

# ELECTRONICA APLICADA I

Prof. Titular Dr. Ing. Guillermo Riva  
Prof. Adjunto Ing. Martín Guido

## Amplificador Diferencial parte I.

- Circuito, características y formas de salida.
- Entradas y salidas.
- Análisis del punto de reposo.
- Definiciones.
- Relaciones entre señal y ruido.
- Amplificador diferencial salida asimétrica.
- Circuito equivalente reflejado en el emisor con salida asimétrica por  $T_2$ .
- Expresión  $i_1$  e  $i_2$  en función de las corrientes  $i_c$  e  $i_d$ .
- Conversión de la fuente de corriente en fuente de tensión.
- Obtención de  $i_{e_2}$  y  $i_L$ .
- Cálculo de la relación de rechazo a modo común.
- Reemplazo de  $R_e$  por una fuente de corriente constante elevando la impedancia y mejorando la RRMC.
- Análisis en corriente continua.

# Amplificador Diferencial.

## *Introducción.*

*El amplificador diferencial es un circuito versatil que se usa como etapa de entrada de la mayoria de los amplificadores operacionales. Usualmente utilizan tensiones de alimentación partida de manera que la tensión de salida tenga excusiones positiva y negativa pero tambien se puede utilizar alimentación unipolar.*

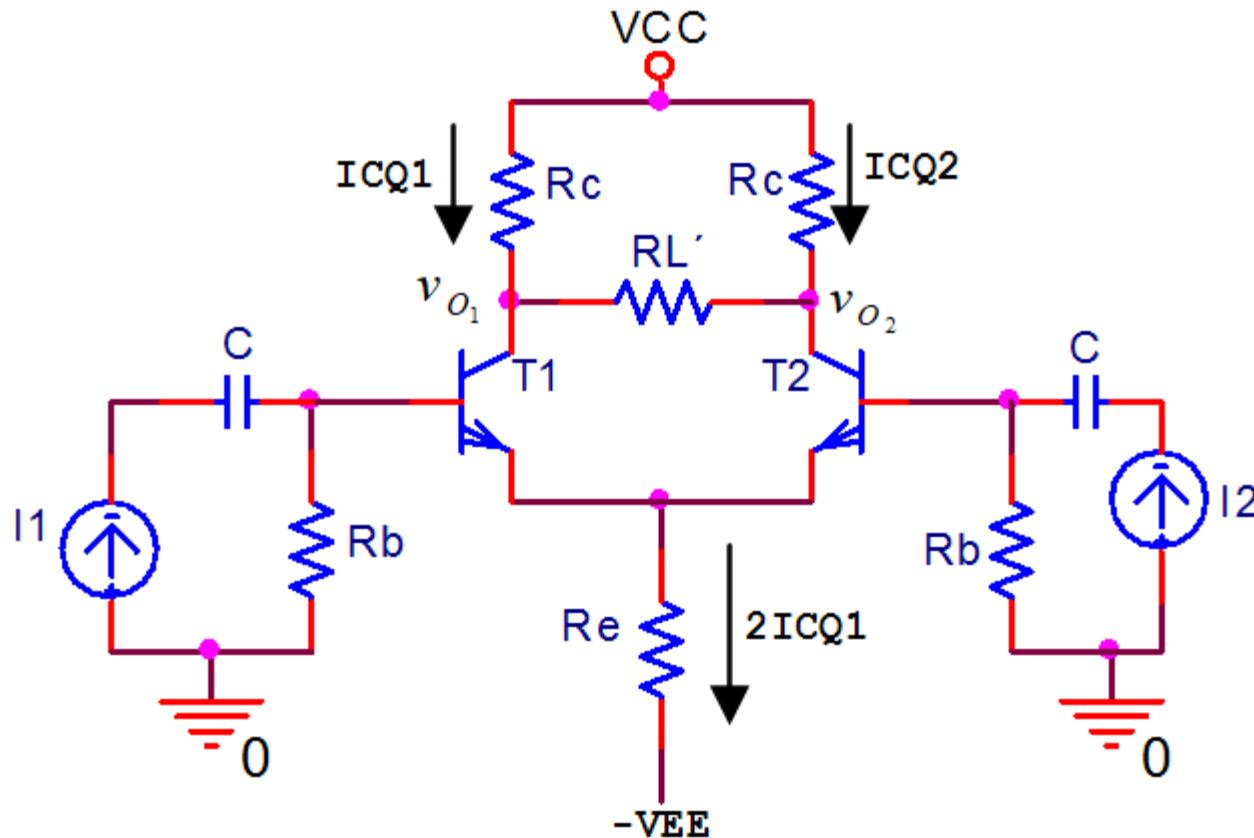
*El circuito tiene dos entradas  $v_1$ ,  $v_2$  y tres salidas  $v_{O1}$ ,  $v_{O2}$  y  $v_{O1} - v_{O2}$ . La importancia estriba que la salida es proporcional a la diferencia de las señales de entrada.*

*Asi el circuito se puede utilizar para amplificar la diferencia entre las dos entradas o amplificar una sola entrada conectantando a masa la otra.*

# Amplificador Diferencial.

Salida simétrica.

Características : Elimina ruidos de origen externo presentes en las entradas.



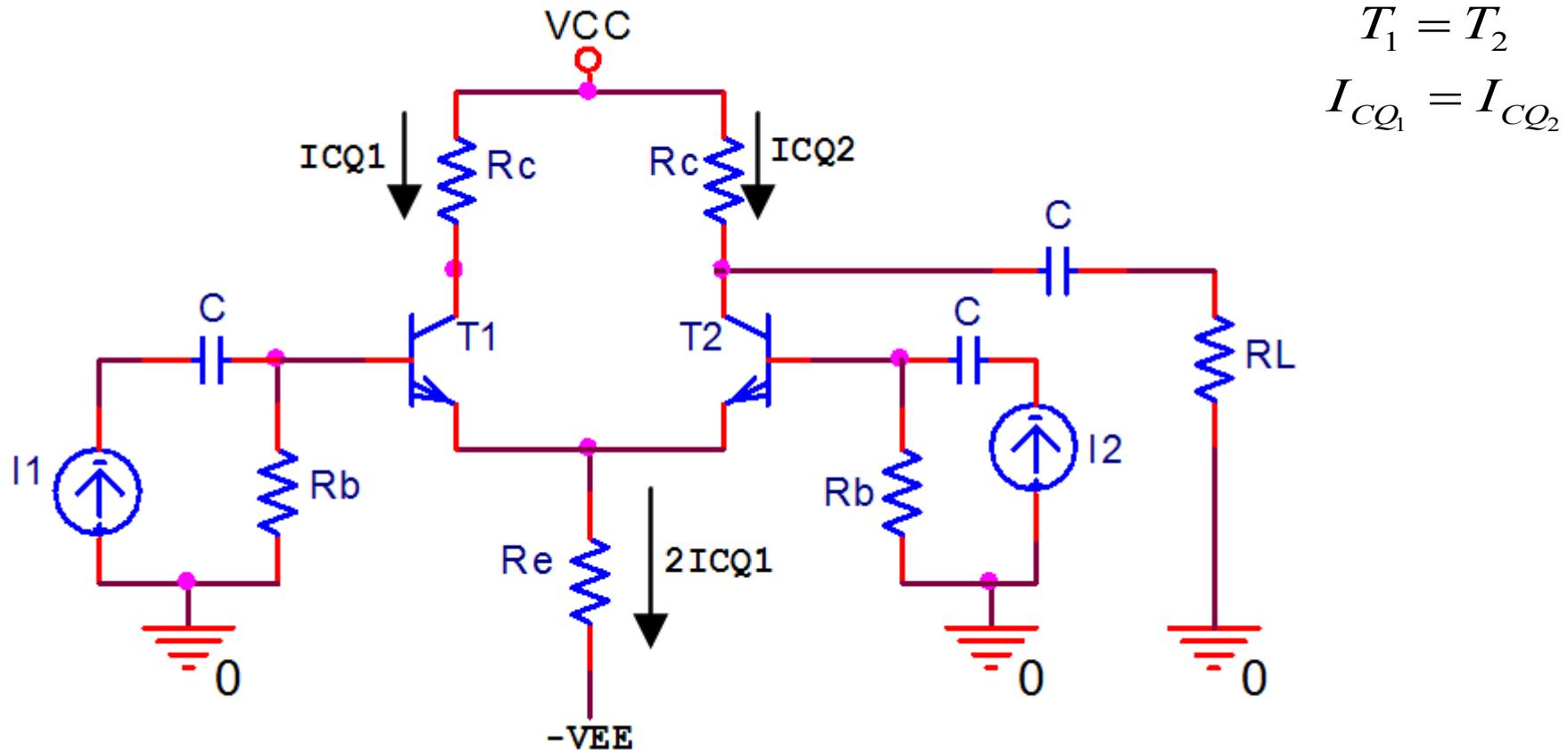
$$T_1 = T_2$$

$$I_{CQ_1} = I_{CQ_2}$$

# Amplificador Diferencial.

Salida asimétrica.

Características : Atenua ruidos de origen externo presentes en las entradas.

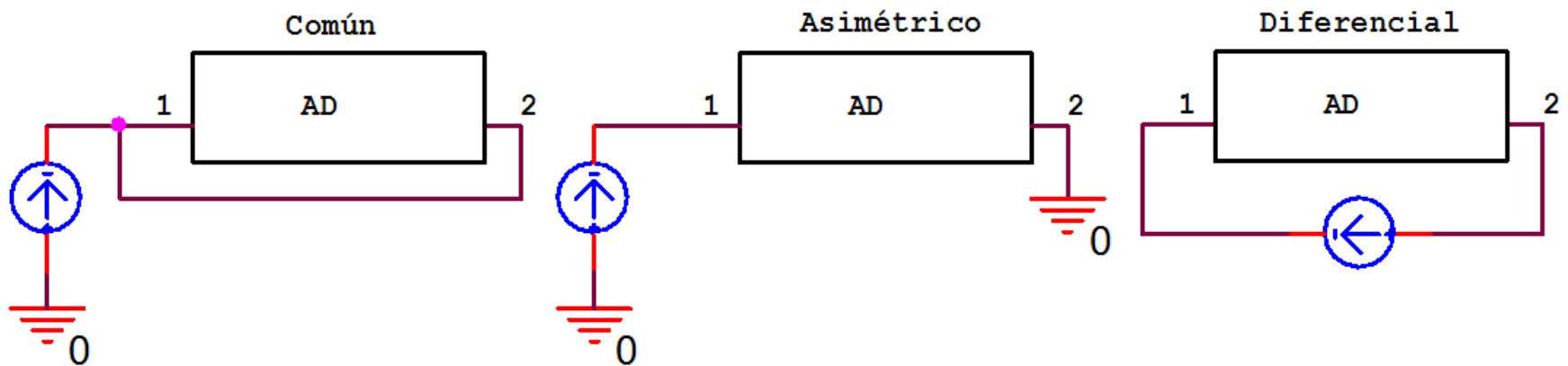


# Amplificador Diferencial.

*Salidas*  $\begin{cases} \text{Asimétrica} - R_L \rightarrow \text{Atenua el ruido} \\ \text{Diferencial o simétrica} - R'_L \rightarrow \text{Elimina el ruido} \end{cases}$

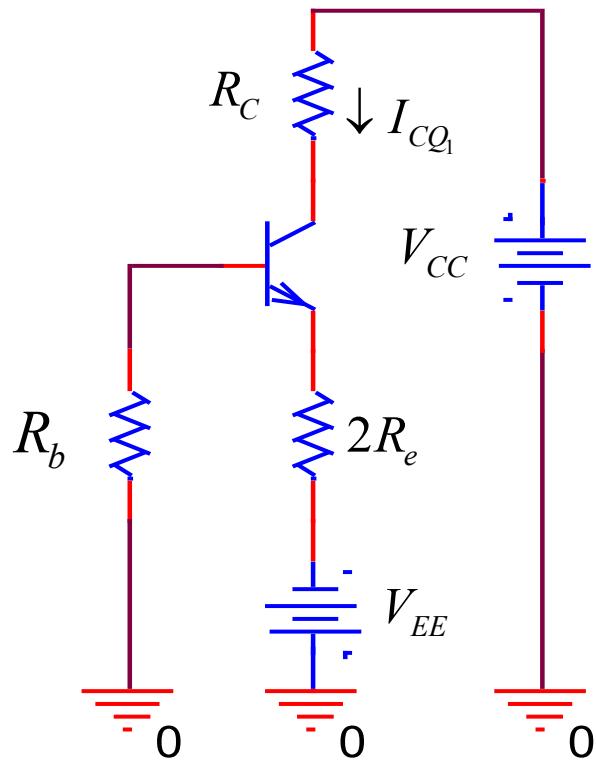
# Amplificador Diferencial.

*Forma de entrada de la señal*  $\begin{cases} \text{Común (ruido)} \\ \text{Asimétrica (señal referida a masa)} \\ \text{Diferencial (puente)} \end{cases}$



# Amplificador Diferencial.

*Análisis de punto de reposo.*



Tensión en  $R_e$ .

$$V_{R_e} = 2I_{CQ_1}R_e = I_{CQ_1}2R_e$$

De la malla de entrada.

$$V_{EE} - \frac{I_{CQ_1}}{\beta}R_b - V_{BE} - I_{CQ_1}2R_e = 0$$

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{\frac{R_b}{\beta} + 2R_e} = I_{CQ_2}$$

De la malla de salida.

$$V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ_1}(R_C + 2R_e) - V_{CEQ_1} = 0$$

$$V_{CEQ_1} = V_{CC} + V_{EE} - I_{CQ_1}(R_C + 2R_e)$$

$$V_{CEQ_1} = V_{CEQ_2} \quad (\text{Si } R_C \text{ son iguales})$$

# Amplificador Diferencial.

*Definiciones :*

*Corriente de modo común :*  $i_c = \frac{i_1 + i_2}{2}$

*Corriente de modo diferencial :*  $i_d = i_2 - i_1$

*Corriente de salida :*  $i_L = A_c i_c \pm A_d i_d$

*Ruido*      *Señal*

*Ganancia de modo común :*  $A_c = \left. \frac{i_L}{i_c} \right|_{i_d=0}$

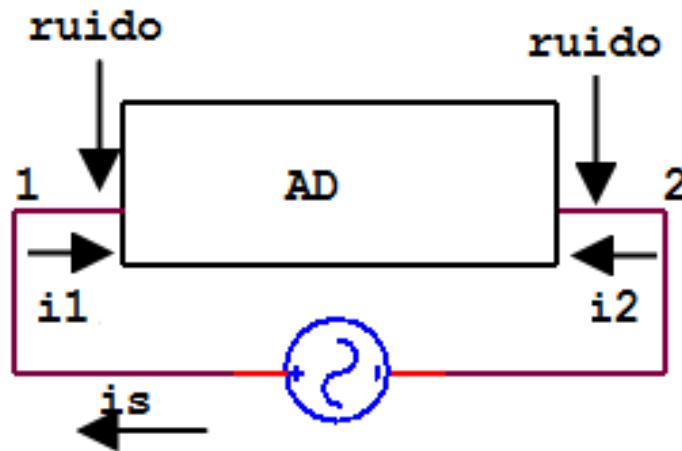
*Ganancia de modo diferencial :*  $A_d = \left. \frac{i_L}{i_d} \right|_{i_c=0}$

*Relacion de rechazo de modo comun :*  $RRMC = \frac{A_d}{A_c} \rightarrow \infty$

$A_d \gg A_c$  (es deseable).

# Amplificador Diferencial.

Relacion entre señal y ruido.



Corrientes de entrada con entrada diferencial.

$$i_1 = i_s + i_r$$

$$i_2 = -i_s + i_r$$

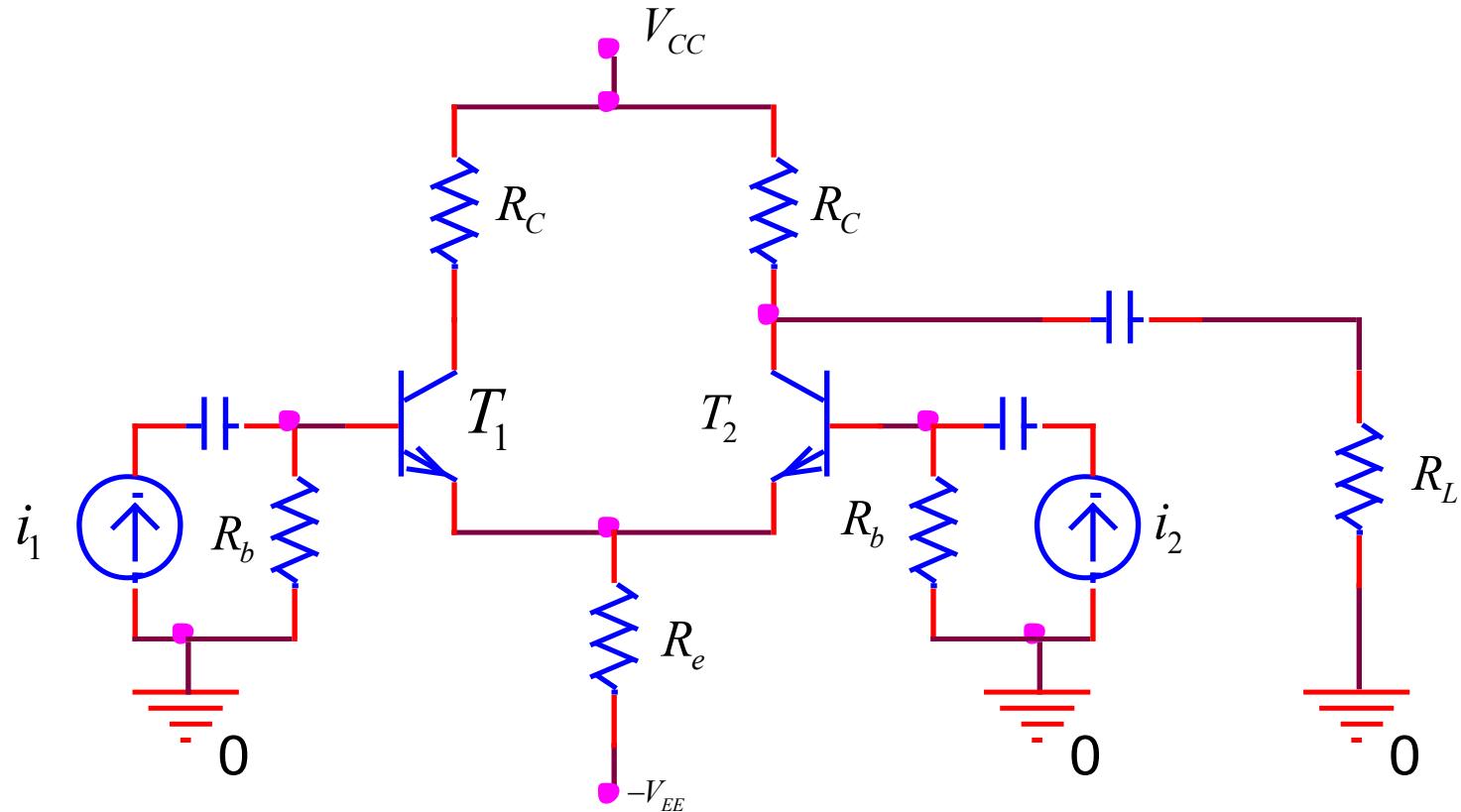
$$i_s = \text{señal} \quad i_r = \text{ruido}$$

$$i_c = \frac{i_1 + i_2}{2} = \frac{i_s + i_r - i_s + i_r}{2} = \frac{2i_r}{2} = i_r$$

$$i_d = i_2 - i_1 = -i_s + i_r - i_s - i_r = -2i_s$$

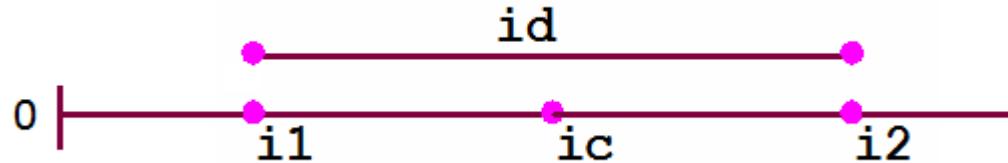
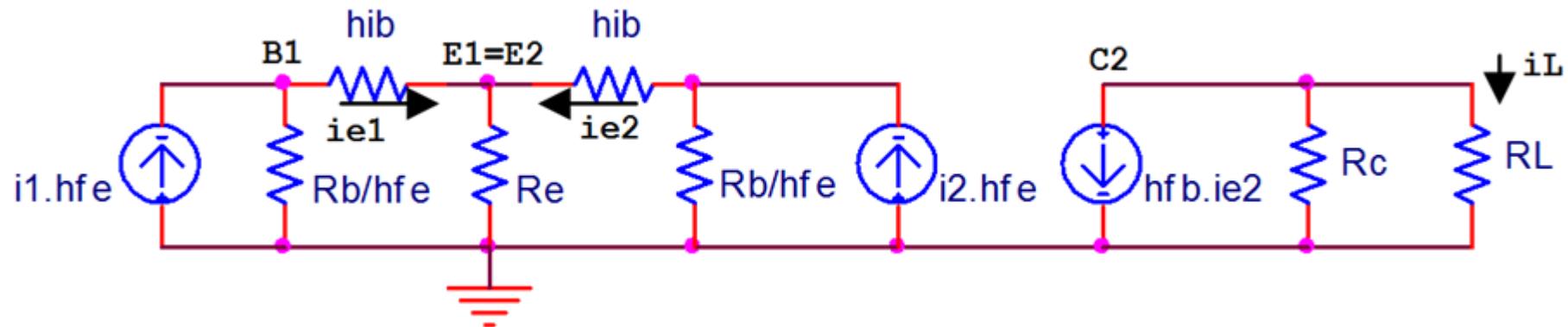
# Amplificador Diferencial.

*Amplificador diferencial salida asimétrica.*



# Amplificador Diferencial.

*Circuito equivalente reflejado al emisor con salida asimétrica por T<sub>2</sub>.*

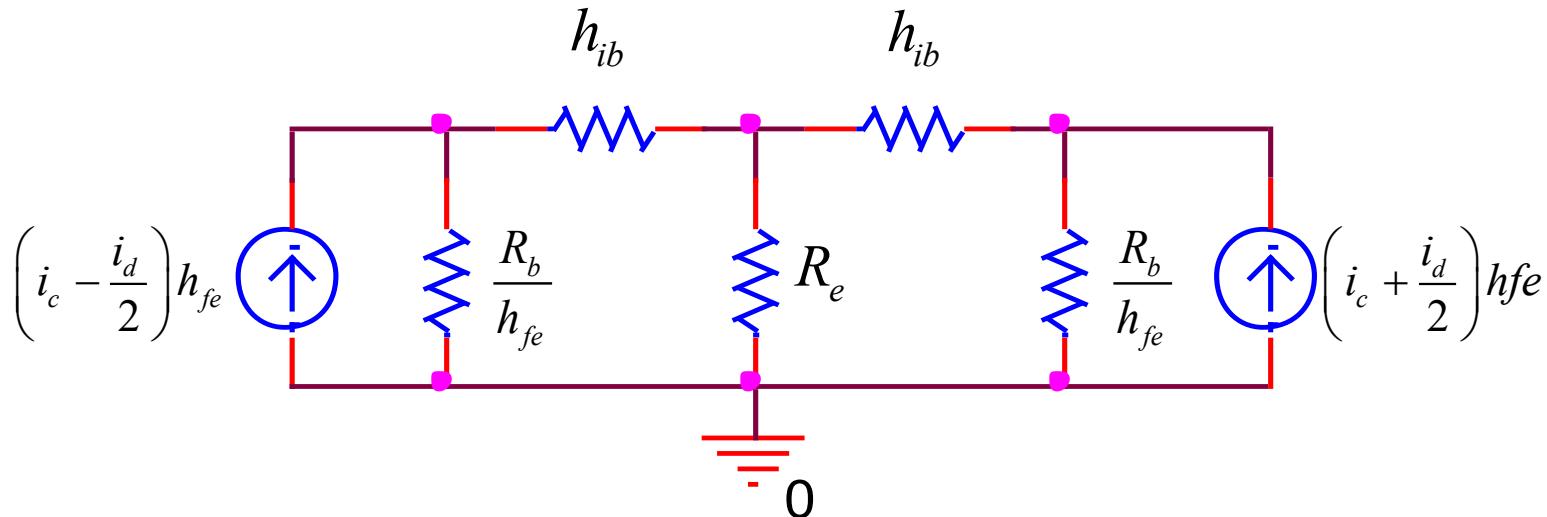


$$i_1 = i_c - \frac{i_d}{2}$$

$$i_2 = i_c + \frac{i_d}{2}$$

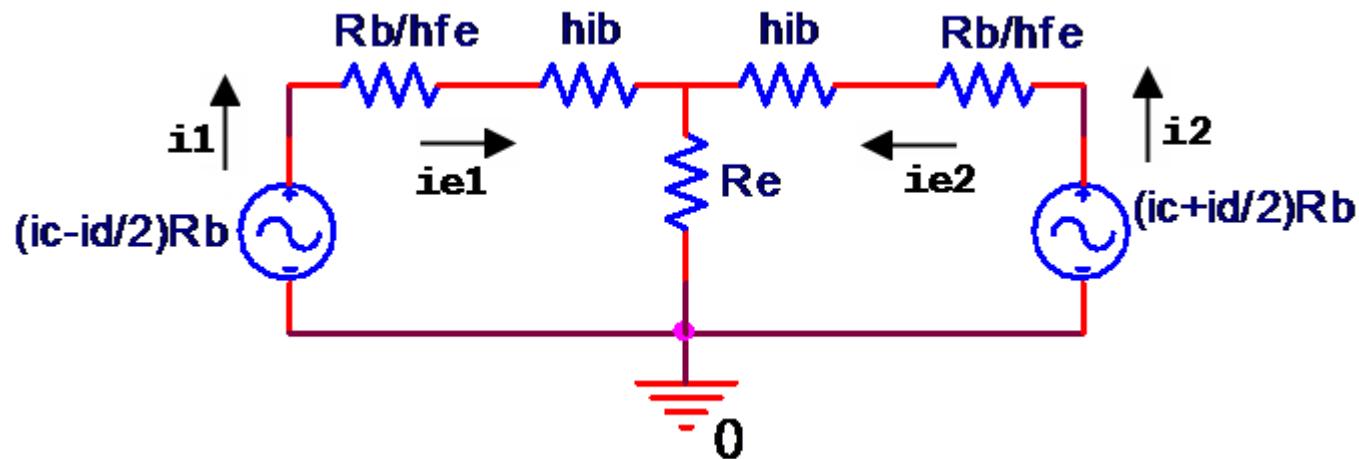
# Amplificador Diferencial.

Expresamos  $i_1$  e  $i_2$  en función de las corrientes  $i_c$  e  $i_d$ .



# Amplificador Diferencial.

*Convertimos la fuente de corriente a fuente de tensión.*



# Amplificador Diferencial.

*Para extraer conclusiones se analizara el amplificador diferencial ante las dos situaciones siguientes :*

$$1^{er} \text{ caso } i_1 = i_2 \quad \{ i_d = i_2 - i_1 = i_2 - i_2 = 0$$

*Si observamos el circuito concluimos que*   $i_{e_1} = i_{e_2}$

$$2^{do} \text{ caso } i_1 = -i_2 \quad \left\{ i_c = \frac{i_1 + i_2}{2} = \frac{-i_2 + i_2}{2} = 0 \right.$$

*Si observamos el circuito concluimos que*   $i_{e_1} = -i_{e_2}$

# Amplificador Diferencial.

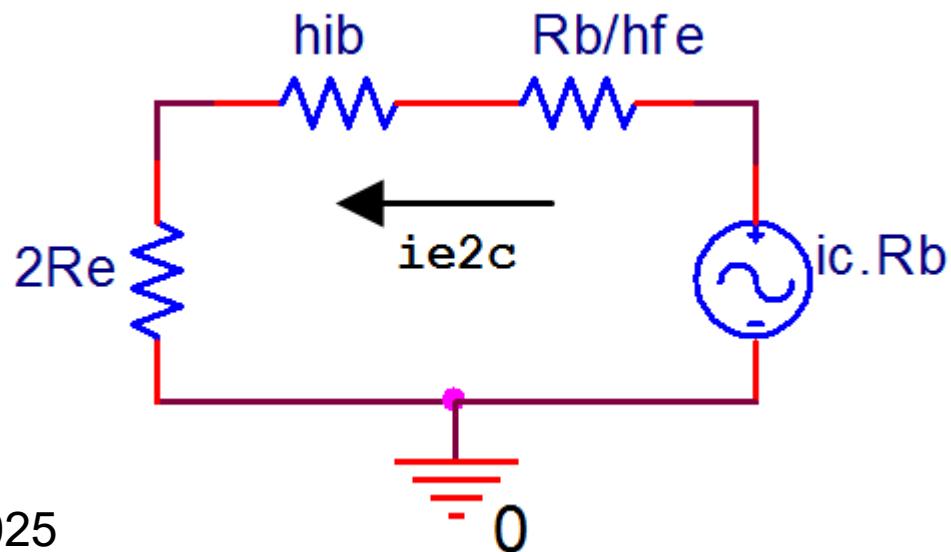
En la malla de salida tenemos que:

$$i_L = f(i_{e_2})$$

$$i_{e_2} = f(i_c, i_d)$$

1<sup>er</sup> caso si:  $i_1 = i_2 = i_c \Rightarrow i_d = 0$

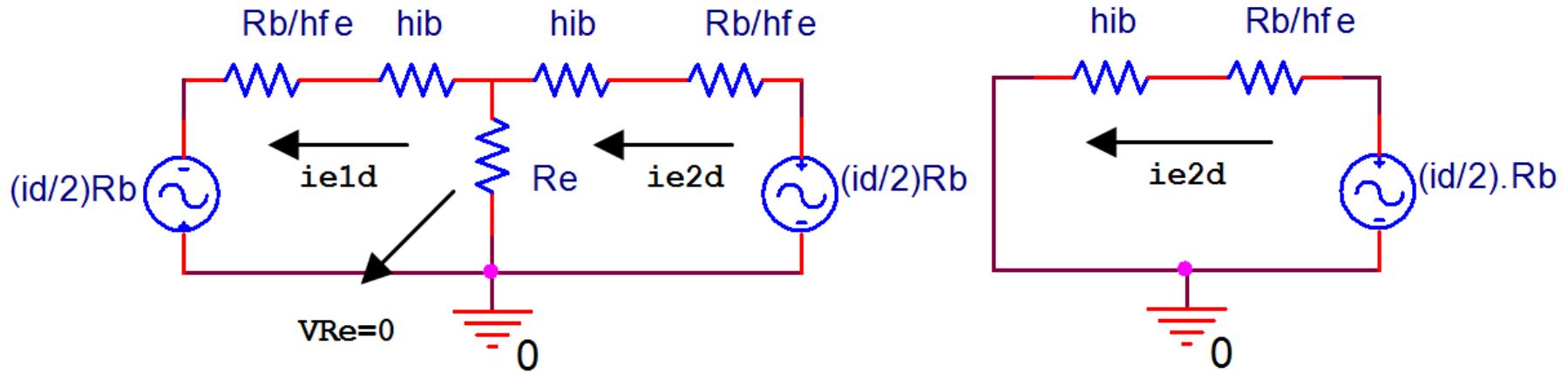
$$v_{Re} = 2i_{e_{2c}} R_e = i_{e_{2c}} 2R_e$$



$$i_{e_{2c}} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c$$

# Amplificador Diferencial.

$$2^{\text{do}} \text{ caso si : } i_1 = -i_2; \quad i_c = \frac{-i_2 + i_2}{2} = \frac{0}{2} = 0$$



$$i_{e_{2d}} = \frac{R_b}{2 \left( h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}} \right)} i_d$$

# Amplificador Diferencial.

*Obtenemos  $i_{e_2}$  sumando ambas componentes.*

$$i_{e_2} = i_{e_{2c}} + i_{e_{2d}} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c + \frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

*Hallamos  $i_L$*

$$i_L = -h_{fb} i_{e_2} \times \frac{R_c R_L}{R_c + R_L} \times \frac{1}{R_L} = -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} i_{e_2}$$

# Amplificador diferencial.

Reemplazamos  $i_{e_2}$  por su valor.

$$i_L = -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} \left( \underbrace{\frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} \times i_c + \frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} \times i_d}_{A_c} \right)$$
$$i_L = \left( -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} \right) \underbrace{\frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} \times i_c}_{A_c} + \left( -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} \right) \underbrace{\frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} \times i_d}_{A_d}$$

# Amplificador diferencial.

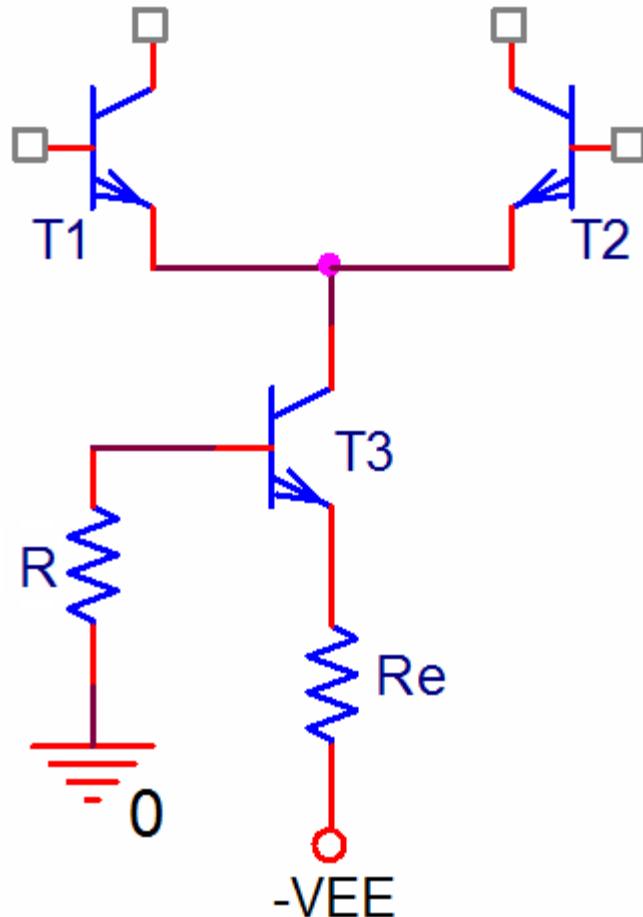
*Relación de Rechazo a Modo Común.*

$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} = \frac{\left( -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} \right) \frac{R_b}{2 \left( h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}} \right)}}{\left( -h_{fb} \frac{R_c}{R_c + R_L} \right) \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}}} = \frac{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}}{2 \left( h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}} \right)}$$

Si:  $R_e \gg h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}$   $\Rightarrow RRM C = \frac{R_e}{h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}}$

# Amplificador Diferencial.

Remplazamos  $R_e$  por una fuente de corriente constante elevando la impedancia y mejorando la RRMC.



En el circuito anterior

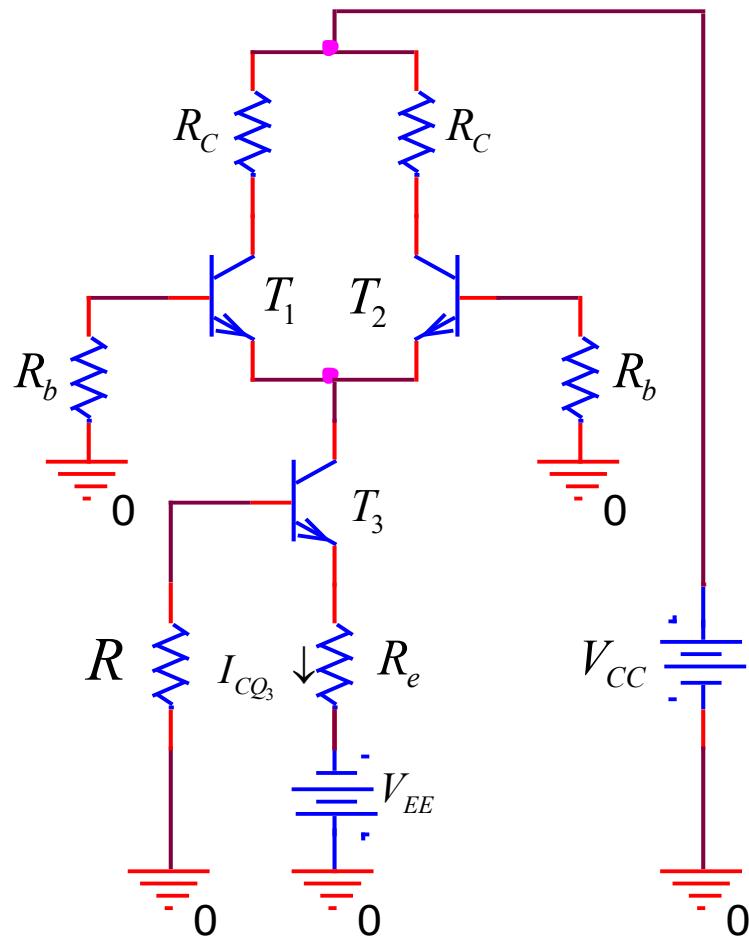
$$RRMC = \frac{R_e}{h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}}$$

En este circuito

$R_e$  es reemplazada por  $\frac{1}{h_{oe_3}}$

$$RRMC = \frac{\frac{1}{h_{oe_3}}}{h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}}$$

# Amplificador Diferencial.



*Análisis en corriente continua:*

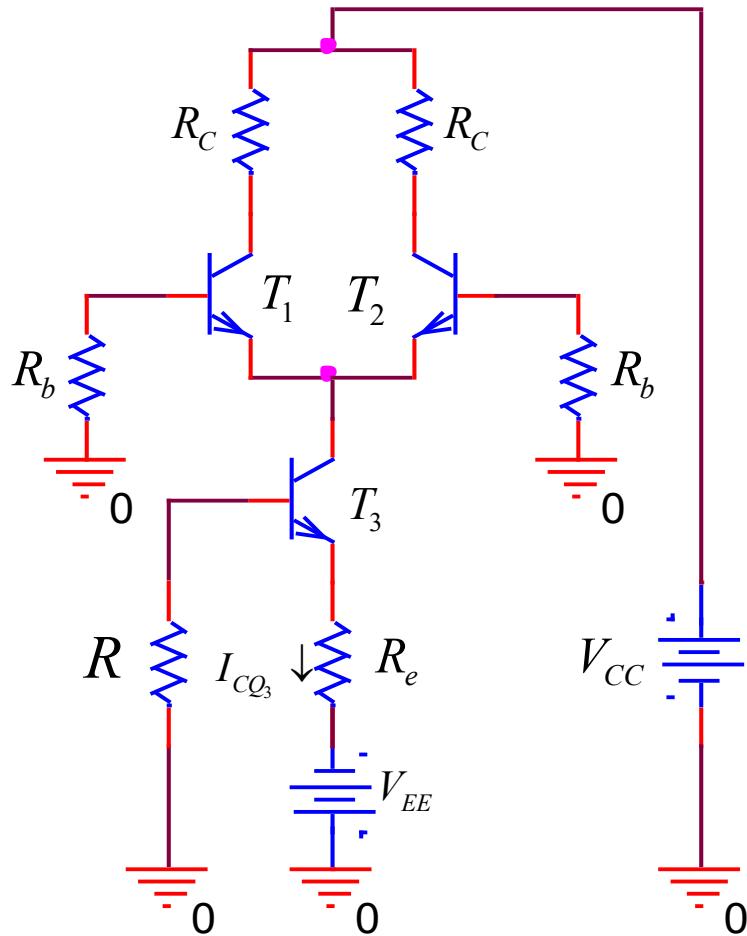
$$V_{EE} - \frac{I_{CQ_3}}{\beta_3} R - V_{BE_3} - I_{CQ_3} R_e = 0$$

$$V_{EE} - V_{BE_3} = \frac{I_{CQ_3}}{\beta_3} R + I_{CQ_3} R_e$$

$$V_{EE} - V_{BE_3} = I_{CQ_3} \left( \frac{R}{\beta_3} + R_e \right)$$

$$I_{CQ_3} = \frac{V_{EE} - V_{BE_3}}{\frac{R}{\beta_3} + R_e} = 2I_{CQ_1} = 2I_{CQ_2}$$

# Amplificador Diferencial.



*Análisis en corriente continua:*

$$V_{CEQ_1} = V_{C_1} - V_{E_1}$$

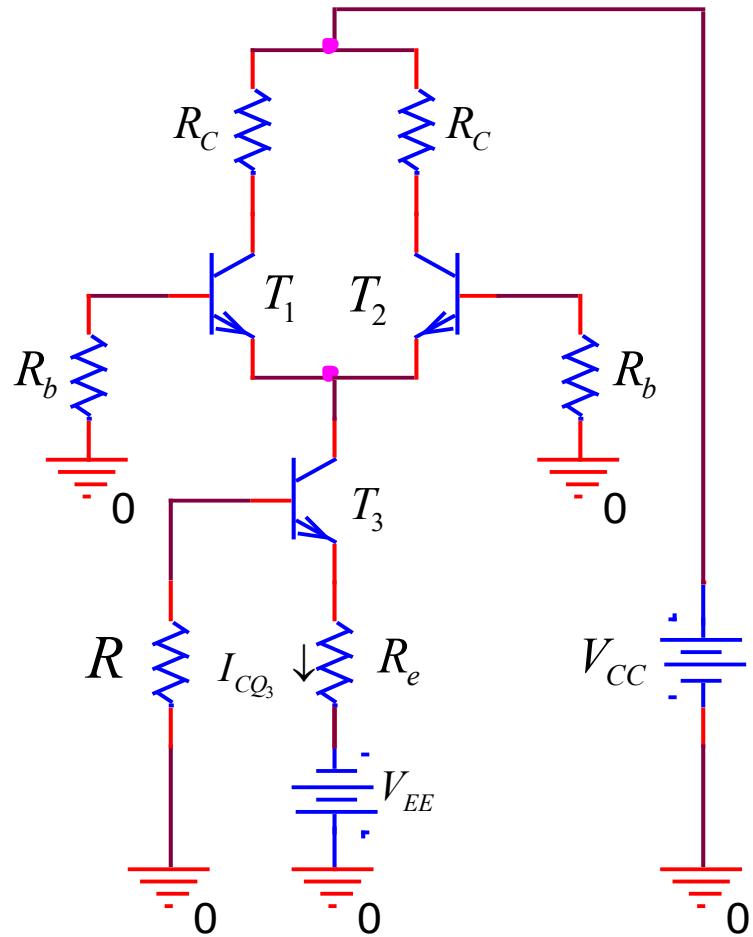
$$V_{C_1} = V_{CC} - I_{CQ_1} R_C$$

$$V_{E_1} = V_{E_2} = -\frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b - V_{BE_1}$$

$$V_{CEQ_1} = V_{CC} - I_{CQ_1} R_C - \left( -\frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b - V_{BE_1} \right)$$

$$V_{CEQ_1} = V_{CC} - I_{CQ_1} R_C + \frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b + V_{BE_1} = V_{CEQ_2}$$

# Amplificador Diferencial.



*Análisis en corriente continua:*

$$V_{CEQ_3} = V_{C_3} - V_{E_3}$$

$$V_{C_3} = -\frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b - V_{BE_1}$$

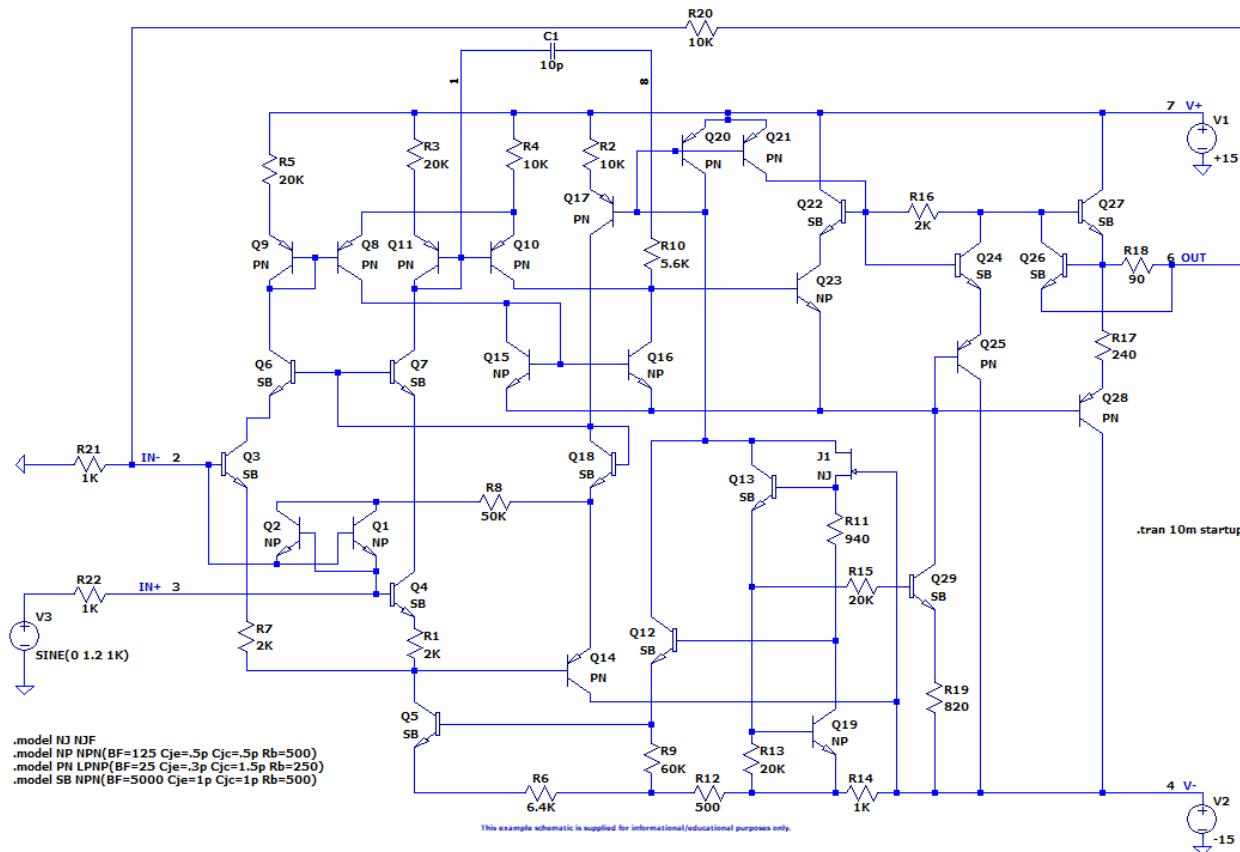
$$V_{E_3} = -V_{EE} + I_{CQ_3} R_e$$

$$V_{CEQ_3} = -\frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b - V_{BE_1} - (-V_{EE} + I_{CQ_3} R_e)$$

$$V_{CEQ_3} = -\frac{I_{CQ_1}}{\beta} R_b - V_{BE_1} + V_{EE} - I_{CQ_3} R_e$$

# Tarea

Simule en LT Spice el amplificador operacional LM308 que viene de ejemplo. Verifique su funcionamiento considerando señales de entrada a modo común y a modo diferencial.



# ELECTRONICA APLICADA I

Profesor Titular Ing. Fernando Cagnolo

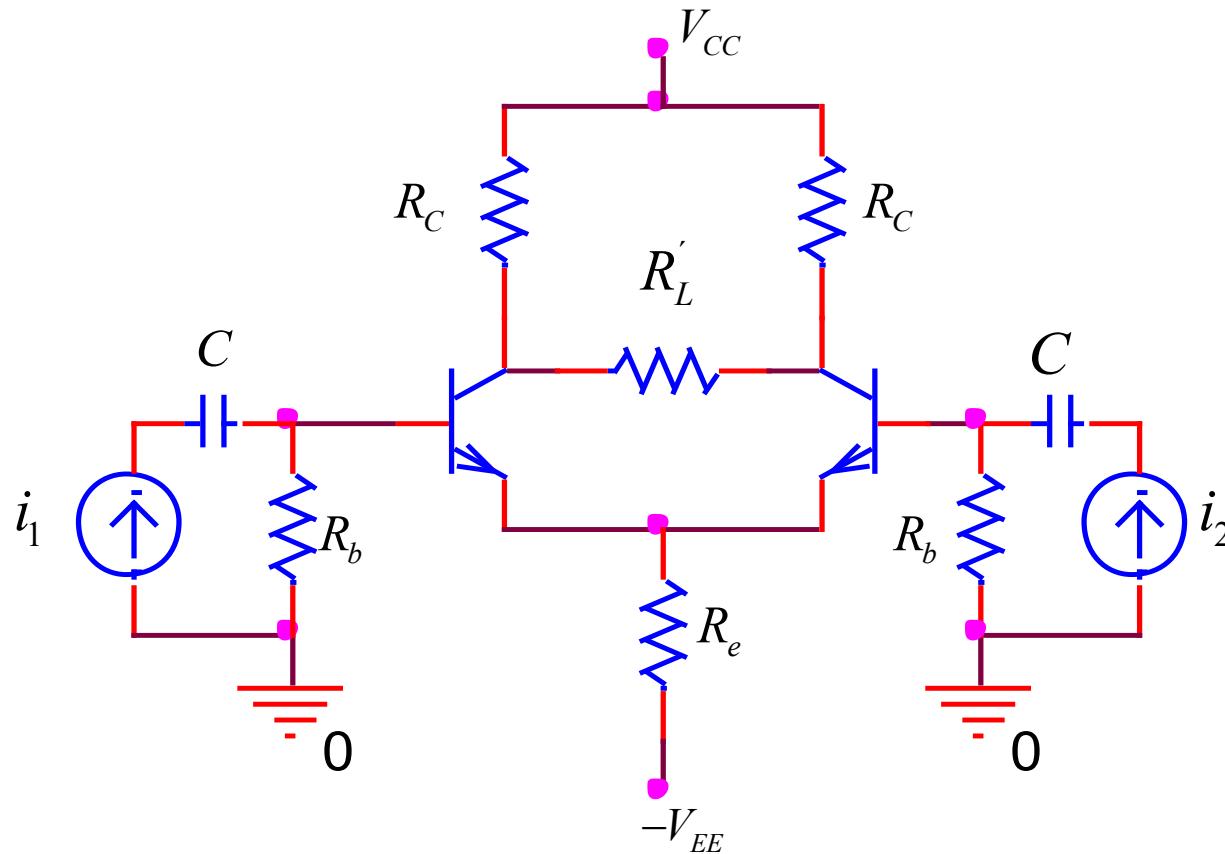
Profesor Adjunto Dr Ing Guillermo Riva

## Amplificador Diferencial parte II.

- Salida simétrica.
- Circuito equivalente reflejado al emisor.
- Conversión de la fuente de corriente en fuente de tensión.
- Definiciones.
- Expresión de  $i_1$  e  $i_2$  en función de las corrientes  $i_c$  e  $i_d$ .
- 1º caso.
- 2º caso.
- Obtención de  $i_{e_1}$  e  $i_{e_2}$ .
- Obtención de la diferencia  $i_{e_2} - i_{e_1}$ .
- Obtención de  $i_{L_{1-2}}$ .
- Cálculo de RRMC.
- Impedancia de salida.
- Impedancia de entrada.

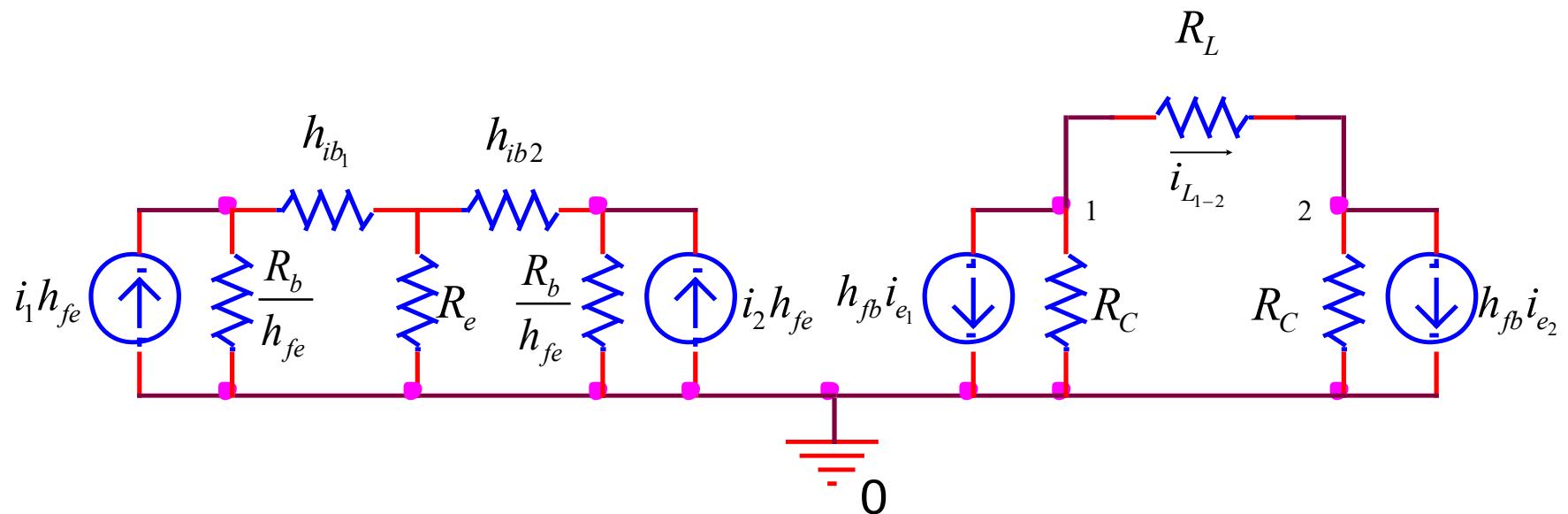
# Amplificador Diferencial.

*Salida simétrica.*



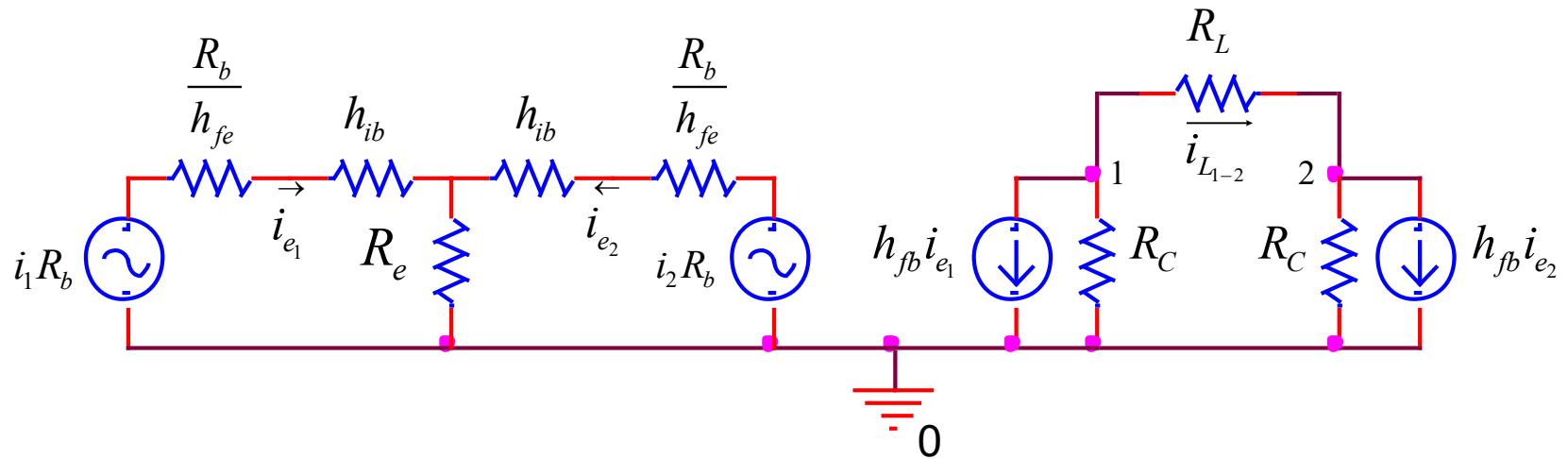
# Amplificador Diferencial.

*Circuito equivalente reflejado en el emisor.*



# Amplificador Diferencial.

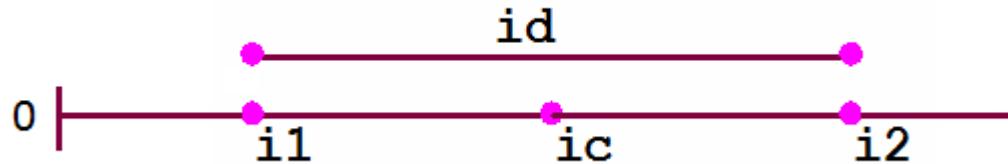
*Conversión de la fuente de corriente en fuente de tensión*



# Amplificador Diferencial.

Definimos la corriente a modo diferencial como  $i_d = i_2 - i_1$

Definimos la corriente a modo común  $i_c = \frac{i_1 + i_2}{2}$



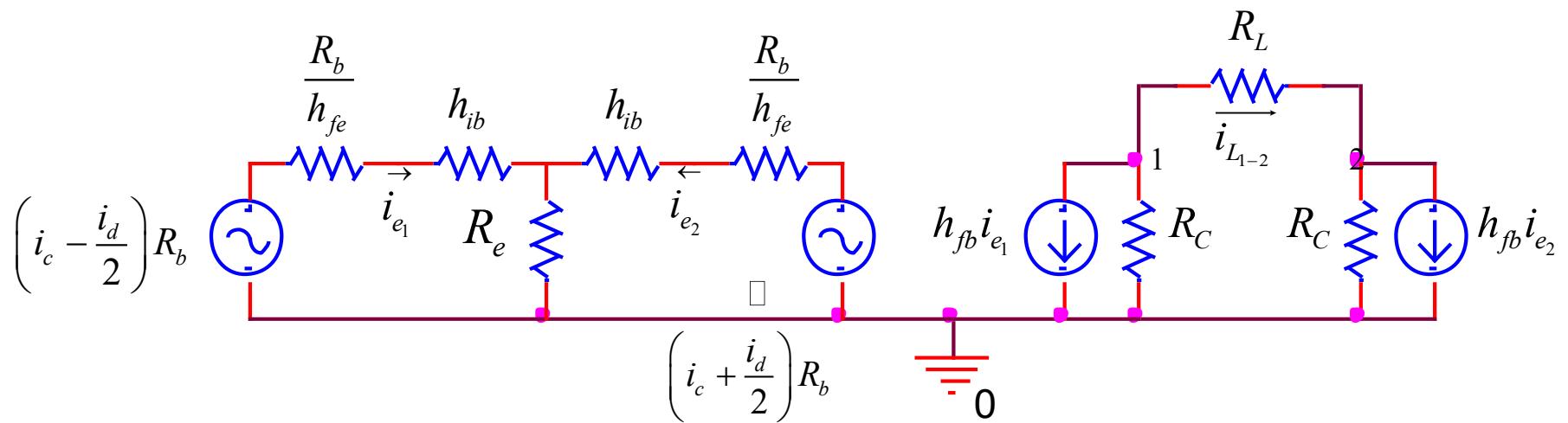
Expresamos  $i_1$  e  $i_2$  en función de  $i_c$  e  $i_d$

$$i_1 = i_c - \frac{i_d}{2}$$

$$i_2 = i_c + \frac{i_d}{2}$$

# Amplificador Diferencial.

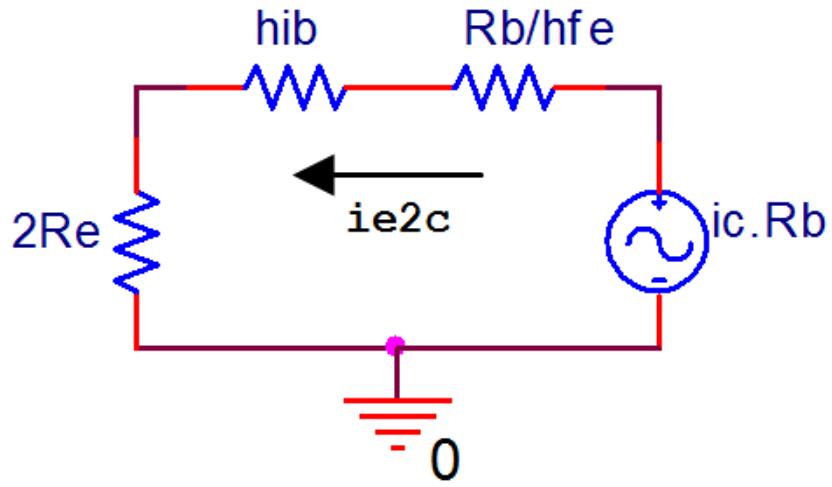
Expresamos  $i_1$  e  $i_2$  en función de  $i_c$  e  $i_d$



# Amplificador diferencial.

1<sup>er</sup> caso si:  $i_1 = i_2 \Rightarrow i_d = i_2 - i_1 = i_2 - i_2 = 0$

$$v_{Re} = 2i_{e_{2c}} \times R_e = i_{e_{2c}} \times 2R_e$$



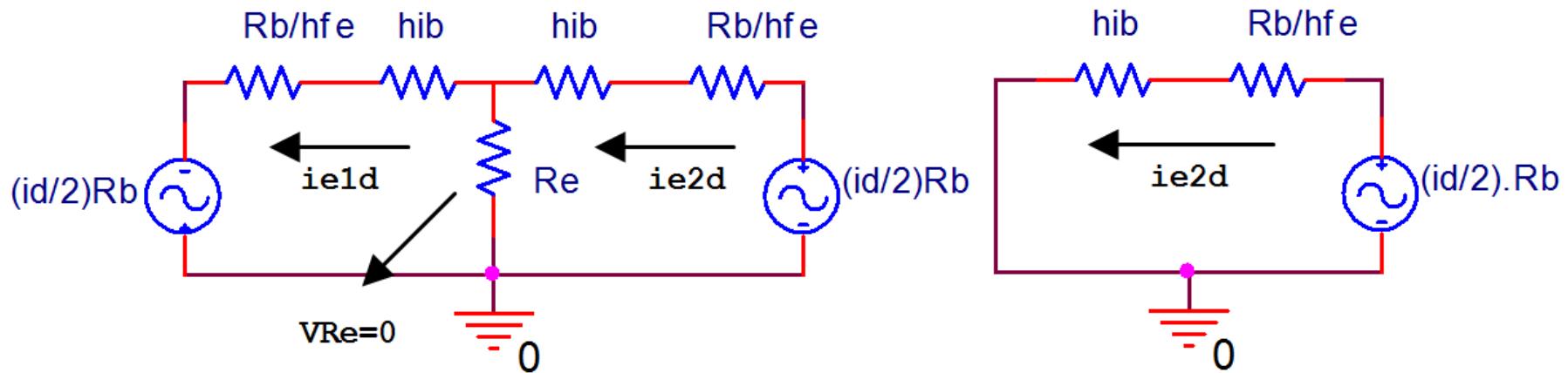
$$i_{e_{2c}} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c$$

Similarmente obtenemos  $i_{e_{1c}}$

$$i_{e_{1c}} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c$$

# Amplificador diferencial.

2<sup>do</sup> caso si:  $i_1 = -i_2$ ;  $i_c = \frac{i_1 + i_2}{2} = \frac{-i_2 + i_2}{2} = \frac{0}{2} = 0$



$$i_{e_{2d}} = \frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

$$i_{e_{1d}} = -\frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

# Amplificador diferencial.

Obtenemos  $i_{e_1}$  e  $i_{e_2}$  sumando ambas componentes  $i_c$  e  $i_d$

$$i_{e_2} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c + \frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

$$i_{e_1} = \frac{R_b}{2R_e + h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_c - \frac{R_b}{2\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

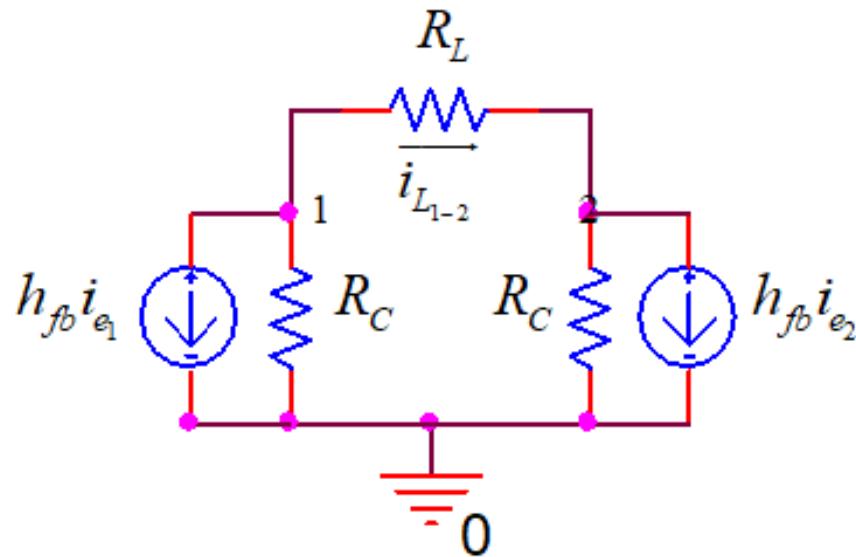
Realizamos la diferencia  $i_{e_2} - i_{e_1}$

$$i_{e_2} - i_{e_1} = \frac{R_b}{\left(h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}\right)} i_d$$

# Amplificador Diferencial.

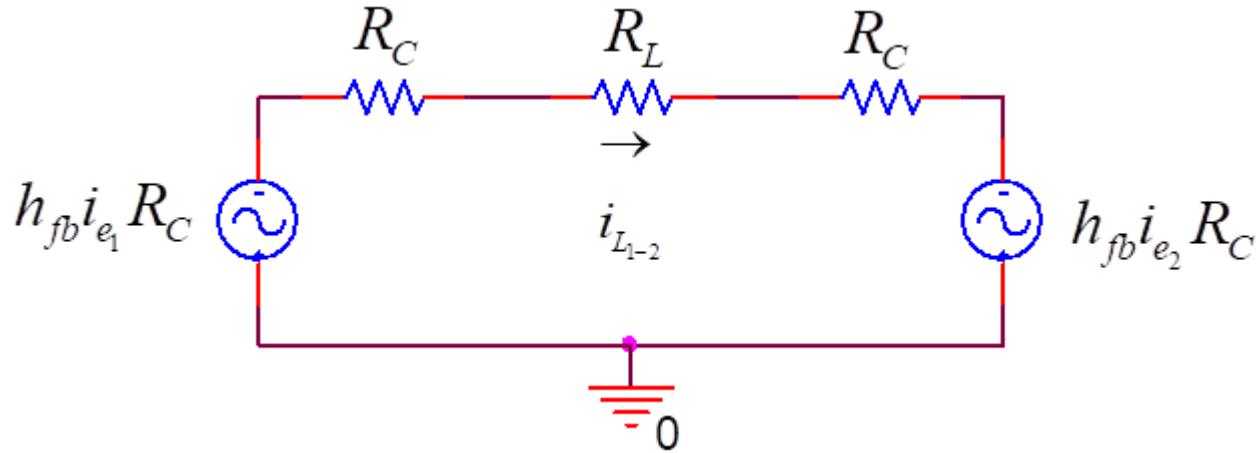
Obtención de la corriente  $i_{L_{1-2}}$  con salida diferencial.

Partiendo del circuito de salida.



# Amplificador Diferencial.

*Convertimos las fuentes de corriente en fuente de tensión.*



*Aplicamos la ley de Kirchoff de tensiones en la malla*

$$h_{fb}i_{e_2}R_C - h_{fb}i_{e_1}R_C - i_{L_{1-2}}R_C - i_{L_{1-2}}R_L - i_{L_{1-2}}R_C = 0$$

*Despejamos  $i_{L_{1-2}}$*

$$i_{L_{1-2}} = \frac{h_{fb}i_{e_2}R_C - h_{fb}i_{e_1}R_C}{2R_C + R_L} = \frac{h_{fb}R_C}{2R_C + R_L}(i_{e_2} - i_{e_1})$$

## Amplificador diferencial.

$$i_{L(1-2)} = h_{fb} \frac{R_C}{2R_C + R_L} (i_{e_2} - i_{e_1})$$

Reemplazando  $i_{e_2} - i_{e_1}$  por el valor obtenido anteriormente

$$i_{L(1-2)} = h_{fb} \frac{R_C}{2R_C + R_L} \times \underbrace{\frac{R_b}{h_{ib} + \frac{R_b}{h_{fe}}} i_d}_{A'_d} \quad \text{donde } A'_c = 0$$

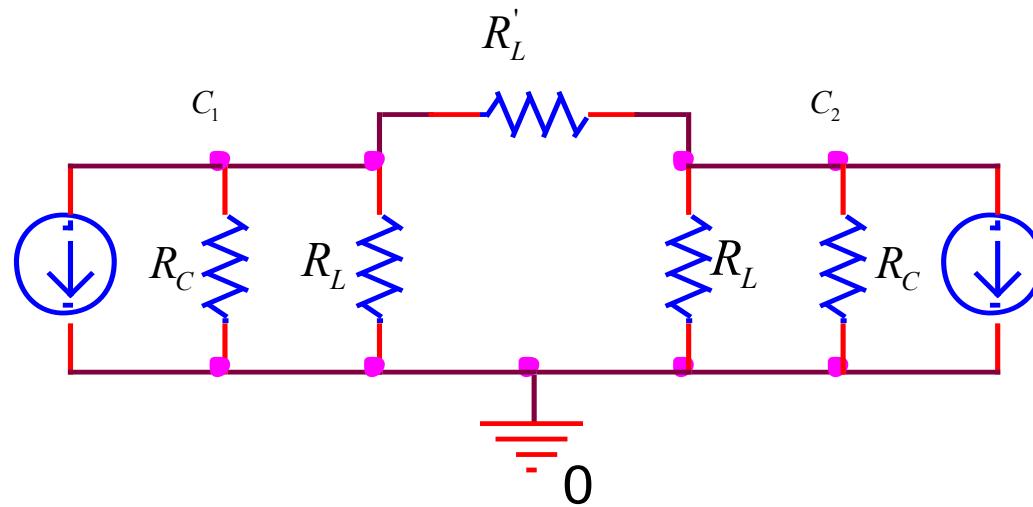
Por último obtenemos la relación de rechazo a modo común.

$$RRMC = \frac{A'_d}{A'_c} = \frac{A'_d}{0} = \infty$$

# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de Salida.*

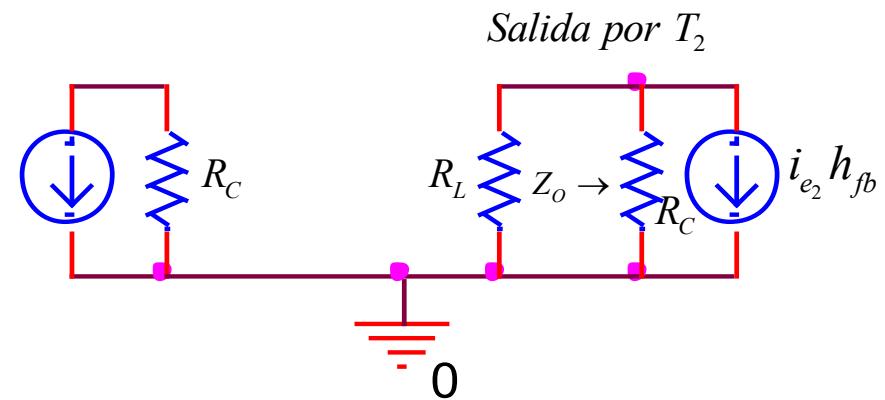
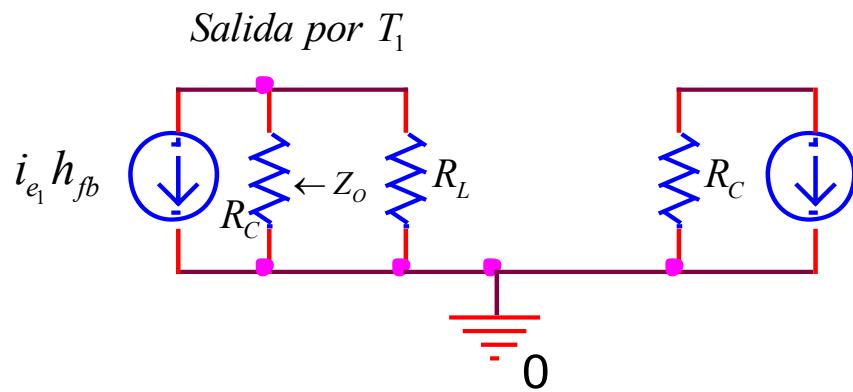
*Distintas formas de conectar la carga.*



# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de salida*

*Carga conectada en forma asimétrica.*



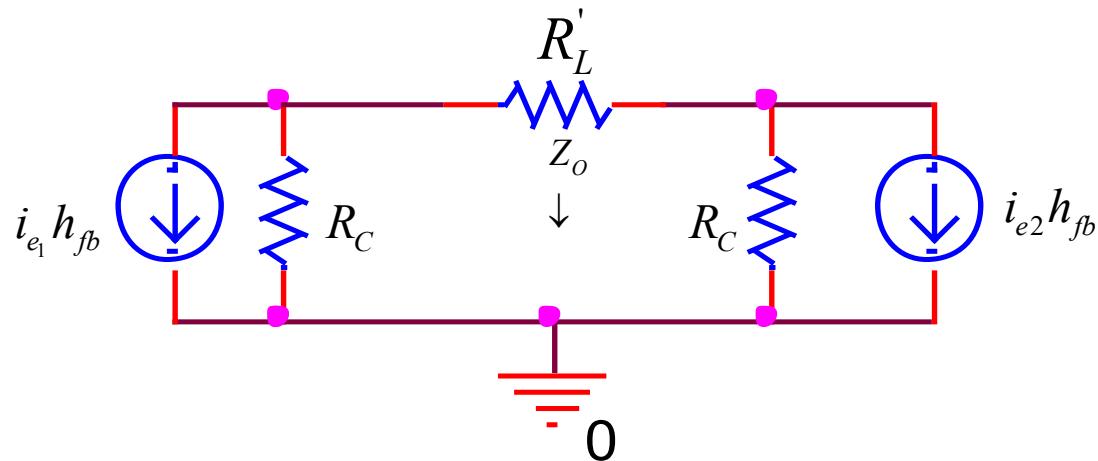
$$Z_o = R_C$$

$$Z_o = R_C$$

# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de salida*

*Carga conectada en forma Simétrica*

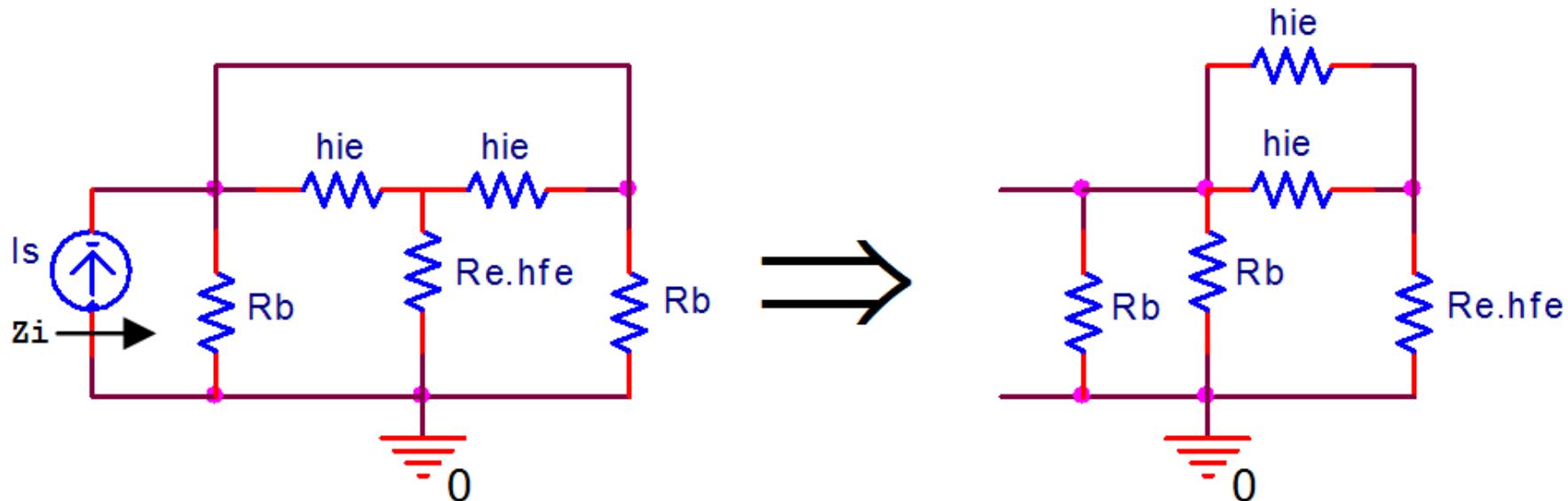


$$Z_o = 2R_C$$

# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de entrada*

*Entrada común :*

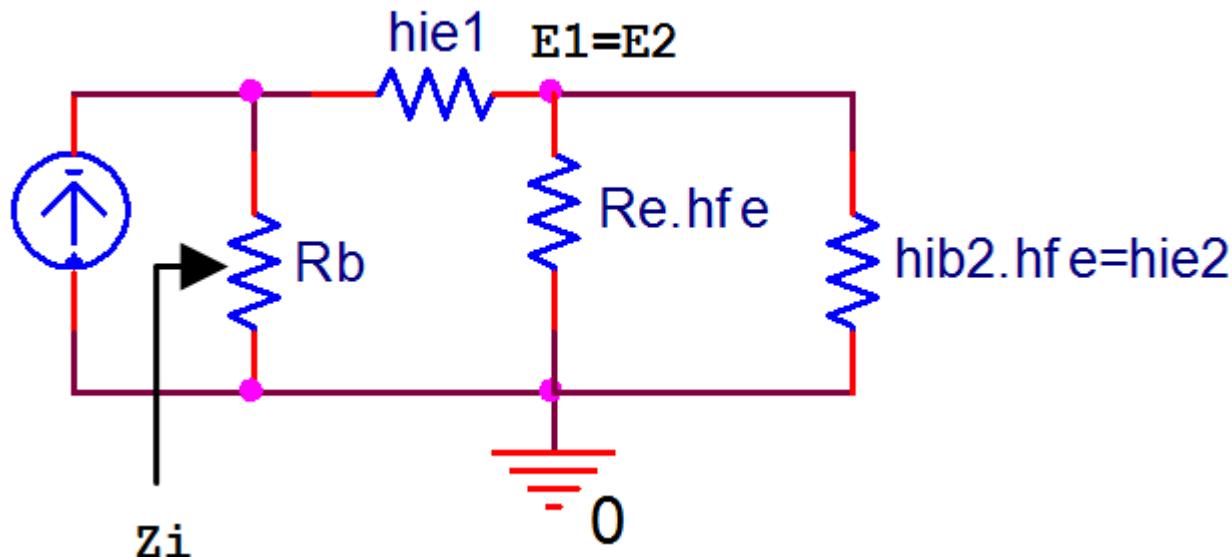


$$Z_i = \frac{R_b}{2} // \left( \frac{h_{ie}}{2} + R_e h_{fe} \right)$$

# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de entrada*

*Entrada Asimétrica*

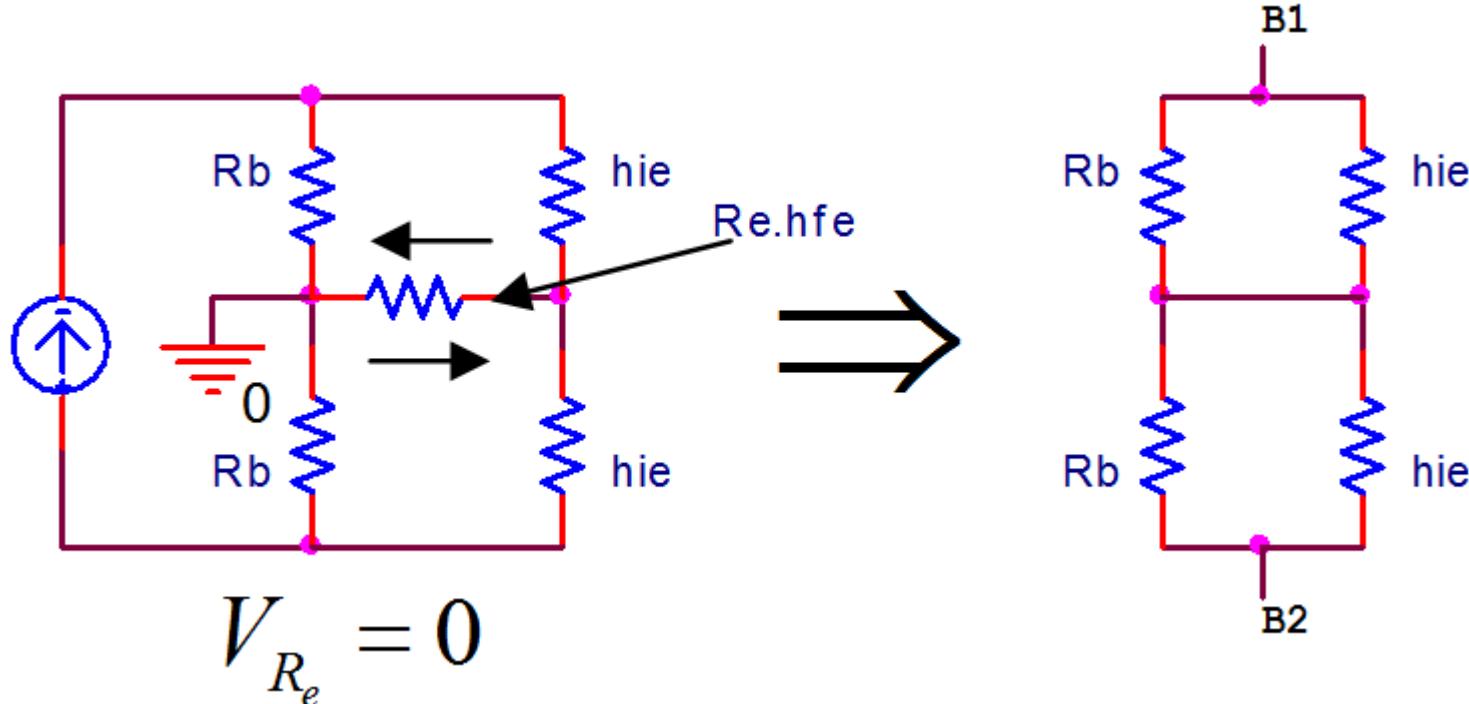


$$Z_i = R_b // \left[ h_{ie} + (R_e h_{fe} // h_{ie}) \right]$$

# Amplificador Diferencial.

*Impedancia de entrada.*

*Entrada diferencial.*



$$Z_i = R_b // h_{ie} + R_b // h_{ie} = 2(R_b // h_{ie})$$

# Bibliografía

- **Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados,**
- Donald L. Schilling-Charles Belove.