

Dispositivos Electrónicos II

CURSO 2010-11

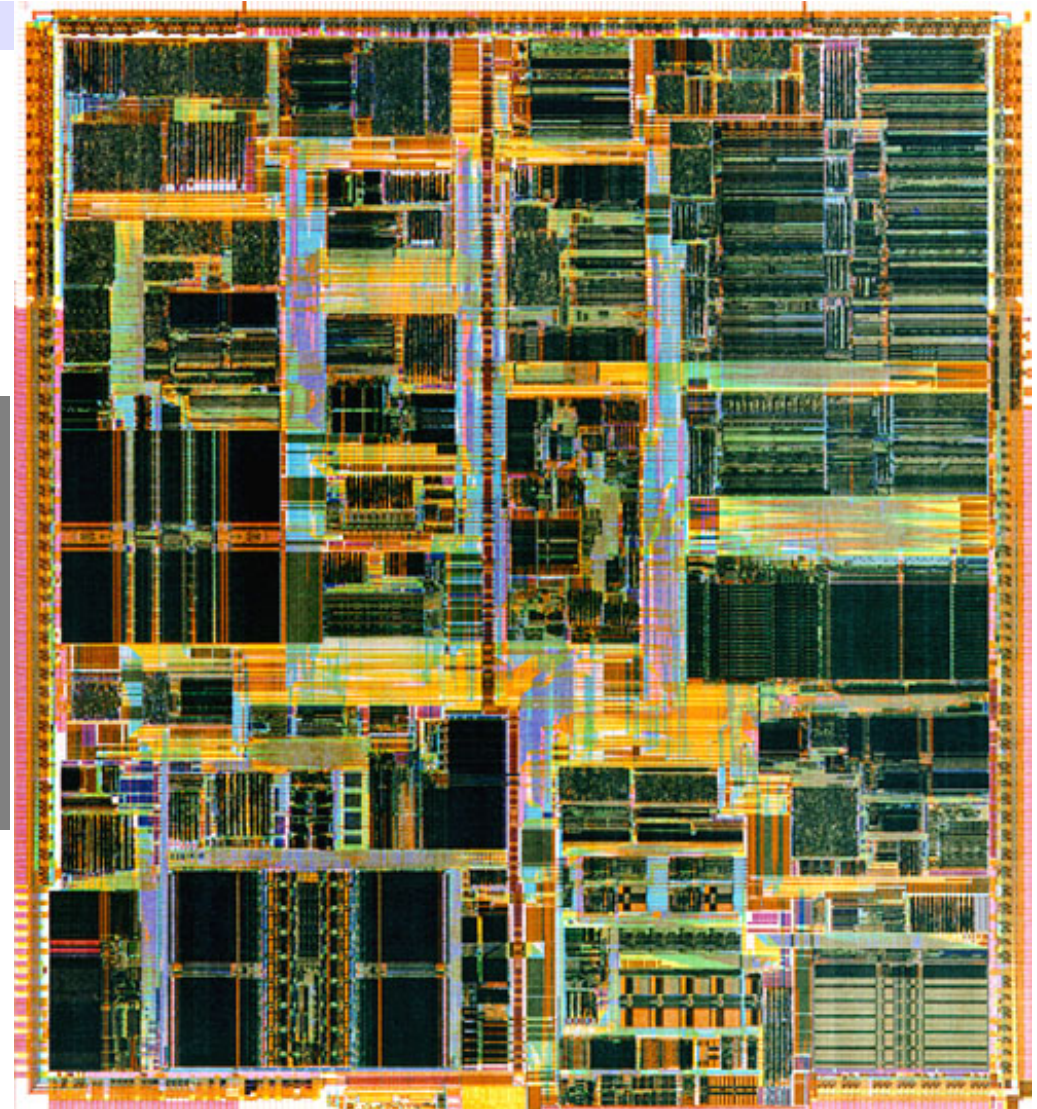
Tema 3

AMPLIFICACIÓN: PRINCIPIOS BÁSICOS

Profesores:

Miguel Ángel Domínguez Gómez

Camilo Quintáns Graña



DEPARTAMENTO DE
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA



UNIVERSIDAD DE VIGO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

AMPLIFICACION: PRINCIPIOS BÁSICOS

1. CONSIDERACIONES GENERALES

- 1.1. Linealidad
- 1.2. Ganancia de tensión, de corriente y de potencia.
- 1.3. Decibelios

2. AMPLIFICADOR IDEAL

3. MODELOS DE AMPLIFICADORES REALES

- 3.1. Amplificador de tensión
- 3.2. Amplificador de Corriente
- 3.3. Amplificador de transconductancia
- 3.4. Amplificador de transresistencia
- 3.5. Cálculo de resistencias de entrada y salida

4. LIMITACIONES PRÁCTICAS DE LOS AMPLIFICADORES REALES

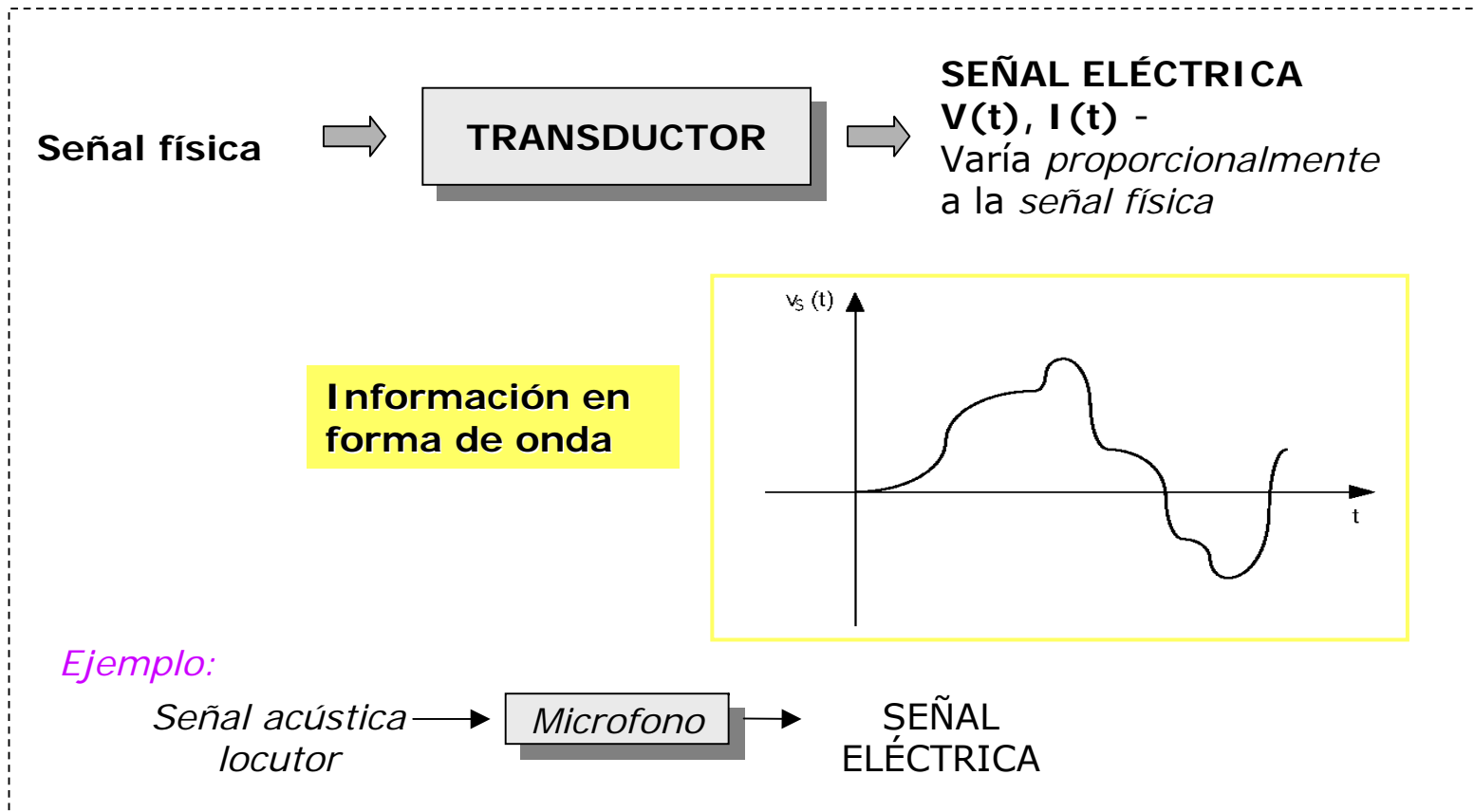
- 4.1. Niveles de saturación del amplificador
- 4.2. Característica de transferencia no lineal. Polarización.
 - Distorsión no lineal
 - Notación
- 4.3. Respuesta en frecuencia de amplificadores.
- 4.4. Diagramas de Bode

INTRODUCCIÓN

SEÑALES: información elementos y actividades del mundo físico

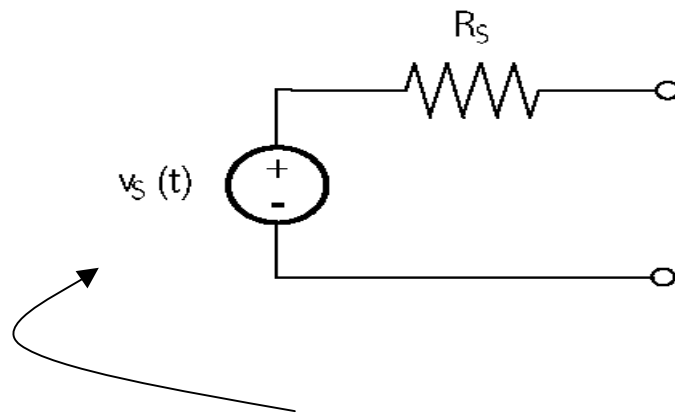
Ejemplo:

- Información tiempo: temperatura aire, presión, velocidad viento, etc.
- Locutor radio: SEÑAL ACUSTICA con información acontecimientos mundiales.

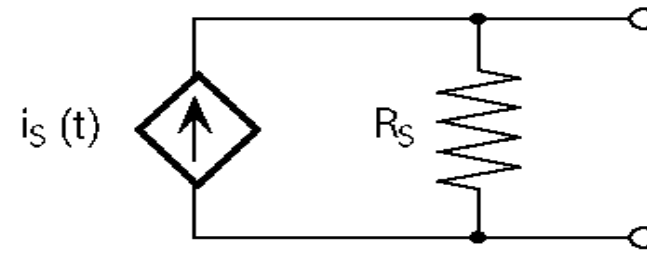


En esta asignatura consideraremos que las señales físicas de interés existen en el dominio de las **señales eléctricas**

2 modelos equivalentes:



THEVENIN (Si $R_s \downarrow\downarrow$)



NORTON (Si $R_s \uparrow\uparrow$)

Señales con información a procesar

La amplificación de señales eléctricas de pequeña amplitud:

- ✓ *Procesado más simple* que se puede realizar sobre una señal
- ✓ *Función primordial* de casi *cualquier sistema electrónico*.

NECESIDAD AMPLIFICACIÓN:

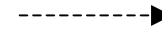
Debida principalmente a que la mayoría de los TRANSDUCTORES proporcionan **señales eléctricas de amplitud $\sim \mu\text{V}$ o mV** , demasiado débiles para poder realizar un procesamiento fiable de la información.

Ejemplos:

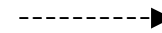
Salida Reproductor Cassette $\rightarrow \mu\text{W}$

Señales recepción antena: muy débiles

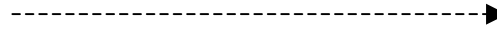
Sistemas Digitales



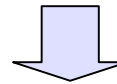
Altavoz: varios W



Amplificarlas para procesarlas y obtener la información que transportan



Amplificación para poder diferenciar con claridad niveles lógicos.



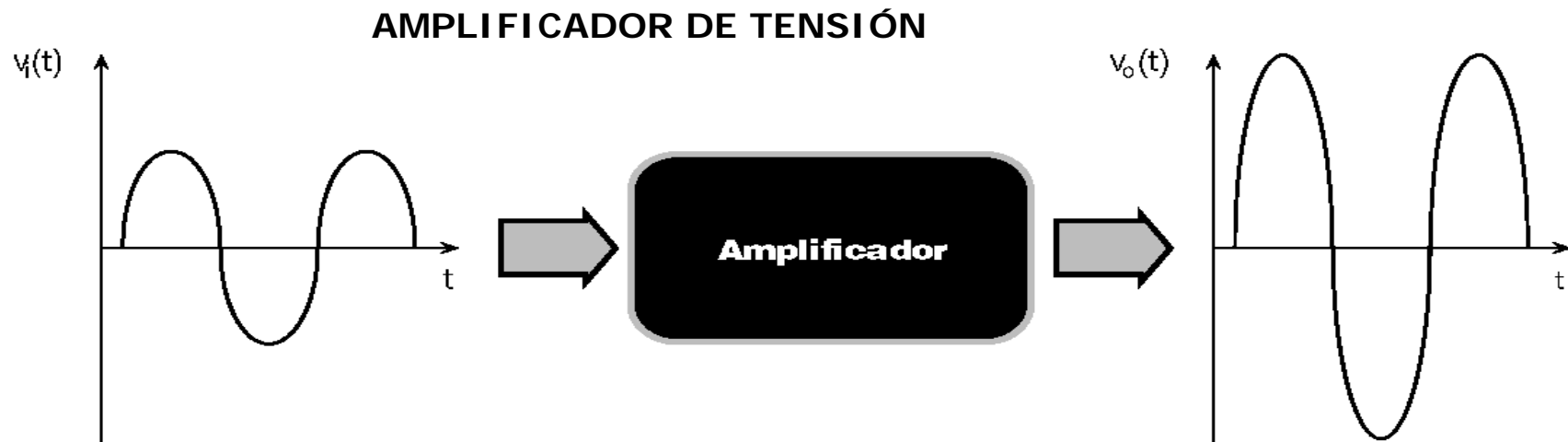
**DISEÑO CIRCUITOS
AMPLIFICADORES: PAPEL
DETERMINANTE EN
SISTEMAS ELECTRÓNICOS**



1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. LINEALIDAD

Propiedad de los amplificadores de realizar la amplificación sin alterar la forma de onda de la señal (en ella está contenida la información)



*Señal Salida: réplica exacta de la señal de **entrada**, pero con **mayor amplitud***

$$v_o(t) = A \cdot v_i(t)$$

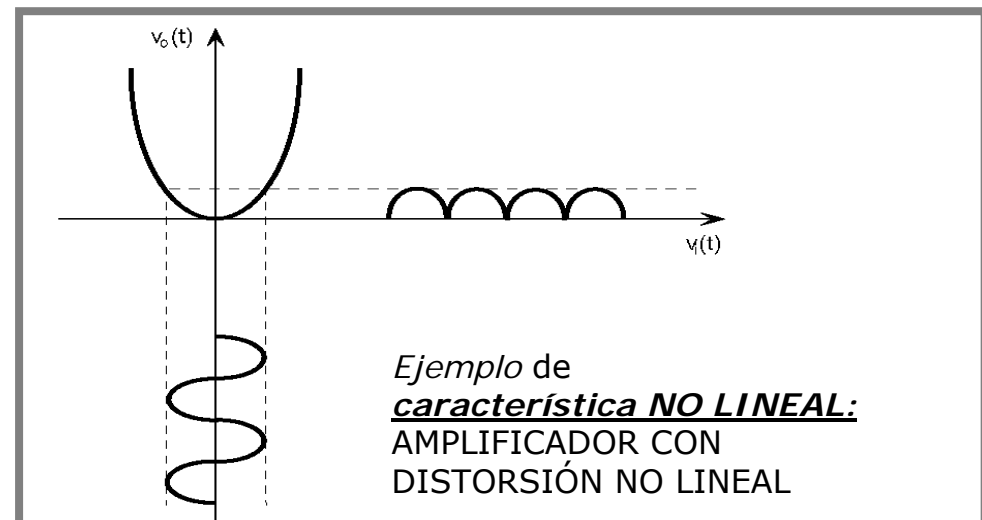
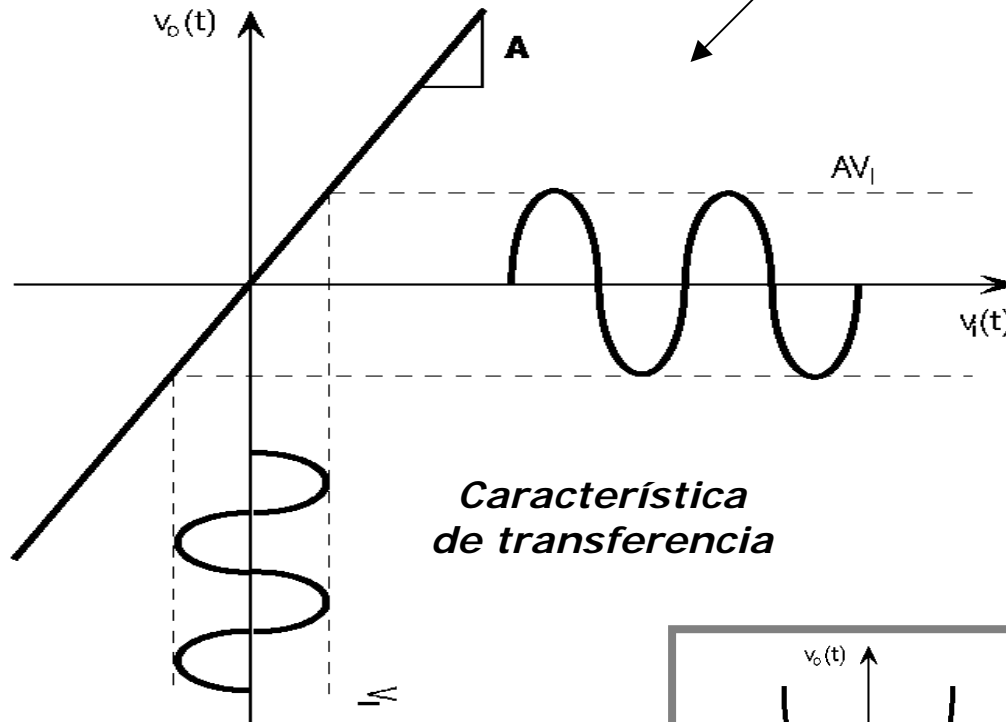
DE-II

CONSIDERACIONES
GENERALES

Tema 3: Amplificación: principios básicos

GANANCIA DE TENSIÓN

$$A = \frac{\text{tensión de salida}}{\text{tensión de entrada}} = \frac{v_o(t)}{v_i(t)}$$

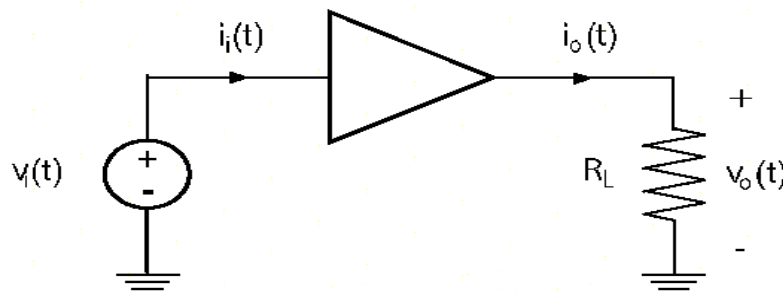


1.2. GANANCIA DE POTENCIA Y DE CORRIENTE

GANANCIA DE
POTENCIA

$$A_P = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o \cdot i_o}{v_i \cdot i_i}$$

$$A_P = A_V \cdot A_I$$



GANANCIA DE CORRIENTE

$$A_I = \frac{\text{corriente de salida}}{\text{corriente de entrada}} = \frac{i_o}{i_i}$$

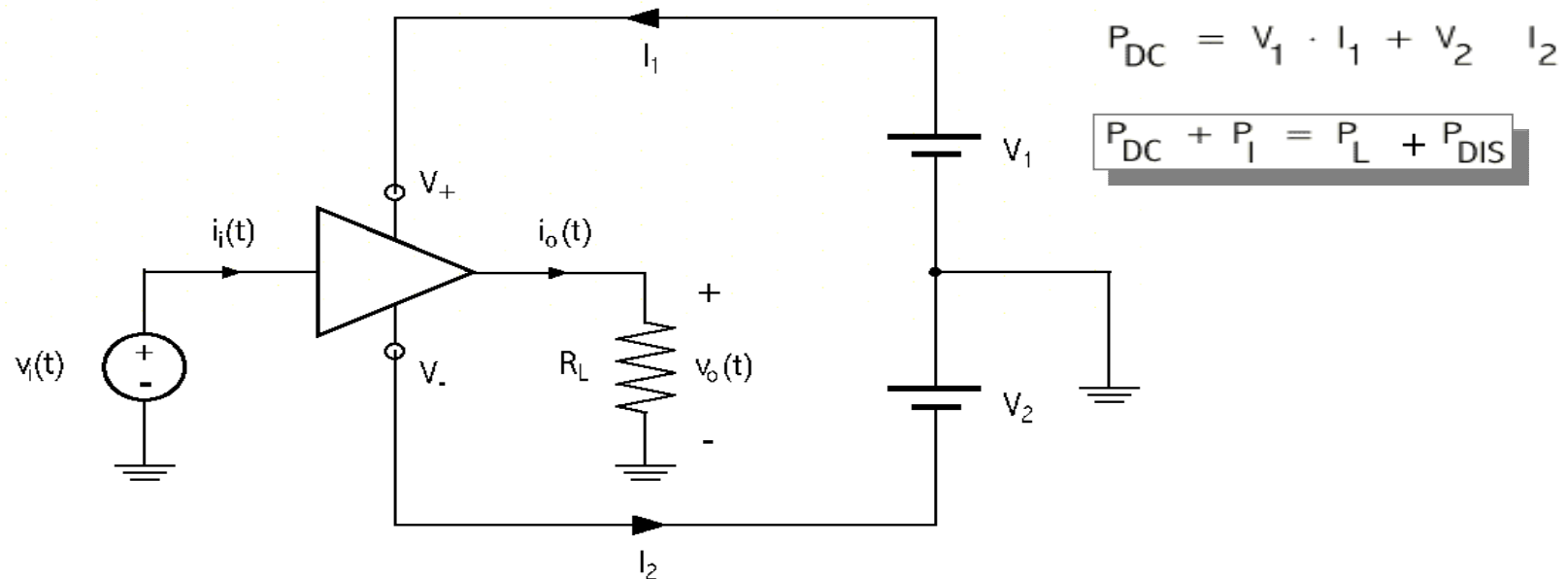
Para que un amplificador pueda entregar en su salida una **potencia superior a la que se obtiene de la señal de entrada** sin violar el **PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**: necesaria fuente externa que suministre esa potencia adicional.



Los amplificadores son capaces de proporcionar en su salida señales de mayor potencia debido a que para su funcionamiento es necesario utilizar:

FUENTES CONTINUAS DE ALIMENTACIÓN:

Suministran al amplificador la potencia adicional que entrega en su salida, así como la potencia consumida o disipada en forma de calor por su circuito interno).



RENDIMIENTO (η): Eficiencia de la conversión de P_{DC} entregada por las fuentes de alimentación en Pot. de señal P_L :

$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}}$$

(parámetro determinante en amplificadores cuyo propósito es proporcionar grandes cantidades de potencia en su salida, denominados **AMPLIFICADORES DE POTENCIA**)

1.3. DECIBELIOS

Ganancias de tensión, corriente y potencia: *relaciones adimensionales entre variables de entrada y variables de salida.*

Estas GANANCIAS pueden expresarse de forma más conveniente en unas unidades LOGARÍTMICAS denominadas **DECIBELIOS (dB)**, especialmente si se trata con:

- grandes variaciones de ganancia
- varios amplificadores conectados en cascada

Ganancia de tensión en dB

$$A_{VdB} = 20 \cdot \log \left| \frac{v_o(t)}{v_i(t)} \right| = 20 \cdot \log |A_V|$$

Ganancia de corriente en dB

$$A_{IdB} = 20 \cdot \log \left| \frac{i_o(t)}{i_i(t)} \right| = 20 \cdot \log |A_I|$$

NOTA: Valor absoluto necesario porque la *ganancia* puede ser *negativa* (salida invertida respecto a la forma de onda de la entrada)

Como la potencia está relacionada con la tensión o la corriente de forma cuadrática:

Ganancia de potencia en dB

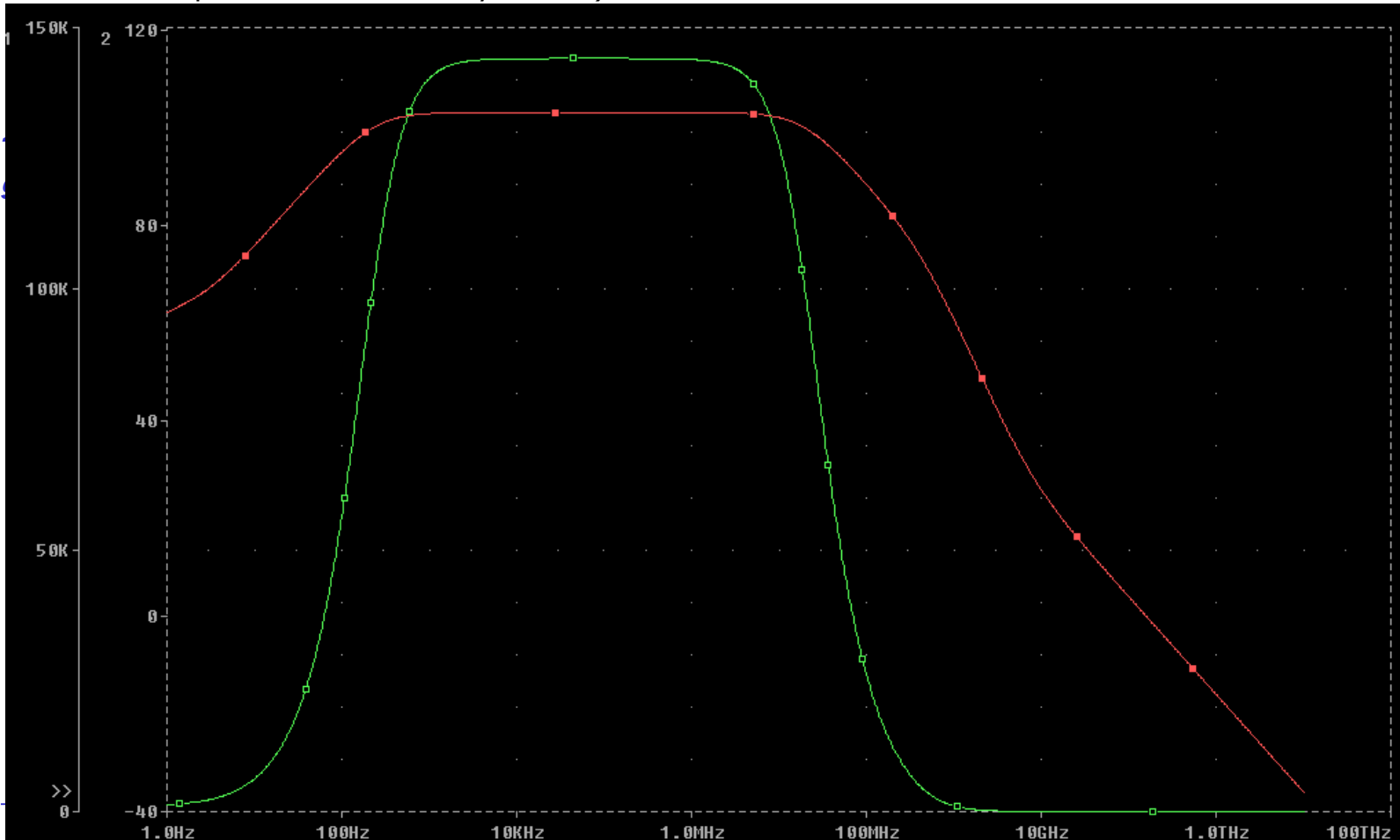
$$A_{PdB} = 10 \cdot \log \left| \frac{P_o(t)}{P_i(t)} \right| = 10 \cdot \left(\log \left| \frac{i_o(t)^2}{i_i(t)^2} \right| \cdot \frac{R_L}{R_i} \right) = 10 \cdot \log |A_P|$$

Conversión inversa: $|A_V| = \left| \frac{v_o(t)}{v_i(t)} \right| = 10^{(A_{VdB}/20)}$

VENTAJAS:



1- Utilizando escalas en dB, se pueden describir gráficamente conjuntos de valores entre los que existe una gran diferencia. (Ejemplo: curva de una amplificador cuya ganancia varía desde 1 a 10^5 con algún parámetro determinado, se puede representar en escala de dB que varía entre 0dB y 100dB).



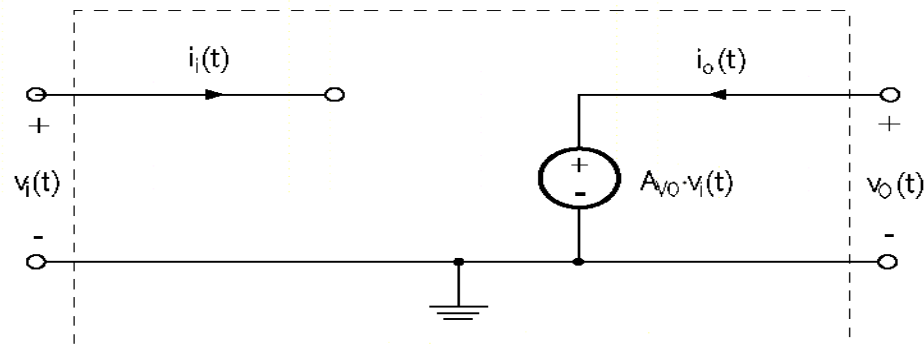
2. EL AMPLIFICADOR IDEAL

Modelado
 mayoría
 DISPOSITIVOS
 ELECTRÓNICOS:



Generalmente existe un ***terminal común*** entre ambos puertos de entrada y salida que se utiliza como ***referencia*** (masa del circuito)

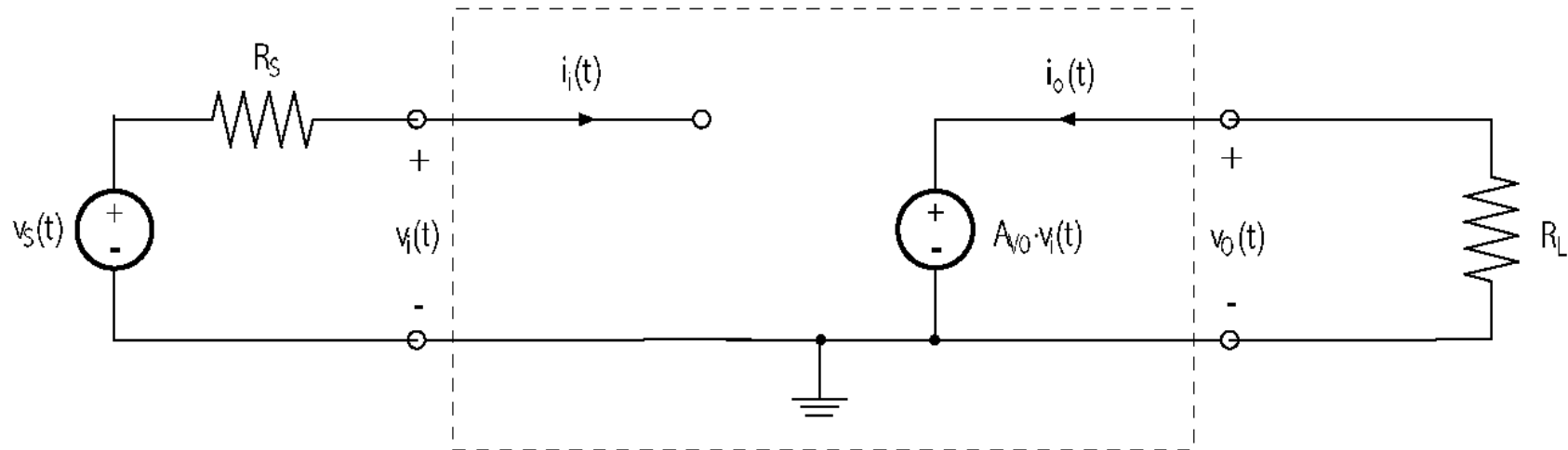
Modelo equivalente de amplificador de tensión ideal:



DE-II

EL AMPLIFICADOR IDEAL

Tema 3: Amplificación: principios básicos



IDEAL
→

Capaz de proporcionar a la salida una potencia ilimitada (corriente suministrada a R_L arbitrariamente grande)

No toma potencia de la señal de entrada (corriente de entrada nula)

$$v_o(t) = A_{VO} v_i(t)$$

$$A_V = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = A_{VO}$$

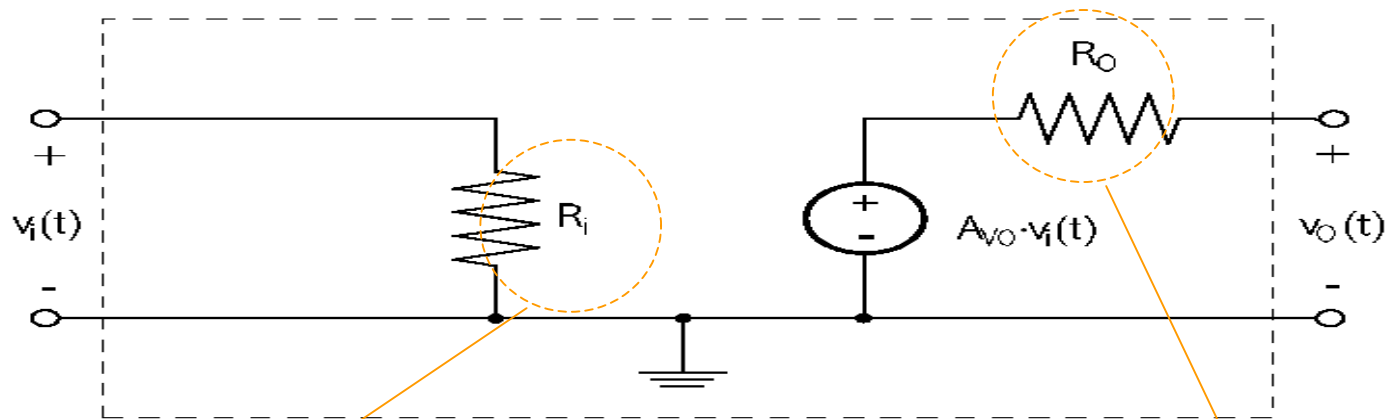
$$v_i(t) = v_S(t)$$

A_i, A_p infinitas

IMPOSIBLE!!

3. MODELOS DE AMPLIFICADORES REALES

3.1 Amplificador de tensión



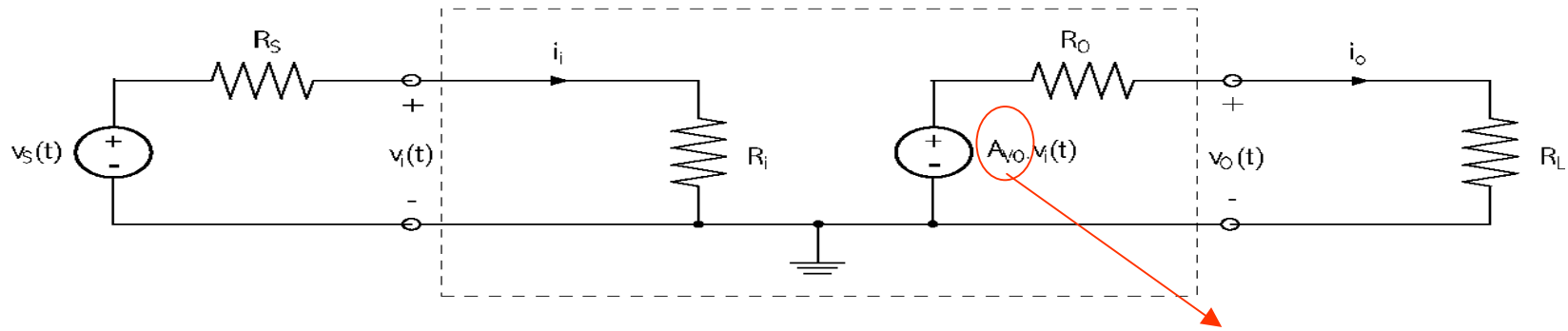
Caracteriza el hecho de que un *amplificador real* **TOMA CORRIENTE DE LA FUENTE DE SEÑAL APLICADA A SU ENTRADA**

Caracteriza el **CAMBIO DE TENSIÓN QUE SE PRODUCE EN LA SALIDA DEL AMPLIFICADOR A MEDIDA QUE ES NECESARIO SUMINISTRAR MÁS CORRIENTE A LA CARGA**

DE-II

MODELOS DE
AMPLIFICADORES
REALES

Tema 3: Amplificación: principios básicos



$$v_o(t) = A_{VO} v_i(t) \cdot \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

$$A_V = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = A_{VO} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

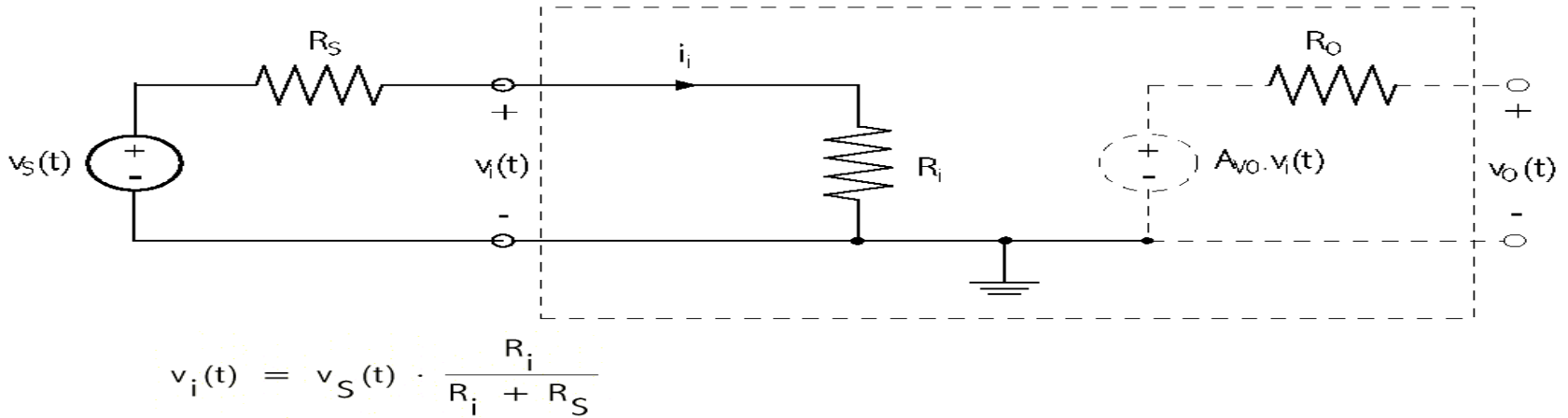
**GANANCIA DE TENSIÓN
DEL AMPLIFICADOR**

**A_{VO} : Ganancia en
circuito abierto**
(valor máximo de
ganancia que puede
dar el amplificador)



PARA NO PERDER GANANCIA DE TENSIÓN EN EL ACOPLAMIENTO DE LA SALIDA DEL AMPLIFICADOR A LA CARGA:

EL AMPLIFICADOR DEBE DISEÑARSE DE FORMA QUE $R_O \ll R_L$



PARA NO PERDER UNA PARTE SIGNIFICATIVA DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN EL ACOPLAMIENTO DE LA FUENTE DE SEÑAL A LA ENTRADA DEL AMPLIFICADOR:

EL AMPLIFICADOR DEBE DISEÑARSE DE FORMA QUE $R_i \gg R_S$

Por ello, útil definir:

GANANCIA DE TENSIÓN GLOBAL A_V'

$$A_V' = \frac{v_o(t)}{v_S(t)} = \frac{R_i}{R_i + R_S} \cdot A_{VO} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_O}$$

Incluye también el efecto de la carga de entrada

AMPLIFICADOR IDEAL: $R_i = \infty$, $R_O = 0$

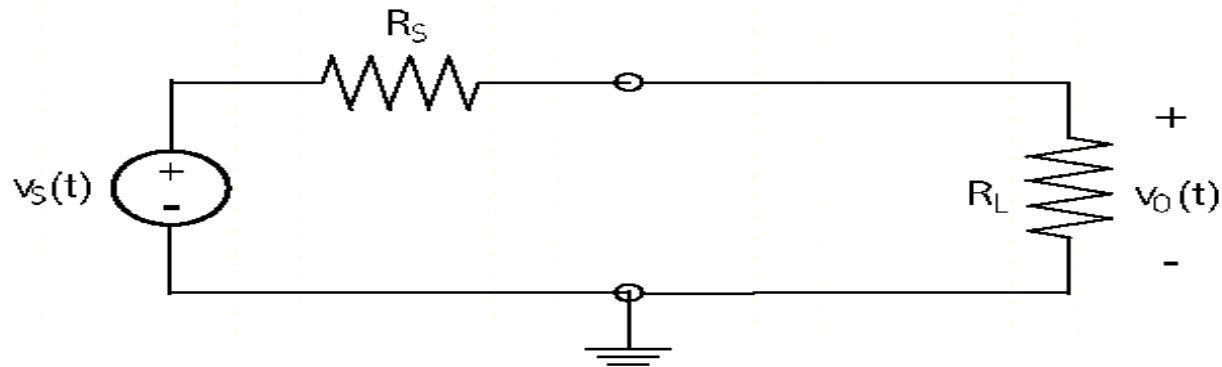
BUFFERS DE TENSION

Hay situaciones en las que el diseño del amplificador se realiza con el fin de ADAPTAR una SEÑAL a una DETERMINADA CARGA, sin que sea necesario obtener una ganancia de tensión elevada.

Este tipo de amplificadores de tensión: **BUFFERS**

Ejemplo:

Supongamos que se desea aplicar una señal $V_s(t)$ a una determinada R_L , pero $R_S \gg R_L$.



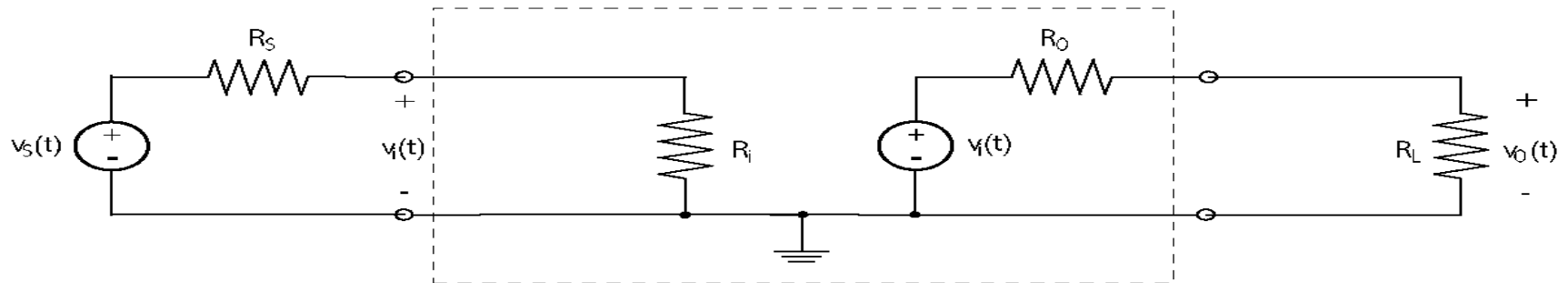
$$v_o(t) = v_s(t) \cdot \left(\frac{R_L}{R_L + R_S} \right),$$

con $R_L \ll R_S \rightarrow v_o(t) \approx 0$

Solución:



Realizar el ACOPLAMIENTO FUENTE-CARGA mediante un **AMPLIFICADOR** de **GANANCIA DE TENSIÓN PROXIMA A LA UNIDAD**, pero con una R_i ELEVADA tal que $R_i \gg R_s$, y una R_o pequeña tal que $R_o \ll R_L$.

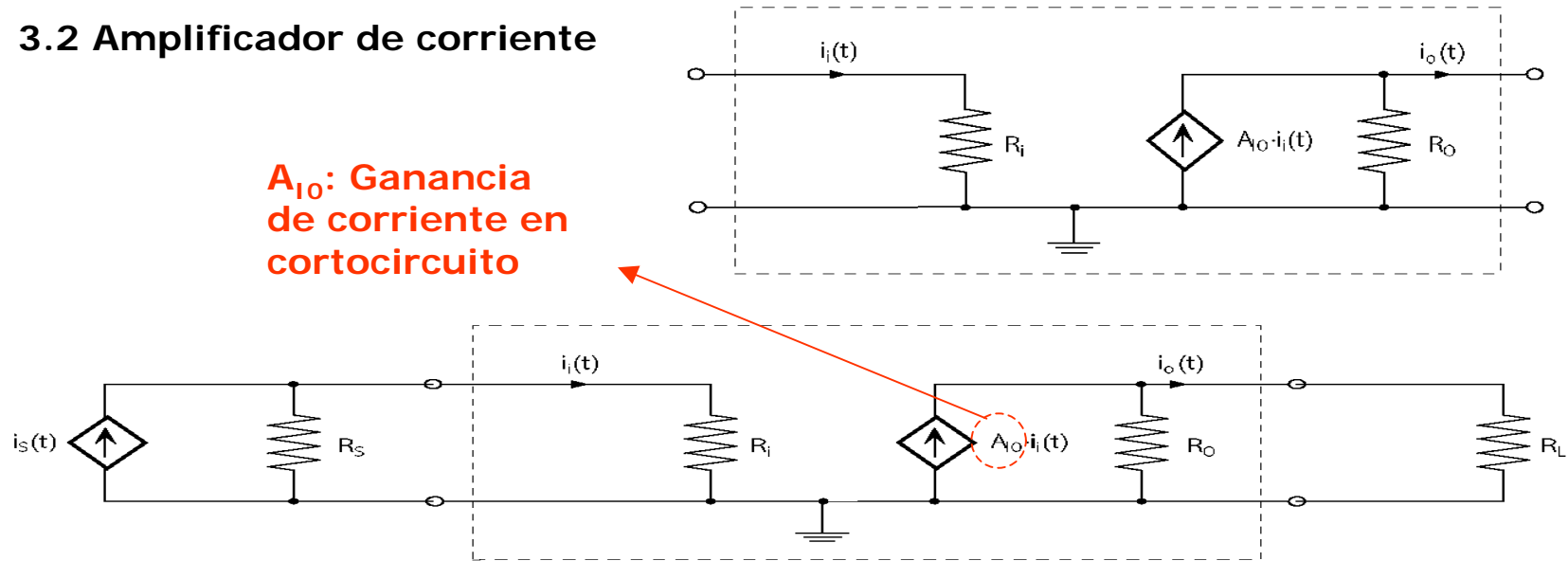


$$v_o(t) = v_s(t) \cdot \left(\frac{R_i}{R_i + R_s} \right) \cdot \left(\frac{R_L}{R_L + R_o} \right),$$

$$\text{con } R_i \gg R_s \text{ y } R_o \ll R_L \rightarrow v_o(t) \approx v_s(t)$$

3.2 Amplificador de corriente

A_{IO} : Ganancia de corriente en cortocircuito



$$i_o(t) = A_{IO} i_i(t) \cdot \frac{R_O}{R_L + R_O}$$

$$A_I = \frac{i_o(t)}{i_i(t)} = A_{IO} \cdot \frac{R_O}{R_L + R_O}$$

GANANCIA DE CORRIENTE DEL AMPLIFICADOR

$$i_i(t) = i_S(t) \cdot \frac{R_S}{R_i + R_S}$$



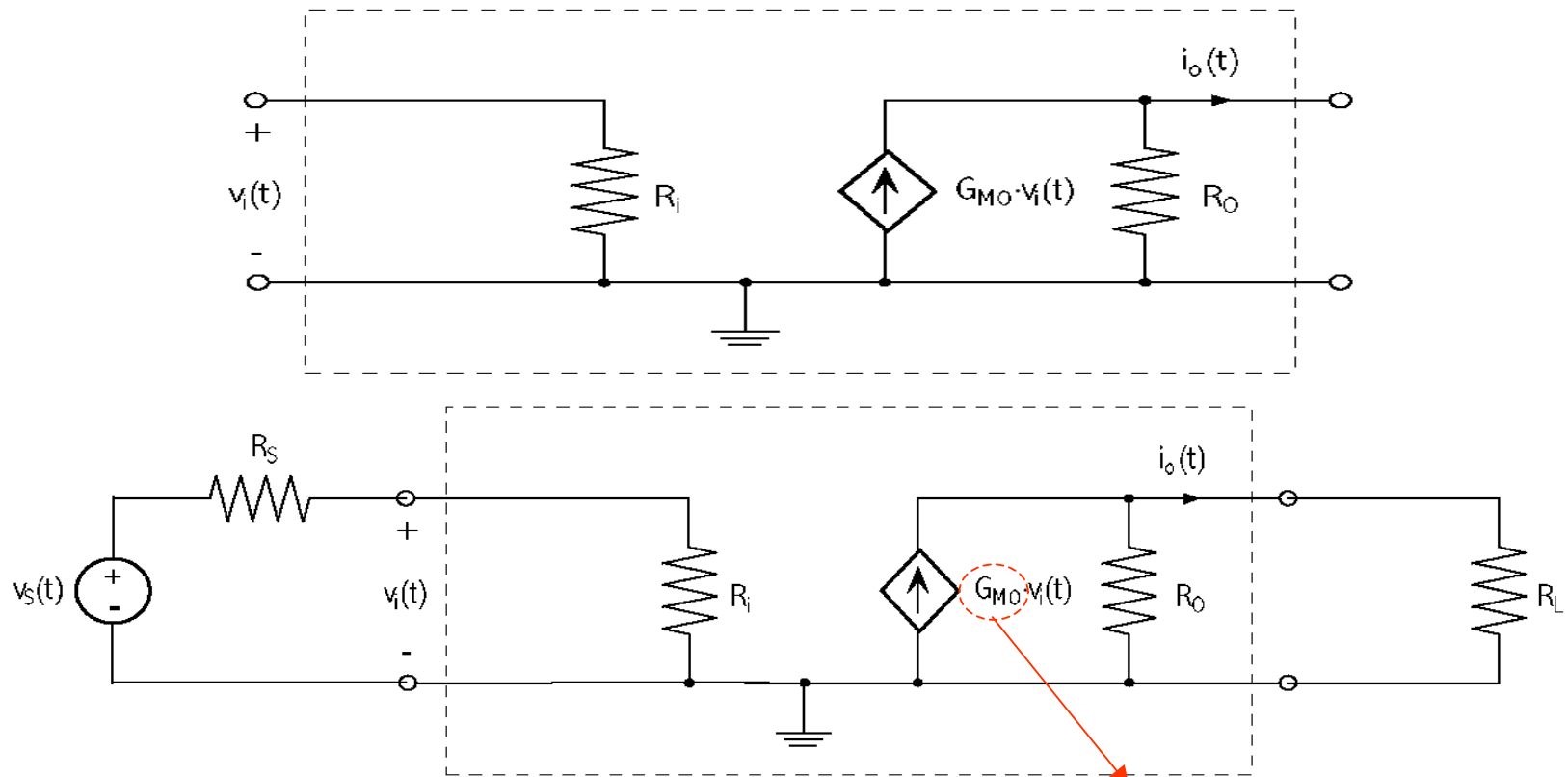
PARA NO PERDER GANANCIA DE CORRIENTE EN EL ACOPLAMIENTO DE LA SALIDA DEL AMPLIFICADOR A LA CARGA, Y NO PERDER UNA PARTE SIGNIFICATIVA DE LA SEÑAL DE ENTRADA EN EL ACOPLAMIENTO DE LA FUENTE:

EL AMPLIFICADOR DEBE DISEÑARSE DE FORMA QUE
 $R_i \ll R_S, R_O \gg R_L$

AMPLIFICADOR IDEAL: $R_i = 0, R_O = \infty$

3.3 Amplificador de transconductancia

Se utilizan cuando la señal de **entrada** es una **tensión cuyo valor varía con el tiempo** y se desea proporcionar la **salida** en forma de **corriente**.



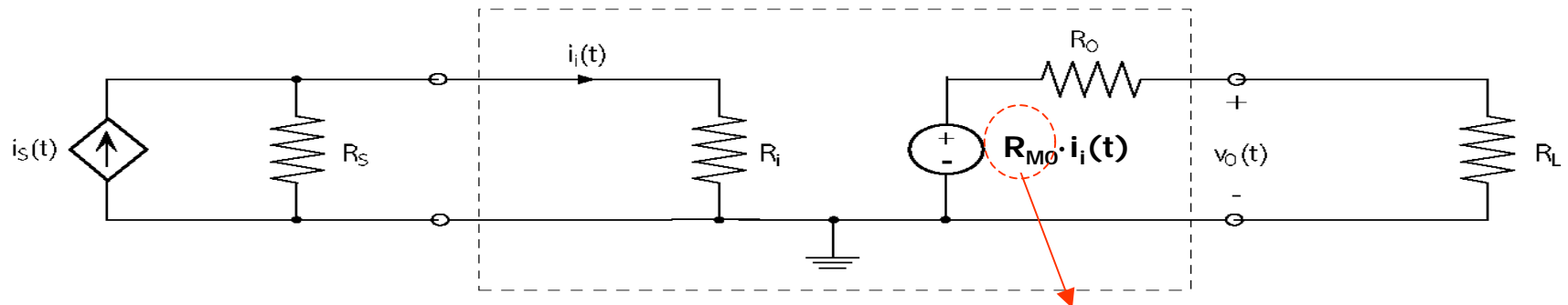
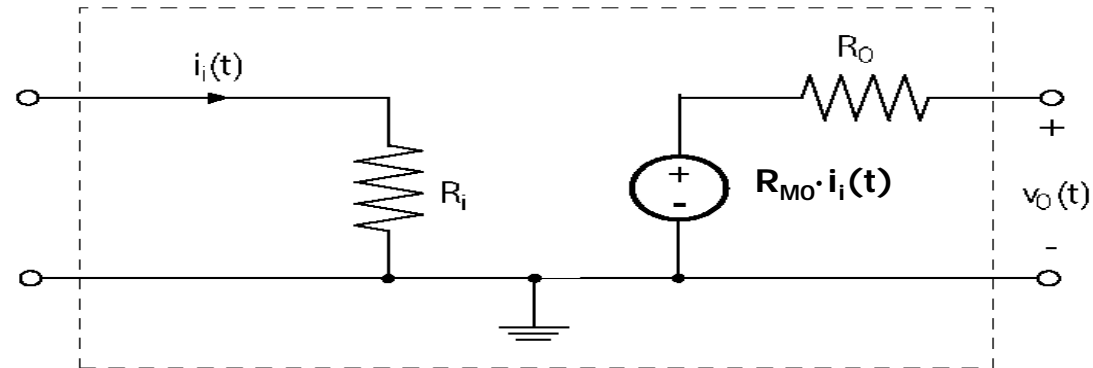
G_{M0} : Ganancia de transconductancia en cortocircuito (A/V)

AMPLIFICADOR IDEAL: $R_i = \infty$, $R_o = \infty$

$$G_{M0} = \left. \frac{i_o(t)}{v_i(t)} \right|_{R_L = 0}$$

3.4 Amplificador de transresistencia

Se utilizan cuando la **señal de entrada** es una **corriente cuyo valor varía con el tiempo** y se desea proporcionar la **salida** en forma de **tensión**.



R_{M0} : Ganancia de transresistencia en circuito abierto ($V/A, \Omega$)

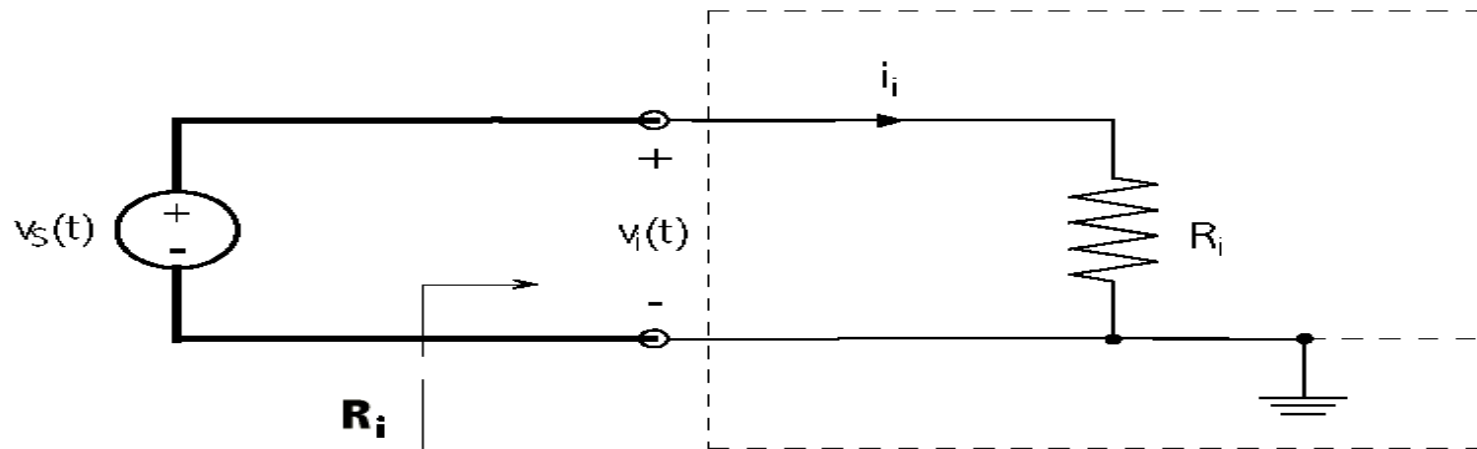
AMPLIFICADOR IDEAL: $R_i = 0$, $R_o = 0$

$$R_{M0} = \left. \frac{v_o(t)}{i_i(t)} \right|_{R_L = \infty}$$

3.5 Cálculo de las resistencias de entrada R_i y de salida R_o de un amplificador

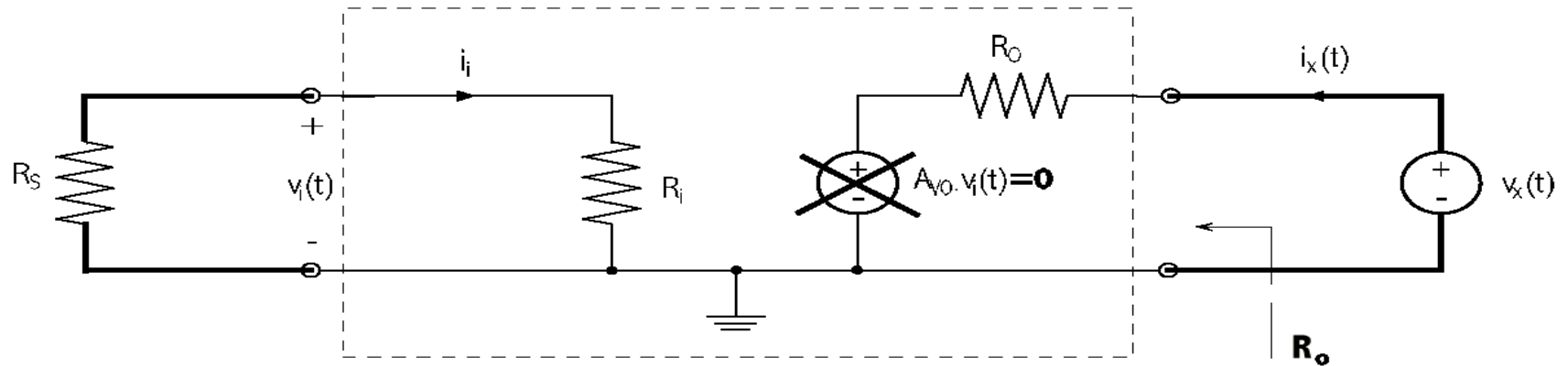
En base a los modelos presentados anteriormente:

a) Resistencia de entrada R_i



$$R_i = \frac{v_i(t)}{i_i(t)}$$

Cálculo aplicando una tensión de entrada $v_i(t)$ y midiendo la corriente de entrada resultante.

b) Resistencia de salida R_o 

Cálculo **eliminando la fuente de señal de entrada** (con lo que se anulan $v_i(t)$ e $i_i(t)$) aplicando una fuente de tensión $v_x(t)$ en la salida del amplificador, considerando que $R_L = \infty$.

$$R_o = \frac{v_x(t)}{i_x(t)}$$

4. LIMITACIONES PRÁCTICAS DE LOS AMPLIFICADORES REALES

Efectos que determinan en la práctica las características de los amplificadores reales.

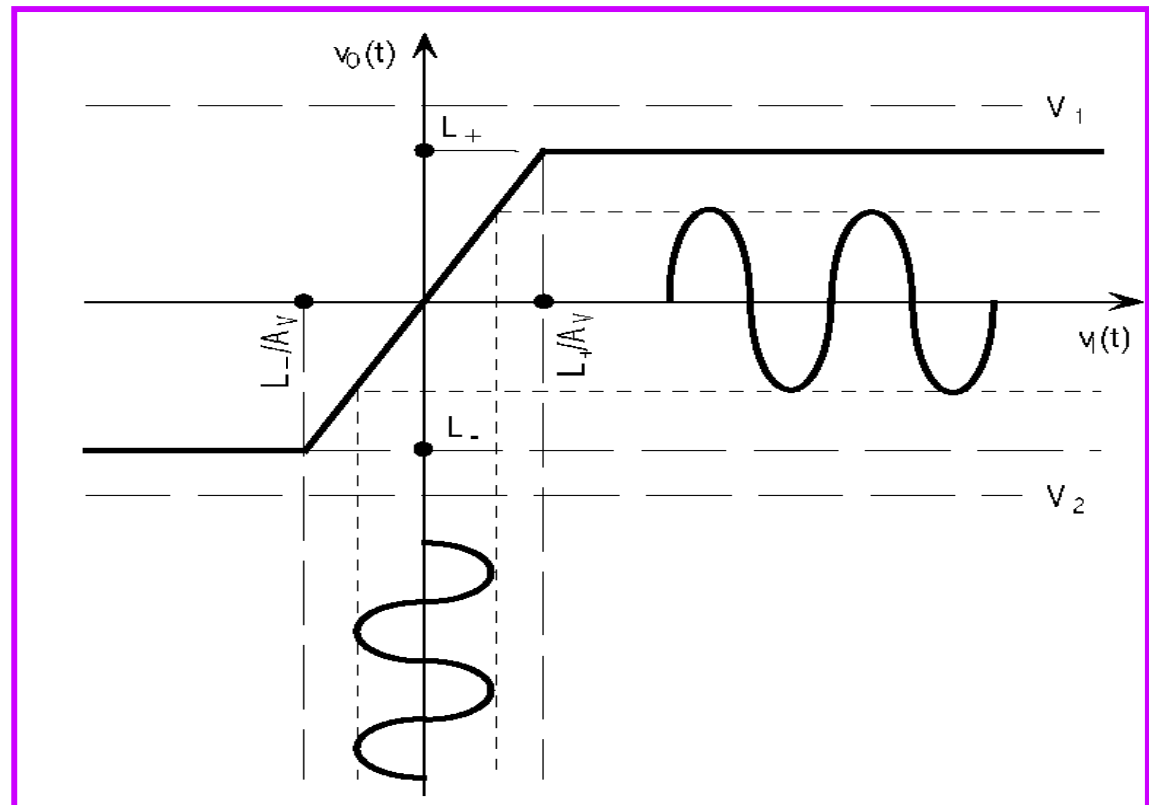
4.1 Niveles de saturación del amplificador

La característica de transferencia de un amplificador real es **lineal sólo para un determinado rango de valores de la tensión de entrada**.



Sólo podrá amplificar señales cuya amplitud esté comprendida entre los niveles de entrada para los que el amplificador puede proporcionar en su salida una señal amplificada sin distorsión.

Ejemplo: Amplificador genérico alimentado mediante fuente DC V_1 positiva y V_2 negativa.



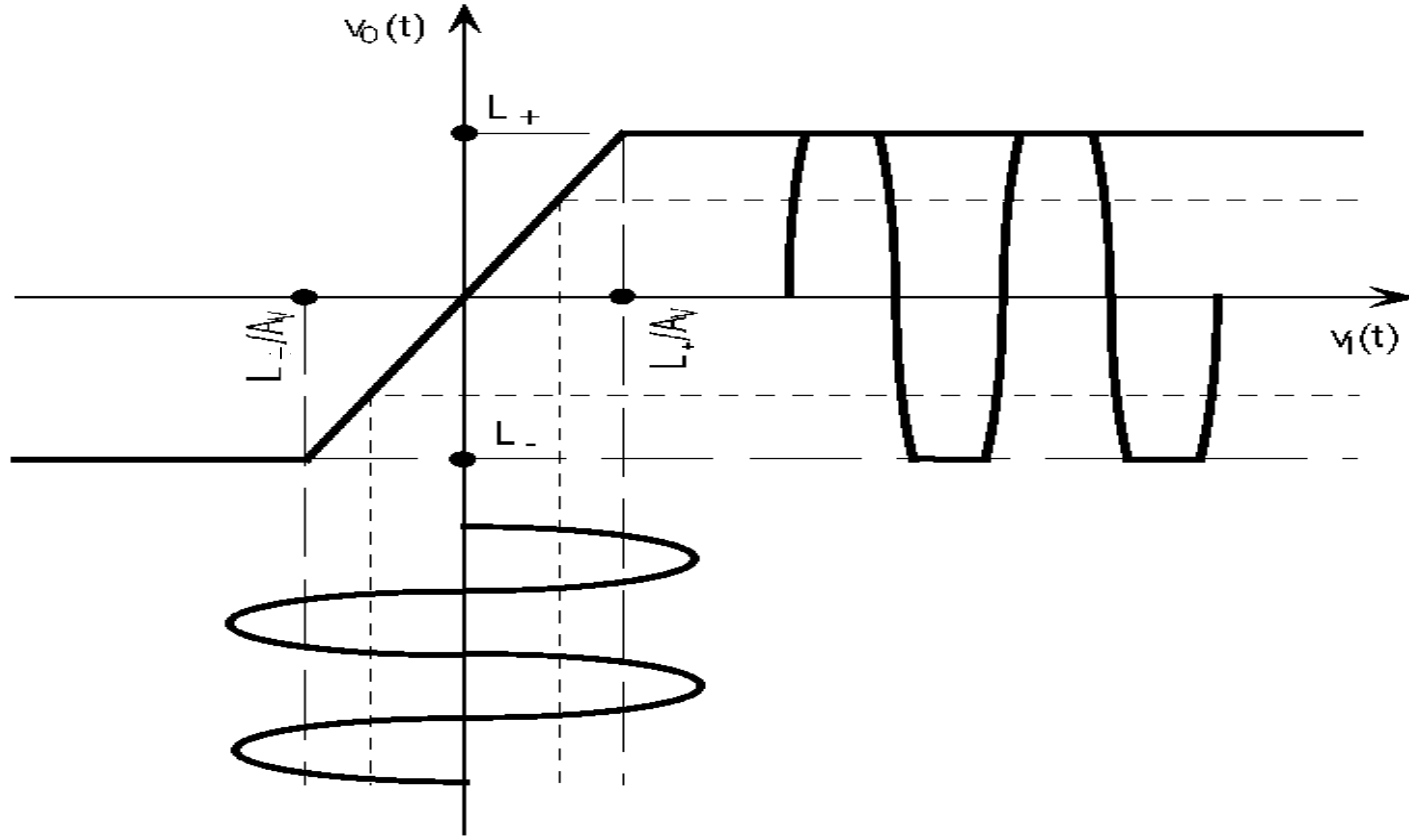
Por muy grande que sea la amplitud de $v_i(t)$:

$$L_- \leq v_o(t) \leq L_+$$



Para *evitar*
DISTORSIÓN EN
SALIDA:

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

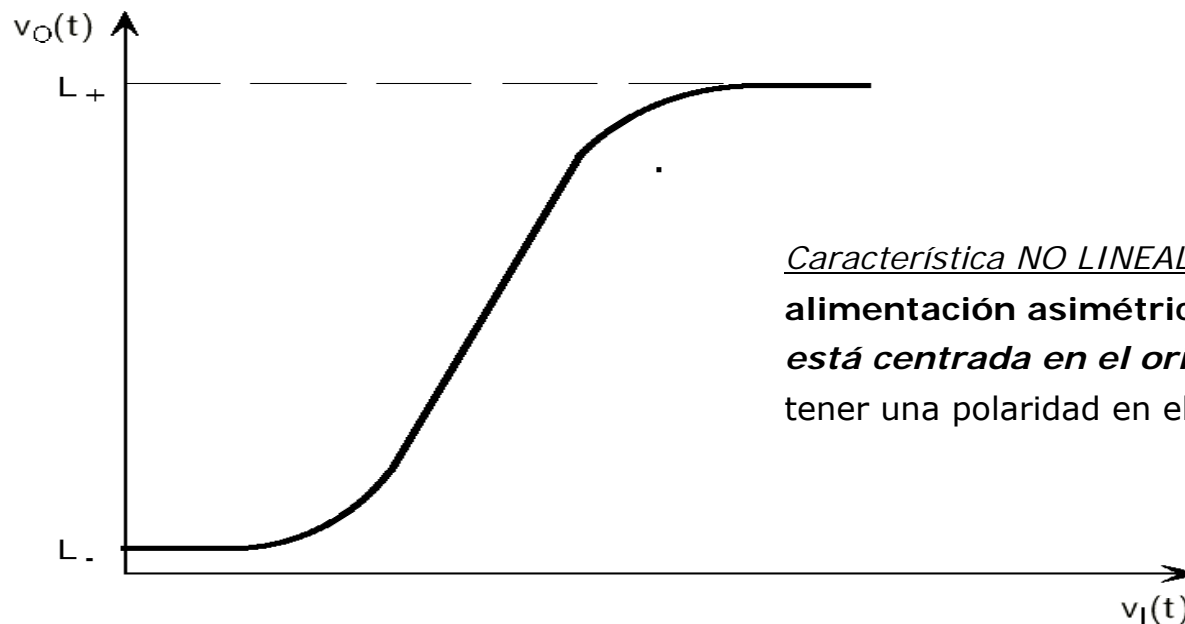


4.2. Característica de Transferencia No Lineal. Polarización

*Excepto por el efecto de saturación, hasta ahora se ha supuesto
CARACTERÍSTICA TRANSFERENCIA AMPLIFICADOR PERFECTAMENTE LINEAL*

Práctica: puede presentar diferentes grados de alinealidad dependiendo del esfuerzo invertido en el diseño para asegurar funcionamiento lineal.

Característica transferencia típica (amplificador real alimentado mediante una única fuente positiva de tensión continua)



Característica NO LINEAL. Debido a **alimentación asimétrica** utilizada **no está centrada en el origen** (sólo podemos tener una polaridad en el circuito).

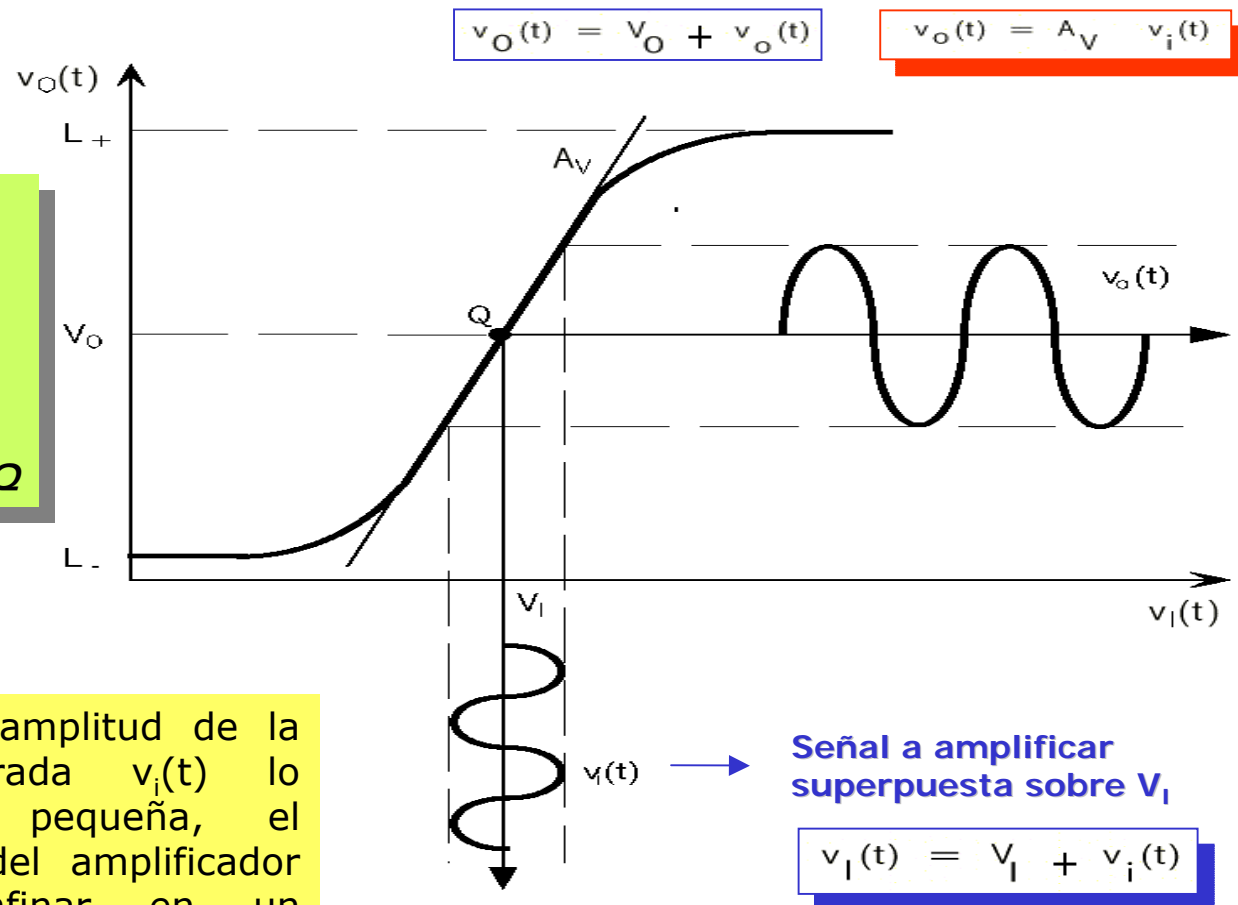
POLARIZACIÓN:

Técnica simple mediante la cual se puede obtener la amplificación de una señal sin distorsión en un amplificador con la anterior característica de transferencia.



IDEA: Hacer que las variaciones de $v_i(t)$ se produzcan alrededor del punto de funcionamiento Q

Manteniendo la amplitud de la señal de entrada $v_i(t)$ lo suficientemente pequeña, el funcionamiento del amplificador se puede confinar en un segmento prácticamente lineal.

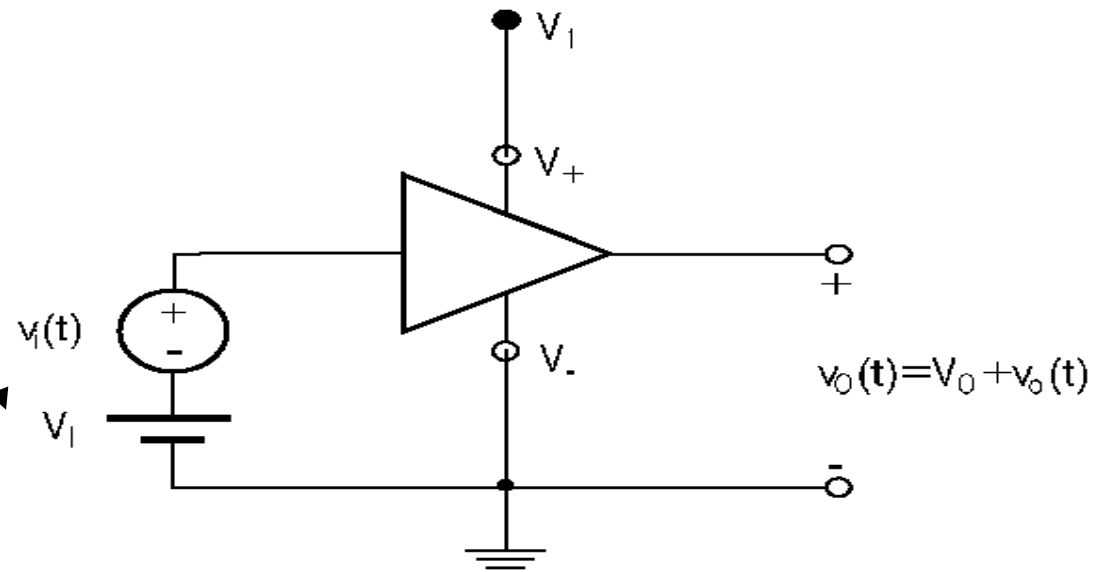


Polarizar el circuito de forma que las *variaciones* de la señal de entrada $V_i(t)$ no se produzcan en el origen de la característica de transferencia sino *alrededor de un punto de funcionamiento* Q donde su comportamiento sea *prácticamente lineal*.

$$v_i(t) = V_I + v_i(t)$$

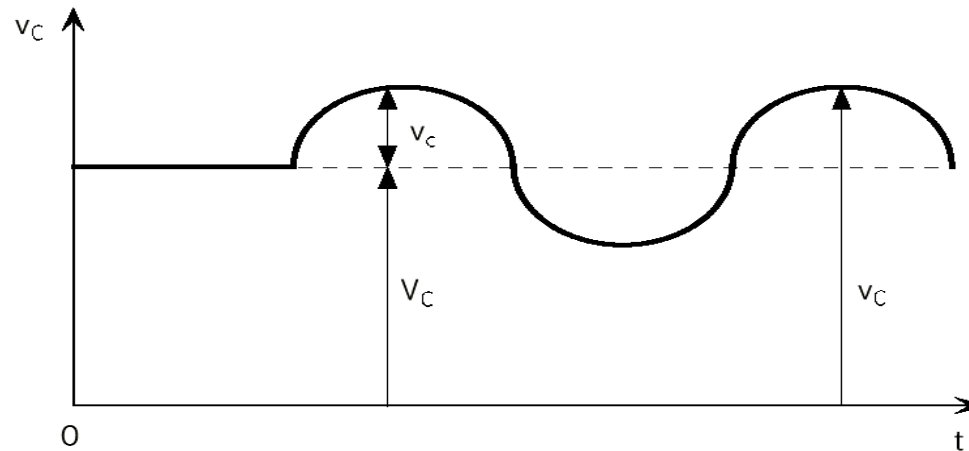
POLARIZACIÓN:

añadiendo una tensión continua V_I en la entrada.



Notación

Notación que se empleará para distinguir los distintos tipos de tensiones y corrientes en un circuito:



★ **Tensiones y corrientes continuas:**

SÍMBOLO y SUBÍNDICE en MAYÚSCULAS.

Ejemplo: V_C , I_C , V_O , I_O .

★ **Variaciones de señal:**

SÍMBOLO y SUBÍNDICE en MINÚSCULAS.

Ejemplo: v_c , i_c , v_o , i_o .

★ **Tensiones y corrientes totales:**

SÍMBOLO en MINÚSCULAS y
SUBÍNDICE en MAYÚSCULAS.

Ejemplo: v_{cC} , i_{cC} , v_{oC} , i_{oC} .

4.3. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LOS AMPLIFICADORES

En *AMPLIFICADORES REALES*:
siempre existen **CONDENSADORES**

- Inherentes a los componentes del amplificador
- Asociados a la fabricación o al cableado del circuito
- Añadidos intencionalmente con alguna finalidad útil

Su tensión no puede
cambiar instantáneamente



Podrían limitar el tiempo de respuesta de un amplificador.

Bloquean la corriente DC



Podrían limitar la capacidad de los amplificadores de responder a las señales que varían lentamente con el tiempo.

Desde otro pto. vista:

En **amplificadores** que trabajen en un **amplio margen de frecuencias**, la $Z_c = 1/j\omega C$ asociada a los **CONDENSADORES** **varía apreciablemente con f** , lo cual puede hacer que la salida del amplificador lineal aparezca distorsionada.



La GANANCIA de los amplificadores DEPENDE DE LA FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE ENTRADA:

$$A(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)}$$

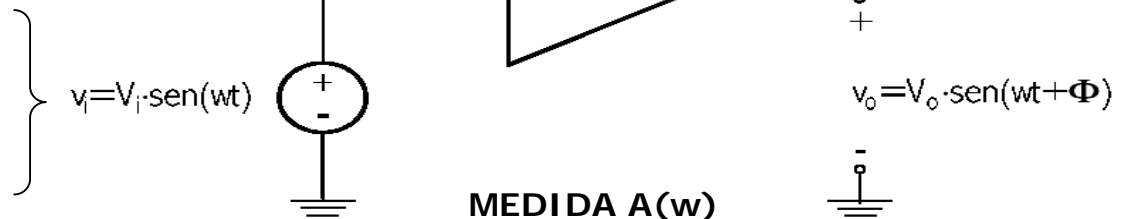


Una de las características más importantes del comportamiento de un amplificador lineal es su respuesta ante señales senoidales de entrada de diferentes frecuencias: **RESPUESTA EN FRECUENCIA**

4.3.1. CÁLCULO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN AMPLIFICADOR LINEAL

Experimentalmente:

- Amplitud V_i pequeña
- Barrido en frecuencia en el margen de frecuencias de interés



Entrada de frecuencia w_o



Circuito lineal



Salida con **igual frecuencia** w_o que la entrada, pero generalmente con **distinta amplitud** y con **desplazamiento de fase** respecto a la entrada.

Caracterización de la Respuesta en Frecuencia de un AMPLIFICADOR a una señal senoidal de frecuencia w_o :

$$|A(w_o)| = \frac{V_o}{V_i}$$

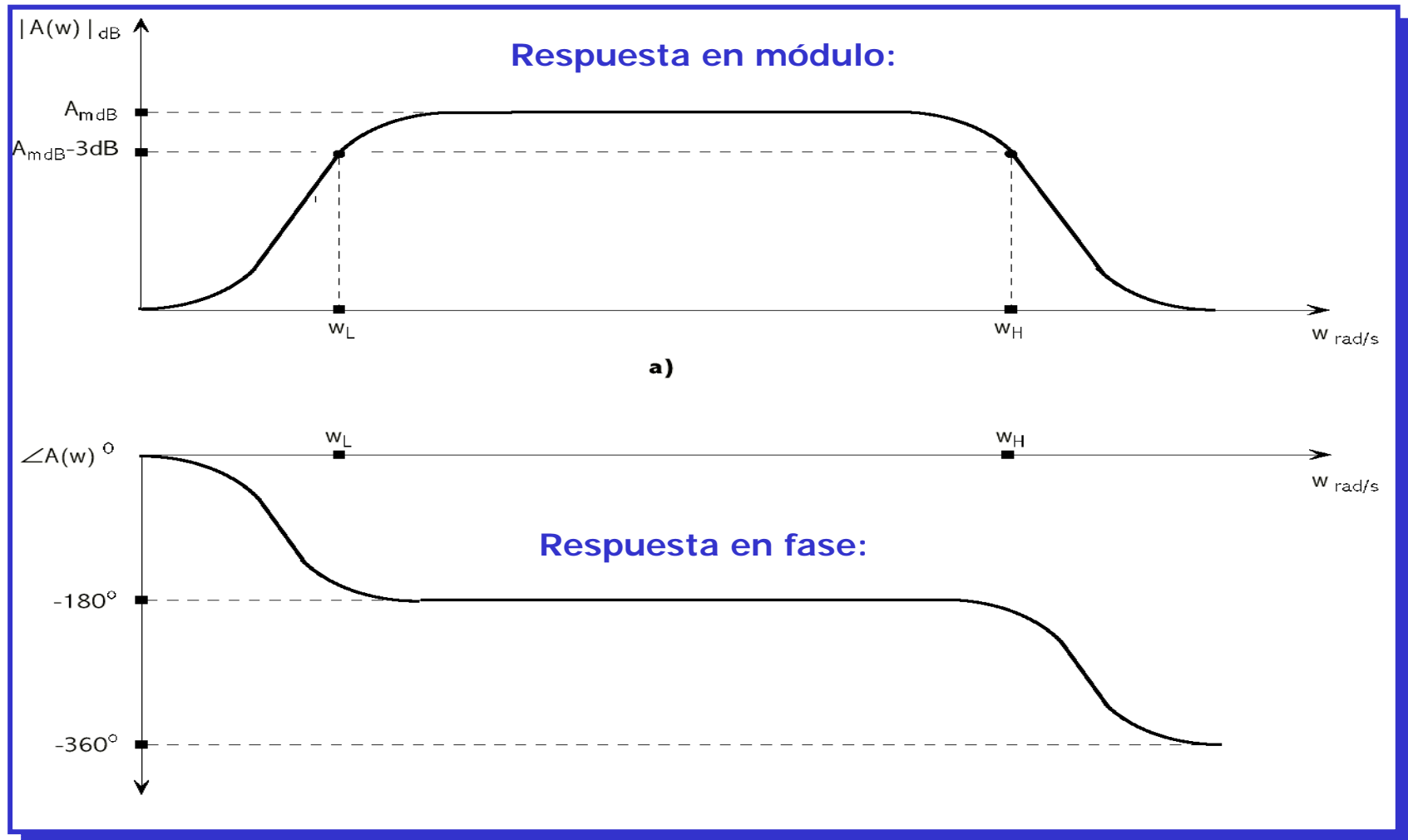
Módulo de la ganancia a w_o (relación de amplitudes)

$$\angle A(w_o) = \Phi$$

Fase de la ganancia a w_o (desfase)

Variando ω_0 y midiendo el módulo y la fase de A:

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MÓDULO Y FASE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL AMPLIFICADOR EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA



4.3.2. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN AMPLIFICADOR REAL

- ✓ Ganancia \approx cte. e independiente de ω en $\omega_L < \omega < \omega_H$. (**BANDA DE FRECUENCIAS MEDIAS**)

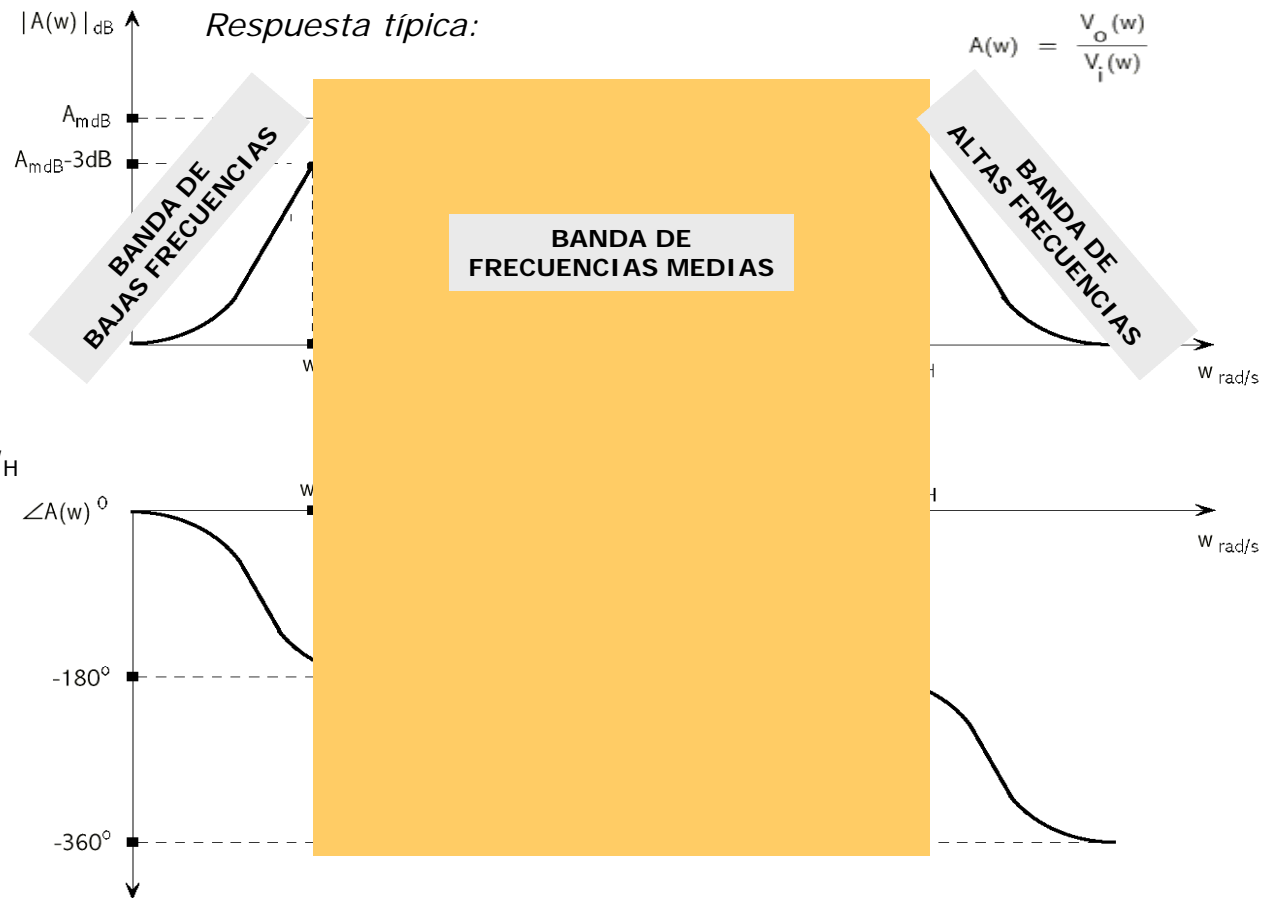
- ✓ Ganancia en $\omega_L < \omega < \omega_H$ **máxima** e igual a A_{mdb}

- ✓ Para señales de frecuencia $\omega < \omega_L$ o $\omega > \omega_H$ la amplitud de la ganancia disminuye gradualmente.

- ✓ ω_L : Frecuencia de Corte Inferior
- ✓ ω_H : Frecuencia de Corte Superior

- ✓ **ANCHO DE BANDA (BW)**: rango de frecuencias en las que el amplificador es útil.

$$BW = \omega_H - \omega_L$$



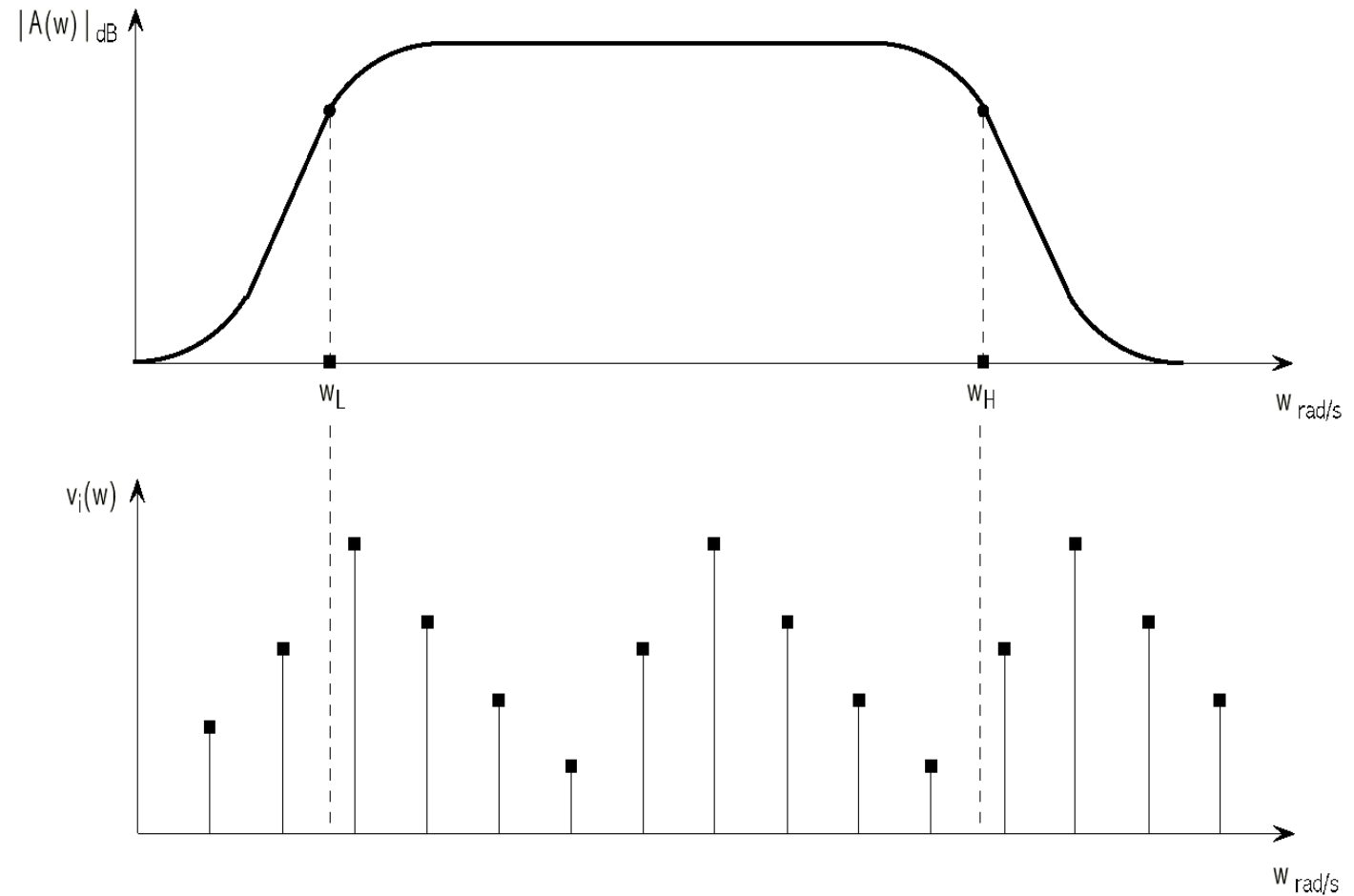
Frecuencias a las que la ganancia **disminuye 3dB** respecto a su valor a frecuencias medias.

$$|A(\omega_L)| = |A(\omega_H)| = A_{\text{mdb}} - 3\text{dB}$$



NECESARIO DISEÑAR EL AMPLIFICADOR DE FORMA QUE SU BW INCLUYA EL ESPECTRO DE LAS SEÑALES A AMPLIFICAR PARA EVITAR LA DISTORSIÓN EN FRECUENCIA.

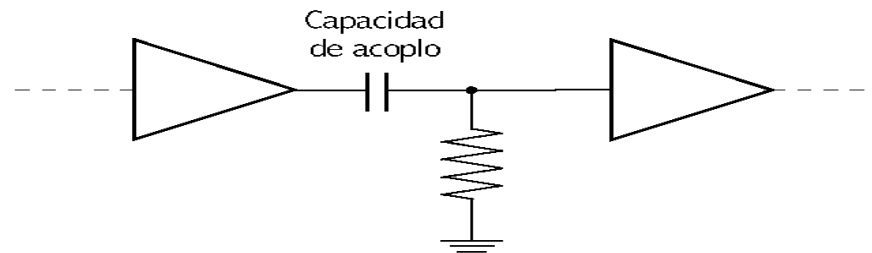
Ejemplo: el siguiente amplificador amplificará diferentes componentes espectrales de la señal de entrada con diferentes ganancias, de forma que **DISTORSIONARÁ EL ESPECTRO DE FRECUENCIAS**, cambiando la forma de onda de la salida.



BANDA DE BAJAS FRECUENCIAS

Caída de ganancia determinada por las capacidades asociadas a los CONDENSADORES DE ACOPLO

Utilizados para conectar en cascada un amplificador a otro y simplificar el proceso de diseño de las diferentes etapas del amplificador, como se verá en sucesivos capítulos.



- ⇒ Su **capacidad** se elige de **valor elevado (decenas de μF)**, de forma que su impedancia equivalente $Z(\omega)$ sea **despreciable** a las **frecuencias de trabajo**. $Z = (1/j\omega C)$
- ⇒ A **frecuencias** lo suficientemente **bajas**, $Z(\omega)$ puede ser lo bastante **elevada** como para provocar caídas de tensión que reduzcan la ganancia final del amplificador.

Los CONDENSADORES DE ACOPLO limitan el valor de ω_L y en consecuencia la FRECUENCIA MÍNIMA de funcionamiento del amplificador

BANDA DE ALTAS FRECUENCIAS

Caída de ganancia determinada por las CAPACIDADES INTERNAS de los transistores utilizados en la implementación física del amplificador, así como las capacidades parásitas asociadas a las conexiones.

⇒ Estas **capacidades** son **muy pequeñas (pF)**, de forma que su impedancia equivalente **Z(w)** es **muy elevada** a las **frecuencias de trabajo**.

$$Z = (1/j\omega C)$$

⇒ A **frecuencias** lo suficientemente **elevadas**, **Z(w)** puede **disminuir** lo bastante como para provocar caídas de tensión que reduzcan la ganancia final del amplificador.

*El propio elemento activo es el que limita el valor de ω_H y en consecuencia la **FRECUENCIA MÁXIMA** de funcionamiento del amplificador*