

# 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

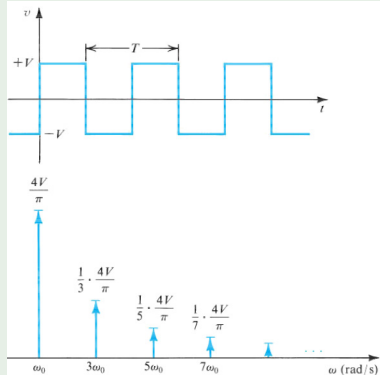
- Las señales contienen información sobre los fenómenos que ocurren en el mundo que nos rodea.
- Para extraer esta información, es necesario procesar dichas señales de la forma más conveniente por sistemas electrónicos.
- Para ello, las señales deben de convertirse en señales eléctricas (voltaje o corriente)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

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

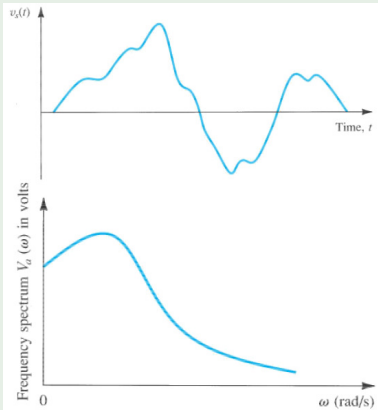
- De esta forma, una señal puede representarse en el dominio del tiempo ( $v(t)$ ) o en el dominio de la frecuencia ( $V(\omega)$ ).

# Introducción

## Señal Periódica



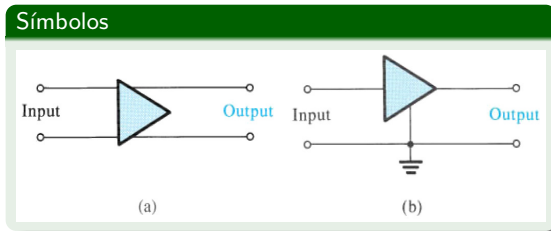
## Señal Arbitraria



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

# Generalidades

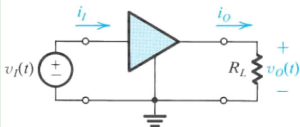
- La amplificación es una función fundamental en el procesamiento de las señales.
- Símbolo



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

# Ganancia

## Circuito



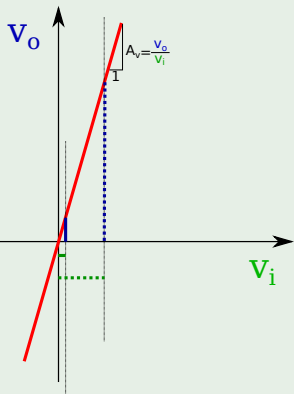
- Ganancia de voltaje.

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

- Ganancia de corriente.

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

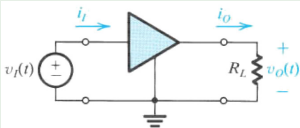
## Representación gráfica





# Ganancia

## Circuito



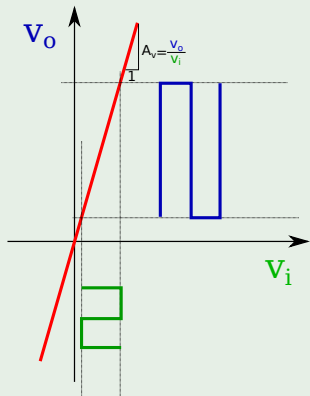
- Ganancia de voltaje.

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

- Ganancia de corriente.

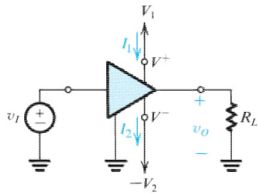
$$A_i \equiv \frac{i_o}{i_i} \Rightarrow 20 \log |A_i| dB$$

## Representación gráfica



# Saturación

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

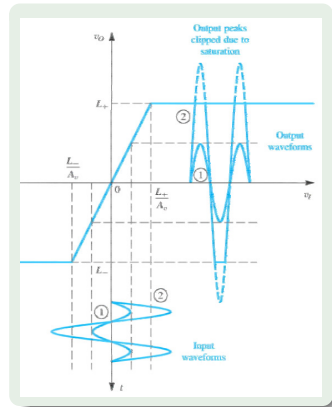


- $L_+$  y  $L_-$  son los valores de saturación positivos y negativos respectivamente.

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

- Para evitar la distorsión:

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



## Saturación: ejemplo

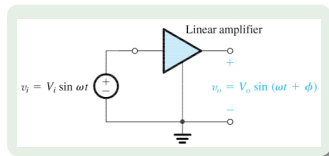
Supongamos que  $A_v = \frac{v_o}{v_i} = 3$ ,  $L_+ = 15V$  y  $L_- = -15V$ , entonces:

- 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



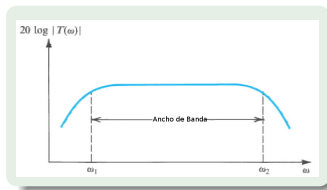
- La **respuesta en frecuencia** es una caracterización importante del amplificador en términos de su respuesta a señales sinusoidales de entrada de frecuencias diferentes.
- Matemáticamente la caracterizamos a través de la **función de transferencia del propio amplificador** ( $T(\omega)$ ) que describe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

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

- 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

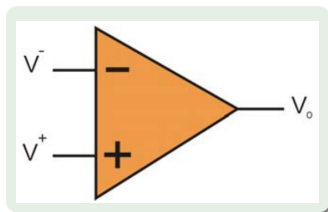
- Para representar la respuesta en frecuencia se usa el diagrama de Bode, tanto en amplitud como en fase.
- El **ancho de banda** del amplificador es la banda de frecuencias sobre la que la ganancia del amplificador es casi constante, a menos de cierto número de decibelios (por lo general 3dB).



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

# Generalidades

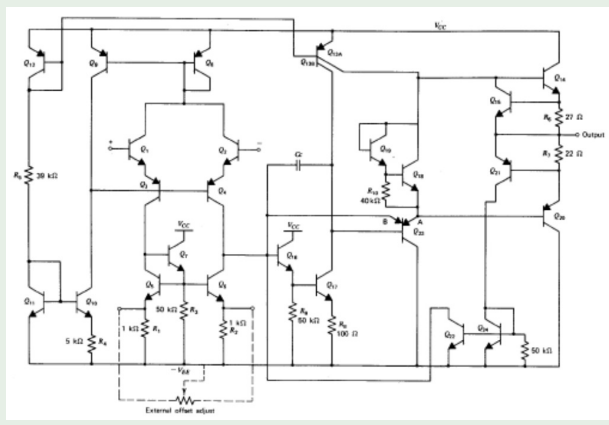
- El Amplificador Operacional (AO) es un amplificador de gran ganancia, utilizado para realizar operaciones lineales y no lineales sin más que cambiar los elementos externos tales como resistencias, condensadores, diodos, etc.
- Símbolo del Amplificador Operacional:



# Esquemático

El amplificador operacional está compuesto por muchos transistores.

## Esquemático del AO 741: 24 transistores

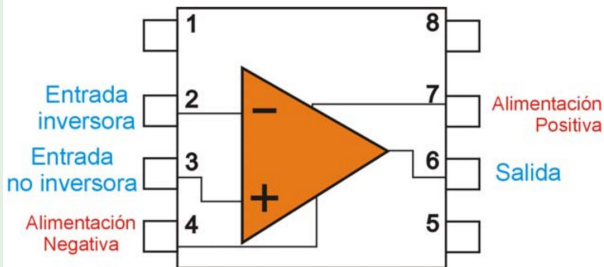




# Chip

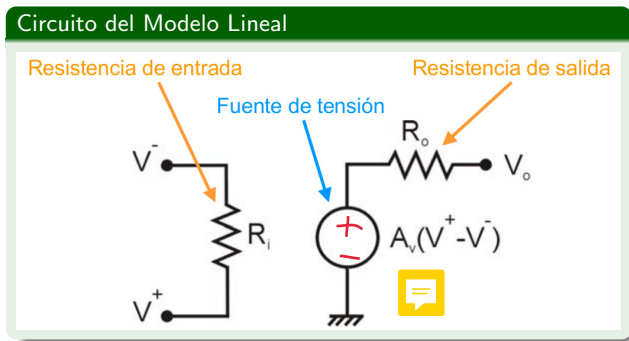
En el laboratorio se trabaja con un chip.

## Chip del AO 741



# Modelo Lineal

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

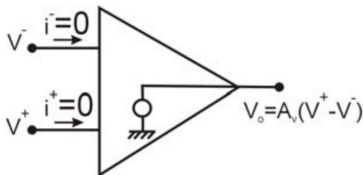


# Modelo Ideal

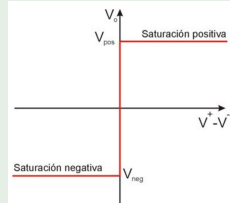
En el modelo ideal del AO se realizan las siguiente aproximaciones:

- 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

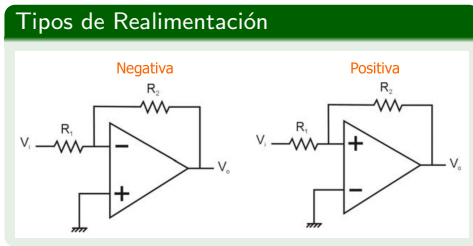


## Característica



# 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.



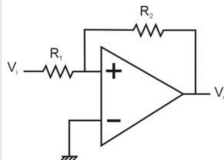
- ¿Para qué sirve conectar la salida y la entrada? Lo vemos a continuación...

# 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  $+V_{cc}$

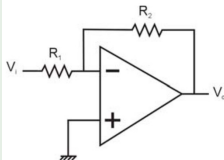
## Realimentación Positiva



## 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

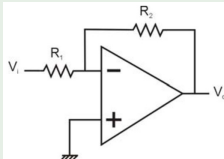
## Análisis del circuito:

- 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



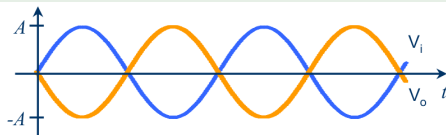
### Transferencia





# Configuración inversora

## Ejemplo 1

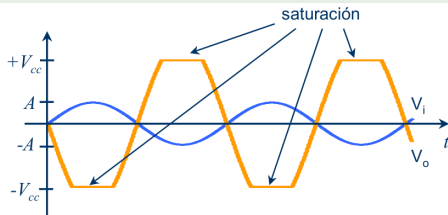


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A =$$

$$R_1 = R_2$$

## Ejemplo 2



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

$$A = 5$$

$$R_2 = 4R_1$$

# Configuración no inversora

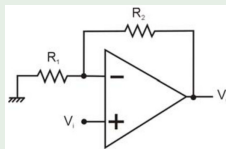
## Análisis del circuito:

- 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  $V^+ = V_i \Rightarrow V^- = V_i$

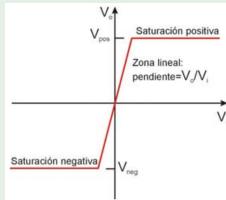
## Característica de transferencia:

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

### Circuito

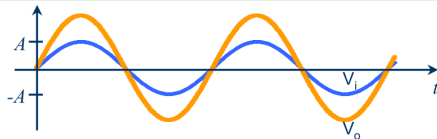


### Transferencia



# Configuración no inversora

## Ejemplo 3

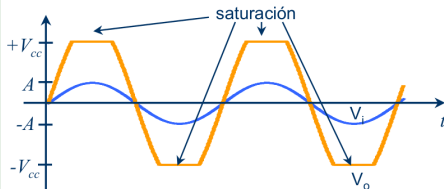


$$V_i = A \text{sen}(\omega t)$$

$$A =$$

$$R_2 = R_1$$

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

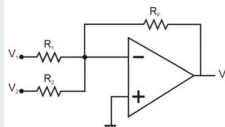
## Característica de transferencia del inversor:

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

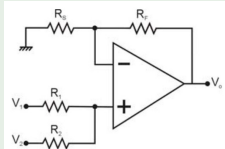
Si  $R_1 = R_2 = R_F \Rightarrow V_o = -(V_1 + V_2)$

**Analizar como ejercicio el no inversor:**

### Circuito inversor



### Circuito no inversor



# Derivador

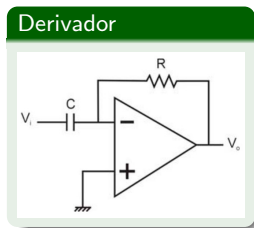
## Análisis del circuito:

- 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:  

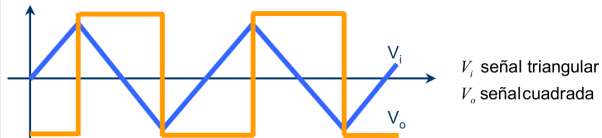
$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$
- En el dominio de la frecuencia:  

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

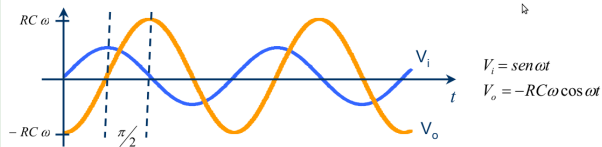


# Derivador

## Ejemplo 5

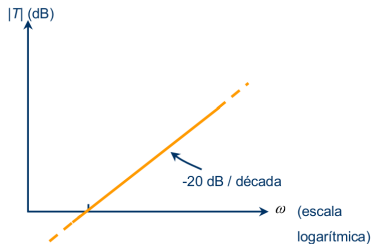


## Ejemplo 6



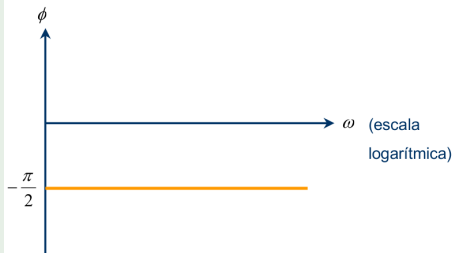
## Derivador

## Bode en amplitud



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

## Bode en fase



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

# Integrador

## Análisis del circuito:

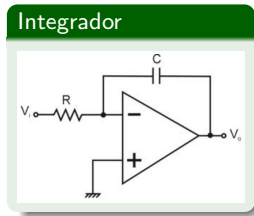
- Condiciones ideales:  $i^- = i^+ = 0A$
- Realimentación negativa:  $V^- = V^+ \Rightarrow$  como  $V^+ = 0V \Rightarrow V^- = 0V$
- Ecuación para el condensador:  

$$i_c(t) = C \frac{dv_o(t)}{dt}$$
- 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:  

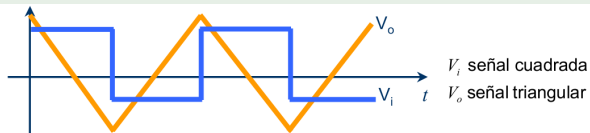
$$V_o(\omega) = -\frac{1}{RCj\omega} V_i(\omega)$$



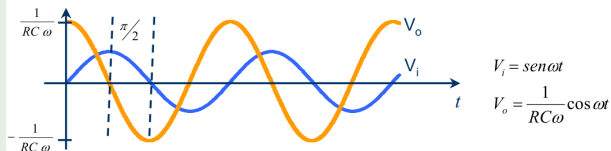


# Integrador

## 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  $-R_2/R_1$ .

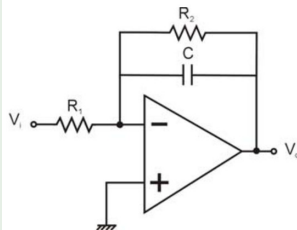
# Integrador

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

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

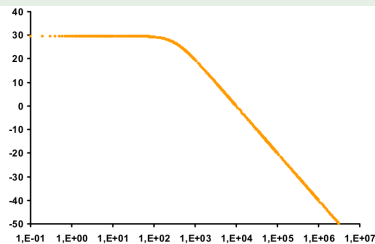
- Filtro paso-bajo de frecuencia de corte:  
 $\omega_0 = (R_2 C)^{-1}$
- Si  $\omega > \omega_0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{1}{R_1 C j \omega}$
- El integrador resultante ya no es ideal, pero se puede reducir al mínimo la imperfección seleccionando una  $R_2$  tan grande como sea posible.

## Integrador Modificado

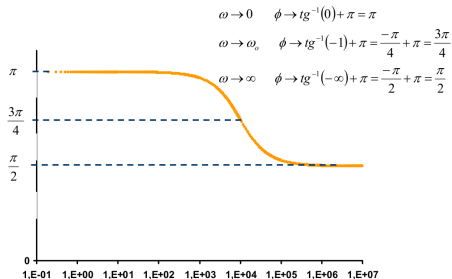


# Integrador

## Bode en amplitud



## Bode en fase



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