{V_{iC}} \right|_{v_{iD}=0}
 \end{aligned}$$

Aplicando principio de superposición, los voltajes de salida para el amplificador lineal serán:

$$\begin{aligned}
 V_{oD} &= G_{DD}V_{iD} + G_{DC}V_{iC} \\
 V_{oC} &= G_{CD}V_{iD} + G_{CC}V_{iC}
 \end{aligned}$$

Ideal:  $G_{DC} = 0$   
 $G_{CD} = 0$

Factor de discriminación :  $D = \frac{G_{DD}}{G_{CC}}$

**Amplificador diferencial real: factores de mérito**

$$CMRR = C = \frac{G_{DD}}{G_{DC}}$$

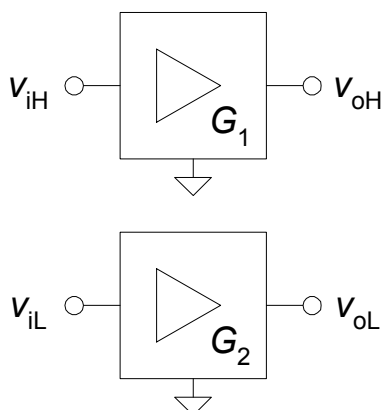
Factor de exclusión :  $E = \frac{G_{CD}}{G_{DD}}$

$$V_{oD} = G_{DD}V_{iD} + G_{DC}V_{iC} = G_{DD}\left(V_{iD} + \frac{V_{iC}}{C}\right)$$

$$V_{oC} = G_{CD}V_{iD} + G_{CC}V_{iC} = G_{CC}(V_{iC} + V_{iD}ED)$$

**Ejemplo: etapas no acopladas.**

**Amplificador diferencial completo formado por dos amplificadores asimétricos paralelos no acoplados con ganancias  $G_1$  y  $G_2$ .**



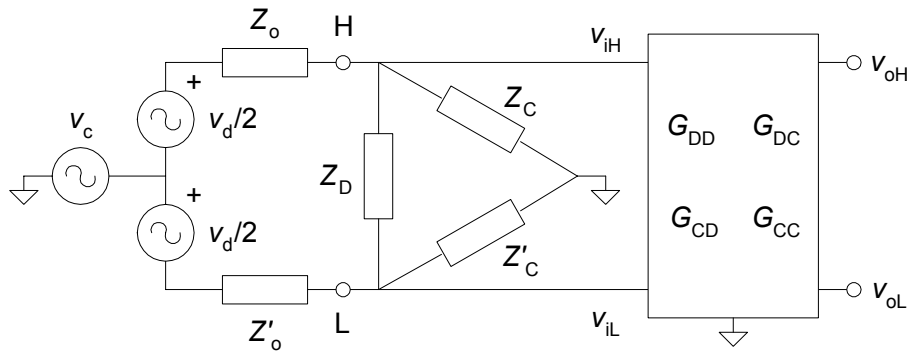
$$D = \frac{G_{DD}}{G_{CC}} = 1$$

$$C = \frac{G_{DD}}{G_{DC}} = \frac{1}{2} \frac{G_1 + G_2}{G_1 - G_2}$$

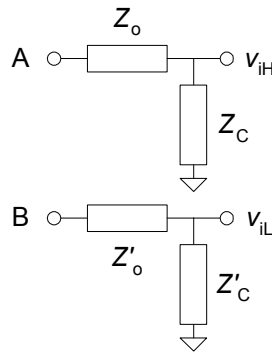
$$E = \frac{G_{CD}}{G_{DD}} = \frac{(G_1 - G_2)/4}{(G_1 + G_2)/2} = \frac{1}{4C}$$



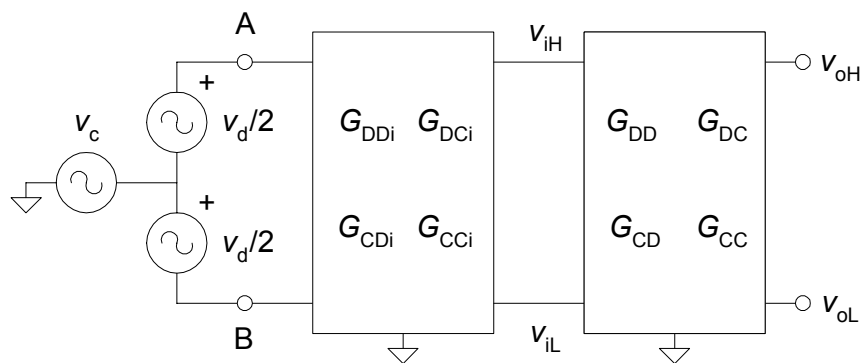
### Amplificador diferencial real: efecto impedancias entrada



El efecto de las impedancias de entrada finitas se analiza considerando una red de impedancias que precede al amplificador.



(a)



(b)

(a) Circuito equivalente para la red de impedancias cuando  $Z_d$  es muy grande.

(b) Función de transferencia para la red de impedancias en (a):

Desbalances de impedancias pueden describirse mejor por valores de impedancia promedio ( $Z_{ca}$ ,  $Z_{oa}$ ) y de diferencia ( $\Delta Z_c$ ,  $\Delta Z_o$ ):

$$\left. \begin{aligned} Z_C &= Z_{Ca} + \frac{\Delta Z_C}{2} \\ Z'_C &= Z_{Ca} - \frac{\Delta Z_C}{2} \end{aligned} \right| \quad \left. \begin{aligned} Z_o &= Z_{oa} + \frac{\Delta Z_o}{2} \\ Z'_o &= Z_{oa} - \frac{\Delta Z_o}{2} \end{aligned} \right|$$

Calculando factor de mérito C ( $G_{DDi}/G_{DCi}$ ) para bloque de impedancias:

$$C_i = \frac{Z_C(Z_C + Z'_o) + Z'_C(Z_C + Z_o)}{2(Z_{oa}\Delta Z_C - Z_{Ca}\Delta Z_o)} \cong \frac{Z_{Ca}}{Z_{oa}} \frac{1}{\frac{\Delta Z_C}{Z_{Ca}} - \frac{\Delta Z_o}{Z_{oa}}}$$

Se muestra que desbalances ya sea en la impedancia de la fuente de salida o la impedancia de entrada en modo común resultan en una conversión de señal en modo común a señal diferencial en la entrada del amplificador. Esta relación de conversión disminuye cuando  $Z_{ca}$  es mucho mayor que  $Z_{oa}$ .

Calculando la relación de rechazo en modo común efectiva ( $C_e$  o  $CMRRe$ ) a partir del voltaje de salida diferencial en el amplificador:

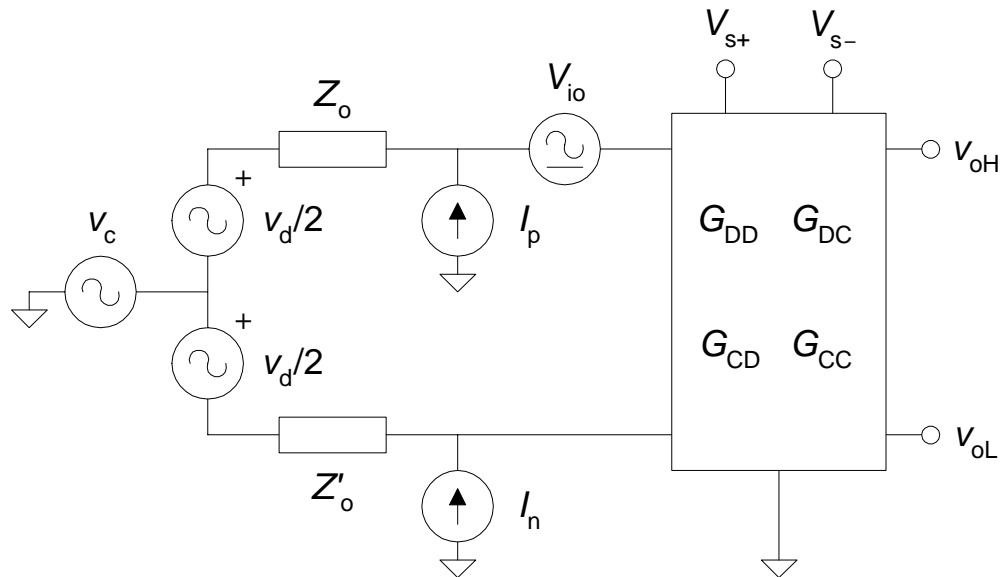
$$C_e = \frac{G_{DD}G_{DDi} + G_{DC}G_{CDi}}{G_{DD}G_{DCi} + G_{DC}G_{CCi}} = \frac{1}{C_i^{-1} + C_a^{-1}} + \frac{1}{4(C_i + C_a)}$$

$$\frac{1}{C_e} \cong \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_a}$$

Donde  $C_a$  es el CMRR del amplificador y  $C_i$  el CMRR del bloque de impedancias, normalmente  $C_e$  será menor que  $C_a$  debido al desbalance de impedancias  $Z_o$  y  $Z_c$ .

$Z_D$  finita no altera el resultado

### Errores en amplificadores de voltaje reales



$$v_{oD} = G(1 \pm \epsilon_G) \left( v_d + \frac{v_c}{\text{CMRR}_e} + \frac{\Delta V_{S+}}{\text{PSRR}_+} + \frac{\Delta V_{S-}}{\text{PSRR}_-} + \text{IZE} + E_{ni} \right)$$

$$\text{IZE} = V_{io} + \frac{\Delta V_{io}}{\Delta T} (T - T_0) + \left( \frac{\Delta V_{io}}{\Delta t} \right) \Delta t + I_p R_o - I_n R'_o + \left( \frac{\Delta I_p}{\Delta T} R_o - \frac{\Delta I_n}{\Delta T} R'_o \right) (T - T_0)$$

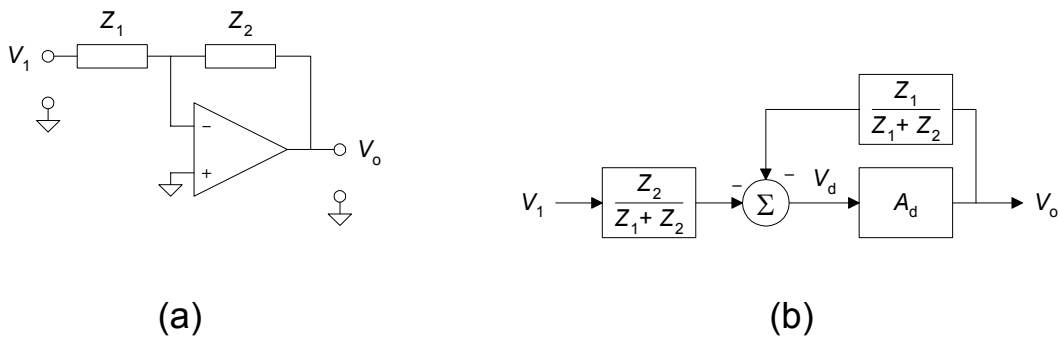
$$T = T_a + P_d (\theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}) = T_a + P_d \theta_{ja};$$

$$P_d = |V_{S+}| |I_{S+}| + |V_{S-}| |I_{-}|$$

### Propiedades de la retroalimentación negativa

Características de la ganancia de DC del Amp. Op.:

- Muy grande (un pequeño voltaje de entrada saturará su salida).
- Variable de unidad a unidad.
- Depende de las corrientes de alimentación.
- Es una función no lineal del voltaje de entrada.
- Coeficiente de temperatura grande.



**Fig. 2.2** (a) Amplificador operacional con retroalimentación en voltaje; (b) diagrama a bloques equivalente

$$V_o = -V_1 \frac{Z_2/Z_1}{1 + 1/A_d\beta} \cong -V_1 \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\beta = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$G(f) = \frac{G_0}{1 + j \frac{f}{f_G}}$$

$$f_G = f_T\beta$$

**Bloques integrados para amplificación de voltaje**

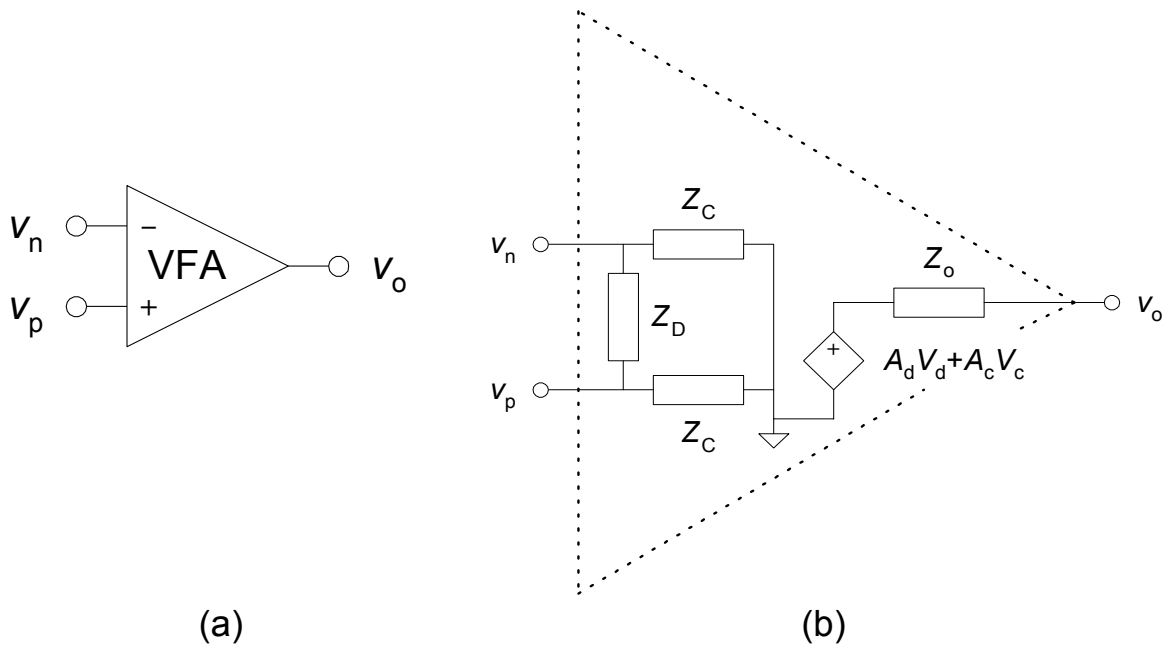
**– Amplificador operacional retroalimentado en voltaje (VFA)**

Amplificadores de voltaje con entrada diferencial y usualmente salida asimétrica ( $G_{cd} = G_{cc} = 0$ )

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c$$

donde:  $V_d = V_p - V_n$ ,  $V_c = (V_p + V_n) / 2$

$A_d = G_D = G_{DD}$ ,  $A_c = G_C = G_{DC}$



**Fig. 2.1** Amplificador operacional retroalimentado en voltaje (VFA)  
 (a) símbolo (b) circuito equivalente

Amp. Op. tienen una ganancia de voltaje diferencial de DC muy grande ( $10^5$  a  $10^7$  para modelos de baja frecuencia), generalmente con un decremento de 20 dB/década a partir de una frecuencia  $f_a$ , aproximadamente desde 0.1 Hz (OPA77) hasta 200 kHz (OPA620).

$$A_d = A_{do} \frac{f_a}{jf + f_a} = \frac{f_T}{jf + f_a} = G_{DD}$$

donde:  $A_{do}$  – ganancia diferencial de DC.

$f_T = A_{do} f_a$ , producto ganancia-ancho de banda (GBP) o ancho de banda unitario para el Amp. Op. ( $|A_d(f_T)| = 1$ )

$$|G_{DC}| = |G_{DD}| / |\text{CMRR}|$$

– Impedancias de entrada (dependen de la tecnología del IC):

- 1 M $\Omega$  a 1 P $\Omega$ , mayores en modelos con entradas tipo FET y CMOS que para modelos con entradas BJT. En paralelo con estas resistencias se colocan capacidades de 2 pF a 10 pF.

– La resistencia de salida en general es menor de 100  $\Omega$ .

– Voltajes de offset y corrientes de entrada con sus respectivos coeficientes de temperatura dependen de la tecnología del IC, los rangos normales son:

- $V_{io}$  de 1 mV a 1  $\mu$ V con derivas tan bajas como 0.01  $\mu$ V/  $^{\circ}$ C.
- $I_b$  de 10 nA a 1 pA pero hay modelos con  $I_b$  de 10 fA.
- Amp. Op. con entradas BJT : corrientes de entrada mayores pero voltajes de offset y derivas menores.
- Amp. Op. con entradas FET : corrientes de entrada menores pero derivas mayores ( $I_b$  se duplica por cada incremento de 10  $^{\circ}$ C), y voltajes de offset y derivas mayores.
- Las corrientes de entrada y la impedancia también dependen del voltaje de modo común y las fuentes de alimentación. (efectos de segundo orden)

– CMRR es muy alto en DC (80 dB a 130 dB) y disminuye a partir de frecuencias mayores de  $f_a$ .

- Este CMRR se aplica solamente para voltajes de modo común  $V_c$ ; bajos o medios, valores mayores de  $V_c$  implican un comportamiento no lineal que no puede describirse por una función de transferencia.

– PSRR es de 80 dB a 110 dB en DC y disminuye a partir de frecuencias que pueden ser diferentes para cada fuente de voltaje (Amp. Op. con  $V_{io}$  bajo deben tener CMRR y PSRR alto).

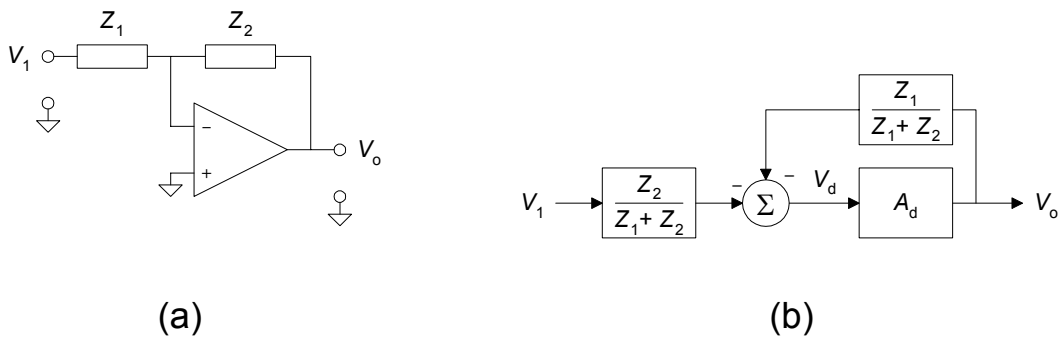
– Distorsión no lineal en Amp. Op. surge debido a:

- Limitaciones de slew rate. (Rangos a partir de  $0.1 \text{ V}/\mu\text{s}$  y mayores de  $1000 \text{ V}/\mu\text{s}$ ; en una onda senoidal el SR mayor se tiene en los cruces por cero, donde la pendiente es  $2\pi f V_p$ , por lo que se requiere tener  $2\pi f V_p < \text{SR}$ .)
- Saturación de voltaje y corriente de salida. (Se presenta cuando el voltaje de salida es cercano a cualquiera de las fuentes de alimentación y cuando la corriente de salida excede una corriente especificada, que tiene un rango de 10 mA a 40 mA, dependiendo de los modelos. Amp. Op. CMOS y de bajo voltaje de alimentación tiene un rango de salida dinámico mayor que la de los Amp. Op. comunes.)
- La no-linealidad de la ganancia se corrige por retroalimentación.

**Propiedades de la retroalimentación negativa**

Características de la ganancia de DC del Amp. Op.:

- Muy grande (un pequeño voltaje de entrada saturará su salida).
- Variable de unidad a unidad.
- Depende de las corrientes de alimentación.
- Es una función no lineal del voltaje de entrada.
- Coeficiente de temperatura grande.



**Fig. 2.2** (a) Amplificador operacional con retroalimentación en voltaje; (b) diagrama a bloques equivalente

Debido a la alta impedancia de entrada, la corriente de entrada al Amp. Op. es despreciable por lo tanto:

$$\frac{V_1 + V_d}{Z_1} = \frac{V_d - V_o}{Z_2}$$

Como  $V_p = 0$  y  $V_d$  es muy pequeña debido a la alta ganancia del Amp. Op., entonces  $V_c \approx 0$ , entonces:

$$V_o = A_d V_d \qquad V_o = - \left( V_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} + V_o \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) A_d$$

$$\beta = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \qquad \text{Factor de retroalimentación}$$



Resolviendo para  $V_o$  se tiene:

$$V_o = -V_1 \frac{Z_2/Z_1}{1 + 1/A_d\beta} \quad \text{sí } A_d\beta \gg 1 \quad V_o = -V_1 \frac{Z_2}{Z_1}$$

donde:  $-\frac{Z_2}{Z_1}$  *Ganancia de voltaje en lazo cerrado*

$A_d\beta$  *Ganancia de lazo*;  $A_d$  *Ganancia de lazo abierto*

En altas frecuencias,  $f \gg f_a$  entonces:  $A_d \approx A_{d0} \frac{f_a}{jf}$

$$V_o = -V_1 \frac{Z_2/Z_1}{1 + j \frac{f}{A_{d0}f_a\beta}} = -V_1 \frac{Z_2/Z_1}{1 + j \frac{f}{f_G}}$$

donde:  $f_G = A_{d0}f_a\beta = f_T\beta$

$$G(f) = \frac{G_0}{1 + j \frac{f}{f_G}}$$

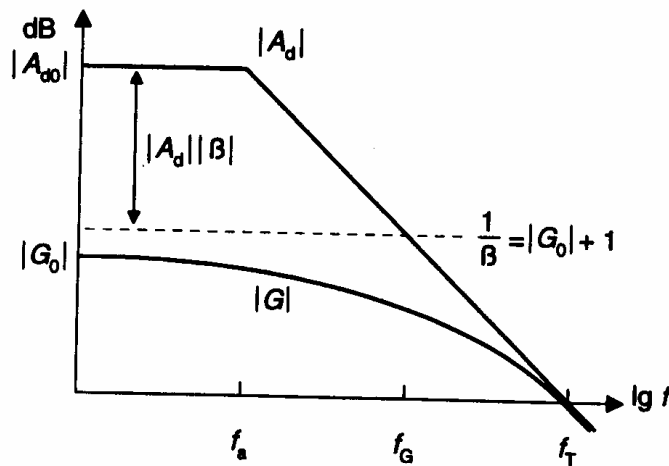


Fig. 2.3 Ganancia del circuito de la Fig. 2.2 cuando  $Z_1=R_1$  y  $Z_2=R_2$ .

**Amp. Op. con retroalimentación positiva y negativa**

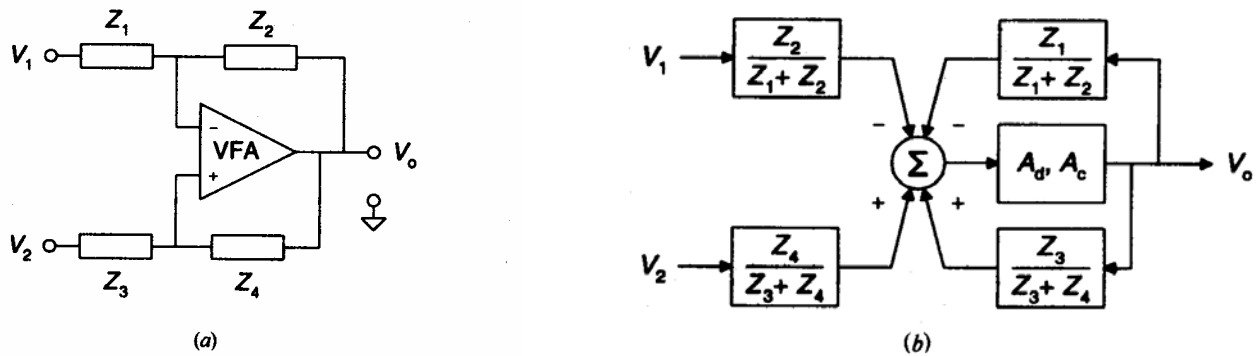


Fig. 2.4 (a) Retroalimentación positiva y negativa en un Amp. Op.  
(b) diagrama a bloques equivalente.

En bajas frecuencias,  $A_c \ll A_d$ :

$$V_o = A_d \left[ V_o \left( \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) - V_1 \left( \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) + V_2 \left( \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) \right]$$

$$V_o = \frac{A_d \left( V_2 \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} - V_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)}{1 + A_d \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right)}$$

Definiendo factores de retroalimentación positivo y negativo, factor neto de retroalimentación y las relaciones de alimentación:

$$\beta_n = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \beta_p = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \quad \beta = \beta_n - \beta_p$$

$$\alpha_n = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \alpha_p = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4}$$

$$V_O = \frac{(V_2 \alpha_p - V_1 \alpha_n) / \beta}{1 + \frac{1}{Ad\beta}}$$

Con  $Ad\beta$  muy grande el funcionamiento del circuito será cercano al ideal, al igual que para el circuito que tiene retroalimentación negativa.

Si el factor neto de retroalimentación es negativo (más retroalimentación positiva que negativa) el circuito tenderá a saturarse o a oscilar. Para prevenirlo es necesario que  $\beta > 0$  para todo el ancho de banda, por lo tanto:

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} > \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$$

## Amplificadores de diferencia (DA)

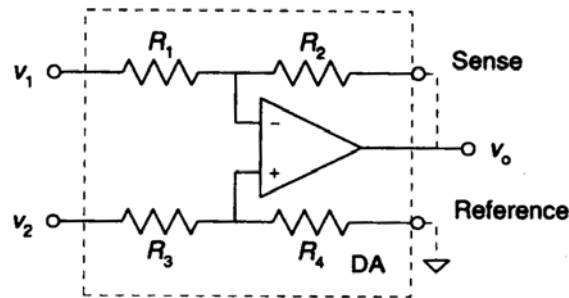


Fig. 2.7 Amplificador de diferencia (DA) que contiene un Amp. Op. Integrado y una red de resistencias de película de metal apareadas.

La F.T. de muchos circuitos basados en amp. op. depende de la relación y el apareamiento entre pares de resistencias más que de su valor absoluto.

Los amplificadores de lazo cerrado que incluyan el amp. op. y los resistores apareados en el mismo chip estarán apareados en temperatura, estos C.I. son los **amplificadores de diferencia (DA)** para distinguirlos de los **amplificadores diferenciales** contruidos con amp. op. y resistencias discretas.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = k$$

$$V_o = (V_2 - V_1) \frac{kf_a}{jf + f_a} = \frac{f_T}{jf + f_a} = G_{DD}$$

donde:  $f_T = kf_a$

Ejemplos: - INA105, INA106, AMP03

( $f_T = 1$  MHz,  $k=1-10$ ,  $CMRR \approx 100$  dB en DC y bajas frecuencias)

- INA117, AD626

**Desventaja:** Baja impedancia de entrada (en modo diferencial y común).

### Amplificadores de instrumentación (IA)

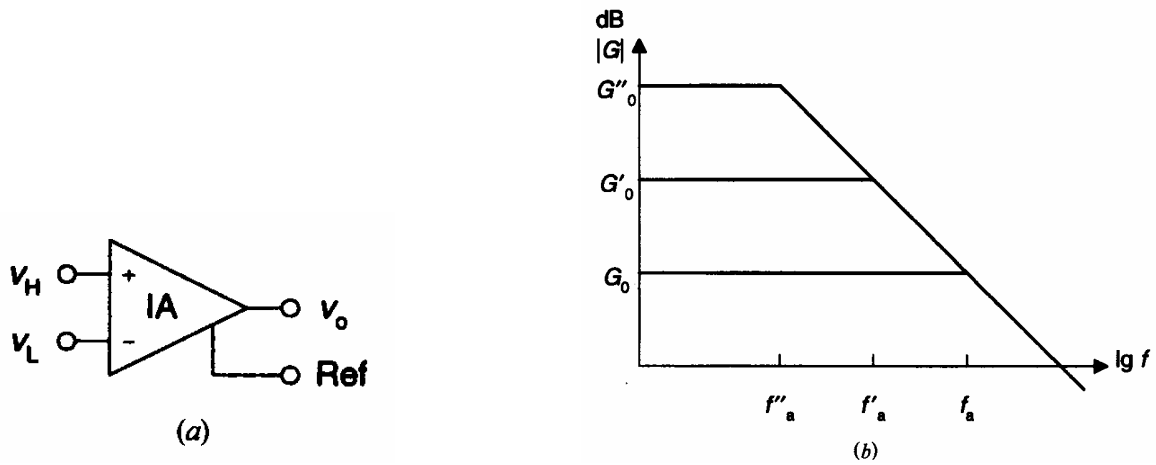


Fig. 2.8 (a) Símbolo y (b) ganancia para amplificadores de instrumentación (IAs).

- Amplificadores de lazo cerrado con entrada diferencial y salida asimétrica.
- Impedancia de entrada alta (en modo diferencial y común)
- Impedancia de salida baja.
- Entrada diferencial pero cualquiera de sus terminales de entrada puede ser aterrizada para implementar un amplificador asimétrico.
- F.T. no depende de componentes externos conectados a las terminales de entrada de la señal, ya que la ganancia se coloca internamente con resistores integrados, aunque en algunos modelos se puede modificar con componentes externos.
- Ancho de banda se reduce al aumentar la ganancia.

$$G_0 f_a \approx G'_0 f'_a \approx G''_0 f''_a$$

- Producto ganancia-ancho de banda mayor que la de los amp. op. comunes.