



Electrónica Analógica

Capítulo 1: Fundamentos de amplificación



Índice

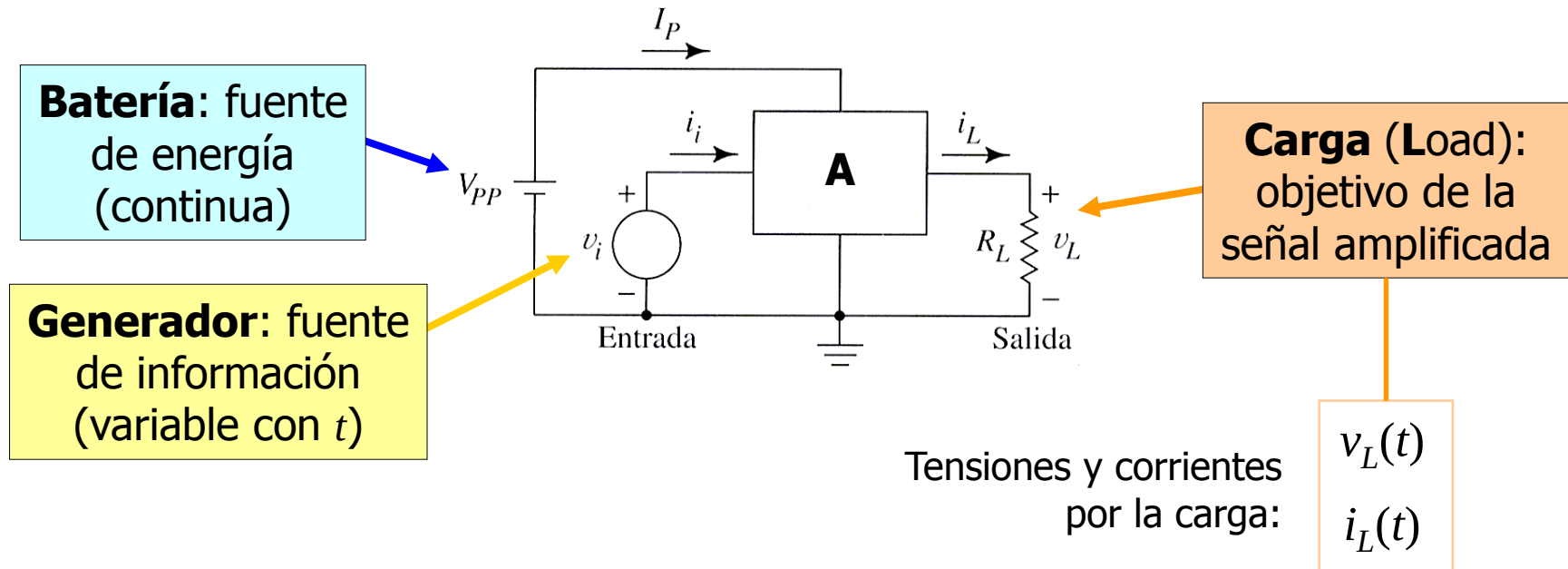
1. Introducción. Principios de modelado
2. Amplificación
 1. Generalidades
 2. Tipos de amplificadores
 3. Ganancias
3. Amplificadores reales: efectos de carga
4. Amplificadores ideales
5. Otras limitaciones
6. Amplificadores multietapa
7. Amplificadores diferenciales
8. Bibliografía
- Anexo: notas complementarias



1.-Principios de modelado: definiciones

❑ Nomenclatura de las señales eléctricas

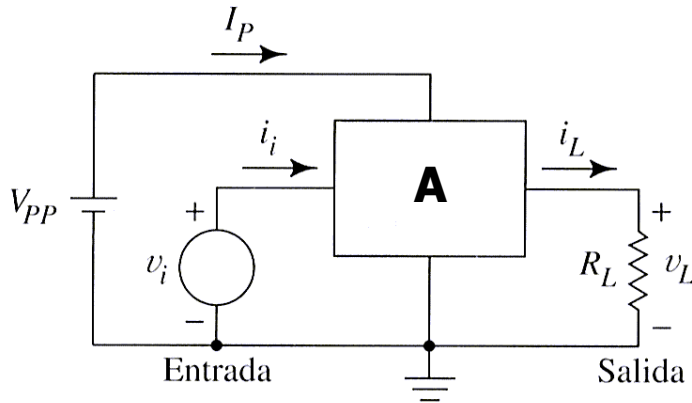
- Tomaremos como ejemplo un amplificador de señal analógica
- Diferenciamos las partes continuas y las variables
 - *normalmente, la fuente de energía es de c. continua (batería)*
 - *normalmente, la información reside en las variaciones de la señal*





1.-Principios de modelado: definiciones

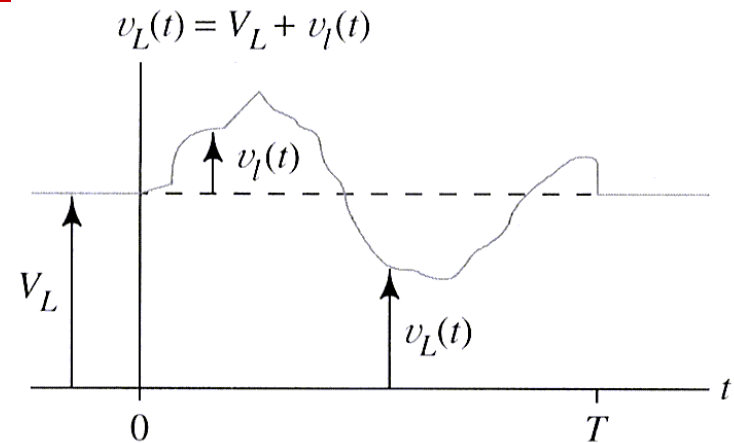
□ Gráficamente...



Según esta nomenclatura para la definición de las señales:

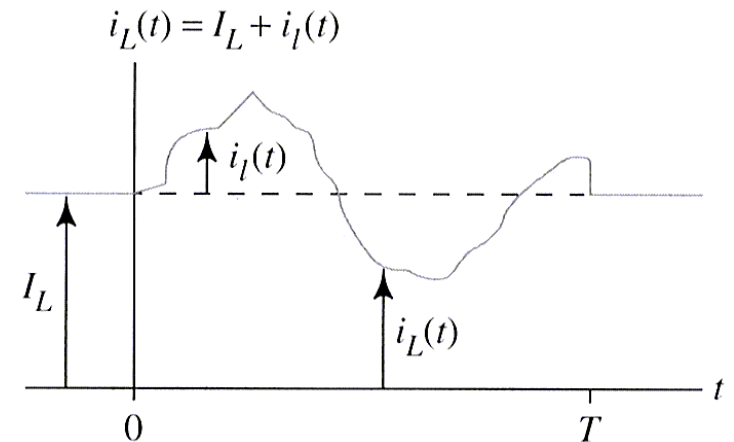
¡Mucho ojo al uso de mayúsculas, minúsculas y subíndices!

➔ En posteriores lecciones veremos cómo manejar adecuadamente todos estos conceptos, según el tipo de circuito y/o de señales implicados.



$$v_L(t) = V_L + v_l(t) = \text{continua} + \text{info } f(t)$$

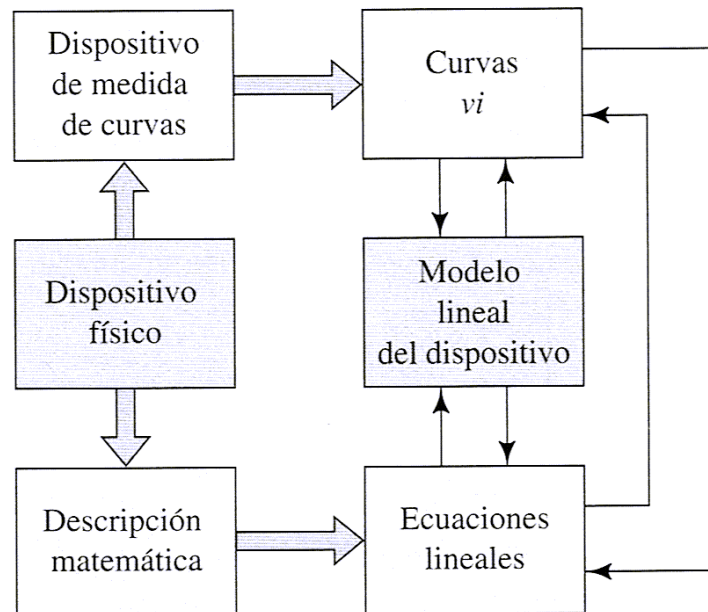
$$i_L(t) = I_L + i_l(t) = \text{continua} + \text{info } f(t)$$





1.-Modelos de dispositivos electrónicos

- ❑ Para analizar/diseñar SSEE usamos análisis de circuitos lineales.
 - Pero muchos dispositivos reales son NO-LINEALES ($v \neq k \cdot i$)
 - Usamos modelos lineales para poder trabajar con ellos (ver Anexo)
 - **Podemos aplicar** las técnicas de análisis de Circuitos Lineales.
 - Hay que ser conscientes de los **límites** de tales modelos.



A lo largo de esta asignatura se estudiarán los **dispositivos físicos**, sus curvas, las ecuaciones que describen su funcionamiento y sus **modelos**.



Igualmente, si se sabe **modelar** un comportamiento dado, llegaremos a saber **qué circuito** podrá responder a ese modelo.

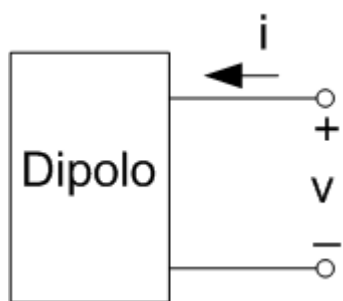


1.-Modelado: dipolos

❑ Modelo:

- Descripción matemática del comportamiento de un dispositivo o circuito en el rango o margen de actuación especificado.
 - *Los modelos eléctricos más simples establecen las relaciones de corriente-tensión entre sus extremos o conexiones.*
 - *Si estas relaciones se muestran de forma gráfica, se conocen como curvas (v-i)*

❑ Si se trata de un dipolo:



Se pueden dar varios casos:

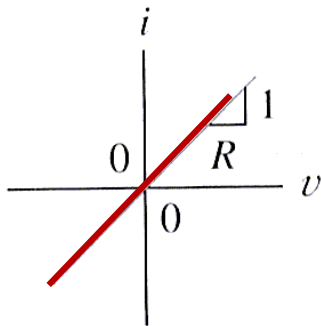
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{relaciones básicas} \left\{ \begin{array}{l} v = Z \cdot i \\ v = K_1, \forall i \\ i = K_2, \forall v \end{array} \right. \\ \text{otras relaciones} \quad \left\{ v = f(i) \right. \end{array} \right.$$



1.-Modelado: dipolos

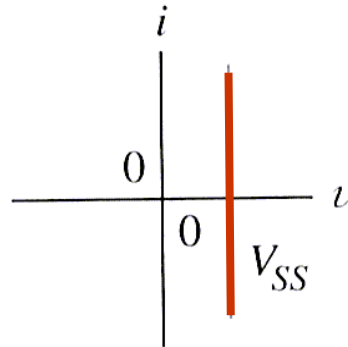
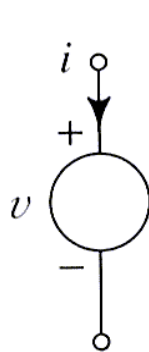
■ Ejemplos de dipolos elementales:

Resistor



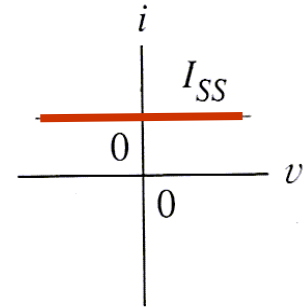
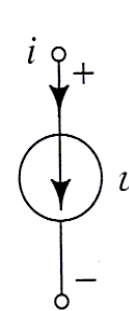
$$v = i \cdot R$$

Generador de tensión ideal



$$v = V_{SS} \quad \forall i$$

Generador de corriente ideal



$$i = I_{SS} \quad \forall v$$

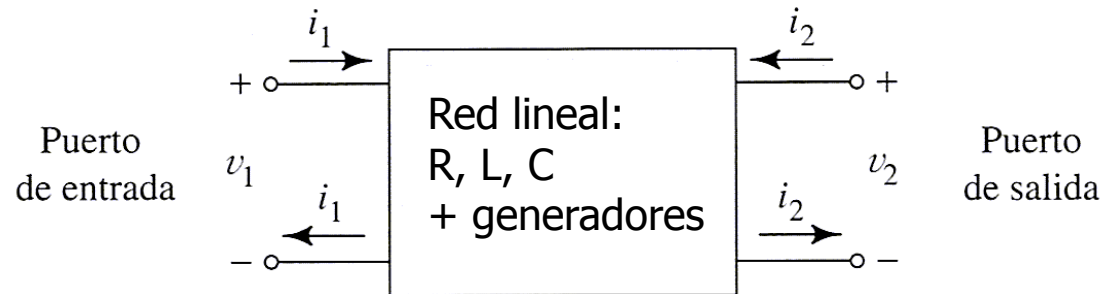
Ejercicio:

Modelo para un dipolo cuya característica es una línea recta que no pasa por el origen, con pendiente positiva.

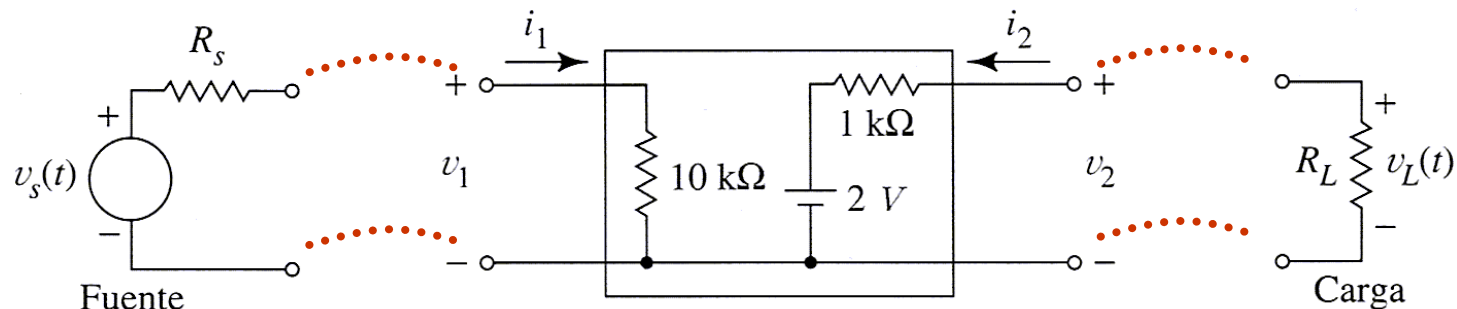


1.-Modelado: cuadripolos

- ❑ Cuadripolo: tienen cuatro terminales (o polos)
 - Dos terminales de **entrada** y dos de **salida** (puertos).



- Hay cuatro variables eléctricas por conocer: v_1, i_1, v_2, i_2
- La estructura interna del cuadripolo define relaciones entre ellas
- Todas las variables quedan fijadas una vez se conocen el **generador** y la **carga**, como se comprueba en el ejemplo siguiente:





1.-Modelado: cuadripolos básicos

Modelo “h”, híbrido: Serie(v_1) – Paralelo(i_2)		Modelo “z”: solo Serie (v_x en 1 y 2)	
Circuito completo	Ecuaciones	Circuito completo	Ecuaciones
	$v_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot v_2$ $i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot v_2$		$v_1 = z_{11} \cdot i_1 + z_{12} \cdot i_2$ $v_2 = z_{21} \cdot i_1 + z_{22} \cdot i_2$

Modelo “g”, híbrido: Paralelo(i_1) – Serie(v_2)		Modelo “y”: solo Paralelo (i_x en 1 y 2)	
Circuito completo	Ecuaciones	Circuito completo	Ecuaciones
	$i_1 = g_{11} \cdot v_1 + g_{12} \cdot i_2$ $v_2 = g_{21} \cdot v_1 + g_{22} \cdot i_2$		$i_1 = y_{11} \cdot v_1 + y_{12} \cdot v_2$ $i_2 = y_{21} \cdot v_1 + y_{22} \cdot v_2$

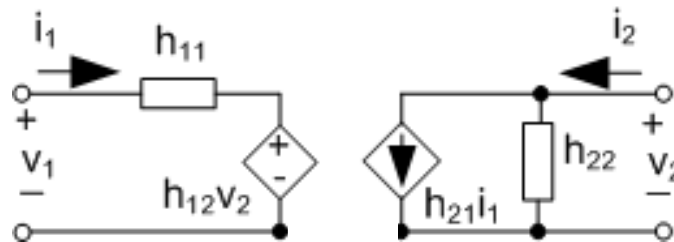


1.-Interpretación de los parámetros

- ❑ Es muy útil comprender el significado y función de los parámetros que describen a un cuadripolo:
 - Parámetros con subíndices iguales: **impedancias terminales**
 - $X_{11} \rightarrow$ impedancia (admitancia) de **entrada**.
 - $X_{22} \rightarrow$ impedancia (admitancia) de **salida**.
 - Parámetros con subíndices diferentes: **de transferencia de** señal
 - $X_{12} \rightarrow$ transferencia **inversa**: señal en la **entrada**, debida a la **salida**.
 - $X_{22} \rightarrow$ transferencia **directa**: señal en **salida**, debida a la **entrada**.
 - Las ecuaciones, en V (serie) o en I (paralelo) nos indican además la **forma** del circuito en ese puerto. Veamos los híbridos [**h**]:

En entrada, v_1 :
suma de tensiones

$$v_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot v_2$$



En salida, i_2 :
suma de corrientes

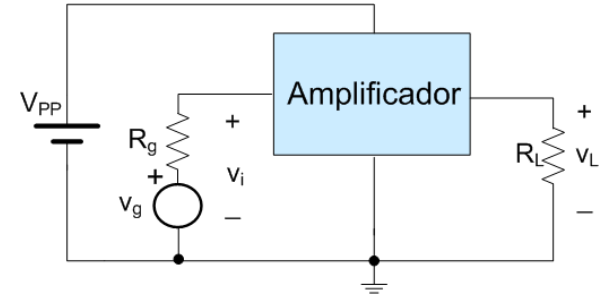
$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot v_2$$



1.-Modelado: amplificadores y cuadripolos

❑ El **Amplificador** como **Cuadripolo**:

- Entrada → generador de señal (fuente)
- Salida → carga (destino)
 - *En muchos casos, hay un terminal común a entrada y salida (masa)*
 - *El efecto de la alimentación (batería), se estudiará en su momento.*



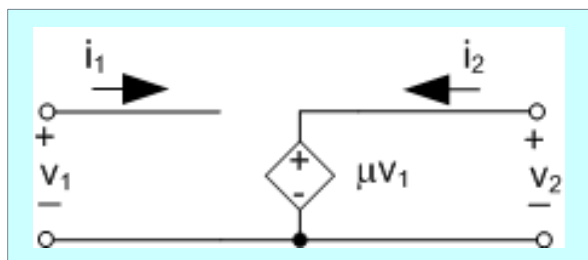
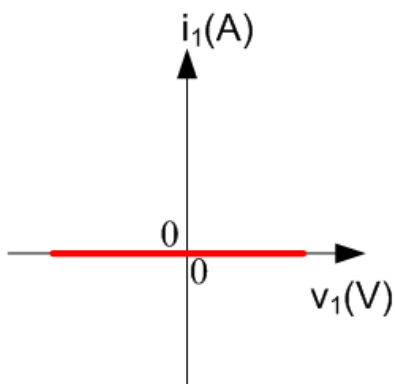
❑ Son muy útiles las relaciones gráficas → curvas ($v-i$)

- Las curvas de **entrada**, **salida** y la **función de transferencia**, visualizan las dependencias entre tensiones y corrientes:
 - **Curvas de entrada**: relacionan corriente y tensión en entrada ($v_1; i_1$)
 - **Curvas de salida**: relacionan corriente y tensión en salida ($v_2; i_2$)
 - **Función de transferencia**: muestra cómo se relacionan las variables de salida con las de entrada. Nos facilita ver **cómo** la señal pasa **desde** la entrada **hasta** la salida del amplificador.

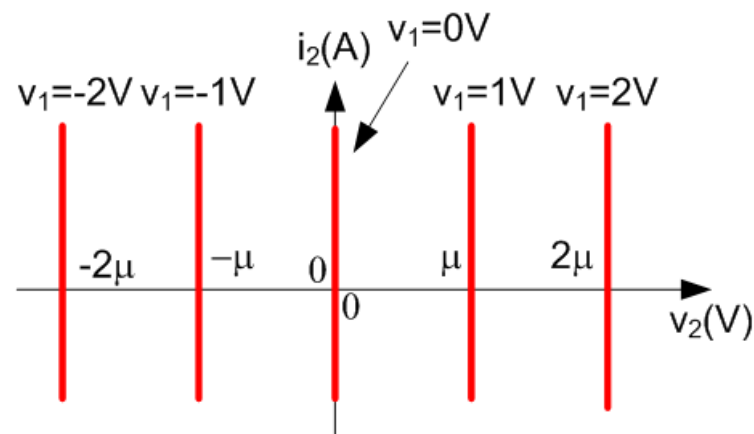


1.-Ejemplos: el VCVS.

- El **VCVS** (Voltage Controlled Voltage Source), ideal:



Parámetro de
transferencia: μ

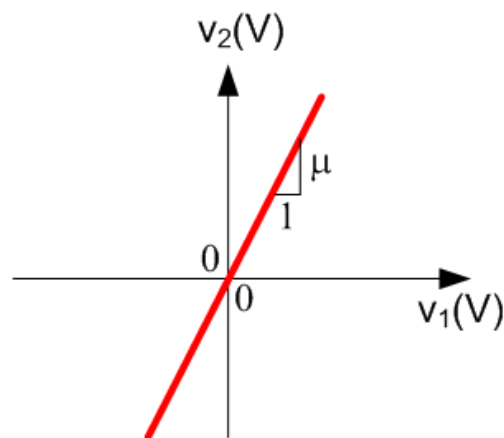


curva de entrada:

$$i_1 = f(v_1) \Rightarrow i_1 = 0, \forall v_1$$

curvas de salida:

$$v_2 = f(i_2) \Rightarrow v_2 = \mu \cdot v_1, \forall i_2$$



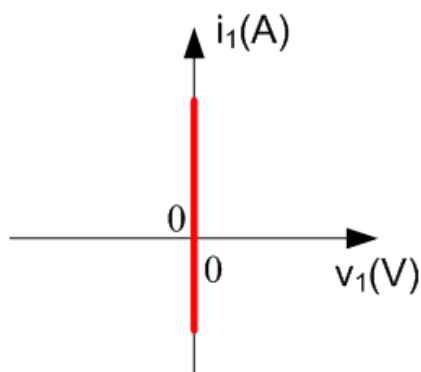
En la salida tenemos, en realidad, **una familia de curvas** que dependen (según μ) del valor de la tensión de entrada.

$$\text{función de transferencia: } v_2 = f(v_1) \Rightarrow v_2 = \mu \cdot v_1$$



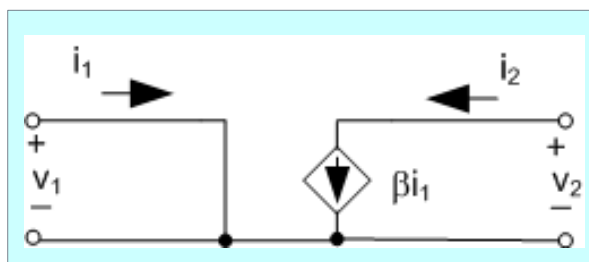
1.- Ejemplos de modelado: el CCCS.

- el **CCCS** (Current Controlled Current Source), ideal:

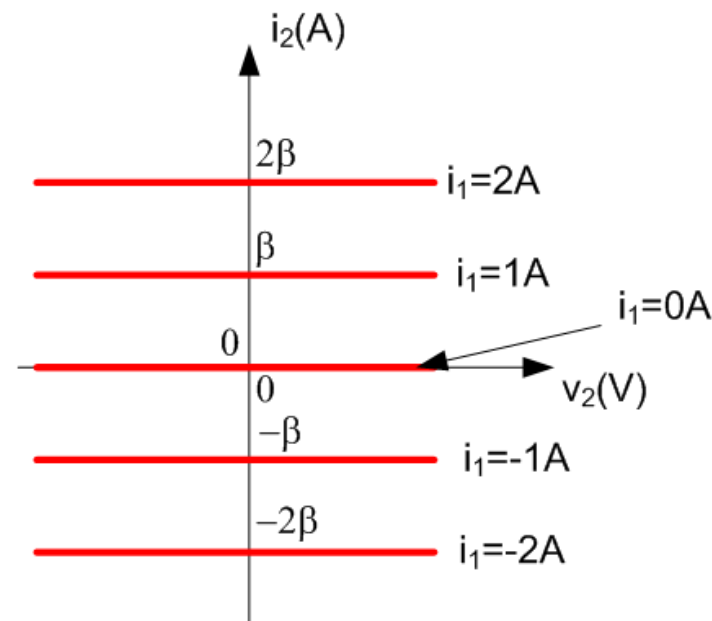
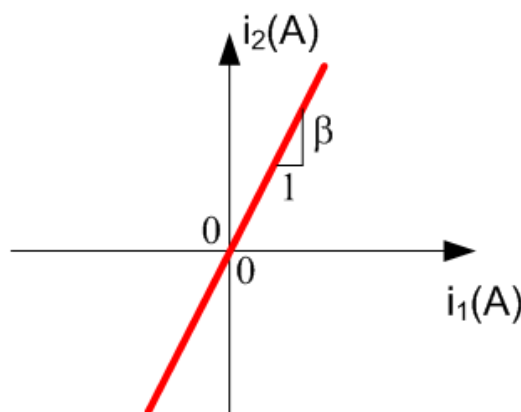


curva de entrada:

$$i_1 = f(v_1) \Rightarrow v_1 = 0, \forall i_1$$



Parámetro de
transferencia: β



curvas de salida:

$$i_2 = f(v_2) \Rightarrow i_2 = \beta \cdot i_1, \forall v_2$$

función de transferencia: $i_2 = f(i_1) \Rightarrow i_2 = \beta \cdot i_1$



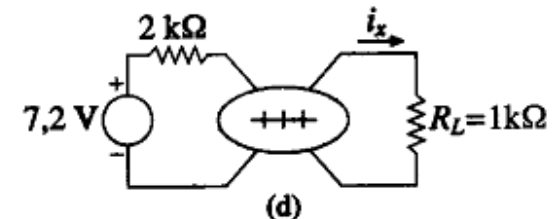
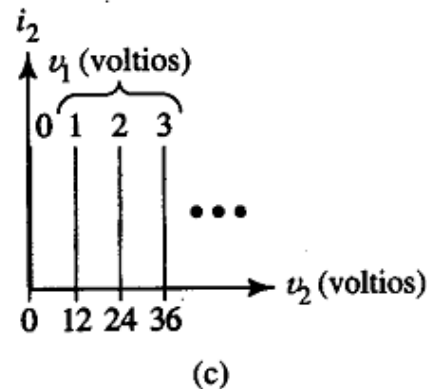
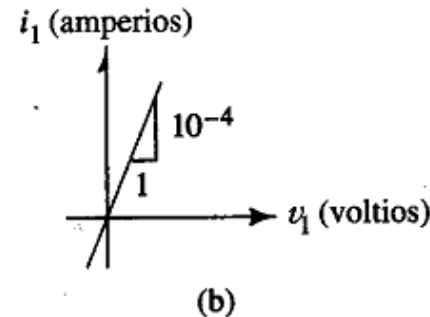
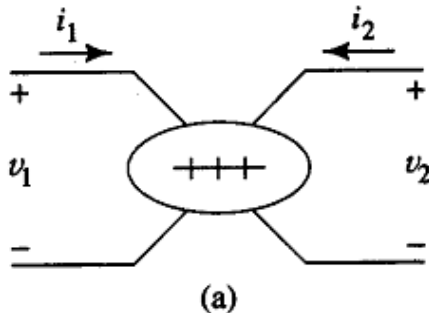
1.-Modelado: ejercicios (1/3).

□ Ejercicio 1.18 (Malik)

El elemento de la fig.(a) tiene la curva v - i de entrada de la fig.(b) y la función de salida de la fig.(c).

a) Dibuje un modelo del circuito que represente al dispositivo cuando funciona en el primer cuadrante de las funciones de entrada y salida.

b) Use el modelo anterior para hallar el valor de i_x en la fig.(d).





1.-Modelado: ejercicios (2/3).

❑ Ejercicio 1.10(Malik)

Un dispositivo cuadripolo tiene la función de transferencia $v_2 = 2v_1$. La corriente de entrada i_1 es siempre 2mA.

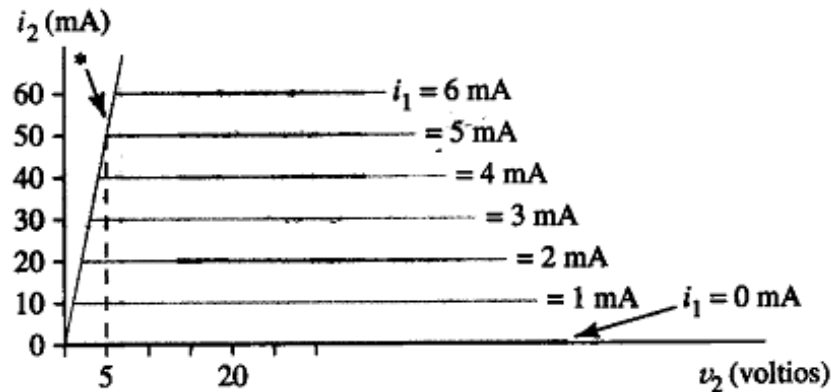
- Represente las funciones de entrada y salida.
- Dibuje un circuito equivalente que represente este cuadripolo.
- Utilice el circuito equivalente anterior para calcular la corriente de salida cuando hay una resistencia de $1\text{k}\Omega$ conectada a la entrada y una de $5\text{k}\Omega$ conectada a la salida.



1.-Modelado: ejercicios (3/3).

❑ Ejercicio 1.8 (Malik)

En la siguiente figura se muestra la función de salida de un dispositivo.



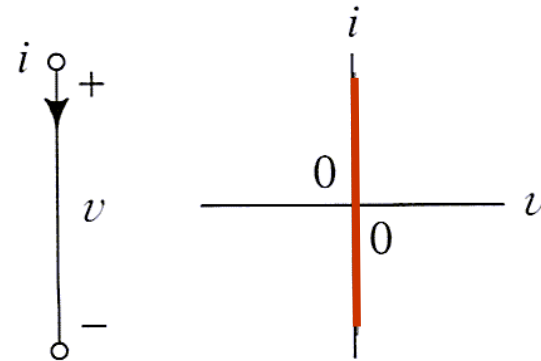
- ¿Qué modelo de un dipolo describe mejor el circuito de salida del dispositivo si $i_1 = 0$?
- ¿Y cuando se tiene $i_1 = 3$ mA y $v_2 > 5$ V?
- ¿Y cuando está en el modo de funcionamiento representado por la línea recta indicada por el asterisco (*)?
- Dibuje el diagrama de un cuadripolo cuya función de salida es idéntica a la obtenida en la región ($v_2 \geq 5$, $0 \leq i_2 < 50$ mA; $0 \leq i_1 < 5$ mA). Asuma que la tensión de entrada v_1 del cuadripolo es siempre 0.



1.-Modelado: trabajo personal (1/3)

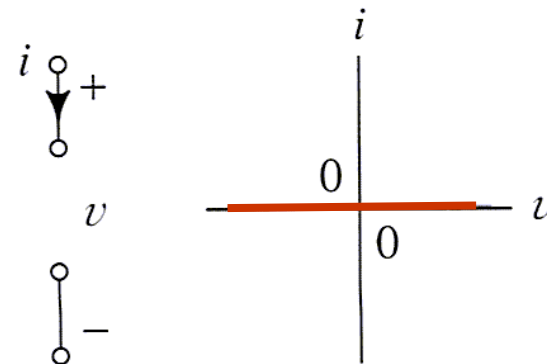
- ¿Qué modelo tiene un **Cortocircuito** (cc $\rightarrow$ *short circuit*, sc)?

- Ecuaciones:
 $v = 0$
 $i = \dots$ indefinida



- ¿Qué modelo tiene un **Circuito abierto** (ca $\rightarrow$ *open circuit*, oc)?

- Ecuaciones:
 $v = \dots$ indefinida
 $i = 0$

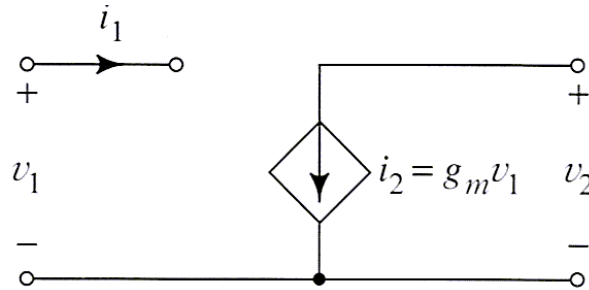




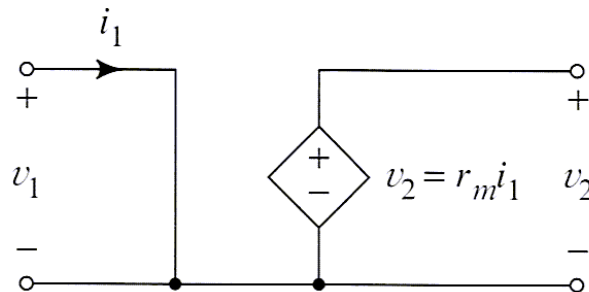
1.-Modelado: trabajo personal (2/3).

❑ Modele (curvas, funciones, etc.) los cuadripolos ...

■ **VCCS** (Voltage Controlled Current Source):



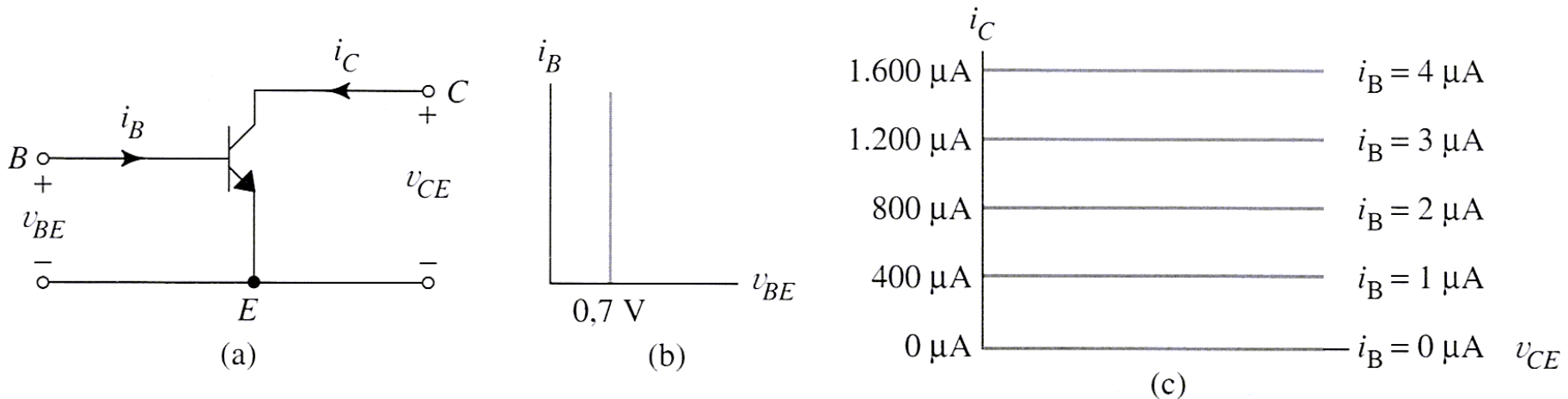
■ y **CCVS** (Current Controlled Voltage Source):



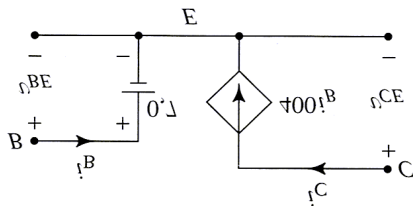


1.-Modelado: trabajo personal (3/3).

- Modelado de un dispositivo sin conocer su estructura interna
 - A partir de las curvas de entrada y salida del dispositivo electrónico **transistor bipolar**, encuentre un **modelo** de cuadripolo que describa su funcionamiento en las zonas mostradas en dichas curvas.



□ Solución...





2.1.-Amplificación: generalidades

❑ Recordatorio de definiciones sobre potencia y tensiones:

- **Potencia** (valor instantáneo): $P(t) = v(t) \cdot i(t)$
- **Potencia media** (señales periódicas)

Matemáticamente, valor medio: Proporcional al área encerrada: $P_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) \cdot dt$

▪ Señal senoidal:
$$\begin{cases} v(t) = V_0 \sen(\omega t) \\ i(t) = I_0 \sen(\omega t) \end{cases} \quad P_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt = \frac{1}{2} V_0 \cdot I_0$$

Otro modo de expresar la potencia media: en función de valores eficaces

Valor eficaz: raíz cuadrada del valor cuadrático medio (root mean square o rms)

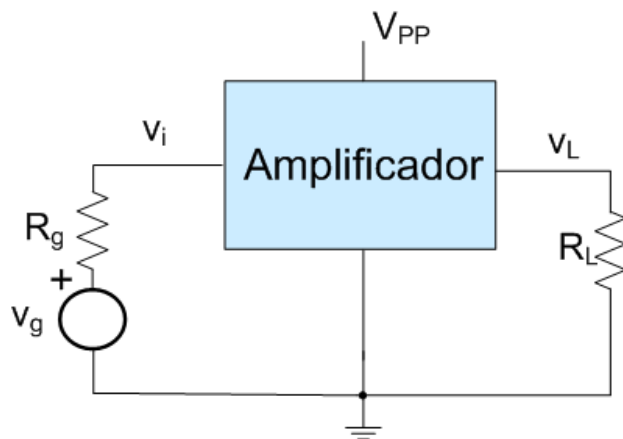
$$V_{ef} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_0 \sen \omega t)^2 \cdot dt} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \Rightarrow P_m = \frac{V_0 \cdot I_0}{2} = V_{ef} \cdot I_{ef}$$

Valor eficaz: valor equivalente de tensión o corriente continua que disipa sobre la misma carga la misma potencia que los valores de señal senoidal.



2.1.-Amplificación: generalidades

- ❑ Un **amplificador** es un circuito electrónico cuya función es proporcionar en su **salida** una **copia de la señal de entrada** en las condiciones de **nivel** y **calidad** requeridas.
 - Normalmente se especifica el nivel necesario de un parámetro eléctrico: **tensión**, **corriente** o **potencia**.
 - Los parámetros necesarios dependen de la aplicación.
 - *Por ejemplo, para escuchar una TV a volumen normal se necesita alrededor de 1 W en el altavoz (una carga R_L de unos 8 Ω).*
 - *Pero en una actuación en público, los amplificadores rondan los kW.*

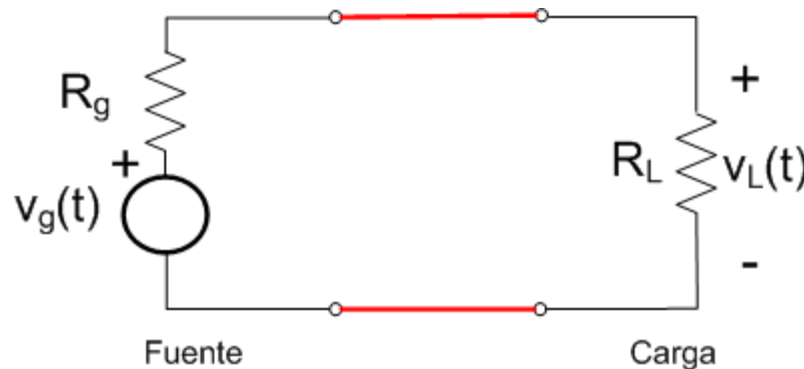




2.1.-Amplificación: generalidades

□ Un ejemplo:

- Se dispone de un lector de cintas de música (fuente) que da una tensión en circuito abierto de 100mV rms y tiene una impedancia interna de 22kΩ. Para poder oír la señal en el altavoz (carga) que es de 8Ω, se necesitan unos 100mW. ¿Se podría oír música conectando la fuente de tensión y carga directamente?
- Solución:

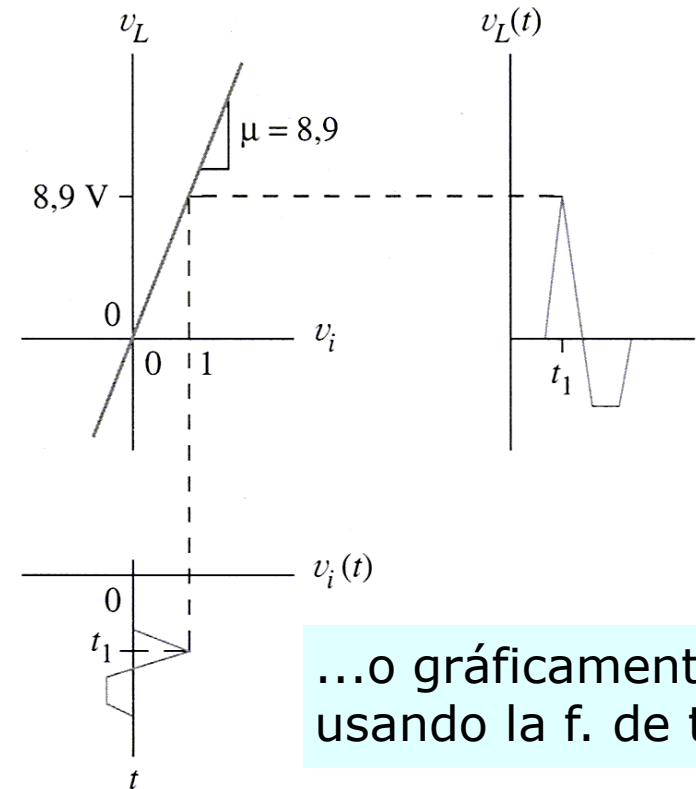
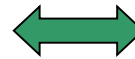
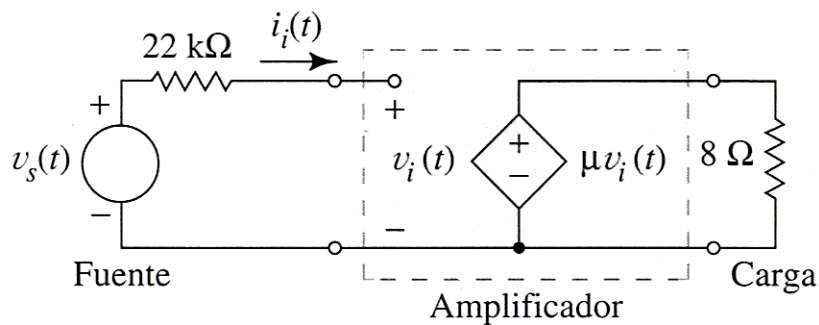


Conexión directa:
$$P_m(\text{en } R_L) = I_{ef}^2 R_L = \left(\frac{V_{gef}}{R_L + R_g} \right)^2 R_L \approx 0,165 \text{ nW}$$



2.1.-Amplificación: generalidades

- ❑ Evidentemente necesitaremos un amplificador que nos permita llegar a la potencia requerida.
- ❑ Para **transferir** la señal de fuente a carga con el **nivel de potencia** requerido podemos usar, p. e. este **VCVS**:



La salida la podemos evaluar analíticamente...

$$P_m = 100mW = \frac{V_{ef}^2}{R_L} = \frac{V_{ef}^2}{8} \Rightarrow V_{ef} = 894mV \Rightarrow \mu \approx 8,9$$

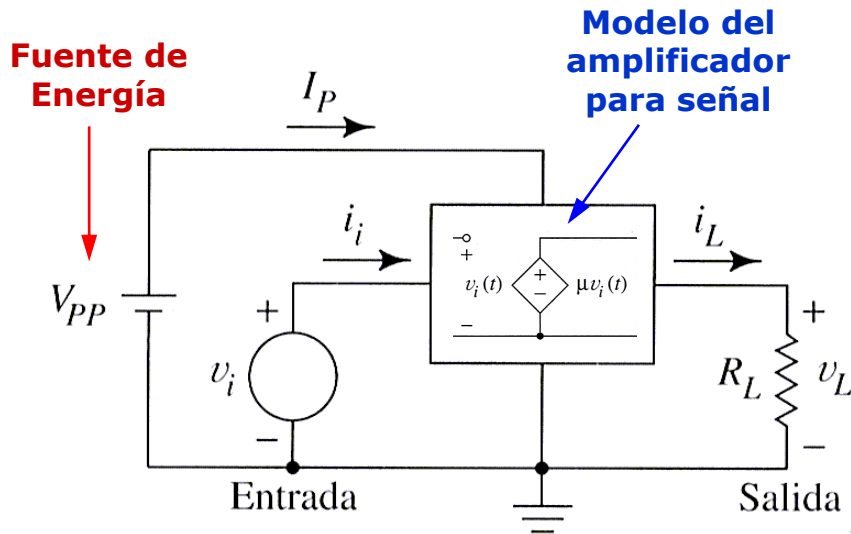
$$v_L(t) = \mu \cdot v_i(t) = \mu \cdot v_s(t) = 8,9 \cdot v_s(t)$$

...o gráficamente usando la f. de t.



2.1.-Amplificación: generalidades

- ❑ En el ejemplo anterior, la carga recibe 100mW pero el generador no entrega potencia alguna ($P_s = 0W$), pues $i_i = 0$.
 - Si el **VCVS** es pasivo (un gen. dependiente)...
...¿**de dónde sale la potencia** que recibe la carga?
 - La respuesta es clara: **de la fuente de energía** (batería, f. de a.)



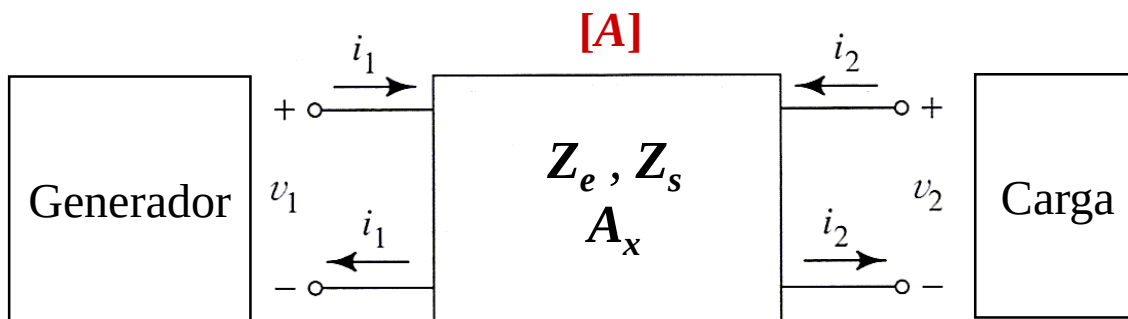
- ✓ El modelo del amplificador recoge el modo en el que la señal **se transfiere** de entrada a salida:
 - ➔ La fuente de energía está implícita en el modelo a través de la **cte.** del gen. dependiente.
- ✓ Los terminales de alimentación de energía **son diferentes** a los de entrada y salida de señal.
- ✓ Energía y señal están relacionadas entre sí, se tratan **por separado**,
 - ➔ pero **sin energía no hay señal**



2.1.-Amplificación: generalidades

□ Modelo básico de un amplificador lineal, A :

- Se define como un **Cuadripolo**, Q , con parámetros adecuados para las componentes de señal variable. Por eso:
 - Los dispositivos internos **deben** ser lineales o **estar en una zona lineal**.
- El amplificador básico tiene sólo tres parámetros:
 - Las dos impedancias terminales (parámetros 11 y 22): Z_e y Z_s
 - El parámetro de transferencia directa (transmitancia, 21): A_x
 - Con solo tres parámetros las ecuaciones **se simplifican mucho**



$$[Y] = [A] \cdot [X]$$

↓

$$[Y] = \begin{bmatrix} (Z_e) & 0 \\ A_x & (Z_s) \end{bmatrix} \cdot [X]$$

El tipo (modelo) de A_x define el tipo de amplificador A



2.2.-Tipos de amplificadores:

- Según el tipo de generador y de carga se tienen las variables entrada/salida más adecuadas:

- Generadores (entradas X_e)

- de tensión (v_e), como micrófonos:



- de corriente (i_e), como los fotodetectores:



- Cargas (salidas X_s)

- que necesitan tensión (v_s), como los altavoces:



- que necesitan corriente (i_s), como dispositivos bobinados:



- En consecuencia, se tienen cuatro combinaciones posibles de entradas salidas, X_s y X_e , preferidas según la aplicación dada.

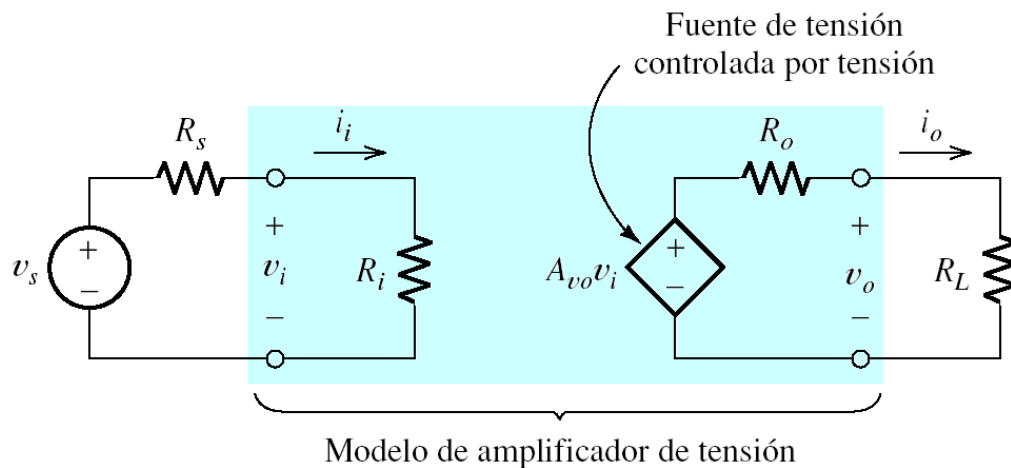
- Cada combinación **define** un tipo de amplificador A_x .
- Comenzaremos el estudio de cada tipo con el A de tensión.



2.2.-Tipos de amplificadores: A. de tensión

❑ Características:

- Las variables preferentes en entrada y salida son **tensiones**
- Por eso, el generador de salida del amplificador tiene un VCVS
- Las medidas "en circuito" son sencillas de hacer
 - *En paralelo con los terminales: con voltímetro, osciloscopio o similar*



Ecuaciones en el amplificador:

$$\begin{cases} v_i = R_i \cdot i_i \\ v_o = A_{vo} \cdot v_i - R_o \cdot i_o \end{cases}$$

En generador y carga:

$$\begin{cases} v_i = v_s - R_s \cdot i_i \\ v_o = R_L \cdot i_o \end{cases}$$

Ejercicio: →

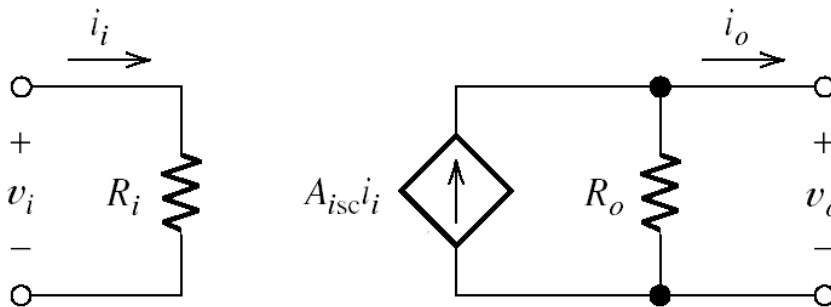
¿Cómo se mediría el parámetro μ del VCVS?
¿Tiene relación con ello el nombre A_{vo} ?



2.2.-Otros amplificadores: de corriente

❑ Características:

- Las variables preferentes en entrada y salida son corrientes
- El generador de salida del amplificador tiene un CCCS
- Las medidas "en circuito" son más complicadas (como un amperímetro)



Medida de la transmitancia:

$$A_{isc} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{R_L=0} = G_I \Big|_{\text{salida en c.c.}} \quad \left(\frac{A}{A} \right)$$

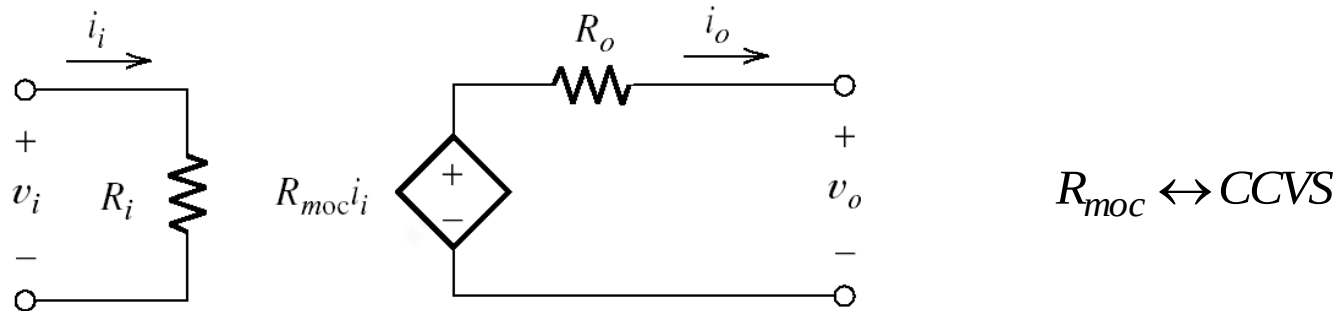
- ✓ En esencia, la salida de un amplificador de **corriente** se modela a partir de un **equivalente Norton** de todo el circuito.
- ✓ De igual manera, el amp. de **tensión** es un **equivalente Thévenin**.
- ✓ Si es posible, se puede **pasar de uno a otro tipo** simplemente convirtiendo el generador de salida, referenciando la variable de entrada adecuada.



2.2.-Otros amplificadores: A_Z y A_Y

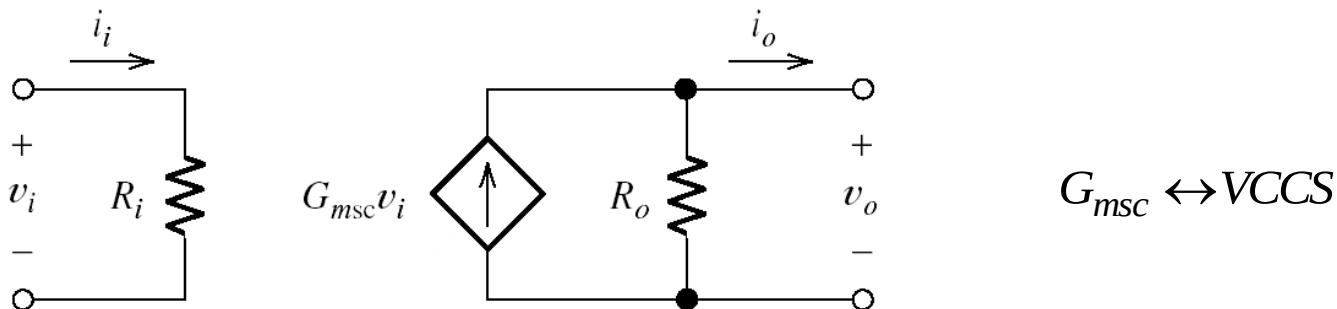
□ Amplificador de **trans-impedancia**, A_Z :

- La transmitancia tiene unidades de Z (salida, v_o ; entrada, i_i)



□ Amplificador de **trans-admitancia**, A_Y :

- La transmitancia tiene unidades de Y (salida, i_o ; entrada, v_i)





2.3.-Ganancias

- Es la relación existente entre las variables eléctricas consideradas en entrada y salida del amplificador.
 - dan una medida de la **transferencia real** de señal de entrada a salida.
 - en general, pueden ser **números complejos** (módulo-fase).
- Cinco definiciones básicas, en función de las variables tomadas:

X_{salida}	X_{entrada}	Ganancia	Unidades	Nomenclatura
P_o	P_i	(P_o / P_i)	(W/W)	Ganancia de Potencia
v_o	v_i	(v_o / v_i)	(V/V)	de (trans)- tensión
i_o	i_i	(i_o / i_i)	(A/A)	de (trans)- corriente
v_o	i_i	(v_o / i_i)	Ω	de transimpedancia (compleja) o de transresistencia (si es real)
i_o	v_i	(i_o / v_i)	$1/\Omega$	de transadmitancia (compleja) o de transconductancia (si es real)



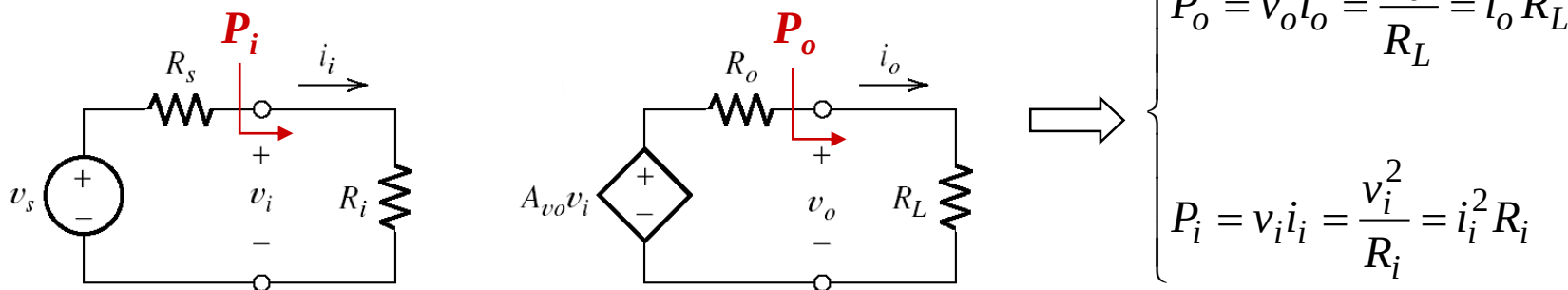
2.3.-Ganancia de potencia

❑ Un caso interesante es la Ganancia de Potencia.

■ Se define como:

$$G_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\text{Potencia entregada a la carga}}{\text{Potencia en la entrada del Amp.}} \quad \left(\frac{W}{W}\right)$$

■ En el amp. de la figura se tiene...



$$G_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = G_v G_i = G_v^2 \frac{R_i}{R_L} = G_i^2 \frac{R_L}{R_i} = \dots \quad \left(\frac{W}{W}\right)$$

- ➔ ¡Múltiples maneras para obtener el valor del parámetro deseado!
- ➔ Aplicables todas las técnicas y reglas del análisis de circuitos lineales.



2.3.-Ganancia de potencia: el deciBelio

- ❑ Es habitual manejar las ganancias en unidades logarítmicas.
 - Las ganancias prácticas se dan en un rango muy amplio.
 - Muchos efectos se modelan u operan mejor con logaritmos
 - *percepción humana: octavas en música; intensidad sonora; ...*
 - *los productos se transforman en sumas; las exp. en productos; ...*

❑ Definición

- Sobre la relación de potencias:

$$G_{PdB} = 10 \cdot \log G_P \text{ (dB)}$$

← el dB es adimensional

- Por extensión, se puede aplicar al resto de ganancias, pero...
 - *...iojo con las **dimensiones** y los valores **complejos**!*

Muy usadas en dB:

$$G_{VdB} = 20 \cdot \log |G_V| \text{ (dB)}$$

$$G_{IdB} = 20 \cdot \log |G_I| \text{ (dB)}$$

No usadas, por...

$$G_{ZdB} = 20 \cdot \log \left| \frac{G_Z}{\Omega} \right| \text{ (dB}\Omega\text{)}$$
$$G_{YdB} = 20 \cdot \log \left| \frac{G_Z}{S} \right| \text{ (dBS)}$$



Ejemplos:

❑ Ejercicio 1.20 (Malik)

Halle la ganancia de tensión necesaria si un amplificador de tensión, con impedancia de entrada infinita y nula en la salida, se conecta a una fuente de señal de 2 miliVoltios (rms) con resistencia interna de $200\ \Omega$ sobre una carga de $50\ \Omega$ que necesite $1/2\ \text{W}$ de potencia.

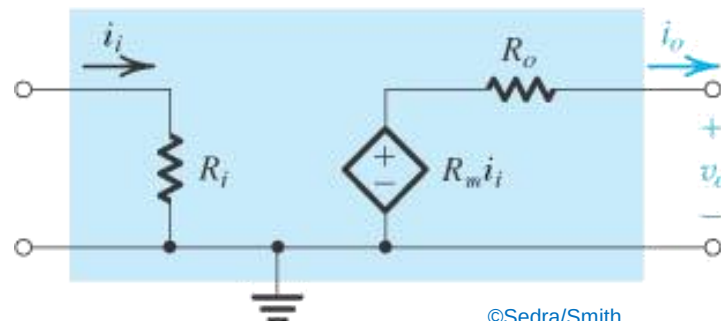
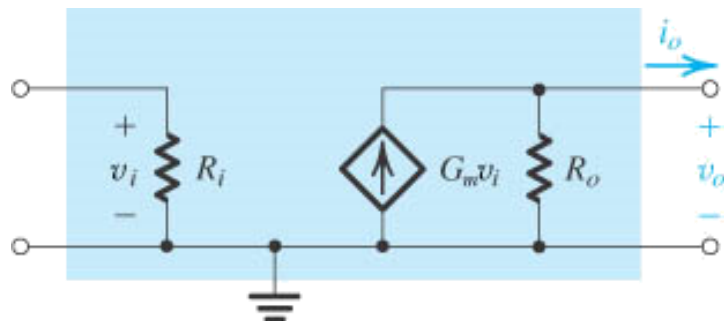
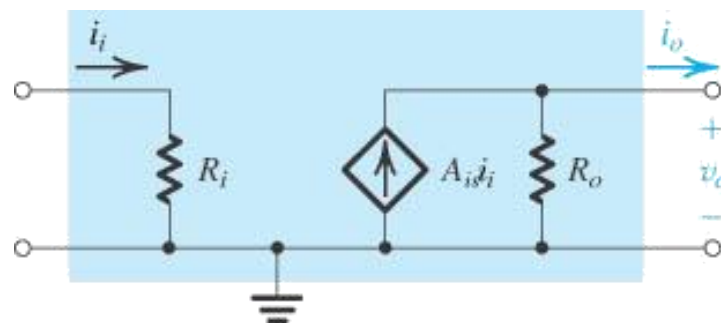
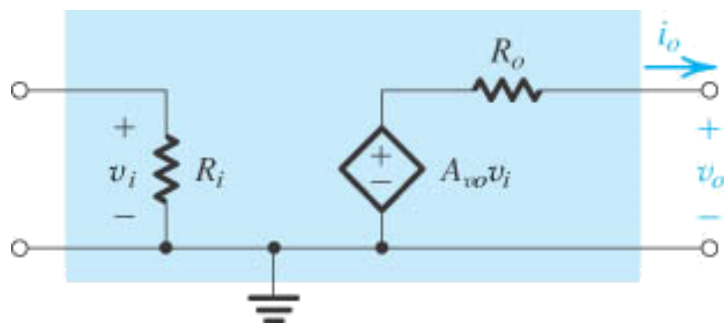
❑ Ejercicio 1.23 (Malik)

Si utilizamos un CCCS con transmitancia β para entregar $100\ \text{mW}$ de potencia a una carga de $8\ \Omega$ desde una fuente de tensión de $0,1\text{V}$ y $1\ \text{k}\Omega$ de resistencia, halle el mínimo valor válido para β .



3.-Amplificadores reales: efectos de carga

- En general, un amplificador real presenta impedancias en sus terminales de entrada y salida:
 - En entrada Z_e es distinta de cero o infinito (c.c. o c.a.)
 - En salida, el generador no es ideal (Z_s distinta de cero o infinito)

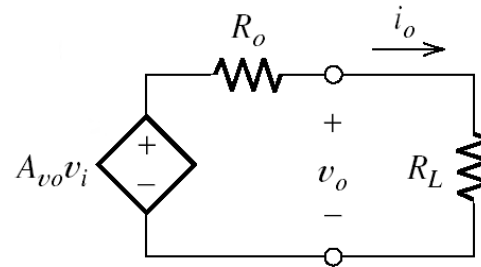
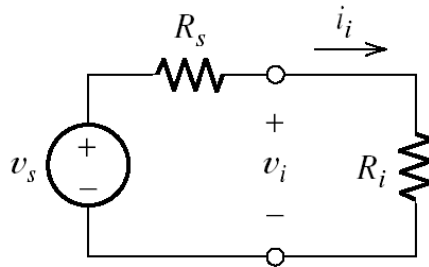


©Sedra/Smith



3.-Amplificadores reales: efecto de carga

- Las impedancias terminales provocan una disminución de la señal que puede transferirse a la salida.
- Veámoslo en este ejemplo: calculemos todas las ganancias...



Sobre el cto. se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_o = R_L \cdot i_o = (A_{vo} v_i) \frac{R_L}{R_L + R_o} \\ v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s} \end{array} \right\} \rightarrow$$

$$G_V = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o} \quad \left(\frac{V}{V} \right)$$

$$G_I = \frac{i_o}{i_i} = \frac{(A_{vo} \cdot v_i) / (R_o + R_L)}{v_i / R_i} = \frac{A_{vo} R_i}{(R_o + R_L)} \quad \left(\frac{A}{A} \right)$$

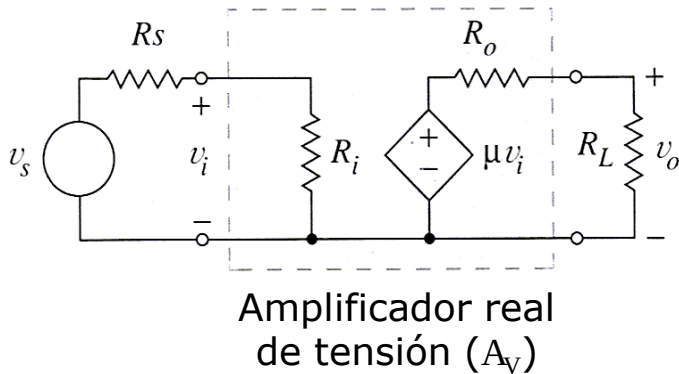
$$G_Z = \frac{v_o}{i_i} = (A_{vo} v_i) \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot \frac{R_i}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o} R_i \quad (\Omega)$$

$$G_Y = \frac{i_o}{v_i} = \frac{A_{vo} v_i}{R_L + R_o} \cdot \frac{1}{v_i} = \frac{A_{vo}}{R_L + R_o} \quad (\Omega^{-1})$$



3.-Amplificadores reales: efectos de carga

- ❑ Vemos diferentes términos interesantes en cada expresión:



➔ la ganancia salida/entrada, A_v , vale:

$$v_o = (\mu v_i) \frac{R_L}{R_L + R_o} \quad \Rightarrow \quad A_v = \frac{v_o}{v_i} = \mu \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

➔ y si definimos otra ganancia referida al generador v_s , se tiene entonces:

$$A'_v = \frac{v_o}{v_s} \quad \Rightarrow \quad A'_v = \frac{R_i}{R_i + R_s} \mu \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

aparecen dos términos, en impedancias, que hacen que la nueva ganancia sea siempre inferior a la transmitancia, μ :

- son los **factores de carga de entrada y salida**:
 - alejan al **amplificador real** de la situación **ideal** → **máxima ganancia** = μ
- pero si los factores de carga ≈ 1 , se tiene que
 - un **amplificador real** se comportaría **como ideal** si los efectos de carga en entrada y salida son despreciables (≈ 1) ⇒ con un diseño adecuado:

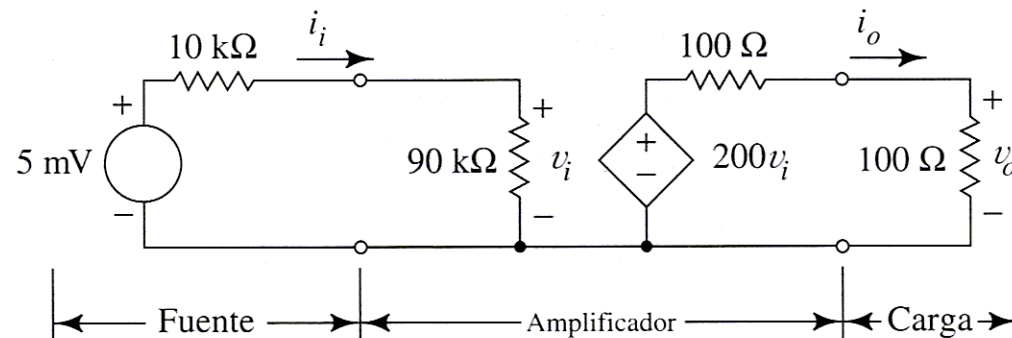
$$R_s \ll R_i \quad , \quad R_o \ll R_L \quad \Rightarrow A'_v \approx \mu$$



3.-Amplificadores reales: efectos de carga

□ Ejercicio 2.1. Sobre el amplificador de la figura adjunta:

1. Determine las ganancias de corriente y potencia.
2. ¿Qué tensión habría en la carga si ésta se conectase directamente al generador?
3. Admitiendo un error de aproximación de alrededor del 10% ¿qué valores debieran tener las impedancias terminales del amplificador (Z_e y Z_s) para considerarle ideal?



□ Ejercicio 2.2.

- Haga una tabla que indique qué condiciones han de cumplir las impedancias terminales (Z_e y Z_s) de cada tipo de amplificador real para aproximarse a la situación ideal correspondiente.



4.-Amplificadores ideales

- ❑ Todo amplificador puede ser descrito con cualquiera de las cinco ganancias básicas, G_X . Si bien:
 - El **tipo de ganancia** más **conveniente** para modelar un amplificador real viene definido frecuentemente por la aplicación:
 - *En audio, se prefiere la Ganancia de Tensión, pues generador y carga se caracterizan mejor de esa manera y además es más fácil de medir.*
 - *En otros casos, el tipo de generador y carga **definen** el tipo de señal de entrada, salida y la ganancia preferente para modelar el problema.*
- ❑ Caso especial, los **Amplificadores Ideales**:
 - Sus impedancias terminales son **ideales** (según el caso: **cero** o ∞)
 - *La señal entregada en la salida no depende del valor de la carga, R_L*
 - *No extraen potencia alguna del generador de señal $P_e = 0$.*
 - alguna de sus ganancias (y siempre G_p) tienden a infinito
 - Un sólo amplificador ideal para **cada tipo** de amplificador.



4.-Amplificadores ideales

- ❑ Los **cuatro** A. ideales se corresponden con:

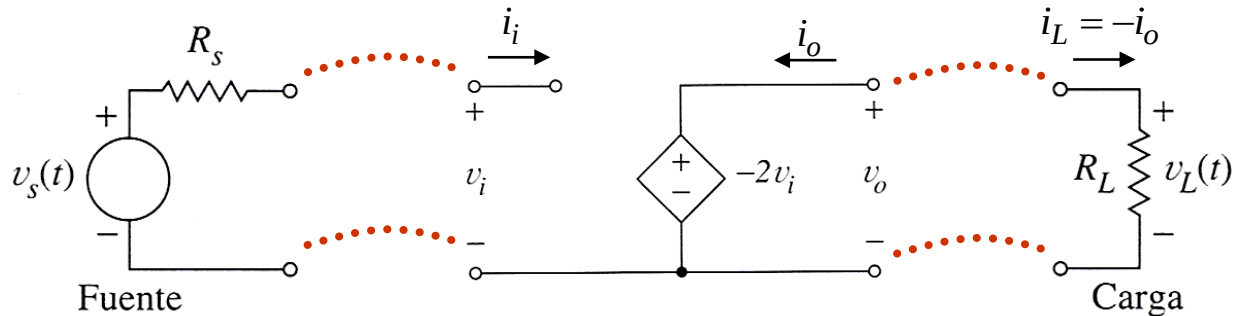
X_{salida}	X_{entrada}	Nombre	Modelo	Z terminales y Transmitancia
V_s	V_e	VCVS, A_V		$Z_e \rightarrow \infty \quad Z_s = 0$ $\mu = (\text{trans})\text{-tensión (V/V)}$ nombre genérico: A_V
i_s	i_e	CCCS, A_I		$Z_e = 0 \quad Z_s \rightarrow \infty$ $\beta = (\text{trans})\text{-corriente (A/A)}$ nombre genérico: A_I
V_s	i_e	CCVS, A_Z		$Z_e = 0 \quad Z_s = 0$ $r_m = \text{transresistencia } (\Omega)$ nombre genérico: A_Z
i_s	V_e	VCCS, A_Y		$Z_e \rightarrow \infty \quad Z_s \rightarrow \infty$ $g_m = \text{transconductancia (1/}\Omega\text{)}$ nombre genérico: A_Y



4.-Amplificadores ideales

❑ Ejemplo:

■ Amplificador **ideal de tensión, (inversor)**.



✓ Ecuaciones:

$$v_L = v_o = \mu \cdot v_i = -2 \cdot v_i = -2 \cdot v_s$$

✓ Ganancias para el A_v ideal:

$$G_V = \frac{v_o}{v_i} = -2 = \mu \neq f(R_L)$$
$$G_P = \frac{P_L}{P_i} = \frac{v_L \cdot i_L}{v_i \cdot i_i} = \frac{X}{0} \rightarrow \infty$$

✓ Otras ganancias:

$$G_I = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{0} \rightarrow \infty$$

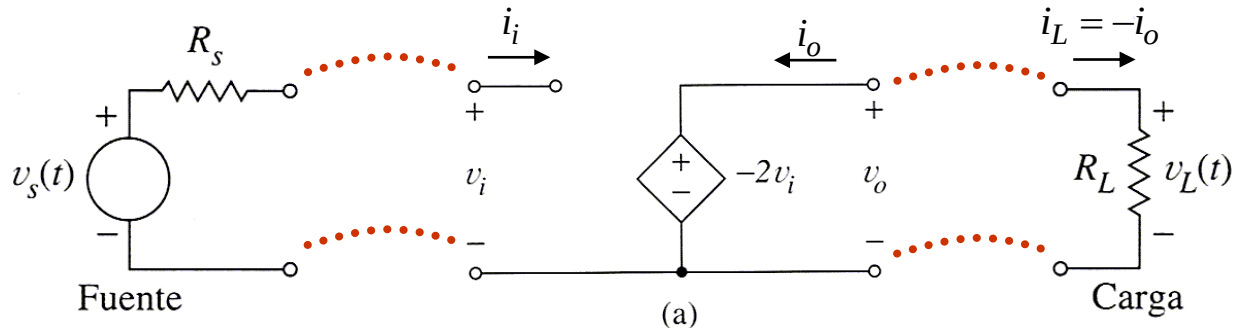
$$G_Z = \frac{v_s}{i_i} = \frac{v_s}{0} \rightarrow \infty$$

$$G_Y = \frac{i_o}{v_i} = \frac{v_o / R_L}{v_i} = \frac{-2}{R_L}$$



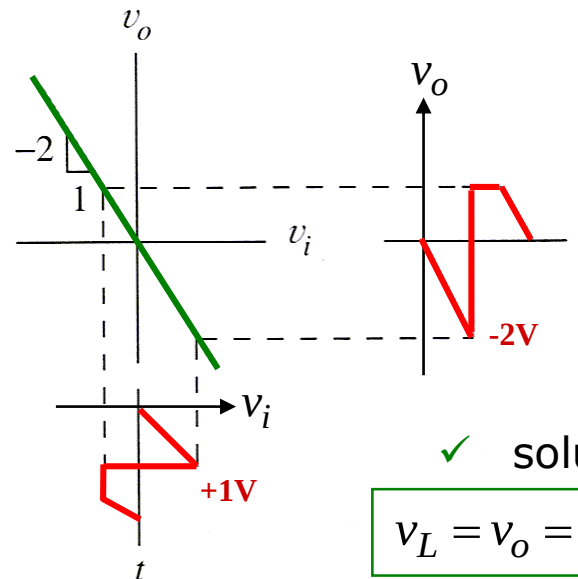
4.-Amplificadores ideales

- El nombre de **Amplificador inversor**, deriva del hecho de que la señal de salida está invertida respecto a la de entrada:



- Conocida la señal de entrada se puede obtener la salida gráficamente, mediante la **función de transferencia**.
- Note que la **transmitancia** es la **derivada** de la **función de transferencia**:

$$A_V = \mu = \frac{dv_o}{dv_i}$$



✓ solución analítica:

$$v_L = v_o = \mu \cdot v_i = -2 \cdot v_i = -2 \cdot v_s$$



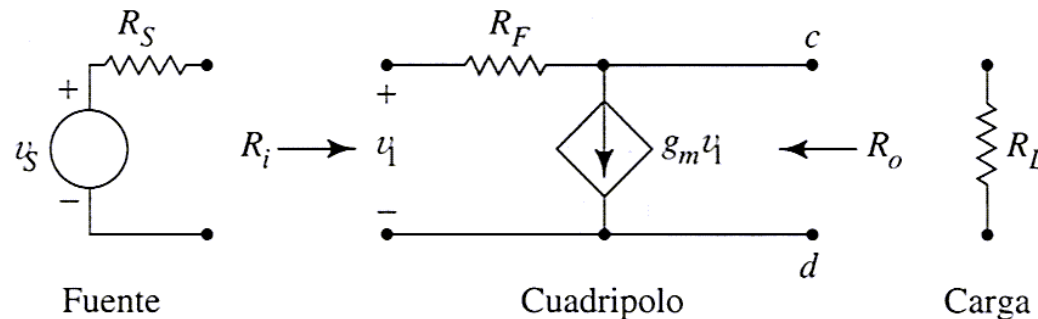
5.-Otras características

- ❑ Los modelos generales de los amplificadores muestran los efectos más importantes:
 - Impedancias terminales y transmitancia.
- ❑ En una primera aproximación los parámetros se han considerado como constantes.
 - ...pero esto no permite considerar otras características.
- ❑ Es necesario completar la definición de los amplificadores añadiendo otras características que modelen:
 - Limitaciones
 - Dependencias con otros parámetros externos o internos
 - Errores
 - etc.



5.-Limitaciones: dependencias en $Z_{e,s}$

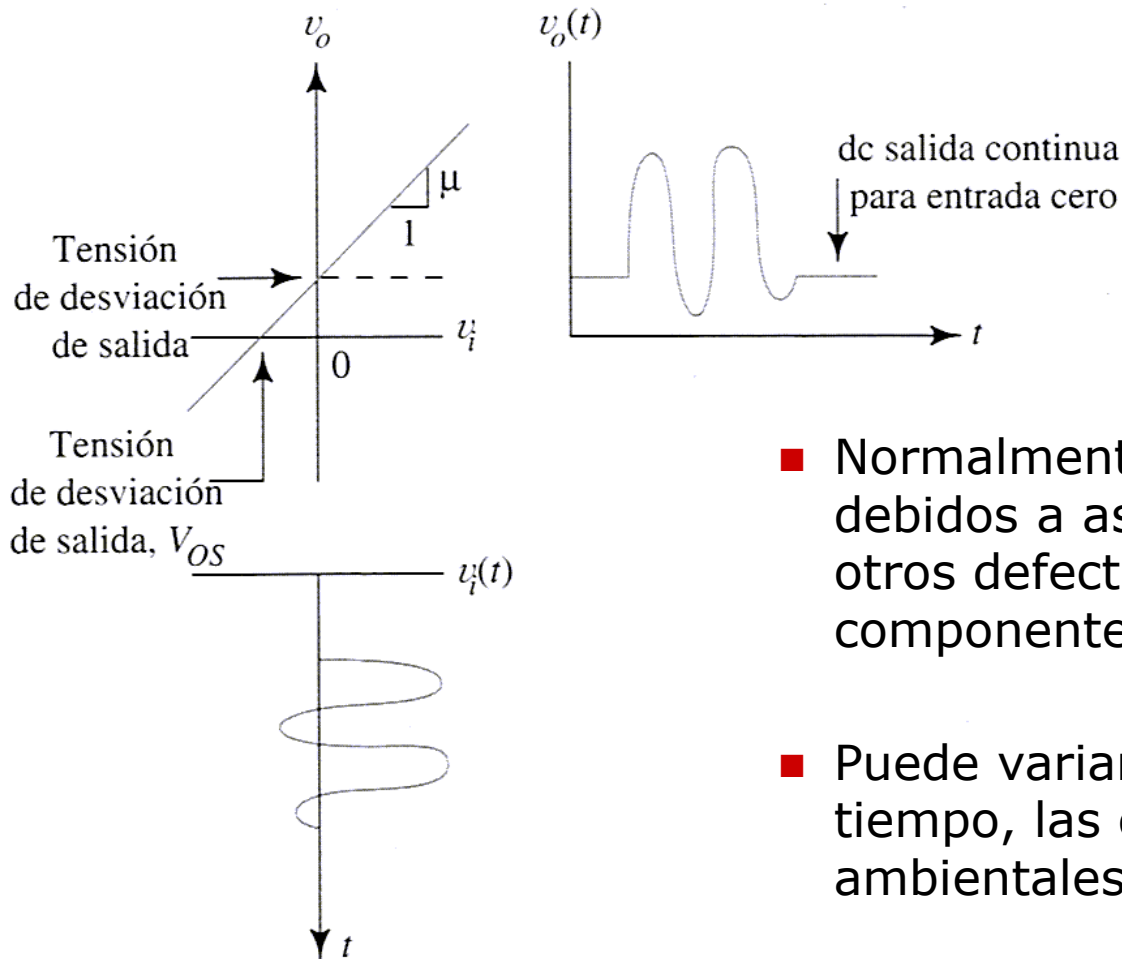
- ❑ Las impedancias terminales son las vistas en las conexiones de entrada y salida.
 - En análisis, su valor se obtiene según lo establecido en la teoría de cuadripolos.
- ❑ En ocasiones, ambas impedancias se ven afectadas por las existentes en generador y carga.
 - Ejemplo: obtener las impedancias terminales del amplificador cuya estructura interna se muestra en la figura.





5.-Tensión de desviación

- La tensión de desviación (*offset*) modela desplazamientos en la curva de transferencia.

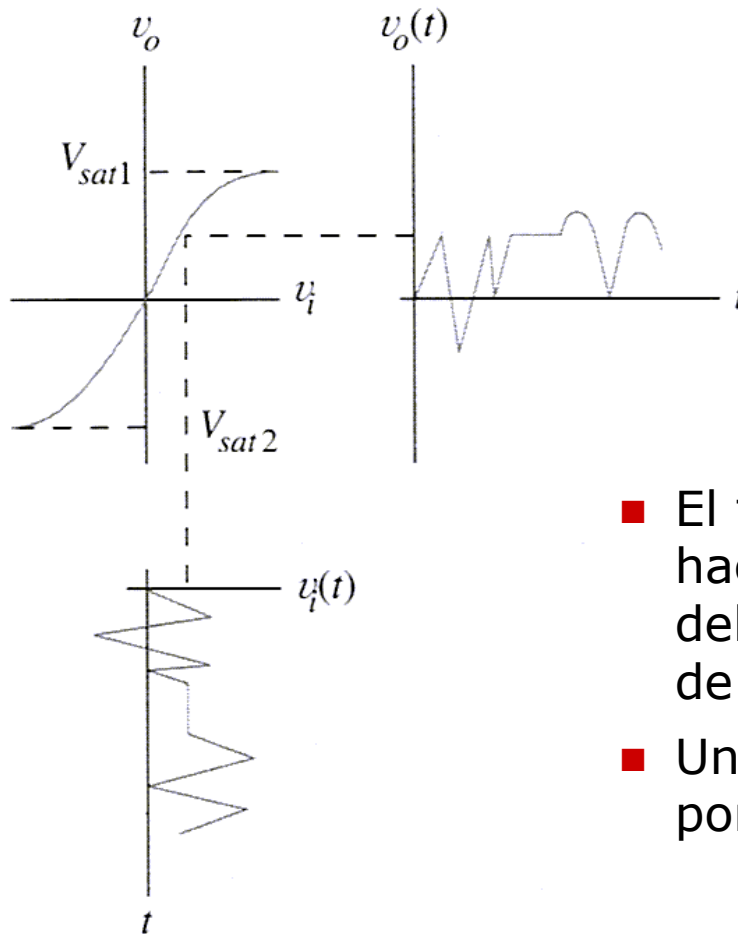


- Normalmente, son valores en DC debidos a asimetrías, impurezas u otros defectos similares en los componentes.
- Puede variar con la temperatura, el tiempo, las condiciones ambientales, etc.



5.-Distorsión no lineal

- **Distorsión** es toda deformación de la forma de onda de salida del amplificador, respecto a la señal de entrada.

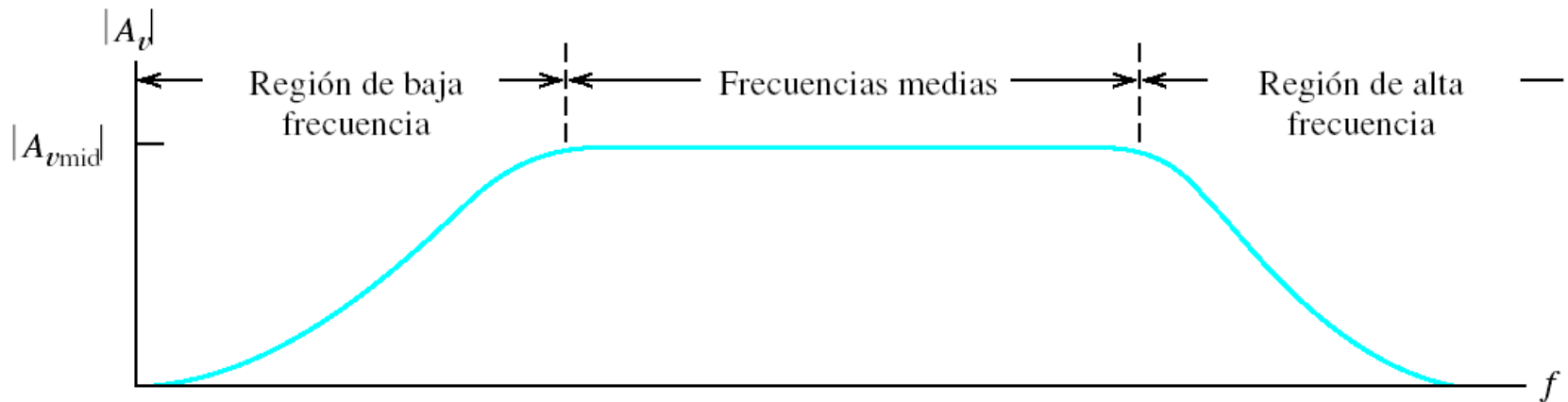


- El término **distorsión no-lineal** hace referencia a la deformación debida a la curvatura de la función de transferencia.
- Un caso particular es la distorsión por **saturación** o **recorte**.



5.-Respuesta frecuencial

- ❑ La **respuesta frecuencial** de un amplificador modela la **dependencia con la frecuencia** de sus parámetros.
 - Todas las características varían con ω : impedancias, ganancias...
 - Afectan en módulo y fase a parámetros y señales.
- ❑ Pueden reconocerse zonas o **bandas** de frecuencia con comportamientos similares:

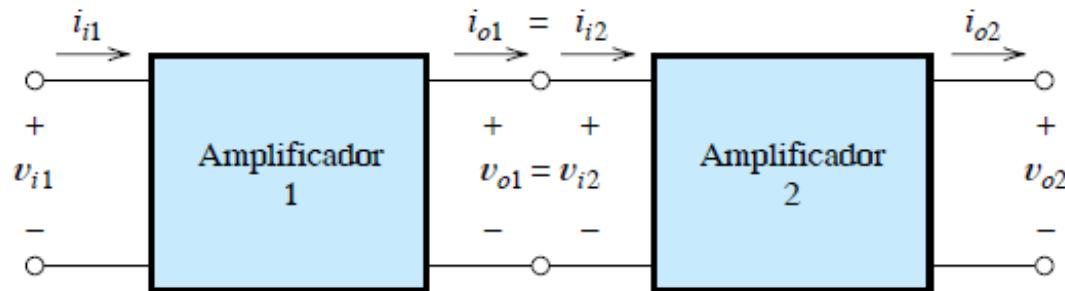


- La banda de **frecuencias medias** es aquella en la que los parámetros pueden considerarse **constantes reales**.



6.-Amplificadores multietapa.

- ❑ Un amplificador práctico suele estar formado por varios amplificadores elementales combinados:
 - La combinación más común es la serie o **cascada**
 - En este caso, cada amplificador elemental es una **etapa**
 - La figura adjunta es un **amplificador en cascada de dos etapas**:

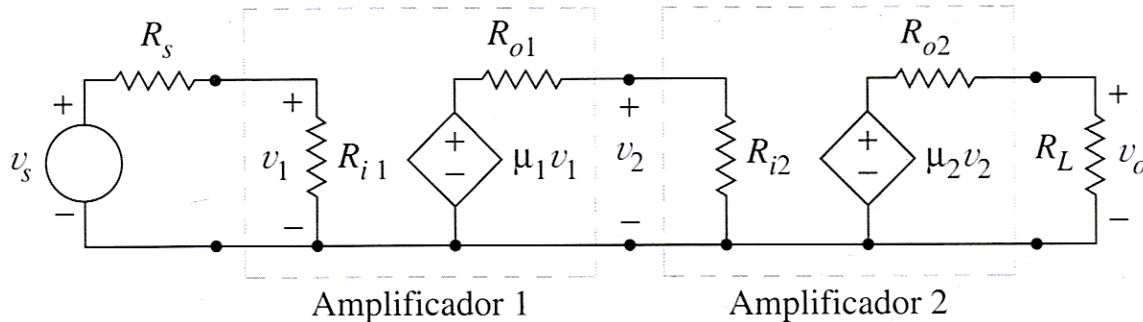


- ❑ De este modo, se simplifica el trabajo...
 - Cada etapa se analiza/diseña por separado
 - Es más fácil cumplir las especificaciones globales por partes
 - *Por ej., en la primera (etapa de entrada) se piensa en el generador*
 - *En la última (etapa de salida) se piensa en la carga.*



6.-Amplificadores multietapa.

- Un ejemplo: dos A_v en cascada.



Las ganancias de cada etapa son:

$$A_{v1} = \frac{v_2}{v_1} = \mu_1 \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{o1}}$$

$$\frac{v_o}{v_2} = A_{v2} = \mu_2 \frac{R_L}{R_L + R_{o2}}$$

La ganancia total del amplificador es el producto de ambas ganancias:

$$\frac{v_o}{v_1} = A_v = \frac{v_2}{v_1} \times \frac{v_o}{v_2} = A_{v1} \times A_{v2}$$

$$A_v = \mu_1 \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{o1}} \mu_2 \frac{R_L}{R_L + R_{o2}}$$

Y si operamos en dB tenemos una relación muy útil:

$$\underline{A_{v,dB} = (A_{v1} \cdot A_{v2})_{dB} = 20 \cdot \log(|A_{v1}| \cdot |A_{v2}|) = \underline{A_{v1,dB}} + \underline{A_{v2,dB}}}$$

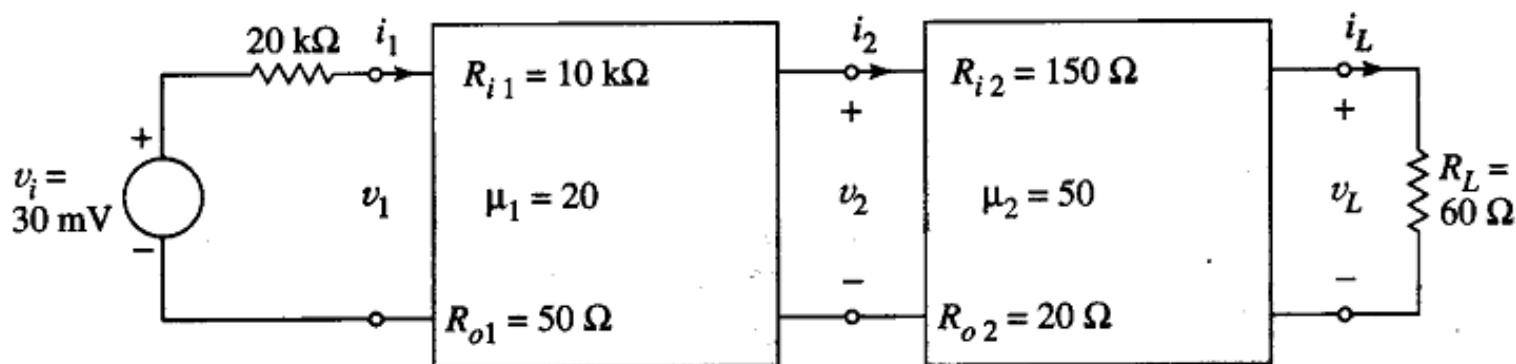


6.-Amplificadores multietapa: ejemplo

❑ Ejercicio 1.30 (Malik)

Para el amplificador de dos etapas de la figura, calcule:

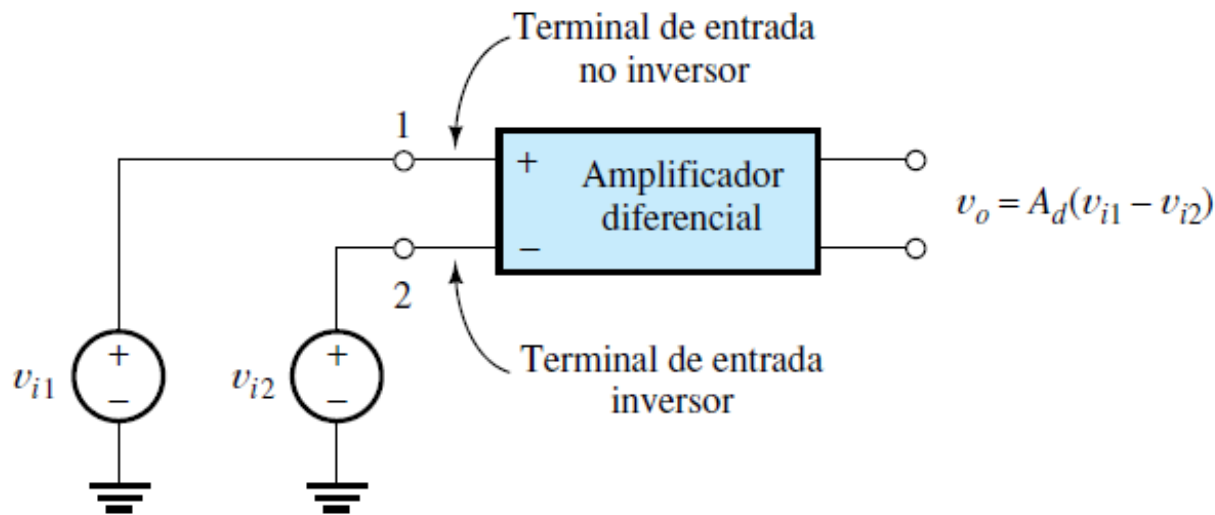
- La ganancia de tensión de v_i a v_L
- La ganancia de corriente (i_L / i_i)
- La ganancia de potencia, tomando la potencia de entrada como la que se tiene en la entrada a la primera etapa.





7.-Amplificadores diferenciales

- ❑ Son un tipo especial de amplificadores de gran importancia
 - Disponen de dos entradas y al menos una salida referidas a masa
 - El más habitual es el amplificador diferencial de tensión.

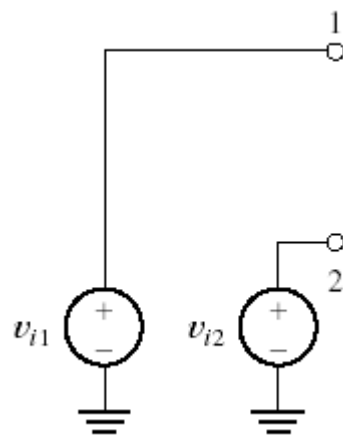


- ❑ El modelo del amplificador diferencial es algo más complejo
 - Por construcción reacciona diferente a la forma en que se relacionan las señales de entrada
 - Esto se caracteriza como los **modos** del diferencial



7.-Amplificadores diferenciales

- ❑ Existen dos **modos** de funcionamiento
 - Modo **diferencial**, referido a 'la diferencia' entre las entradas.
 - Modo **común**, referido a la 'parte común' entre las entradas.
- ❑ Las definiciones y modelo de las entradas son:

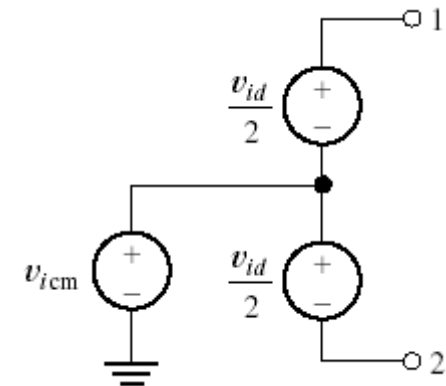


generadores
de entrada

definiciones
de ambos modos

$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2}$$
$$v_{icm} = \frac{1}{2} (v_{i1} + v_{i2})$$

iEquivalentes!



modelo para
los generadores

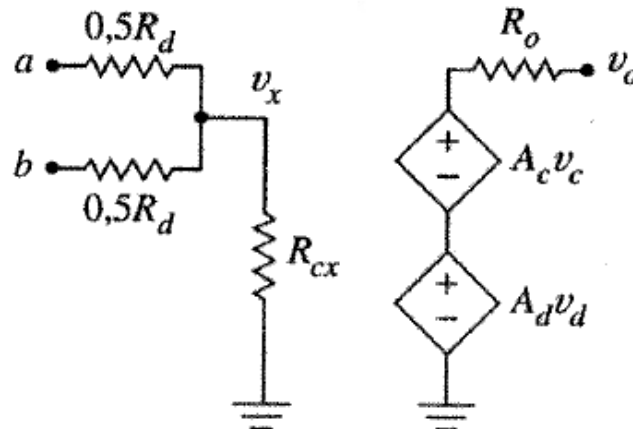


7.-Amplificadores diferenciales

- ❑ Cada **modo** de funcionamiento tiene una ganancia distinta
 - La ganancia **diferencial** y la ganancia **común**. En consecuencia, la salida del amp. diferencial es una combinación de ambos modos:

$$v_o = v_{od} + v_{oc} = A_d v_{id} + A_c v_{icm}$$

- Incluyendo las impedancias de entrada (diferentes según el modo) se **define** un modelo completo para el amplificador diferencial:



Normalmente:

$$A_d \gg A_c$$

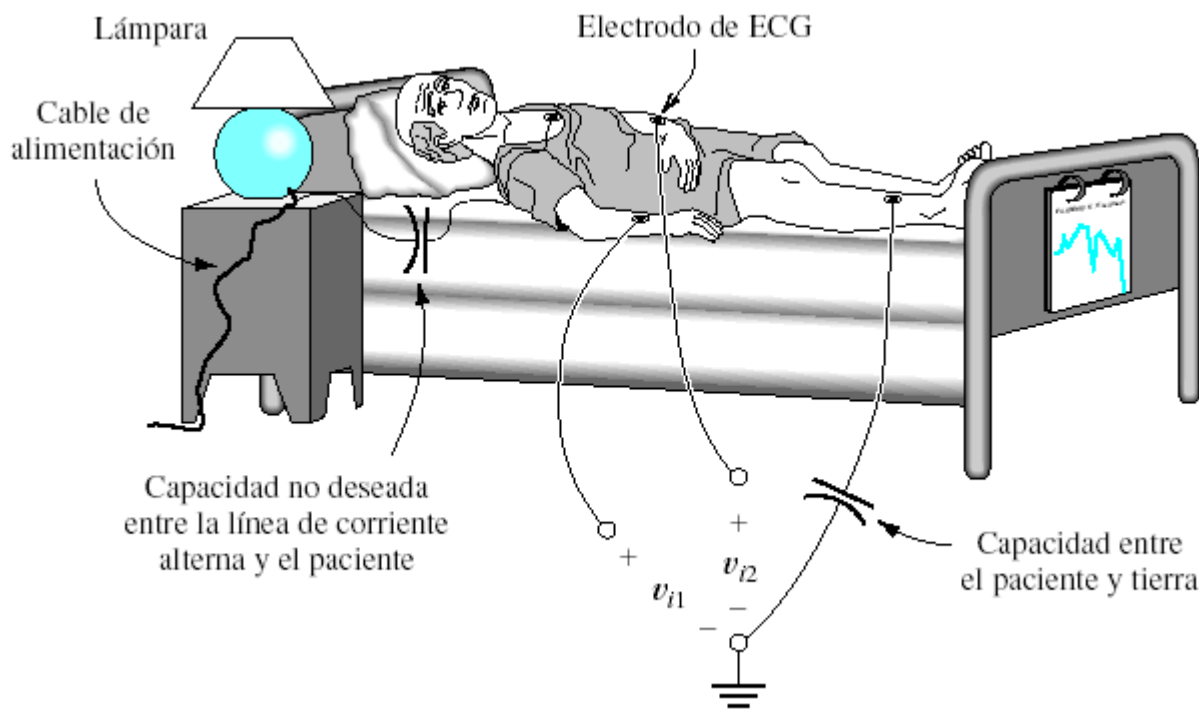
$$R_{cx} \gg$$

- **Ejercicio.** Simplifique el modelo del A. diferencial para los casos:
 - Señal de entrada sólo en modo diferencial.
 - Señal de entrada sólo en modo común.



7.-Amplificadores diferenciales

- ❑ Los amplificadores diferenciales son muy importantes
 - En muchas aplicaciones, el **ruido** enmascara la señal...
 - ...pero si el ruido es **parte común**, se amplifica mucho menos que la **parte diferencial** (señal útil).
- ❑ Un caso típico son los amplificadores de ECG:



Ejercicio:

¿Qué tipo de ruido se tiene en este caso?

¿De qué frecuencia es la señal de ruido?



7.-Amplificadores diferenciales

- ❑ El mismo caso que el ECG es habitual en medidas de sensores
 - La característica que más interesa del amplificador diferencial es su capacidad para *eliminar* la componente de señal común
 - Esta capacidad se puede cuantificar fácilmente relacionando las ganancias diferencial y común.
 - A la relación entre ambas, se la define como **Relación de Rechazo al Modo Común** (*Common Mode Rejection Ratio* = **CMRR**):

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|} \qquad CMRR_{(dB)} = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|}$$

- ❑ Los fabricantes dan como datos A_d y CMRR (ésta, normalmente en dB)
 - Ejercicio:
 - A un diferencial con $A_d=100$ y $CMRR = 120dB$, se aplica una señal de entrada de 10mV con un ruido común de 500mV: ¿Qué señales tenemos finalmente en la salida? ¿Qué relación hay entre ambas?

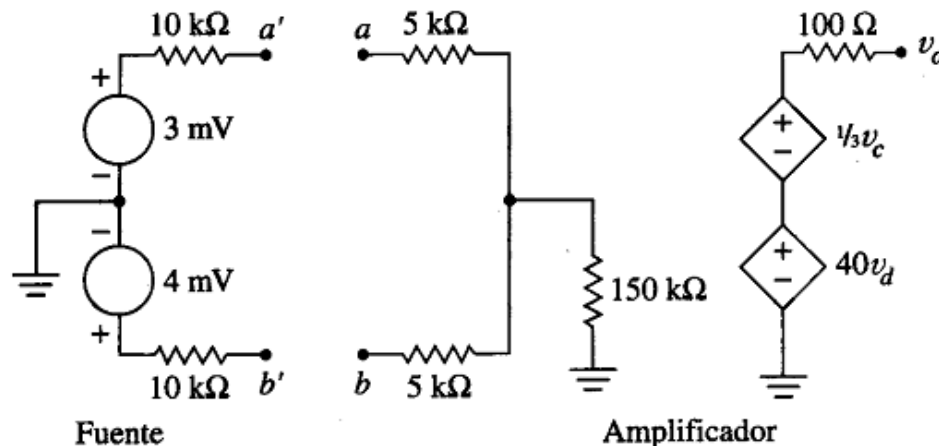


7.-Amplificadores diferenciales: ejemplo

❑ Ejercicio 1.38 (Malik)

Se muestra el modelo para un amplificador diferencial con una fuente de señal doble.

- ¿Cuáles son los valores de A_d , RRMC, R_d y R_c ?
- Halle la componente en modo diferencial de v_o
- Halle el componente en modo común de v_o
- Halle el valor de v_o
- Halle el nuevo valor de v_o si la salida del amplificador se conecta a tierra a través de una resistencia de carga de 800Ω .





8.-Bibliografía

□ Referencias del Tema 1:

- Electrónica. *Allan R. Hambley*. Ed. Pearson Education, Madrid 2001. ISBN: 84-205-2999-0
 - *Capítulo 1, completo: páginas 2 a 56.*
- Circuitos Electrónicos. Análisis diseño y simulación. *Norbert R. Malik*, Ed. Prentice Hall, Madrid 1996. ISBN: 84-89660-03-4.
 - *Capítulo 1, salvo secciones 1.5.5, 1.5.4, 1.6.7 y 1.6.8.*
- Otros materiales de los profesores de la asignatura



Anexo

Análisis, diseño y modelado de SSEE

1. Modelado: para qué y cómo
2. Análisis manual vs. Simulaciones
3. El computador como herramienta
4. Un factor esencial: la Documentación
5. Notas útiles de análisis de circuitos



A.-Análisis, diseño y modelado de SSEE

❑ Conocimientos y destrezas necesarios:

■ De los **circuitos** (bloques):

- *Funciones a realizar, configuraciones posibles, los parámetros que las definen, sus propiedades y los **modelos** aplicables.*

■ De los **dispositivos**:

- *Estructura y propiedades, aplicaciones y configuraciones típicas (funciones que pueden realizar), y los **modelos** aplicables.*

■ **Técnicas** de Análisis y Diseño:

- *Teoría de circuitos, análisis de redes lineales, **modelos...***

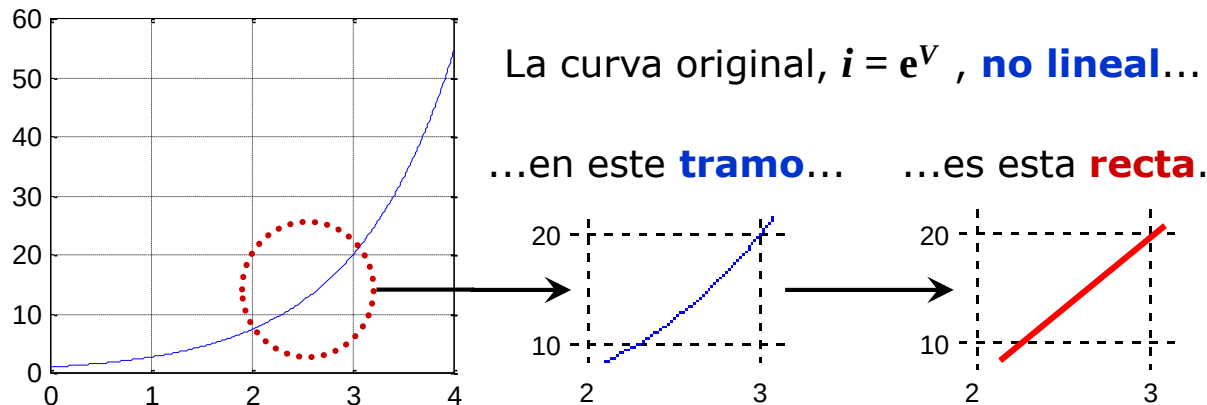
❑ Importancia del **modelado** de dispositivos y circuitos

- Necesitamos **saber** y poder **predecir**, con la **suficiente precisión**, el comportamiento real de un circuito, **sin necesidad de montarlo**.
- Un **modelo matemático** apropiado nos permite realizar los cálculos y pruebas necesarios.



A.1.-Modelado: para qué y como...

- ❑ El **Modelo** de un dispositivo o circuito permite operar con él de manera virtual, usando técnicas de análisis de circuitos lineales:
 - R, L, C, generadores (dependientes o no), etc.:
 - Las ecuaciones son 'rectas': $i = k_1 \cdot v + k_2 \iff v = R \cdot i$
 - Si los dispositivos son **no-lineales** (p.e. $i = k_1 \cdot e^{V \cdot k_2}$), no se podría operar con ellos de forma sencilla...
 - ... entonces ¿no podríamos utilizar las técnicas estudiadas hasta ahora?
- ❑ La solución es **linealizar**: **que las curvas se consideren rectas...**



La **linealización** es **válida**, en un **tramo dado** y con un **error admisible** (p.e. un 10%).



A.1.-Modelado: para qué y cómo...

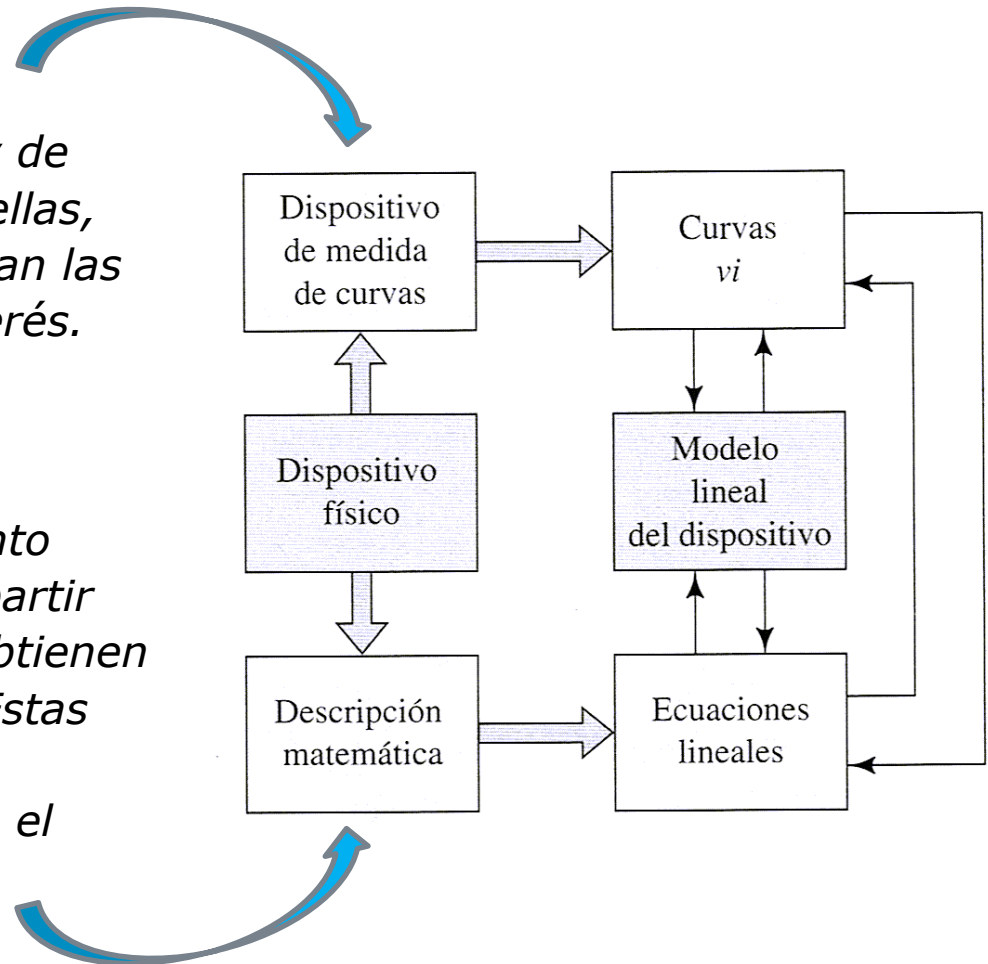
❑ ¿Cómo obtener un modelo a partir del dispositivo/circuito físico?

■ Método gráfico:

- *Se miden las curvas (v - i) y de transferencia. A partir de ellas, de forma gráfica, se estiman las rectas en las zonas de interés.*

■ Método analítico:

- *Se estudia el funcionamiento interno (a nivel físico). A partir de este conocimiento se obtienen una serie de ecuaciones. Estas curvas se analizan para aproximarlas a rectas, con el error como parámetro.*





A.2.-Análisis manual vs. simulaciones

- ❑ El análisis manual (con modelos simplificados) es vital para que el diseñador obtenga una solución inicial al problema.
 - *Trabajaremos estas habilidades a lo largo de las sesiones teórico-prácticas del curso.*
- ❑ La **simulación** y diseño asistido por ordenador **ayuda** a completar el proceso de diseño hasta llegar al prototipo final.
 - Programas como **SPICE** (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) permiten realizar pruebas sobre circuitos usando modelos complejos y ensayos sin riesgo de destrucción.
 - *Podemos probar **rápidamente** efectos de segundo orden, tolerancias, variaciones con T , niveles de señal, potencias, etc.*
 - *Este trabajo es **complementario** con el del Laboratorio.*
- ➔ **En ningún caso**, la simulación puede sustituir a un diseñador:
 - *Sólo un **buen diseñador**, con un **firme conocimiento teórico**, **sabe interpretar correctamente** los resultados de una simulación.*



A.3.-El computador como herramienta

❑ Sinergia Hombre-Computador

- El computador descarga de trabajo al ingeniero de diseño
 - *Velocidad y precisión de **cálculo**, capacidad de **memoria** y almacenamiento de datos...*
- Pero (por fortuna) el hombre sigue siendo superior a la máquina
 - *Capacidad de **decisión**, **comprensión** e **interpretación** de resultados.*

❑ El diseñador **complementa** su tarea con ayuda del ordenador:

- El diseñador se centra en los **principios básicos** y en su aplicación.
 - *El uso que haremos de **modelos simplificados** ayuda en esta labor y permite que el diseñador se centre en lo fundamental de su diseño.*
- El diseñador debe aprovechar el ordenador para **extender** su conocimiento en las áreas en las que está limitado.



A.4.-Un factor esencial: la Documentación

❑ La importancia de la **Documentación**

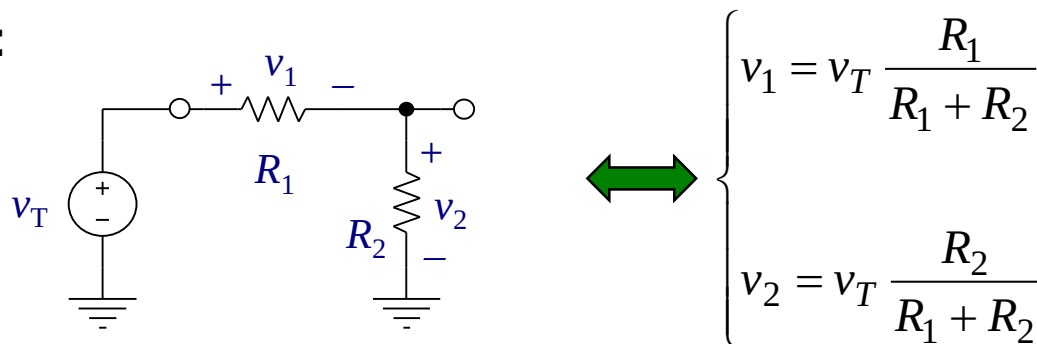
- Un SE consta de muchos bloques, interconectados entre sí.
- El trabajo en cada bloque puede ser independiente, extenderse durante un periodo de tiempo largo (o discontinuo) e implicar a distintas personas:
 - *Cada bloque debe estar perfectamente caracterizado y documentado, tanto en lo que atañe a dicho bloque como en su relación con el resto del SE.*
- La principal tarea del ingeniero es producir la documentación necesaria para que otras personas puedan construir y mantener el sistema completo:
 - *Diagramas de circuito, listas de componentes, parámetros de diseño, formas de onda o medidas en puntos clave, procedimientos de prueba, diseños mecánicos, etc.*
 - ➔ *El ordenador es una herramienta de **gestión** y **diseño** fundamental.*



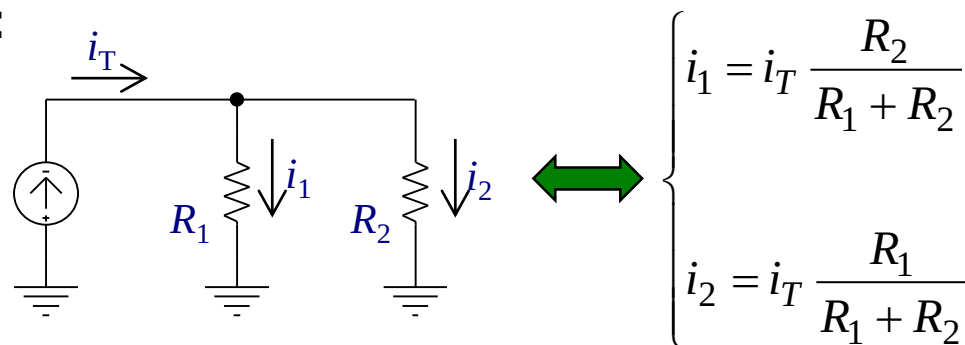
A.5.-Análisis de ctos. Un par de trucos...

- ❑ En los circuitos equivalentes habituales en Electrónica, se repiten dos estructuras sistemáticamente...

→ Divisor de tensión:



→ Divisor de corriente:



- El análisis de amplificadores y otros circuitos electrónicos se simplifica mucho si se hace uso metódico de estas estructuras.



Control de revisiones

- 2015-09-03: versión inicial