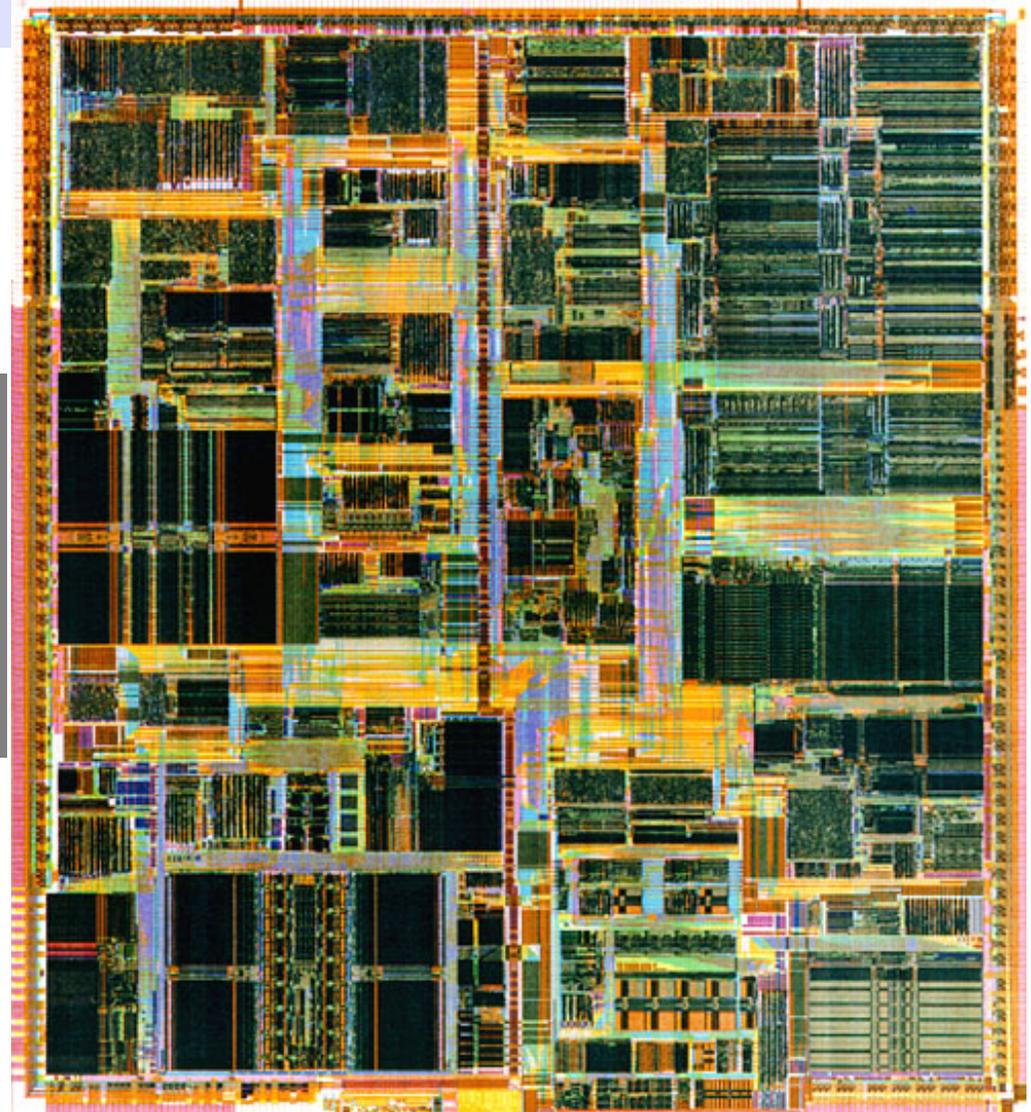


Dispositivos Electrónicos II

CURSO 2010-11

Temas 4,5
**AMPLIFICACIÓN:
ESTRUCTURAS
BÁSICAS**

**Miguel Ángel Domínguez Gómez
Camilo Quintáns Graña**



**DEPARTAMENTO DE
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**



UNIVERSIDAD DE VIGO



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

AMPLIFICACIÓN: ESTRUCTURAS BÁSICAS

1. AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES BIPOLARES

- 1.1. El Transistor Bipolar como Amplificador.
- 1.2. Circuitos Equivalentes de Pequeña Señal
- 1.3. Análisis de Amplificadores.
- 1.4. El Amplificador en Emisor Común.
- 1.5. El Amplificador en Colector Común (Seguidor de Emisor)
- 1.6. El Amplificador en Base Común.
- 1.7. El Amplificador en Emisor Común con Resistencia de Emisor.

2. AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES UNIPOLARES

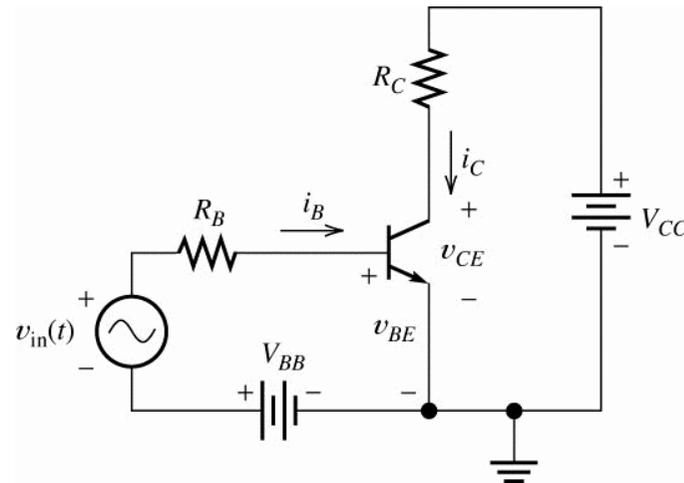
- 2.1. El Transistor de Efecto de Campo como Amplificador.
- 2.2. Circuitos Equivalentes de Pequeña Señal
- 2.3. El Amplificador en Fuente Común
- 2.4. El Amplificador en Drenador Común (Seguidor de Fuente)

3. AMPLIFICADORES DE VARIAS ETAPAS

- 3.1. Optimización de la combinación de Configuraciones.

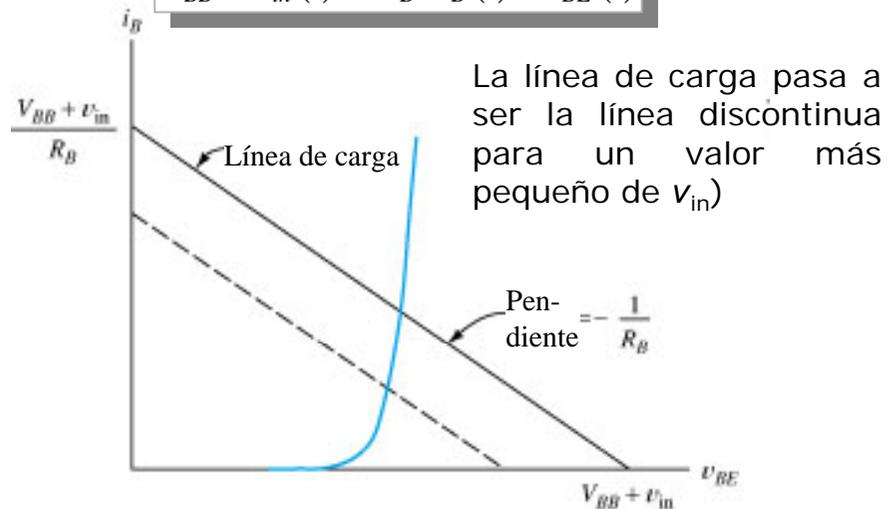
1. AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES BIPOLARES

1.1 EL TRANSISTOR BIPOLAR COMO AMPLIFICADOR

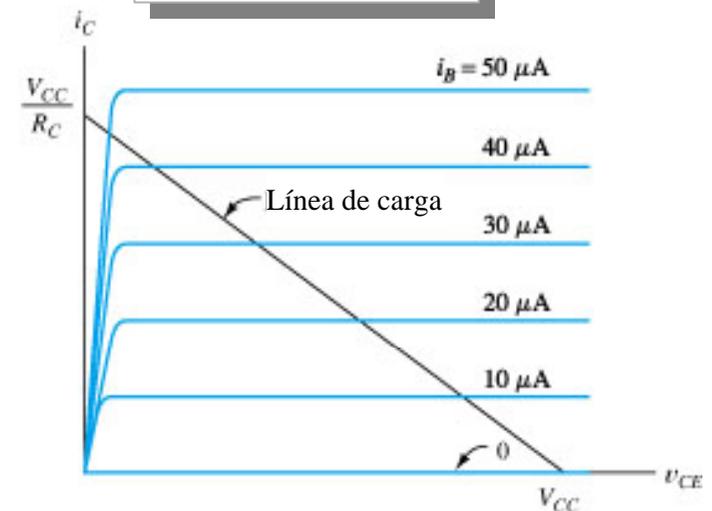


Veremos que entre C y Masa aparece una versión amplificada de la Tensión de Entrada → AMPLIFICADOR

Entrada: $V_{BB} + v_{in}(t) = R_B \cdot i_B(t) + v_{BE}(t)$



Salida: $V_{CC} = R_C \cdot i_C(t) + v_{CE}(t)$



DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

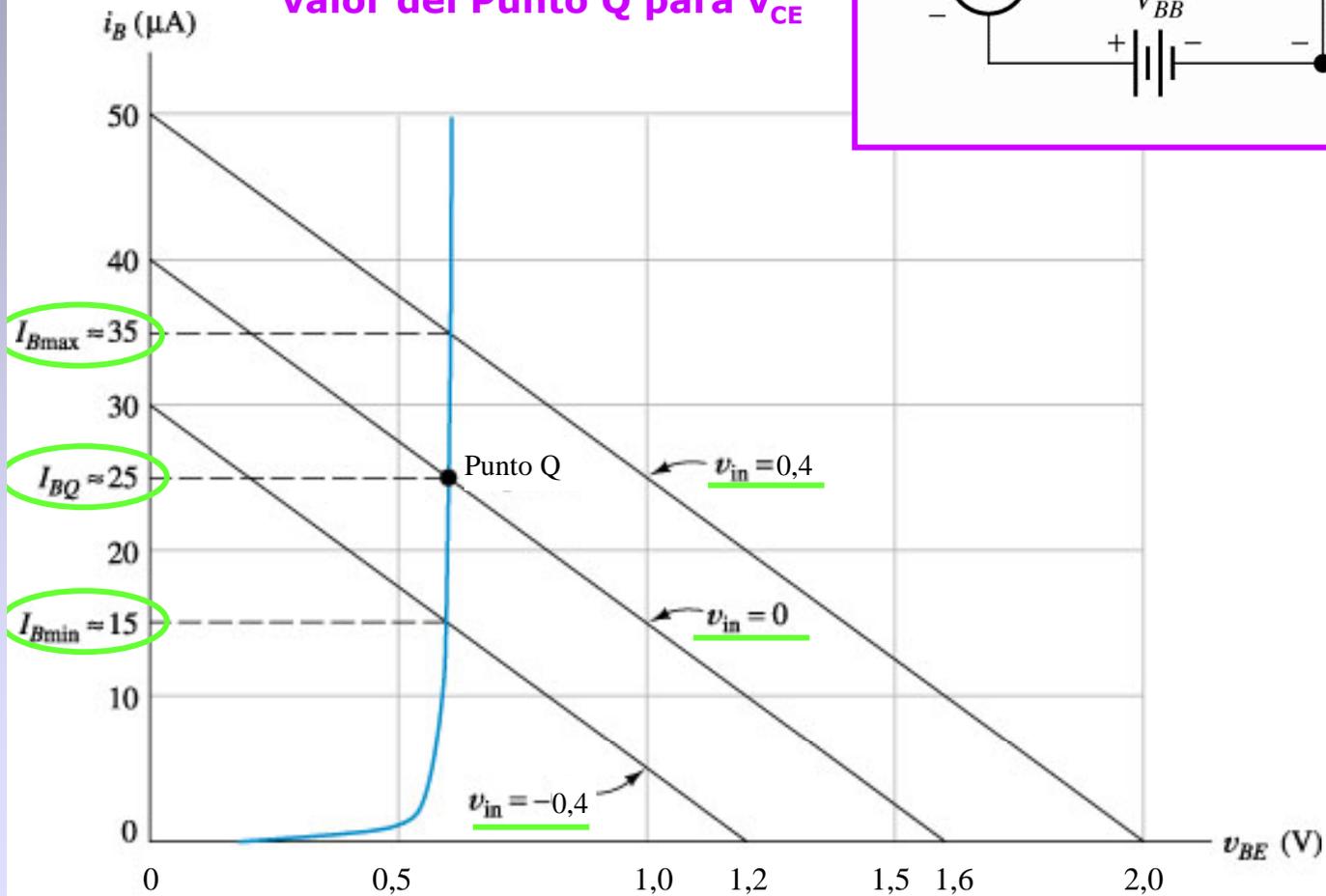
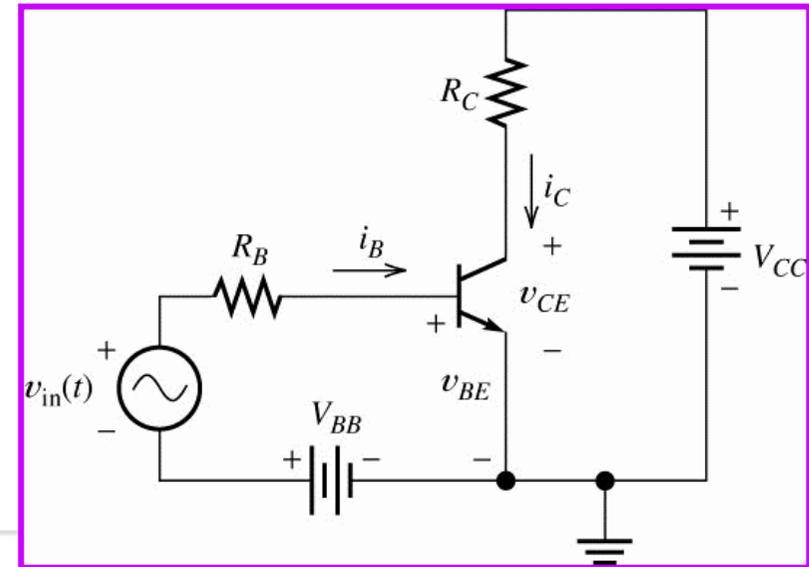
EJEMPLO:

$$V_{CC} = 10V \quad R_C = 2K$$

$$V_{BB} = 1.6V \quad R_B = 40K$$

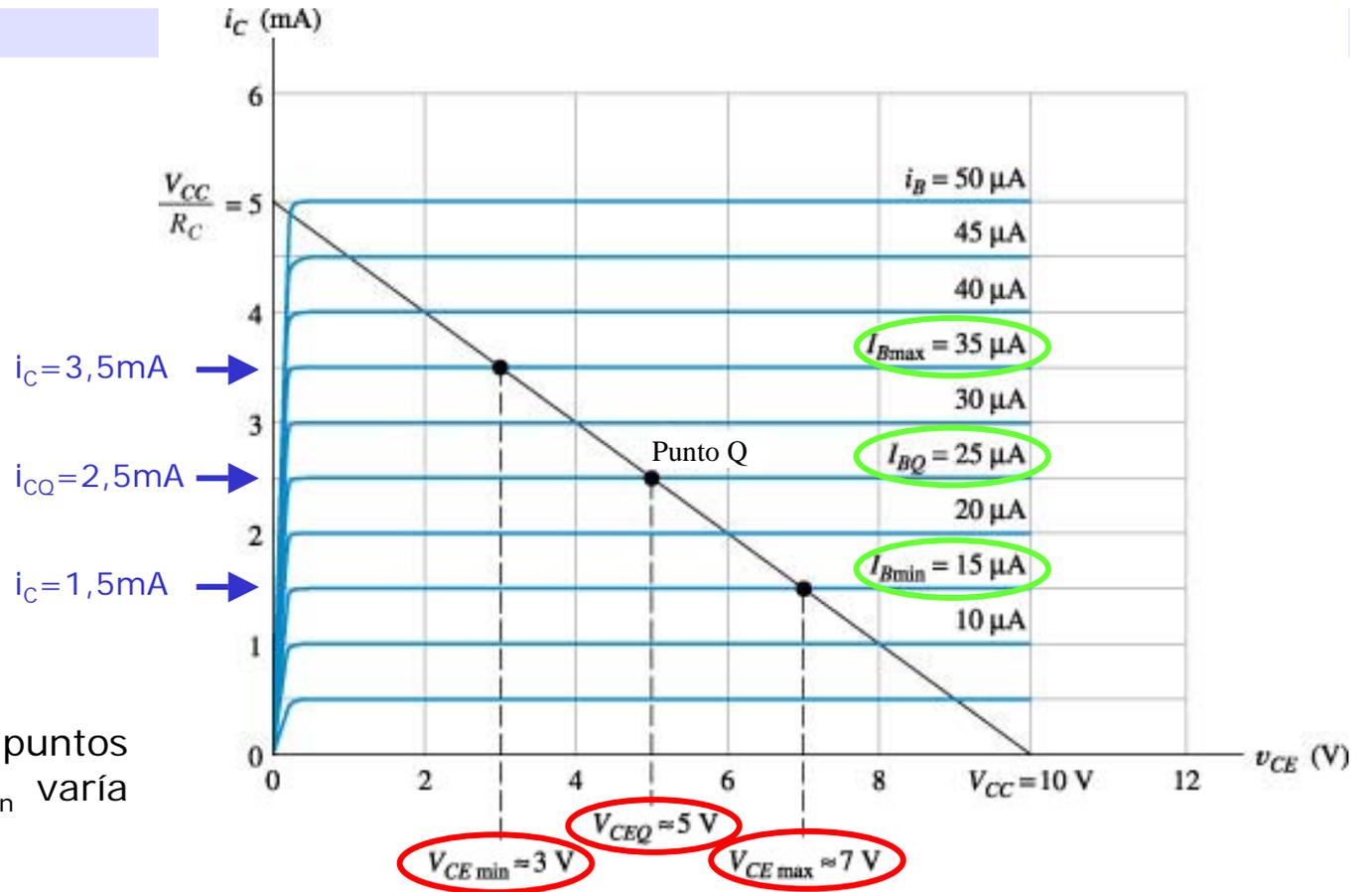
$$v_{in}(t) = 0.4 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 1\text{KHz} \cdot t)$$

Calcular los Valores
Máximo y Mínimo y el
valor del Punto Q para v_{CE}

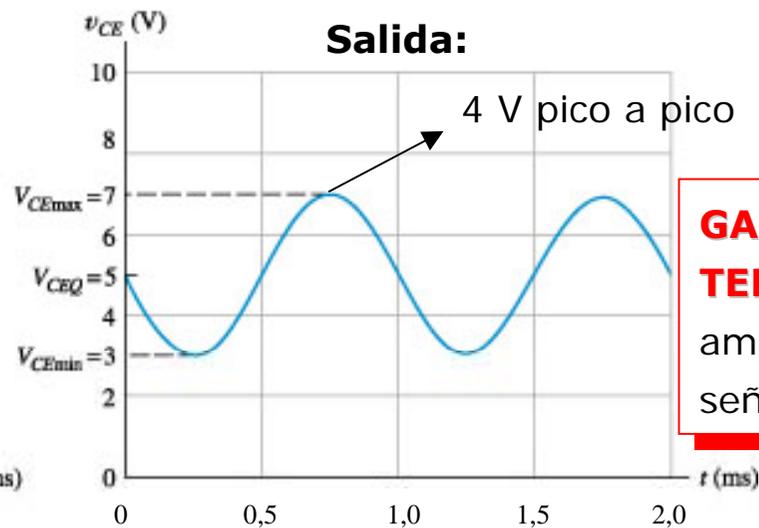
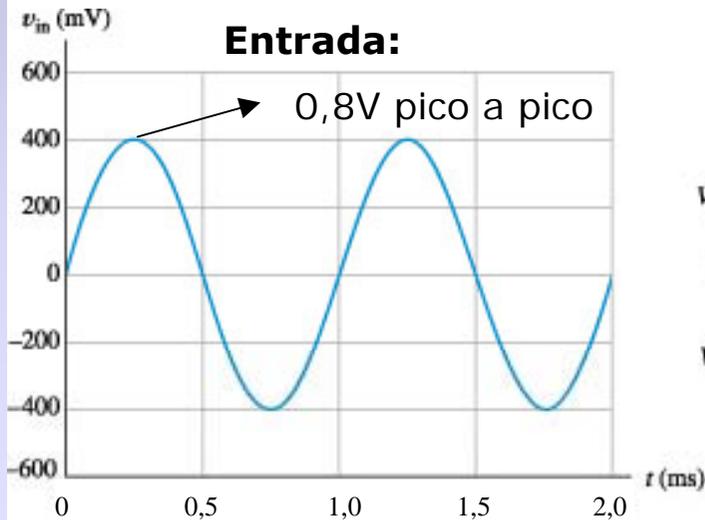


AMPLIFICADORES CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas



Si hallamos más puntos a medida que v_{in} varía con el tiempo:



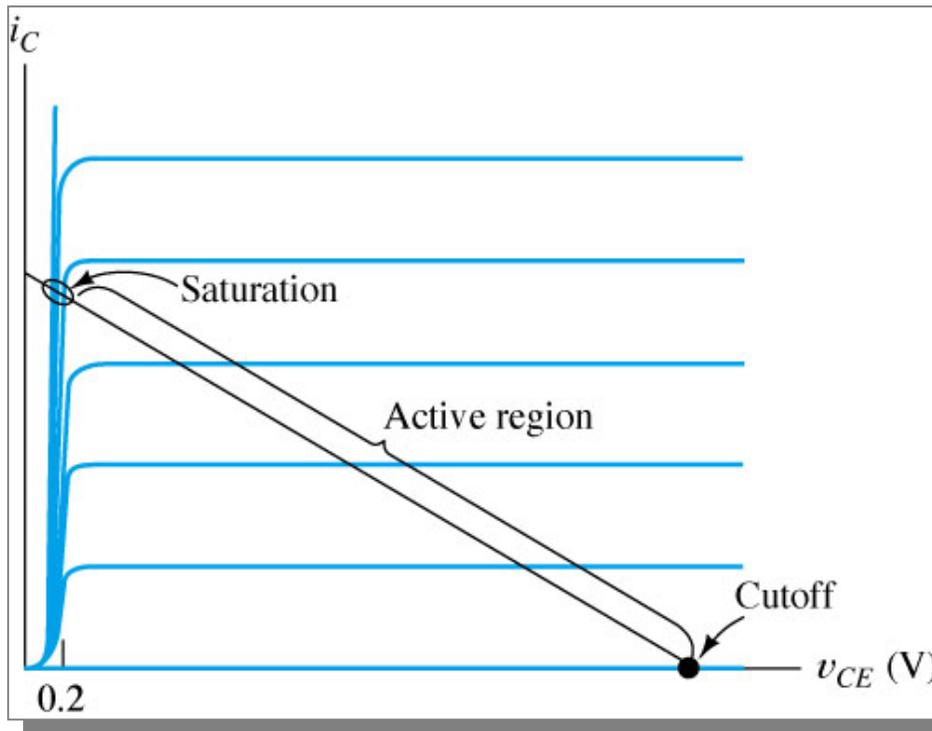
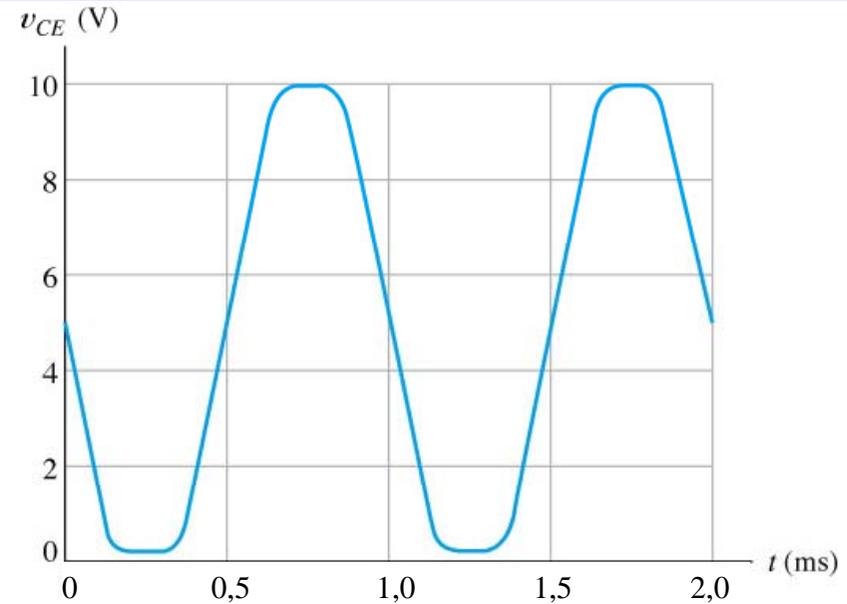
GANANCIA EN TENSIÓN: -5 (el amplif. invierte la señal de entrada)

DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

Salida para:
 $v_{in}(t) = 1,2 \text{ sen}(2000\pi t)$,
 (gran distorsión)



- La Amplificación razonablemente Lineal ocurre en la **REGIÓN ACTIVA**.
- Existe Recorte cuando el Punto Instantáneo de funcionamiento entra en Saturación o en Corte.

1.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL DEL TRANSISTOR BIPOLAR

1.2.1.- Relaciones tensión corriente en pequeña señal

(1) $i_B = (1 - \alpha)I_{ES} \left[\exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$ Corriente de base en función de v_{BE}

$$\left. \begin{aligned} i_B(t) &= I_{BQ} + i_b(t) \\ v_{BE}(t) &= V_{BEQ} + v_{be}(t) \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{aligned} I_{BQ} + i_b(t) &= (1 - \alpha)I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BEQ} + v_{be}(t)}{V_T}\right) \\ I_{BQ} + i_b(t) &= (1 - \alpha)I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BEQ}}{V_T}\right) \exp\left(\frac{v_{be}(t)}{V_T}\right) \end{aligned}$$

Como: $I_{BQ} = (1 - \alpha)I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BEQ}}{V_T}\right) \rightarrow I_{BQ} + i_b(t) = I_{BQ} \exp\left(\frac{v_{be}(t)}{V_T}\right)$

Estamos interesados en las **pequeñas señales** para las cuales el valor de $v_{be}(t)$ es mucho más pequeño que V_T en cualquier instante. Por tanto, $v_{be}(t)$ está relegado a un valor de unos pocos milivoltios.

Para $|x| \ll 1 \rightarrow \exp(x) \cong 1 + x \rightarrow I_{BQ} + i_b(t) \cong I_{BQ} \left(1 + \frac{v_{be}(t)}{V_T}\right)$

Si se llama $r_{be} = V_T/I_{BQ}$, $\rightarrow \boxed{i_b(t) = \frac{v_{be}(t)}{r_{be}}}$

Para variaciones de pequeña señal alrededor del punto Q, la unión base emisor del transistor se comporta como una resistencia que viene dada por la relación

$$r_{be} = V_T / I_{BQ}$$

Como $I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$, \rightarrow $r_{be} = \frac{\beta V_T}{I_{CQ}}$

(2) $i_c(t) = \beta i_b(t) \rightarrow I_{CQ} + i_c(t) = \beta I_{BQ} + \beta i_b(t) \rightarrow i_c(t) = \beta i_b(t)$

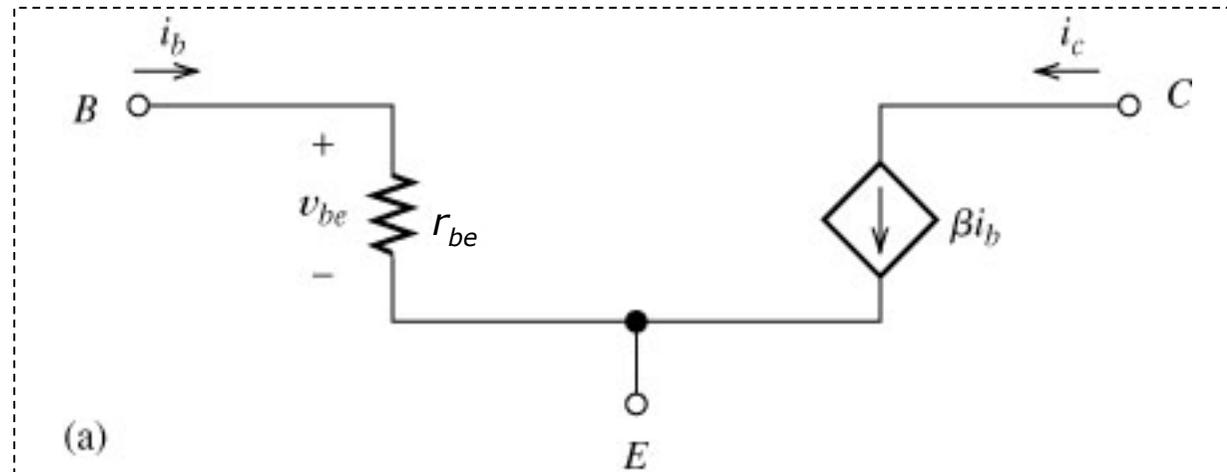
1.2.2.- Circuitos equivalentes de pequeña señal para el transistor bipolar (PNP y NPN)

a)

$$r_{be} = \frac{\beta V_T}{I_{CQ}}$$

$$i_b(t) = \frac{v_{be}(t)}{r_{be}}$$

$$i_c(t) = \beta i_b(t)$$



DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

b)

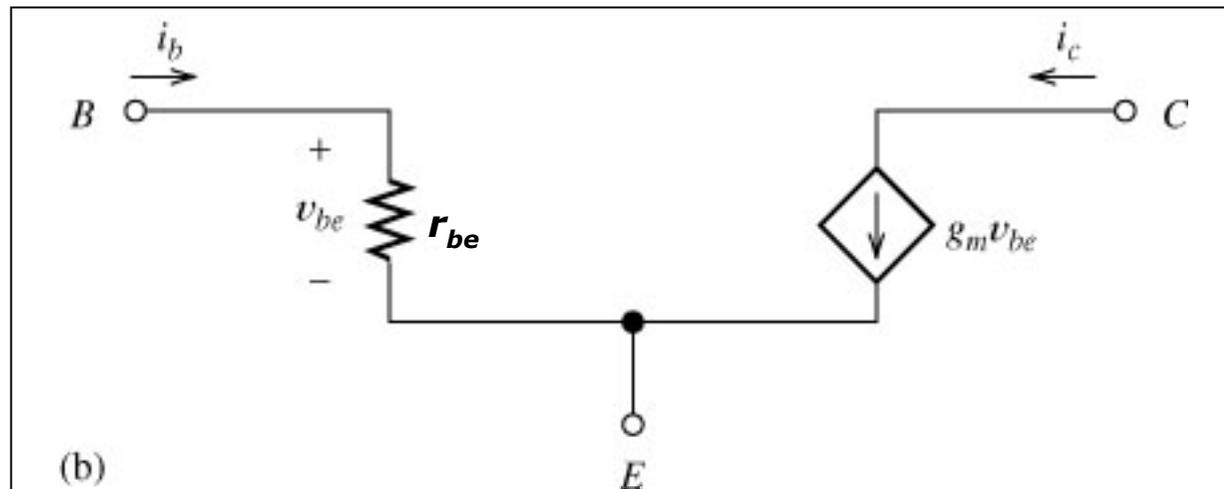
$$i_c(t) = \frac{\beta}{r_{be}} v_{be}(t)$$

Si se define la **Transconductancia** del BJT:

$$g_m = \frac{\beta}{r_{be}}$$

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

$$\begin{cases} v_{be}(t) = r_{be} i_b(t) \\ i_c(t) = g_m v_{be}(t) \end{cases}$$



- ✓ **El Circuito Equivalente en Pequeña Señal de un Transistor Bipolar consiste en una Resistencia r_{be} y una Fuente de Corriente (βi_b o $g_m v_{be}$)**
- ✓ **Dadas la Corriente de Colector del punto Q, I_{CQ} y β , podemos calcular los Parámetros de Pequeña Señal:**

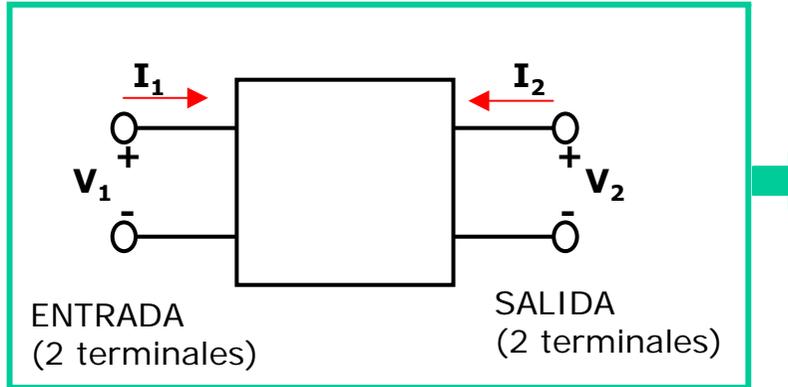
$$r_{be} = \frac{\beta V_T}{I_{CQ}} \quad g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

1.2.3. Parámetros Híbridos

TRANSISTOR: dispositivo
de 3 terminales

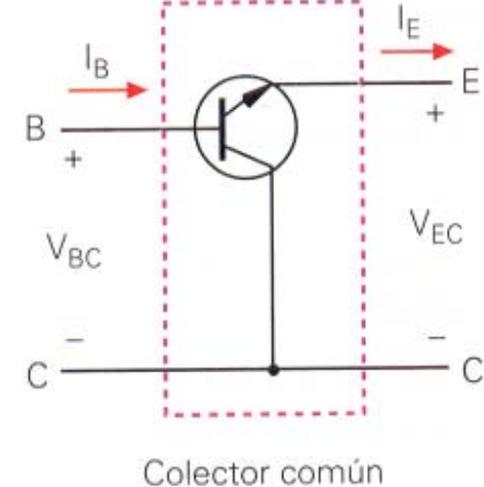
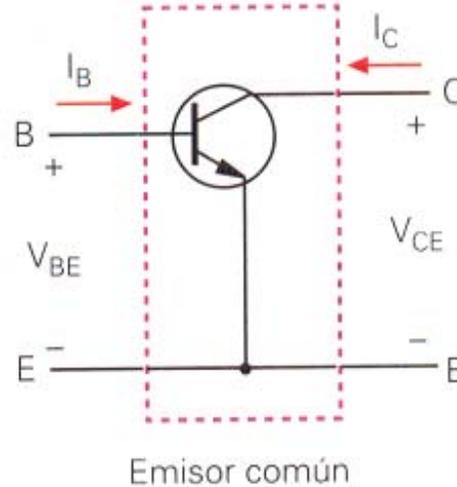
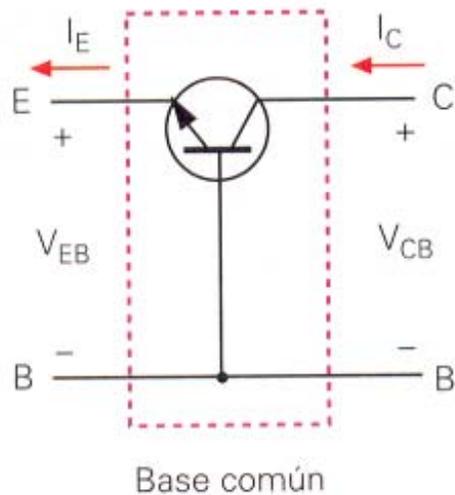


Para estudiar su comportamiento
en un circuito, se analiza como un
CUADRIPOLO:

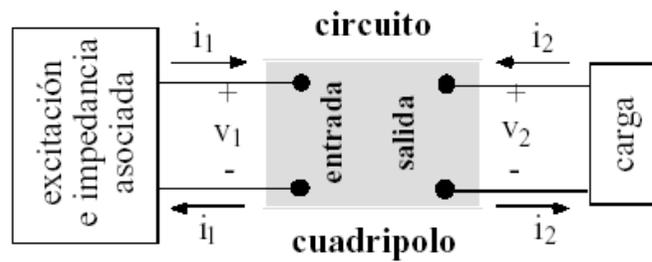


Uno de los 3 terminales deberá ser común a la
ENTRADA y a la SALIDA

3 CONFIGURACIONES: (El terminal común a la E y a la S da el nombre al montaje)



Análisis de Circuitos (1^{er} curso) – TEORÍA DE CUADRIPOLOS

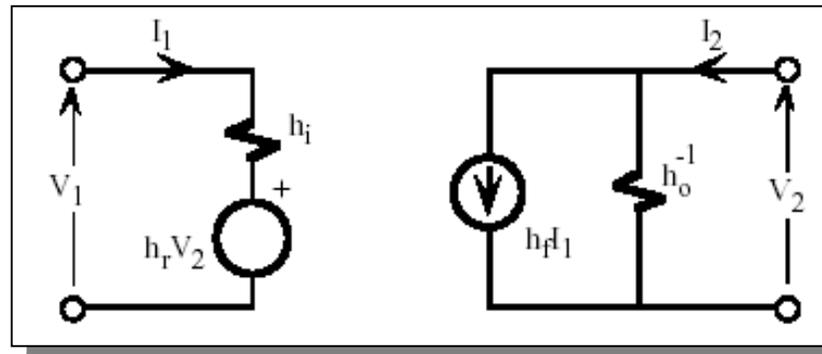


Parámetros Híbridos:

$$V_1 = I_1 h_{11} + V_2 h_{12}$$

$$I_2 = I_1 h_{21} + V_2 h_{22}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$



$$V_1 = h_i I_1 + h_r V_2$$

$$I_2 = h_f I_1 + h_o V_2$$

$$h_i = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} = \text{resistencia de entrada con salida en cortocircuito}$$

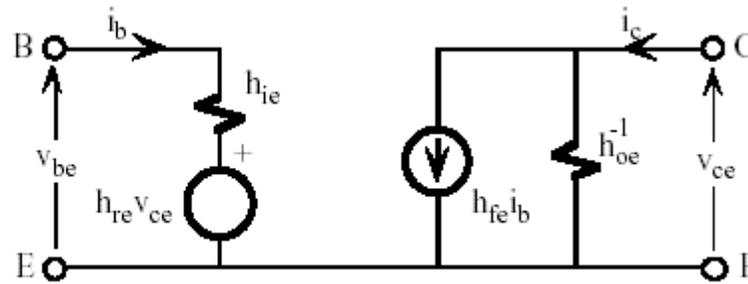
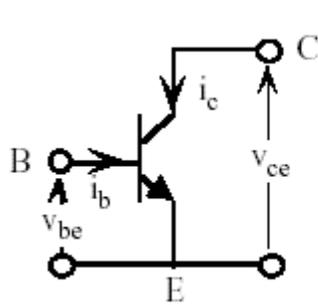
$$h_r = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} = \text{ganancia inversa de tensión con entrada en circuito abierto}$$

$$h_f = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2=0} = \text{ganancia de corriente con salida en cortocircuito}$$

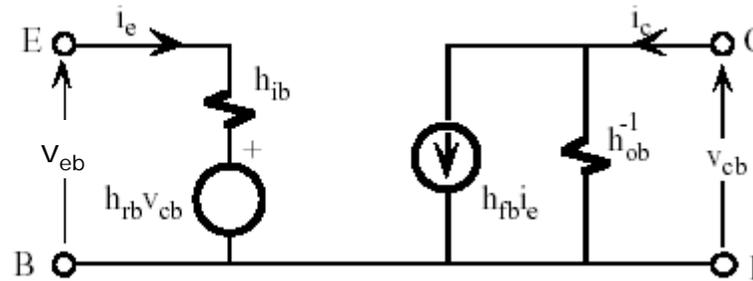
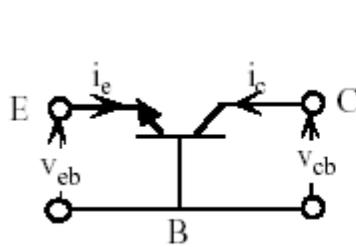
$$h_o = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1=0} = \text{conductancia de salida con entrada en circuito abierto}$$

3 Grupos de Parámetros Híbridos, uno por cada Configuración (EC, BC, CC):

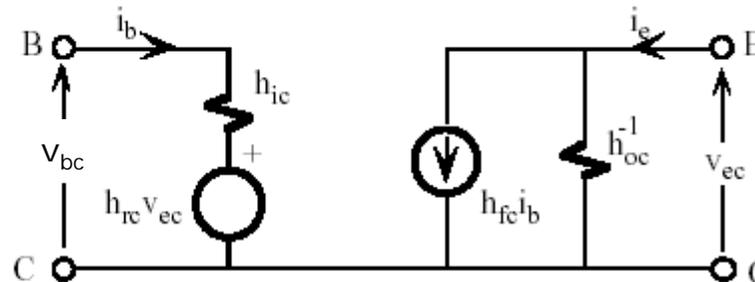
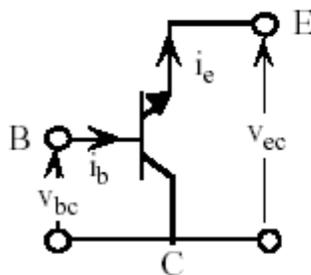
Notación: para distinguirlos se agrega el subíndice correspondiente al terminal común (e,b,c).



Emisor Común



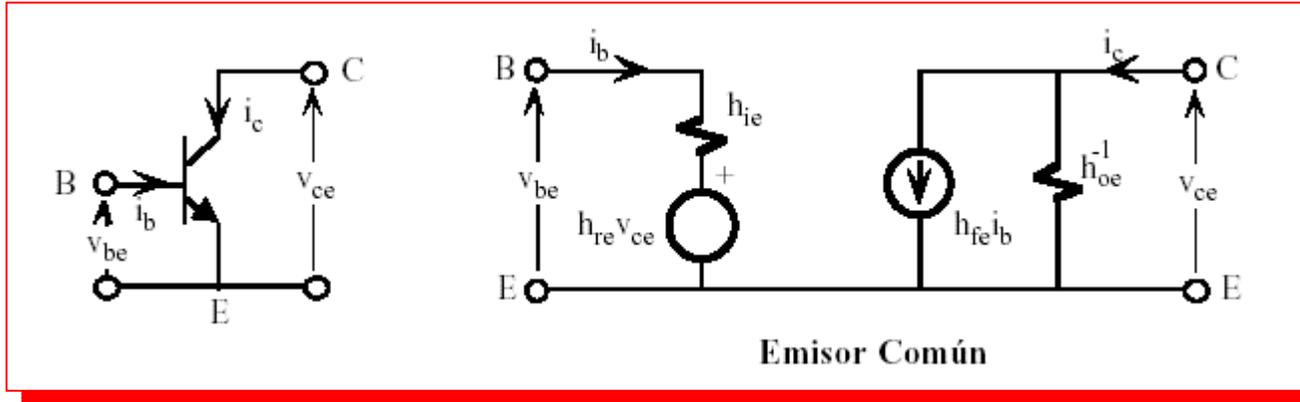
Base Común



Colector-Común

3 Grupos de Parámetros Híbridos, uno por cada Configuración (EC, BC, CC):

Notación: para distinguirlos se agrega el subíndice correspondiente al terminal común (e,b,c).



+ HABITUAL

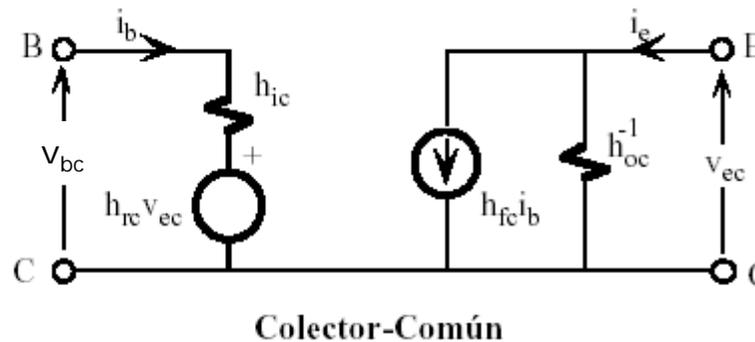
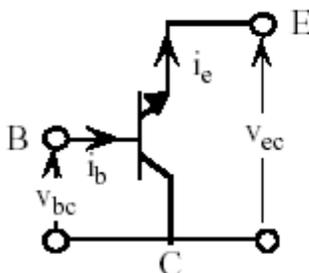
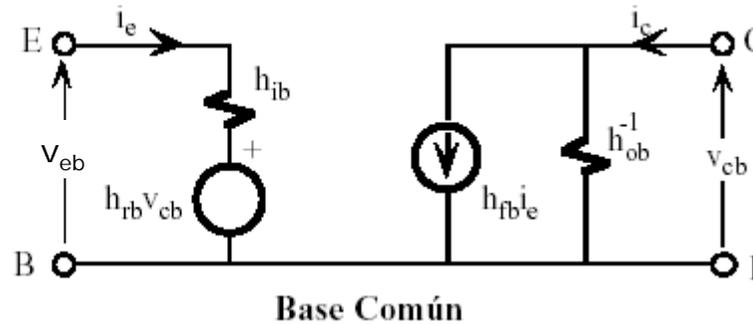
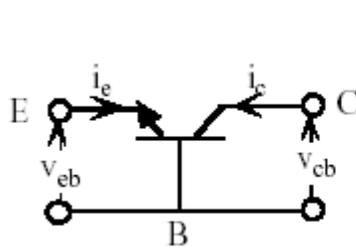
$$v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce}$$

Además,
generalmente:

$$h_{re} \approx 0$$

$$h_{oe} \approx 0$$

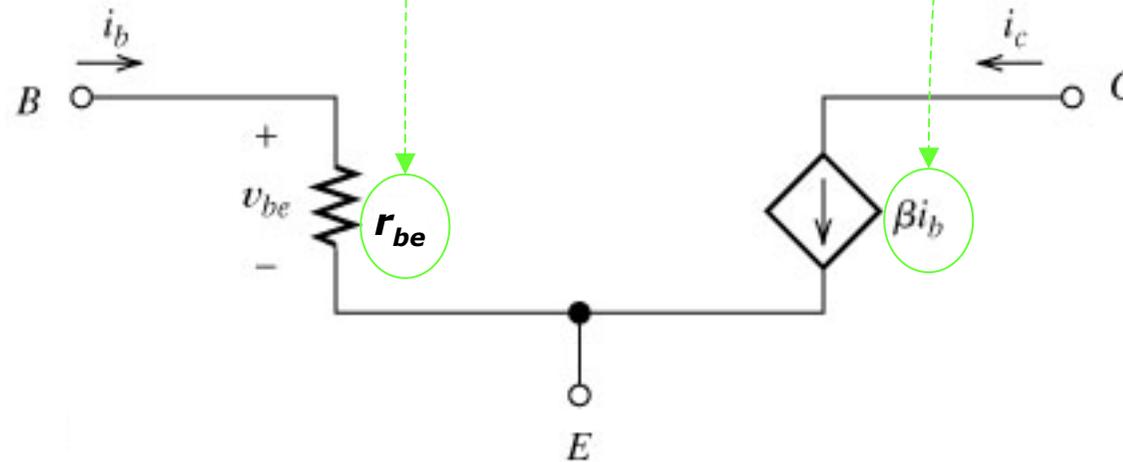
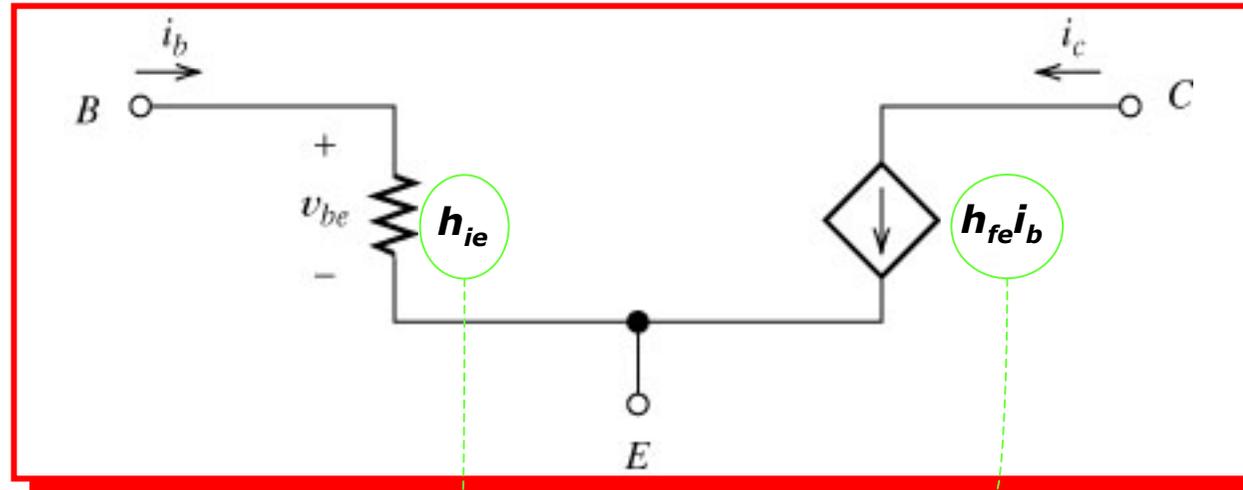


DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

Modelo simplificado:



$$h_{ie} \approx r_{be} (= r_{bb'} + r_{b'e})$$

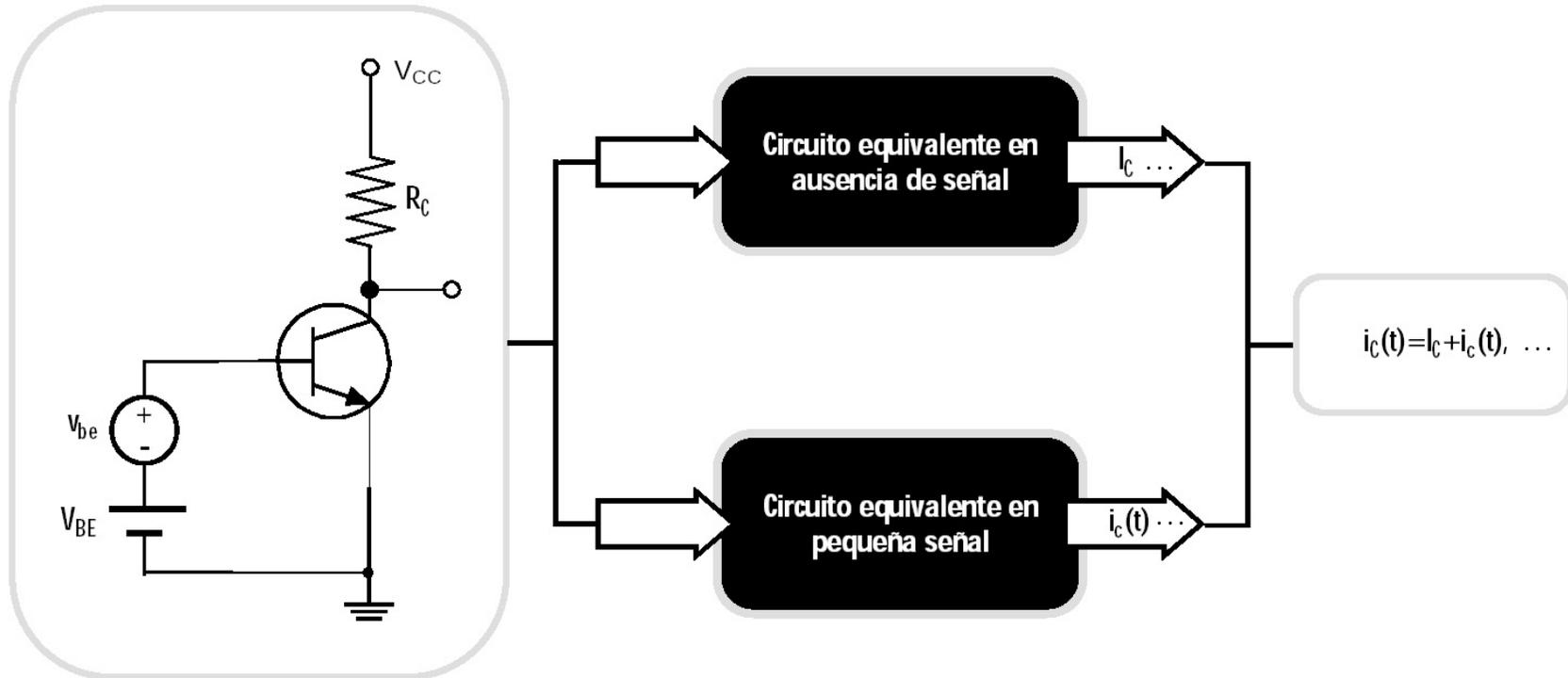
$$h_{fe} = \beta$$

1.3 ANÁLISIS DE AMPLIFICADORES

- Bajo la **Condición de Funcionamiento en Pequeña Señal**, el **Transistor** se comportará como un **Dispositivo Lineal**.
- Las **Componentes de Señal** de cada una de las **Tensiones** y **Corrientes** del **Circuito Amplificador** se **superponen** a los Valores **Continuos de Polarización** del Transistor en ausencia de señal.



ANÁLISIS Y DISEÑO DE AMPLIFICADORES BASADOS EN TRANSISTORES: PUEDE SIMPLIFICARSE ENORMEMENTE SI SEPARAMOS EL CÁLCULO DE LAS COMPONENTES CONTINUAS DE POLARIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS DE PEQUEÑA SEÑAL (Variaciones superpuestas a cada una de las Tensiones y Corrientes Continuas del circuito cuando se aplica una Señal de Entrada de Pequeña Amplitud).



Para calcular las Componentes de Señal: NECESARIO OBTENER **CIRCUITO EQUIVALENTE DEL AMPLIFICADOR EN PEQUEÑA SEÑAL:**

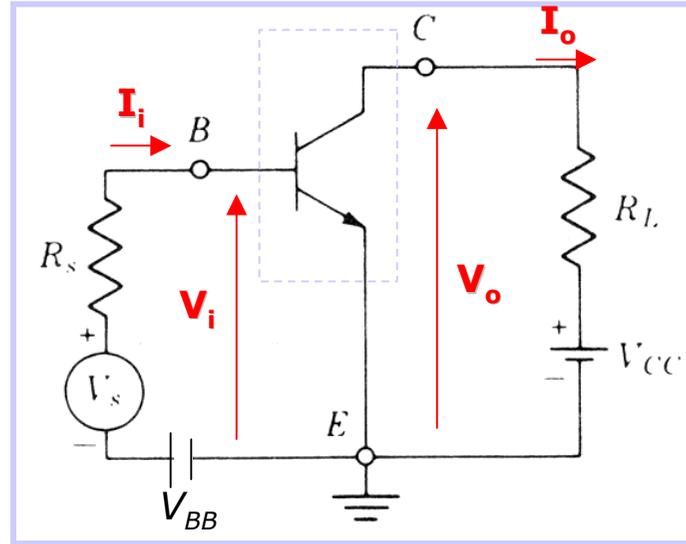
- Sustituir **Fuentes de Tensión Continua** por cortocircuitos.
- Sustituir **Fuentes de Corriente Continua** por circuitos abiertos.
- Sustituir **Transistor** por Circuito Equivalente.

Los MODELOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL HACEN QUE EL ANÁLISIS DE UN AMPLIFICADOR Basado en Transistores se convierta en un PROCESO SISTEMÁTICO:

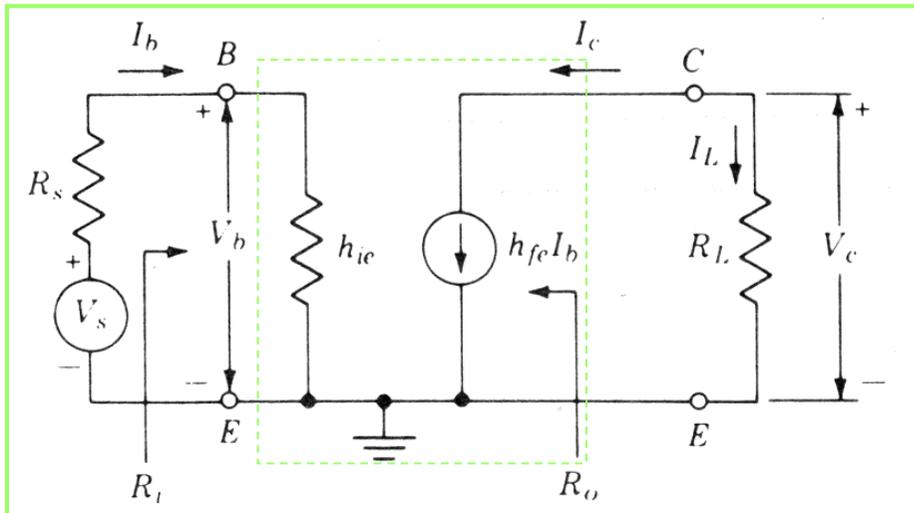
1. Determinar **Punto de Trabajo Q** en ausencia de señal.
2. A partir de las **Especificaciones del Transistor** (Fabricante: hojas de características) y de **Q** → Calcular el valor de los **Parámetros del Modelo Equivalente de Pequeña Señal del Transistor**.
3. **Eliminar** las **Fuentes de Polarización**:
 - Sustituir **Fuentes de Tensión Continua** por cortocircuitos.
 - Sustituir **Fuentes de Corriente Continua** por circuitos abiertos.
4. **Reemplazar** el **Transistor** por uno de sus **Modelos Equivalentes de Pequeña Señal**.
5. **Analizar** el **Circuito Equivalente de Pequeña Señal resultante** para determinar los parámetros del Amplificador (Ej: *Ganancia en Tensión, Resistencia de Entrada, etc.*)

1.4 EL AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN.

Nota: Circuito Básico (polarización simplificada para caracterizar el comportamiento del transistor).



Análisis AC: Circuito Equivalente de Pequeña Señal



Ganancia o amplificación de corriente A_I

$$A_I \equiv \frac{I_L}{I_b} = - \frac{I_c}{I_b} \quad \boxed{A_I = -h_{fe}}$$

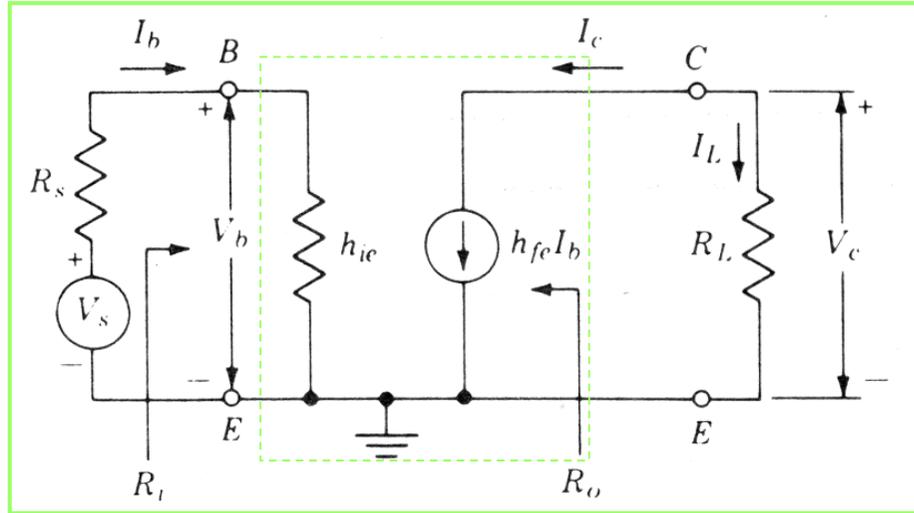
Resistencia de entrada R_i

$$\boxed{R_i \equiv \frac{V_b}{I_b} = h_{ie}}$$

DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

Ganancia o amplificación de tensión A_V

$$A_V \equiv \frac{V_c}{V_b} = \frac{I_L R_L}{I_b h_{ie}} = \frac{A_I R_L}{R_i}$$

Expresión válida \forall transistor
y \forall montaje

En el caso de E.C.:

$$A_V = \frac{-h_{fe} R_L}{h_{ie}}$$

Amplificación de tensión A_{V_s} teniendo en cuenta la resistencia R_s de la fuente

$$A_{V_s} \equiv \frac{V_c}{V_s} = \frac{V_c}{V_b} \frac{V_b}{V_s} = A_V \frac{V_b}{V_s} \quad V_b = \frac{V_s h_{ie}}{h_{ie} + R_s}$$

$$A_{V_s} = \frac{A_V h_{ie}}{h_{ie} + R_s} = \frac{A_I R_L}{h_{ie} + R_s}$$

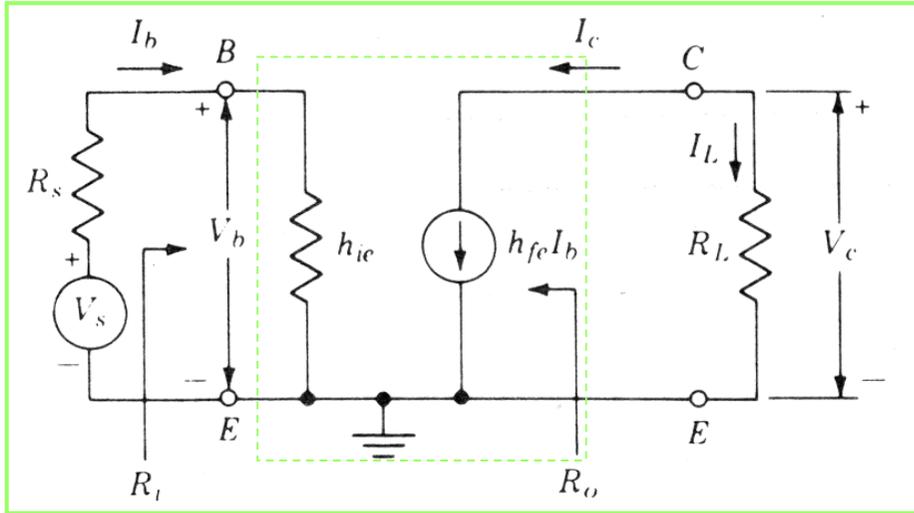
si $R_s = 0$, $A_{V_s} = A_V$

Resistencia de salida

$$R_o \equiv \frac{V_2}{I_2} \quad \text{con} \quad V_s = 0 \quad \text{y} \quad R_L = \infty$$

$$I_b = 0 \rightarrow I_2 = I_c = h_{fe} I_b = 0 \quad R_o = \frac{V_2}{0} = \infty$$

Resistencia de salida R'_o teniendo en cuenta la resistencia de la carga $R'_o = R_o \parallel R_L$



Ganancia o amplificación de tensión A_V

$$A_V \equiv \frac{V_c}{V_b} = \frac{I_L R_L}{I_b h_{ie}} = \frac{A_I R_L}{R_i}$$

Expresión válida \forall transistor y \forall montaje

En el caso de E.C.:

$$A_V = \frac{-h_{fe} R_L}{h_{ie}}$$

Amplificación de tensión A_{V_s} teniendo en cuenta la resistencia R_s de la fuente

$$A_{V_s} \equiv \frac{V_c}{V_s} = \frac{V_c}{V_b} \frac{V_b}{V_s} = A_V \frac{V_b}{V_s} \quad V_b = \frac{V_s h_{ie}}{h_{ie} + R_s}$$

$$A_{V_s} = \frac{A_V h_{ie}}{h_{ie} + R_s} = \frac{A_I R_L}{h_{ie} + R_s}$$

si $R_s = 0$, $A_{V_s} = A_V$

Resistencia de salida

$$R_o \equiv \frac{V_2}{I_2} \quad \text{con} \quad V_s = 0 \quad \text{y} \quad R_L = \infty$$

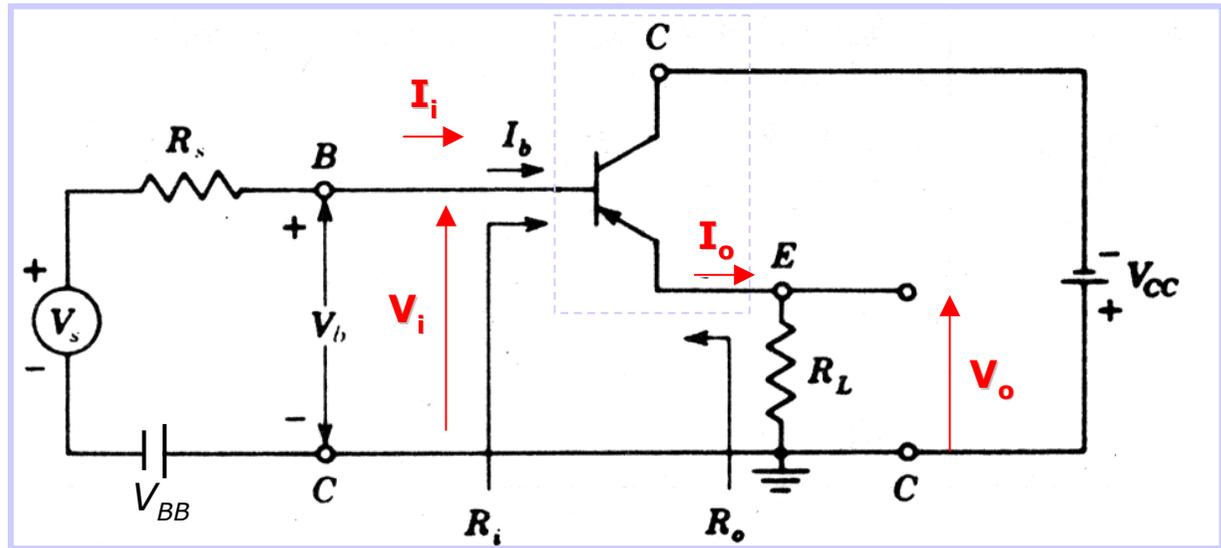
$$I_b = 0 \rightarrow I_2 = I_c = h_{fe} I_b = 0 \quad R_o = \frac{V_2}{0} = \infty$$

Resistencia de salida R'_o teniendo en cuenta la resistencia de la carga $R'_o = R_o \parallel R_L$

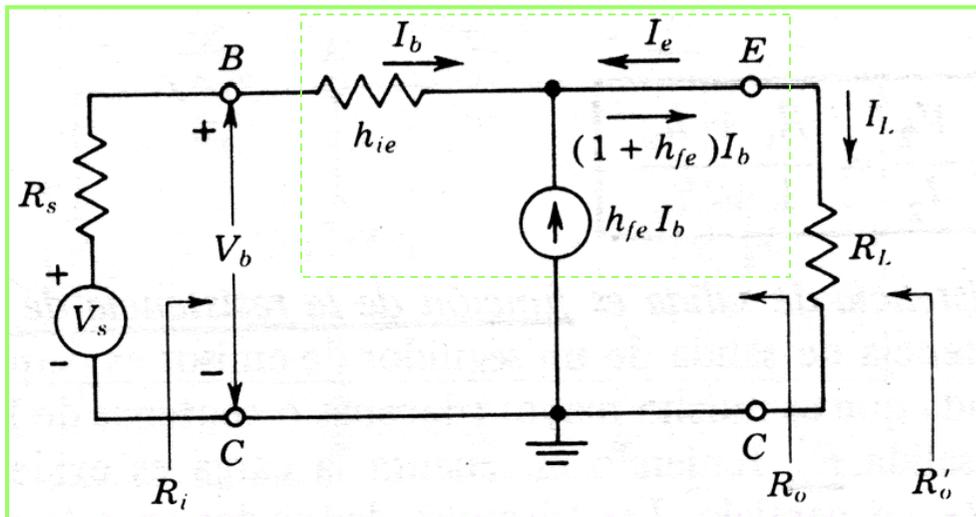
A_I	$-h_{fe}$
R_i	h_{ie}
A_V	$-\frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}}$
R_o	∞
R'_o	R_L

1.5 EL AMPLIFICADOR EN COLECTOR COMÚN (SEGUIDOR DE EMISOR)

Nota: Circuito de polarización simplificado para caracterizar únicamente el comportamiento del transistor



Circuito Equivalente de pequeña señal:



Ganancia de corriente

$$I_L = -I_e = (1 + h_{fe}) I_b$$

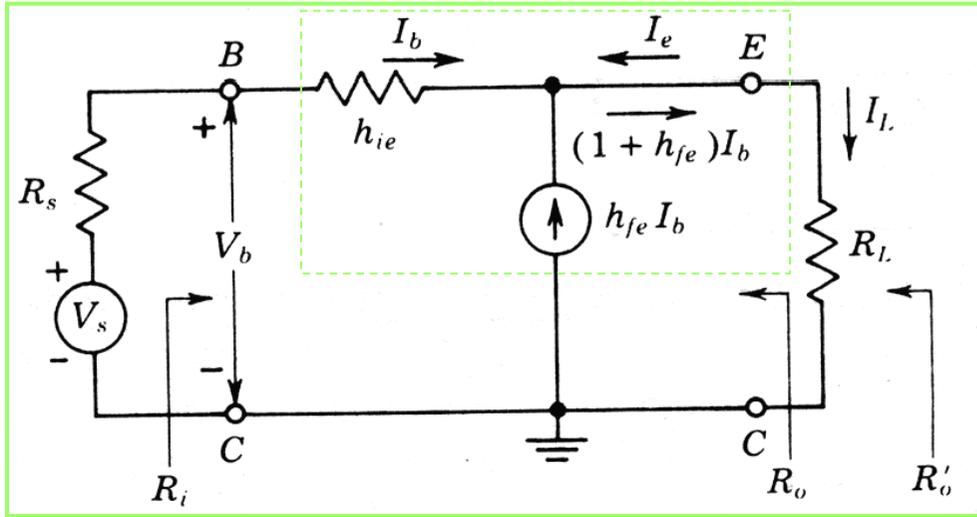
$$A_I = \frac{I_L}{I_b} = 1 + h_{fe}$$

Resistencia de entrada

$$V_b = I_b h_{ie} + (1 + h_{fe}) I_b R_L$$

$$R_i = \frac{V_b}{I_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L \quad R_i \gg h_{ie}$$

Circuito Equivalente de pequeña señal:



Ganancia de tensión

$$A_V = \frac{A_I R_L}{R_i} = \frac{(1 + h_{fe}) R_L}{R_i} = 1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$$

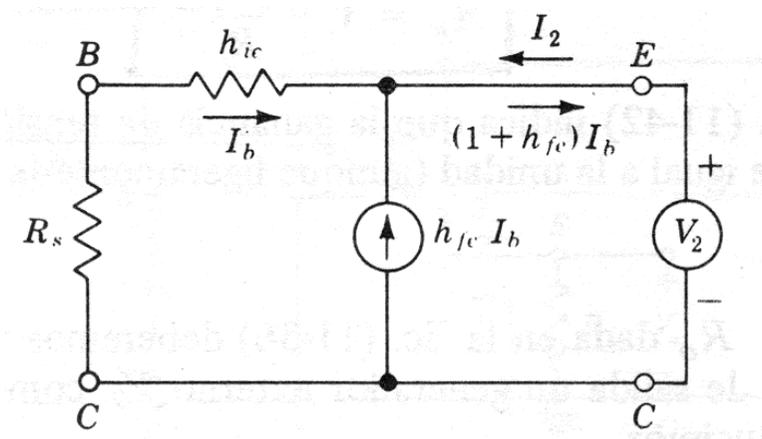
$(1 + h_{fe}) R_L = R_i - h_{ie}$ $R_i \gg h_{ie}$

Resistencia de salida

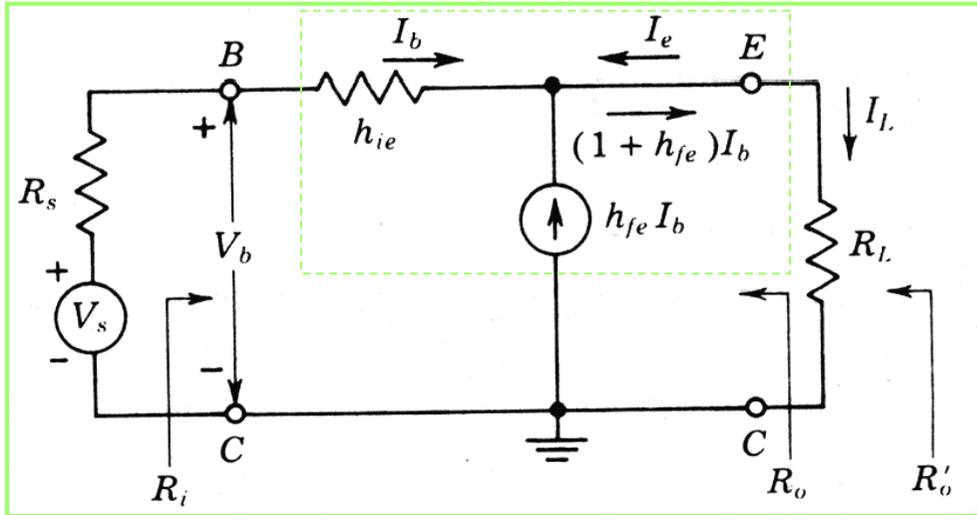
$$V_2 = -I_b(R_s + h_{ie}) \text{ e } I_2 = -(1 + h_{fe})I_b$$

$$R_o \equiv \frac{V_2}{I_2} = \frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

Como $h_{fe} \gg 1 \rightarrow R_o \ll R_i$



Circuito Equivalente de pequeña señal:



A_T	$1 + h_{fe}$
R_i	$h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L$
A_V	$1 - \frac{h_{ie}}{R_i}$
R_o	$\frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
R'_o	$R_o \parallel R_L$

Ganancia de tensión

$$A_V = \frac{A_T R_L}{R_i} = \frac{(1 + h_{fe})R_L}{R_i} = 1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$$

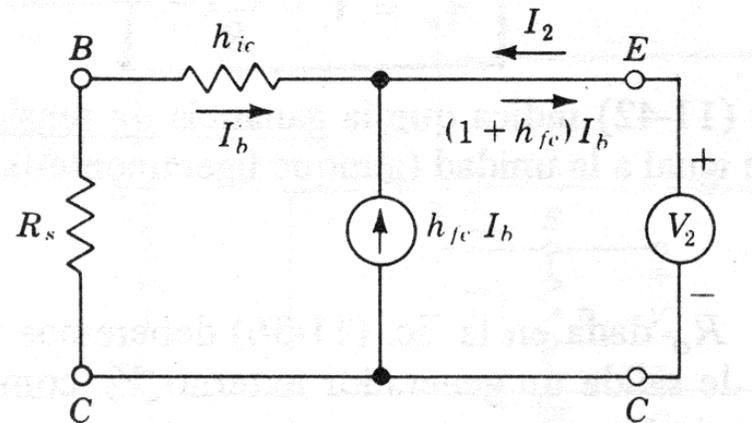
$(1 + h_{fe})R_L = R_i - h_{ie}$ $R_i \gg h_{ie}$

Resistencia de salida

$$V_2 = -I_b(R_s + h_{ie}) \text{ e } I_2 = -(1 + h_{fe})I_b$$

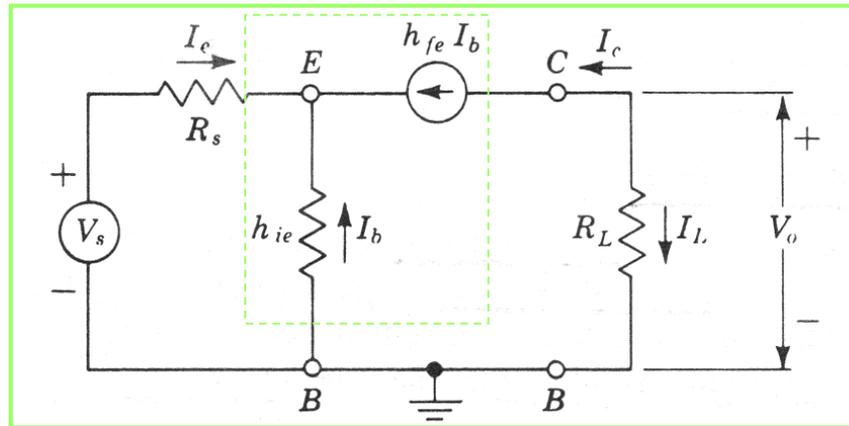
$$R_o \equiv \frac{V_2}{I_2} = \frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

Como $h_{fe} \gg 1 \rightarrow R_o \ll R_i$



1.6. EL AMPLIFICADOR EN BASE COMÚN

Circuito Equivalente de pequeña señal:

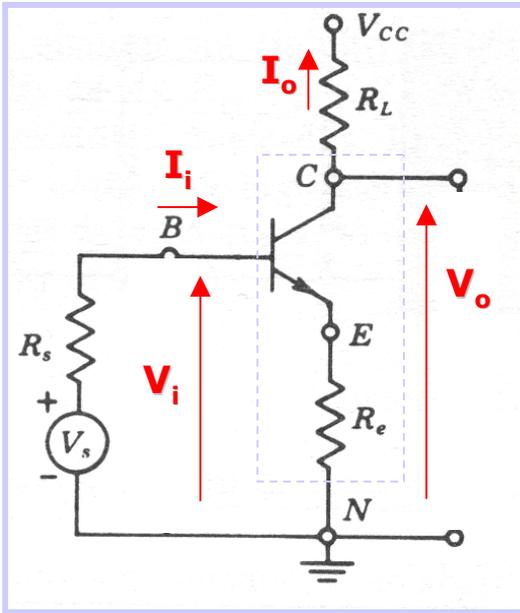


Ejercicio

A_I	$\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}}$
R_i	$\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
A_V	$h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}}$
R_o	∞
R'_o	R_L

1.7. EL AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR.

Nota: Circuito de polarización simplificado para caracterizar únicamente el comportamiento del transistor



En la configuración en **E.C.**, $A_v = f(h_{fe})$.

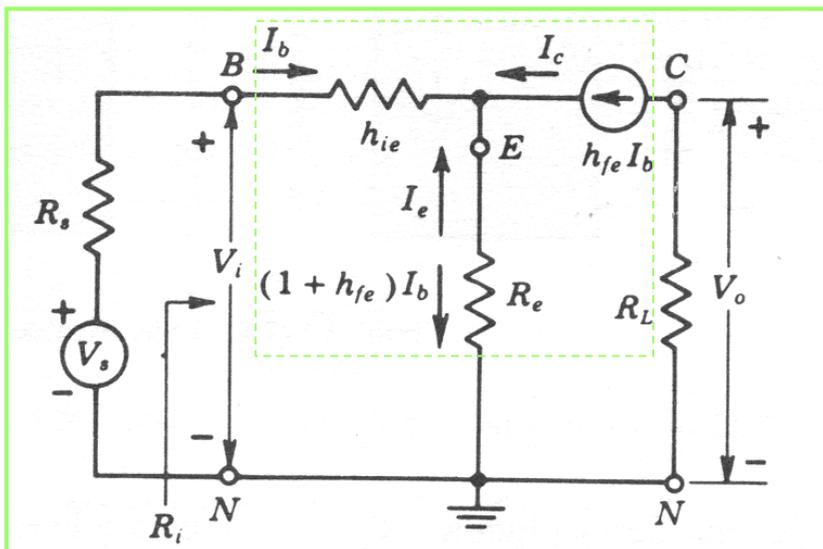
SI SE INTRODUCE UNA **R_e** EN EL EMISOR, **A_v** PASA A SER **INDEPENDIENTE DE h_{fe}**.

ASÍ SE CONSIGUE **ESTABILIZAR LA GANANCIA EN TENSIÓN DEL AMPLIFICADOR**

$$A_I = \frac{-I_c}{I_b} = \frac{-h_{fe}I_b}{I_b} = -h_{fe} \quad R_i = \frac{V_i}{I_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e$$

$$A_V = \frac{A_I R_L}{R_i} = \frac{-h_{fe}R_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e} \approx \frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}} \frac{R_L}{R_e} \approx \frac{-R_L}{R_e}$$

$(1 + h_{fe})R_e \gg h_{ie}$
 $h_{fe} \gg 1$



	CE	CE con R _e
R _i	h _{ie}	h _{ie} + (1 + h _{fe})R _e
A _V	$-\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$	$-\frac{h_{fe}R_L}{R_i} \approx -\frac{R_L}{R_e}$

La ganancia en tensión es menor que en E.C. pero más estable.

CARACTERÍSTICAS AMPLIFICADORAS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

	CE	CE con R_e	CC	CB
A_I	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $1 + h_{fe}$	BAJA $\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 1$
R_i	MEDIA h_{ie}	AUMENTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e$	ALTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L$	BAJA $\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
A_V	ALTA $-\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$	ESTABILIZADA $-\frac{h_{fe}R_L}{R_i} \approx -\frac{R_L}{R_e}$	BAJA $1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$	ALTA $h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}}$
R_o	MUY ALTA ∞	MUY ALTA ∞	BAJA $\frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	MUY ALTA ∞
R'_o	R_L	R_L	$R_o \parallel R_L$	R_L

CARACTERÍSTICAS AMPLIFICADORAS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

	CE	CE con R_e	CC	CB
A_I	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $1 + h_{fe}$	BAJA $\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 1$
R_i	MEDIA h_{ie}	AUMENTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e$	ALTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L$	BAJA $\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
A_V	ALTA $-\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$	ESTABILIZADA $-\frac{h_{fe}R_L}{R_i} \approx -\frac{R_L}{R_e}$	BAJA $1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$	ALTA $h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}}$
R_o	MUY ALTA ∞	MUY ALTA ∞	BAJA $\frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	MUY ALTA ∞
R_o'	R_L	R_L	$R_o \parallel R_L$	R_L

Configuración en E.C.

- Amplificador inversor
- Permite obtener simultáneamente Ganancias de Tensión y de Corriente superiores a la unidad.
- Es la más utilizada

CARACTERÍSTICAS AMPLIFICADORAS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

	CE	CE con R_e	CC	CB
A_I	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $1 + h_{fe}$	BAJA $\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 1$
R_i	MEDIA h_{ie}	AUMENTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e$	ALTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L$	BAJA $\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
A_V	ALTA $-\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$	ESTABILIZADA $-\frac{h_{fe}R_L}{R_i} \approx -\frac{R_L}{R_e}$	BAJA $1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$	ALTA $h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}}$
R_o	MUY ALTA ∞	MUY ALTA ∞	BAJA $\frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	MUY ALTA ∞
R'_o	R_L	R_L	$R_o \parallel R_L$	R_L

Configuración en C.C.

- Amplificador no inversor
- A_I es aproximadamente igual que en E.C (en módulo)
- A_V es menor que la unidad
- R_i es la mayor
- R_o es la menor
- BUFFER DE TENSION (Adaptación de impedancias cuando $R_s \gg R_L$, información en forma de tensión).

CARACTERÍSTICAS AMPLIFICADORAS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

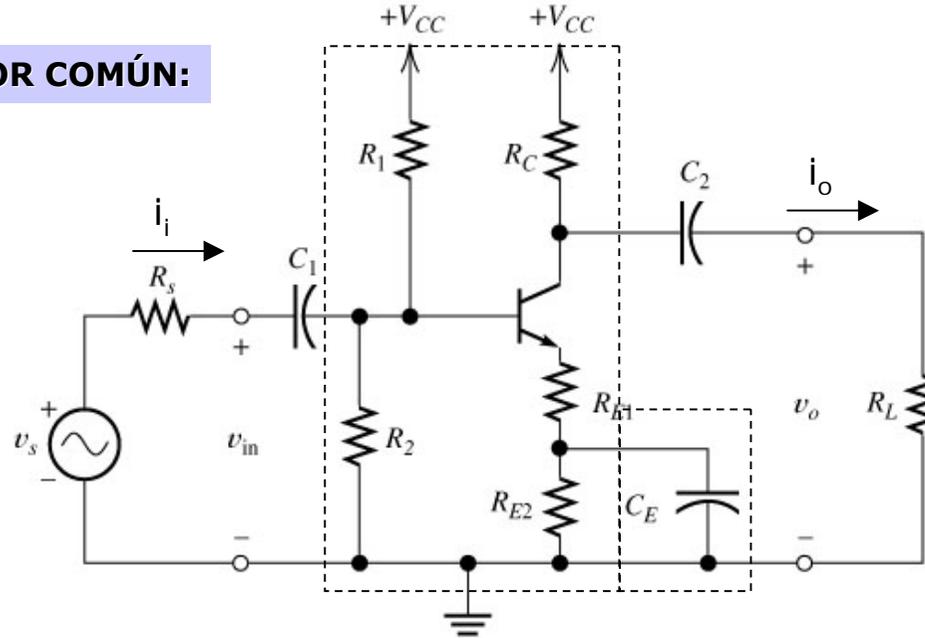
	CE	CE con R_e	CC	CB
A_I	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $-h_{fe}$	ALTA $1 + h_{fe}$	BAJA $\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 1$
R_i	MEDIA h_{ie}	AUMENTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_e$	ALTA $h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L$	BAJA $\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$
A_V	ALTA $-\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}$	ESTABILIZADA $-\frac{h_{fe}R_L}{R_i} \approx -\frac{R_L}{R_e}$	BAJA $1 - \frac{h_{ie}}{R_i} \approx 1$	ALTA $h_{fe} \frac{R_L}{h_{ie}}$
R_o	MUY ALTA ∞	MUY ALTA ∞	BAJA $\frac{R_s + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	MUY ALTA ∞
R'_o	R_L	R_L	$R_o \parallel R_L$	R_L

Configuración en B.C.

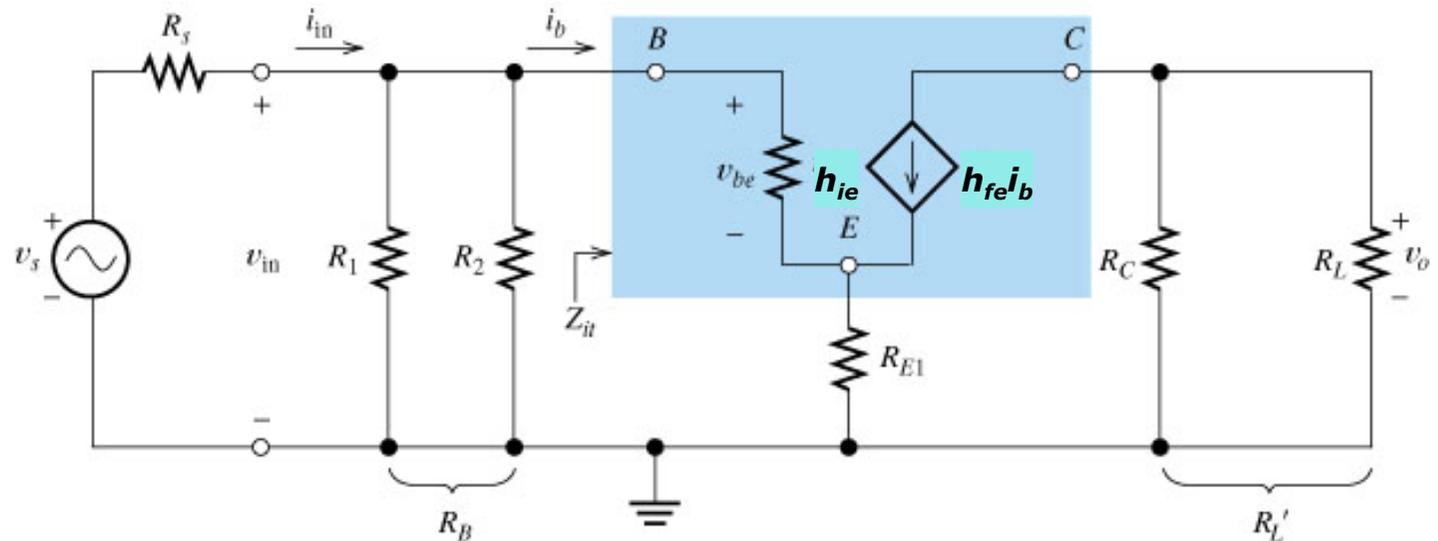
- Amplificador no inversor
- A_I es algo menor que la unidad
- A_V igual que en EC (en módulo)
- R_i es la menor de las tres
- R_o es ∞ , como en EC
- BUFFER DE CORRIENTE (Adaptación de impedancias cuando $R_s \ll R_L$, información en forma de corriente)

1.8. CIRCUITOS AMPLIFICADORES "REALES" (con autopolarización)

1 - EMISOR COMÚN:

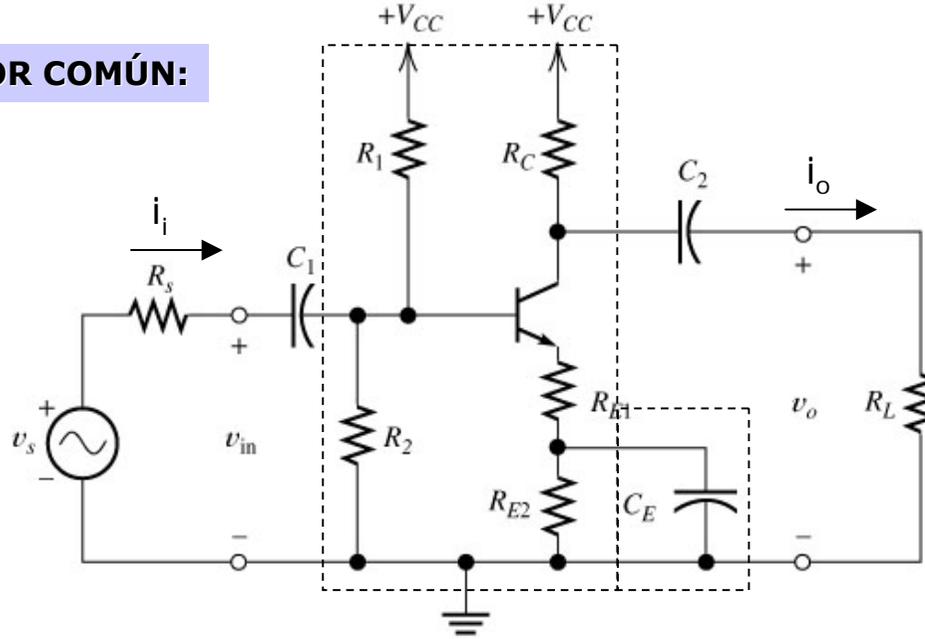


Circuito
equivalente en
pequeña señal a
frecuencias
medias



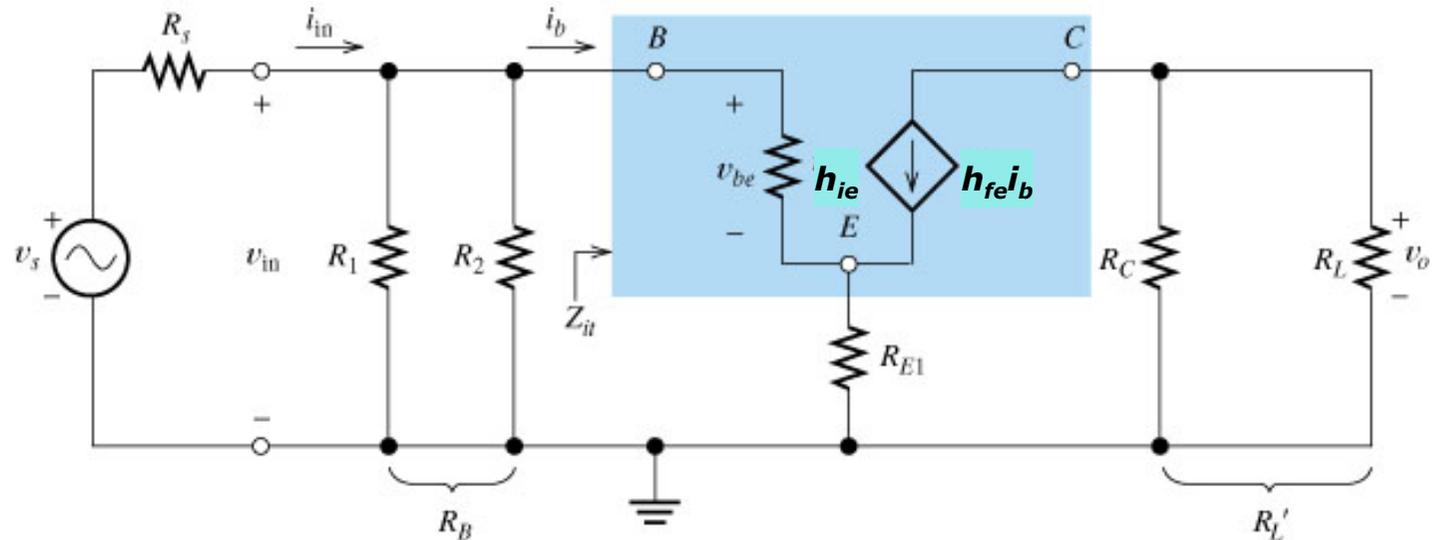
1.8. CIRCUITOS AMPLIFICADORES "REALES" (con autopolarización)

1 - EMISOR COMÚN:



EJERCICIO: obtener las expresiones de A_i , R_i , A_v , R_o , A_{v_s} .

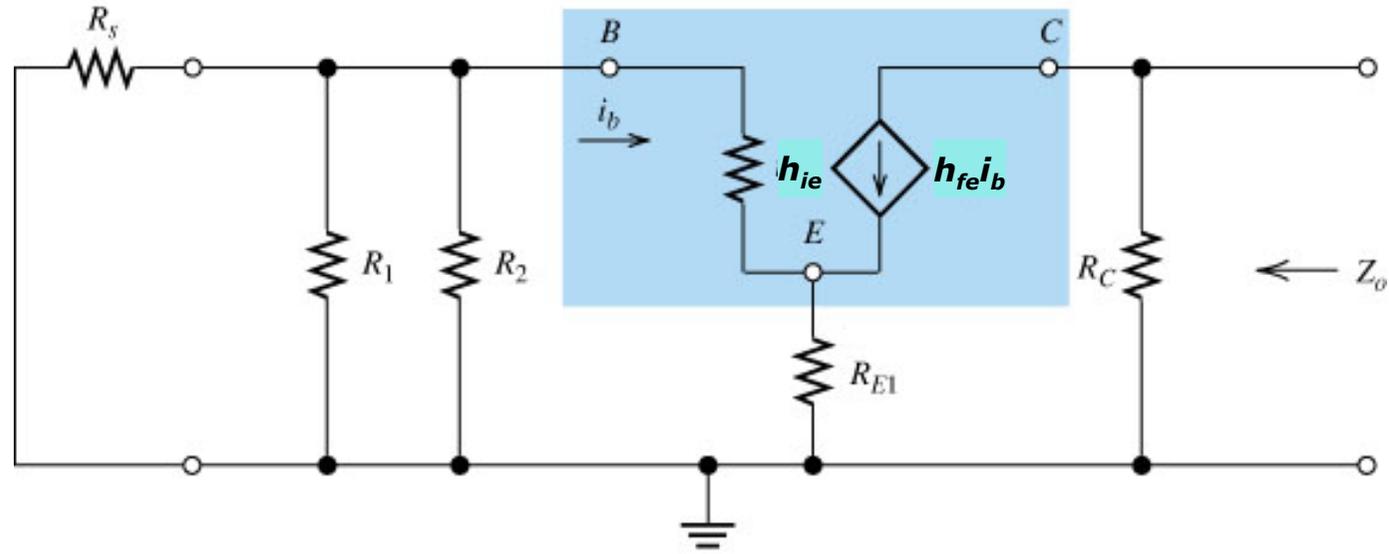
Circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias



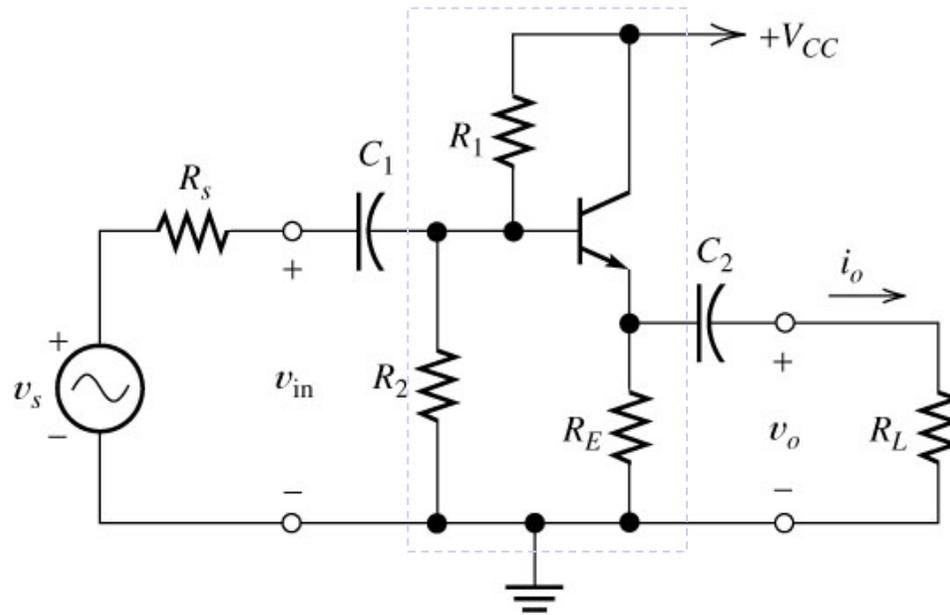
DE-II

AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

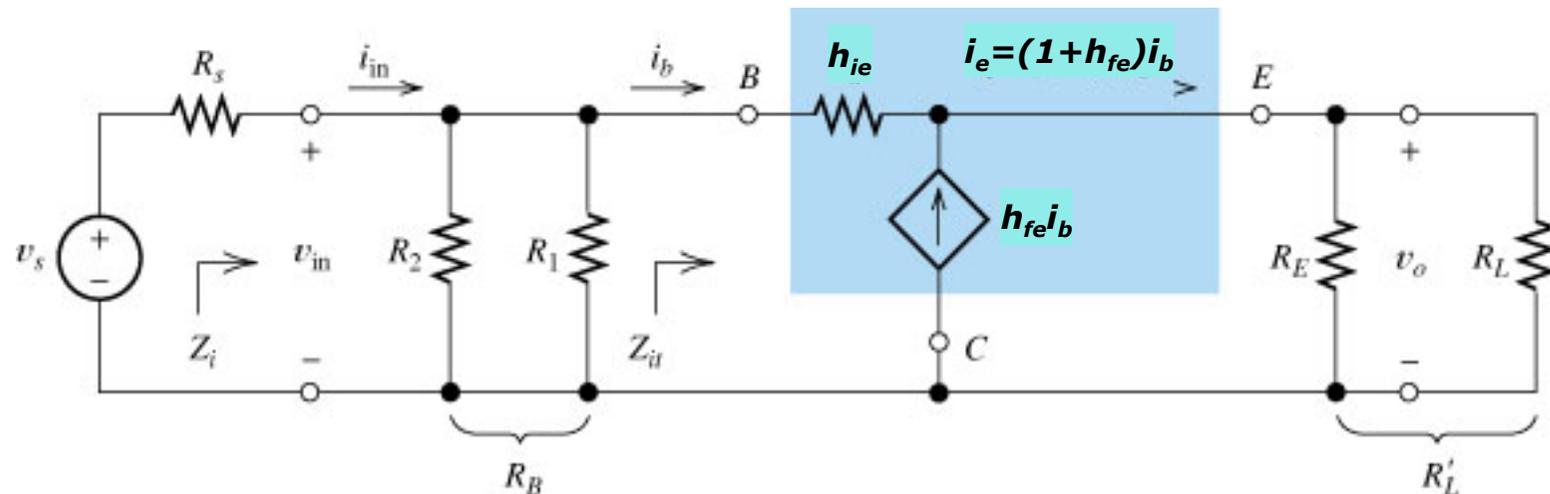
Circuito equivalente utilizado para hallar Z_o 

2 - SEGUIDOR DE EMISOR:



EJERCICIO: obtener las expresiones de A_i , R_i , A_v , R_o , A_{vs} .

Circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias

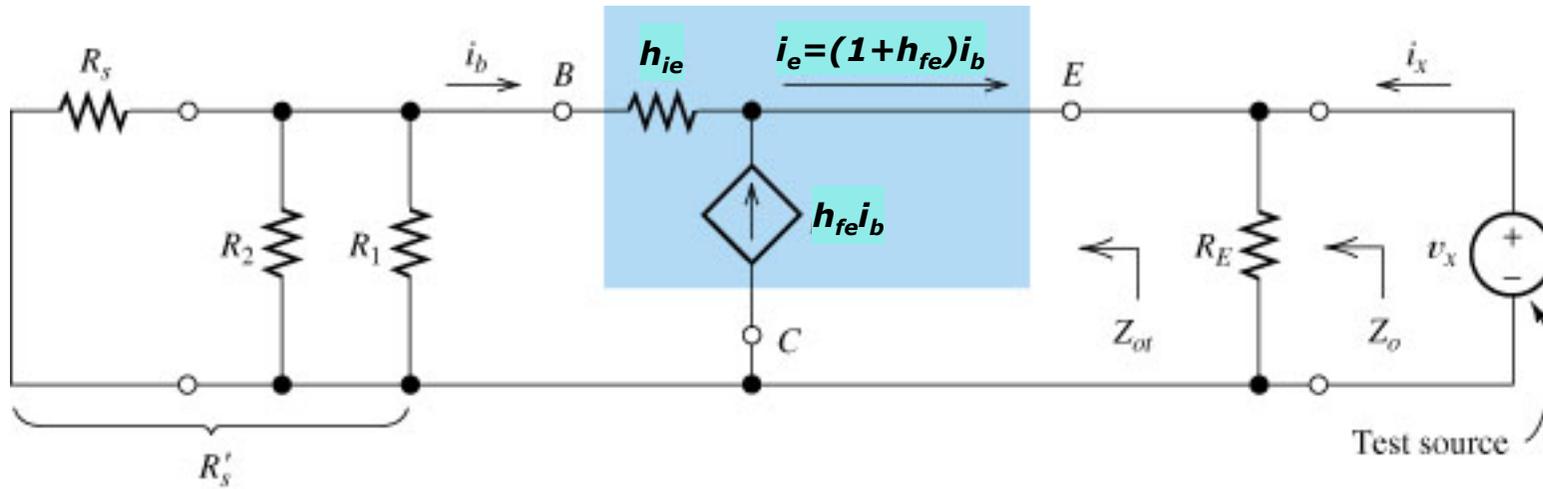


DE-II

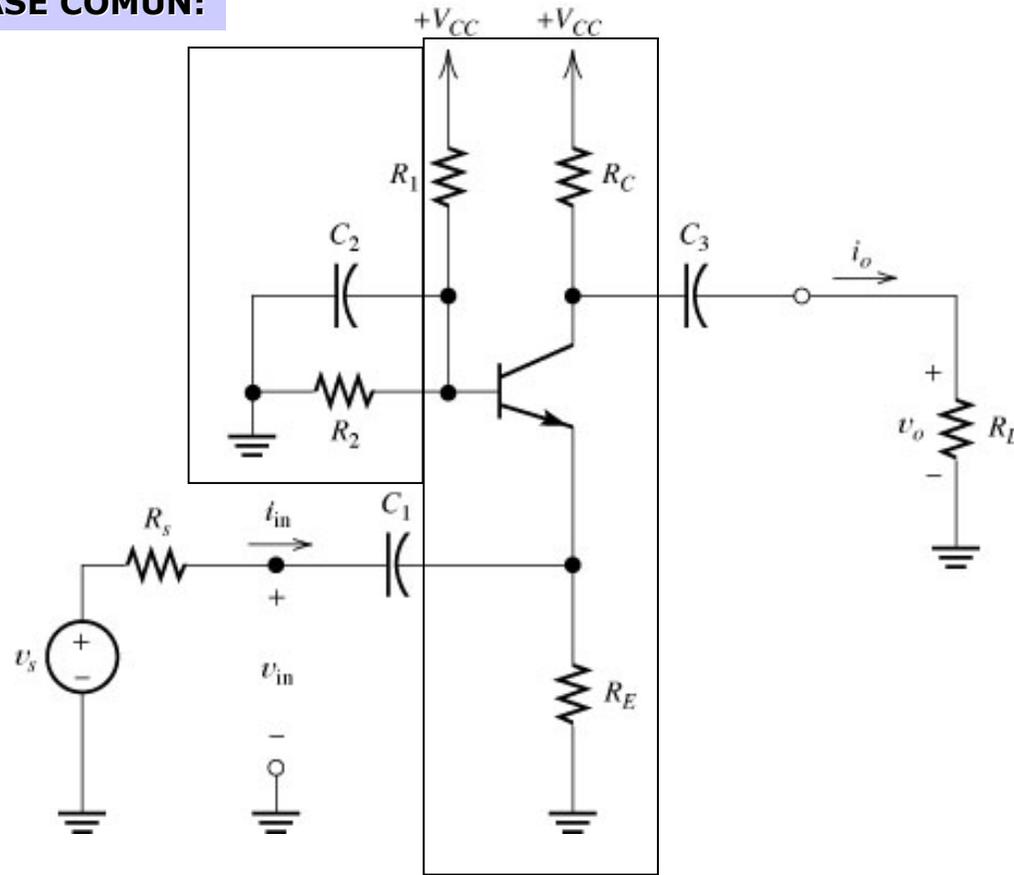
AMPLIFICADORES
CON BJTS

Tema 4,5: Amplificación: Estructuras Básicas

Circuito equivalente utilizado para hallar la impedancia de salida Z_o



3 - BASE COMÚN:



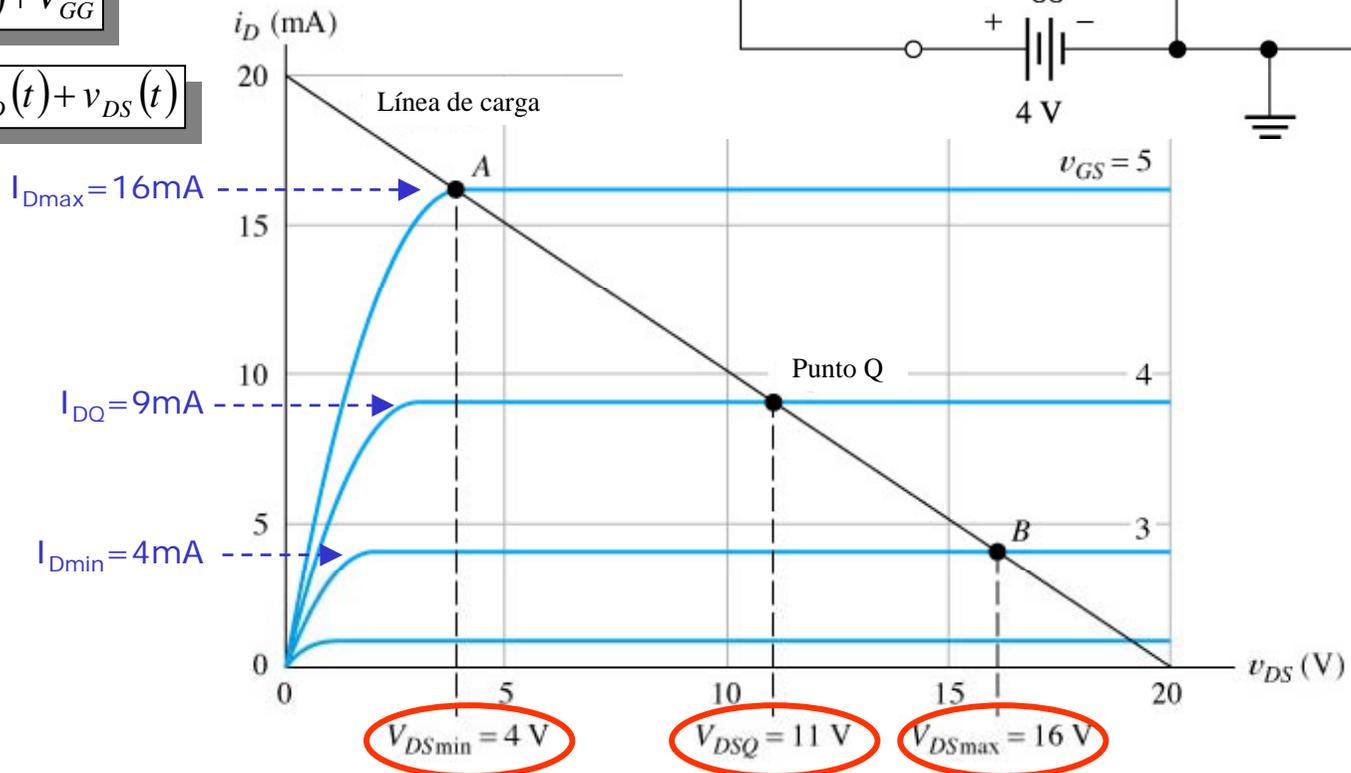
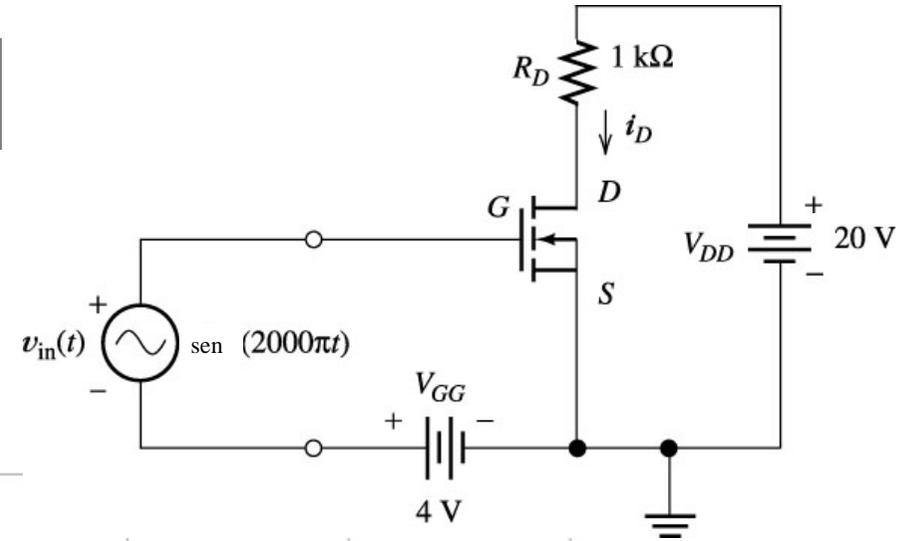
EJERCICIO: obtener las expresiones de A_i , R_i , A_v , R_o , A_{v_s} .

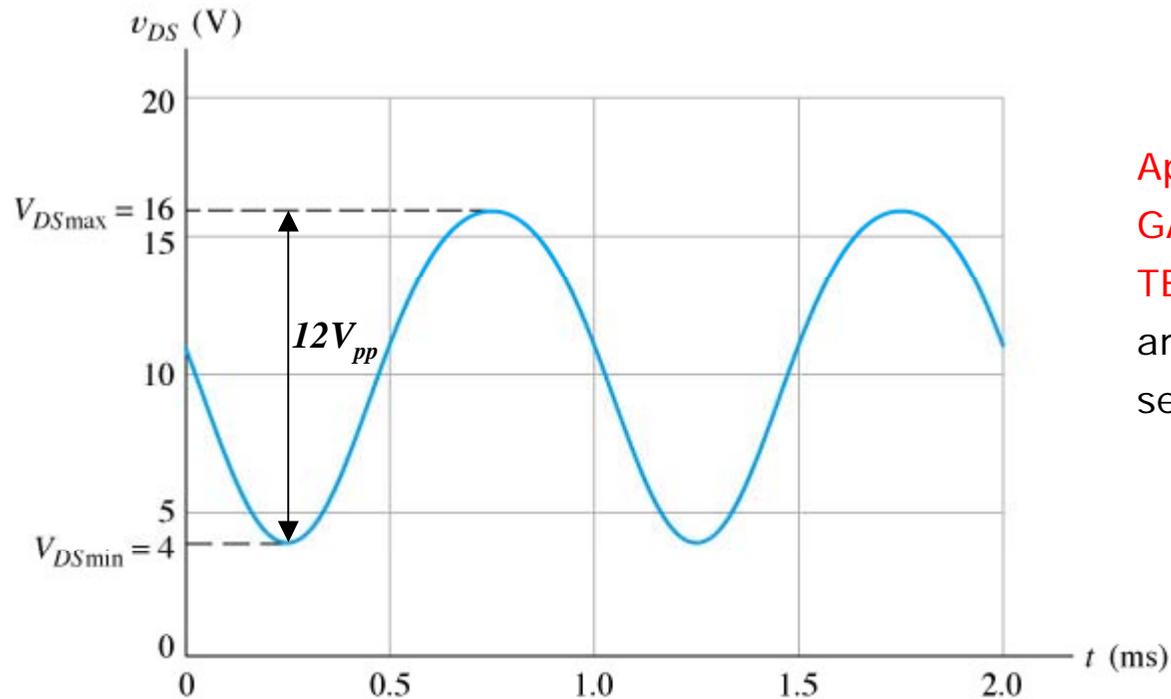
2. AMPLIFICADORES CON TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

2.1. EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO COMO AMPLIFICADOR

$$v_{GS}(t) = v_{in}(t) + V_{GG}$$

$$V_{DD} = R_D \cdot i_D(t) + v_{DS}(t)$$





Aparentemente,
GANANCIA EN
TENSIÓN: -6 (el
amplif. invierte la
señal de entrada)

La forma de onda de salida no es senoidal simétrica como la de la entrada: $V_{DSQ} = 11V$, y $V_{DSmax} = 16V$, $V_{DSmin} = 4V$



Salida mayor que
la entrada, pero
DISTORSIONADA



DISTORSIÓN: debida a que las *curvas características del FET no son equidistantes*.

Si se aplicara una **AMPLITUD DE ENTRADA MUCHO MENOR**, tendríamos una **AMPLIFICACIÓN CON DISTORSIÓN INAPRECIABLE**, pues las *curvas están distanciadas de una manera más uniforme* si se considera una *región más restringida de las curvas características* \Rightarrow **PEQUEÑA SEÑAL.**

2.2. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL

Análisis gráfico: difícil para amplificadores reales. A continuación desarrollaremos un **circuito equivalente lineal en pequeña señal** para el FET, que nos permitirá utilizar técnicas de **análisis matemático** en lugar del análisis gráfico.

$$\left. \begin{aligned} i_D(t) &= I_{DQ} + i_d(t) \\ v_{GS}(t) &= V_{GSQ} + v_{gs}(t) \\ \text{Transistor polarizado} \\ \text{en zona saturación: } i_D &= K(v_{GS} - V_{to})^2 \end{aligned} \right\} I_{DQ} + i_d(t) = K[V_{GSQ} + v_{gs}(t) - V_{to}]^2$$

$$I_{DQ} + i_d(t) = K(V_{GSQ} - V_{to})^2 + 2K(V_{GSQ} - V_{to})v_{gs}(t) + Kv_{gs}^2(t)$$

$$\text{Como: } I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{to})^2$$

Y además estamos interesados en las condiciones de **pequeña señal** para las cuales $v_{gs}^2(t)$ es muy pequeño y se puede despreciar.

(Suponemos que $|v_{gs}(t)| \ll |V_{GSQ} - V_{to}|$)

$$i_d(t) = 2K(V_{GSQ} - V_{to})v_{gs}(t)$$

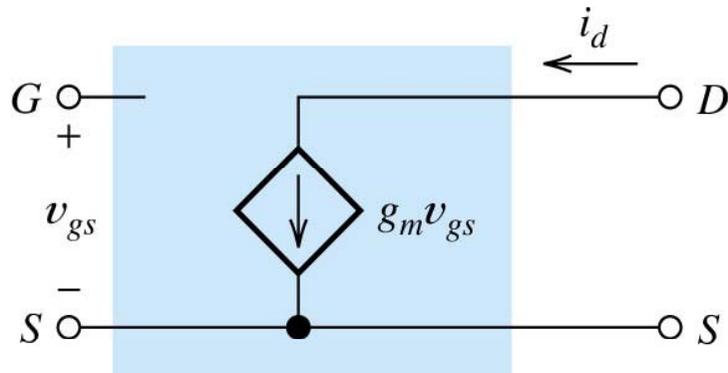
Si se define la **transconductancia** del transistor como: $g_m = 2K(V_{GSQ} - V_{to})$

$$i_d(t) = g_m v_{gs}(t)$$

Como la *corriente de puerta* es despreciable:

$$i_g(t) = 0$$

DE-II

AMPLIFICADORES
CON FETS

Para Pequeña Señal los Transistores Unipolares pueden modelarse como una Fuente de Corriente Controlada por Tensión entre D y S.

2.2.1. Dependencia de la Transconductancia respecto al Punto Q y los Parámetros del Dispositivo.

Despejando $(V_{GSQ} - V_{to})$ en $I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{to})^2$ y sustituyendo los resultados en

$g_m = 2K(V_{GSQ} - V_{to})$ se obtiene:

$$g_m = 2\sqrt{KI_{DQ}}$$



Se puede incrementar g_m eligiendo un valor más elevado de I_{DQ} .

$$\text{Como } K = \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \frac{KP}{2}$$

W = anchura del canal

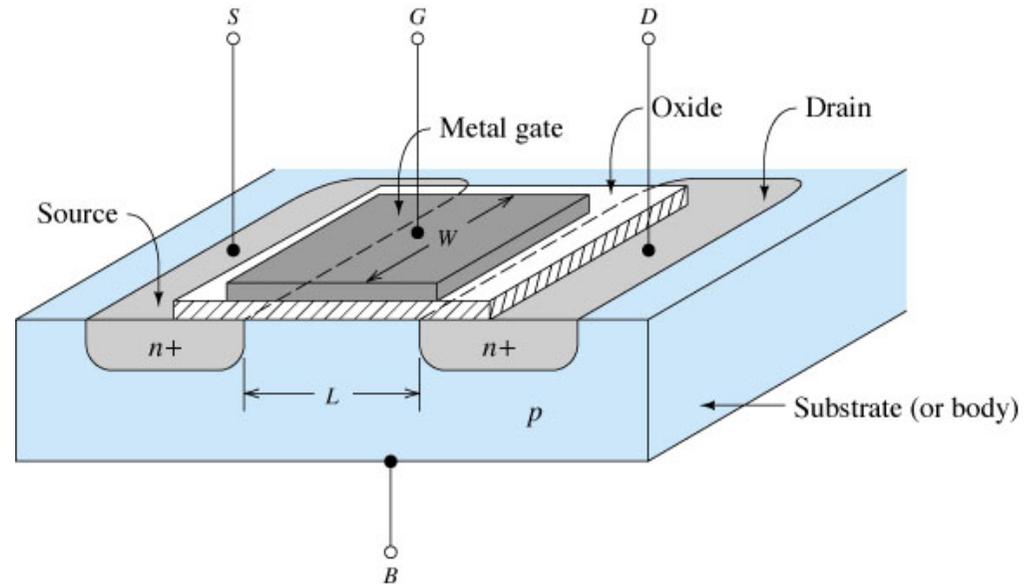
L = longitud del canal (valor mínimo limitado por el proceso de fabricación)

$KP = \mu_n \cdot C_{ox}$: parámetro dependiente del proceso de fabricación del transistor.

(μ_n = movilidad superficial de los electrones en el canal;

C_{ox} = capacidad de puerta por unidad de área, que depende a su vez de la anchura del óxido t_{ox})

$$g_m = \sqrt{2KP} \sqrt{W/L} \sqrt{I_{DQ}}$$



Se puede obtener valores mayores de g_m incrementando la relación anchura-longitud del canal del MOSFET. Se obtiene una transconductancia alta a costa del área del CI.

2.2.2. Circuito equivalente más complejo

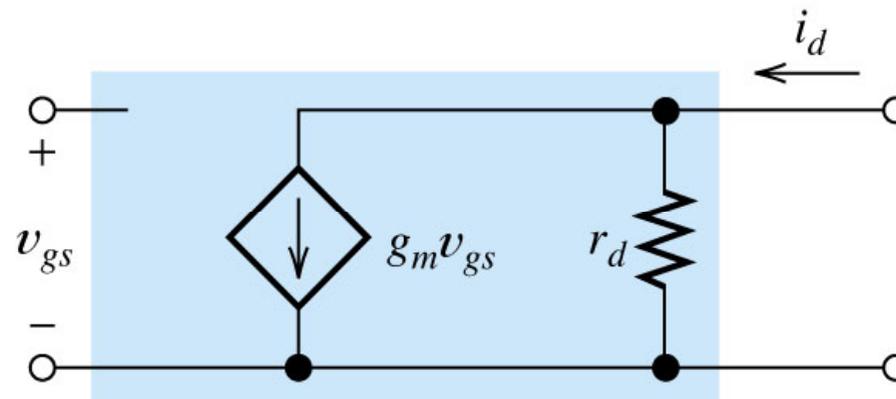
En el modelo anterior se supone que las características de drenador son horizontales en la región de saturación, pero eso no es del todo cierto:

Las curvas características de drenador tienen una pendiente ligeramente ascendente respecto a v_{DS} .

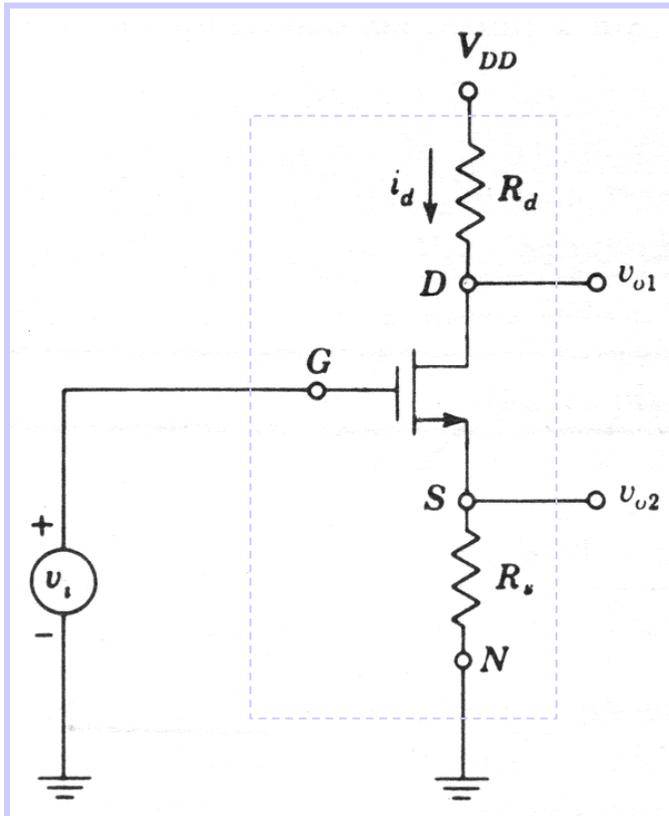


Para tener en cuenta este efecto: AÑADIR UNA RESISTENCIA r_D llamada **RESISTENCIA DE DRENADOR** entre D y S

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{v_{ds}}{r_d}$$

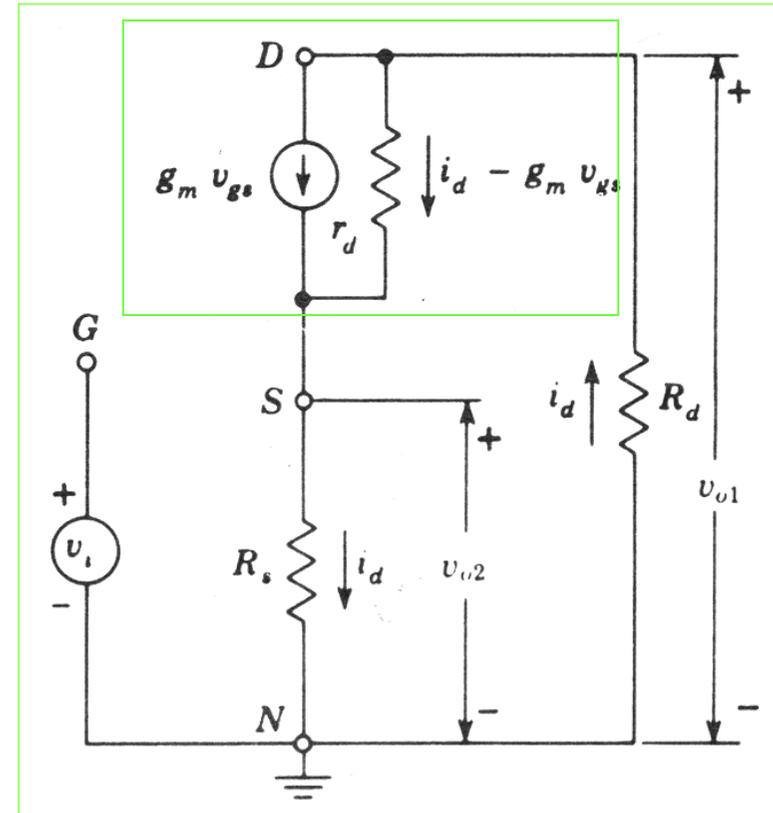


2.3. EL AMPLIFICADOR EN FUENTE COMÚN EL AMPLIFICADOR EN DRENADOR COMÚN (SEGUIDOR DE FUENTE)

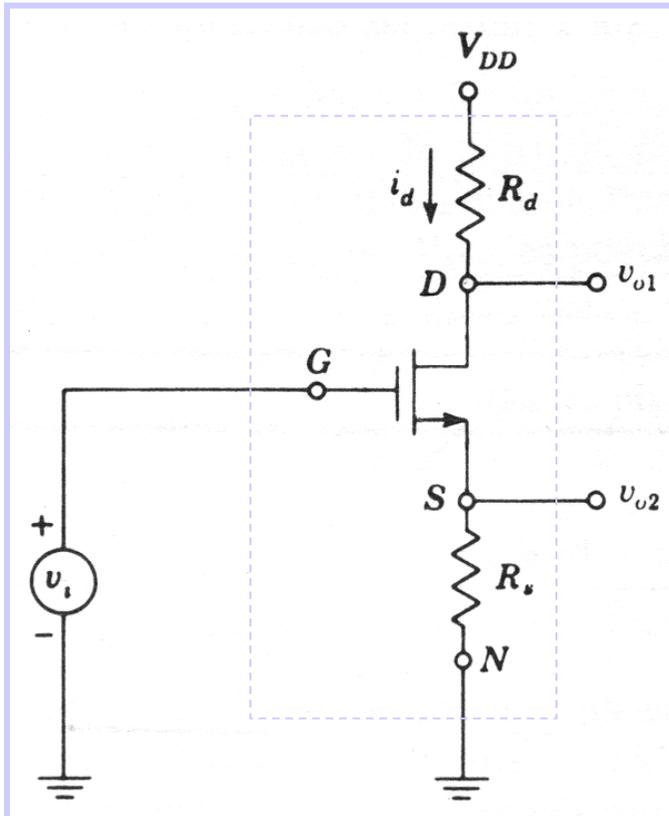


Si $R_s = 0$ y $v_o = v_{o1}$: **FUENTE COMÚN**
 Si $R_d = 0$ y $v_o = v_{o2}$: **DRENADOR COMÚN**

Circuito equivalente de pequeña señal

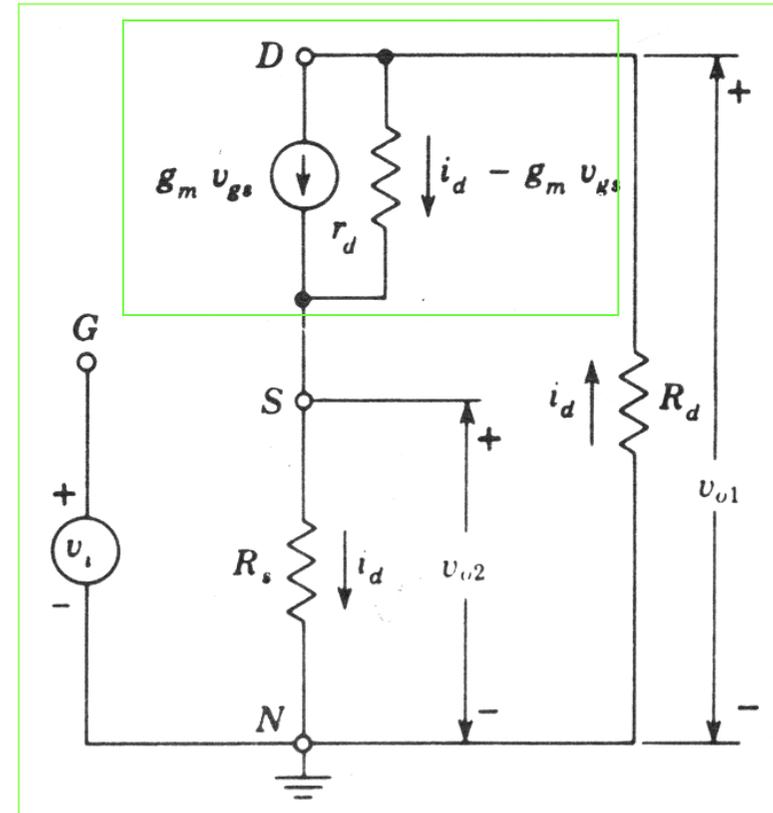


2.3. EL AMPLIFICADOR EN FUENTE COMÚN EL AMPLIFICADOR EN DRENADOR COMÚN (SEGUIDOR DE FUENTE)



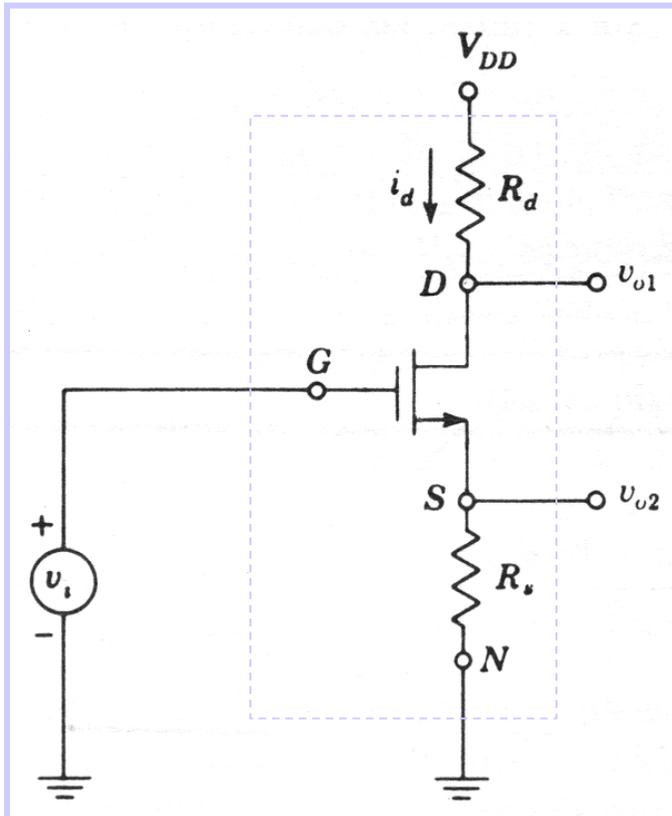
Si $R_s = 0$ y $v_o = v_{o1}$: **FUENTE COMÚN**
 Si $R_d = 0$ y $v_o = v_{o2}$: **DRENADOR COMÚN**

Circuito equivalente de pequeña señal



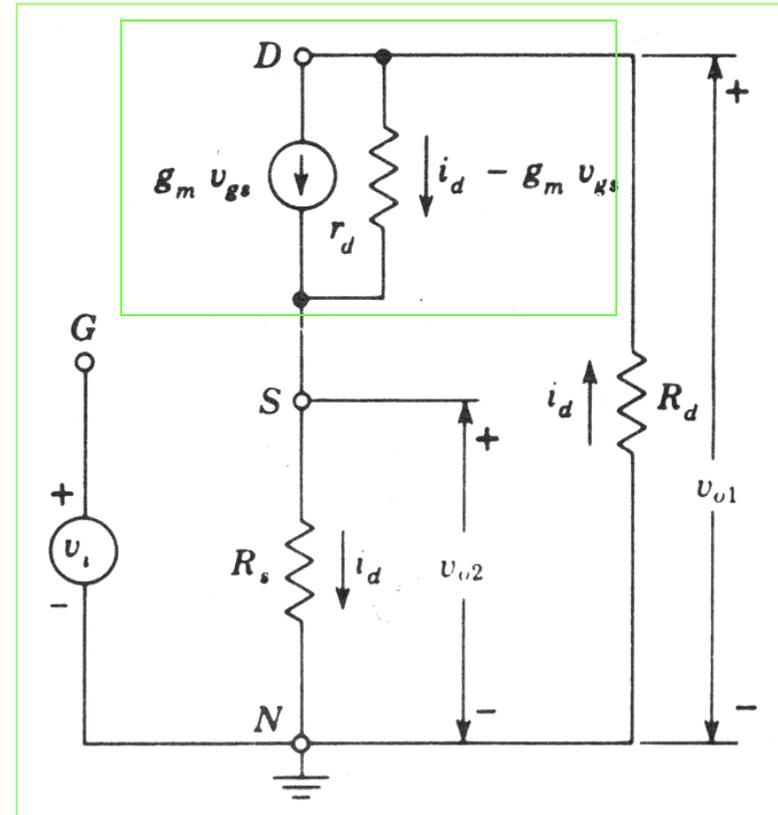
$$\left. \begin{aligned} i_d R_d + (i_d - g_m v_{gs}) r_d + i_d R_s &= 0 \\ v_{gs} &= v_i - i_d R_s \end{aligned} \right\}$$

**2.3. EL AMPLIFICADOR EN FUENTE COMÚN
EL AMPLIFICADOR EN DRENADOR COMÚN (SEGUIDOR DE FUENTE)**



Si $R_s = 0$ y $v_o = v_{o1}$: **FUENTE COMÚN**
 Si $R_d = 0$ y $v_o = v_{o2}$: **DRENADOR COMÚN**

Circuito equivalente de pequeña señal



$$i_d R_d + (i_d - g_m v_{gs}) r_d + i_d R_s = 0$$

$$v_{gs} = v_i - i_d R_s$$

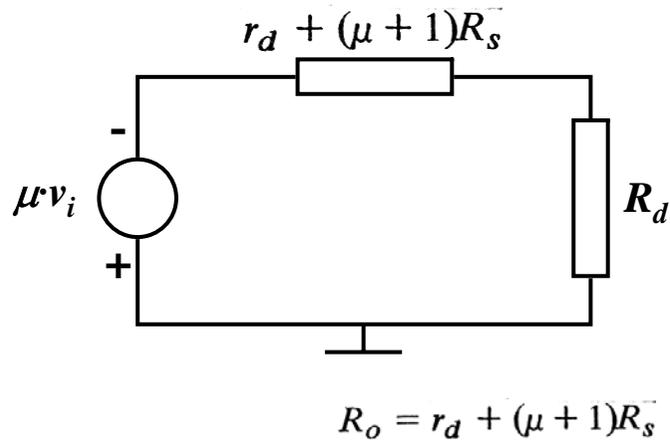
$$i_d = \frac{\mu v_i}{r_d + R_d + (\mu + 1) R_s}$$

$\mu = r_d g_m$ **FACTOR DE AMPLIFICACIÓN**

(1) FUENTE COMÚN ($R_s=0$ y $v_o=v_{o1}$)

$$v_{o1} = -i_d R_d \quad v_{o1} = \frac{-\mu v_i R_d}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s}$$

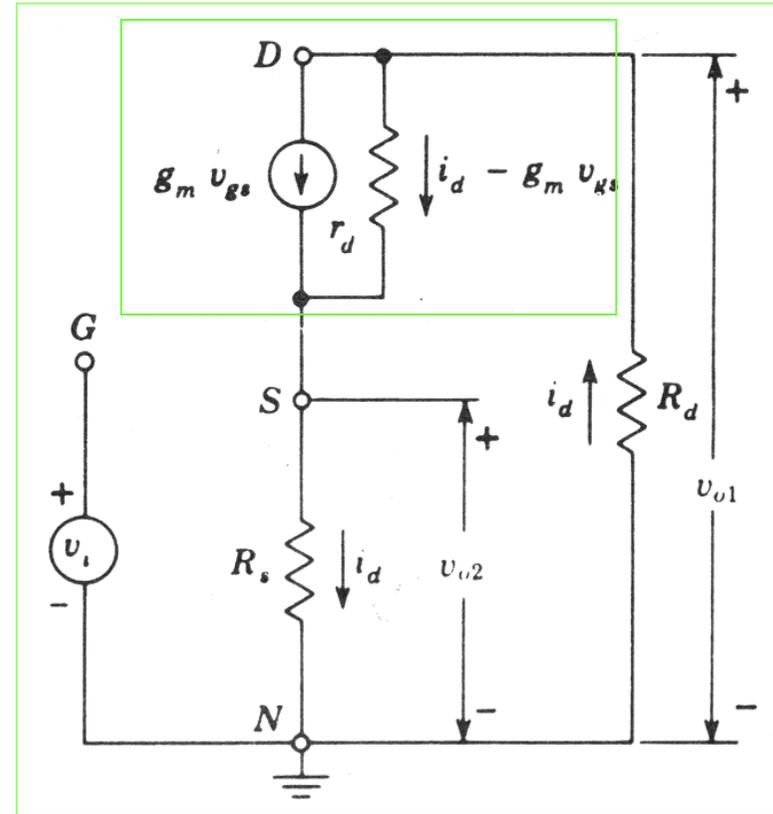
Circuito equivalente visto desde Drenador:



$$R_s = 0 \quad A_V = \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{-\mu R_d}{r_d + R_d} = -g_m R'_d$$

$\mu = r_d g_m$

Circuito equivalente de pequeña señal



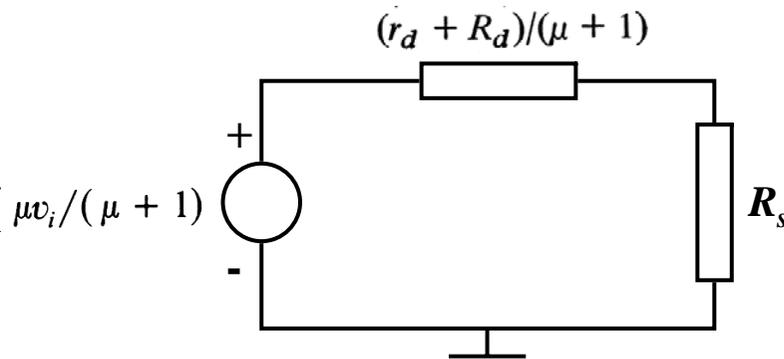
$$R'_d = R_d \parallel r_d$$

(2) DRENADOR COMÚN ($R_d=0$ y $v_o=v_{o2}$)

$$v_{o2} = i_d R_s$$

$$v_{o2} = \frac{\mu v_i R_s}{r_d + R_d + (\mu + 1)R_s} = \frac{[\mu v_i / (\mu + 1)] R_s}{(r_d + R_d) / (\mu + 1) + R_s}$$

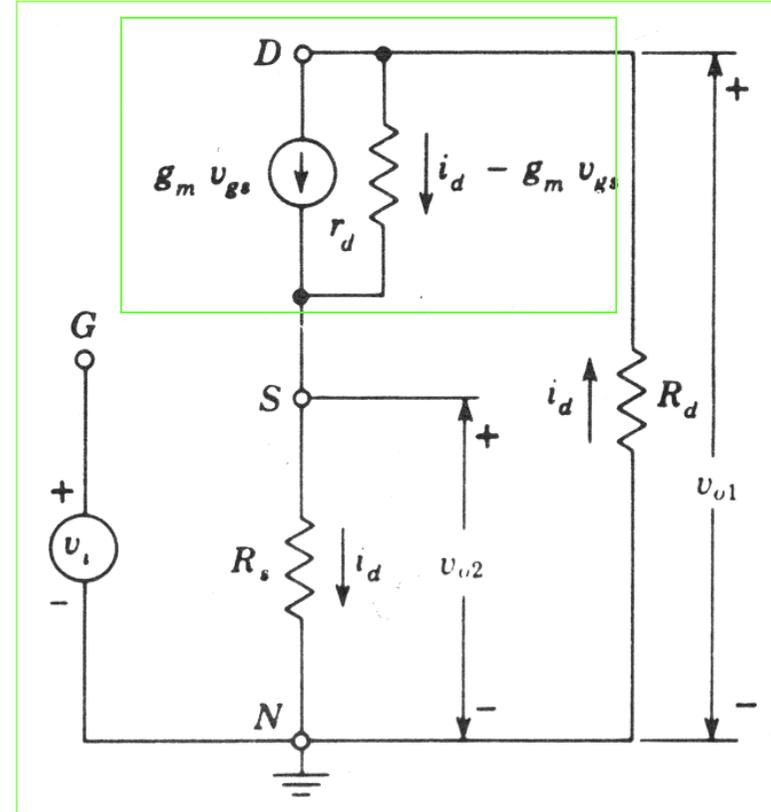
Circuito equivalente visto desde Fuente:



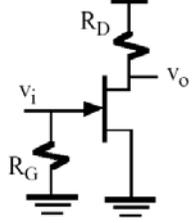
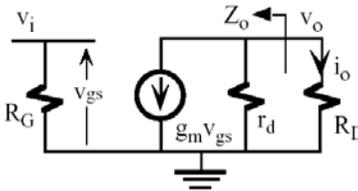
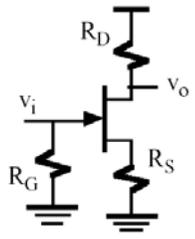
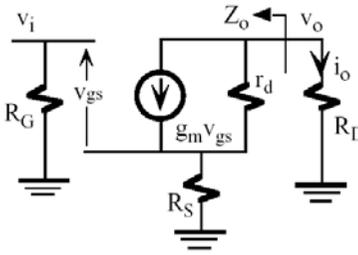
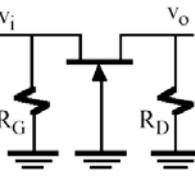
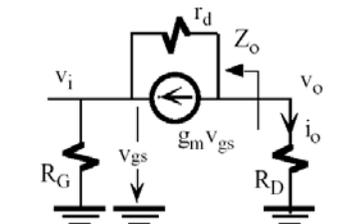
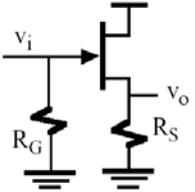
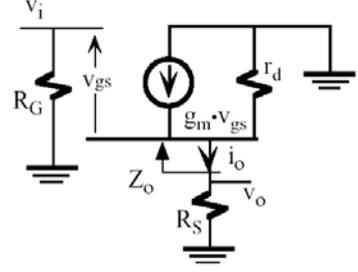
$$R_o = (r_d + R_d) / (\mu + 1)$$

$$\left. \begin{array}{l} R_d = 0 \\ (\mu + 1)R_s \gg r_d \end{array} \right\} \underline{A_V \approx \mu / (\mu + 1) \approx 1} \quad \rightarrow \quad \text{(Si } \mu \gg 1)$$

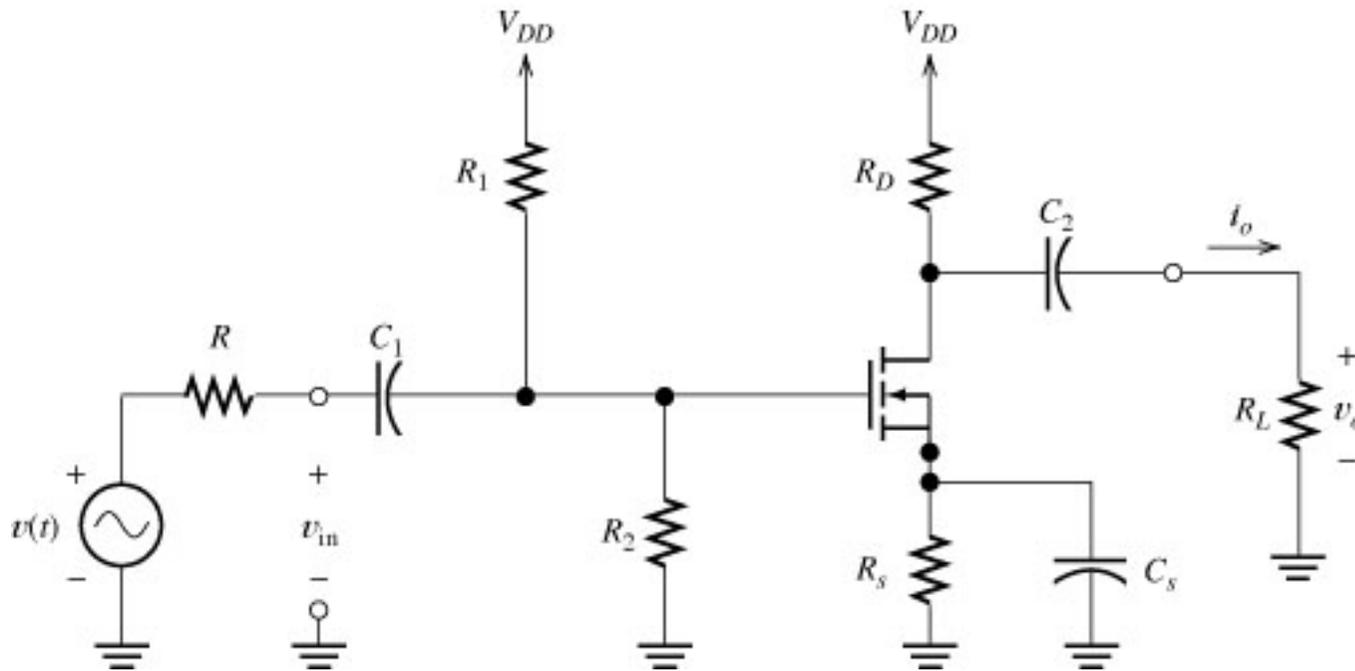
Circuito equivalente de pequeña señal



**Por este motivo, se denomina
SEGUIDOR DE FUENTE**

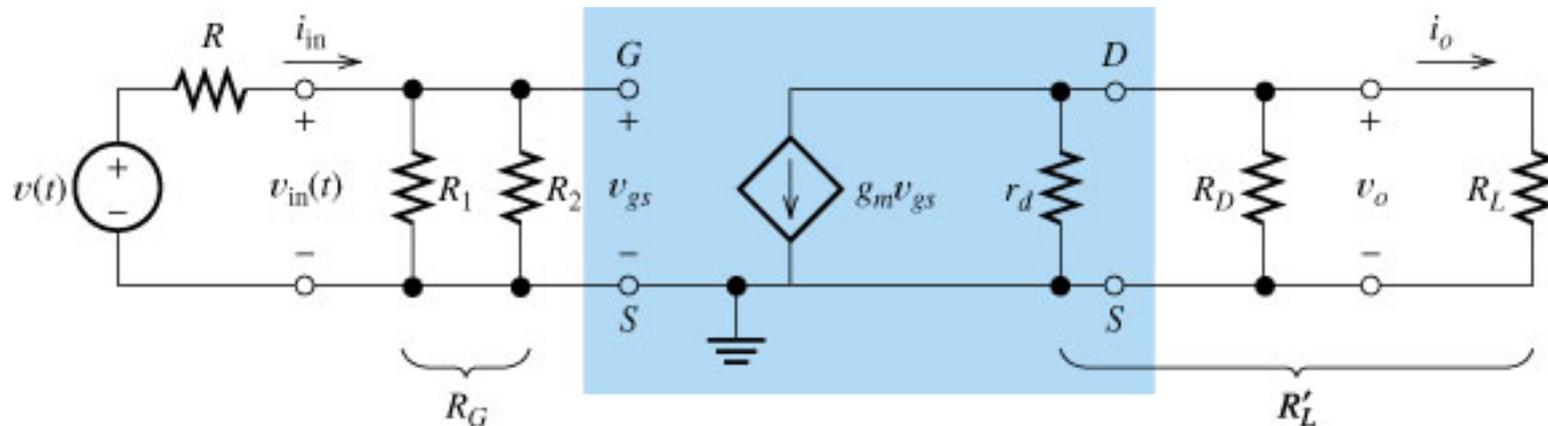
Configuración del amplificador	Modelo equivalente de pequeña señal	Parámetros del amplificador
 <p>Fuente común</p>		$A_V = -\frac{\mu R_D}{R_D + r_d}$ $A_I = -\frac{\mu R_G}{R_D + r_d}$ $Z_i = R_G$ $Z_o = r_d; \quad Z_o' = Z_o \parallel R_D$
 <p>Fuente común con resistencia de fuente</p>		$A_V = -\frac{\mu R_D}{R_D + r_d + (1 + \mu)R_S}$ <p>Si $(1 + \mu)R_S \gg R_D + r_d$ y $\mu \gg 1$</p> $A_V \approx -\frac{R_D}{R_S}$ $Z_i = R_G$ $Z_o = r_d + (1 + \mu)R_S$ $Z_o' = Z_o \parallel R_D$
 <p>Puerta común</p>		$A_V = \frac{(1 + \mu)R_D}{r_d + R_D}$ $Z_i = R_G \parallel \frac{r_d + R_D}{1 + \mu}$ $Z_o = r_d$ $Z_o' = Z_o \parallel R_D$
 <p>Drenador común</p>		$A_V = \frac{1}{1 + \frac{R_S + r_d}{\mu R_S}}$ $Z_i = R_G$ $Z_o = \frac{r_d}{1 + \mu}$ $Z_o' = Z_o \parallel R_S$

2.4. AMPLIFICADOR EN FUENTE COMÚN (con circuito de autopolarización)

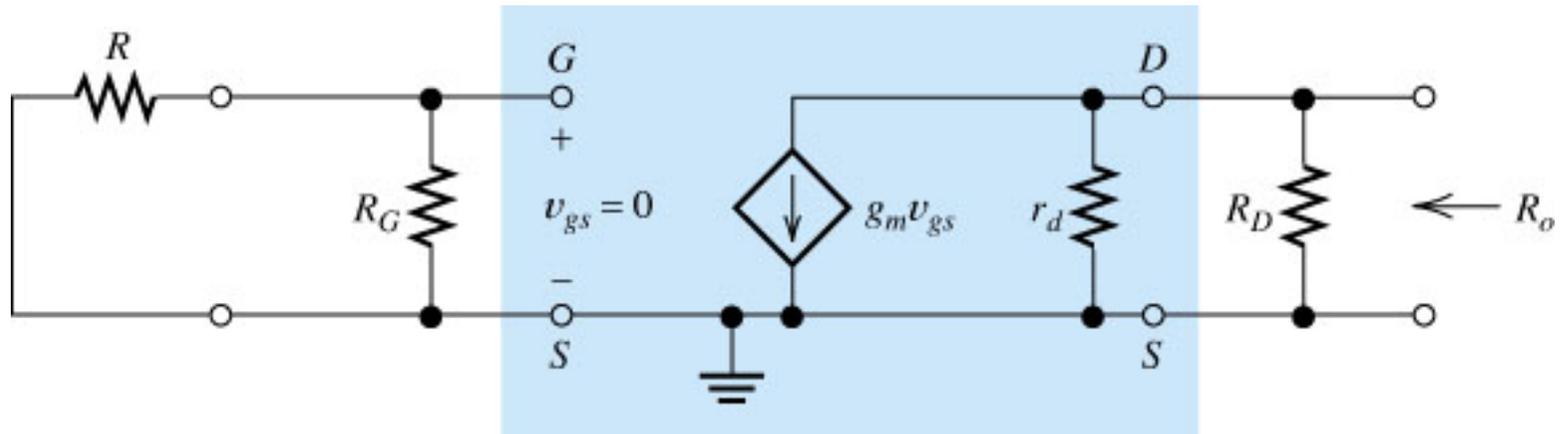


EJERCICIO:
obtener las expresiones
de A_{v_i} , R_{i_i} ,
 R_{o_i} , A_{i_i} , A_{v_s} .

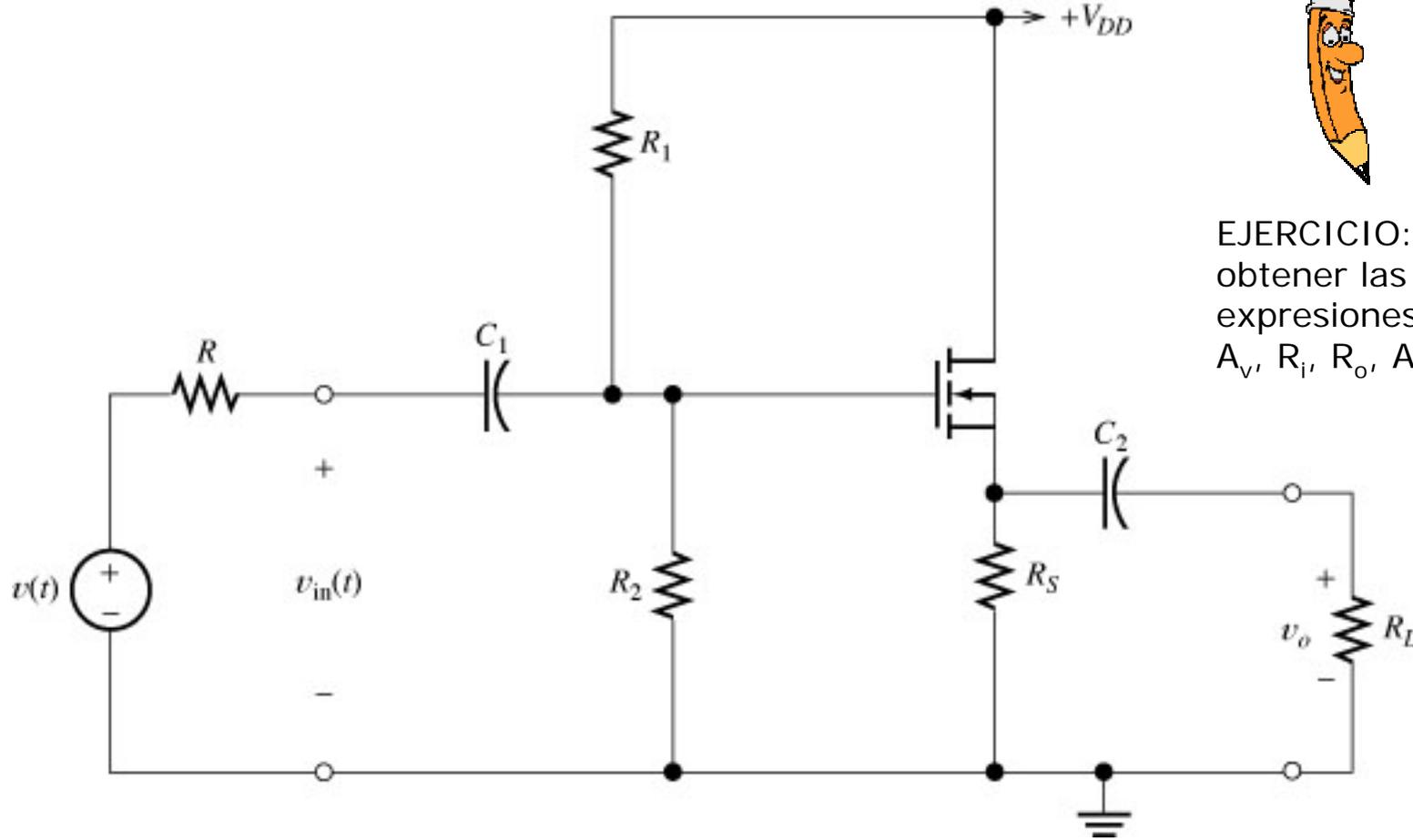
Circuito equivalente en pequeña señal para el amplificador en fuente común



Circuito utilizado para calcular R_o

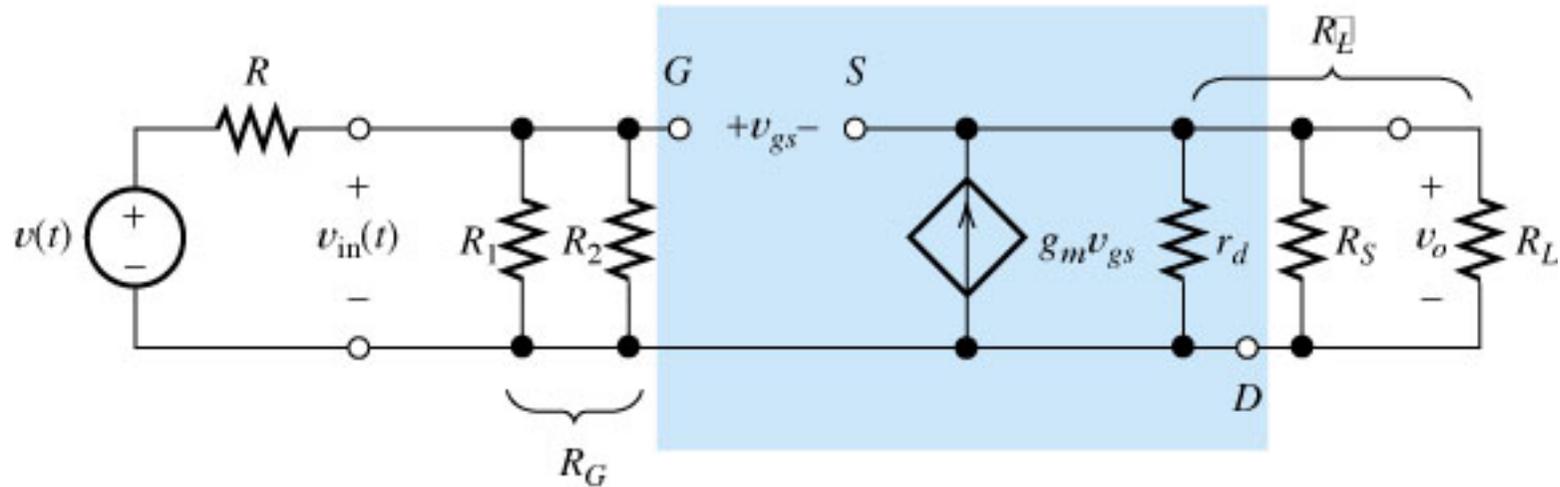


2.5. SEGUIDOR DE FUENTE (con circuito de autopolarización)

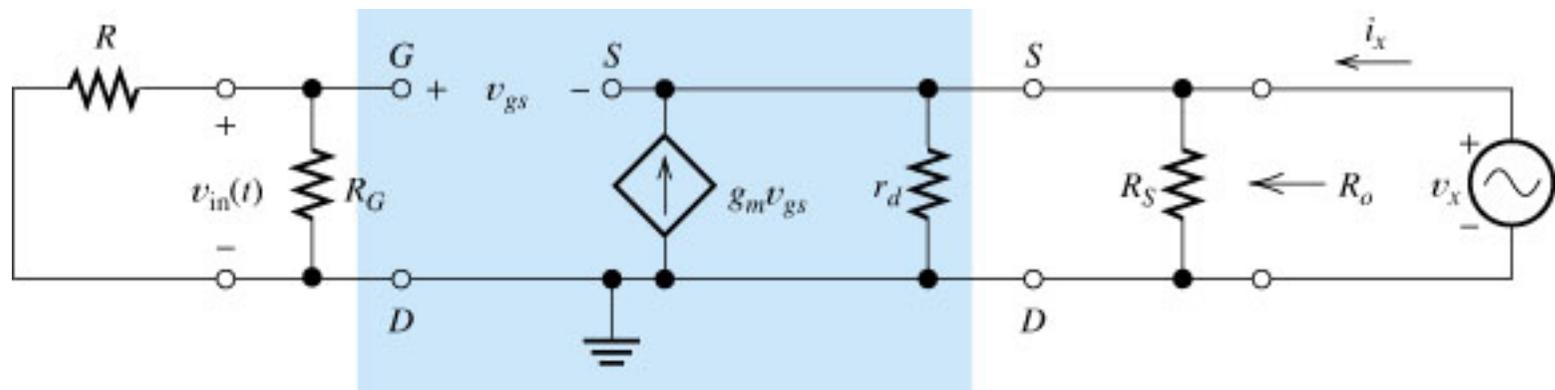


EJERCICIO:
obtener las
expresiones de
 A_v , R_i , R_o , A_{v_i} , A_{v_s} .

Circuito equivalente en pequeña señal alterna para el seguidor de fuente.



Circuito equivalente utilizado para hallar la resistencia de salida del seguidor de fuente.



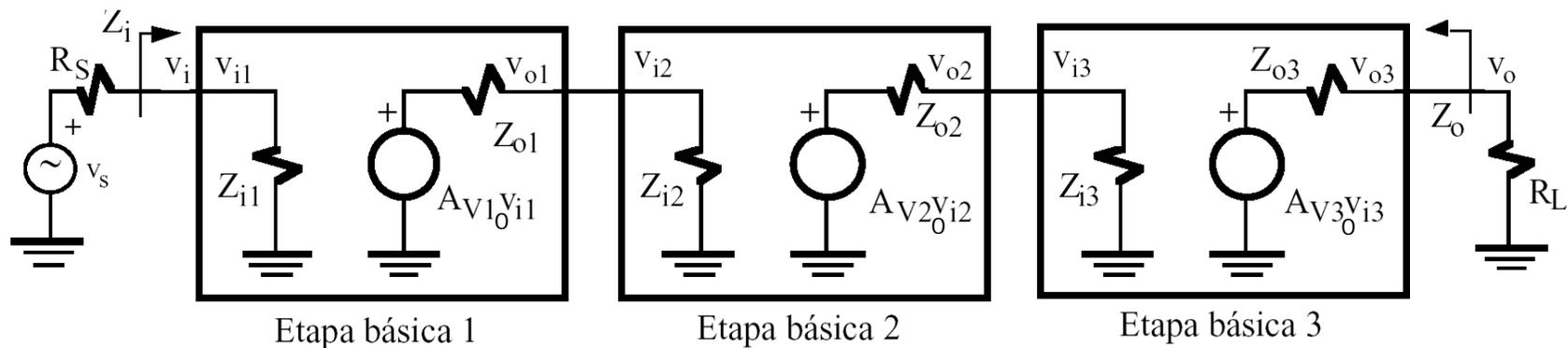
3. AMPLIFICADORES DE VARIAS ETAPAS

En aplicaciones reales se hace necesario el acoplamiento de varias etapas:

- Para obtener una amplificación mayor.
- Para una correcta adaptación de impedancias si la impedancia de entrada o salida de una sola etapa no es la adecuada

De forma general:

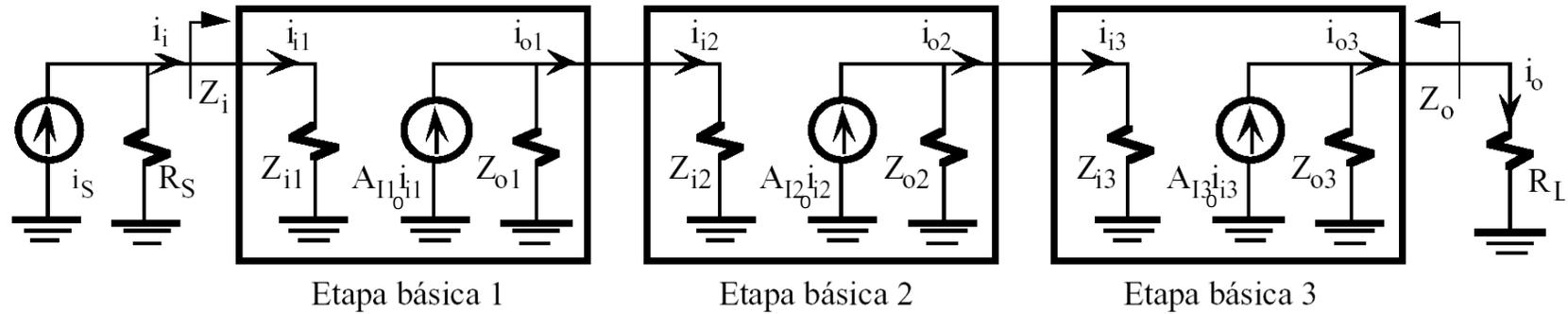
AMPLIFICADOR MULTIETAPA UTILIZANDO MODELOS EQUIVALENTES DE TENSIÓN



$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{o1}}{v_i} \frac{v_{o2}}{v_{i2}} \frac{v_o}{v_{i3}} = \frac{Z_{i2}}{Z_{i2} + Z_{o1}} A_{V1} \frac{Z_{i3}}{Z_{i3} + Z_{o2}} A_{V2} \frac{R_L}{R_L + Z_{o3}} A_{V3}$$

$$A_{V_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{Z_{i1}}{Z_{i1} + R_S} A_V$$

AMPLIFICADOR MULTIETAPA UTILIZANDO MODELOS EQUIVALENTES DE CORRIENTE



$$A_I = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_{o1}}{i_i} \frac{i_{o2}}{i_{i2}} \frac{i_o}{i_{i3}} = \frac{Z_{o1}}{Z_{i2} + Z_{o1}} A_{I1} \frac{Z_{o2}}{Z_{i3} + Z_{o2}} A_{I2} \frac{Z_{o3}}{R_L + Z_{o3}} A_{I3}$$

$$A_{I_s} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{R_S}{Z_{i1} + R_S} A_I$$

3.1. OPTIMIZACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE CONFIGURACIONES

Los montajes pueden ser en EC, BC, CC o combinación.

En general, al acoplar varias etapas se busca un **aumento** en la **ganancia de tensión**.

En una cadena amplificadora se distinguen:

- Etapa de entrada
- Etapas intermedias
- Etapa de salida

(1) ETAPAS INTERMEDIAS

- No se utiliza una configuración en CC porque $A_v < 1$.
- No se utiliza una configuración en BC porque A_v de varias etapas de este tipo acopladas es menor que la última:

$$A_v = A_i \cdot \frac{R_L}{R_i} \cong \frac{R_L}{R_i} < 1 \text{ si } R_i = R_{i+1} \text{ ya que } R_L = R_C // R_i$$

- Por el contrario, en una etapa en EC:

$$|A_v| = h_{fe} \cdot \frac{R_L}{R_i} > 1 \text{ porque } h_{fe} \gg 1$$



En un amplificador de varias etapas las intermedias utilizan configuraciones en EC

(2) ETAPA DE ENTRADA

Su elección se realiza en función del generador conectado a la entrada:

- Si el **generador es de tensión:** 

(necesaria Z_i alta)

Entrada en CC

Montaje con FET (DC, FC)

- Si el **generador es de corriente:** 

(necesaria Z_i baja)

Entrada en BC

(3) ETAPA DE SALIDA

Se selecciona en función de la impedancia de carga

- Si R_L *baja impedancia*, e información codificada en forma de *tensión*: 

(necesaria Z_o baja)

Salida en CC

- Si R_L *alta impedancia*, e información codificada en forma de *corriente*: 

(necesaria Z_o alta)

Salida en BC

4. ANÁLISIS EN PEQUEÑA SEÑAL

OBSERVACIONES

1 - DIBUJO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE EN PEQUEÑA SEÑAL

1. Sustituir **fuentes de tensión continua** por cortocircuitos.
2. Sustituir **fuentes de corriente continua** por circuitos abiertos.
3. Sustituir **condensadores de acoplo y de desacoplo** por cortocircuitos cuando se desee un **análisis a frecuencias medias**.

Nota: Para hallar expresiones para la *ganancia* o la *impedancia en función de la frecuencia*, o hacer un *análisis en régimen transitorio*, deberían incluirse los condensadores en el circuito equivalente.

4. Sustituir **transistor** por circuito equivalente.
5. Si circuito tiene varios transistores, se utilizarán *subíndices* para distinguir las corrientes y los parámetros de los diferentes transistores.



- **Vale la pena prestar atención al dibujar el circuito equivalente:**

Analizar un circuito equivalente incorrecto es una pérdida de tiempo y de esfuerzo.

COMPROBAR BIEN EL CIRCUITO EQUIVALENTE ANTES DE ESCRIBIR LAS ECUACIONES ¡!

- *Puede que resulte conveniente dividir en varios pasos el dibujo de los circuitos equivalentes en pequeña señal.*

En primer lugar, se hacen los cambios necesarios y después, si se quiere, se vuelve a dibujar el circuito para simplificar el trazado.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE INTERÉS DEL CIRCUITO

Una vez finalizado el circuito equivalente en pequeña señal, trataremos de *hallar expresiones para las ganancias e impedancias que sean de interés.*

En primer lugar, ***identificaremos las corrientes y tensiones pertinentes y las señalaremos en el circuito equivalente.***

Ejemplo:

- Para hallar la ganancia de tensión, las variables pertinentes son la tensión de entrada v_i y la tensión de salida v_o .
- Para la impedancia de entrada, lo que nos interesa son v_i y la corriente de entrada i_i .

3. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE SALIDA

La resistencia de salida es la resistencia de Thevenin del amplificador. Para hallar la resistencia de salida:

- **Quitamos la carga**
- Ponemos a **cero** el valor de las **fuentes de señal independientes** (sustituir las *fuentes de tensión* por *cortocircuitos*, y las *fuentes de corriente* por *circuitos abiertos*). **Las fuentes dependientes, como la fuente controlada de corriente del transistor equivalente, no se ponen a cero.**
- Miramos **desde los terminales de salida** para hallar la **resistencia**.
- A menudo es conveniente agregar una fuente de tensión de prueba V_x a los terminales de salida para hallar la resistencia de salida del seguidor de emisor. La resistencia de salida viene dada por la relación entre V_x e i_x .

4. ESCRITURA DE LAS ECUACIONES DEL CIRCUITO

Tras dibujar el circuito equivalente en pequeña señal e identificar las variables de tensión o corriente pertinentes, utilizamos el **análisis de circuitos** para escribir las ecuaciones.

- *A menudo es necesario incluir corrientes o tensiones adicionales en las ecuaciones.*

Ejemplo:

Para hallar la resistencia de salida del seguidor de emisor, queríamos calcular la relación entre V_x e i_x pero al escribir las ecuaciones, incluimos una corriente adicional i_b .

- Tras escribir el conjunto de ecuaciones de circuito adecuadas, despejaremos para eliminar las corrientes y tensiones no deseadas, hasta que tengamos una ecuación que relacione las dos variables de interés.



Si el circuito es bastante complejo, es una buena idea asegurarse de que se ha escrito un conjunto de ecuaciones correcto antes de eliminar las variables que no se desean:

- Supongamos que contamos las variables no deseadas, y llamamos a ese número N . Como necesitamos una ecuación para eliminar cada una de las variables no deseadas, y como necesitamos dar con una ecuación que relacione las dos variables de interés, necesitaremos un total de $N + 1$ ecuaciones independientes.
- ***Hay que asegurarse de que las ecuaciones no son dependientes:*** a veces puede que escribamos la misma ecuación de diferente manera sin darnos cuenta.

5. CALCULO Y COMPROBACIÓN DE LA EXPRESIÓN BUSCADA

Una vez que hemos escrito un numero suficiente de ecuaciones independientes, se utilizan *técnicas algebraicas simples para eliminar las variables de circuito no deseadas* y hallar la expresión buscada.

Si, en este proceso, la sustitución da lugar a la cancelación de todos los términos (con lo que nos quedaría $0 = 0$), es que hemos escrito *ecuaciones dependientes* y hemos de volver a escribir ecuaciones adicionales.

6. COMPROBACIÓN DE LAS UNIDADES

Tras haber hallado una *expresión para la ganancia o la impedancia*, es buena idea **comprobar si las unidades de la expresión hallada son las correctas**:

- Ganancia de tensión o corriente: no debería tener unidades.
- Impedancia de entrada o salida: debería estar en ohmios.

En el caso de que las unidades no fueran las que esperábamos, deberíamos buscar algún error al escribir la ecuación original o algún error algebraico.



EL ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DE PEQUEÑA SEÑAL NO ES TAN PROBLEMÁTICO COMO PARECE EN ESTA EXPLICACIÓN.

SE HAN INTENTADO MENCIONAR TODOS LOS PROBLEMAS QUE SE ENCUENTRAN COMÚNMENTE CON ESTA TÉCNICA, PARA QUE NO DESPERDICIEIS MUCHO TIEMPO SI TROPEZAIS CON ELLOS.