

Tema 7:

“El TBJ en alterna - Modelo para pequeña señal

Cálculo de Ganancias e Impedancias

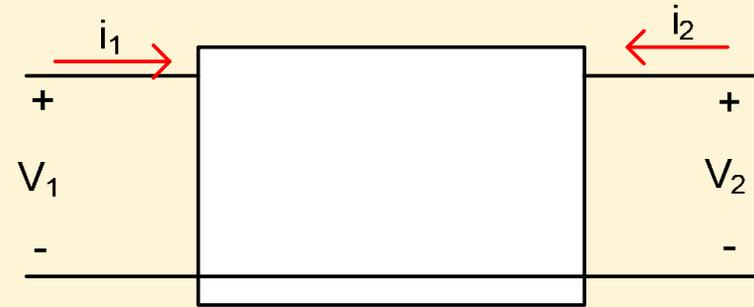
4º Parte

- Las ecuaciones desarrolladas hasta ahora en los diversos modelos (Ebers y Moll, PSPICE etc) representan al transistor bipolar en toda su generalidad y con cualquier tipo de polarización.
- Sin embargo su fuerte carácter no lineal hace que cualquier circuito que se pretenda analizar implique soluciones complicadas
- Pero, bajo adecuadas condiciones, el transistor puede ser modelado a través de un circuito lineal que incluye equivalentes Thévenin, Norton y principios de teoría de circuitos lineales.
- El análisis del comportamiento del transistor en amplificación se simplifica enormemente cuando se utiliza el llamado modelo de pequeña señal obtenido a partir del análisis del transistor a pequeñas variaciones de tensiones y corrientes en sus terminales.
- El ***modelo de pequeña señal del transistor*** es a veces llamado modelo incremental.
- **Los circuitos que se van a estudiar aquí son válidos a frecuencias medias y para pequeñas señales.**

INT. A TEORIA DE CUADRIPOLO LINEAL

TEMA 7

- Desde un punto de vista general, cualquier transistor puede verse, en pequeña señal, como un cuadripolo lineal, con una entrada y una salida respecto a un terminal común.
- Puede ser especificado a través de dos corrientes (i_1, i_2) y dos tensiones (v_1, v_2).
- En función de las dos posibles variables seleccionadas como independientes, ese circuito lineal puede ser caracterizado mediante cuatro tipo de parámetros ($\{Z\}, \{Y\}, \{H\}, \{G\}$), que en notación matricial, se expresan de la siguiente manera



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_i & Z_r \\ Z_f & Z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_i & Y_r \\ Y_f & Y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_i & g_r \\ g_f & g_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Parámetro	Independientes	Ecuaciones
<i>g</i>	Tensión de entrada Corriente de salida	$i_1 = g_i v_1 + g_r i_2$ $v_2 = g_f v_1 + g_o i_2$
<i>h (híbridos)</i>	Corriente de entrada Tensión de salida	$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2$ $i_2 = h_f i_1 + h_o v_2$
<i>z (impedancias)</i>	Corriente entrada Corriente salida	$v_1 = z_i i_1 + z_r i_2$ $v_2 = z_f i_1 + z_o i_2$
<i>y (admitancias)</i>	Tensión se entrada Tensión de salida	$i_1 = y_i v_1 + y_r v_2$ $i_2 = y_f v_1 + y_o v_2$

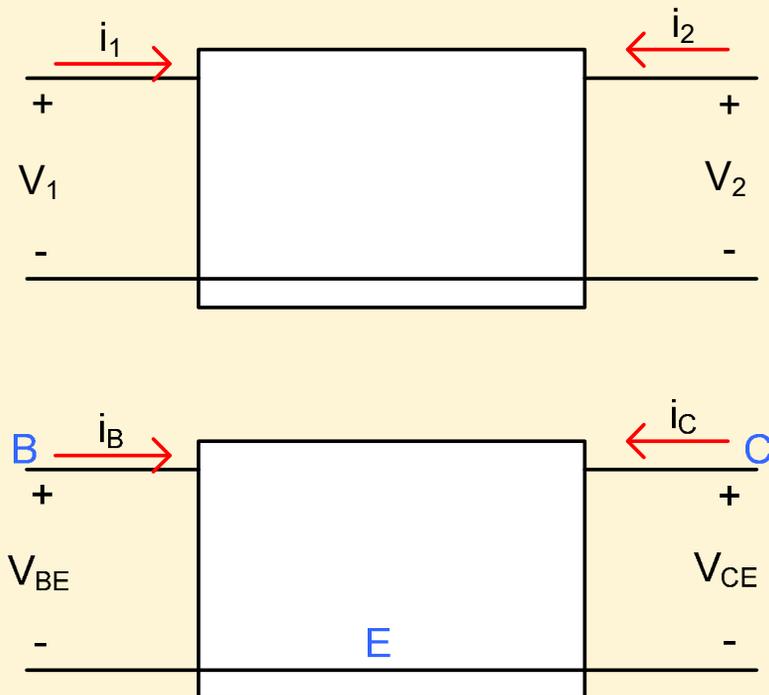
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Las cantidades ***h_i***, ***h_r***, ***h_f*** y ***h_o*** son llamados parámetros “h” o híbridos por que no son homogéneos dimensionalmente

También se les llama:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \iff \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Para una configuración en emisor común:



$$V_1 = v_{BE}$$

$$I_1 = i_B$$

$$V_2 = v_{CE}$$

$$I_2 = i_C$$

$$h_{11} = h_{ie}$$

$$h_{12} = h_{re}$$

$$h_{21} = h_{fe}$$

$$h_{22} = h_{oe}$$

La linealización de dispositivos no lineales de tres terminales, es un proceso de aproximación del modelo no lineal a un modelo lineal, truncando los correspondientes desarrollos en serie de Taylor a partir de los términos de 2º Orden

Aunque el proceso es válido para cualquier dispositivo de tres terminales, se va a particularizar para el transistor bipolar o TBJ

$$v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE}) = f_1(I_{BQ}, V_{CEQ}) + \frac{\partial}{\partial i_B} f_1(i_B, v_{CE}) \Big|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial}{\partial v_{CE}} f_1(i_B, v_{CE}) \Big|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} \cdot \Delta v_{CE} + \dots$$

$$i_C = f_2(i_B, v_{CE}) = f_2(I_{BQ}, V_{CEQ}) + \frac{\partial}{\partial i_B} f_2(i_B, v_{CE}) \Big|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} \cdot \Delta i_B + \frac{\partial}{\partial v_{CE}} f_2(i_B, v_{CE}) \Big|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} \cdot \Delta v_{CE} + \dots$$

Donde:

$$V_{BEQ} = f_1(I_{BQ}, V_{CEQ}) \quad v_{be} = v_{BE} - V_{BEQ}$$

$$I_{CQ} = f_2(I_{BQ}, V_{CEQ}) \quad i_c = i_C - I_{CQ}$$

Llamando:

$$\left. \frac{\partial}{\partial i_B} f_1(i_B, v_{CE}) \right|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} = h_{ie}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial v_{CE}} f_1(i_B, v_{CE}) \right|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} = h_{re}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial i_B} f_2(i_B, v_{CE}) \right|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} = h_{fe}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial v_{CE}} f_2(i_B, v_{CE}) \right|_{I_{BQ}, V_{CEQ}} = h_{oe}$$

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{aligned}$$

**Donde los h_{xe} son los denominados:
Parámetros incrementales híbridos o parámetros h referidos
a emisor común**

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

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

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} \qquad h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} \qquad h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

De estas ecuaciones lineales, se puede deducir el circuito incremental equivalente:

INT. A TEORIA DE CUADRIPOLO LINEAL

TEMA 7

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

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

$$h_{ie} = h_{11} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

$$h_{12} = h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

$$h_{21} = h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

$$h_{22} = h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

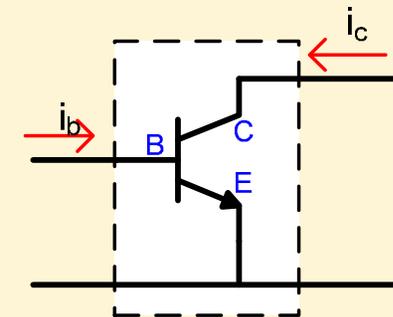
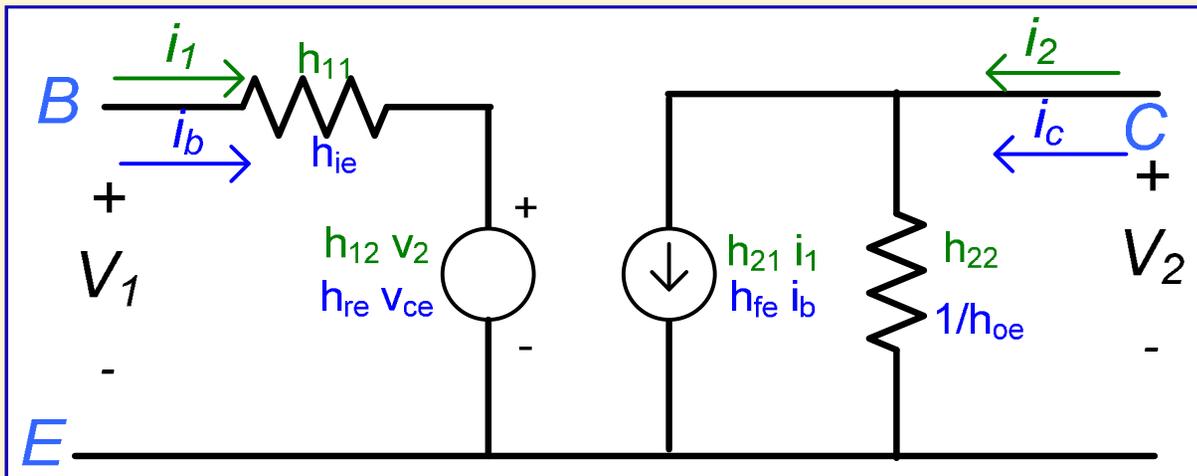
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

i = entrada

o = salida

f = transferencia directa

r = transferencia inversa



➤ ANÁLISIS DEL CIRCUITO DE POLARIZACIÓN:

- 1º) Anular “las fuentes de señal”; dejar las fuentes de polarización de continua, ya sea de tensión o de corriente
- 2º) Sustituir los condensadores por circuitos abiertos, y las inductancias por cortocircuitos (salvo su resistencia interna).
- 3º) Utilizar el modelo para DC del transistor
- 4º) Hallar el punto de operación de cada transistor, utilizando las ecuaciones de polarización, y el modelo del transistor de DC en la R.A.D.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

➤ MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL:

5º) De ser necesario, con los datos del punto de operación de cada transistor, así como de las características suministradas por los fabricantes, calcular los parámetros incrementales de los transistores.

➤ ANÁLISIS EN PEQUEÑA SEÑAL (SEÑAL INCREMENTAL)

6º) Anular las fuentes de polarización (fuentes ideales de tensión constantes: cortocircuitos, fuentes ideales de corriente constante: circuito abierto).

En el caso de no ser ideales habrá que considerar su correspondientes resistencias equivalentes en alterna.

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

➤ ANÁLISIS EN PEQUEÑA SEÑAL (SEÑAL INCREMENTAL)

7º) Sustituir los condensadores de acople y desacople por cortocircuitos, (si se han diseñado para ello)

8º) Sustituir los transistores por su modelo de pequeña señal, o sea dibujar el modelo incremental.

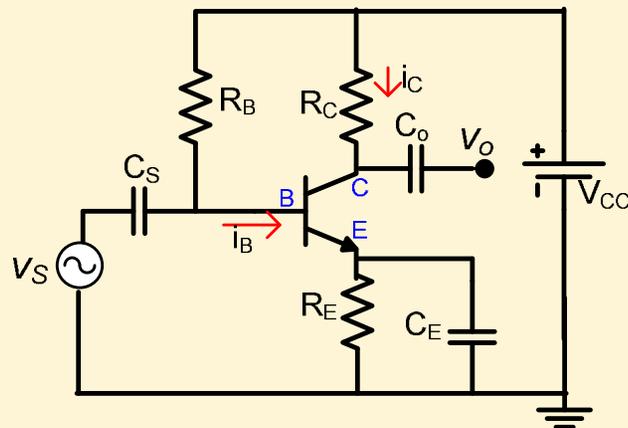
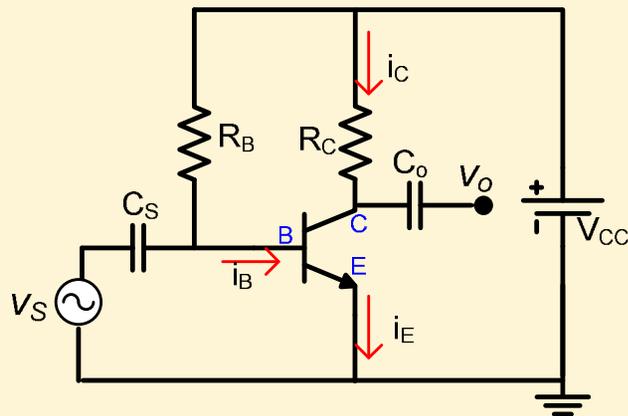
9º) Aplicar la señal de entrada , y analizar su respuesta en la salida. Evaluando en cada caso lo que interese:

- Ganancia en tensión
- Ganancia en corriente
- Ganancia en potencia
- Impedancias de entrada
- Impedancia de salida

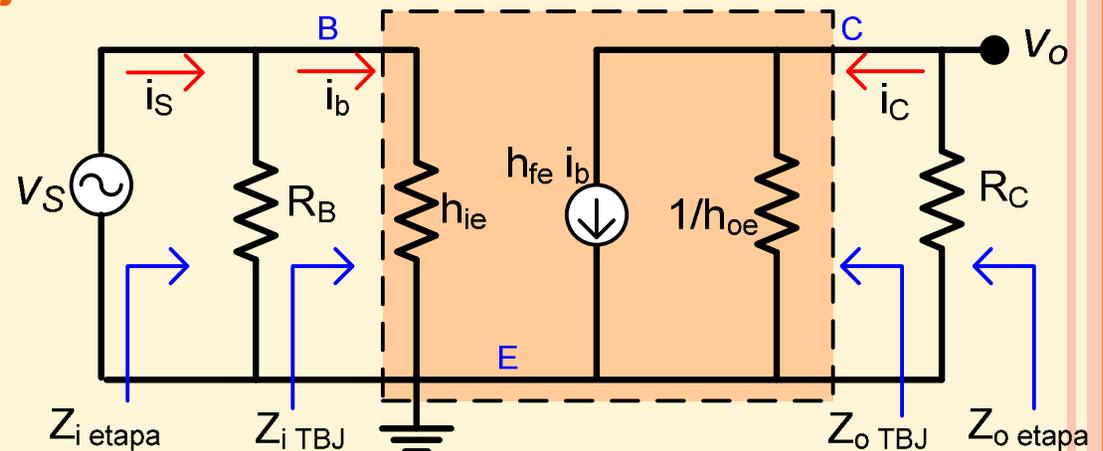
ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

Configuración Amplificador con Emisor Común

1.- Circuito con polarización fija



Modelo incremental



Cálculo de la Ganancia de Tensión

$$A_V = \frac{v_o}{v_s} \quad v_s = i_b h_{ie} \quad v_o = -i_b h_{fe} \frac{r_{oe}}{R_C + r_{oe}} R_C$$

$$\text{Si } R_C \ll r_{oe} \Rightarrow A_V \cong -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

Cálculo de la Ganancia de Corriente

$$A_i = \frac{i_o}{i_s}$$

Si $R_B \gg h_{ie} \Rightarrow i_s = i_b$

Si $R_C \ll r_{oe} \Rightarrow i_o = i_b h_{fe}$

$$A_i \cong h_{fe}$$

Cálculo de la Impedancia de Entrada del TBJ

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

$$i_s = i_b$$

$$Z_{inTBJ} = \frac{v_S}{i_b} = h_{ie}$$

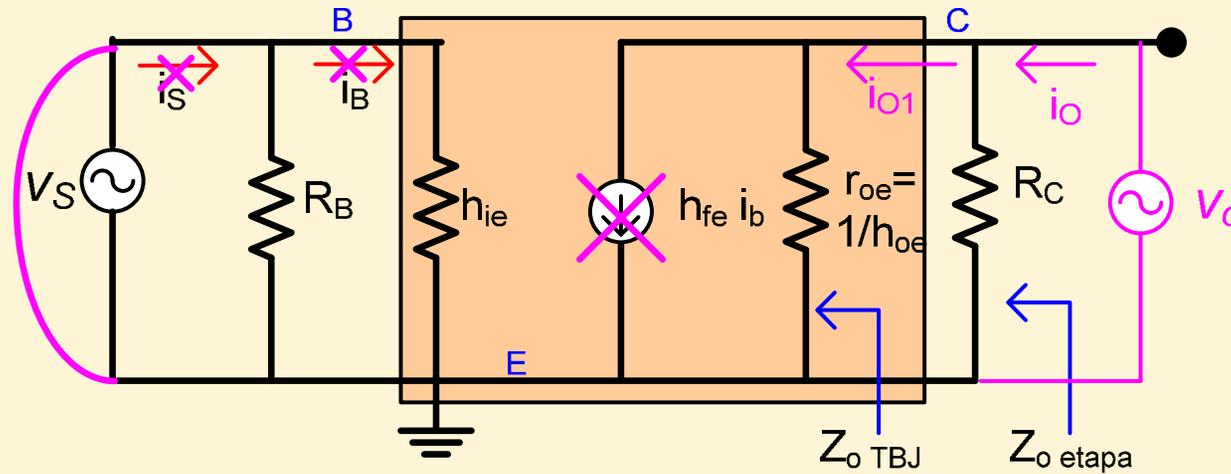
Cálculo de la Impedancia de Entrada de la etapa

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_B} + \frac{v_S}{h_{ie}} = v_S \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{ie}} \right)$$

$$Z_{in} = \frac{R_B h_{ie}}{R_B + h_{ie}} = R_B // h_{ie} \cong h_{ie}$$

Cálculo de la Impedancia de salida



$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$v_o = i_o \frac{r_{oe} R_C}{r_{oe} + R_C}$$

$$\Rightarrow Z_{out} = \frac{r_{oe} R_C}{r_{oe} + R_C} \cong R_C$$

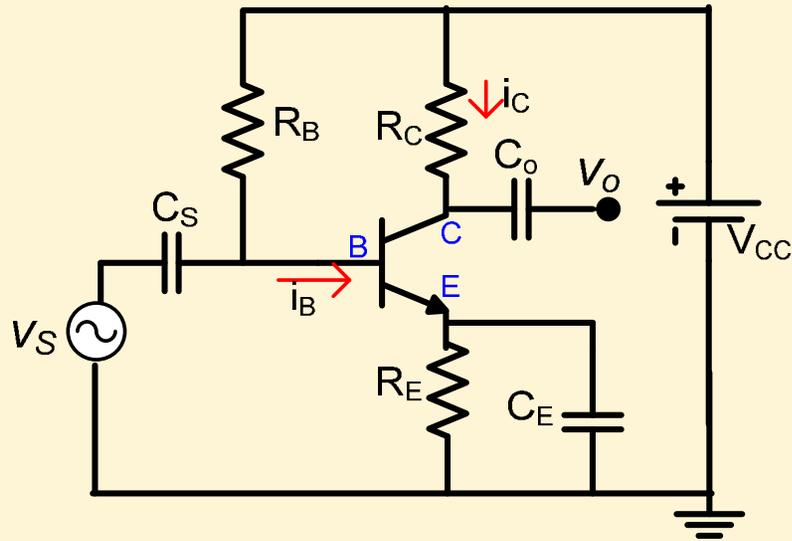
$$Z_{o\ TBJ} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$v_o = i_o r_{oe}$$

$$\Rightarrow Z_{o\ TBJ} = r_{oe}$$

DIMENSIONAMIENTO DE LOS CAPACITORES DE LA ETAPA

TEMA 7



$$X_{C_S} = \frac{1}{\omega C_S} \ll R_{in}$$

$$X_{C_E} = \frac{1}{\omega C_E} \ll R_E$$

$$X_{C_O} = \frac{1}{\omega C_O} \ll R_L$$

- C_S es un condensador de acople de la señal alterna de entrada a la base del transistor
- C_E es un condensador de desacople de la componente alterna, para conseguir más ganancia
- C_O es un condensador de acople de la señal variable de salida a la carga

DIMENSIONAMIENTO DE LOS CAPACITORES DE LA ETAPA

TEMA 7

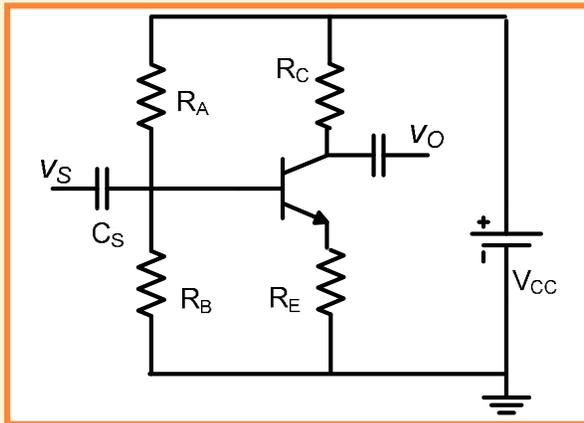
- Al ser las capacidades circuitos abiertos para la componente continua, los puntos de operación no se ven afectados.
- Normalmente las capacidades se diseñan para que a las frecuencias de trabajo se puedan considerar cortocircuitos.
- El procedimiento de análisis y diseño de las mismas es sencillo, aplicado análisis frecuencial en módulo y argumento

El mayor inconveniente del empleo de capacidades es que la frecuencia inferior de corte está limitada por el valor de la capacidad.

En caso de procesamiento de señales de muy baja frecuencia o que varíen muy lentamente (señales biológicas) no se pueden emplear.

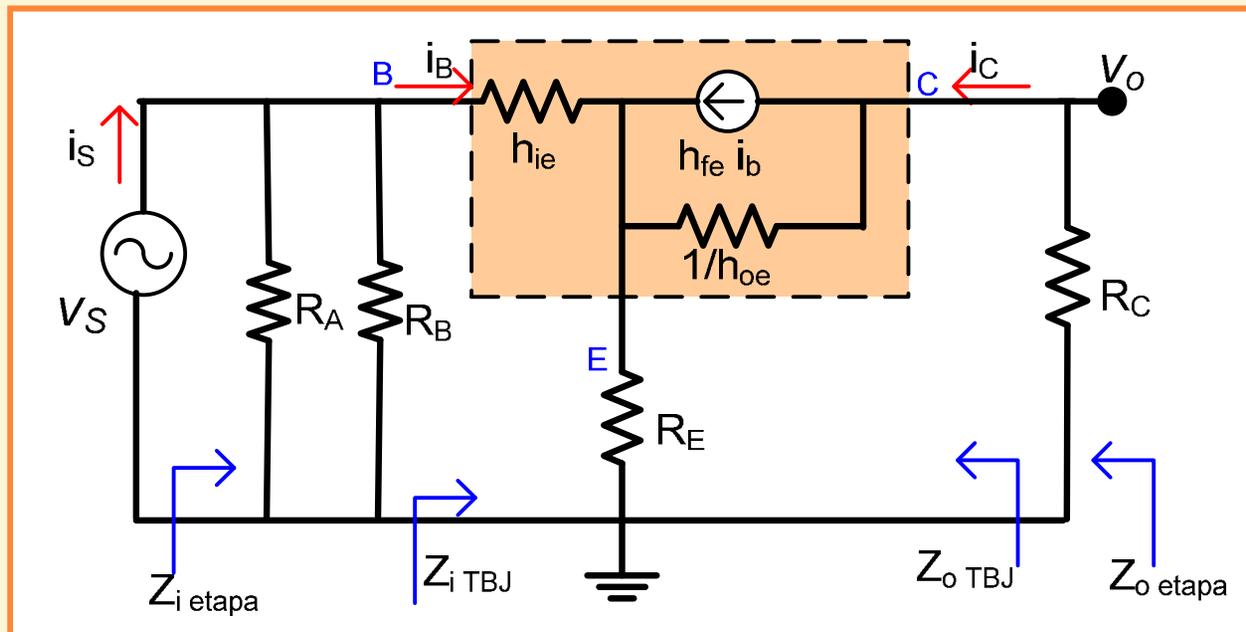
ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7



2.- Configuración con polarización independiente de β

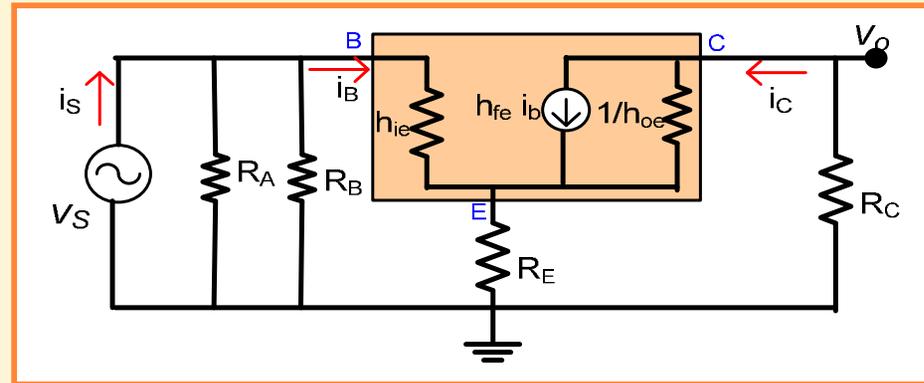
Modelo incremental



ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

2.- Configuración con polarización independiente de β TEMA 7

Cálculo de la Ganancia de Tensión



$$A_V = \frac{v_O}{v_s}$$

$$v_s = i_b h_{ie} + i_e R_E = i_b h_{ie} + i_b (1 + h_{fe}) R_E = i_b \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right]$$

$$v_o = -i_b h_{fe} R_C$$

$$A_V = - \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

2.- Configuración con polarización independiente de β

TEMA 7

Cálculo de la Ganancia de Tensión

$$\text{Si } R_C \ll r_{oe} \Rightarrow A_V \cong -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (1 + \beta) R_E}$$

$$\text{Si } \beta \geq 100 \Rightarrow A_V \cong -\frac{R_C}{R_E}$$

Cálculo de la Ganancia de Corriente de la etapa

$$A_i = \frac{i_O}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_A // R_B} + i_b \quad \text{con} \quad i_b = \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

$$\therefore i_s = \left[\frac{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}{R_A // R_B} + 1 \right] i_b$$

$$\text{Si } R_C \ll r_{oe} \Rightarrow i_o = i_b h_{fe}$$

$$A_i \cong \frac{h_{fe}}{\frac{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}{R_A // R_B} + 1} \leq h_{fe}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

2.- Configuración con polarización independiente de β

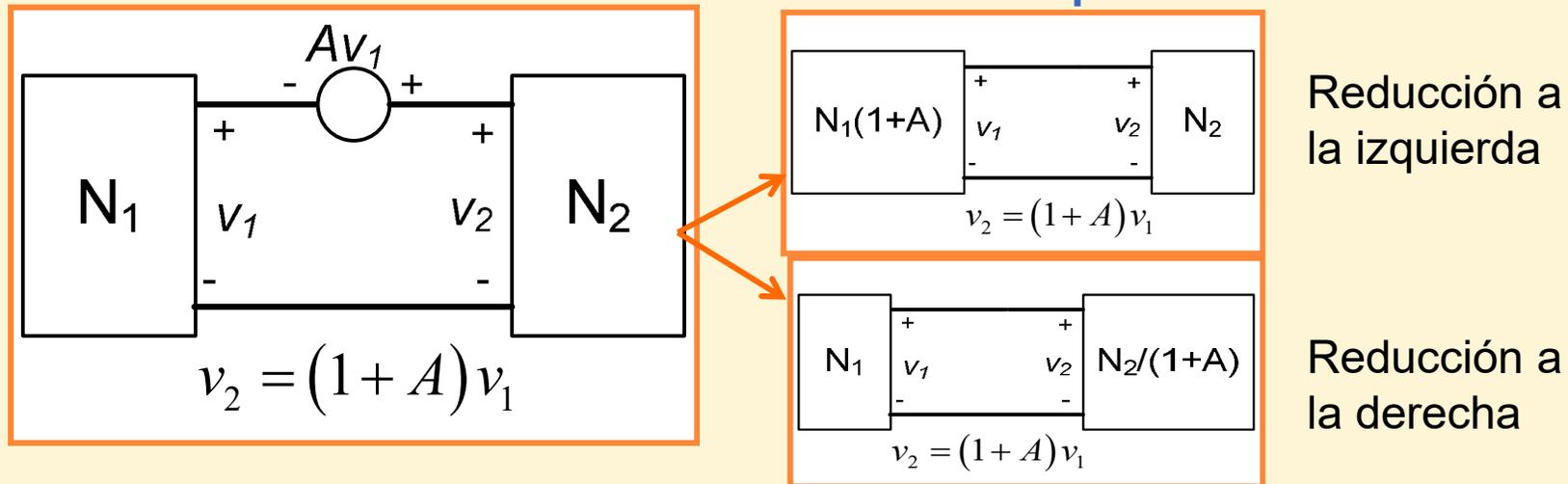
TEMA 7

Cálculo de la Ganancia de Corriente

$$A_i \cong \frac{h_{fe}}{\frac{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}{R_A // R_B} + 1} \approx \frac{(R_A // R_B) \cdot h_{fe}}{h_{ie} + h_{fe}R_E + (R_A // R_B)}$$

$$A_i \cong \frac{(R_A // R_B) \cdot h_{fe}}{h_{fe}R_E + (R_A // R_B)} \leq 1$$

1.- Fuente de tensión controlada por tensión

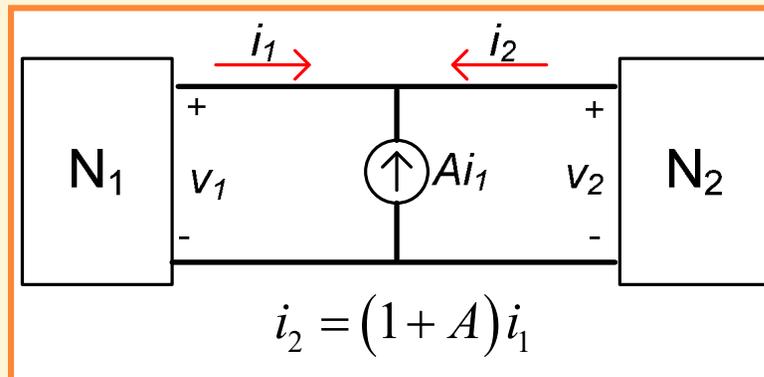


Mediante el Teorema de reducción, se podrá reemplazará el generador controlado Av_1 por un cortocircuito si y solo si se cumple una de las siguientes condiciones:

1. Se **multiplicará** el valor de todas las resistencias, inductancias y fuentes de tensión por el factor $(1+A)$ en la red N_1 (reducción hacia la izquierda)
2. Se **dividirán** el valor de todas las resistencias, inductancias y fuentes de tensión por el factor $(1+A)$ en la red N_2 (reducción hacia la derecha)

Al hacer alguna de estas reducciones, se logra hacer desaparecer la fuente de tensión controlada por tensión manteniendo las corrientes constantes.

2.- Fuente de corriente controlada por corriente



Mediante el Teorema de reducción, se podrá reemplazará el generador controlado Ai_1 por un circuito abierto si y solo si se cumple una de las siguientes condiciones:

1. Se multiplicará el valor de todas las resistencias, inductancias de la red N2 por el factor $(1+A)$ (**reducción hacia la derecha**) y se dividirá las fuentes de corriente de N2 por $(1+A)$
2. Se dividirá el valor de todas las resistencias, inductancias de la red N1 por el factor $(1+A)$ (**reducción hacia la izquierda**) y se multiplicará las fuentes de corriente de la red N1 por el factor $(1+A)$

Al hacer alguna de estas reducciones, se logra hacer desaparecer la fuente de corriente controlada por corriente manteniendo las tensiones constantes

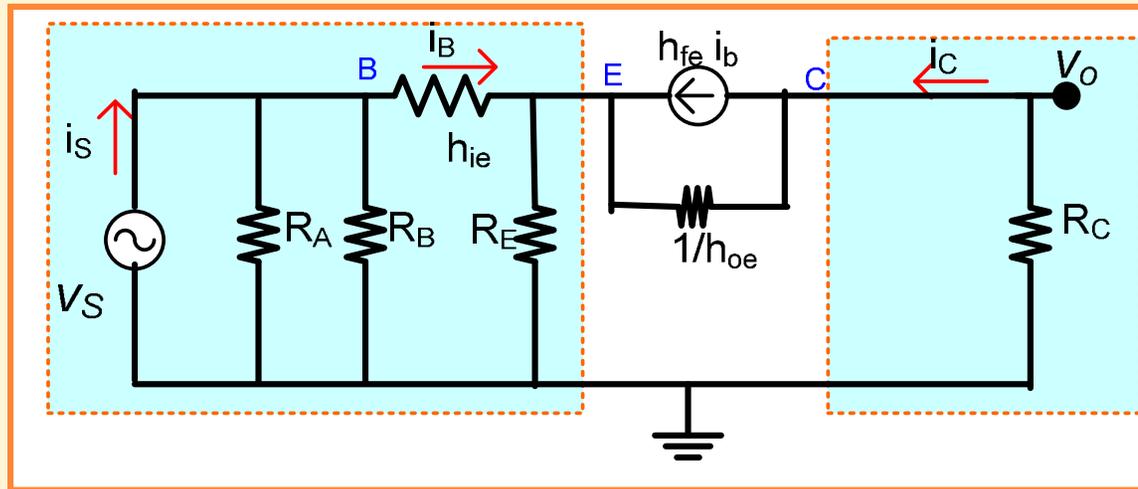
RESTRICCIONES DEL TEOREMA DE REDUCCIÓN:

Para poder aplicar el teorema de reducción, se debe cumplir:

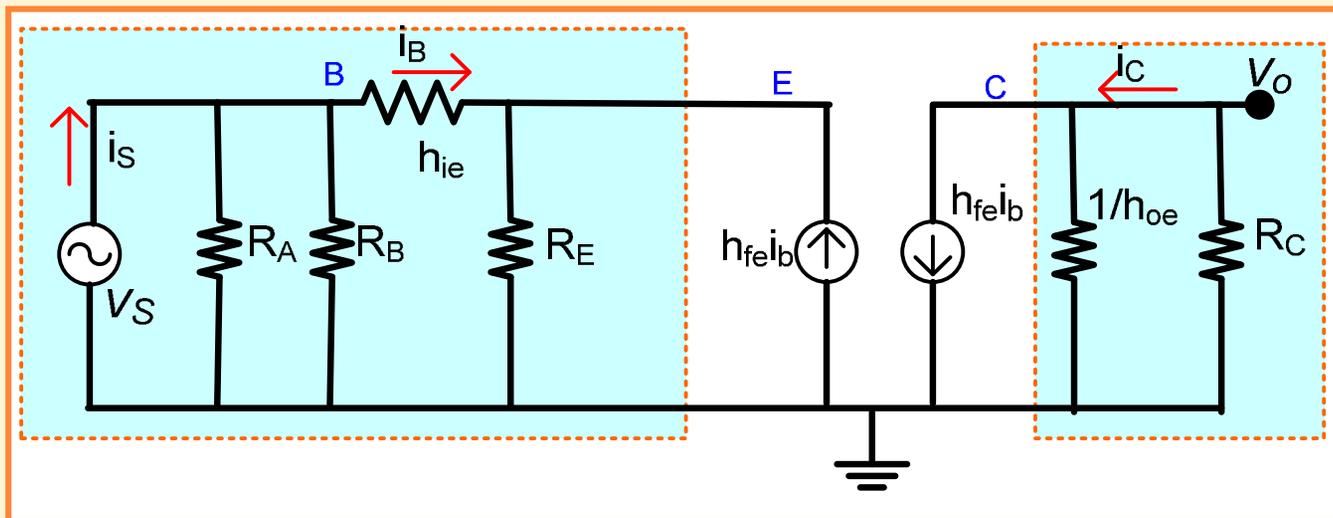
1. Las redes N1 y N2 son de un solo par de terminales, es decir que no debe entrar ni salir corriente de ellas por el otro extremo.
2. La tensión de salida de la red N1 debe ser exactamente la tensión de control de la fuente controlada para el caso 1 (caso 1)
3. La corriente de salida de la red N1 debe ser exactamente la corriente de control de la fuente controlada para el caso 2 (caso 2)
4. En el caso 1, los generadores de corriente, si los hubiera, NO se multiplican ni dividen por el factor $(1+A)$, si no que permanecen constantes cuando se hace la reducción.
5. En el caso 2, los generadores de tensión, si los hubiera, NO se multiplican ni dividen por el factor $(1+A)$, si no que permanecen constantes cuando se hace la reducción.
6. El valor de A es cualquier número real positivo o negativo.

CÁLCULO DE LA GANANCIA APLICANDO TEOREMA DE REDUCCIÓN

TEMA 7 2.- Configuración con polarización independiente de β

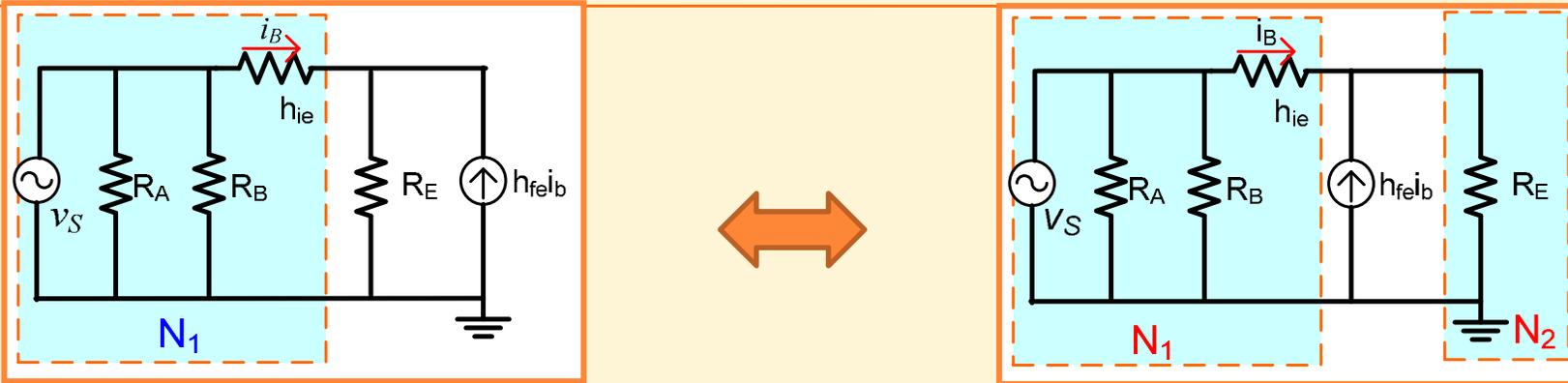


Si se desprecia r_{oe} , es equivalente a:



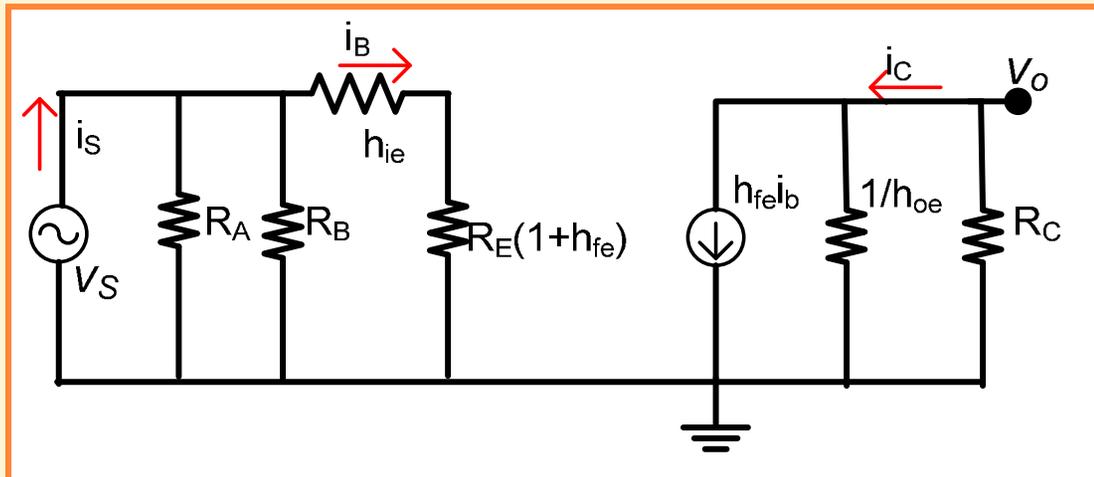
CÁLCULO DE LA GANANCIA APLICANDO TEOREMA DE REDUCCIÓN

TEMA 7 2.- Configuración con polarización independiente de β



Se puede aplicar el teorema de reducción de redes (reducción hacia la izquierda), el modelo queda:

Cálculo de la Ganancia de Tensión



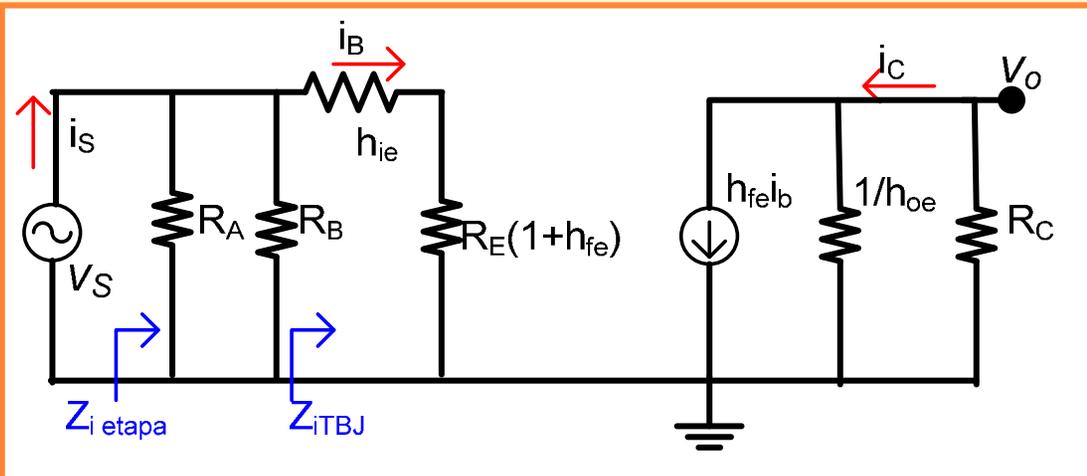
$$A_V = \frac{v_o}{v_S} \quad v_S = i_b \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right] \quad v_O = i_b h_{fe} \frac{r_{oe} R_C}{r_{oe} + R_C}$$

$$\text{Si } \beta \geq 100 \quad \wedge \quad r_{oe} \gg R_C \quad \Rightarrow \quad A_V \cong -\frac{R_C}{R_E}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7

2.- Configuración con polarización independiente de β



Cálculo de la Impedancia de Entrada de la etapa y del TBJ

$$Z_{iTBJ} = \frac{v_S}{i_b}$$

$$i_b = \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

$$\Rightarrow Z_{iTBJ} = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E$$

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_A // R_B} + \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

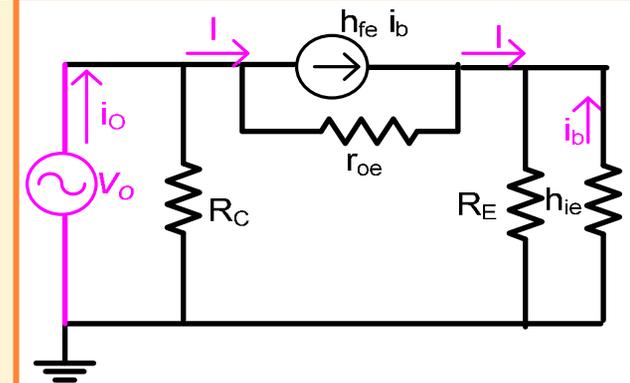
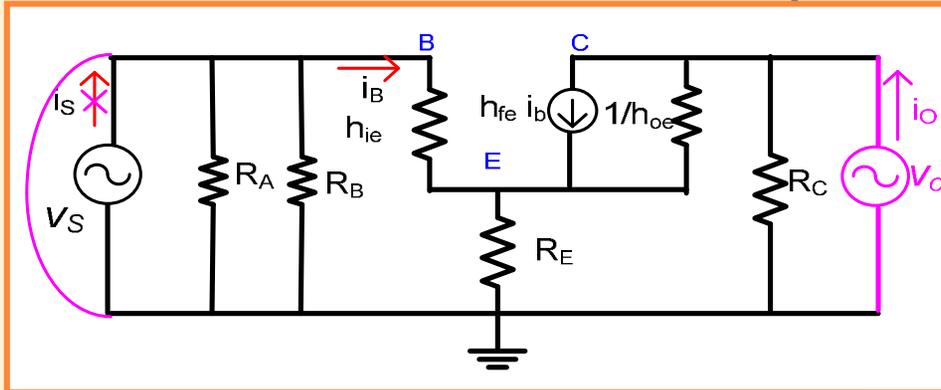
$$i_s = v_S \left(\frac{1}{R_A // R_B} + \frac{1}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E} \right)$$

$$\Rightarrow Z_{in} = R_A // R_B // [h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E]$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

2.- Configuración con polarización independiente de β TEMA 7

Cálculo de la Impedancia de salida



$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_C} + i$$

$$i = i_b + i_e$$

$$i_b h_{ie} = i_e R_E \Rightarrow i_e = i_b \frac{h_{ie}}{R_E}$$

$$i = h_{fe} \cdot i_b + i_{oe} = i_b + i_e$$

$$i_{oe} = \frac{v_o - i_b h_{ie}}{r_{oe}}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

2.- Configuración con polarización independiente de β

TEMA 7

$$h_{fe} \cdot i_b + \frac{v_o - i_b h_{ie}}{r_{oe}} = i_b \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_E} \right)$$

$$i_b = \frac{v_o}{r_{oe} \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_E} + \frac{h_{ie}}{r_{oe}} \right)}$$

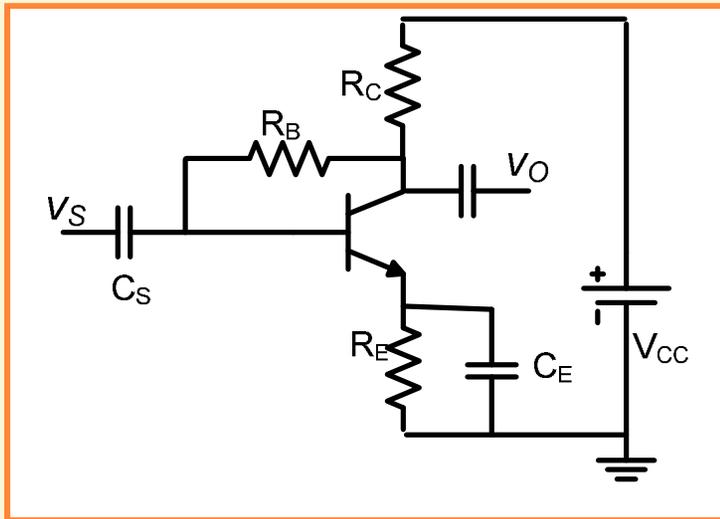
$$i_o = \frac{v_o}{R_C} + \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_E} \right) \frac{v_o}{r_{oe} \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_E} + \frac{h_{ie}}{r_{oe}} \right)}$$

$$Z_o = \frac{R_C \cdot r_{oe} \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_E} + \frac{h_{ie}}{r_{oe}} \right)}{r_{oe} \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_E} + \frac{h_{ie}}{r_{oe}} \right) + R_C \left(1 + \frac{h_{ie}}{R_E} \right)}$$

Cálculo de la Impedancia de salida

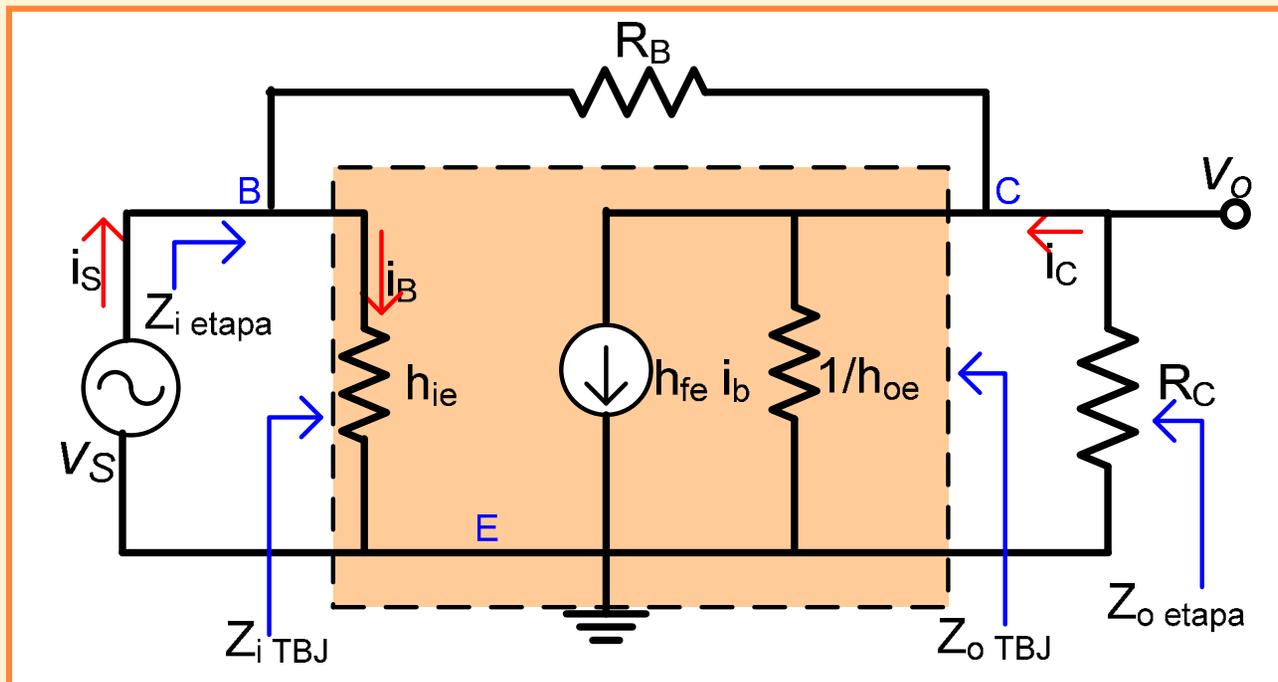
ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7



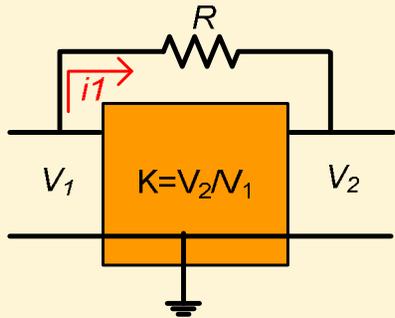
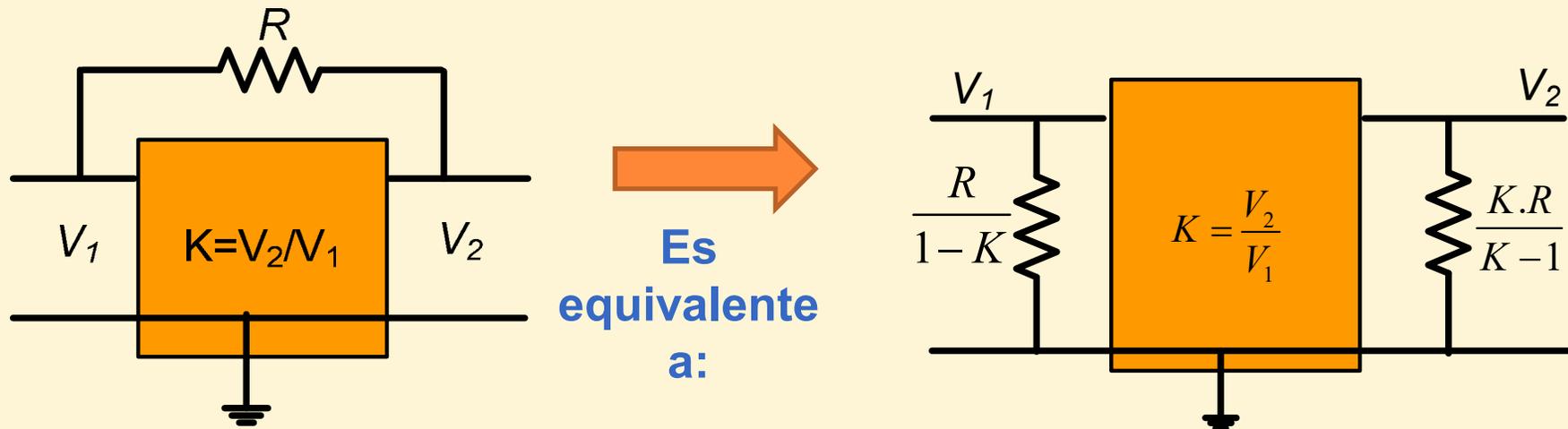
3.- Configuración con realimentación base-colector

Modelo incremental



APÉNDICE: TEOREMA DE MILLER

TEMA 3



$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_1(1-K)}{R} = \frac{V_1}{R/1-K} = \frac{V_1}{R_{M1}} \quad \text{con} \quad R_{M1} = R/1-K$$

$$i_2 = \frac{V_2 - V_1}{R} = \frac{V_2(1-1/K)}{R} = \frac{V_2(K-1)}{K.R} = \frac{V_2}{K.R/K-1} \quad \text{con} \quad R_{M2} = K.R/K-1$$

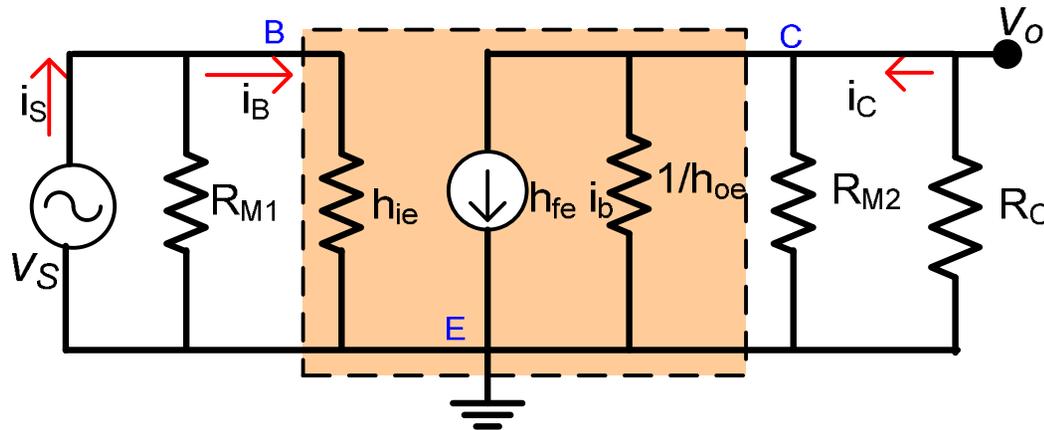
ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

3.- Configuración con realimentación base-colector

TEMA 7

Aplicando teorema de Miller:

Donde se cumple que:



$$K = \frac{v_o}{v_s} = A_v$$

$$R_{M1} = \frac{R_B}{1-K}$$

$$R_{M2} = \frac{K \cdot R_B}{K-1} \cong R_B \quad \text{Si } K \geq 10$$

$$\Rightarrow \text{Si } A_v \geq 10$$

Cálculo de la Ganancia de Tensión:

$$A_V = \frac{v_o}{v_s} \quad v_s = i_b h_{ie} \quad v_o = -i_b h_{fe} \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} \quad \text{si } r_{oe} \gg R_B \parallel R_C$$

$$\Rightarrow A_V = -\frac{R_B R_C}{R_B + R_C} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \cong -R_C \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \quad \text{si } R_B \gg R_C$$

Se calcula y se comprueba si se verifica el supuesto $A_v \geq 10$, para esto se debe cumplir:

$$R_C \cdot h_{fe} \geq 10 \cdot h_{ie}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

3.- Configuración con realimentación base-colector

TEMA 7

Ahora se puede calcular R_{M1}

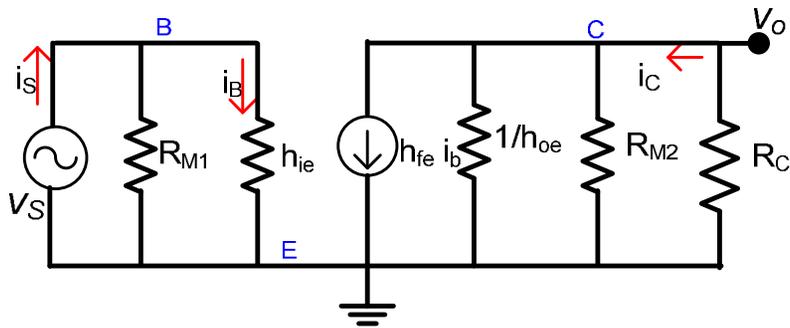
$$R_{M1} = \frac{R_B}{1 - A_v} = \frac{R_B}{1 + R_C \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}} \cong \frac{h_{ie} R_B}{h_{fe} R_C}$$

Cálculo de la Ganancia de corriente

$$A_{ITBJ} = \frac{i_o}{i_b} = \frac{i_b h_{fe}}{i_b} = h_{fe}$$

$$A_{I Etapa} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{v_o / R_C}{i_b + \frac{v_s}{R_{M1}}} = \frac{h_{fe} i_b (r_{oe} // R_{M2} // R_C)}{i_b + i_b \frac{h_{ie}}{R_{M1}}} \cdot \frac{1}{R_C}$$

$$A_{I Etapa} \cong \frac{h_{fe} (R_B // R_C)}{1 + \frac{h_{fe} R_C}{R_B}} \cdot \frac{1}{R_C} \cong \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe} \frac{R_C}{R_B}} \leq 1$$



ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7

3.- Configuración con realimentación base-colector

Cálculo de la Impedancia de entrada

$$Z_{i_{TBJ}} = \frac{v_S}{i_b}$$

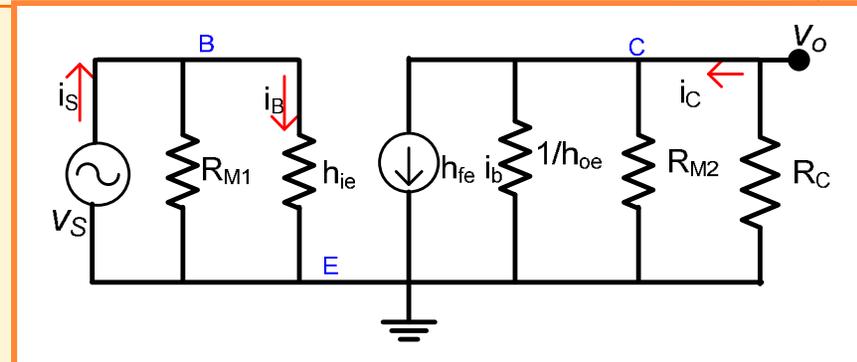
$$v_S = i_b \cdot h_{ie}$$

$$\Rightarrow Z_{i_{TBJ}} = h_{ie}$$

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_{M1}} + \frac{v_S}{h_{ie}}$$

$$\Rightarrow Z_{in} = R_{M1} // h_{ie}$$



Cálculo de la Impedancia de salida

$$Z_{o_{TBJ}} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$v_o = i_o r_{oe}$$

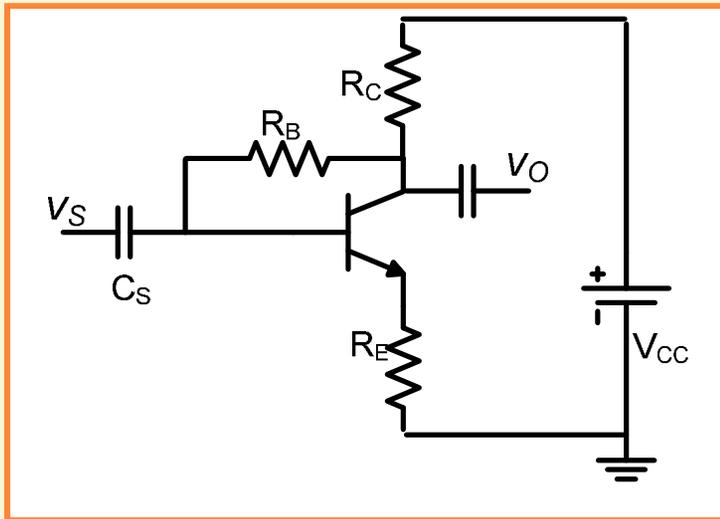
$$\Rightarrow Z_{o_{TBJ}} = r_{oe}$$

$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$Z_{out} = r_{oe} // R_B // R_C$$

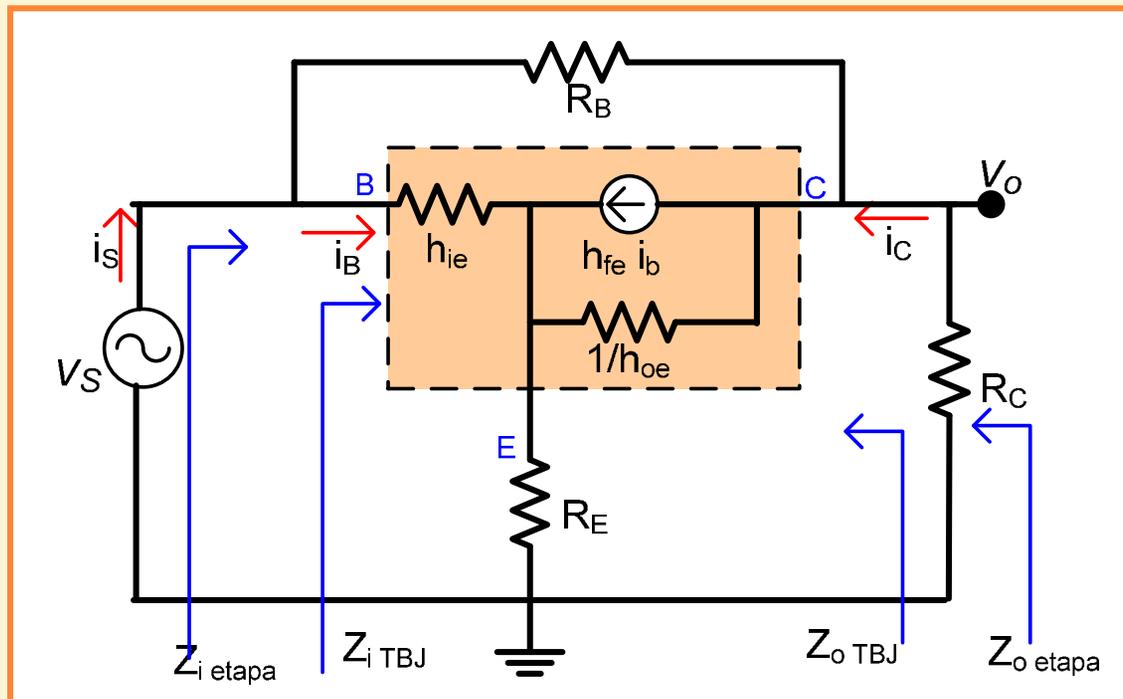
ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7



4.- Configuración con realimentación base-colector y resistencia de emisor

Modelo incremental

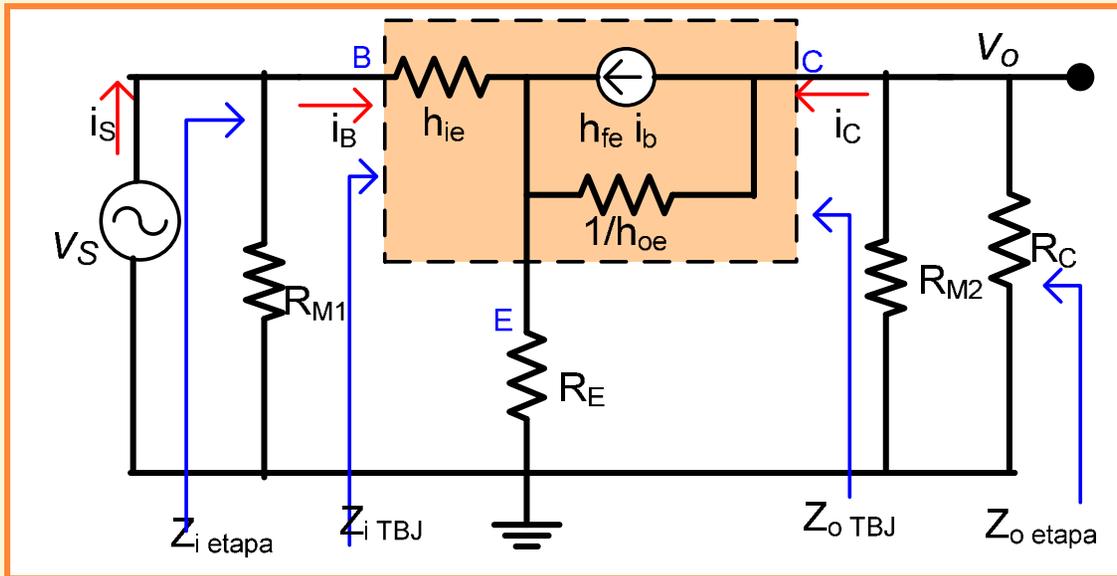


ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7

4.- Configuración con realimentación base-colector y resistencia de emisor

Modelo incremental

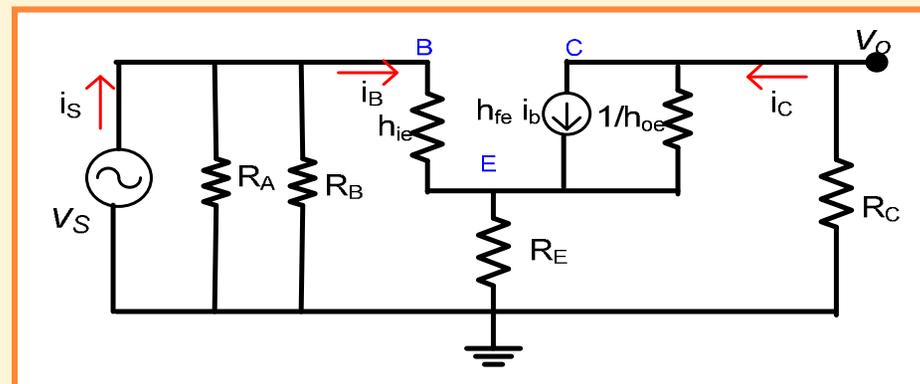


$$K = \frac{v_o}{v_i} = A_v$$

$$R_{M1} = \frac{R_B}{1 - A_v}$$

$$R_{M2} = \frac{A_v \cdot R_B}{A_v - 1} \cong R_B \quad \text{Si } A_v \geq 10$$

Modelo incremental del circuito con polarización independiente de β



ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

TEMA 7

4.- Configuración con realimentación base-colector y resistencia de emisor

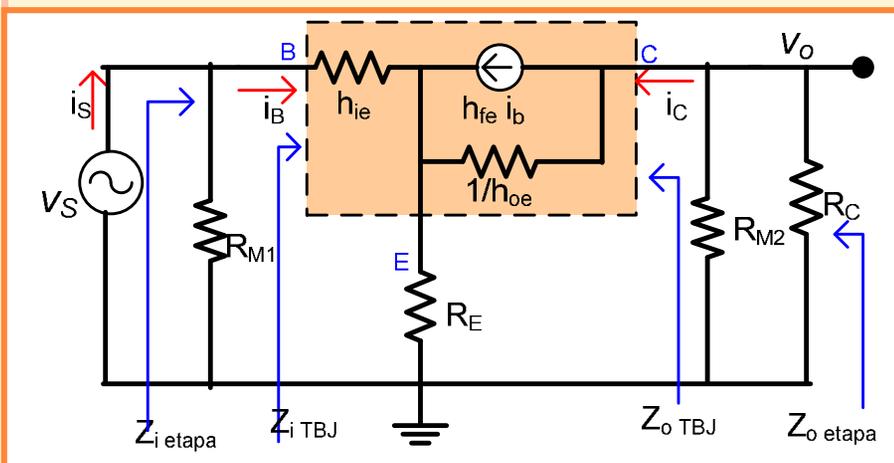
Calculo de la Ganancia de Tensión

$$A_V = \frac{v_o}{v_s}$$

$$v_s = i_b h_{ie} + i_e R_E = i_b h_{ie} + i_b (1 + h_{fe}) R_E = i_b [h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E]$$

$$v_o = -i_b h_{fe} (R_C // R_B)$$

$$A_V = -\frac{h_{fe} (R_C // R_B)}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E} \cong -\frac{R_C}{R_E}$$



Ahora se puede calcular R_{M1}

$$R_{M1} = \frac{R_B}{1 - A_V} = \frac{R_B}{1 + \frac{R_C}{R_E}} = \frac{R_E R_B}{R_E + R_C}$$

4.- Circuito realimentación base-colector y resistencia de emisor

Cálculo de la Ganancia de Corriente

$$A_I = \frac{i_o}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_{M1}} + i_b \quad \text{con} \quad i_b = \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

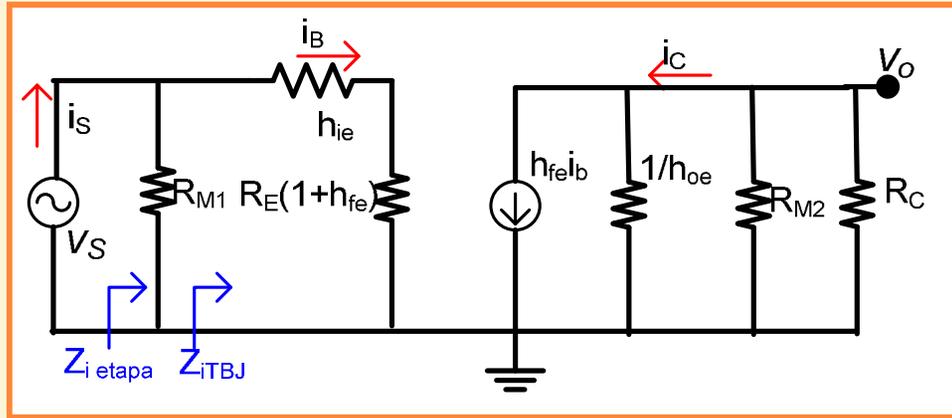
$$\therefore i_s = \left[\frac{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}{R_{M1}} + 1 \right] i_b$$

$$\text{Si } R_C \ll r_{oe} \Rightarrow i_o = i_b h_{fe}$$

$$A_i \cong \frac{h_{fe}}{\frac{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}{R_{M1}} + 1} \approx h_{fe}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

4.- Configuración con realimentación base-colector y resistencia de emisor TEMA 7



Cálculo de la Impedancia de Entrada de la etapa y del TBJ

$$Z_{iTBJ} = \frac{v_S}{i_b}$$

$$i_b = \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

$$\Rightarrow Z_{iTBJ} = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E$$

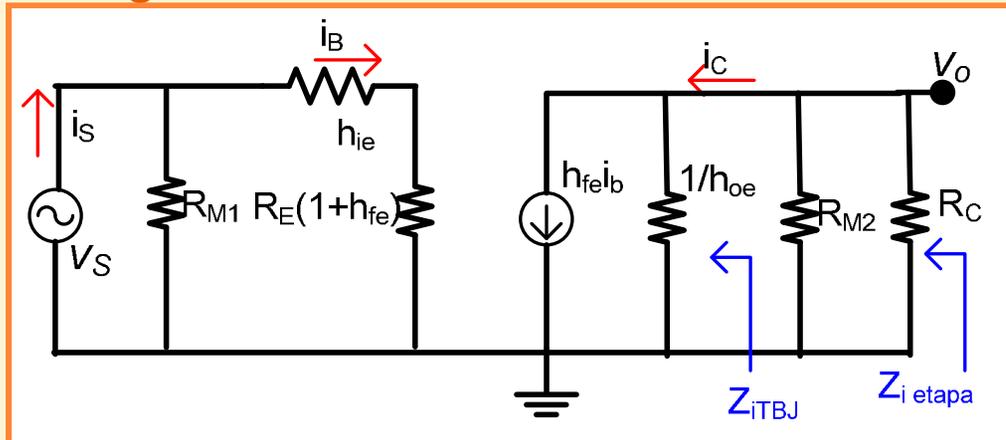
$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

$$i_s = \frac{v_S}{R_{M1}} + \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E}$$

$$i_s = v_S \left(\frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E} \right)$$

$$\Rightarrow Z_{in} = R_{M1} // [h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E]$$

4.- Configuración con realimentación base-colector y resistencia de emisor



Cálculo de la Impedancia de salida de la etapa y del TBJ

$$Z_{oTBJ} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$v_o = i_o r_{oe}$$

$$\Rightarrow Z_{oTBJ} = r_{oe}$$

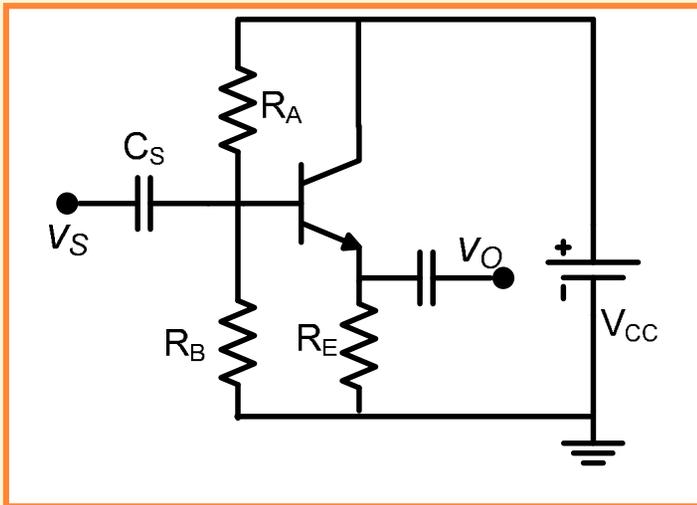
$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$Z_{out} = r_{oe} // R_B // R_C$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

5.- Configuración Colector Común

TEMA 7

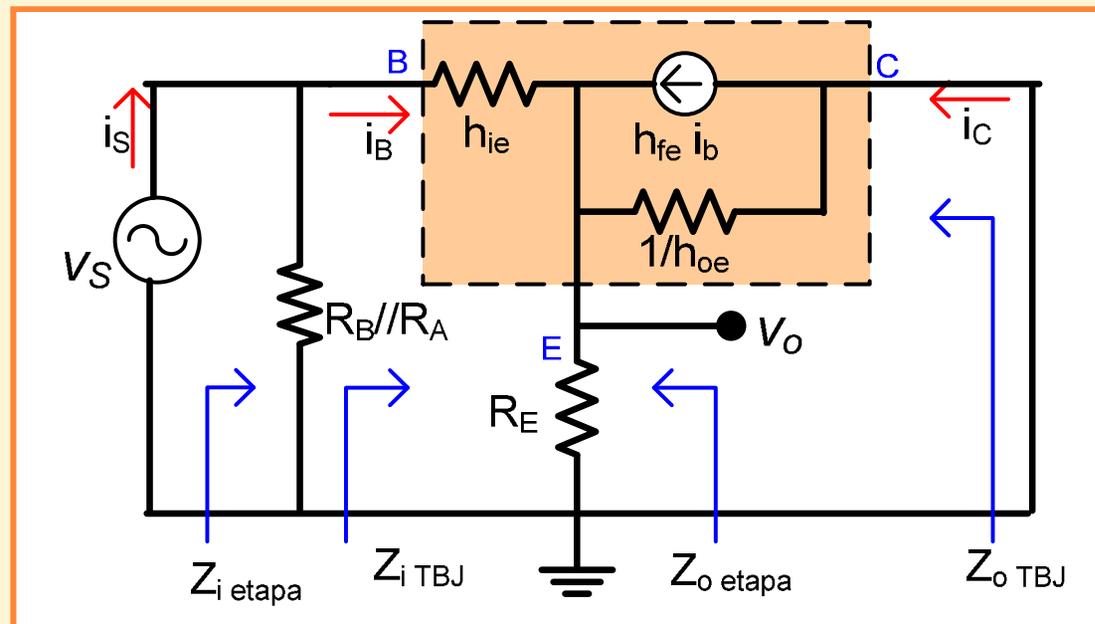


Polarización:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_E R_E$$

$$V_B = V_{CC} \frac{R_B}{R_A + R_B} = V_{BE} + I_E R_E$$

Modelo incremental

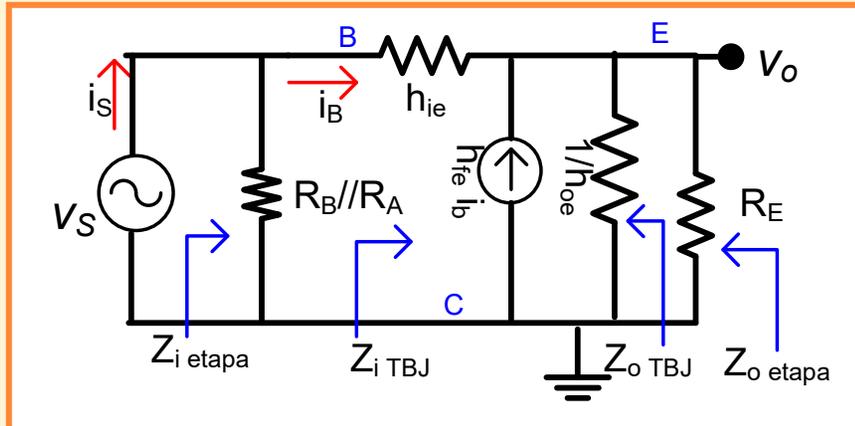


ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

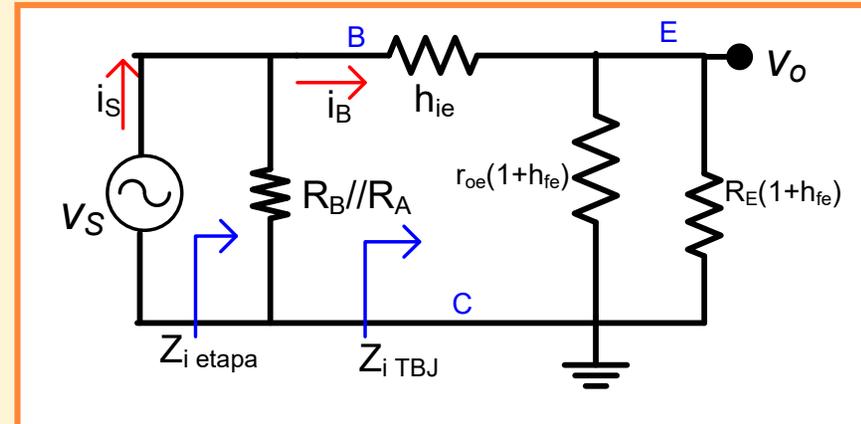
5.- Configuración Colector Común

TEMA 7

Modelo incremental redibujado



Modelo incremental aplicando Teorema de Reducción



Calculo de la Ganancia de Tensión

$$A_V = \frac{v_o}{v_s}$$

$$v_s = i_b \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right]$$

$$v_o = i_b (h_{fe} + 1) R_E$$

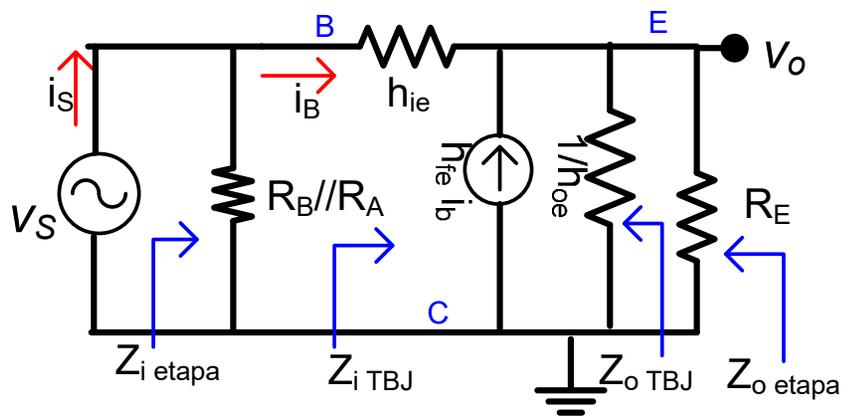
$$A_V = \frac{(h_{fe} + 1) R_E}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E} \cong 1$$

$$R_E // r_{oe} \cong R_E$$

Calculo de la Ganancia de Corriente del dispositivo y del amplificador

$$A_{I\ TBJ} = \frac{i_O}{i_s} = \frac{i_e}{i_b} = 1 + h_{fe}$$

$$R_E // r_{oe} \cong R_E$$



$$A_I = \frac{i_O}{i_s} = \frac{i_e}{i_s}$$

$$v_s = i_b \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right]$$

$$A_I = \frac{i_O}{i_s} = \frac{i_b (h_{fe} + 1)}{i_b + i_b \frac{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}{R_A // R_B}}$$

$$A_I = \frac{(h_{fe} + 1) R_A // R_B}{R_A // R_B + h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

5.- Configuración Colector Común

TEMA 7

Calculo de la Impedancia de entrada del dispositivo y del amplificador

$$Z_{iTBJ} = \frac{v_S}{i_b}$$

$$i_b = \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

$$\Rightarrow Z_{iTBJ} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E$$

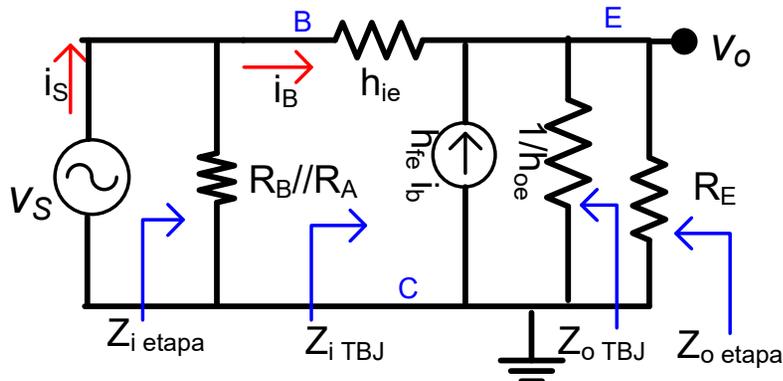
$$R_E // r_{oe} \cong R_E$$

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

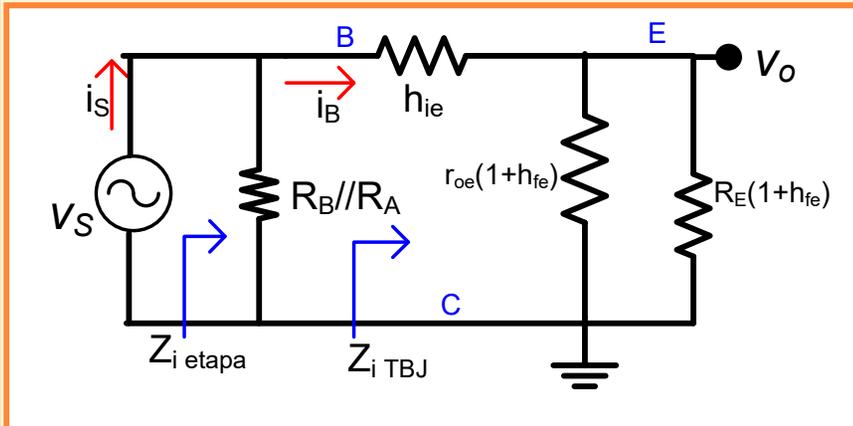
$$i_s = \frac{v_S}{R_A // R_B} + \frac{v_S}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

$$i_s = v_S \left(\frac{1}{R_A // R_B} + \frac{1}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E} \right)$$

$$\Rightarrow Z_{in} = R_A // R_B // \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right]$$



Calculo de la Impedancia de entrada del dispositivo y del amplificador, aplicando Teorema de Reducción



$$R_E (1 + h_{fe}) // r_{oe} (1 + h_{fe}) \cong R_E (1 + h_{fe})$$

$$Z_{in} = \frac{v_S}{i_s}$$

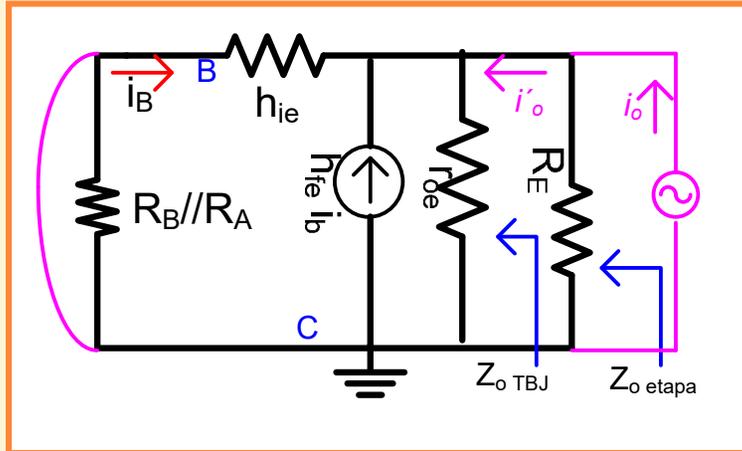
$$Z_{in} = R_A // R_B // \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right]$$

$$Z_{iTBj} = \frac{v_S}{i_b}$$

$$Z_{iTBj} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E$$

Observaciones: Si se aplicó T. de reducción, para calcular Z_{in} se deben dejar invariables los parámetros de N1. O sea se aplica reducción hacia la derecha, a N2. Para ello se multiplica por $(1+h_{fe})$

Cálculo de la Impedancia de salida de la etapa y del TBJ



$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$Z_{out} = R_E \parallel Z_{o\ TBJ}$$

$$Z_{out} = R_E \parallel r_{oe} \parallel \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

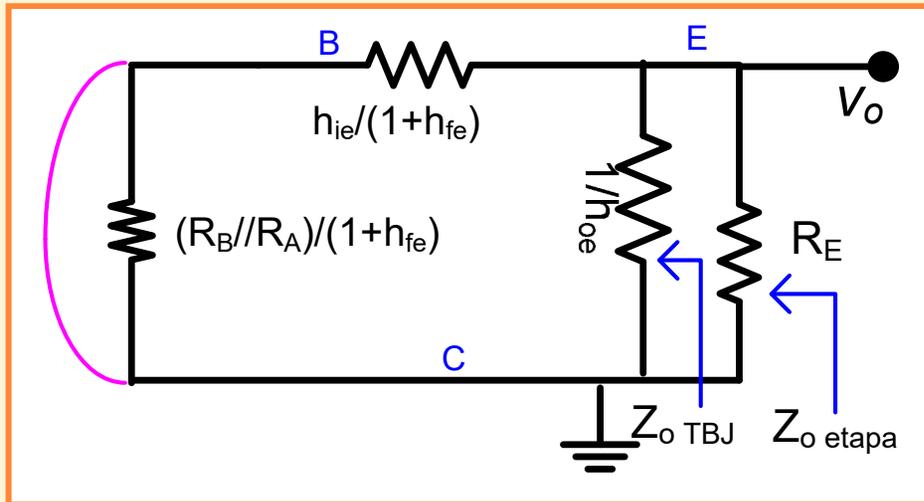
$$Z_{o\ TBJ} = \frac{v_o}{i'_o}$$

$$i_b = \frac{v_o}{h_{ie}}$$

$$i'_o = \frac{v_o}{h_{ie}} + \frac{h_{fe} v_o}{h_{ie}} + \frac{v_o}{r_{oe}}$$

$$Z_{o\ TBJ} = r_{oe} \parallel \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

Cálculo de la Impedancia de salida de la etapa y del TBJ, aplicando Teorema de reducción



$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$Z_{out} = R_E // r_{oe} // \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$Z_{out} \approx \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$Z_{o\ TBJ} = r_{oe} // \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

Observaciones: Si se aplicó T. de reducción, para calcular Z_o se deben dejar invariables los parámetros de N_2 . O sea se aplica reducción hacia la izquierda, a N_1 . Para ello se divide en $(1+h_{fe})$

Resumiendo:

El amplificador en configuración colector común, tiene:

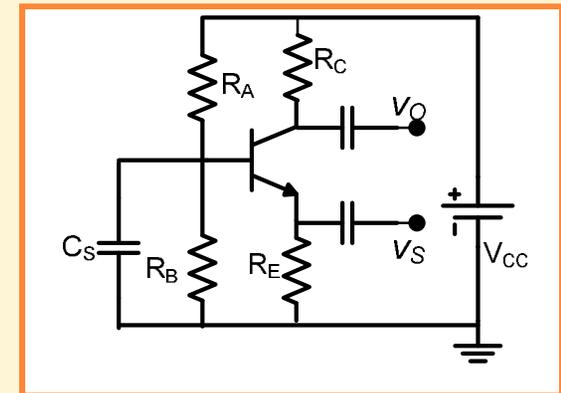
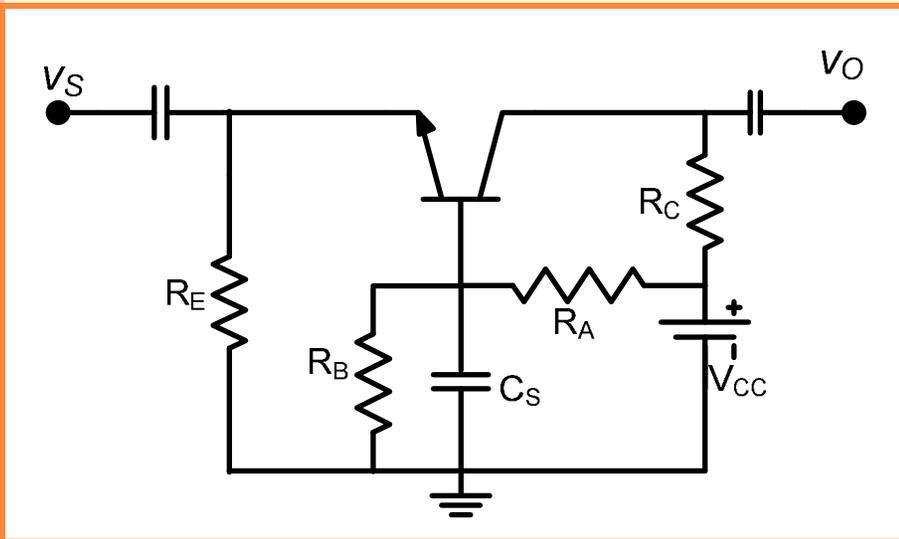
- Ganancia de tensión $A_v \leq 1$, o sea no gana en tensión.
- La tensión de salida y de entrada están en fase.
- Debido a los dos puntos anteriores, se le llama “seguidor de tensión” o seguidor emisor.
- La impedancia de entrada es muy alta.
- La impedancia de salida es muy baja.
- Debido a los puntos anteriores se lo usa como adaptador de impedancias.
- La ganancia de corriente es elevada.

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

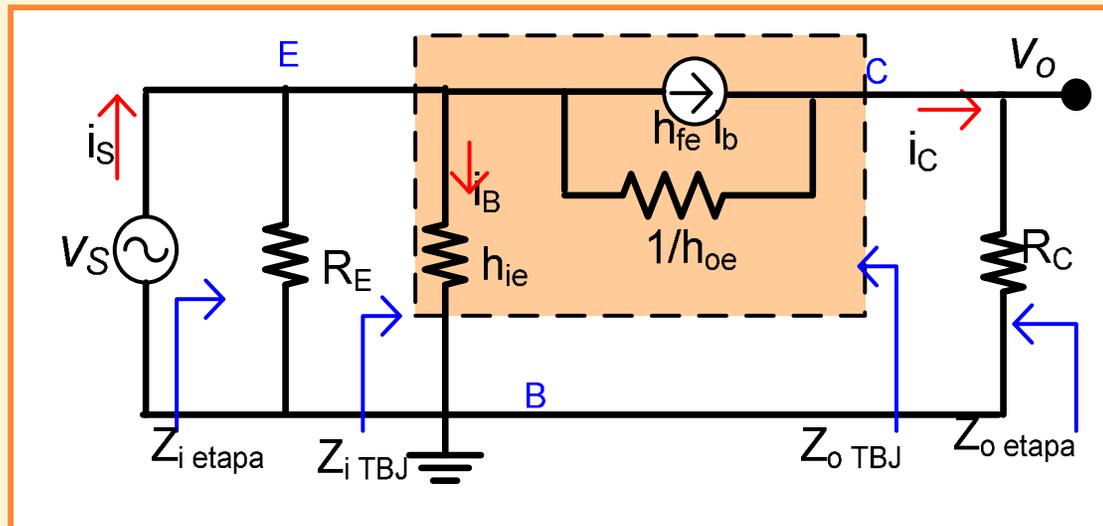
TEMA 7

6.- Configuración Base Común

Polarización:
Idéntico al circuito con polarización independiente de β



Modelo incremental

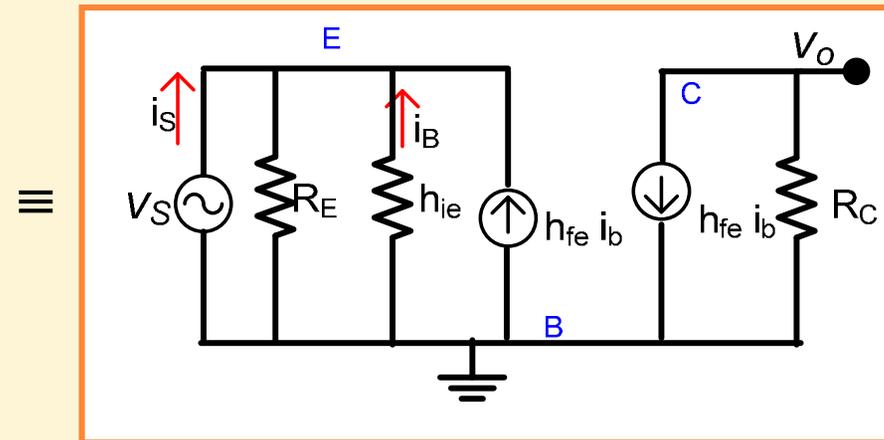
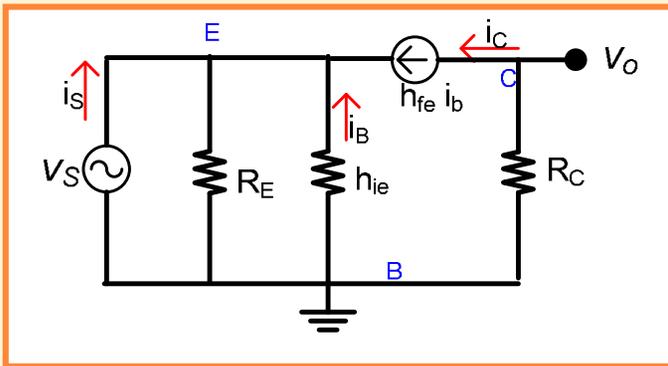


ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

6.- Configuración Base Común

TEMA 7

a) Se puede despreciar r_{oe}



Calculo de la Ganancia de Tensión

$$A_V = \frac{v_O}{v_s}$$

$$v_O = -i_b h_{fe} R_C$$

$$v_s = -i_b h_{ie}$$

$$A_V = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

Calculo de la Ganancia de Corriente

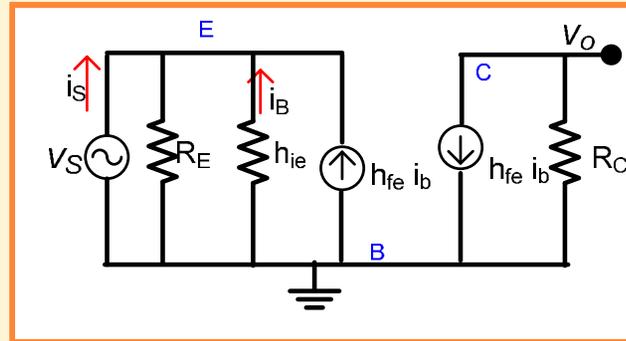
$$A_I = \frac{i_O}{i_s} = \frac{i_c}{i_e}$$

$$i_c = h_{fe} i_b$$

$$i_e = i_b (h_{fe} + 1)$$

$$A_I = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \cong 1$$

a) Se puede despreciar r_{oe}



Calculo de la Impedancia de entrada

$$Z_i = \frac{v_S}{i_S} = \frac{v_S}{i_e} = \frac{i_b h_{ie}}{(1 + h_{fe}) i_b}$$

$$Z_{iTBJ} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

Cálculo de la Impedancia de salida

$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o} = \frac{h_{fe} i_b R_C}{(1 + h_{fe}) i_b}$$

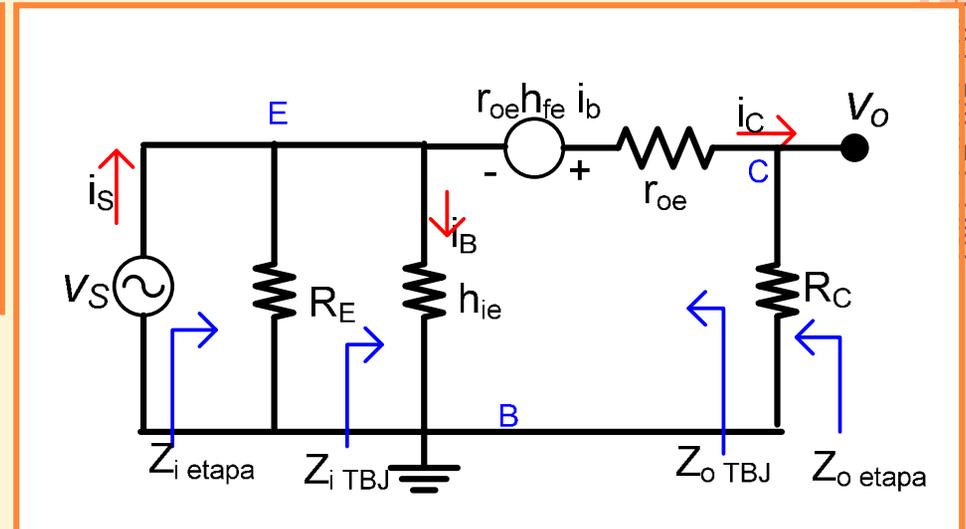
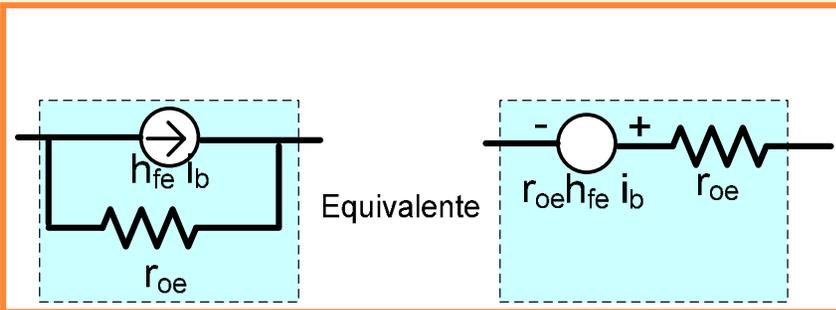
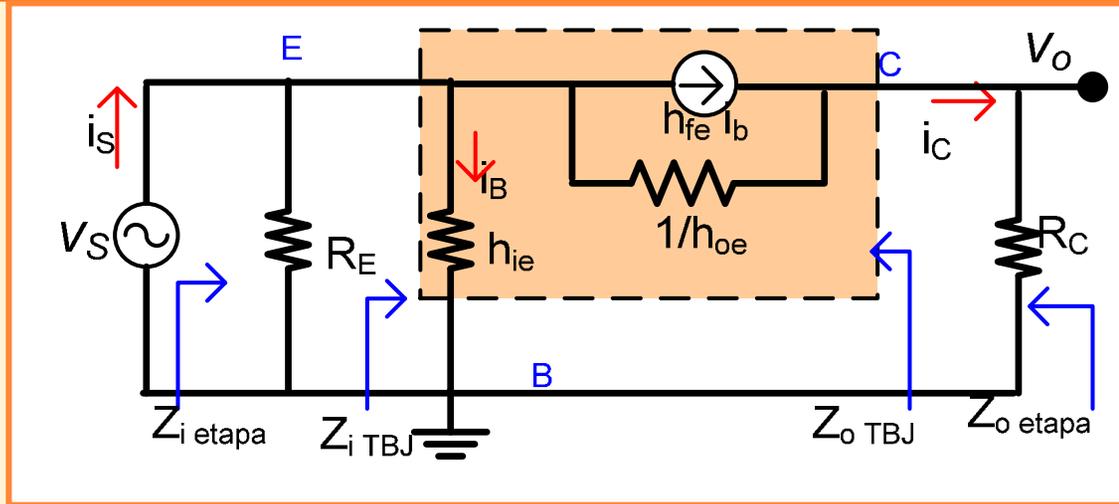
$$Z_{out} = \frac{h_{fe} R_C}{1 + h_{fe}} \cong R_C$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

6.- Configuración Base Común

TEMA 7

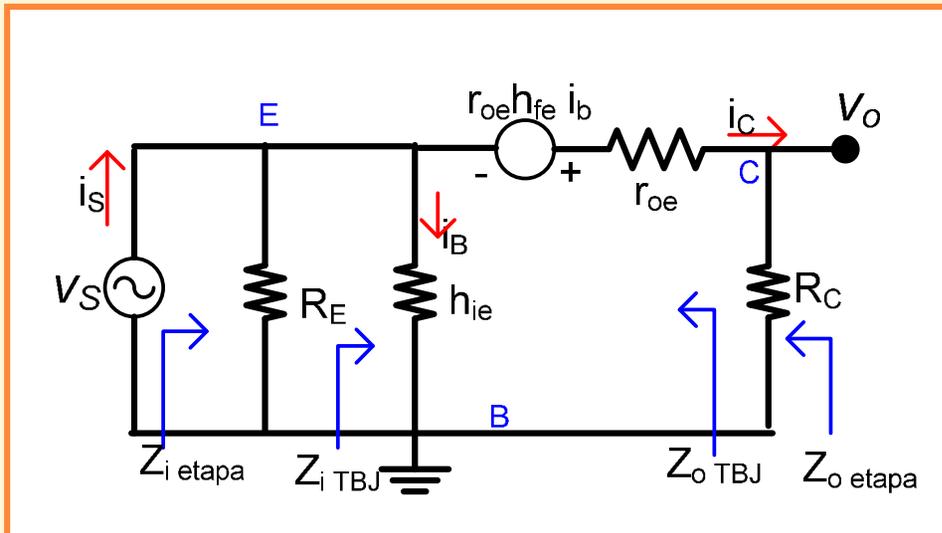
b) Si NO se puede despreciar r_{oe} :



ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

6.- Configuración Base Común

TEMA 7

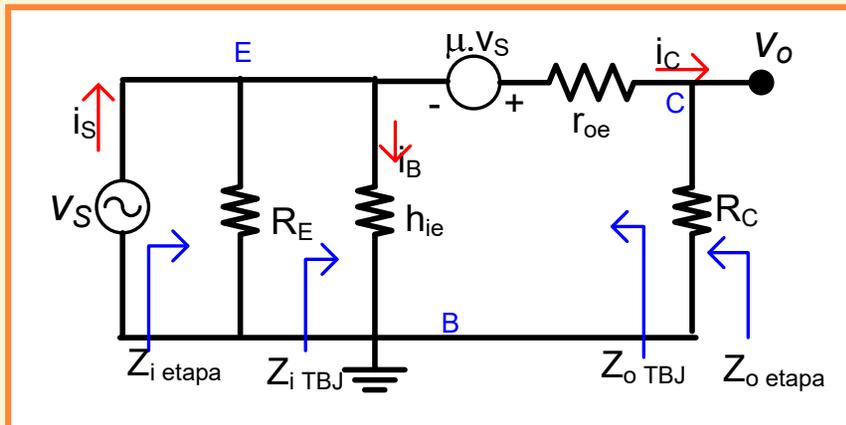


b) NO se puede despreciar r_{oe}

$$v_S = i_b h_{ie}$$

$$h_{fe} r_{oe} i_b = \frac{h_{fe} r_{oe}}{h_{ie}} v_S = \mu v_S$$

Calculo de la Ganancia de Tensión



$$A_V = \frac{v_O}{v_s} \quad v_O = \frac{R_C}{r_{oe} + R_C} (1 + \mu) v_S$$

$$A_V = \left(1 + \frac{h_{fe} r_{oe}}{h_{ie}} \right) \frac{R_C}{r_{oe} + R_C}$$

$$A_V \cong \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C$$

b) NO se puede despreciar r_{oe}

Calculo de la Ganancia de Corriente

$$A_I = \frac{i_O}{i_s} = \frac{i_c}{i_e}$$

$$i_c = \frac{v_s(1+\mu)}{r_{oe} + R_C} \quad i_e = i_b + i_c = \frac{v_s}{h_{ie}} + \frac{v_s(1+\mu)}{r_{oe} + R_C}$$

$$A_I = \frac{\frac{v_s(1+\mu)}{r_{oe} + R_C}}{\frac{v_s}{h_{ie}} + \frac{v_s(1+\mu)}{r_{oe} + R_C}} = \frac{1+\mu}{r_{oe} + R_C + (1+\mu)h_{ie}}$$

$$A_I = \frac{1 + \frac{h_{fe}r_{oe}}{h_{ie}}}{r_{oe} + R_C + \left(1 + \frac{h_{fe}r_{oe}}{h_{ie}}\right)h_{ie}}$$

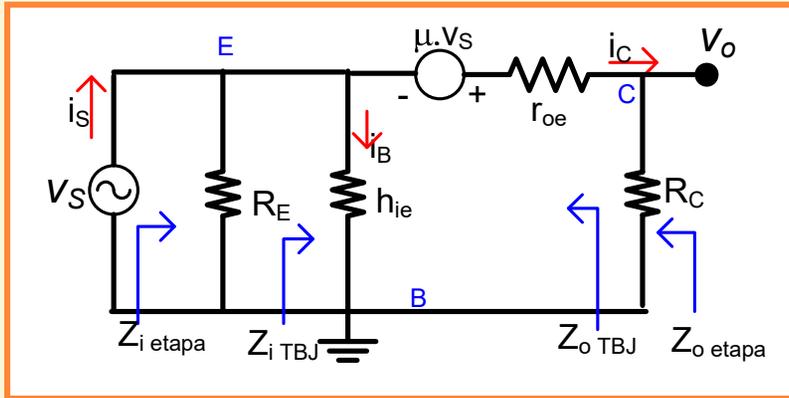
Si $h_{ie} \ll r_{oe}$ y $R_C \ll r_{oe}$:

$$A_I = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \cong 1$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS CON TRANSISTORES EN PEQUEÑA SEÑAL

6.- Configuración Base Común

TEMA 7



Calculo de la Impedancia de Entrada

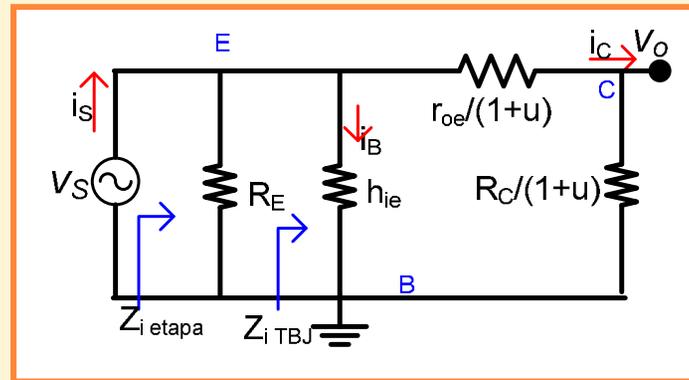
$$Z_{iTBJ} = h_{ie} \parallel \left(\frac{r_{oe}}{1 + \mu} + \frac{R_C}{1 + \mu} \right)$$

$$Z_{iTBJ} = h_{ie} \parallel \left(\frac{r_{oe} + R_C}{1 + \frac{h_{fe} r_{oe}}{h_{ie}}} \right)$$

$$Z_i = R_E \parallel Z_{iTBJ}$$

b) NO se puede despreciar r_{oe}

Aplicando Teorema de reducción hacia la derecha (sirve solo para calcular A_v , A_i y Z_{in})



$$\mu = \frac{h_{fe} r_{oe}}{h_{ie}}$$

Cálculo de la Impedancia de salida

$$Z_{out} = \frac{v_o}{i_o} = R_C \parallel r_{oe}$$

Cuidado!!! Para el calculo de la impedancia de salida, se debe realizar reducción hacia la izquierda