

Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Tema 6. El Amplificador Operacional

Isabel M. Tienda Luna

Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores
Universidad de Granada

isabelt@ugr.es

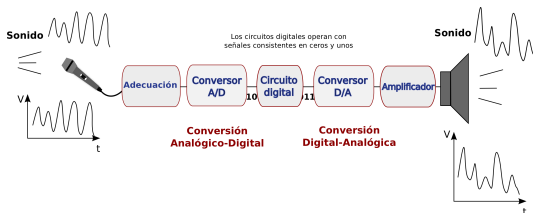
GIADE-GIM
Curso 2020-2021

- 1 Introducción
- 2 Características de los Amplificadores
- 3 El Amplificador Operacional
- 4 Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

- 1 Introducción
- 2 Características de los Amplificadores
- 3 El Amplificador Operacional
- 4 Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

Introducción

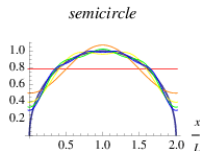
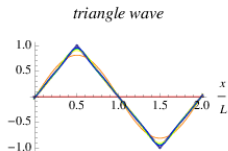
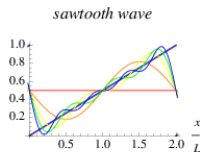
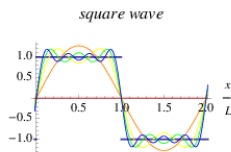
- Las señales contienen información sobre los fenómenos que ocurren en el mundo que nos rodea.
- Para extraer esta información, es necesario procesar dichas señales de la forma más conveniente por sistemas electrónicos.
- Para ello, las señales deben de convertirse en señales eléctricas (voltaje o corriente) por medio de transductores. Pero los transductores producen señales débiles \Rightarrow Necesitamos **amplificar** las señales.



Introducción

- Una caracterización muy útil de una señal es en términos de su **espectro de frecuencias**. El espectro de frecuencias de una señal se calcula mediante una serie de herramientas matemáticas (series de Fourier o transformada de Fourier) que permiten representar la señal como suma de señales sinusoidales de diferentes frecuencias y amplitudes.

$$v(t) = \sum_i V_i \cos(\omega_i t)$$



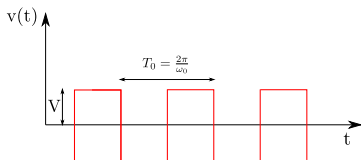
Introducción

- En el **espectro de frecuencias** se representa en el eje X la frecuencia (ω_i) de cada uno de los cosenos de la suma y en el eje Y la amplitud correspondiente a cada función coseno (V_i)

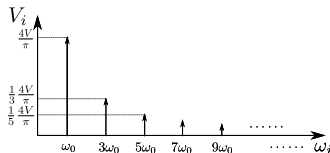
$$v(t) = \sum_i V_i \cos(\omega_i t)$$

- Ejemplo:** señal cuadrada periódica de frecuencia ω_0

Dominio del tiempo



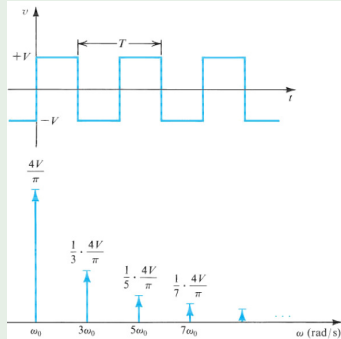
Dominio de la frecuencia



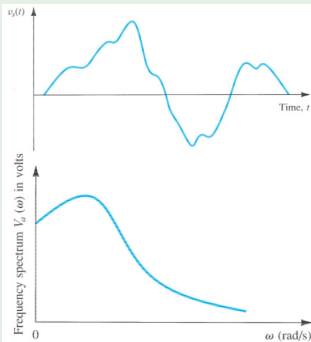
Introducción

- De esta forma, una señal puede representarse en el dominio del tiempo ($v(t)$) o en el dominio de la frecuencia ($V_i(\omega)$). Y en el proceso de amplificación han de tenerse en cuenta ambas representaciones.

Señal Periódica



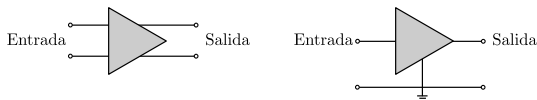
Señal Arbitraria



- 1 Introducción
- 2 Características de los Amplificadores
- 3 El Amplificador Operacional
- 4 Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

Generalidades

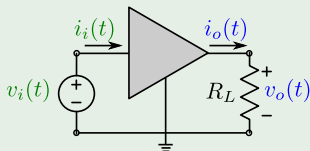
- La **amplificación** es una función fundamental en el procesamiento de las señales que consiste en obtener a la salida del sistema amplificador una réplica de la señal de entrada pero de mayor magnitud.
- Representación en circuitos:



- Diferentes tipos dependiendo de las entradas y salidas. Nos centraremos principalmente en los de voltaje aunque también hablaremos de los de corriente.
- La mayoría de los amplificadores se diseñan para ser **lineales**: la señal de salida es una réplica exacta de la de entrada, salvo que tiene mayor magnitud. En este tema nos centraremos en este tipo de amplificadores.
- Amplificadores **no lineales**: distorsión de la señal de salida.

Ganancia: definición y característica de transferencia

Circuito



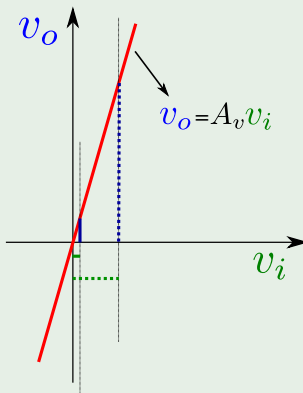
- Ganancia de voltaje.

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

- Ganancia de corriente.

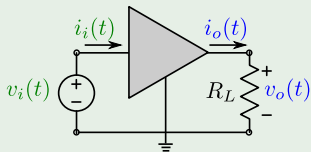
$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i}$$

Característica de Transferencia



Ganancia: definición y característica de transferencia

Circuito



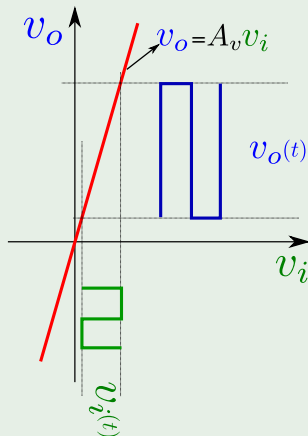
- Ganancia de voltaje.

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

- Ganancia de corriente.

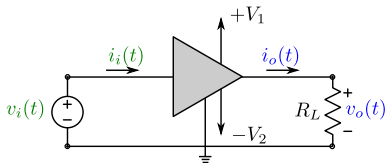
$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i}$$

Característica de Transferencia



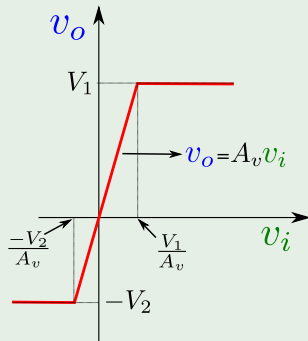
Ganancia: Fenómeno de Saturación

- La **alimentación** (fuentes V_1 y $-V_2$) es necesaria para que el amplificador funcione y limita su comportamiento.

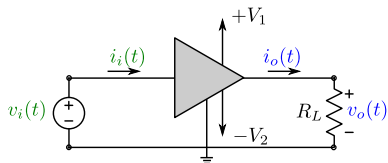


- Condiciones ideales: $-V_2 \leq v_o(t) \leq V_1$
- Alimentación simétrica: $V_1 = +V_{CC}$ y $V_2 = -V_{CC} \Rightarrow -V_{CC} \leq v_o(t) \leq +V_{CC}$
- Fenómeno de **Saturación**. La característica de transferencia permanece lineal sólo un intervalo limitado de voltajes de entrada y salida.

Característica de Transferencia ideal



Ganancia: Fenómeno de Saturación



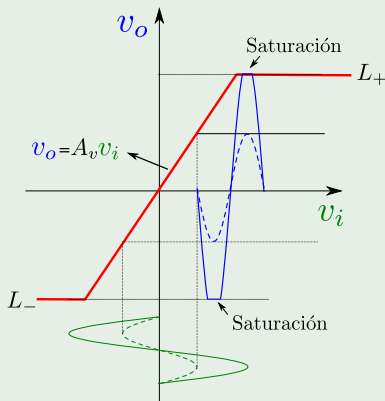
- Condiciones reales:

$$-V_2 < L_- \leq v_o(t) \leq L_+ < V_1$$

- L_+ y L_- son los valores de saturación positivos y negativos respectivamente.
- Para evitar la saturación:

$$\frac{L_-}{A_v} \leq v_i(t) \leq \frac{L_+}{A_v}$$

Caraterística de Transferencia real y funciones temporales



Ejemplo de Saturación

Supongamos que $A_v = \frac{v_o}{v_i} = 3$, $L_+ = 15V$ y $L_- = -15V$, entonces para un instante t :

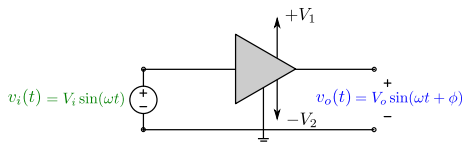
- Si $v_i(t) = 2V \Rightarrow v_o(t) = 3 \cdot 2V = 6V$, como $6V < L_+ \Rightarrow v_o(t) = 6V$
- Si $v_i(t) = 4V \Rightarrow v_o(t) = 3 \cdot 4V = 12V$, como $12V < L_+ \Rightarrow v_o(t) = 12V$
- Si $v_i(t) = 6V \Rightarrow v_o(t) = 3 \cdot 6V = 18V$, como $18V > L_+ \Rightarrow v_o(t) = L_+ = 15V$
- Si $v_i(t) = -4V \Rightarrow v_o(t) = 3 \cdot (-4V) = -12V$, como $-12V > L_- \Rightarrow v_o(t) = -12V$
- Si $v_i(t) = -6V \Rightarrow v_o(t) = 3 \cdot (-6V) = -18V$, como $-18V < L_- \Rightarrow v_o(t) = L_- = -15V$

En este caso, para evitar la saturación:

$$\begin{aligned} \frac{L_-}{A_v} &\leq v_i(t) \leq \frac{L_+}{A_v} \\ \frac{-15V}{3} &\leq v_i(t) \leq \frac{15V}{3} \\ -5V &\leq v_i(t) \leq 5V \end{aligned}$$

Ganancia: Respuesta en frecuencia

- Estudiamos ahora la salida de amplificadores cuando la señal es una señal sinusoidal de frecuencia ω .

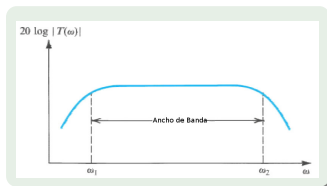


- La **respuesta en frecuencia** es una característica importante del amplificador. Permite estudiar cómo es la salida del amplificador para señales sinusoidales de entrada de distintas frecuencias.
- Matemáticamente la caracterizamos a través de la **función de transferencia** del propio amplificador ($T(\omega)$) que se calcula como siempre, cociente entre salida y entrada para cada frecuencia. En el ejemplo de la figura:

$$|T(\omega)| = \frac{V_o}{V_i} \quad \arg(T(\omega)) = \arg(V_o) - \arg(V_i) = \phi$$

Ganancia: Respuesta en frecuencia

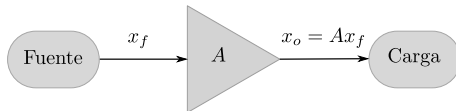
- Para calcular $T(\omega)$ es necesario analizar el modelo de circuito equivalente del amplificador: analizar en el dominio de la frecuencia con impedancias para obtener la función de transferencia.
- Para representar la respuesta en frecuencia se usa el diagrama de Bode, tanto en amplitud como en fase.
- El **ancho de banda** del amplificador es la banda de frecuencias sobre la que la ganancia del amplificador es casi constante, a menos de cierto número de decibelios (por lo general 3dB).



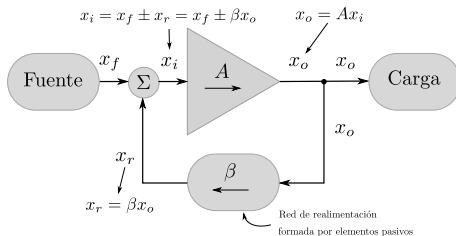
- A veces puede interesar que el amplificador tenga ganancias diferentes en diferentes intervalos. Ejemplo: audífono.

Realimentación

- Amplificador en **lazo abierto**: no existe conexión entre salida y entrada.

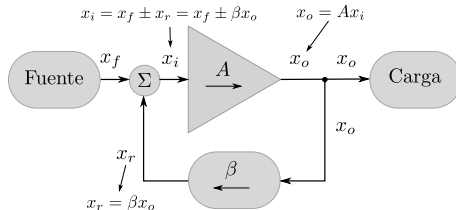


- Amplificador con **realimentación**: se establece una conexión entre salida y entrada.



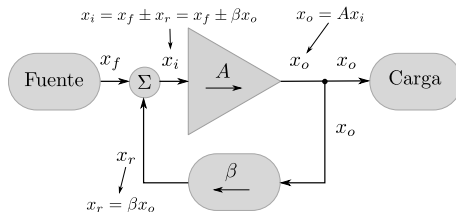
- La señal de entrada al amplificador (x_i) es la señal de la fuente (x_f) más (Realimentación positiva) o menos (Realimentación negativa) la procedente del lazo de realimentación (x_r).

Tipos de realimentación



- **Realimentación positiva:** $x_i = x_f + \beta x_o$. Normalmente β es grande $\Rightarrow x_i$ aumenta debido a la realimentación y el amplificador acaba entrando en saturación.
- **Realimentación negativa:** $x_i = x_f - \beta x_o$. Operando, $x_i = \frac{1}{1+\beta A} x_f$. Normalmente β es grande $\Rightarrow x_i$ disminuye debido a la realimentación hasta que en el equilibrio $x_i \simeq 0 \Rightarrow x_f \simeq \beta x_o$.

Realimentación negativa

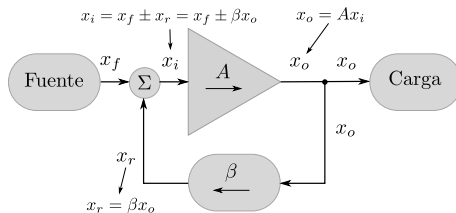


- Ganancia del amplificador realimentado A_r :

$$A_r = \frac{x_o}{x_f} = \frac{x_o}{x_i + x_r} = \frac{Ax_i}{x_i + \beta x_o} = \frac{Ax_i}{x_i + A\beta x_i} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

- Ganancia de lazo βA : normalmente βA es muy grande de manera que $A_r \approx \frac{1}{\beta}$: los elementos que haya en la realimentación controlan la ganancia que pasa a ser independiente del diseño del amplificador (desensibilización de la ganancia).

Realimentación negativa

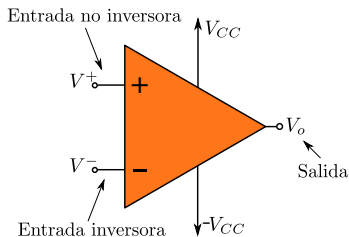


- Otras consecuencias de usar realimentación negativa son:
 - Se consigue hacer la ganancia constante e independiente del nivel de la señal de entrada
 - Se consigue reducir el efecto del ruido
 - Se consigue extender el ancho de banda

- 1 Introducción
- 2 Características de los Amplificadores
- 3 El Amplificador Operacional**
- 4 Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

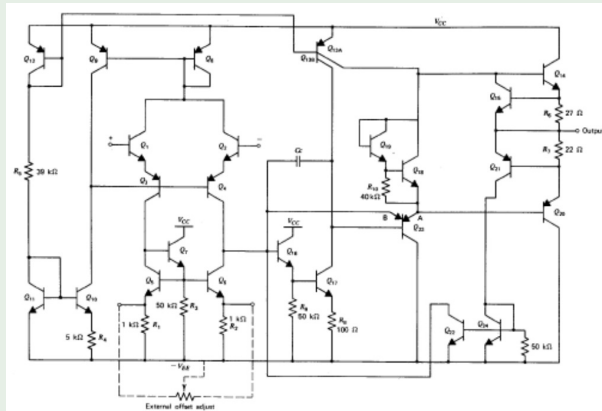
Características Generales

- El Amplificador Operacional (AO) es un amplificador de **gran ganancia**, utilizado para realizar operaciones lineales y no lineales sin más que cambiar los elementos externos tales como resistencias, condensadores, diodos, etc.
- Símbolo del Amplificador Operacional:



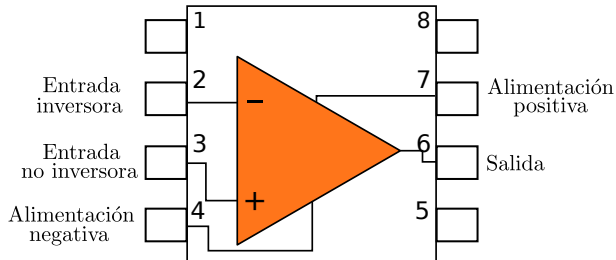
- Su **característica de transferencia** es igual a la de cualquier amplificador: con una zona lineal y dos zonas de saturación.
- La tierra del circuito, que es común para las entradas, la salida y las fuentes de alimentación, se encuentra fuera del amplificador.

Esquemático del AO 741: 24 transistores



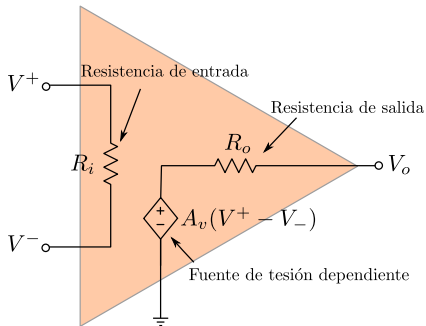
Chip

En el laboratorio se trabaja con el circuito integrado AO 741:



Modelo Lineal

- En la región **lineal** de la característica de transferencia del AO, su comportamiento puede modelarse con el siguiente circuito:

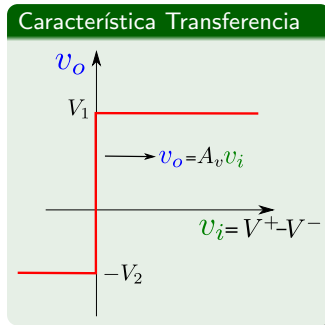
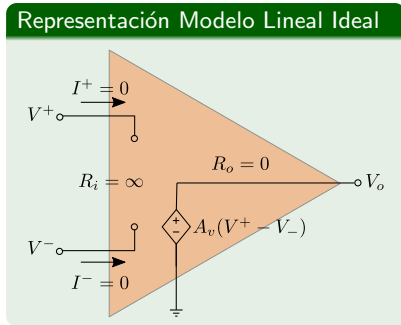


- Para que la ganancia del amplificador no se vea reducida, es deseable que R_i sea grande y R_o pequeña.

Modelo Lineal Ideal

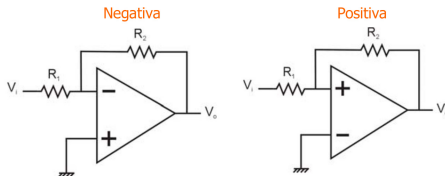
En el **Modelo Lineal Ideal** del AO se realizan las siguiente aproximaciones:

- Los límites de saturación son los voltajes de alimentación.
- A_v es muy grande $\Rightarrow A_v \rightarrow \infty$.
- R_i es muy grande $\Rightarrow R_i \rightarrow \infty$.
- R_o es muy pequeña $\Rightarrow R_o \rightarrow 0$ y $V_o = A_v(V^+ - V^-)$.
- Ancho de banda muy grande $\Rightarrow B \rightarrow \infty$.



Realimentación en el Amplificador Operacional

- Amplificador Operacional en **lazo abierto**: no existe conexión entre salida y entrada
 \Rightarrow como A_v es muy grande, el amplificador se satura \Rightarrow Circuito comparador.
- Amplificador Operacional con **realimentación**: se establece una conexión entre salida y entrada.
 - Para conseguir **realimentación positiva** la salida se conecta, usando una red de realimentación, a la entrada no inversora. Circuito comparador. Circuitos osciladores.
 - Para conseguir **realimentación negativa** la salida se conecta, usando una red de realimentación, a la entrada inversora. Principal característica: $V^+ = V^-$. Múltiples aplicaciones dependiendo de la red de realimentación.
- Ejemplos de circuitos con realimentación:

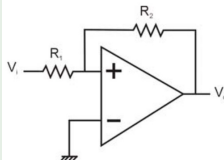


Realimentación en el Amplificador Operacional

Realimentación Positiva

- Si $V^- > V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) < 0 \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow V^+ \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow V_o$ se limita a $-V_{cc}$
- Si $V^- < V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) > 0 \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow V^+ \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow V_o$ se limita a $+V_{cc}$

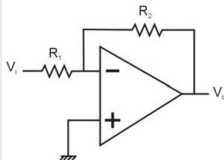
Realimentación Positiva



Realimentación Negativa

- Si $V^- > V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) < 0 \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow V^- \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow$ Equilibrio $V^- = V^+$
- Si $V^- < V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) > 0 \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow V^- \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow$ Equilibrio $V^- = V^+$

Realimentación Negativa



- 1 Introducción
- 2 Características de los Amplificadores
- 3 El Amplificador Operacional
- 4 Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional**

Generalidades

- El comportamiento del AO se considera **ideal** a la hora de analizar los circuitos.
- El AO opera en condiciones de **lazo cerrado**, en concreto con **retroalimentación negativa**.
- Las características del circuito dependerán de los valores externos.
- Las características del circuito son independientes de la ganancia interna del AO y de R_i y R_o .
- Los circuitos que vamos a estudiar son:
 - Configuración inversora y configuración no inversora.
 - Sumador inversor y sumador no inversor.
 - Derivador.
 - Integrador.

Configuración inversora

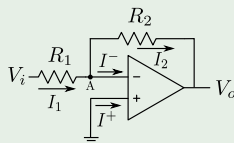
Análisis del circuito:

- Condiciones ideales: $I^- = I^+ = 0A$
- Leyes de Kirchoff: $\frac{V_i - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_o}{R_2}$
- Realimentación negativa: $V^- = V^+$
 \Rightarrow como $V^+ = 0V \Rightarrow V^- = 0V$

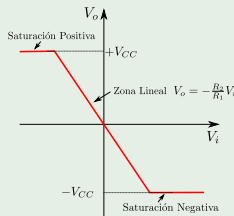
Característica de transferencia:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Circuito

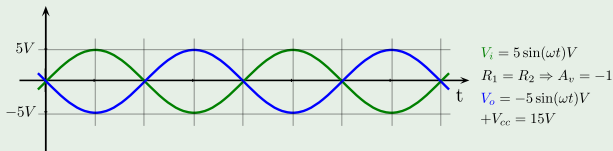


Transferencia

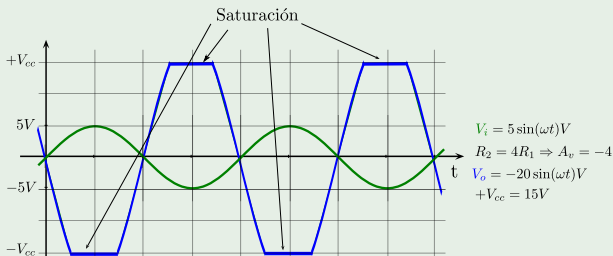


Configuración inversora

Ejemplo 1



Ejemplo 2



Configuración no inversora

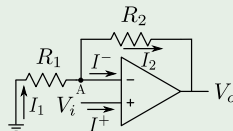
Análisis del circuito:

- Condiciones ideales: $I^- = I^+ = 0A$
- Leyes de Kirchhoff: $\frac{0 - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_o}{R_2}$
- Realimentación negativa: $V^- = V^+$
 \Rightarrow como $V^+ = V_i \Rightarrow V^- = V_i$

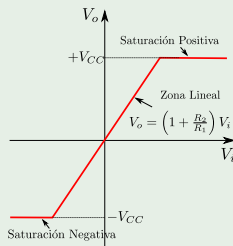
Característica de transferencia:

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

Circuito

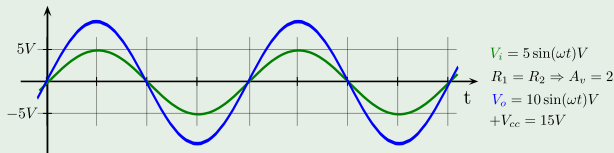


Transferencia

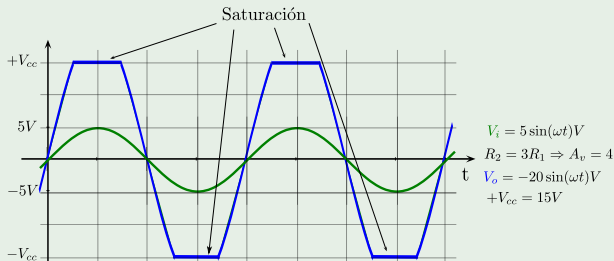


Configuración no inversora

Ejemplo 3



Ejemplo 4



Sumador

Análisis del circuito inversor:

- Condiciones ideales: $I^- = I^+ = 0A$
- Leyes de Kirchoff:

$$\frac{V_1 - V^-}{R_1} + \frac{V_2 - V^-}{R_2} = \frac{V^- - V_o}{R_F}$$
- Realimentación negativa: $V^- = V^+$
 $\Rightarrow \text{como } V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0$

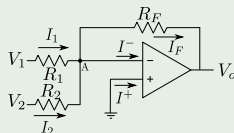
Característica de transferencia del inversor:

$$V_o = -R_F \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

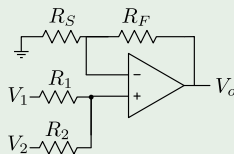
Si $R_1 = R_2 = R_F \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2)$

Analizar como ejercicio el no inversor:

Circuito inversor



Circuito no inversor



Derivador

Análisis del circuito:

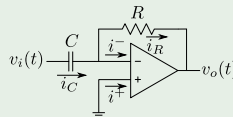
- Condiciones ideales: $i^- = i^+ = 0A$
- Realimentación negativa: $v^- = v^+ \Rightarrow$ como $v^+ = 0V \Rightarrow v^- = 0V$
- Ecuación para el condensador:

$$i_c(t) = C \frac{dv_i(t)}{dt}$$
- En el dominio del **tiempo**: la señal de salida es la derivada de la señal de entrada:

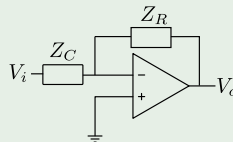
$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$
- En el dominio de la **frecuencia**:

$$V_o = -RCj\omega V_i \Rightarrow T(\omega) = -RCj\omega$$

Derivador dominio t

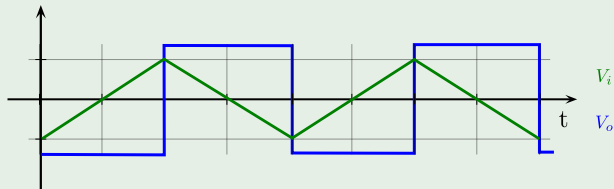


Derivador dominio ω

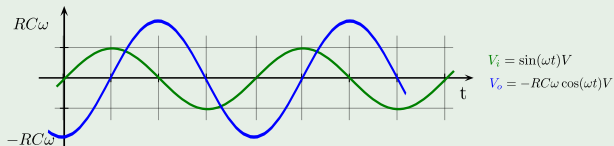


Derivador

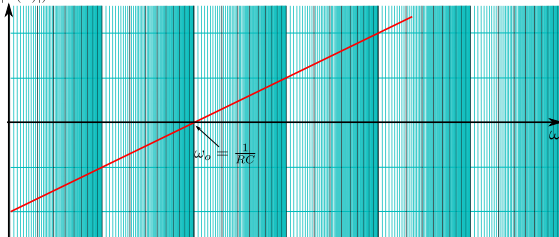
Ejemplo 5



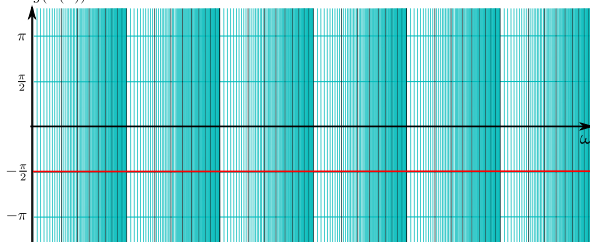
Ejemplo 6



Derivador

 $20 \log(|T(\omega)|)$


$$|T(\omega)| = RC\omega$$

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


$$\phi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$$

Integrador

Análisis del circuito:

- Condiciones ideales: $i^- = i^+ = 0A$
- Realimentación negativa: $v^- = v^+ \Rightarrow$ como $v^+ = 0V \Rightarrow v^- = 0V$
- Ecuación para el condensador:

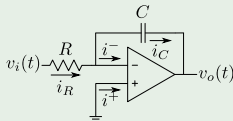
$$i_c(t) = C \frac{dv_o(t)}{dt}$$
- En el dominio del **tiempo**: la señal de salida es la integral de la señal de entrada:

$$v_i(t) = -RC \frac{dv_o(t)}{dt} \Rightarrow$$

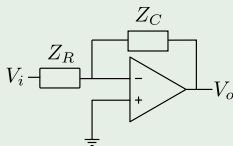
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$
- En el dominio de la **frecuencia**:

$$V_o = -\frac{1}{RCj\omega} V_i \Rightarrow T(\omega) = -\frac{1}{RCj\omega}$$

Integrador dominio t

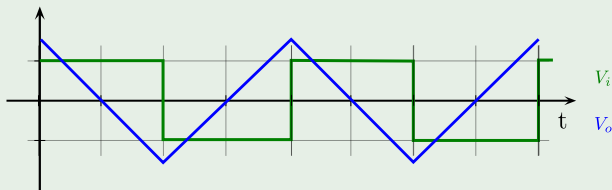


Integrador dominio ω

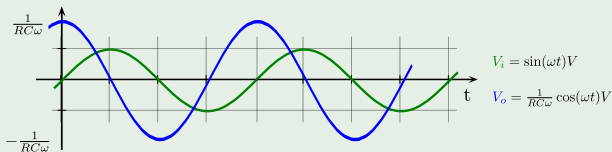


Integrador

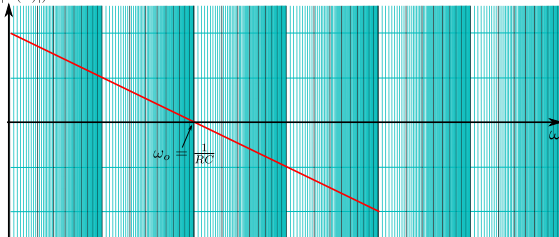
Ejemplo 7



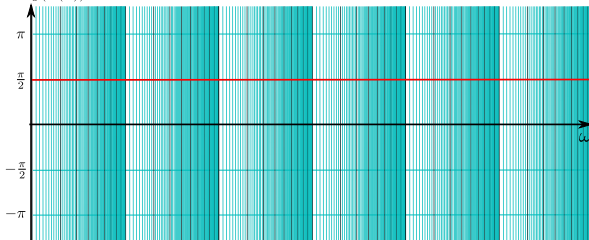
Ejemplo 8



Integrador

 $20 \log(|T(\omega)|)$


$$|T(\omega)| = \frac{1}{RC\omega}$$

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


$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2}$$

Integrador

- **Problema de estabilidad:** en continua el condensador se comporta como un circuito abierto y no hay realimentación negativa. Cualquier pequeña componente de continua en V_i teóricamente produce una salida infinita.

$$v_i(t) = \sin(\omega t) + k$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int (\sin(\omega t) + k) dt$$

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \left(-\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) + kt + V_o(0) \right)$$

- En la práctica, la salida del amplificador se satura a un voltaje cercano $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$, dependiendo de la polaridad de la señal de entrada.
- **Solución:** El problema de ganancia muy alta en continua del integrador se resuelve al conectar R_2 en paralelo con el condensador. Esta resistencia cierra el circuito de realimentación y proporciona una ganancia finita en continua de $-R_2/R_1$.

Integrador Modificado

- Al introducir la resistencia R_2 , la función de transferencia resultante es:

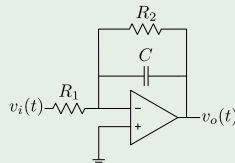
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1+R_2 C j \omega}$$

- Filtro paso-bajo de frecuencia de corte:

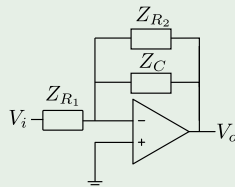
$$\omega_0 = (R_2 C)^{-1}$$

- Si $\omega > \omega_0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{1}{R_1 C j \omega}$
- El integrador resultante ya no es ideal, pero se puede reducir al mínimo la imperfección seleccionando una R_2 tan grande como sea posible.

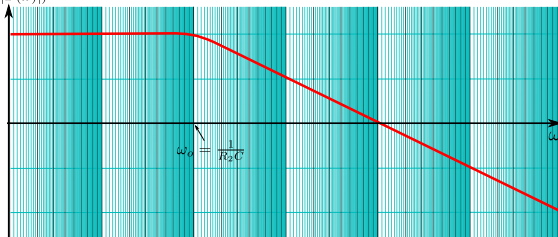
Integrador Modificado dominio t



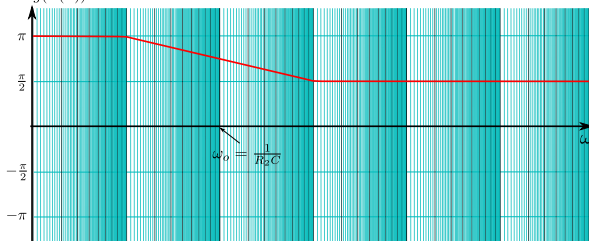
Integrador Modificado dominio ω



Integrador Modificado

 $20 \log(|T(\omega)|)$


$$|T(\omega)| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (R_2 C \omega)^2}}$$

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


$$\phi(\omega) = \pi - \arctan(R_2 C \omega)$$