

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

Grado en Informática
Curso 2012-2013

- 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

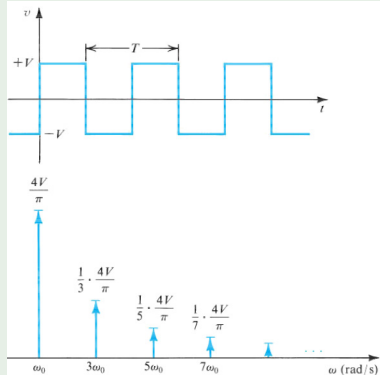
- Las señales contienen información sobre los fenómenos que ocurren en el mundo que nos rodea.
- Para extraer esta información, es necesario procesar dichas señales de la forma más conveniente por sistemas electrónicos.
- Para ello, las señales deben de convertirse en señales eléctricas (voltaje o corriente)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

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

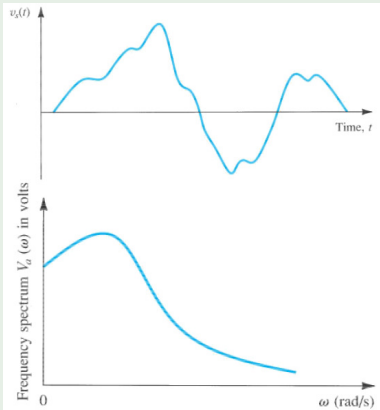
- De esta forma, una señal puede representarse en el dominio del tiempo ($v(t)$) o en el dominio de la frecuencia ($V(\omega)$).

Introducción

Señal Periódica



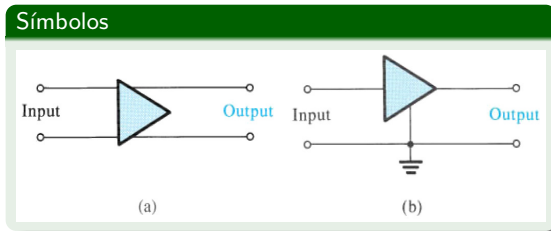
Señal Arbitraria



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

Generalidades

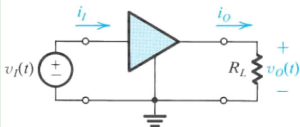
- La amplificación es una función fundamental en el procesamiento de las señales.
- Símbolo



- En amplificadores lineales, la señal de salida es una réplica exacta de la de entrada, salvo que tiene mayor magnitud.

Ganancia

Circuito



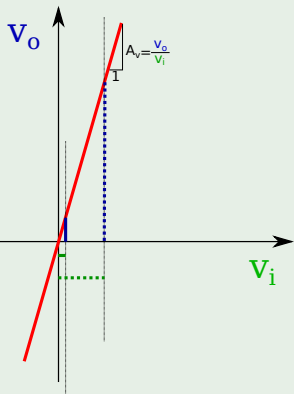
- Ganancia de voltaje.

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \Rightarrow 20 \log |A_v| dB$$

- Ganancia de corriente.

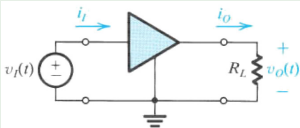
$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i} \Rightarrow 20 \log |A_i| dB$$

Representación gráfica



Ganancia

Circuito



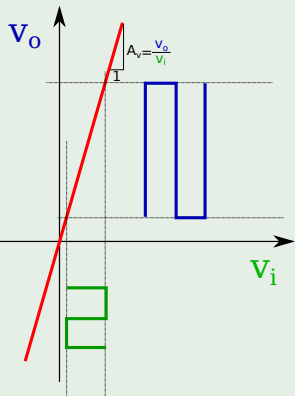
- Ganancia de voltaje.

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} \Rightarrow 20 \log |A_v| dB$$

- Ganancia de corriente.

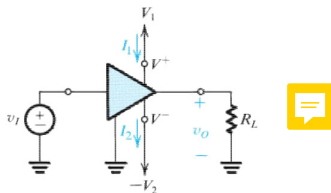
$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i} \Rightarrow 20 \log |A_i| dB$$

Representación gráfica



Saturación

- Fenómeno de Saturación. La característica de transferencia permanece lineal sólo un intervalo limitado de voltajes de entrada y salida. Alimentación.

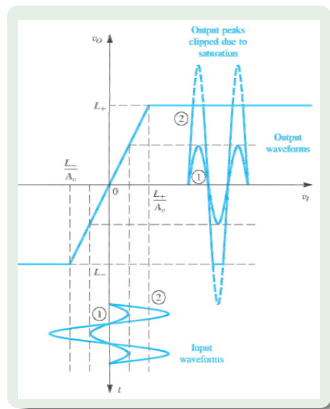


- L_+ y L_- son los valores de saturación positivos y negativos respectivamente.

$$L_- \leq v_o \leq L_+$$

- Para evitar la distorsión:

$$\frac{L_-}{A_v} \leq v_i \leq \frac{L_+}{A_v}$$



Saturación: ejemplo

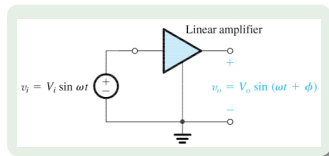
Supongamos que $A_v = \frac{v_o}{v_i} = 3$, $L_+ = 15V$ y $L_- = -15V$, entonces:

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

En este caso, para evitar la distorsión:

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

Respuesta en frecuencia



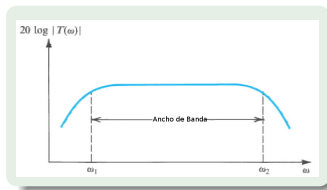
- La **respuesta en frecuencia** es una caracterización importante del amplificador en términos de su respuesta a señales sinusoidales de entrada de frecuencias diferentes.
- Matemáticamente la caracterizamos a través de la **función de transferencia del propio amplificador** ($T(\omega)$) que describe la respuesta del amplificador a una señal sinusoidal de frecuencia ω .

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

- Para calcular $T(\omega)$ es necesario analizar el modelo de circuito equivalente del amplificador: analizar en el dominio de la frecuencia con impedancias y/o admitancias para obtener la función de transferencia.

Respuesta en frecuencia

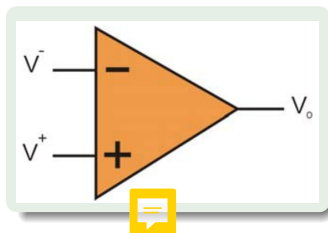
- Para representar la respuesta en frecuencia se usa el diagrama de Bode, tanto en amplitud como en fase.
- El **ancho de banda** del amplificador es la banda de frecuencias sobre la que la ganancia del amplificador es casi constante, a menos de cierto número de decibelios (por lo general 3dB).



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

Generalidades

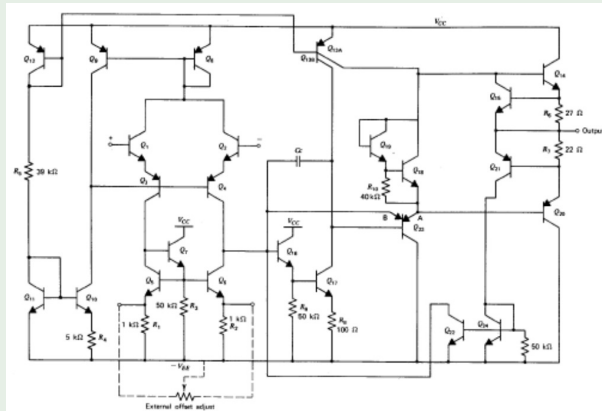
- El Amplificador Operacional (AO) es un amplificador de gran ganancia, utilizado para realizar operaciones lineales y no lineales sin más que cambiar los elementos externos tales como resistencias, condensadores, diodos, etc.
- Símbolo del Amplificador Operacional:



Esquemático

El amplificador operacional está compuesto por muchos transistores.

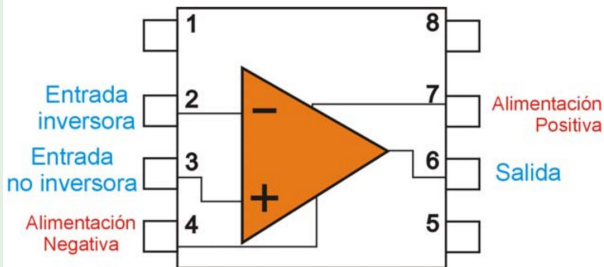
Esquemático del AO 741: 24 transistores



Chip

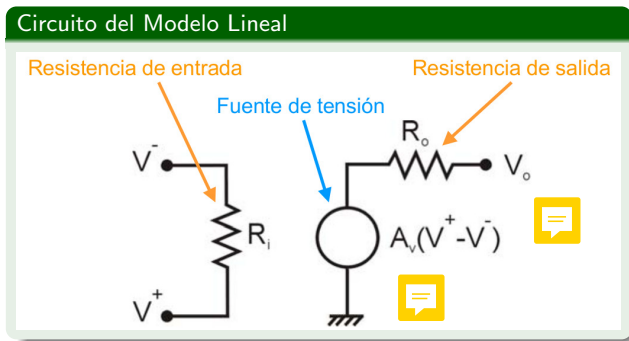
En el laboratorio se trabaja con un chip.

Chip del AO 741



Modelo Lineal

Cuando el comportamiento del AO es **lineal**, se puede sustituir por el siguiente modelo lineal:

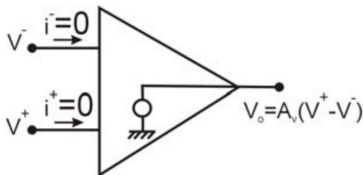


Modelo Ideal

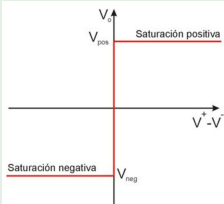
En el modelo ideal del AO se realizan las siguiente aproximaciones:

- 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 $\Rightarrow B \rightarrow \infty$.

Representación Modelo Ideal

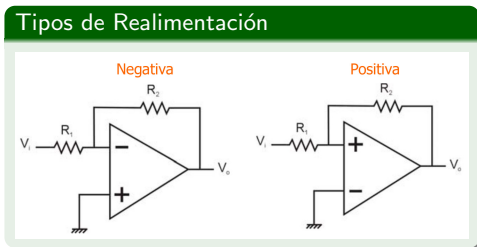


Característica



Realimentación

- Amplificador Operacional en **lazo abierto**: no existe conexión entre salida y entrada.
- Amplificador Operacional con **realimentación**: se establece una conexión entre salida y entrada.
- Existen dos tipos de realimentación: positiva y negativa.



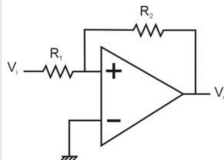
- ¿Para qué sirve conectar la salida y la entrada? Lo vemos a continuación...

Realimentación

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 $+V_{cc}$

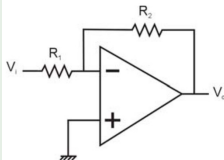
Realimentación Positiva



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

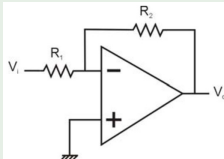
Análisis del circuito:

- 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

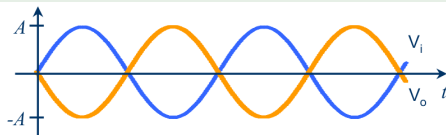


Transferencia



Configuración inversora

Ejemplo 1

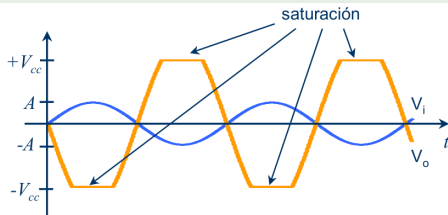


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A =$$

$$R_1 = R_2$$

Ejemplo 2



$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_2 = 4R_1$$

Configuración no inversora

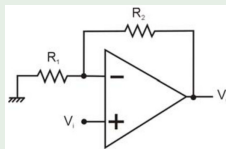
Análisis del circuito:

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

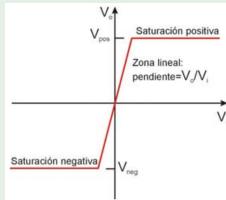
Característica de transferencia:

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

Circuito

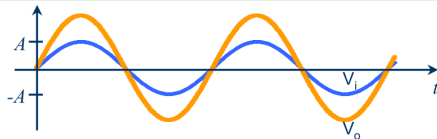


Transferencia



Configuración no inversora

Ejemplo 3

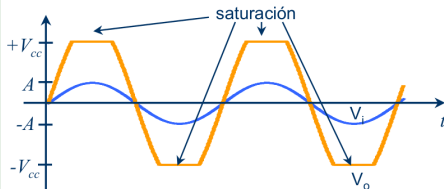


$$V_i = A \text{sen}(\omega t)$$

$$A =$$

$$R_2 = R_1$$

Ejemplo 4



$$V_i = A \text{sen}(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_2 = 3R_1$$

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 como $V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0$

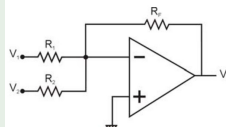
Característica de transferencia del inversor:

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

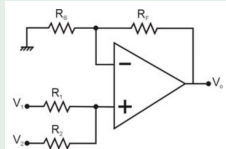
Si $R_1 = R_2 = R_F \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2)$

Analizar como ejercicio el no inversor:

Circuito inversor



Circuito no inversor



Derivador

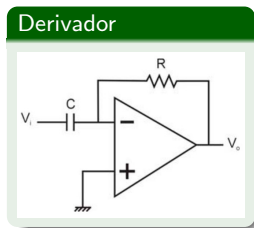
Análisis del circuito:

- 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:

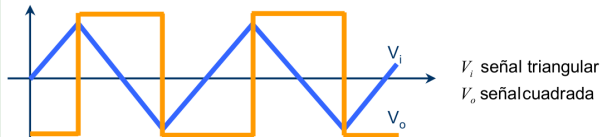
$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$
- En el dominio de la frecuencia:

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

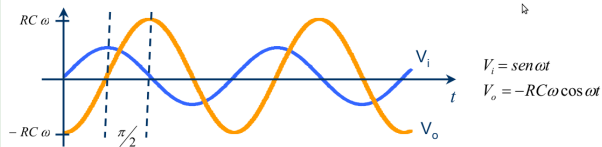


Derivador

Ejemplo 5

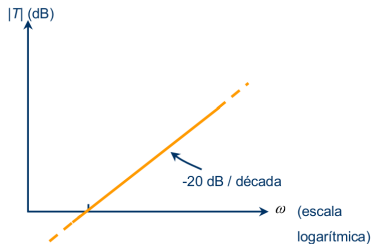


Ejemplo 6



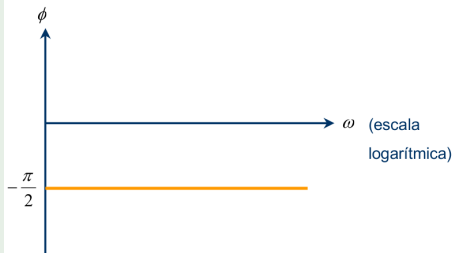
Derivador

Bode en amplitud



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

Bode en fase



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

Integrador

Análisis del circuito:

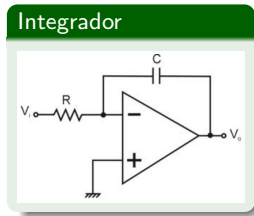
- Condiciones ideales: $i^- = i^+ = 0A$
- Realimentación negativa: $V^- = V^+ \Rightarrow$ como $V^+ = 0V \Rightarrow V^- = 0V$
- Ecuación para el condensador:

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

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

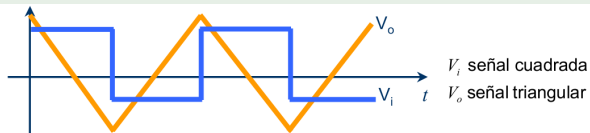
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$
- En el dominio de la frecuencia:

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

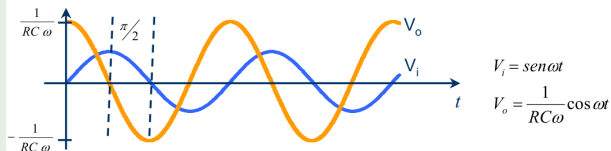


Integrador

Ejemplo 7



Ejemplo 8



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 $-R_2/R_1$.

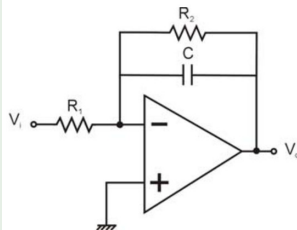
Integrador

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

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

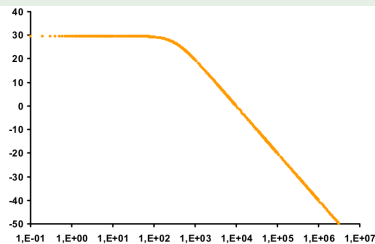
- Filtro paso-bajo de frecuencia de corte:
 $\omega_0 = (R_2 C)^{-1}$
- Si $\omega > \omega_0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{1}{R_1 C j \omega}$
- El integrador resultante ya no es ideal, pero se puede reducir al mínimo la imperfección seleccionando una R_2 tan grande como sea posible.

Integrador Modificado

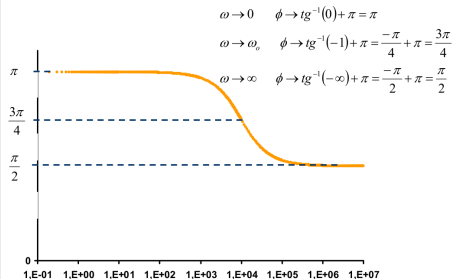


Integrador

Bode en amplitud



Bode en fase



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