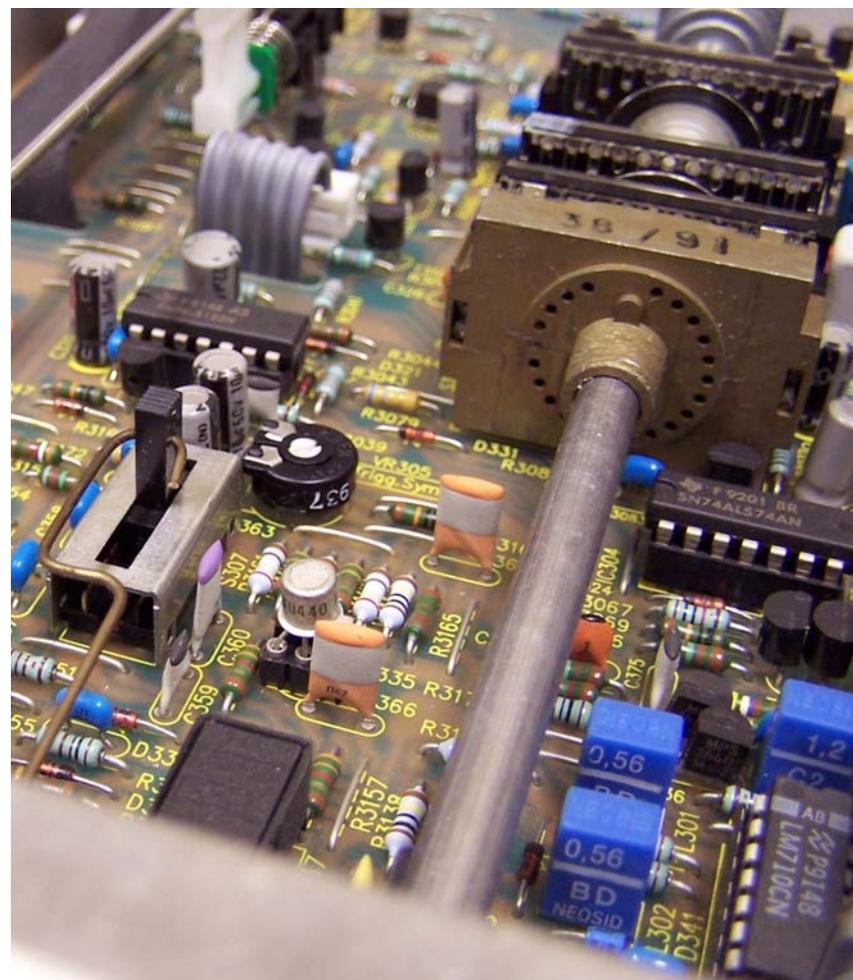


# Dispositivos Electrónicos II

CURSO 2010-2011

## Tema 11 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL (II)

Miguel Ángel Domínguez Gómez  
Camilo Quintáns Graña



DEPARTAMENTO DE  
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA



UNIVERSIDAD DE VIGO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

## 11. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL (II)

### 11.1. Estructura Interna del Amplificador Operacional.

11.1.1. Etapas diferenciales.

11.1.2. Etapa intermedia.

11.1.3. Etapa de salida: Salida push-pull. Distorsión de cruce. Salida totem-pole.

### 11.2. El amplificador operacional real.

11.2.1. Características de Entrada.

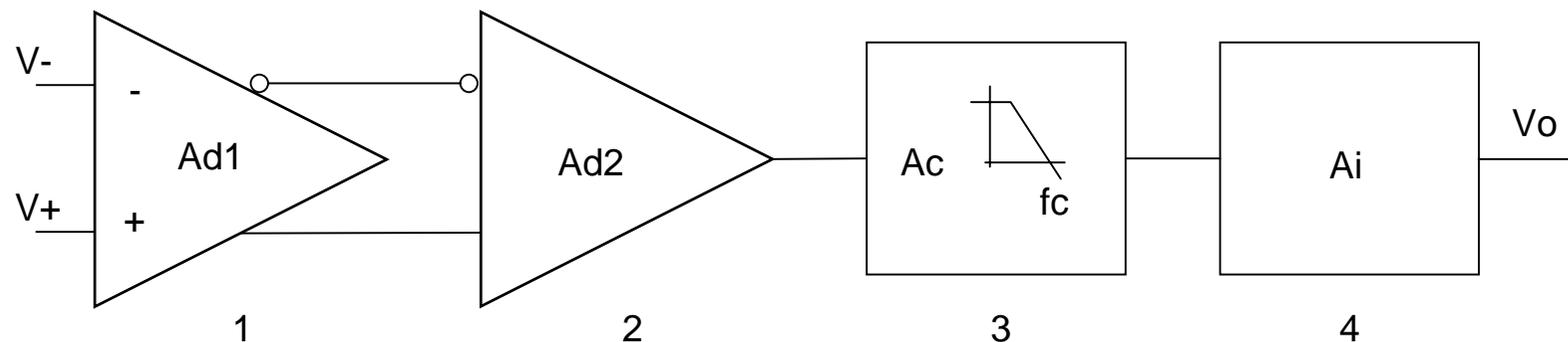
11.2.2. Características de Salida.

11.2.3. Características de Transferencia.

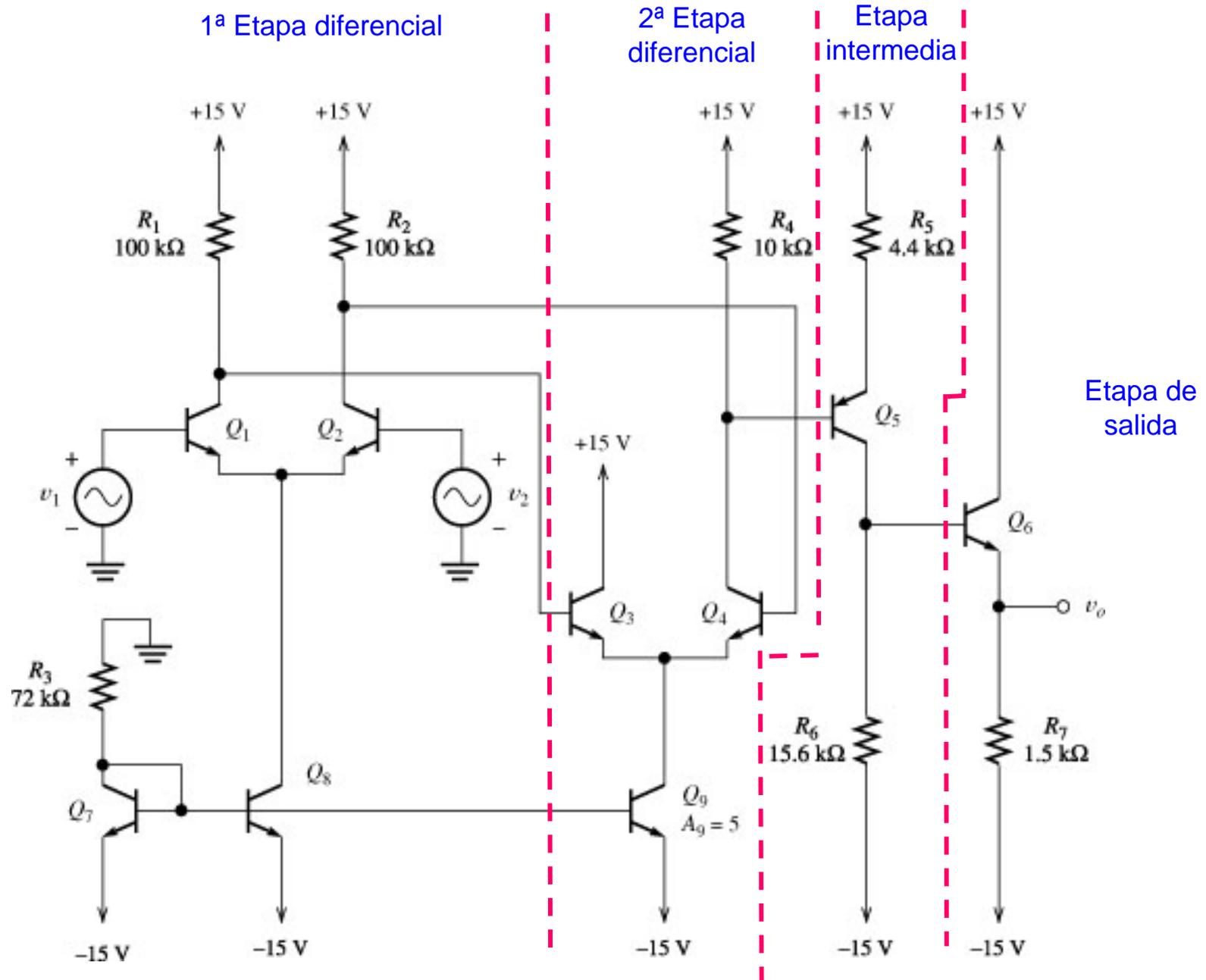
## 11.1. Estructura Interna del Amplificador Operacional.

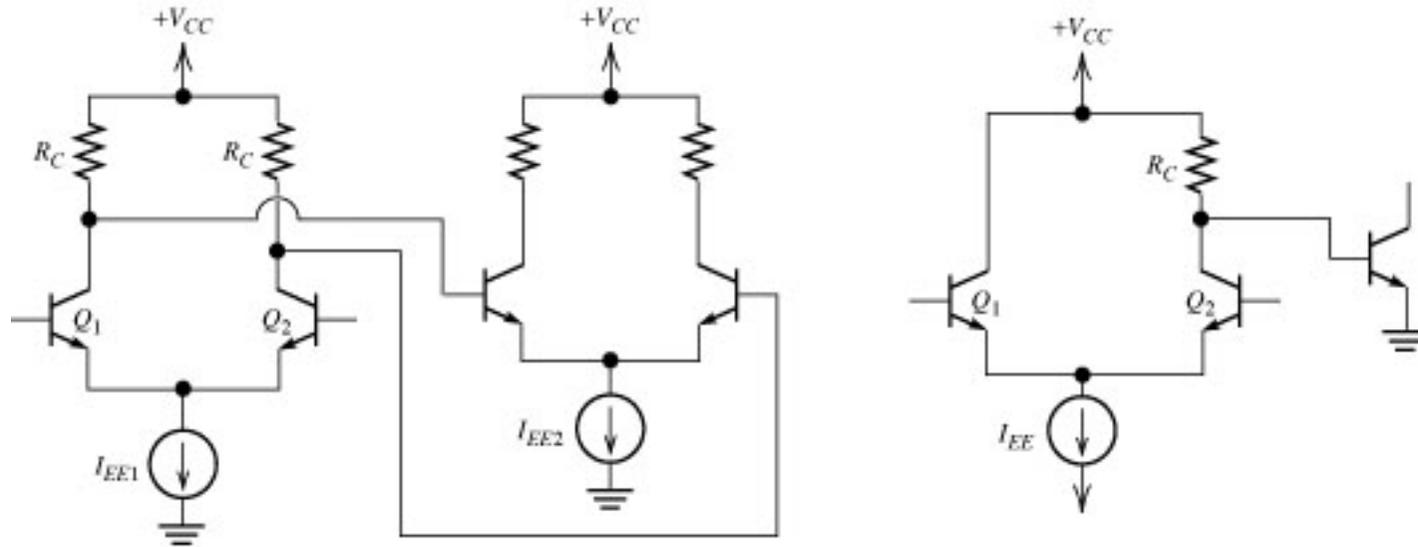
Los amplificadores operacionales suelen estar formados por las siguientes etapas:

1. Un etapa amplificadora de entrada diferencial y salida diferencial: Define las características de entrada del AO. Suele ser un AD (Amplificador diferencial) basado:
  1. En transistores bipolares simples o en montaje Darlington para disminuir las corrientes de entrada.
  2. Transistores FET que aumentan la impedancia de entrada.
2. Una segunda etapa de entrada diferencial y salida asimétrica: Aumenta la ganancia diferencial y adapta los niveles de continua para acoplar la salida a la siguiente etapa.
3. Una etapa intermedia: Provee ganancia de potencia y adapta los niveles de continua. Además, limita el ancho de banda total del amplificador en bucle abierto que garantiza su estabilidad. Suele consistir en un amplificador en emisor común.
4. Una etapa de salida: Suele ser un amplificador de corriente que disminuye la impedancia de salida para poder alimentar cargas relativamente bajas con protección contra sobre-corriente.



## Ejemplo de estructura interna de un amplificador operacional

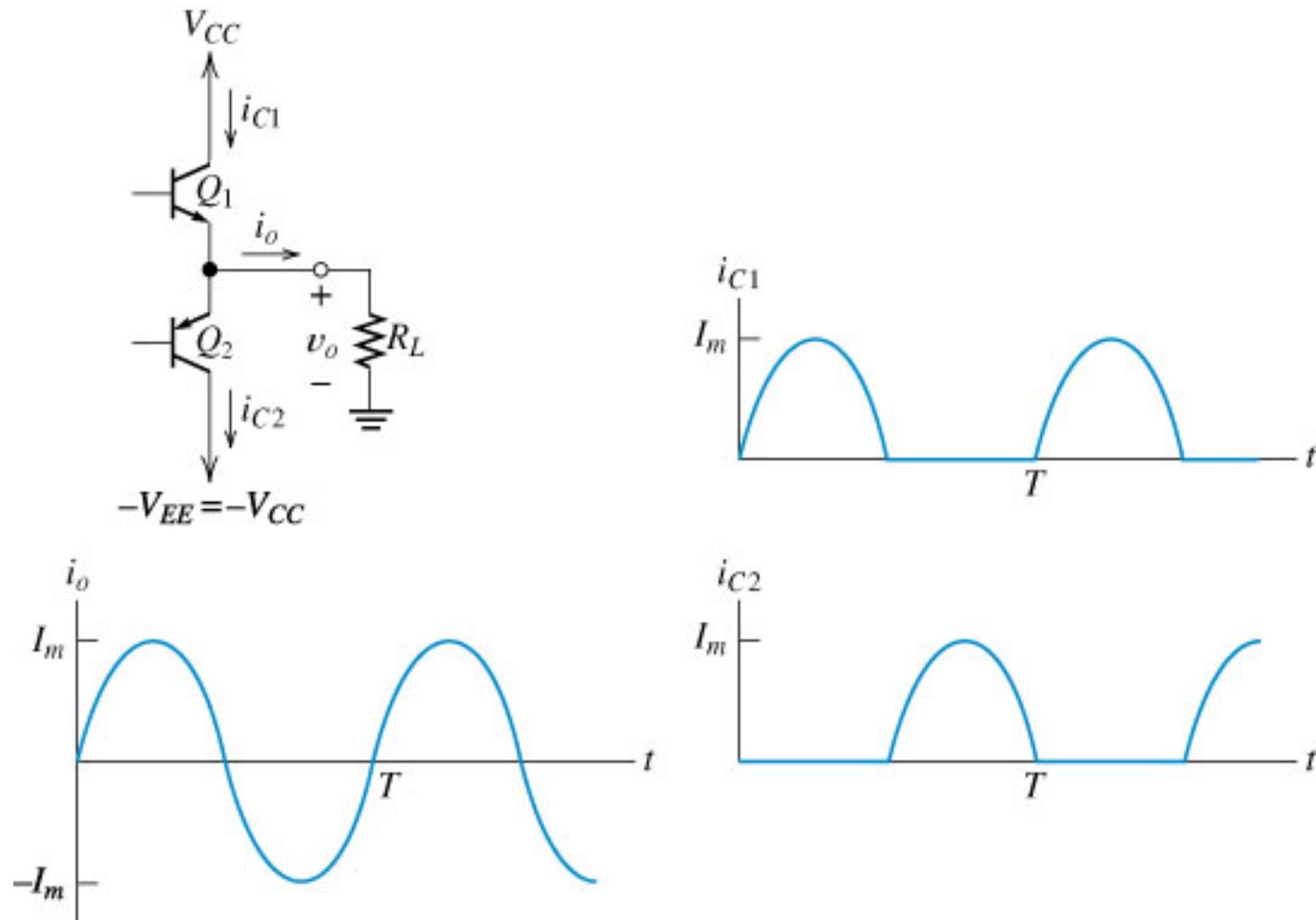


**Etapa de entrada**

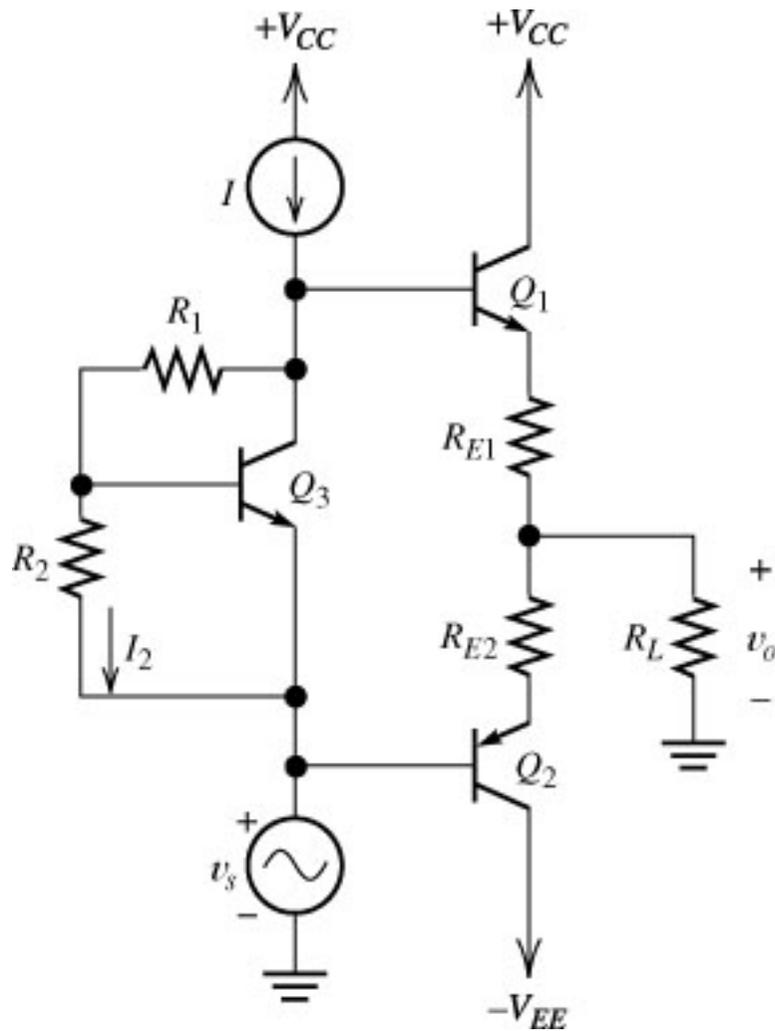
(a) Salida diferencial con acoplamiento directo a la entrada de la segunda etapa

(b) Salida asimétrica con acoplamiento directo a la entrada de la segunda etapa

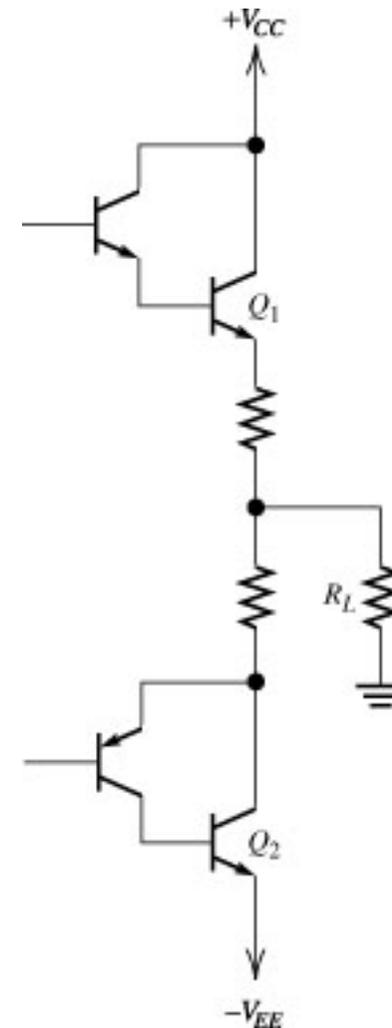
**Etapa de salida. Amplificador de clase B y formas de onda para una tensión de salida sinusoidal.**



### Etapa de salida. Mejora en las prestaciones del amplificador de clase B



Etapa de salida de clase B, incluyendo un multiplicador de  $V_{BE}$  para reducir la distorsión de cruce.

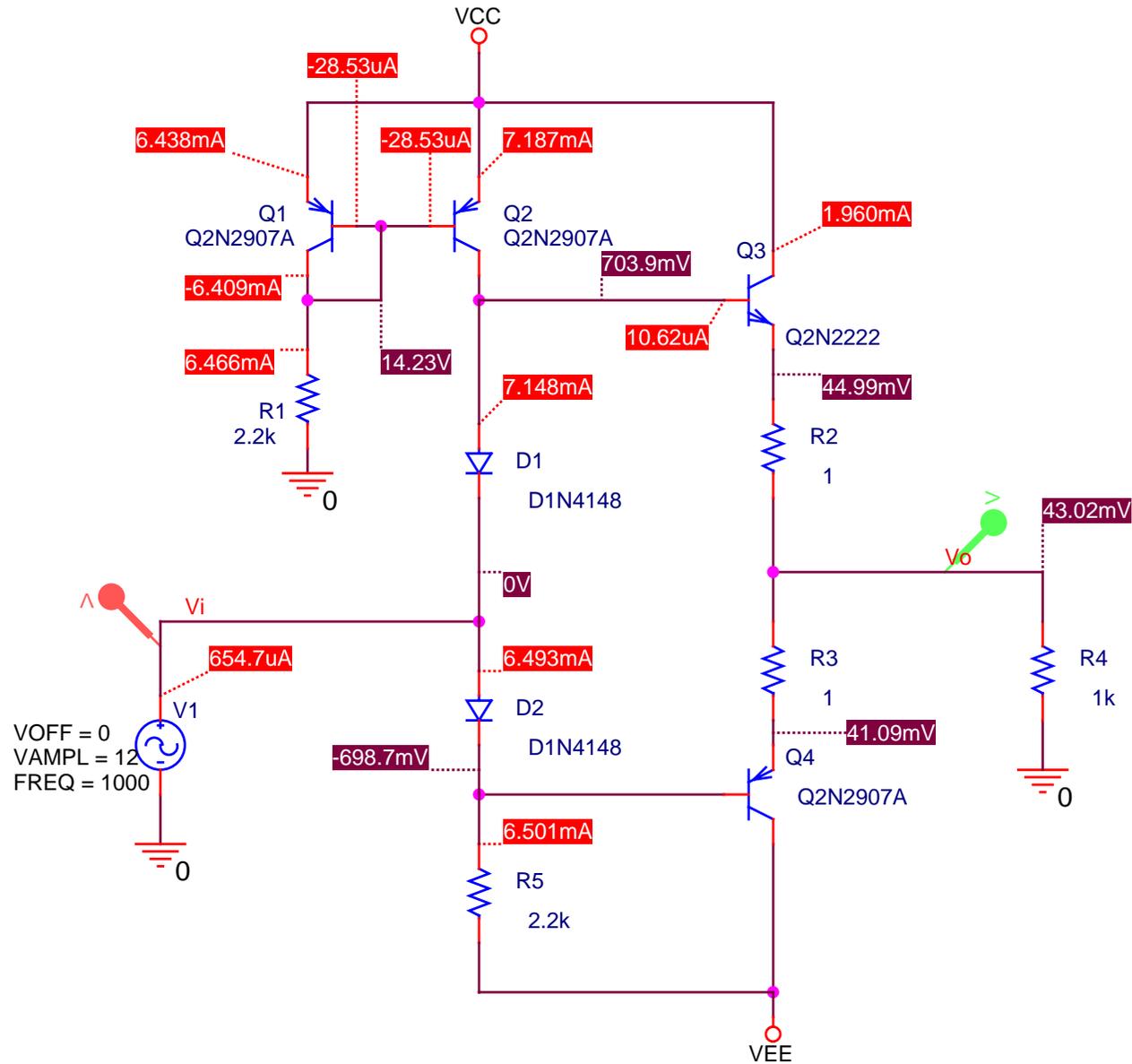


Amplificador complementario de clase B que utiliza transistores en configuración Darlington.

DE-II

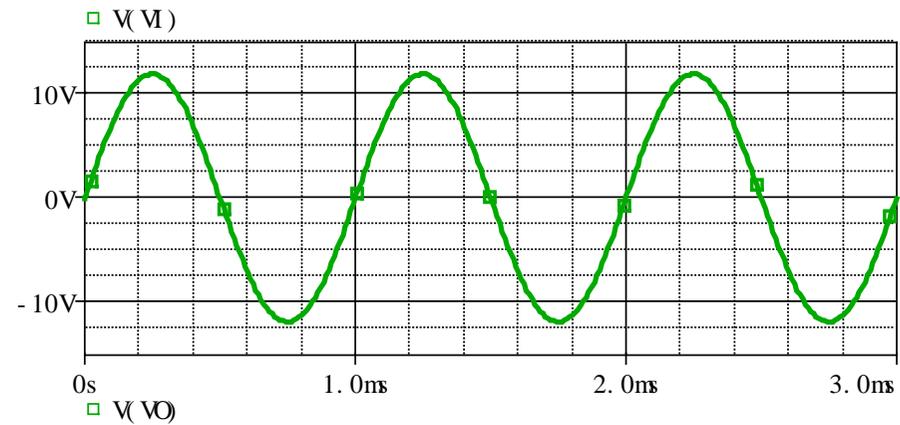
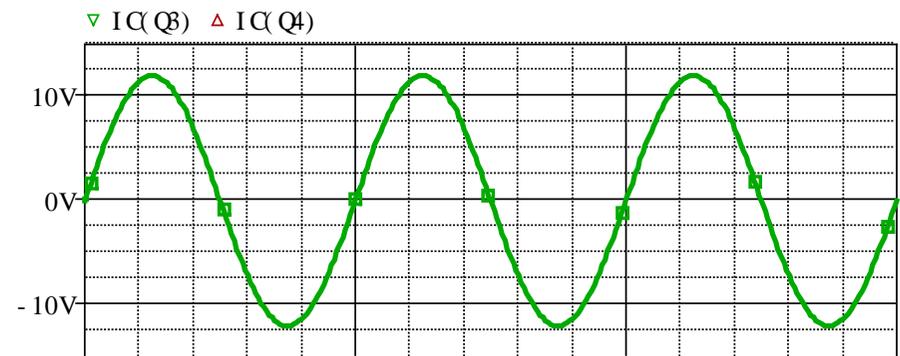
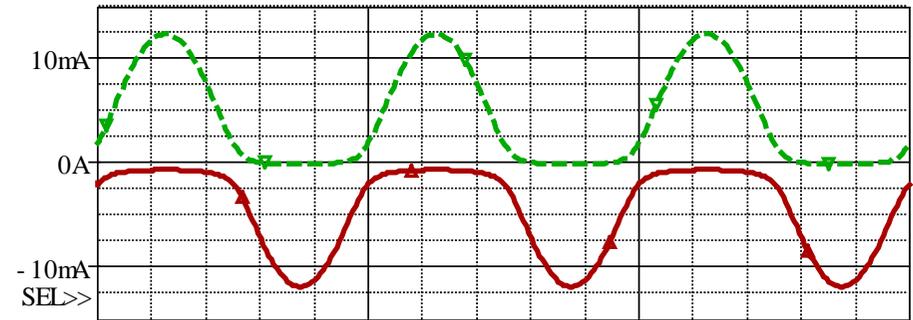
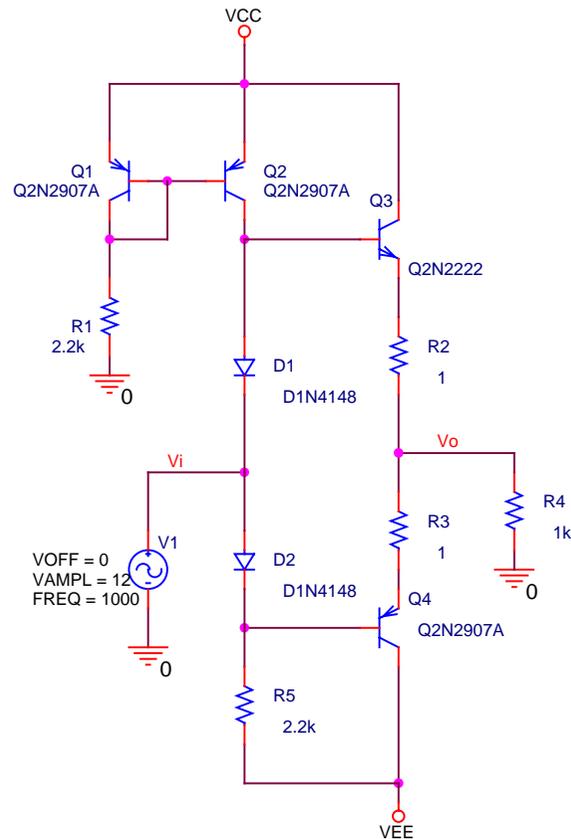
ETAPA DE  
SALIDA

Tema 11: El amplificador operacional II

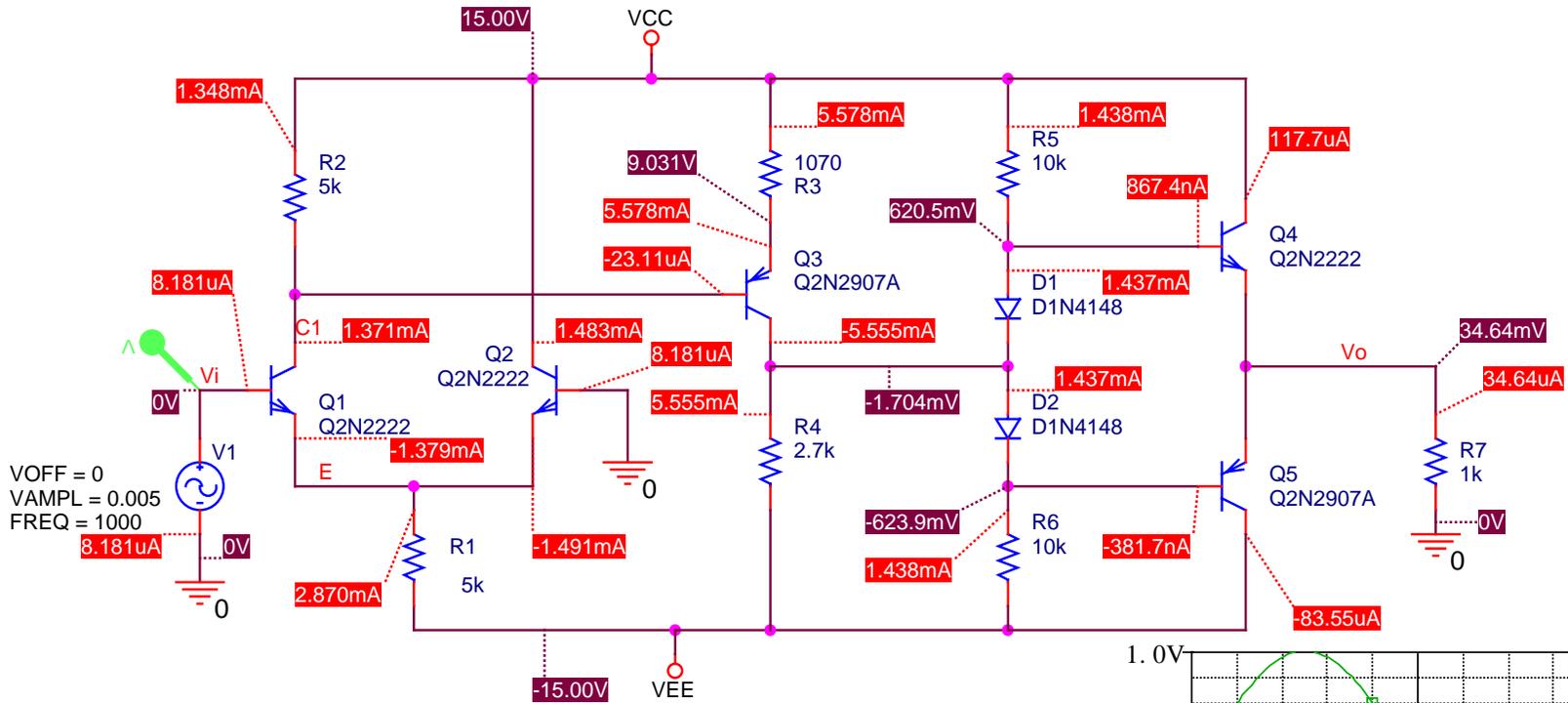
**Simulación de una etapa de salida. Polarización.**

## Simulación de una etapa de salida. Formas de onda.

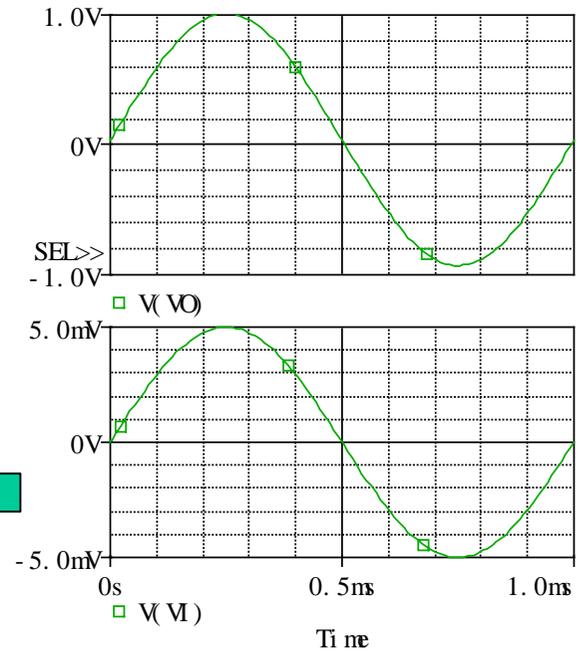
- Q3 conduce el semiciclo positivo y Q4 el negativo.
- La ganancia de tensión es unitaria.



### Ejemplo de simulación de un AO



La ganancia diferencial es aproximadamente:  
 $1000 \text{ mV} / 5 \text{ mV} = \mathbf{200}$



## 11.2. El amplificador operacional real.

Dada la Estructura Interna del AO, no se pueden conseguir las características ideales.

Las Características Reales se agrupan en:

- **Características de Entrada.**
- **Características de Salida.**
- **Características de Transferencia.**

Los valores de estas características hacen que un AO sea idóneo para una aplicación concreta e inadecuado para otra, ya que la gama de AO que se fabrican es casi tan amplia como numerosas son las aplicaciones que los utilizan.

El nº de características que definen un AO es muy amplio  $\Rightarrow$  Conveniente conocerlas a fondo para identificar en que aplicaciones son más importantes cada una de ellas.

### 11.2.1. Características de ENTRADA.

*Determinadas por los bloques de entrada del amplificador.*

Los AO contienen circuitos de entrada *Acoplados en Continua*. La corriente continua entra (o sale de) los dispositivos de entrada del AO por los elementos conectados a los terminales de entrada, como el generador de señal.

La corriente que entra por la entrada no inversora se denomina  $I_{B+}$  y la que entra por la inversora se denomina  $I_{B-}$ :

#### 1. Corriente de Polarización de Entrada ( $I_B$ )

(*Input bias current*): Valor medio de estas corrientes.

$$I_B = \frac{I_{B+} + I_{B-}}{2}$$

Normalmente los circuitos de entrada de los AO son simétricos, y las corrientes de polarización que entran por las entradas inversora y no inversora son parecidas.

Sin embargo, en la práctica, los dispositivos no son exactamente iguales, y las corrientes de polarización tampoco lo son.

#### 2. Corriente de Asimetría de Entrada ( $I_{io}$ )

(*Input offset current*) : Diferencia entre ambas

$$I_{io} = I_{B+} - I_{B-}$$

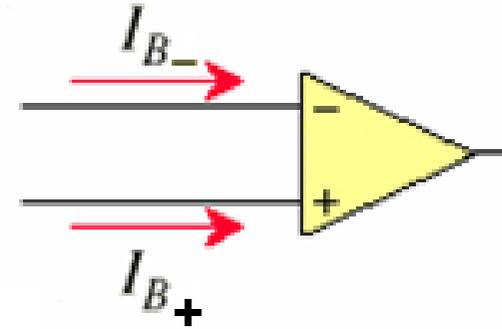
$$I_B = \frac{I_{B+} + I_{B-}}{2}$$

$$I_{io} = I_{B+} - I_{B-}$$



$$I_{B+} = I_B + \frac{I_{io}}{2}$$

$$I_{B-} = I_B - \frac{I_{io}}{2}$$



Ejemplo:  $\mu$ A741

Para el  $\mu$ A741:  $I_{IB} = 80 \text{ nA}$

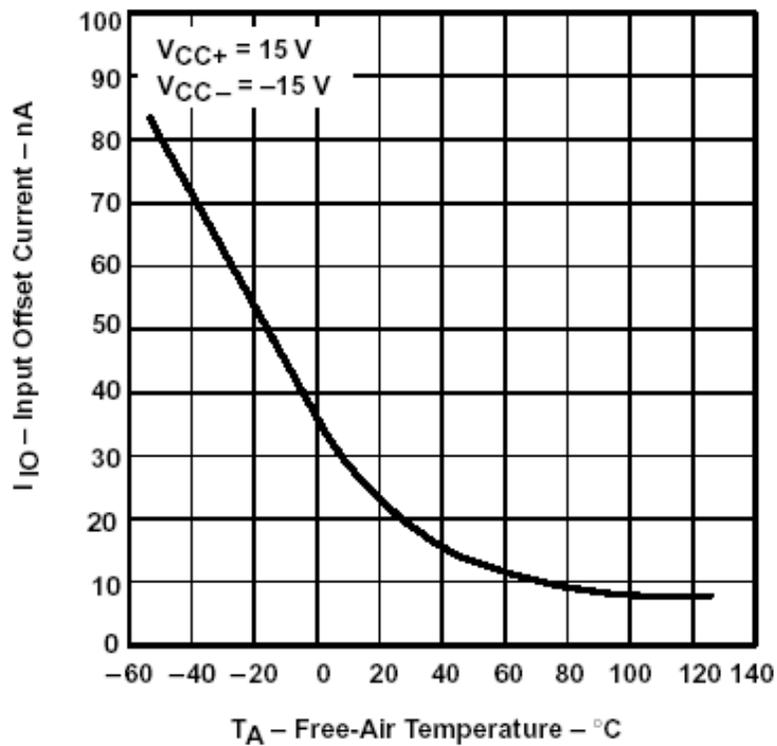
$I_{IO} = 20 \text{ nA}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T <sub>A</sub>	$\mu$ A741C			$\mu$ A741I, $\mu$ A741M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
I <sub>IO</sub>	V <sub>O</sub> = 0	25°C		20	200	20	200	nA	
		Full range			300		500		
I <sub>IB</sub>	V <sub>O</sub> = 0	25°C		80	500	80	500	nA	
		Full range			800		1500		

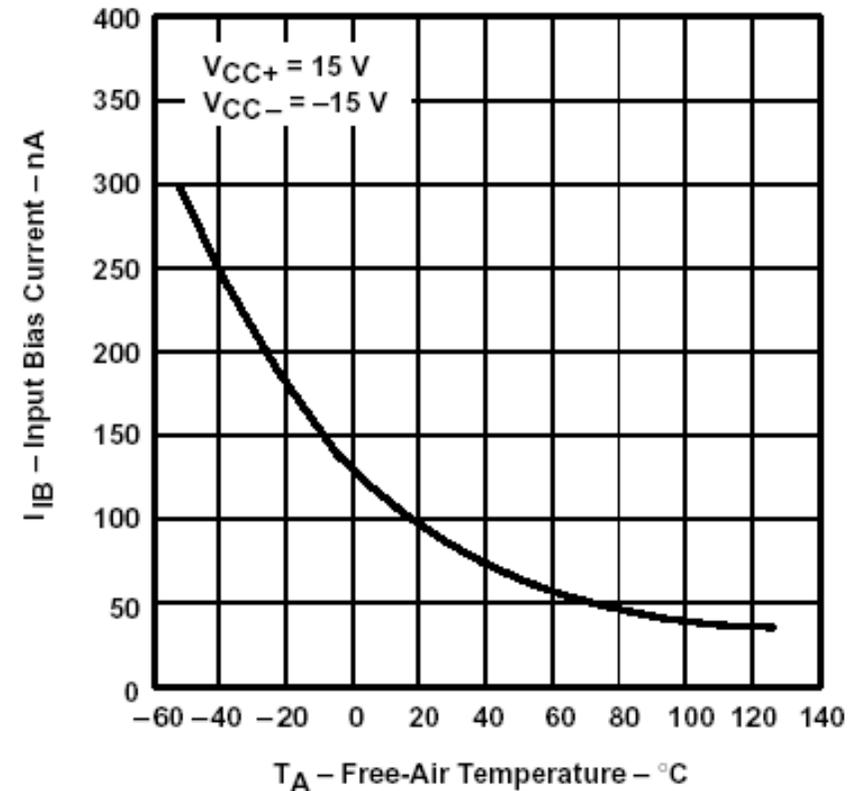
El fabricante también indica las variaciones de ambas corrientes con la temperatura, tensión de alimentación, y el tiempo.

### Ejemplo: $\mu$ A741

INPUT OFFSET CURRENT  
vs  
FREE-AIR TEMPERATURE



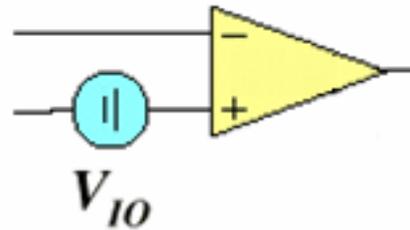
INPUT BIAS CURRENT  
vs  
FREE-AIR TEMPERATURE



### 3. Tensión de Asimetría de Entrada ( $V_{io}$ ):

La tensión de salida del AO puede ser distinta de cero para una tensión de entrada nula debido a las asimetrías anteriormente citadas.

El AO se comporta **como si** existiese un pequeño generador de tensión continua en serie con uno de los terminales de entrada, que se denomina **tensión de desviación** o **tensión de asimetría de entrada (input offset voltage)**



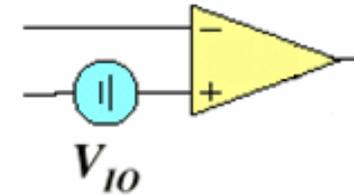
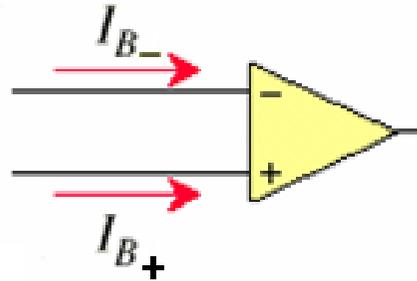
#### Ejemplo: LM741

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<u>Input Offset Voltage</u>	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV

Nota: **POLARIDAD DE  $I_B$ ,  $I_{io}$ ,  $V_{io}$ :**

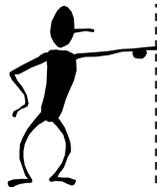
$$I_{B-} = I_B - \frac{I_{io}}{2}$$

$$I_{B+} = I_B + \frac{I_{io}}{2}$$



La dirección de la Corriente de Polarización  $I_B$  es predecible para un tipo determinado de AO.

- Por ejemplo, si los terminales de entrada del AO son los terminales de **BASE** de **transistores bipolares NPN**,  $I_B$  es **positiva**.
- Por el contrario, si son **transistores bipolares PNP**,  $I_B$  será **negativa**.



La polaridad de la tensión de asimetría  $V_{io}$  y la dirección de la corriente de asimetría  $I_{io}$  son impredecibles, y varían entre los transistores de una misma serie.

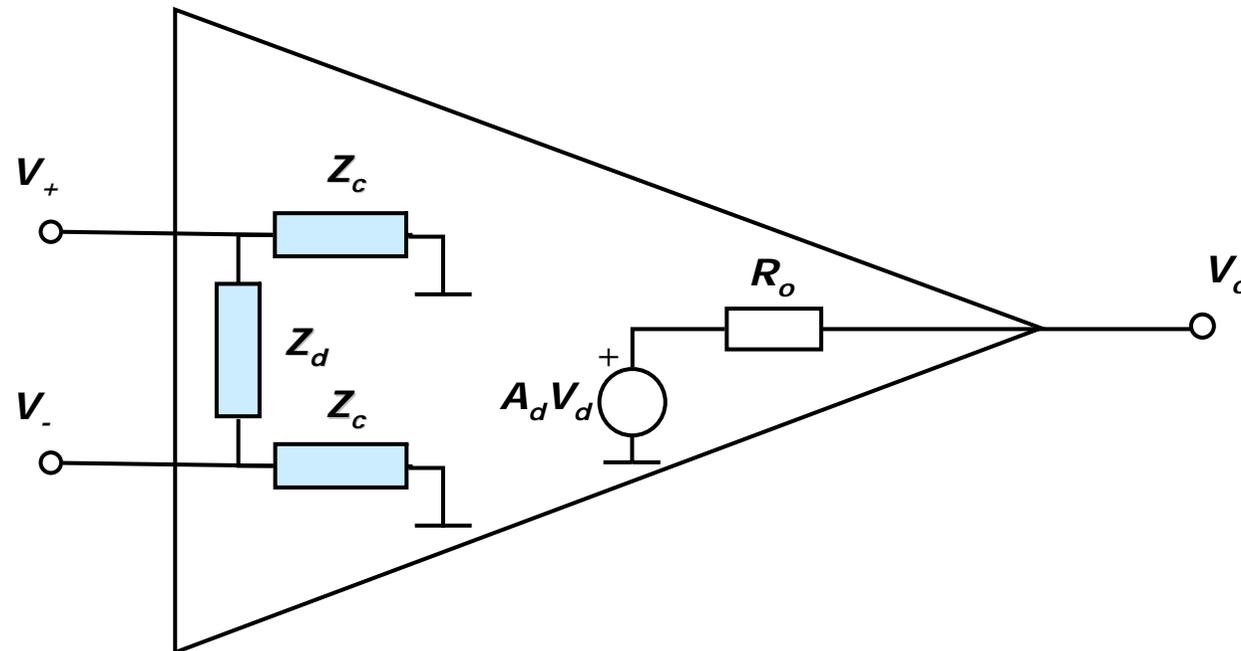
*Ejemplo:* Si la tensión de asimetría de para los AO LM741 tiene un valor máximo de 6mV, el valor de  $V_{io}$  para un AO de la serie puede variar entre -6mV y +6mV.

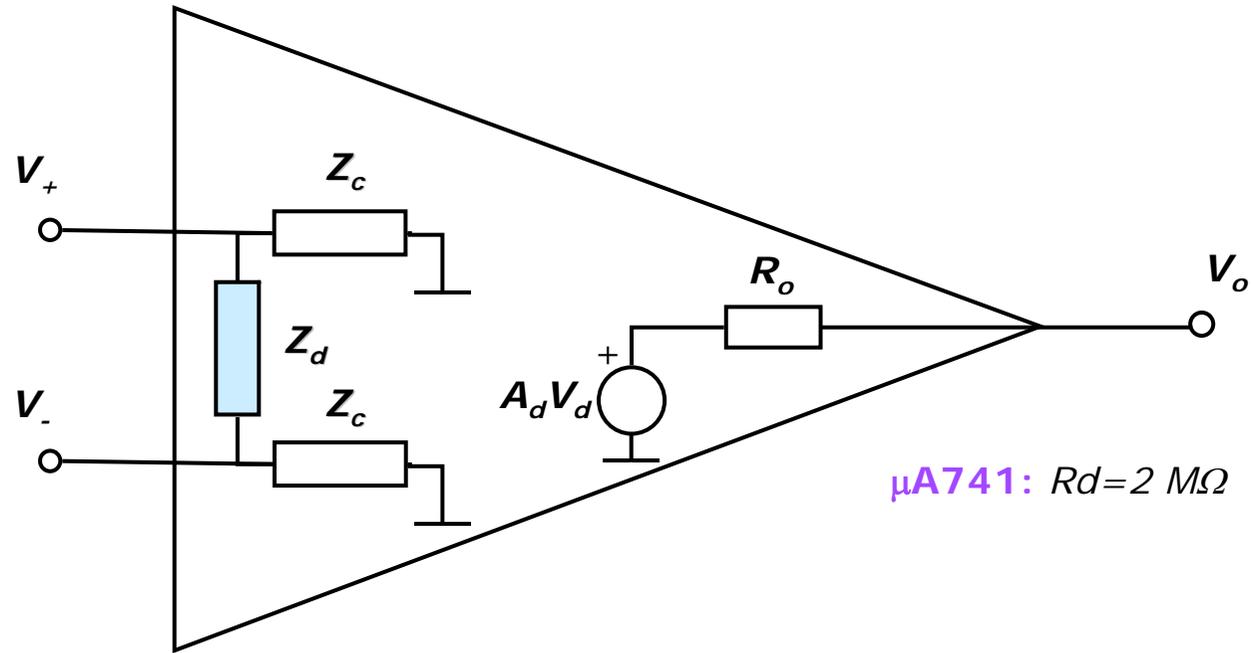
#### 4. Impedancia de Entrada

La impedancia de entrada no es infinita. Se pueden considerar 2 impedancias distintas en el AO:

- Impedancia en Modo Común ( $Z_c$ )
- Impedancia en Modo Diferencial ( $Z_d$ )

$Z_d$  es la más importante a efectos prácticos.





### Resistencia y Capacidad de Entrada:

Debido a la presencia de capacidades parásitas en todos los transistores reales, la Impedancia de Entrada de un AO se compone de:

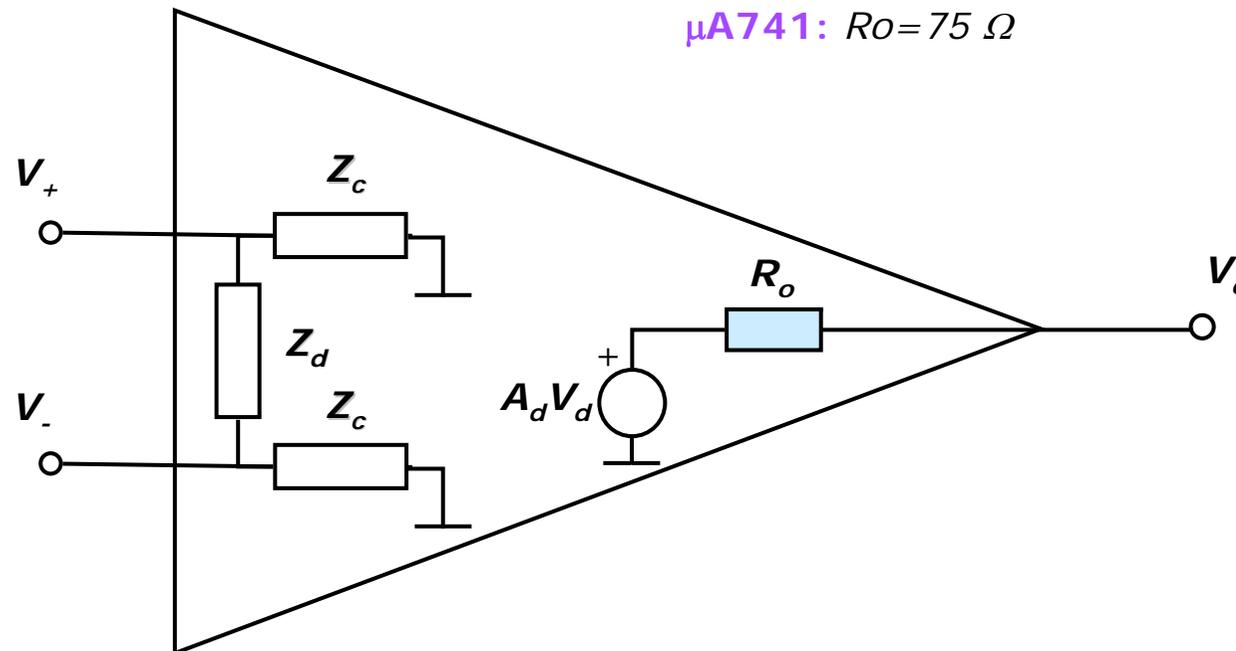
- **Parte resistiva:** Resistencia de Entrada en Modo Diferencial ( $R_d$ ) y en Modo Común ( $R_c$ )
- **Parte reactiva:** Capacidad de Entrada (C)

### Fabricante:

Siempre indica valor de  $R_d$ , y generalmente también C (orden de pF). Como  $R_c$  es siempre  $\gg R_d$ , a menudo se puede despreciar y no se incluye en las hojas de características.

### 11.2.2. Características de SALIDA.

**1. Resistencia de Salida ( $R_o$ )** (*Output Resistance*): No es igual a cero. Valor típico: entre 50 y 500  $\Omega$



**2. Margen de Tensión de Salida o Excursión de Salida** (*Output Voltage Swing*): Máxima tensión sin distorsión (i.e. sin que se produzca la saturación del amplificador) que podemos obtener a la salida).

Suele ser de 1 a 2 V menores (en valor absoluto) que la tensión de alimentación.

### 3. Velocidad de Variación Máxima de la Tensión de Salida (SR)

(Slew Rate): Relación entre el cambio de tensión de salida y el tiempo mínimo requerido para efectuar este cambio. (Gran señal)

$$SR = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \left( \frac{V}{\mu s} \right) \quad \mu A741: SR=0.5 V/\mu s$$

### 4. Tiempo de Subida de la Tensión de Salida ( $t_s$ ) (Rise Time):

Tiempo requerido por la tensión de salida para pasar del 10% al 90% del valor final de tensión.

$$\mu A741: t_s=0.3 \mu s \text{ (pequeña señal)}$$

Definen la frecuencia máxima a la que puede trabajar el AO

PARAMETER		TEST CONDITIONS	$\mu A741Y$			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
$t_r$	Rise time	$V_I = 20 \text{ mV}, R_L = 2 \text{ k}\Omega,$ $C_L = 100 \text{ pF},$ See Figure 1	0.3			$\mu s$
	Overshoot factor		5%			
SR	Slew rate at unity gain	$V_I = 10 \text{ V}, R_L = 2 \text{ k}\Omega,$ $C_L = 100 \text{ pF},$ See Figure 1	0.5			$V/\mu s$

### 5. Máxima Corriente de Salida o de Cortocircuito ( $I_{sc}$ ) (Output Short

Circuit Current): Corriente que puede dar o aceptar el AO cuando su terminal de salida se cortocircuita con la masa o con los terminales de alimentación.

PARAMETER		TEST CONDITIONS	$\mu A741Y$			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
$I_{os}$	Short-circuit output current		$\pm 25$	$\pm 40$	mA	

### 11.2.3. Características de TRANSFERENCIA.

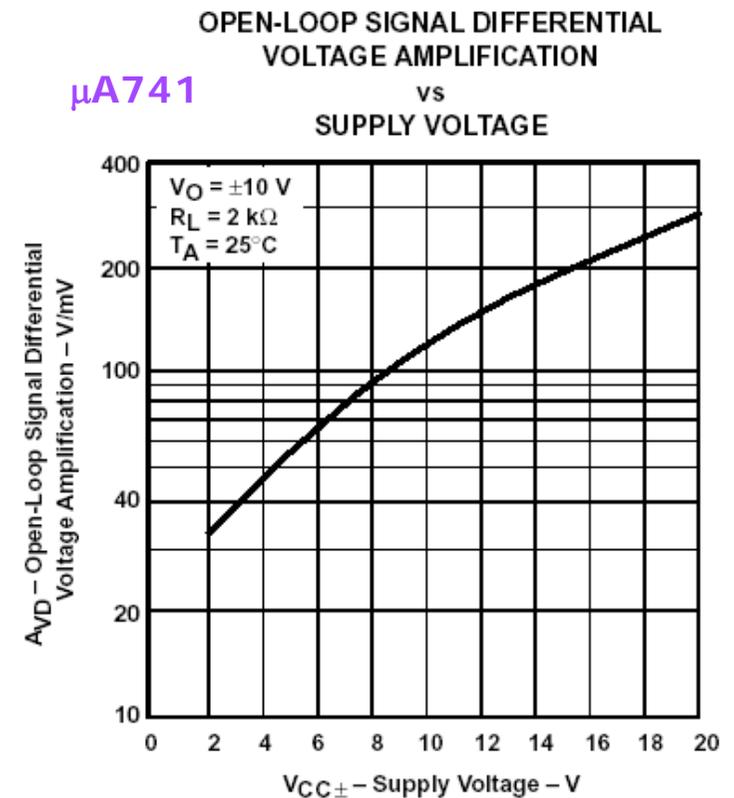
*Parámetros que relacionan las señales de entrada con las de salida*

#### 1. Ganancia Diferencial en Lazo Abierto ( $A_d$ ) (*Open Loop Voltage Gain*):

Relación entre la variación de la tensión producida en la salida (siempre dentro de un rango especificado) y la variación de la tensión diferencial de entrada.

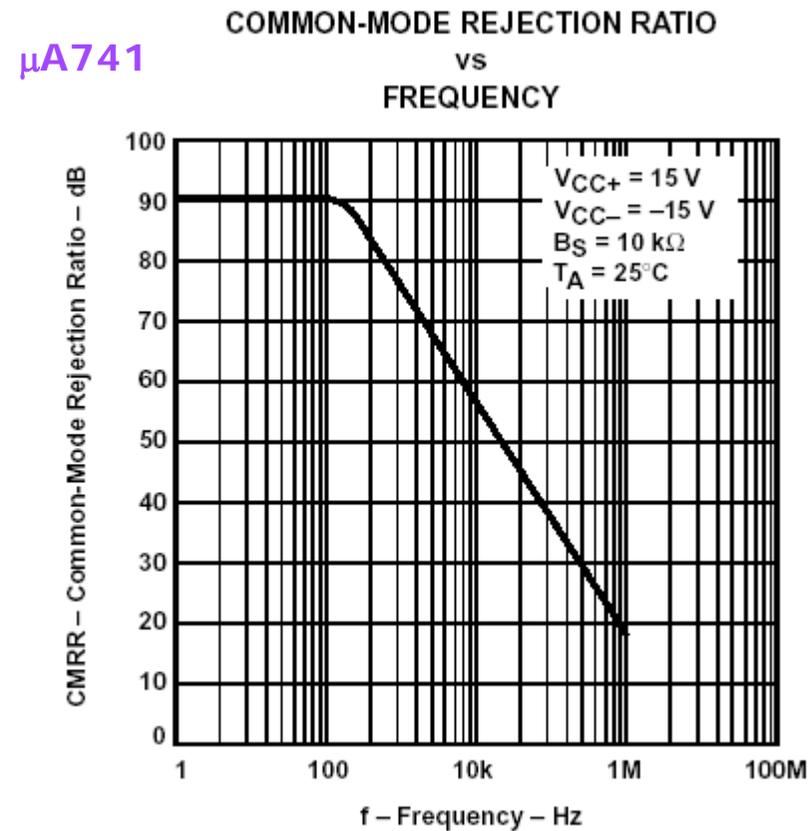
- Se mide en V/mV (o en dB)
- Varía con la temperatura, la carga y la tensión de alimentación.

$\mu A741$ :  $A_d = 200$  (V/mV)



**2. Factor de Rechazo en Modo Común (CMRR)** (*Common Mode Rejection Ratio*): Cociente entre la ganancia diferencial y la ganancia en modo común del AO. Generalmente se expresa en dB.

$\mu$ A741:  $CMRR=90$  dB

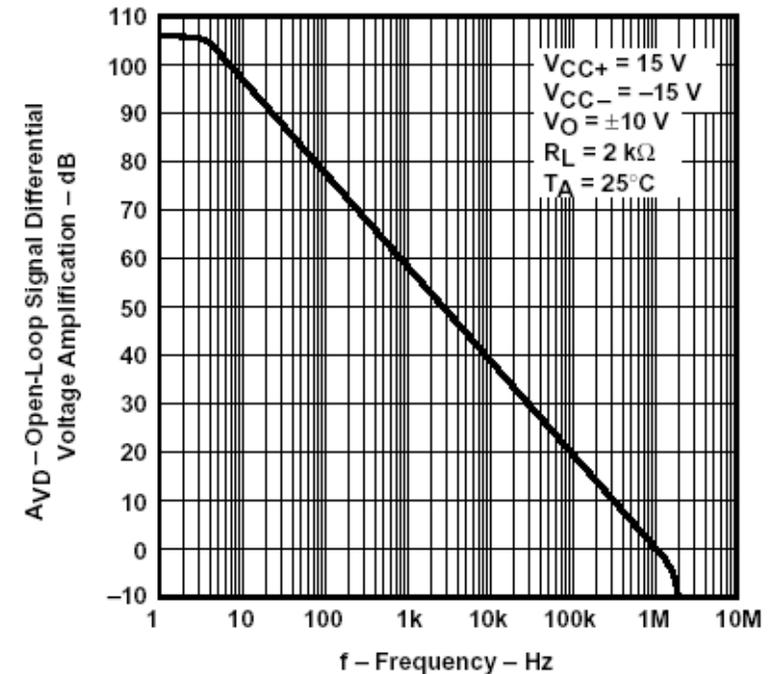


### 3. Ancho de Banda (BW) (*Bandwidth*):

Frecuencia para la cual la ganancia en lazo abierto disminuye 3 dB respecto a su valor máximo.

$\mu A741$

OPEN-LOOP LARGE-SIGNAL DIFFERENTIAL  
VOLTAGE AMPLIFICATION  
VS  
FREQUENCY



### 4. Producto Ganancia-Ancho de Banda (GBW) (*Gain-Bandwidth Product*):

Frecuencia a la cual la ganancia en lazo abierto del AO se reduce a la unidad.

También se suele denominar **Frecuencia de Transición (f<sub>t</sub>)**.