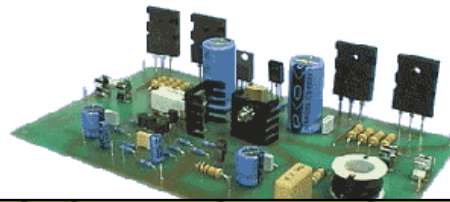




Tecnología Electrónica

Capítulo 5: **Amplificadores Multietapa y Diferenciales.**



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Índice

1. Amplificadores multietapa.
Estructura y tipos de acoplo.
2. Pares de transistores.
Cascode, Darlington y Diferencial
3. Amplificadores integrados
4. Fuentes de corriente
Espejos. Fuentes Wilson y Widlar. Fuentes múltiples
5. Amplificadores diferenciales
Modos y modelos. Análisis en gran y pequeña señal. CMRR.
6. Amnplificadores con cargas activas

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



1. Amplificadores multietapa: motivación

- ❑ Configuraciones básicas → características en señal limitadas.
 - Es raro que una sola etapa satisfaga todas las especificaciones necesarias
 - *ganancias, impedancias, márgenes dinámicos, etc.*

- ❑ Los amplificadores prácticos suelen ser **multietapa**
 - Un amplificador *multietapa* está constituido por un conjunto de amplificadores básicos conectados entre sí.

- ❑ Objetivos de un diseño multietapa, muy variados.
 - Obtener una **ganancia global** mayor que con una sola etapa.
 - Obtener unas **impedancias** en **entrada** y **salida**, adecuadas a la aplicación.
 - **Adaptar las características de la señal** a las especificaciones

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.1. Amplificadores multietapa: estructura

□ Una estructura típica

- Tres etapas: **de entrada**, **intermedia**, y **de salida**.



□ Criterios de diseño

■ Etapa de **entrada**:

- *Adaptarse al generador de señal. Parámetros: impedancia de entrada, niveles de ruido, etc.*

■ Etapa **intermedia**:

- *Ganancia adicional. Adaptar niveles entre etapas de entrada y salida.*

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.2. Acoplo entre etapas

- Un problema a resolver
 - El **acoplo** (forma de conexión... →) entre etapas:



- Necesidad
 - Transferir la señal a través de todas las etapas.
- Restricciones
 - No interesa modificar los puntos de trabajo ni alterar las características de cada etapa, del generador y de la carga.

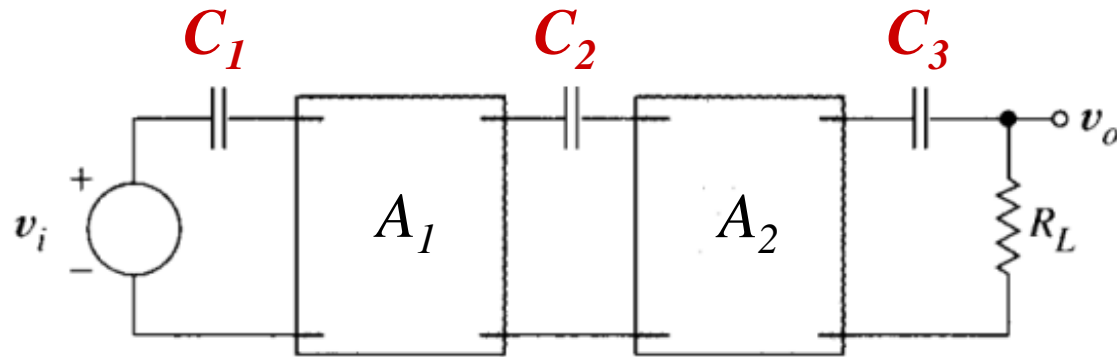
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.2. Tipos de acoplo. Acoplo capacitivo.

- ❑ Tipos básicos: capacitivo, inductivo y directo
 - El acoplo óptico es posible, aunque no es sencillo de realizar.
- ❑ Acoplo **capacitivo**
 - Utiliza un condensador para aislar en DC (polarización) y dejar pasar señales en cierta banda de frecuencias.



La impedancia de C es tal que

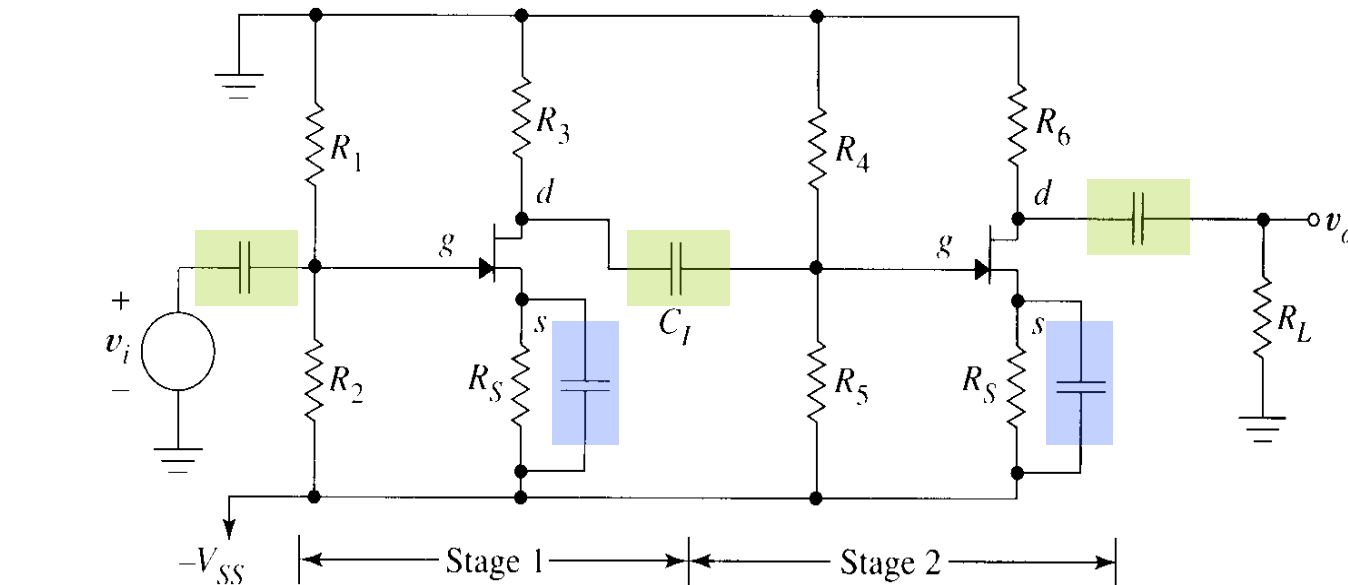
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

1.2. Tipos de acoplo. Nomenclatura

- Configuran la estructura del circuito en señal. Un ejemplo:
 - C. de Acoplo:** conecta dos etapas o deja pasar la señal a su través.
 - C. de Desacoplo:** elimina del cto. en señal un elemento dado.



Cartagena99

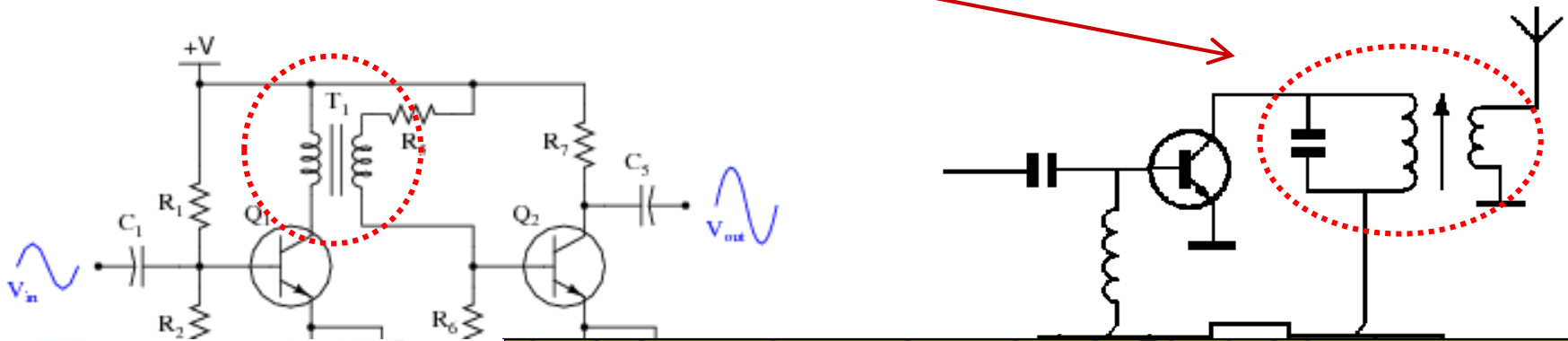
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

1.2. Tipos de acoplo. Acoplo inductivo.

□ Acoplo **inductivo**

- Emplea transformadores, elementos electromagnéticos, etc.
- En bajas frecuencias (p.e. audio) no interesa mucho, por el elevado peso y volumen de los transformadores necesarios.
- Es conveniente en **altas frecuencias** o si se requiere **aislamiento galvánico** entre elementos o etapas del circuito.
- Puede formar un **filtro resonante** con una LC adecuada.



CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

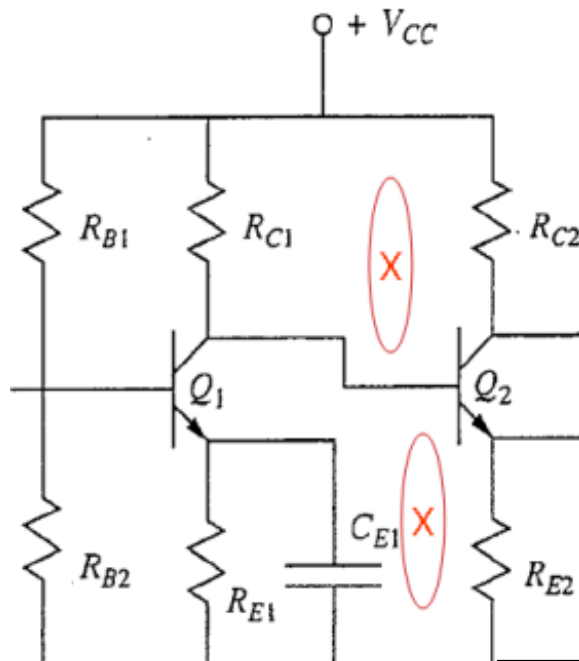
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

1.2. Tipos de acoplo. Acoplo directo.

□ Acoplo **directo**

- La salida de una etapa se une eléctricamente a la entrada de la siguiente etapa.



□ Ventajas:

- Utiliza menos componentes para polarizar los elementos activos.
- Permite amplificar desde frecuencia cero.
- Es esencial en amps. de continua, como el Operacional.

□ Inconvenientes (*relativos...*):

- Los puntos de trabajo de los

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

2. Pares de transistores. Par **Cascodo**

❑ Ciertas combinaciones de **dos** transistores con **acoplo directo** tienen propiedades peculiares. Algunos ejemplos:

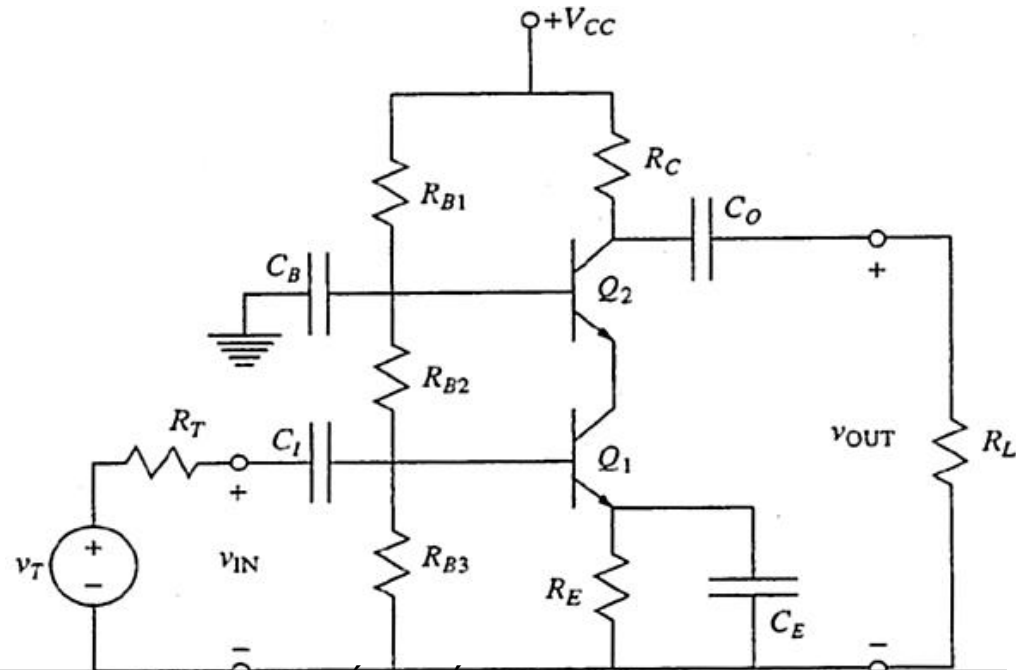
■ Par cascodo, par diferencial, *Darlington*, PNP compuesto, etc.

❑ Par **cascodo**. (figura adjunta)

■ Combinación en serie para señal variable (*cascada*), de un emisor común (Q1) y un base común (Q2)
→ (EC-BC)

■ Configuración útil en Alta Frecuencia

■ En frecuencias medias se comporta como



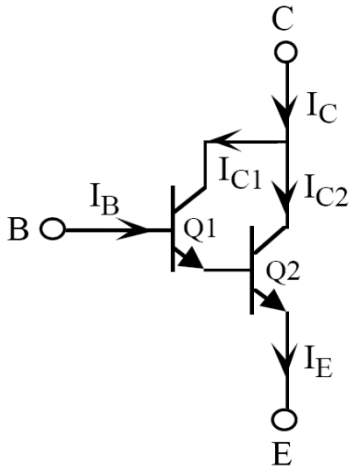
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

2. Par **Darlington**

- El Par Darlington equivale a **un único transistor** compuesto
 - El Darlington básico tiene tres terminales exteriores: E, B y C
 - *Es como un BJT con el doble de VBE en conducción y una beta muy alta*



$$V_{BE_Darlington} = V_{BED} = 2V_{BE}$$

$$I_{CD} = I_{C1} + I_{C2} = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 I_{B2}$$

$$I_{BD} = I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_{E1} = (1 + \beta_1) I_{B1} \approx \beta_1 I_{B1}$$

$$\beta_D = \frac{I_{CD}}{I_{BD}} \approx \beta_1 + \beta_1 \beta_2$$

$$\beta_D \approx \beta_1 \beta_2$$

- Hay versiones con un cuarto terminal: entre E1 y B2.
 - *En este caso, se analiza mejor como DOS BJT en serie.*

- El Darlington se usa mucho como **switch** (interruptor)

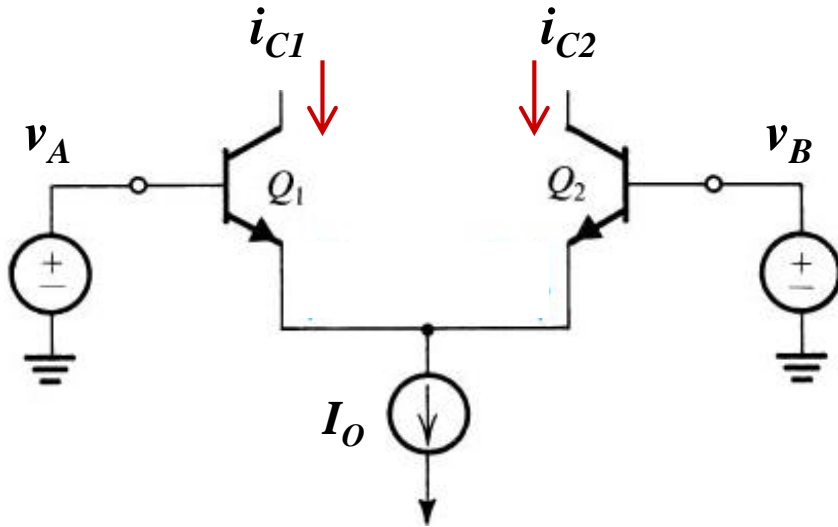
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

- Busque en internet "Darlington Array" y aplicaciones.

2. Par diferencial.



- Conjunto de dos transistores:
 - Unidos por los terminales de referencia de ambos Q's
 - **BJT**: emisores unidos
→ *Par acoplado por emisor.*
 - **FET**: fuentes unidas
→ *Par acoplado por fuente.*

- **Polarización** por corriente en el punto común: generador I_0
- Estructura **simétrica**, referida al punto común.
- **Dos entradas**: una en cada transistor (base o puerta).
- **Dos salidas**: las corrientes de cada transistor (colector o drenador).

□ El par diferencial es una configuración esencial en amplificación

Cartagena99

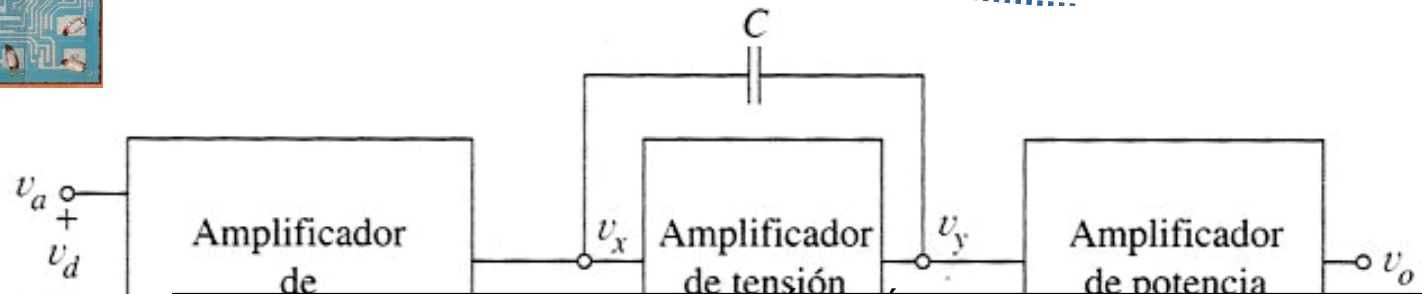
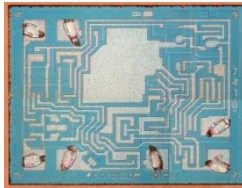
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

3. Amplificadores integrados. Introducción.

Amplificadores integrados

- En un solo IC, incluyen todo lo necesario:
 - Polarización, etapas de amplificación, circuitos de protección, etc.
- Un ejemplo típico: el AO tipo **741** → organizado en tres etapas
 - Acoplo directo entre ellas, luego es un **amplificador de continua**.
 - **Nota:** la función de C (capacidad Miller) se verá oportunamente.



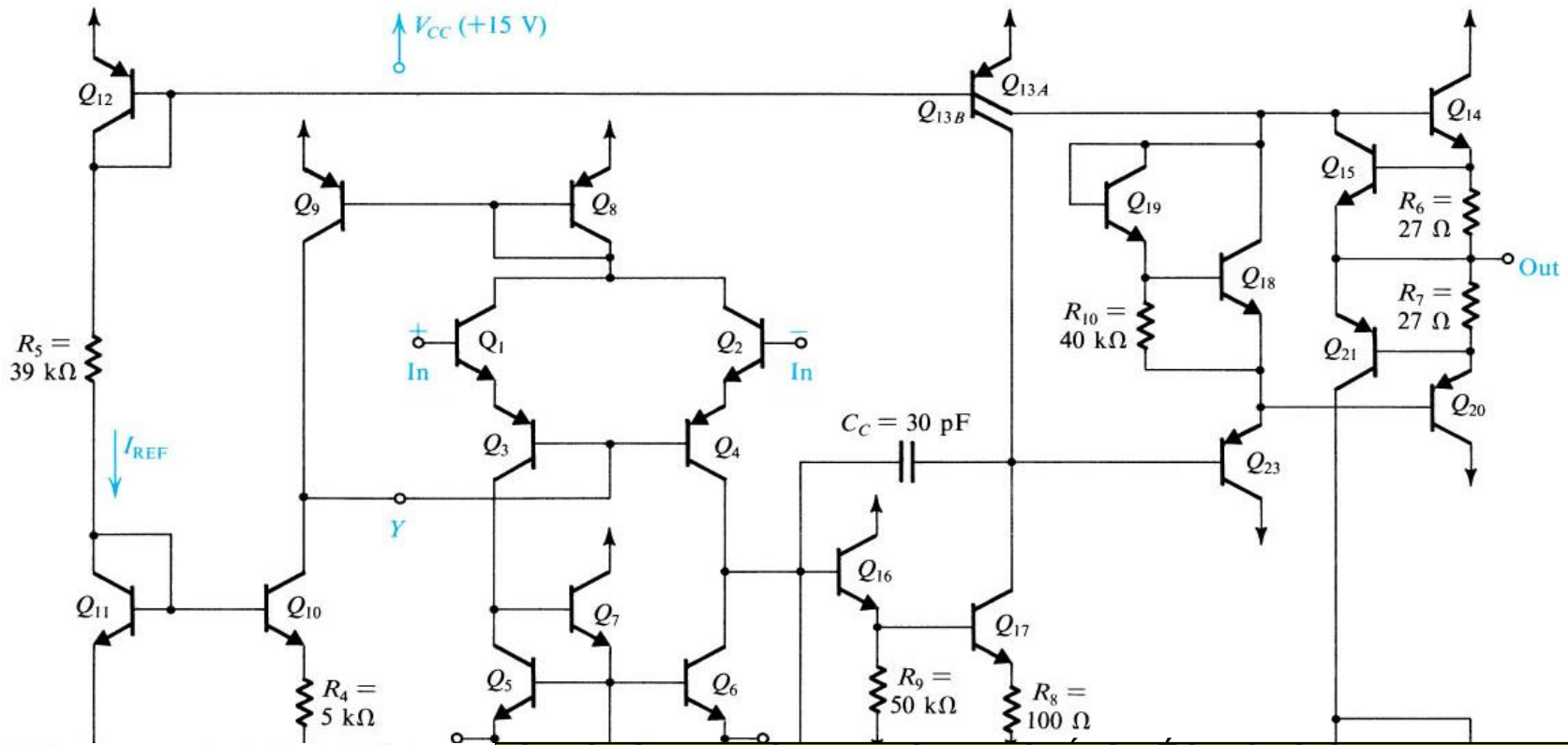
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

3. Ejemplo: estructura del AO 741 (detalle)

- El circuito interno del 741 es aparentemente muy complejo...



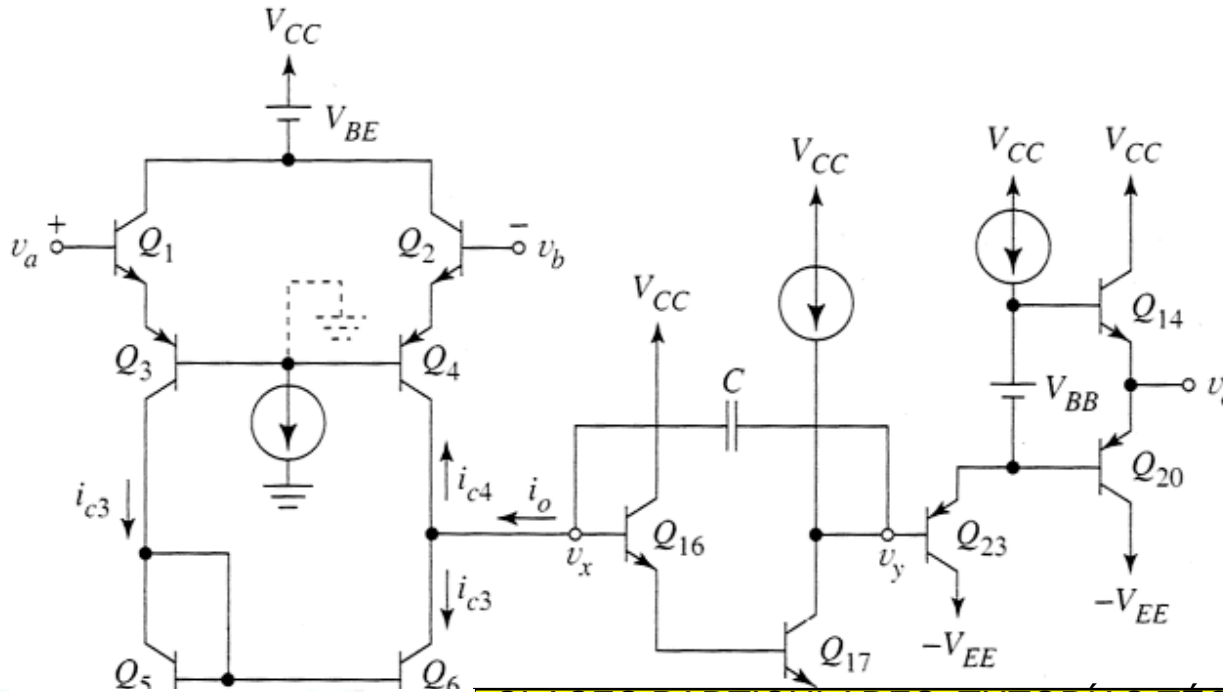
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

3. Ejemplo: estructura del AO 741 (bloques)

- Puede dividirse en **bloques funcionales** muy claros:
 - Redes de polarización, mediante **fuentes de corriente**.
 - Etapas de amplificación estándar: **diferencial**, EC, **potencia**.



Cartagena99

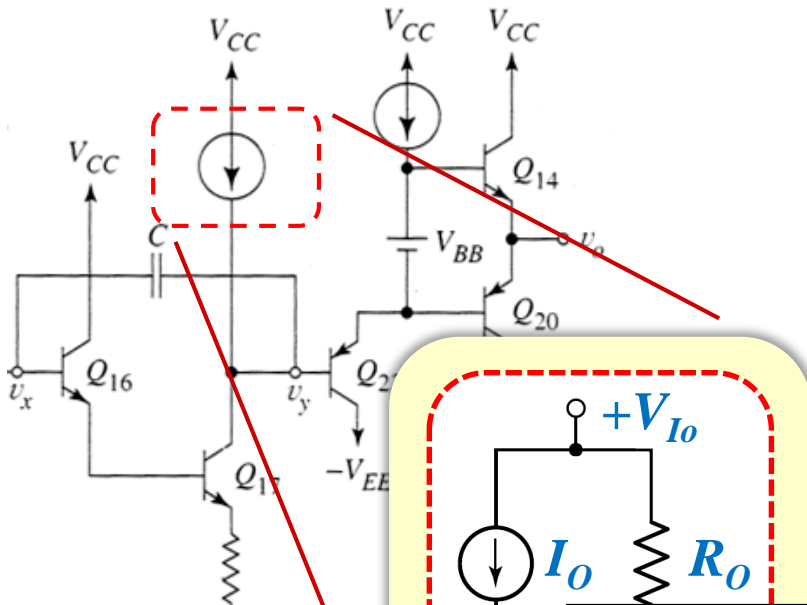
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



4. Fuentes de corriente

- ❑ La polarización por fuentes de corriente es frecuente en los CI's
 - Facilitan puntos de trabajo Q muy estables
 - En CI's, los TRT's ocupan menos superficie de chip que los resistores \rightarrow mayor densidad de integración.



- ❑ ¿Qué les pedimos a las fuentes de corriente de polarización?
 - Corriente constante: $R_O \rightarrow \infty$
 - Tensión de trabajo, V_{I_O} , maximizada
 - Independientes de otros parámetros como: alimentación, temperatura...
 - Ocupar la menor superficie de chip posible (resistores no muy grandes)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

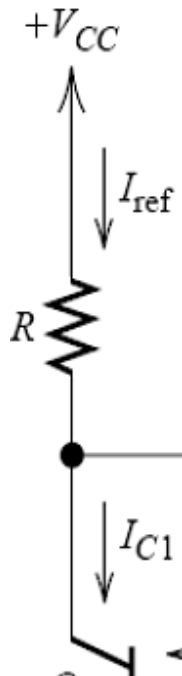
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



4.1. Espejo de corriente: circuito básico.

- El efecto 'espejo de corriente' se da cuando dos TRTs comparten variable de control, haciendo uno de ellos de referencia.
 - En el "espejo de corriente" con BJT, comparten la misma V_{BE} .

Si Q_1 y Q_2 son idénticos y están a la misma temperatura T :



$$\left. \begin{aligned} V_{BE1} &= V_{BE2} \\ I_{C1} &= I_S e^{(V_{BE}/V_T)} = I_{C2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} I_{C1} = I_{C2} &\Rightarrow I_{B1} = I_{B2} = \frac{I_C}{\beta} \\ I_{ref} &= I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_C + 2 \frac{I_C}{\beta} \end{aligned}$$

Si $\beta \gg 1$ se tiene:

$$I_{C1} = I_{C2} \approx I_{ref}$$

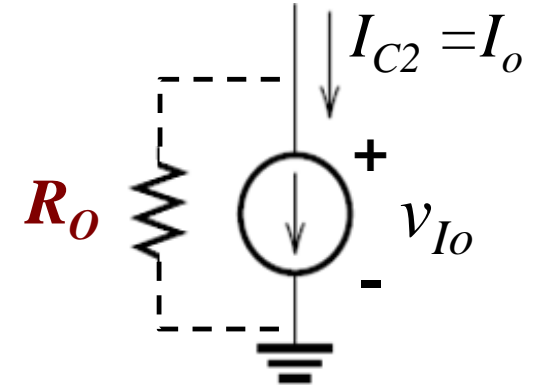
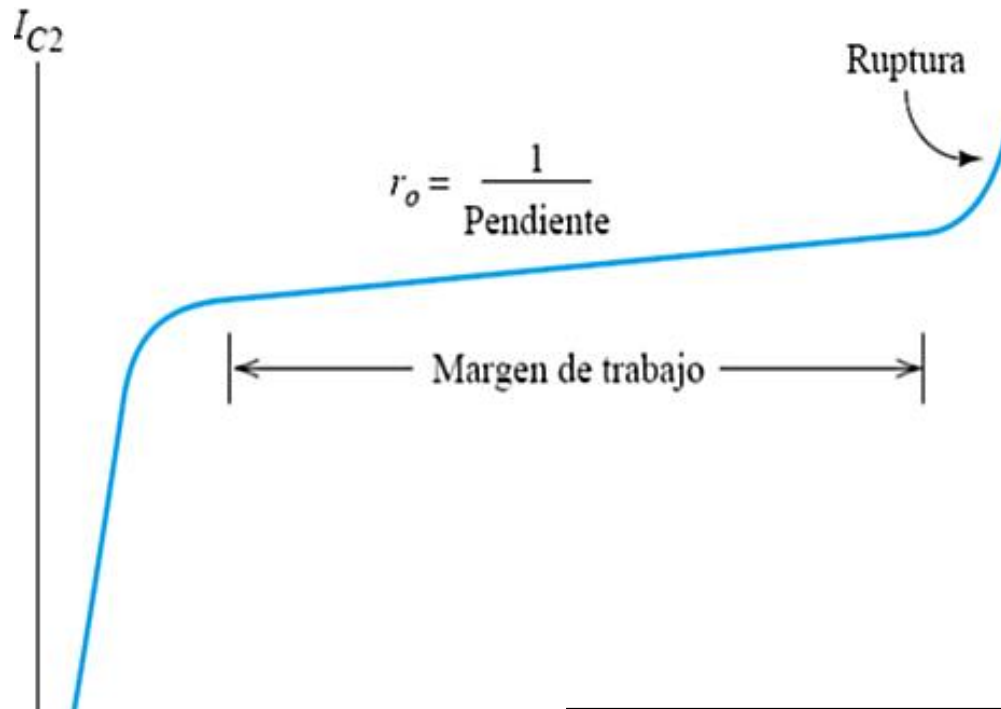
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



4.1. Espejo de corriente: otros parámetros

- ❑ Otros parámetros de la fuente: tensión de trabajo y R_o .
 - La salida v_{Io} de fuente en espejo es v_{CE2} por tanto:



Tensión mínima de trabajo:

$$v_{Io} = v_{CE2} \geq V_{CEsat}$$

Resistencia interna:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

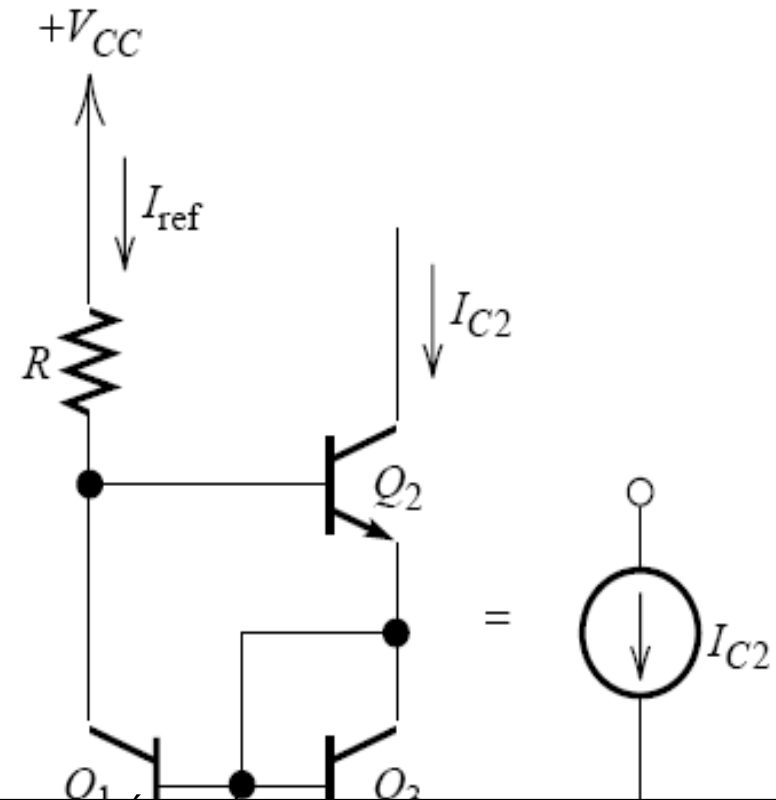
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

4.2. Fuente Wilson

- Posee una **mayor resistencia de salida** que el espejo básico
 - Las fuentes de corriente de alta resistencia, como el circuito Wilson, son muy útiles en la construcción de amplificadores diferenciales de **alto CMRR**.

$$I_O = I_{C2} \approx I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE2} - V_{BE3}}{R}$$



■ **Actividad de estudio:**

Obtenga los parámetros de interés de la fuente Wilson:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

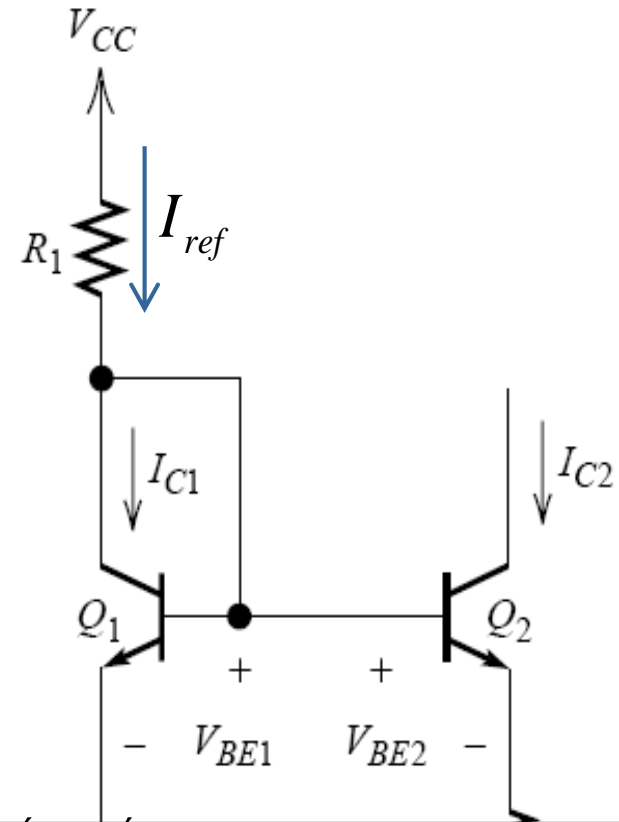
4.3. Fuente Widlar: características.

- ❑ Permite corrientes de salida de valores bajos, inferiores a I_{ref}
 - Valores bajos de corriente interesan por razones de consumo y potencia disipada.
 - Para fuentes de corriente de bajo valor, $R_1 \uparrow \uparrow \rightarrow$ el área ocupada en el chip por dicha R sería muy elevada.

Con ambos trt's iguales y en activa se tiene:

$$I_{C1} = I_S e^{\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right)} \Rightarrow V_{BE1} = V_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right)$$

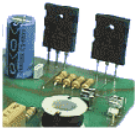
$$I_{C2} = I_S e^{\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)} \Rightarrow V_{BE2} = V_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right)$$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



4.3. Fuente Widlar: características (2).

Aproximando, considerando betas muy grandes:

$$V_{BE1} \approx V_{BE2} + R_2 I_{C2} = V_{BE2} + R_2 I_O$$

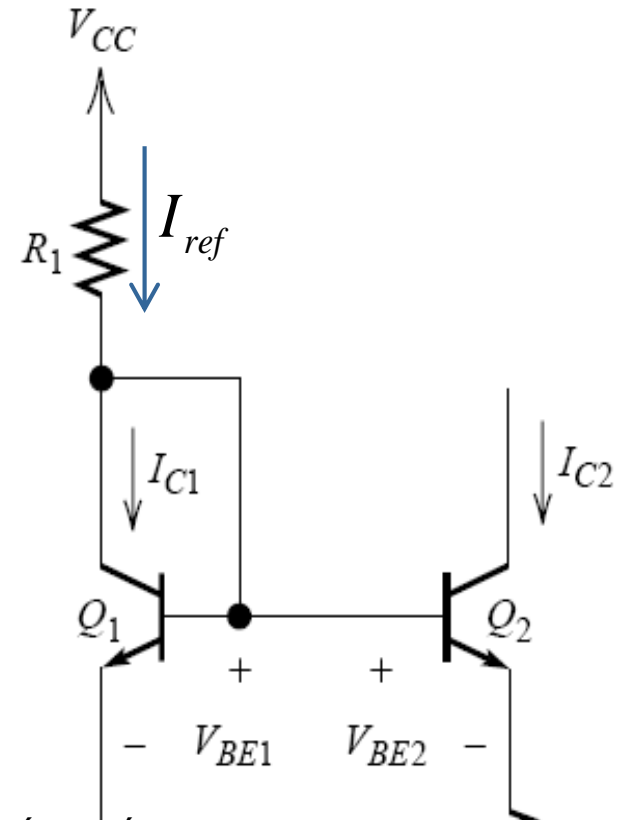
Sustituyendo V_{BE1} y V_{BE2} por sus expresiones en función de I_{C1} e I_{C2} se obtiene:

$$V_T \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_S}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_S}\right) + R_2 I_{C2}$$

y despejando R_2 :

$$R_2 \approx \frac{V_T}{I_{C2}} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right)$$

Y despreciando las corrientes de base, se



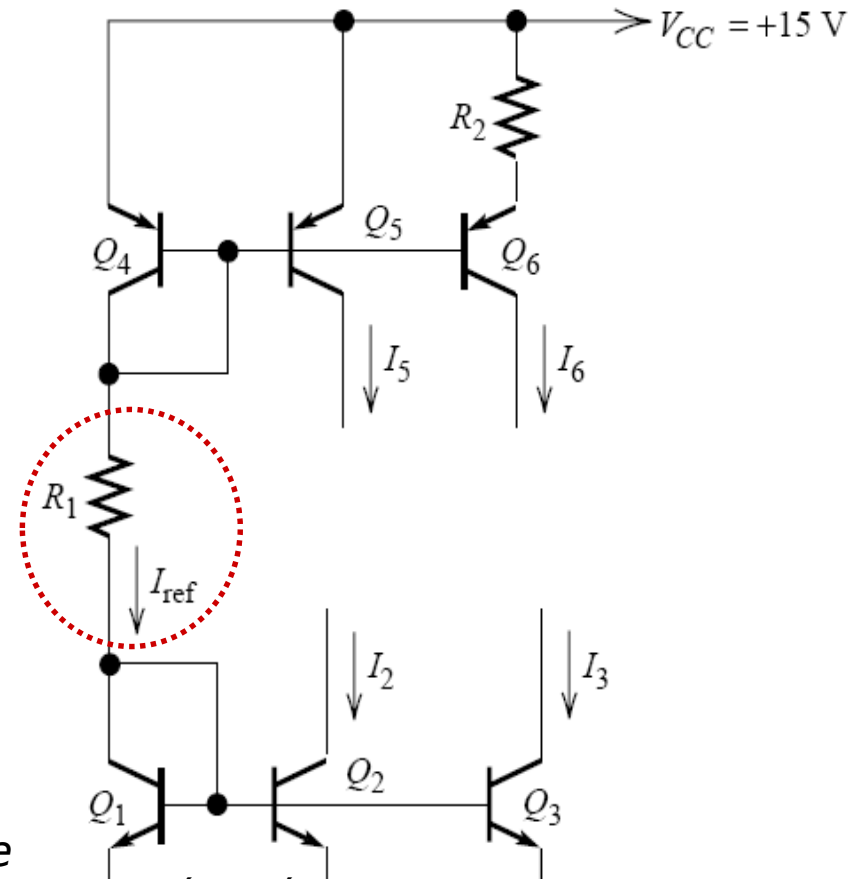
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

4.4. Fuentes múltiples

- ❑ En un amplificador integrado, varias fuentes pueden utilizar la misma corriente de referencia.
 - La corriente a través de R_1 sirve como referencia para las cuatro fuentes de corriente.
 - Q_1 y Q_2 forman un espejo de corriente básico.
 - Q_1 y Q_3 forman una fuente Widlar (donde $I_3 < I_{ref}$)
 - El mismo funcionamiento se tiene para los transistores **pnP**:
 - sólo se diferencian en el sentido de



Cartagena99

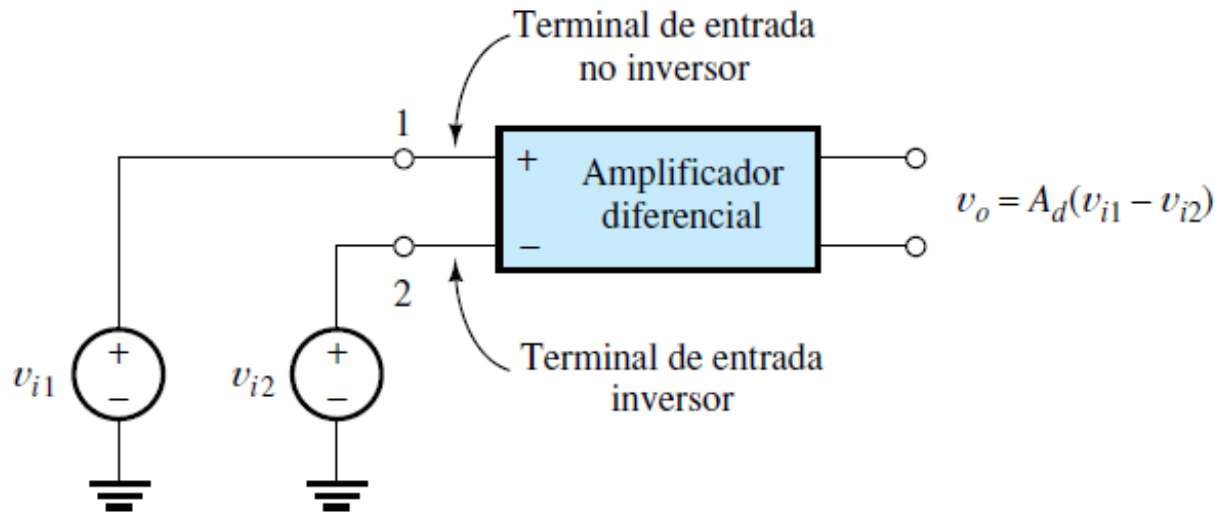
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

V

5. Amplificadores diferenciales. Introducción

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



- El modelo del amplificador diferencial es complejo

Cartagena99

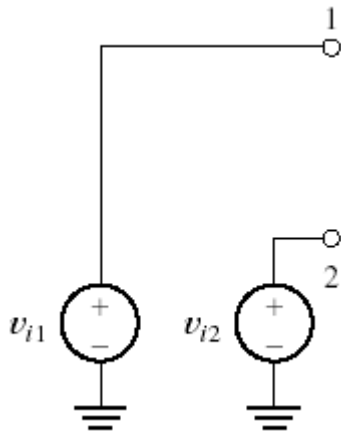
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

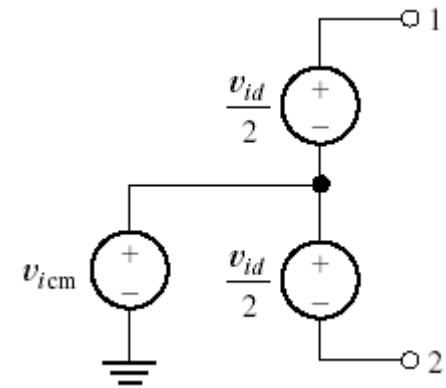
5.1. Amplificadores diferenciales: modos

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

definiciones
de ambos modos



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



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

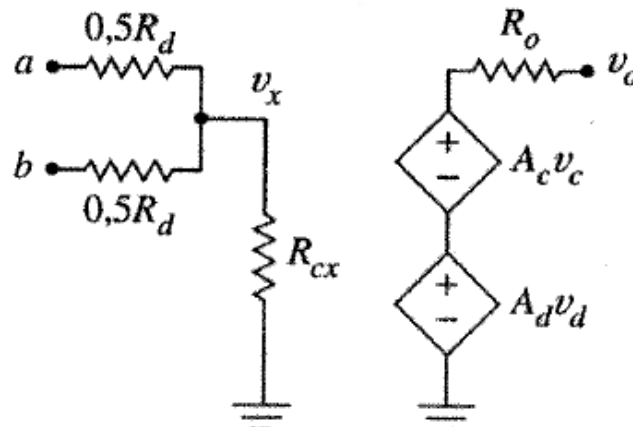
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.1. Amplificadores diferenciales: modelo

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

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

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



Normalmente:

$$A_d \gg A_c$$

$$R_{cx} \gg$$

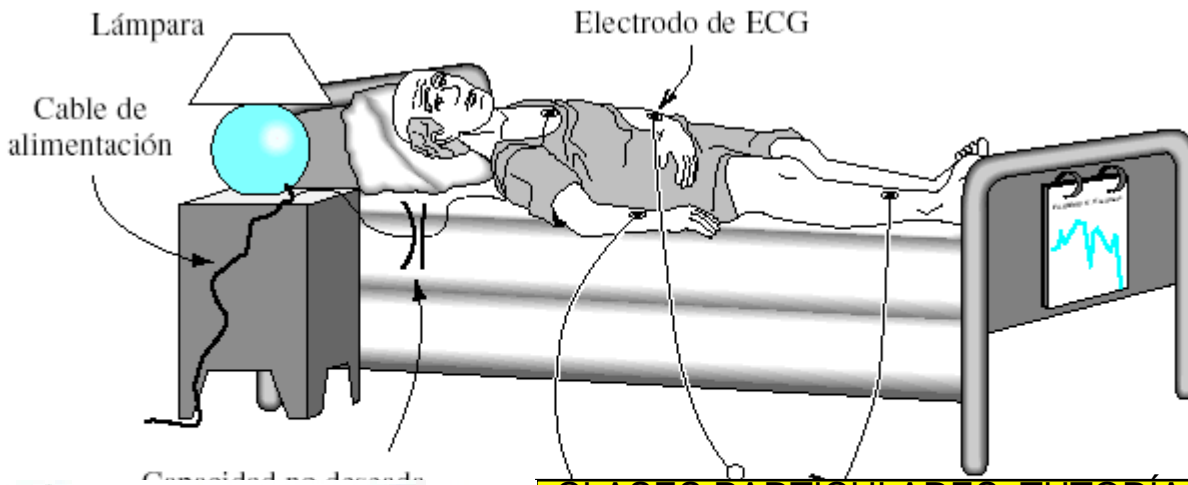
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

5.1. Amplificadores diferenciales: aplicaciones

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



Actividad:

¿Qué fuente de ruido se tiene en este caso?

¿De qué frecuencia es la señal de ruido?

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



5.1. Amplificadores diferenciales: CMRR

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

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

- ❑ Los fabricantes dan como datos A_d y CMRR (ésta, normalmente en dB)
 - Ejercicio:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.1. Amplificadores diferenciales: ejercicio

□ Ejercicio 1.38 (Malik)

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

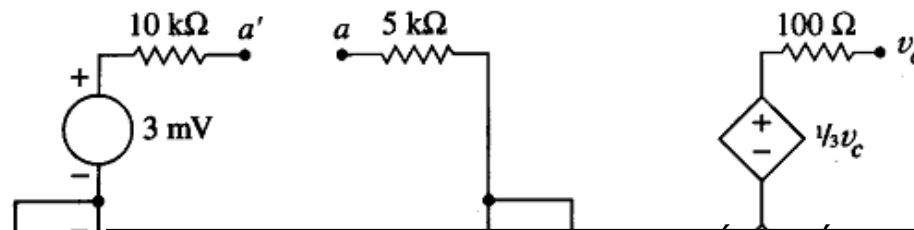
a) ¿Cuáles son los valores de A_d , RRMC, R_d y R_c ?

b) Halle la componente en modo diferencial de v_o

c) Halle el componente en modo común de v_o

d) Halle el valor de v_o

e) Halle el nuevo valor de v_o si la salida del amplificador se conecta a tierra a través de una resistencia de carga de 800Ω .



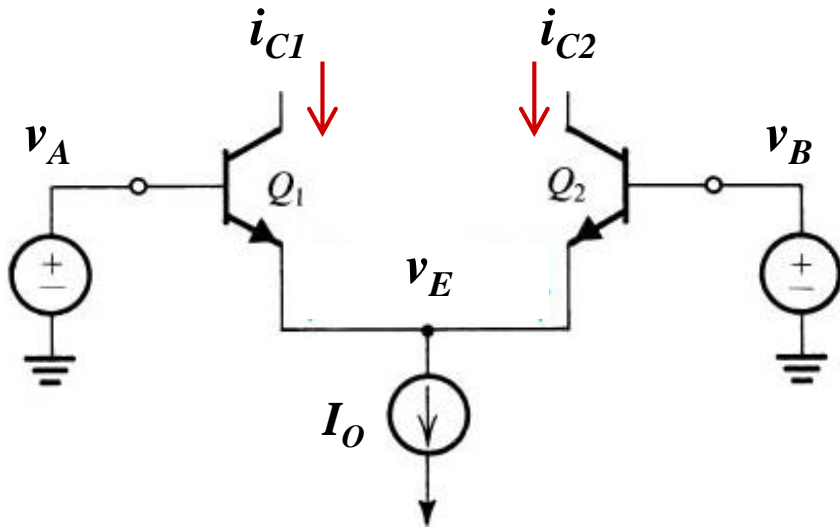
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



5.2. Par diferencial: análisis en gran señal.



- ❑ Base de los amp. diferenciales
- ❑ Funcionamiento:
 - Los transistores sólo deben funcionar en **activa** o corte.
 - Si se saturasen, dejaría de funcionar como diferencial.
 - Las salidas (colectores) han de conectarse de modo **que se garantice** la zona activa.

❑ Análisis en gran señal (*función de transferencia*):

$$i_{C1} = I_{S1} \cdot e^{v_{BE1}/V_{T1}} = I_{S1} \cdot e^{(v_A - v_E)/V_{T1}}$$

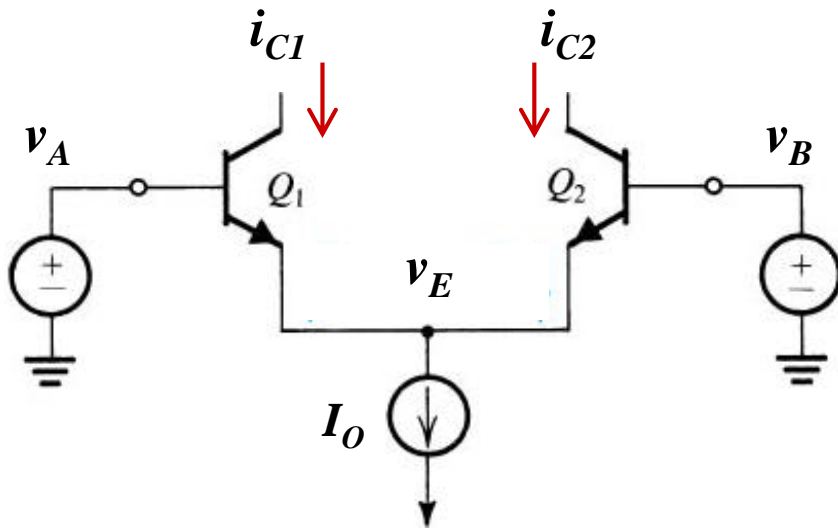
$$I_{S1} = I_{S2} = I_S$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.2. Par diferencial: análisis en gran señal.



$$i_{C1} = I_S \cdot e^{(v_A - v_E)/V_T}$$

$$i_{C2} = I_S \cdot e^{(v_B - v_E)/V_T}$$

$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{(v_A - v_B)/V_T} = e^{v_D/V_T}$$

- Aplicando 2º lema de Kirchhoff (corrientes) en emisores:

$$i_{E1} + i_{E2} = I_O \approx i_{C1} + i_{C2}$$

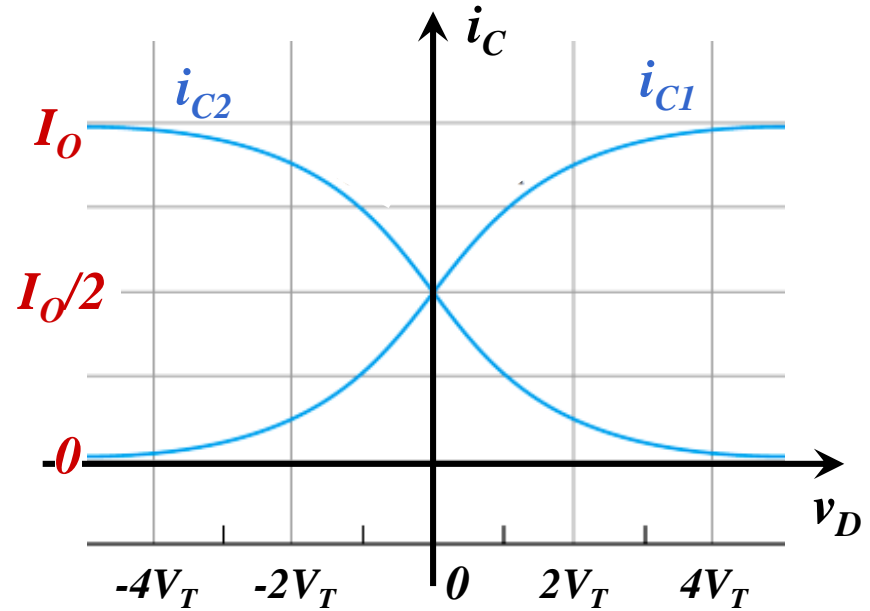
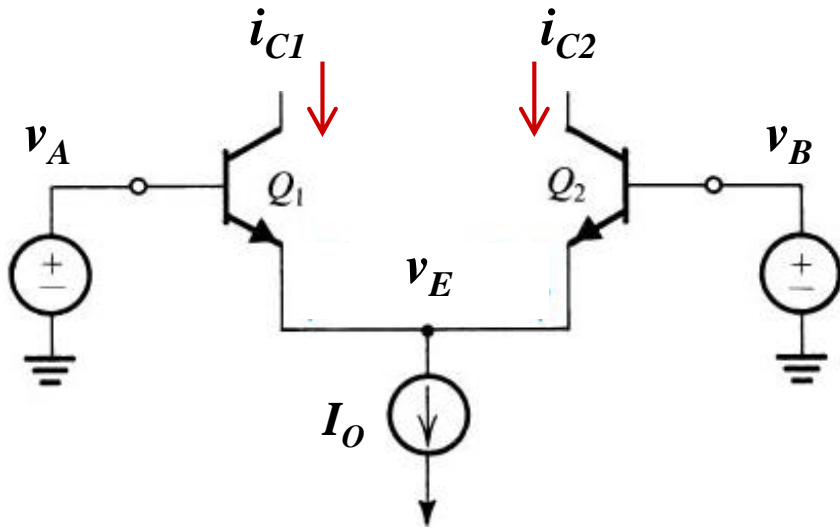
despejando en función de i_{C1} queda...

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.2. Función de transferencia.



Las f. de t. de transconductancia, $i_C = f(v_D)$, para ambas salidas son:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.3. Amplificador diferencial básico, con R_C .

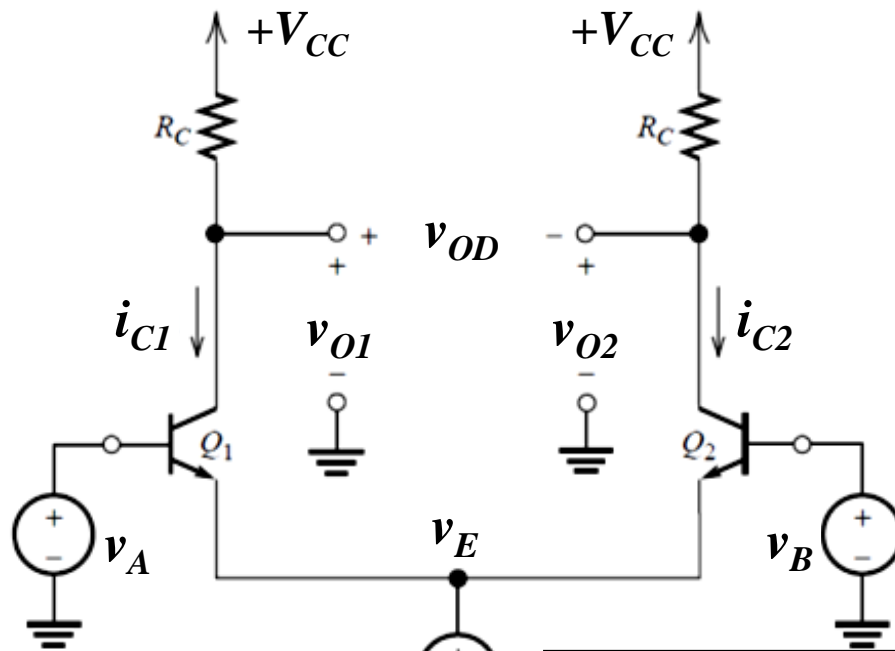
- ❑ Diferencial básico, con resistores en colector.
 - El montaje con V_{CC} y R_C permite pasar las corrientes i_C a tensión y mantener los Q's en activa.

- Tres formas de obtener una tensión de salida:

Salidas asimétricas

$$v_{O1} = V_{CC} - i_{C1}R_C$$

$$v_{O2} = V_{CC} - i_{C2}R_C$$



Salida simétrica o diferencial

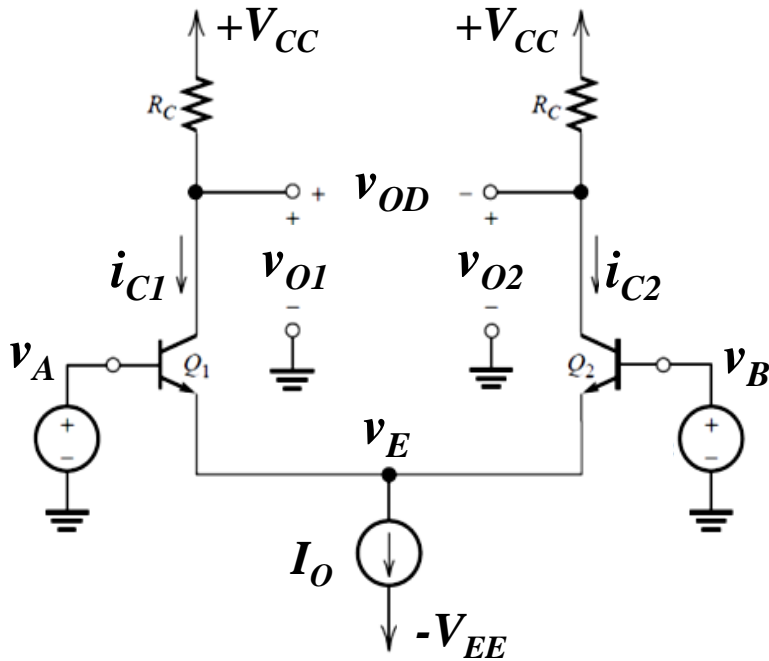
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



5.3. Diferencial básico: salida diferencial.



- Obtención de la función de transferencia: $v_{OD} = f(v_A - v_B) = f(v_D)$

$$v_{OD} = (i_{C2} - i_{C1})R_C$$

$$I_O \approx i_{C1} + i_{C2}$$

$$i_{C2} - i_{C1} = 2i_{C2} - I_O$$

$$i_{C2} = \frac{I_O}{1 + e^{+v_D/V_T}}$$



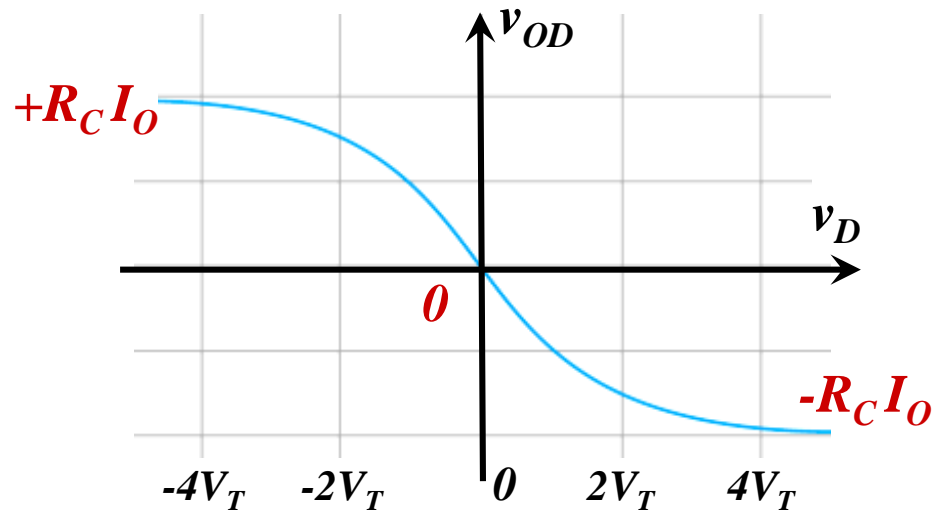
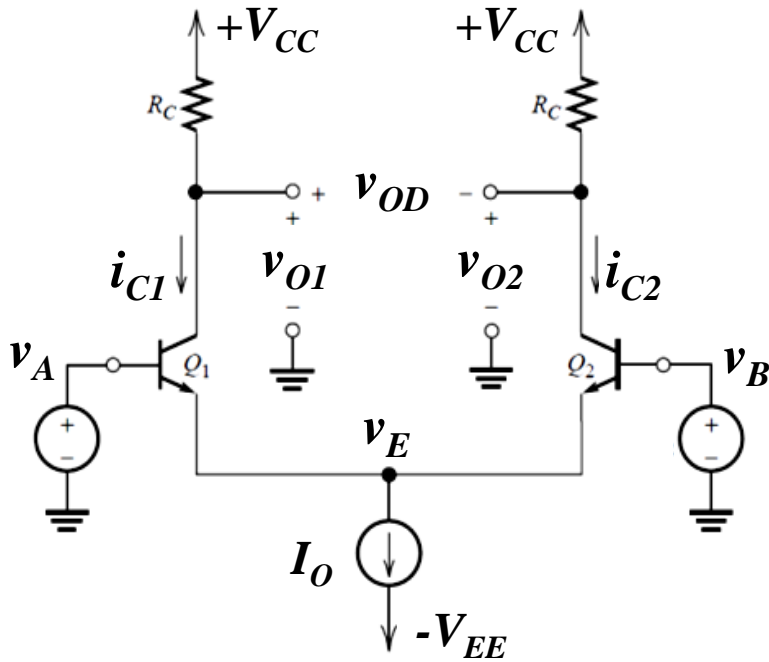
$$v_{OD} = R_C \left(\frac{2I_O}{1 + e^{+v_D/V_T}} - I_O \right) = R_C I_O \frac{1 - e^{+v_D/V_T}}{1 + e^{+v_D/V_T}} = -R_C I_O \tanh \left(\frac{v_D}{2V_T} \right)$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.3. Diferencial básico: salida diferencial.



$$v_{OD} = -R_C I_O \tanh\left(\frac{v_D}{2V_T}\right)$$

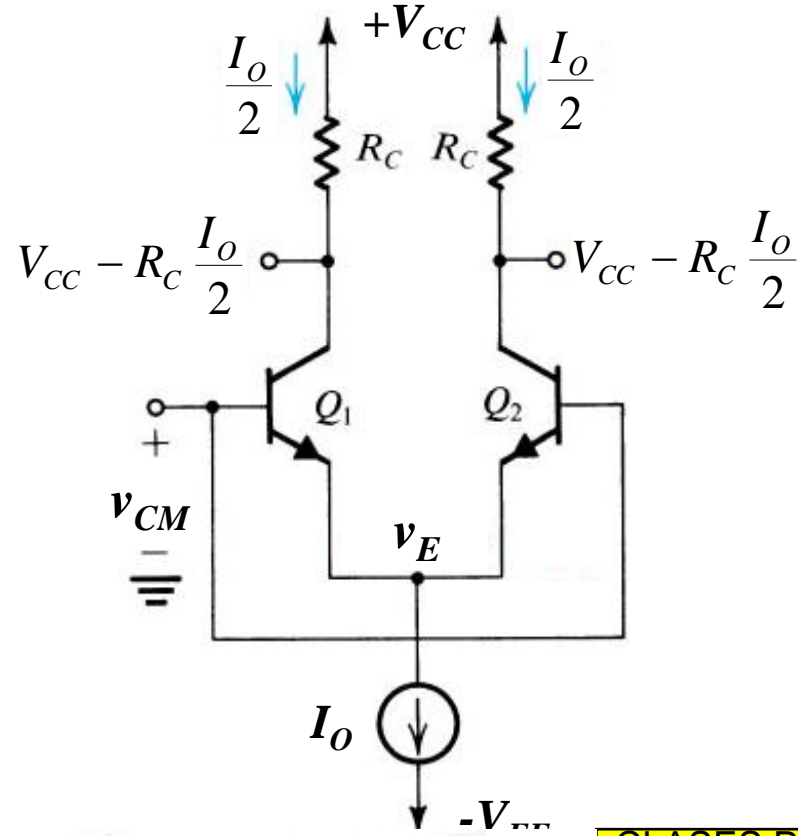
- Ganancia en pequeña señal, en el **mejor punto de trabajo** (0,0):

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.3. Diferencial básico: polarización.



- El mejor punto de trabajo, por defecto, es el equilibrio: $v_D = 0$.
 - Pero además, hay que garantizar el funcionamiento del diferencial.
 - Con $v_D = 0$ tiene que haber una tensión continua, v_{CM} , tal que Q_1 y Q_2 estén en activa.
 - Los valores válidos de esta v_{CM} determinan el **margen de entrada en modo común**.
 - Estos límites son diferentes en cada

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

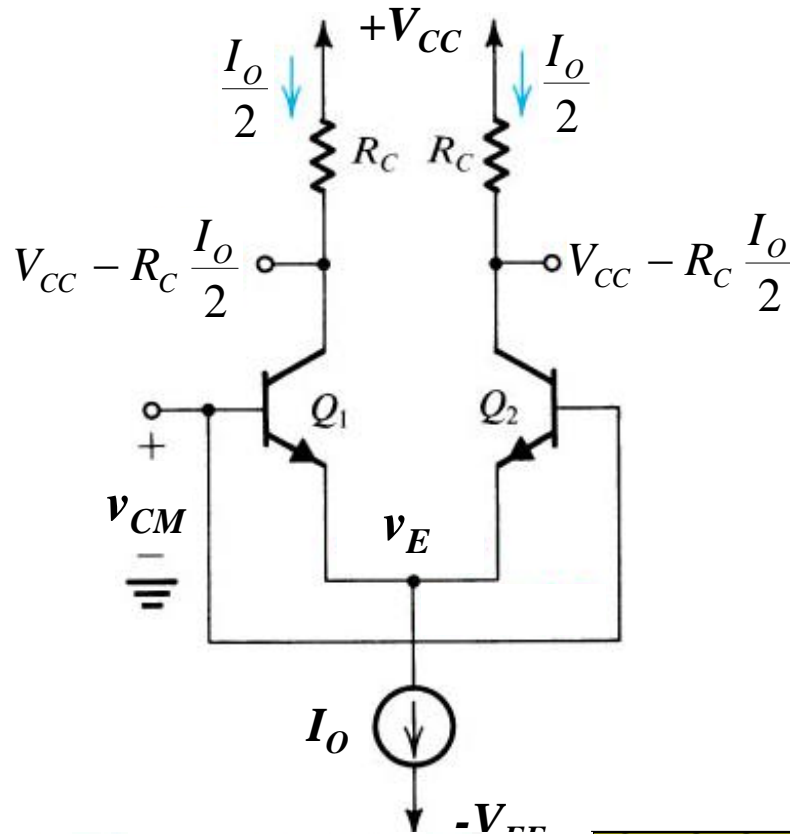
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

5.3. Diferencial básico: polarización.

□ Para el circuito de la figura:

■ Límite superior marcado por la saturación de los transistores



$$\begin{cases}
 v_{CE} \geq V_{CEsat} \approx 0,2V \\
 v_{CE} = v_C - v_E = \left(V_{CC} - \frac{I_O}{2} R_C \right) - v_E \\
 v_E = v_{CM} - V_{BE}
 \end{cases}$$

$$v_{CM} \leq \left(V_{CC} - \frac{I_O}{2} R_C \right) + V_{BE} - V_{CEsat}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

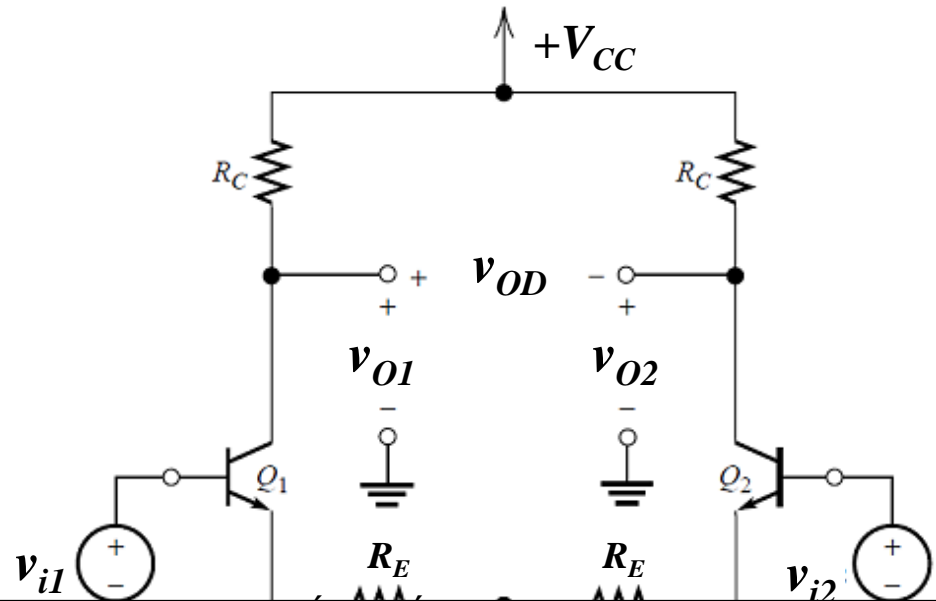
Cartagena99

5.4. El diferencial en pequeña señal

- Conocido el punto de trabajo ($I_C = I_O/2$) se obtienen fácilmente los parámetros del diferencial en pequeña señal.
 - Diferencial definido por: Z_d , Z_c , Z_s , A_d , A_c , **CMRR**, *etc.* (ver trp. 14)
 - El análisis se simplifica, con técnicas específicas.

□ Un ejemplo:

- Diferencial con R de emisor
- Esta R_E proporciona mayor Z_e y mayor margen lineal que el diferencial básico, a costa de menor ganancia. (*Hambley, sección 7.5*)
- Análisis genérico, para ambos modos (trp. 22):



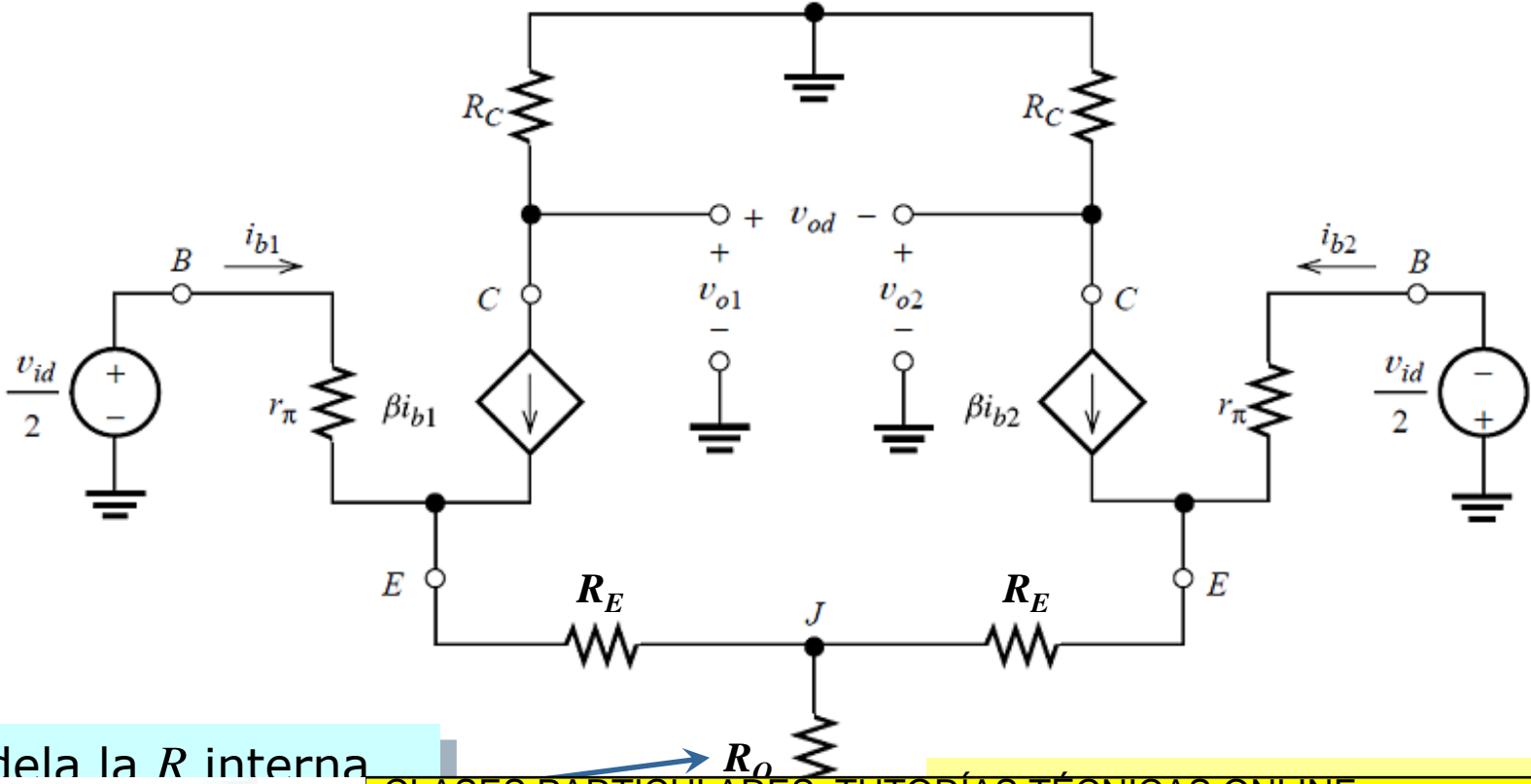
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.4. Modo diferencial

En este modo se tiene: $v_c = 0, v_{i1} = -v_{i2} = v_d/2$



Modela la R interna

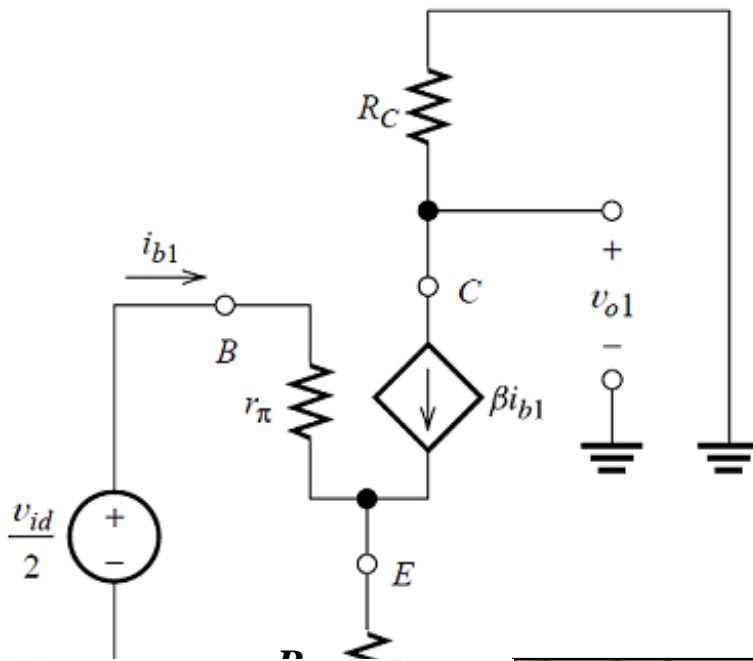
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

5.4. Análisis de semicircuito (m. diferencial)

- La simetría del problema permite una resolución rápida
 - Análisis de "semicircuito": se analiza una mitad y se identifican posteriormente los resultados con el modelo (trp. 14)



$$\left\{ \begin{aligned} Z_{i1} &= r_{\pi} + (\beta + 1)R_E \\ Z_{o1} &= R_C \\ A_{d1} &= \frac{v_{o1}}{v_{id}} = - \frac{\beta R_C}{2[r_{\pi} + (\beta + 1)R_E]} \end{aligned} \right.$$

Atención: si se dan las condiciones adecuadas, A_d sólo dependería de los resistores fijos:

$$(\beta + 1)R_E \gg r_{\pi}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

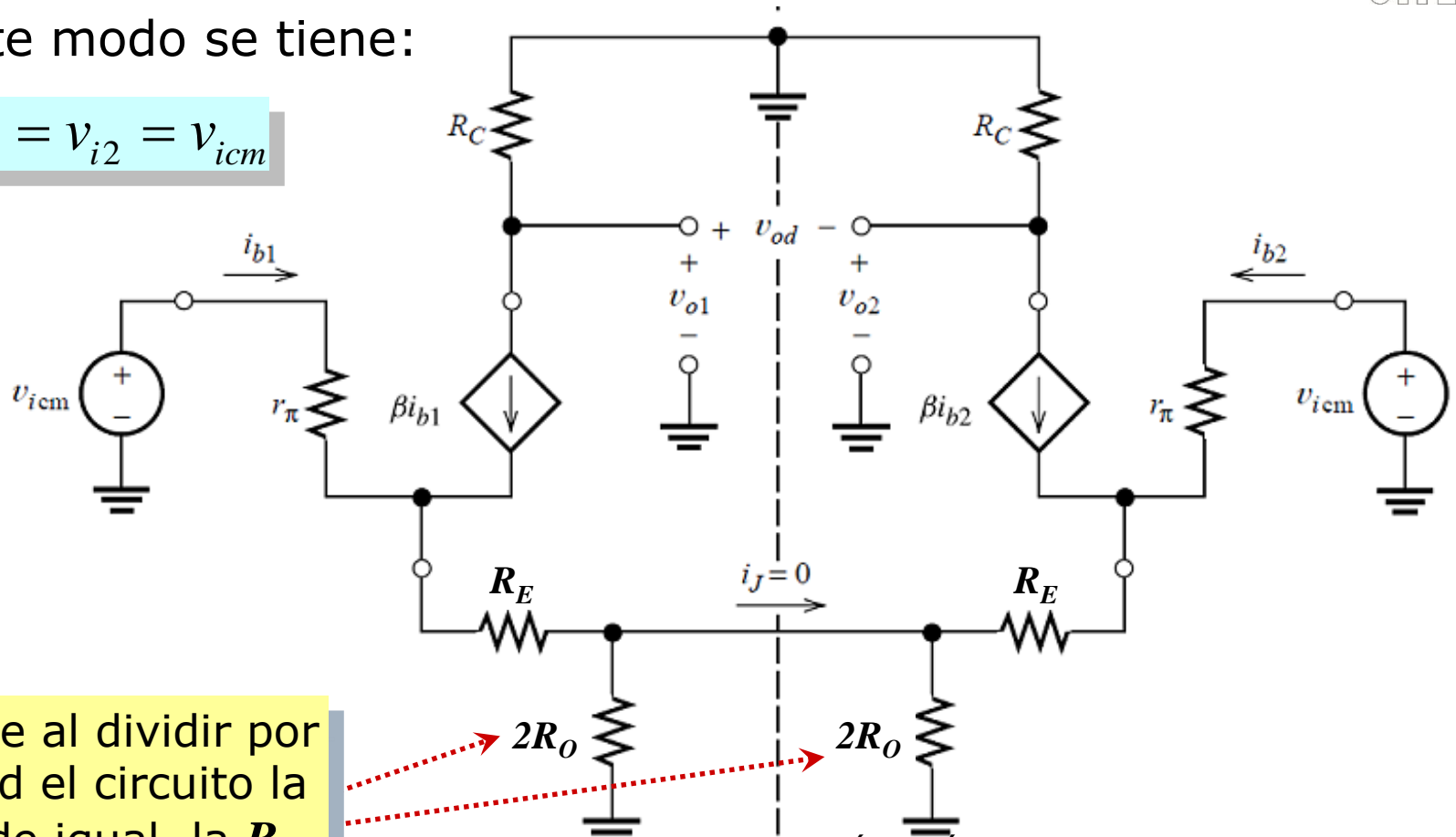
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

5.4. Modo común

En este modo se tiene:

$$v_{i1} = v_{i2} = v_{icm}$$



Para que al dividir por la mitad el circuito la V quede igual la R

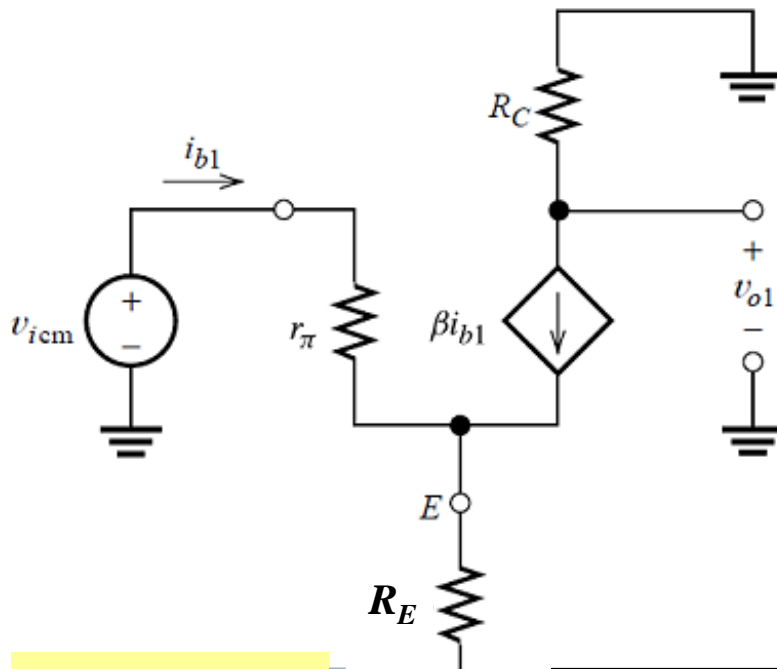
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

5.4. Análisis de semicircuito (m. común)

- Análisis similar al caso diferencial
 - Hay que prestar especial atención a combinar acertadamente los resultados parciales de semicircuito



$$Z_{cm1} = r_{\pi} + (\beta + 1)(R_E + 2R_O)$$

$$Z_{o1} = R_C$$

$$A_{cm1} = \frac{v_{o1}}{v_{icm}} = - \frac{\beta R_C}{r_{\pi} + (\beta + 1)(R_E + 2R_O)}$$

En condiciones normales la R_O de la fuente de corriente es muy alta: por tanto r_{π} es despreciable.

Si además $\beta \gg \rightarrow A_{cm}$ no depende de β :

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

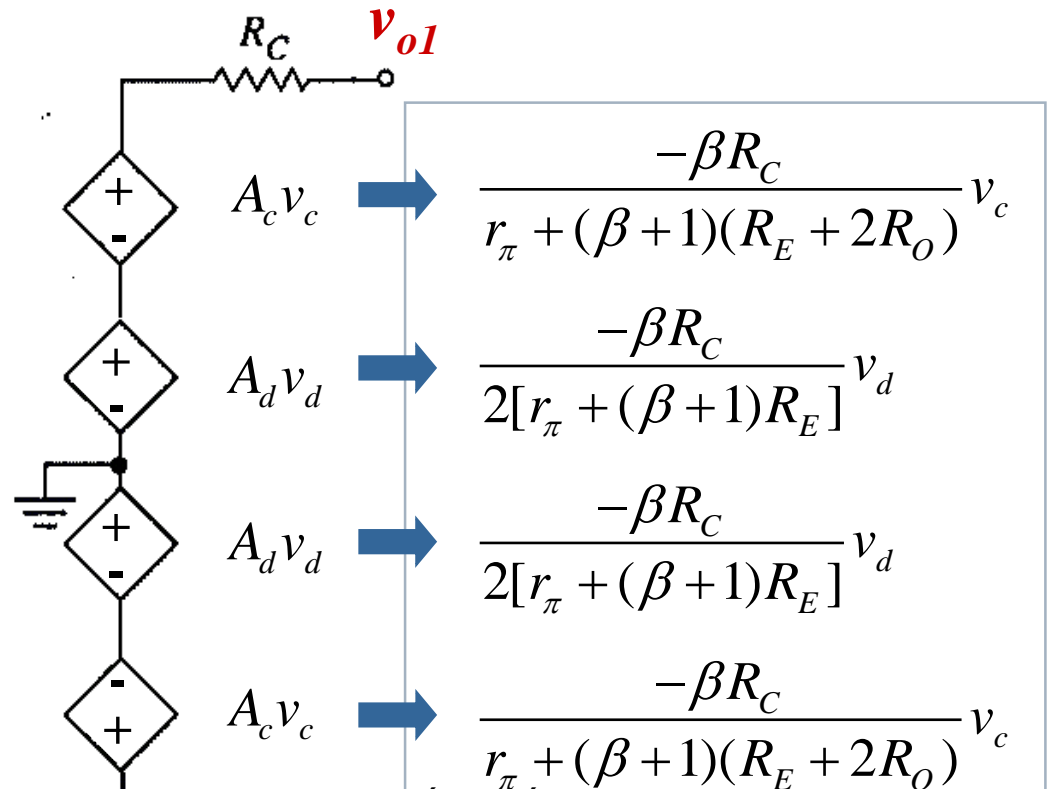
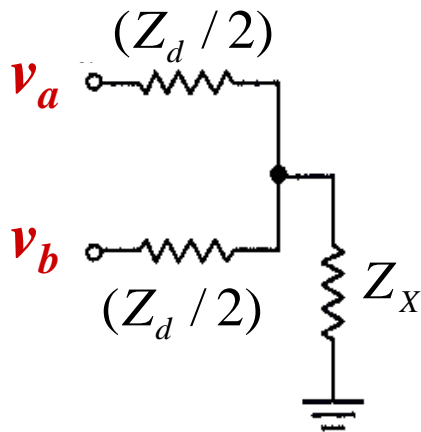
Cartagena99

5.4. Modelo del diferencial con R_E

Combinando adecuadamente los análisis de cada semicircuito:

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi + (\beta + 1)R_E$$

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i2} = r_\pi + (\beta + 1)R_E$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

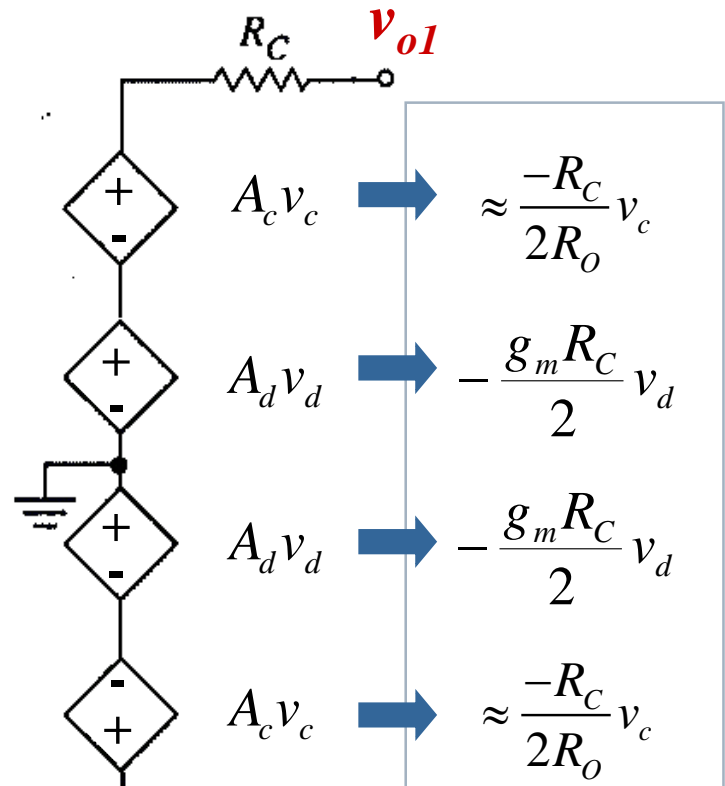
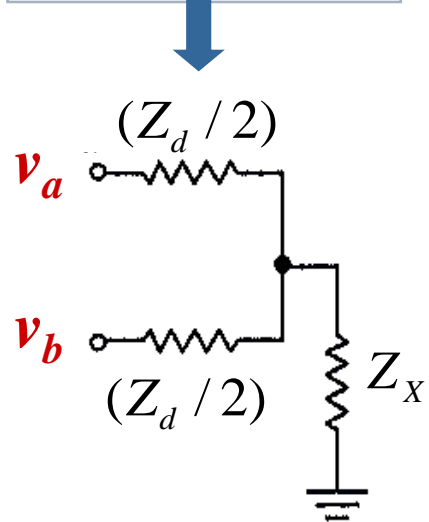


5.4. Modelo del diferencial básico

- Simplificación del anterior, eliminando R_E (recordar que: $g_m r_\pi = \beta$)

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi$$

$$(Z_d/2) \rightarrow Z_{i1} = r_\pi$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



5.5. Análisis del CMRR

- ❑ En un amplificador diferencial el CMRR es un **factor de mérito**
 - Define la calidad del diferencial.
- ❑ Si la simetría del circuito fuera ideal
 - ¡El CMRR en **salida diferencial** sería infinito!
 - Esto es así dado que se cancelan mutuamente ambas componentes comunes.
 - *En la práctica, hay diferencias y en consecuencia sí hay señal de salida.*
 - Sólo tiene sentido hablar del CMRR en salida asimétrica. En el diferencial básico (sin R_E):

$$CMRR \Rightarrow \left| \frac{A_d - \text{una salida}}{A_c - \text{una salida}} \right| = \frac{(g_m R_C) / 2}{R_C / (2R_O)} = g_m R_O$$

Cartagena99

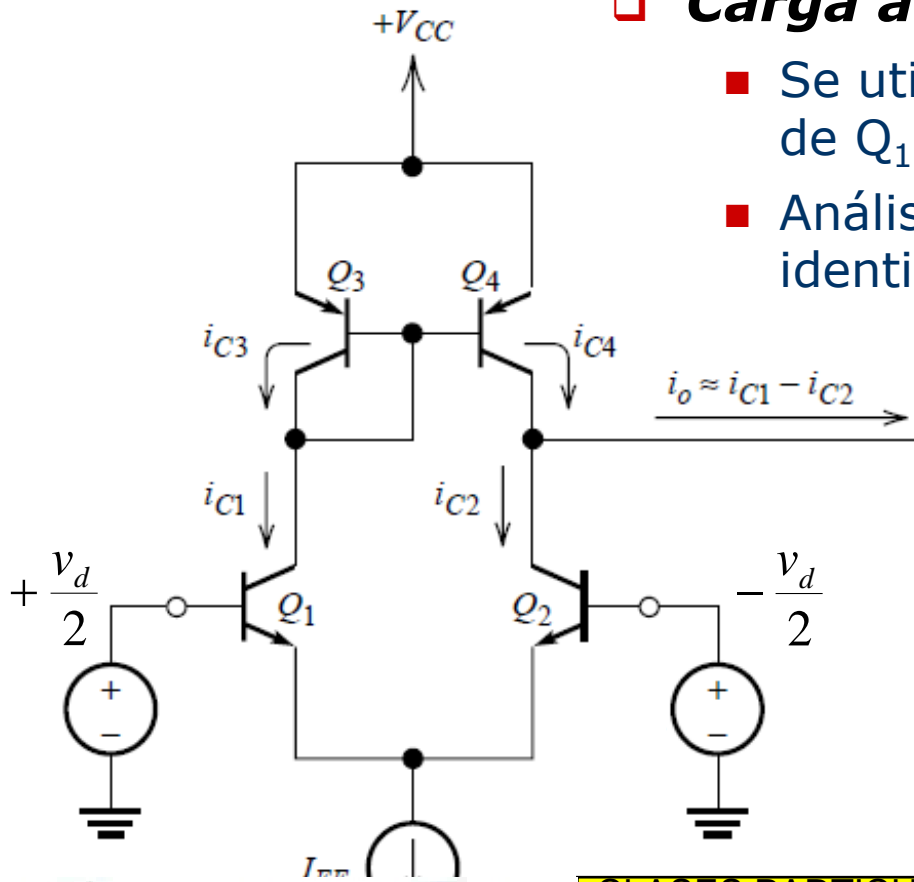
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

6. Diferencial con carga activa

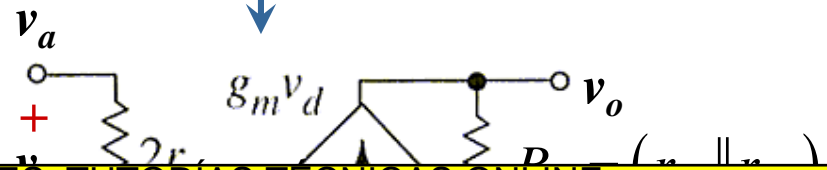
❑ **Carga activa:** con dispositivos D o Q

- Se utiliza un espejo que lleva la corriente de Q_1 hasta la salida.
- Análisis simplificado en modo diferencial: identificando términos conocidos...



$$i_o = i_{C1} - i_{C2} = g_m \frac{v_d}{2} - \left(-g_m \frac{v_d}{2} \right)$$

$$i_o = g_m v_d$$



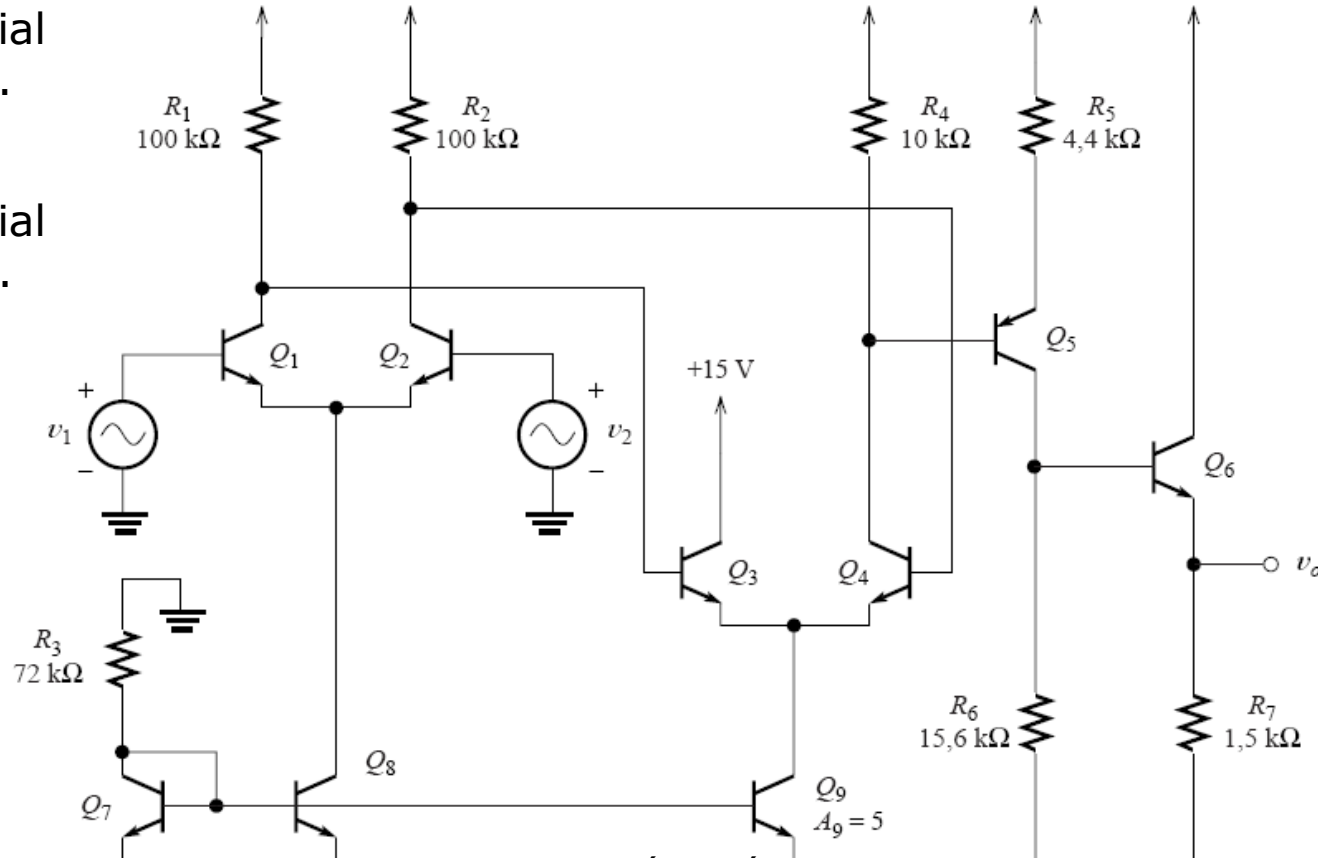
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

7. Ejemplos de amplificadores integrados

- ❑ **Q1 y Q2:**
amplificador diferencial con salida diferencial.
- ❑ **Q3 y Q4:**
amplificador diferencial con salida asimétrica.
- ❑ **Q5:**
amplificador emisor común.
- ❑ **Q6:**
seguidor de emisor.
- ❑ **Q7, Q8 y Q9:**
espejo de corriente doble



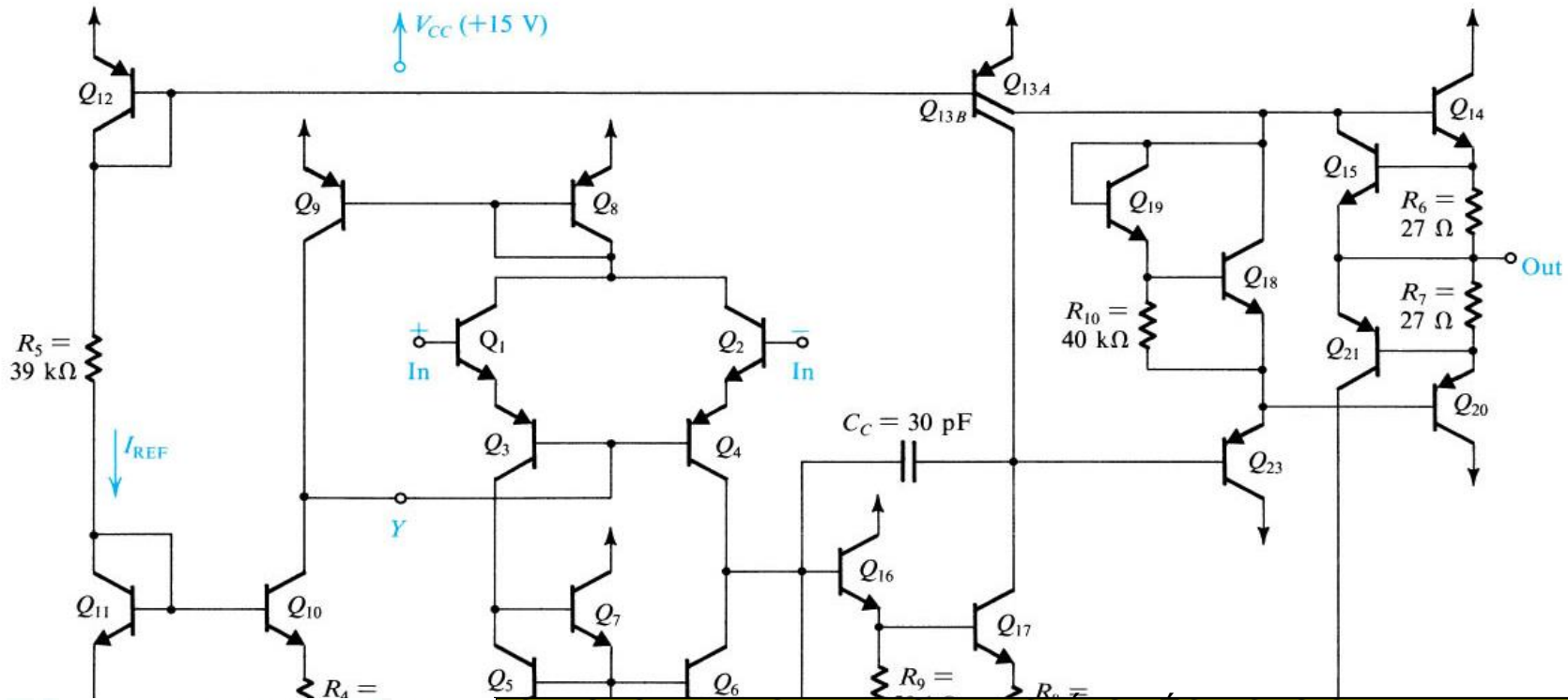
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

7. Ejercicio: de nuevo con el 741

- ❑ La mayoría de los bloques básicos acaban de estudiarse
 - ¿qué bloques puede identificar y qué función realizan?



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Referencias

- ❑ Material de estudio:
 - Hambley, capítulo 7.
 - Malik, secciones: 6.7, 7.8.3, 7.8.5 y 7.9.(2-4)
 - Sedra-Smith, capítulo 6, secciones 6.1-5.

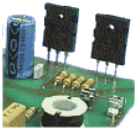
- ❑ Gráficas extraídas de los textos y secciones detallados.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Control de revisiones

- 2017-02-27: versión inicial.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70