

Circuitos Electrónicos I

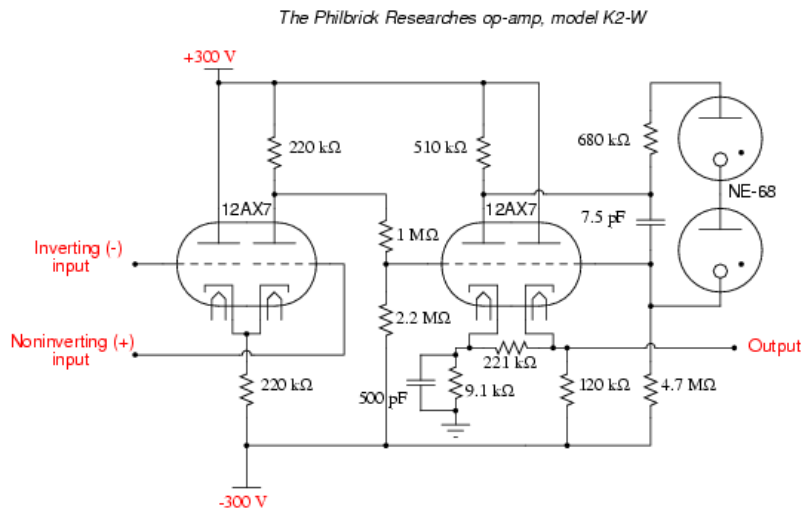
Amplificadores Operacionales



AMPLIFICADORES OPERACIONALES (UN POCO DE HISTORIA)

La idea de construir un amplificador de gran ganancia, para ser utilizado en realimentación negativa como módulo en sistemas de procesamiento analógico de señales existe desde 1940.

En esa época solo existían las válvulas de vacío como componentes para amplificar, de modo que resultaba constructivamente complicada su implementación.



Ejemplo del circuito del OP AMP K2-W



Versiones prácticas
de operacionales
OP AMP K2-W
donde se ven las
válvulas de vacío

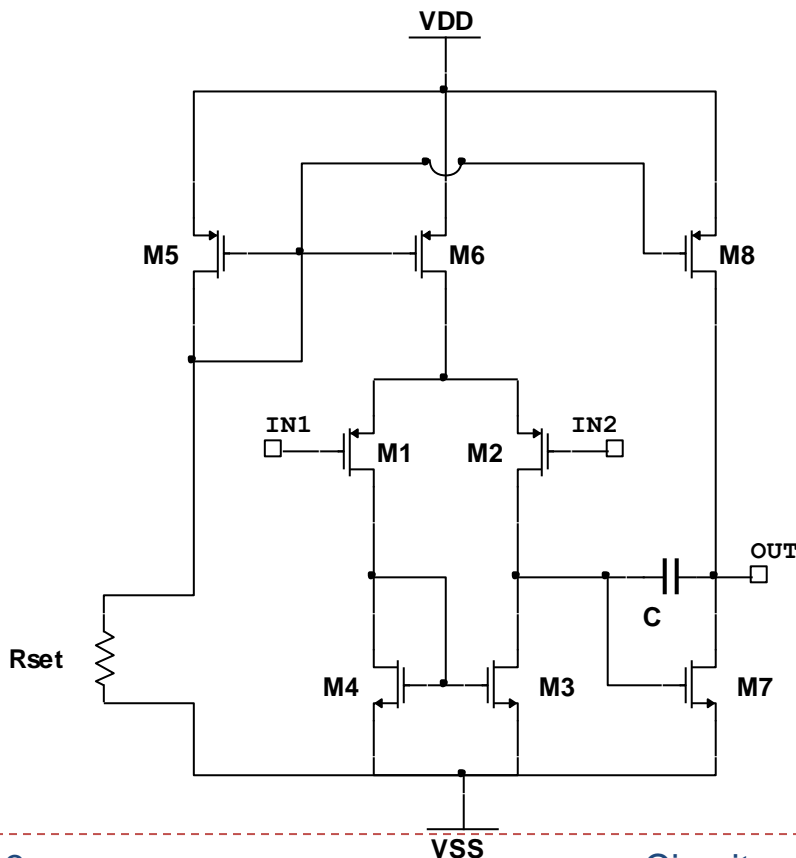
El amplificador del ejemplo tiene una ganancia de 20.000 y consume mucha potencia para calentar los filamentos termoiónicos de las válvulas. Obsérvese que las fuentes de alimentación son de $\pm 300V$.

AMPLIFICADORES OPERACIONALES (UN POCO DE HISTORIA)

El desarrollo de técnicas de integración ha permitido construir amplificadores operacionales con un gran número de componentes que logran ganancias de 10^6 .

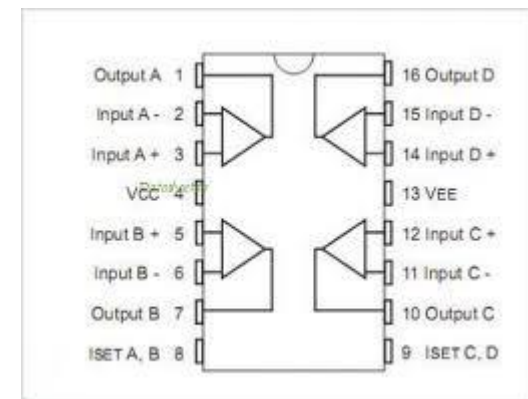
Existen amplificadores en tecnología BJT y MOS.

Existen amplificadores operacionales con prestaciones especiales.



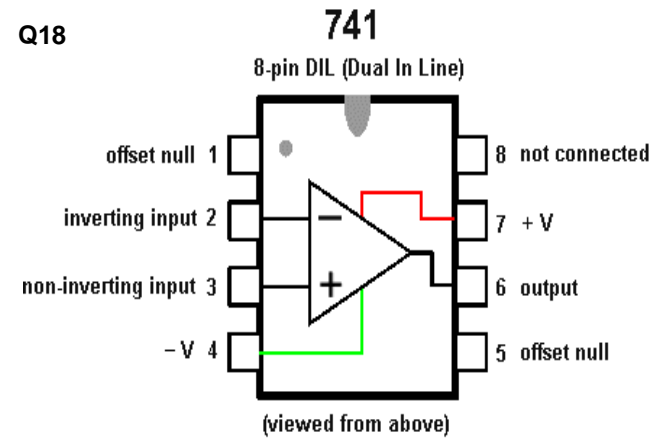
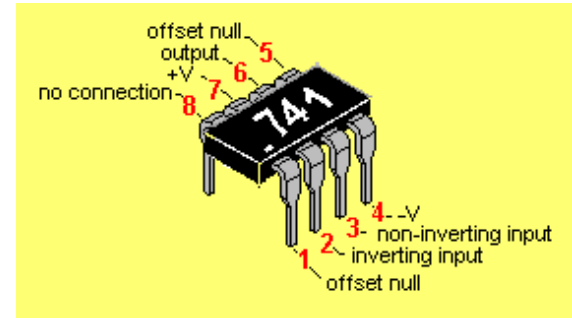
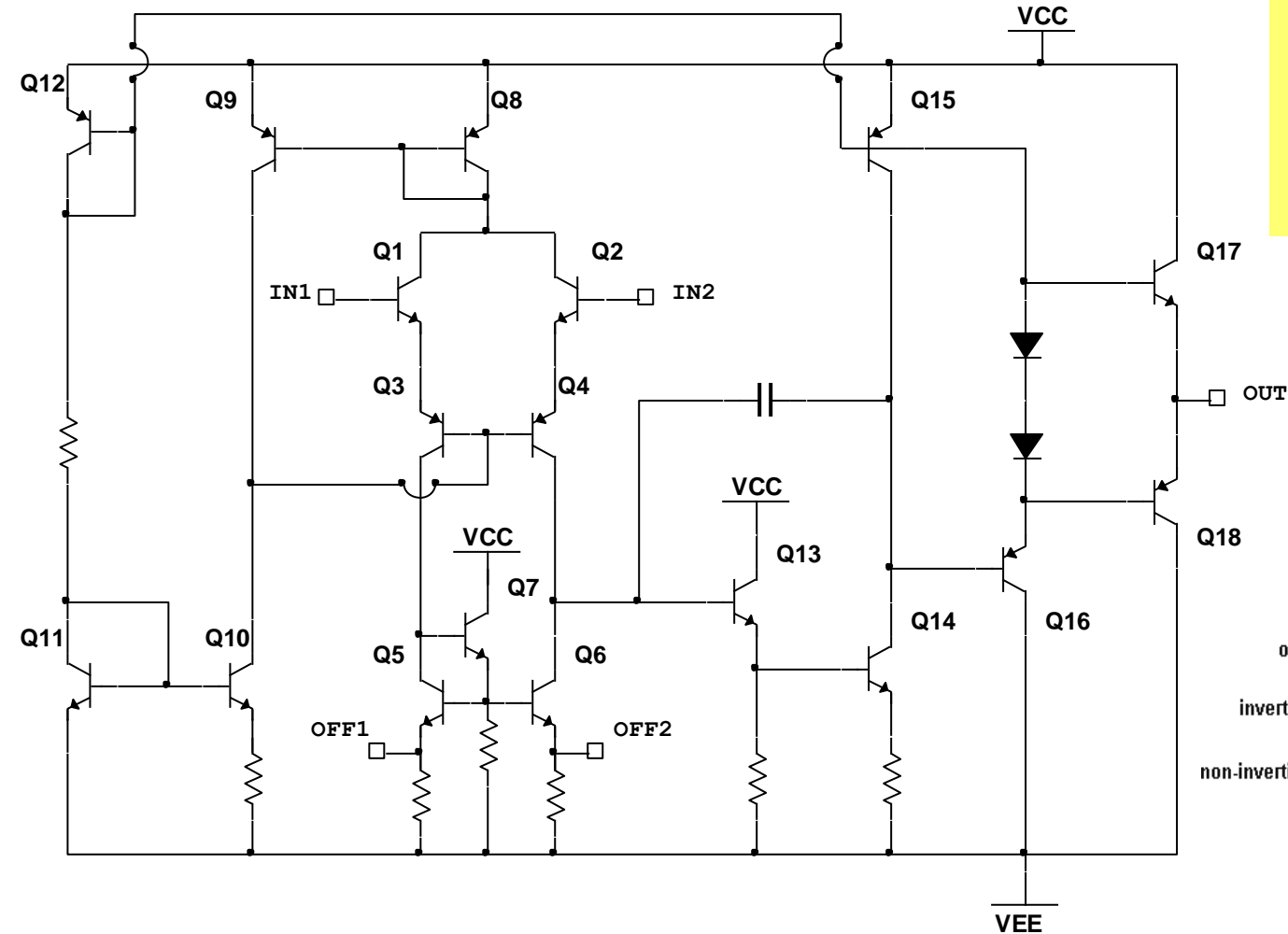
MC14573

A.O. de bajo costo,
tecnología CMOS de enriquecimiento,
baja disipación, polarización programable



AMPLIFICADORES OPERACIONALES (UN POCO DE HISTORIA)

A.O. 741 . Tecnología BJT, bajo costo, usos generales



MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Los OA son amplificadores de tensión de entrada diferencial y salida single-ended

El OA ideal se define como un amplificador con

Entrada diferencial

Un solo terminal de salida

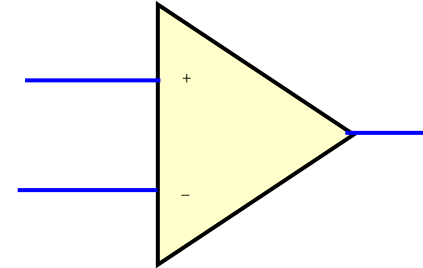
Ganancia infinita ($a = \infty$)

Impedancia de entrada infinita ($R_i = \infty$)

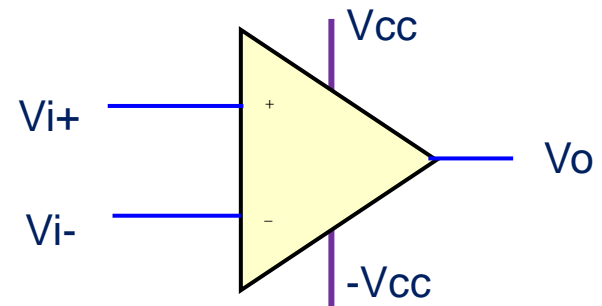
Impedancia de salida nula ($R_o = 0$)

Salida nula a entrada diferencial nula

Representación circuital de 3 terminales



Representación circuital de 5 terminales



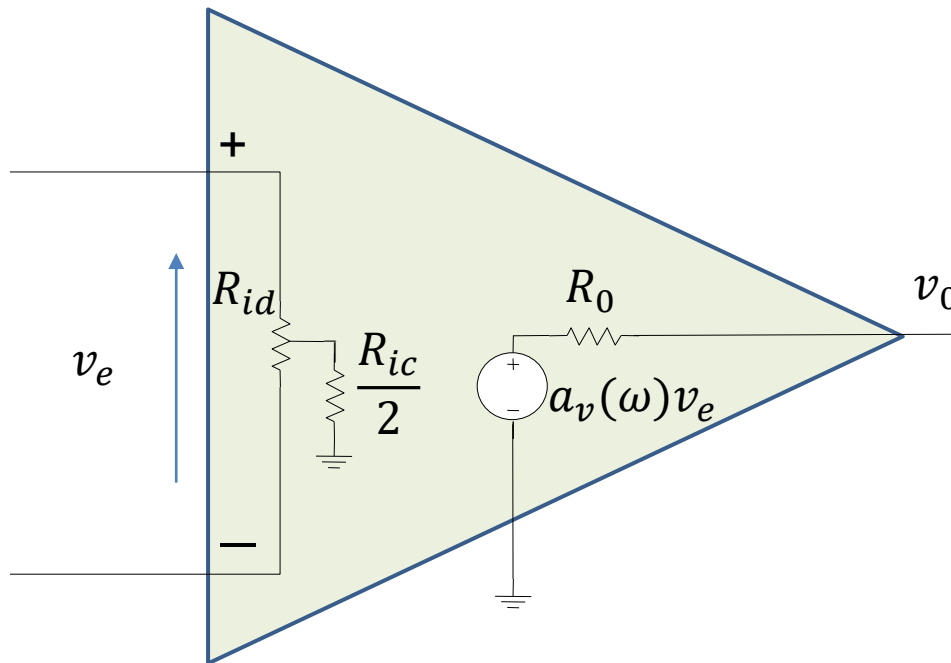
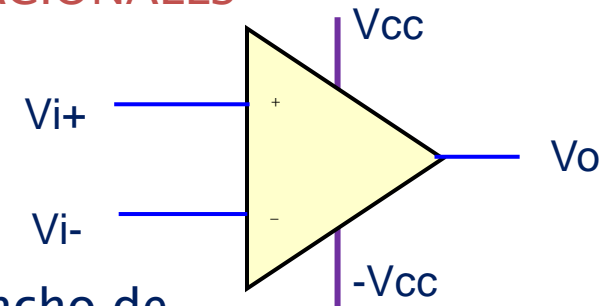
Por su alta ganancia, los OA son concebidos para funcionar realimentados, en general negativamente

Como están contruidos con circuitos transistorizados, las características eléctricas de los OA reales difieren de las ideales en muchos aspectos

MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Comportamiento en señal del OA real

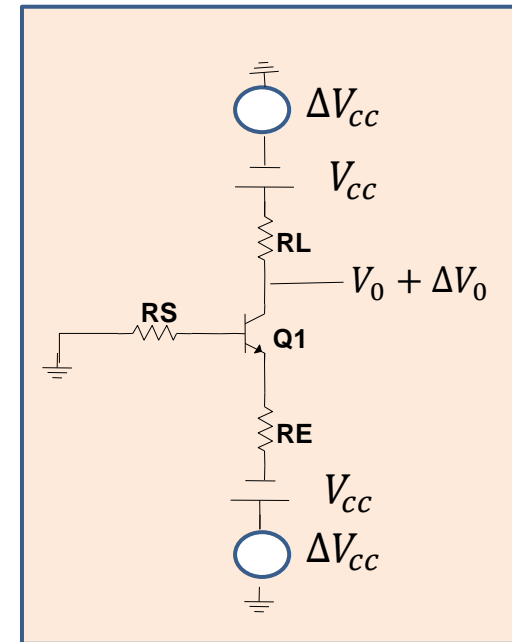
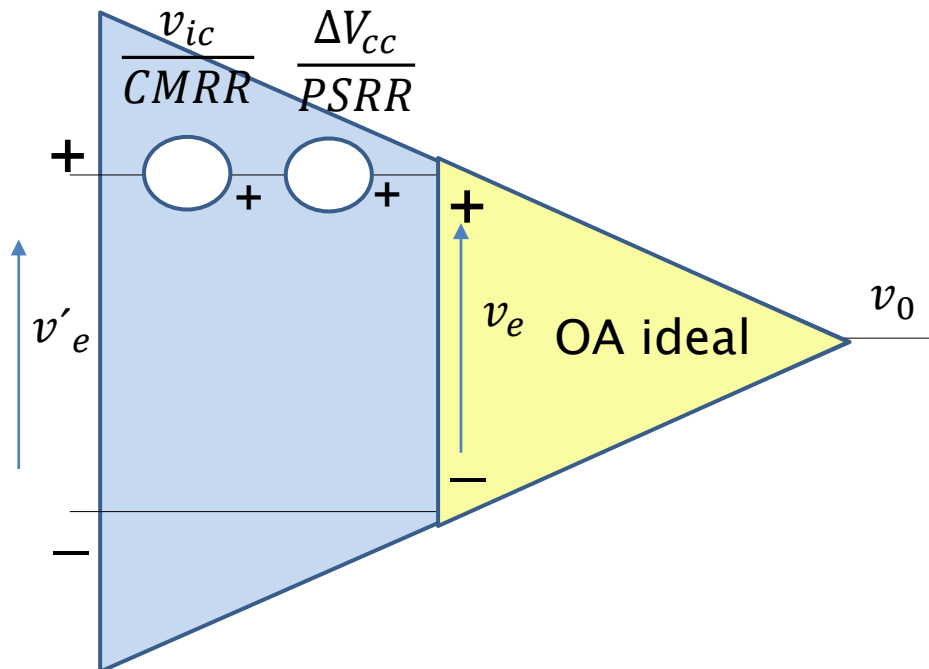
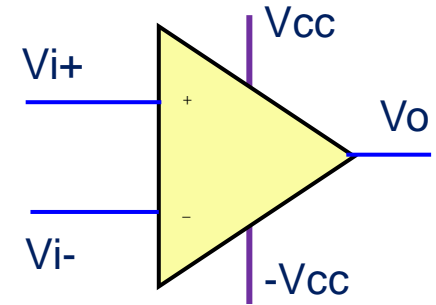
- La ganancia a_v es finita
- La ganancia $a_v(\omega)$ tiene producto ganancia x ancho de banda (ABW) limitado
- Presenta impedancia de entrada de MD y MC finitas
- Presenta impedancia de salida no nula.



MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Comportamiento del OA real frente a señales espurias

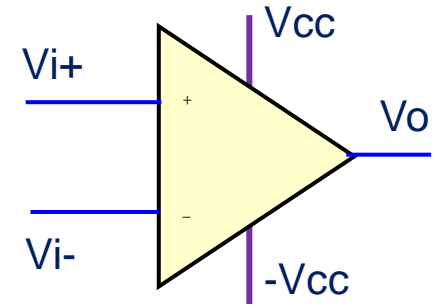
- El CMRR es finito (MC de entrada produce salida)
- El PSRR (power supply rejection ratio) es finito (zumbido o interferencia a través de alimentación produce salida)



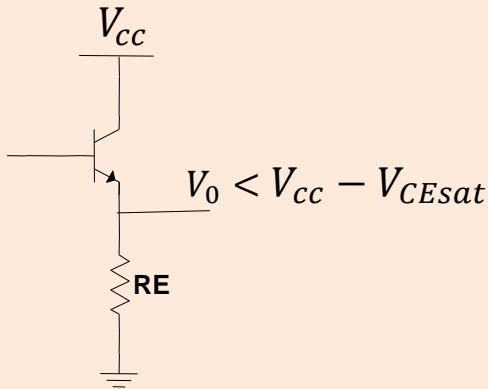
MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Comportamiento del OA real frente a grandes señales

- La excursión máxima de señal está limitada por debajo de la alimentación
- La velocidad de cambio de la salida (slew rate) está limitada



saturación



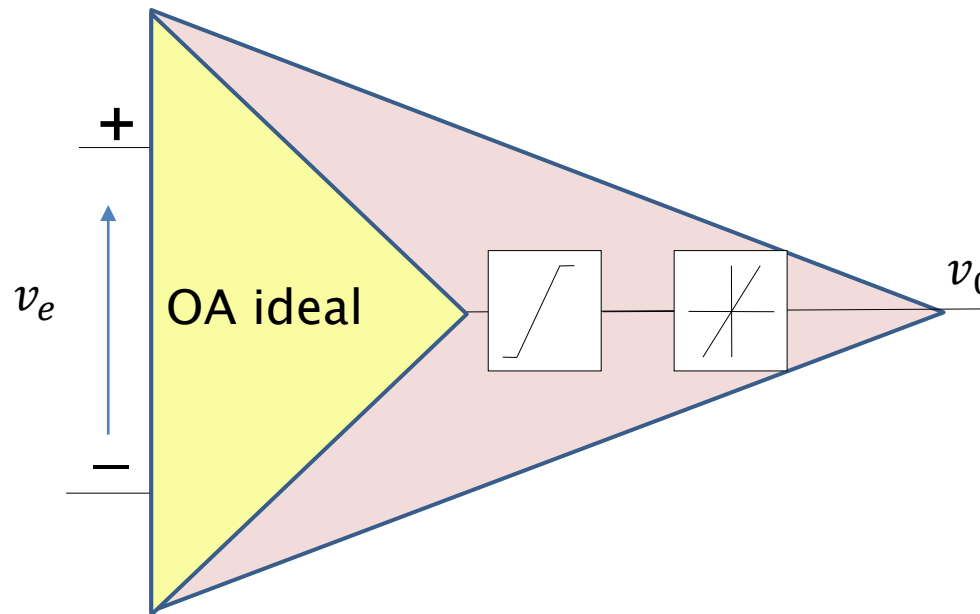
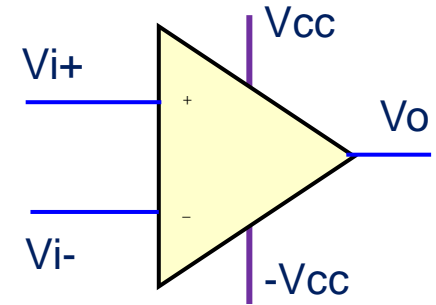
slew rate



MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Comportamiento del OA real frente a grandes señales

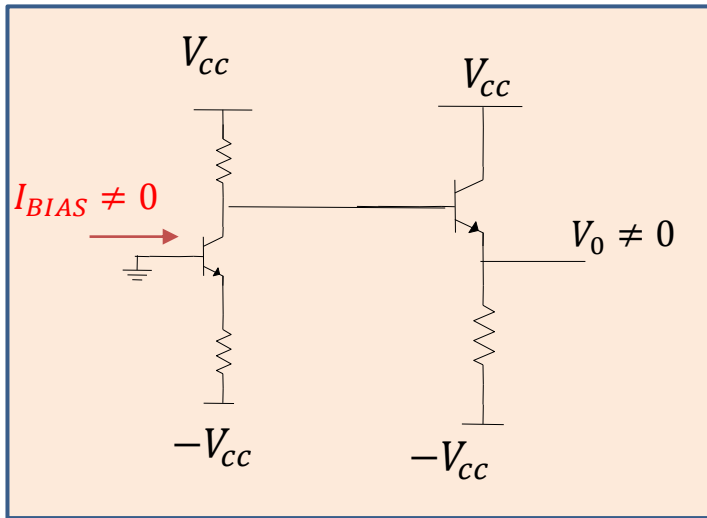
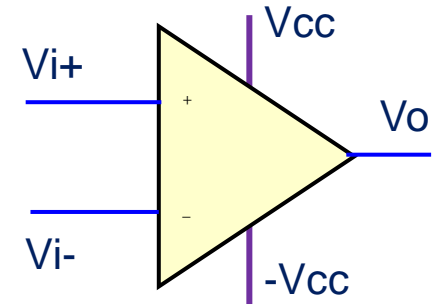
- La excursión máxima de señal está limitada por debajo de la alimentación
- La velocidad de cambio de la salida (slew rate) está limitada



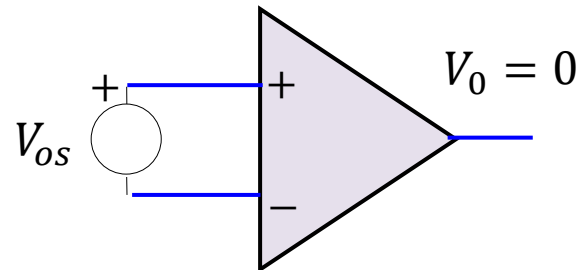
MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Polarización del OA real

- Corrientes de polarización no nulas por las entradas
- Tensión de salida de polarización no nula por desajustes en los circuitos de corrimiento de polarización



Tensión de offset: tensión diferencial de entrada de cc (V_{os}) para que la salida sea $V_o = 0$



MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Corrientes de polarización del OA real

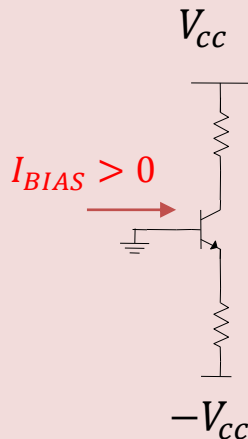
- Corrientes de polarización no nulas por las entradas: I_{BIAS}^+ , I_{BIAS}^-

Se definen:

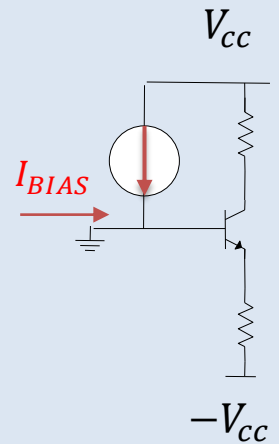
- Corriente de offset: $I_{OS} = I_{BIAS}^+ - I_{BIAS}^-$
- Corriente de polarización media $I_{BIAS} = \frac{1}{2}(I_{BIAS}^+ + I_{BIAS}^-)$

En gral I_{BIAS}^+ , I_{BIAS}^-
tienen sentido definido
(entrantes, npn) e

$$I_{OS} \sim 0.1 - 0.25 I_{BIAS}$$



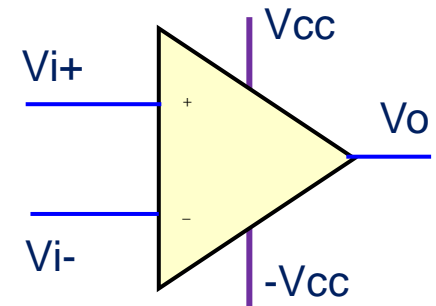
En OA con compensación de
corriente de entrada I_{BIAS}^+ ,
 I_{BIAS}^- pueden no tener sentido
definido e I_{OS} puede tener
valores similares a I_{BIAS}



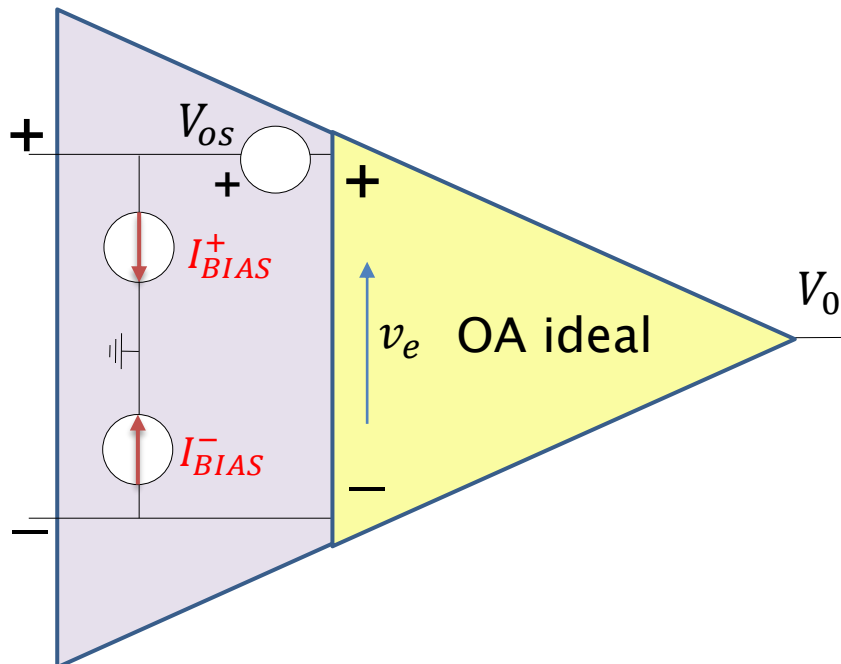
MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Polarización del OA real

- Corrientes de polarización no nulas por las entradas
- Tensión de salida de polarización no nula por desajustes en los circuitos de corrimiento de polarización



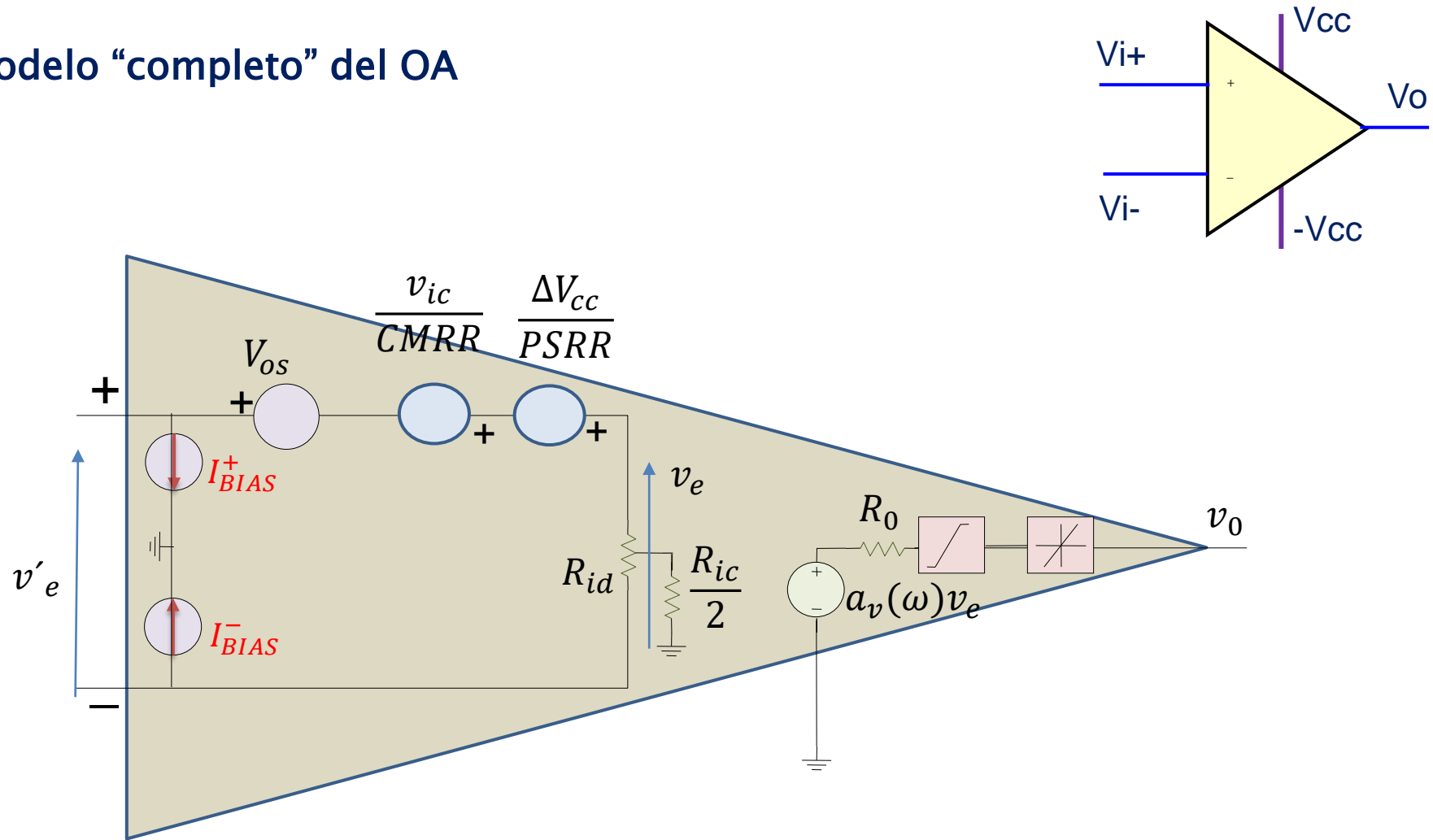
Tensión de offset: tensión diferencial de entrada de cc (V_{os}) para que la salida sea $V_o = 0$



- Las fuentes de corriente del modelo demandan al circuito externo las corrientes de polarización.
- La V_{os} del modelo debe ser cancelada por una V_{os} en contrafase del circuito externo

MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Modelo “completo” del OA



MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El A.O. ideal se define como un amplificador con

Entrada diferencial

Un solo terminal de salida

Ganancia infinita ($a = \infty$)

Impedancia de entrada infinita ($R_i = \infty$)

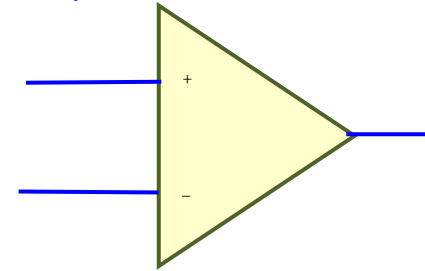
Impedancia de salida nula ($R_o = 0$)

CMRR = ∞

PSRR = ∞

Salida nula a entrada nula (offset nulo)

Representación circuital



El A.O. real difiere del ideal principalmente en estos parámetros

Ganancia finita

Impedancias de entrada de modos diferencial y común finitas

Impedancia de salida no nula

Ancho de banda finito

CMRR finito

PSRR finito

Corrientes de polarización no nulas

Offset no nulo

No linealidades (saturación y slew rate)

MODELOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El A.O. real difiere del ideal principalmente en estos parámetros

Ganancia finita

Impedancias de entrada de modos diferencial y común finitas

Impedancia de salida no nula

Ancho de banda finito

CMRR finito

PSRR finito

Corrientes de polarización no nulas y distintas

Offset no nulo

No linealidades: saturación y slew rate

A.O. 741

$a=300.000$

$2M\Omega$

50Ω

$ABW=1,5MHz$

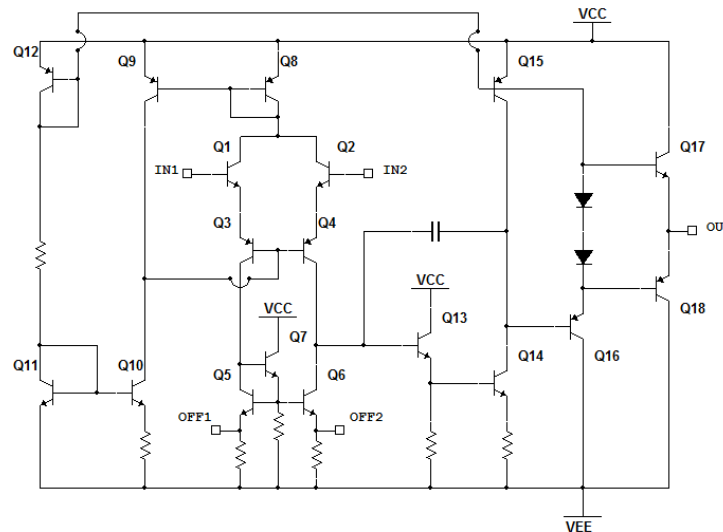
$90dB$

$96dB$

$80nA+0,5nA/^{\circ}C$, $\Delta=20nA$

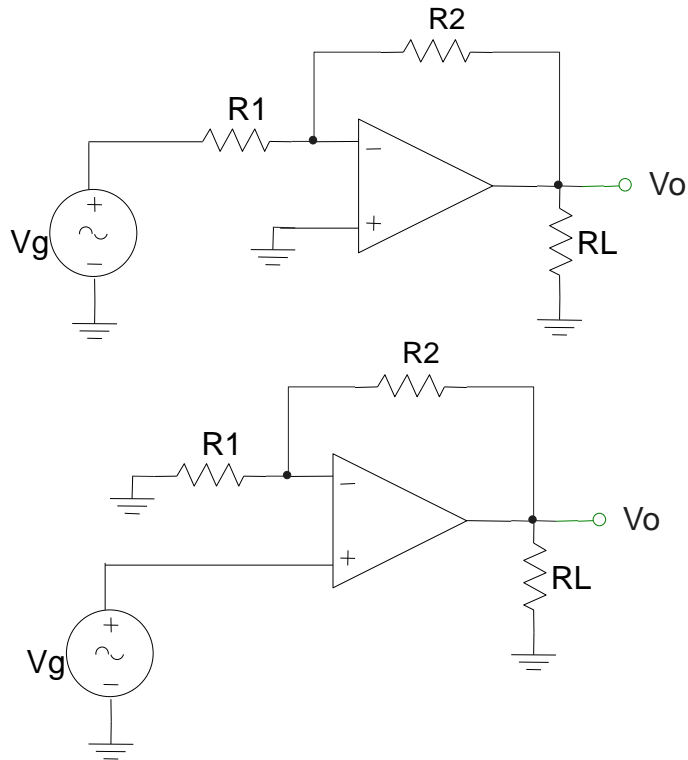
$1mV+15\mu V/^{\circ}C$

$V_{cc}=1V$; $0,5V/\mu s$



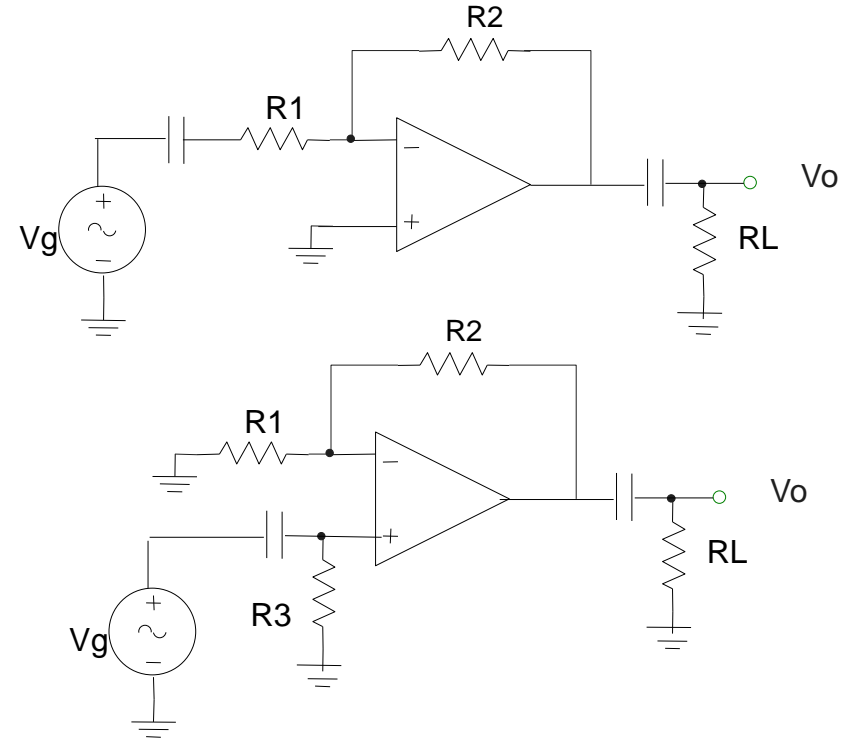
ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Acoplamiento Directo



- Acoplamiento de señales de baja frecuencia.
- Corrientes de polarización por fuente y carga.
- I_{BIAS} y V_{OS} afectan salida.

Acoplamiento Capacitivo

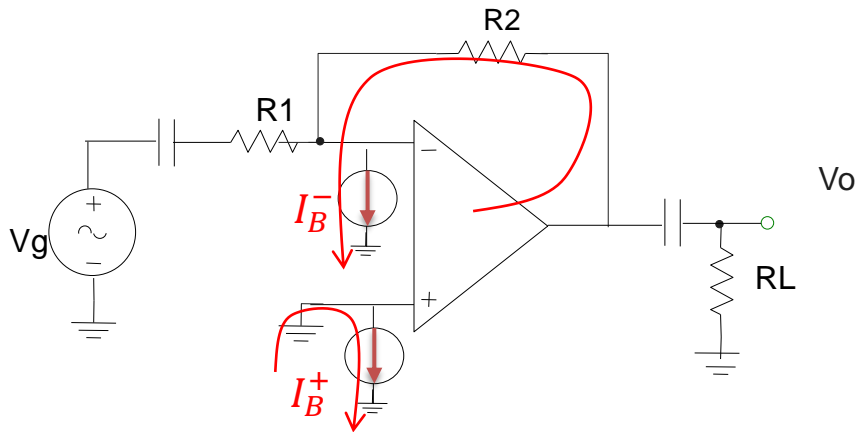


- Acoplamiento de señales de frecuencia media/alta.
- Circuitos adicionales para corrientes de polarización.
- I_{BIAS} y V_{OS} no afectan salida.

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

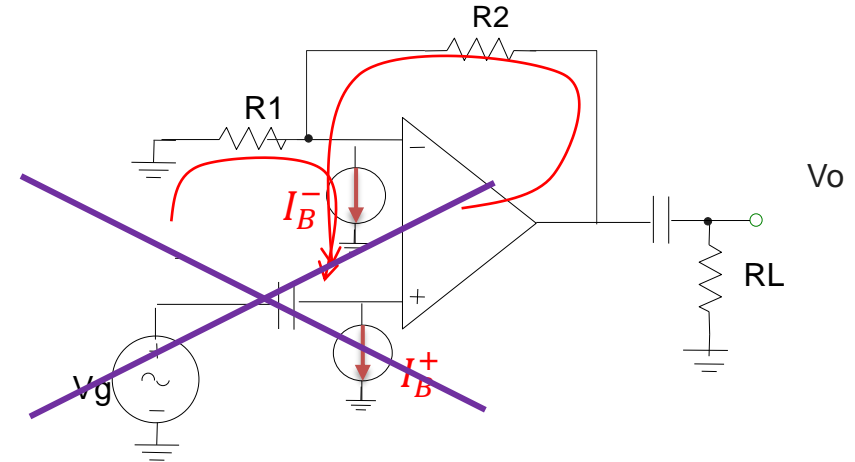
Acoplamiento Capacitivo

Configuración inversora

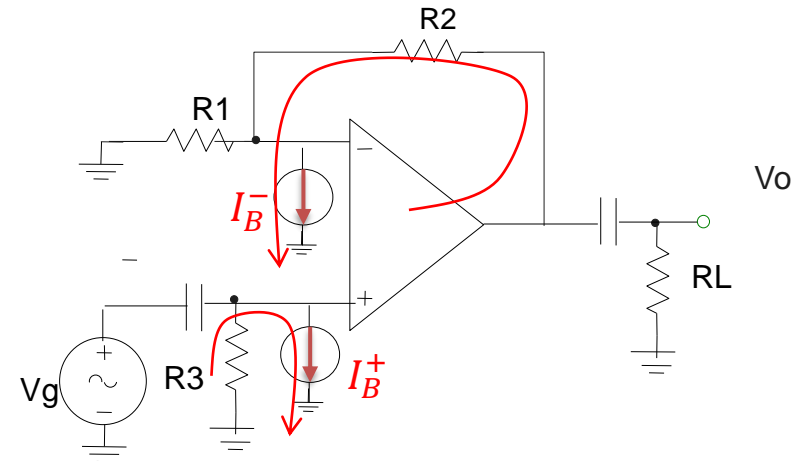


I_B^+ circula por $R3$, pero R_{in} cae a valor de $R3$

Configuración no inversora



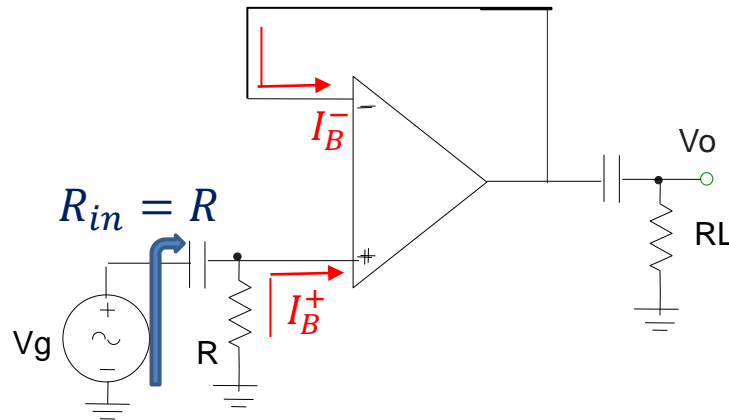
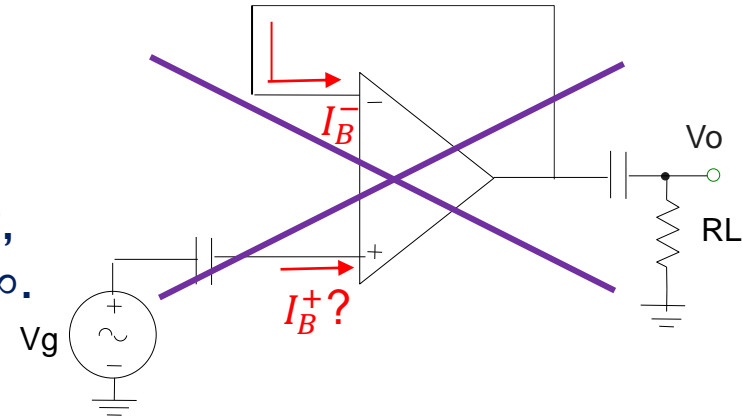
No hay camino para I_B^+ , $IN+$ abierta



ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

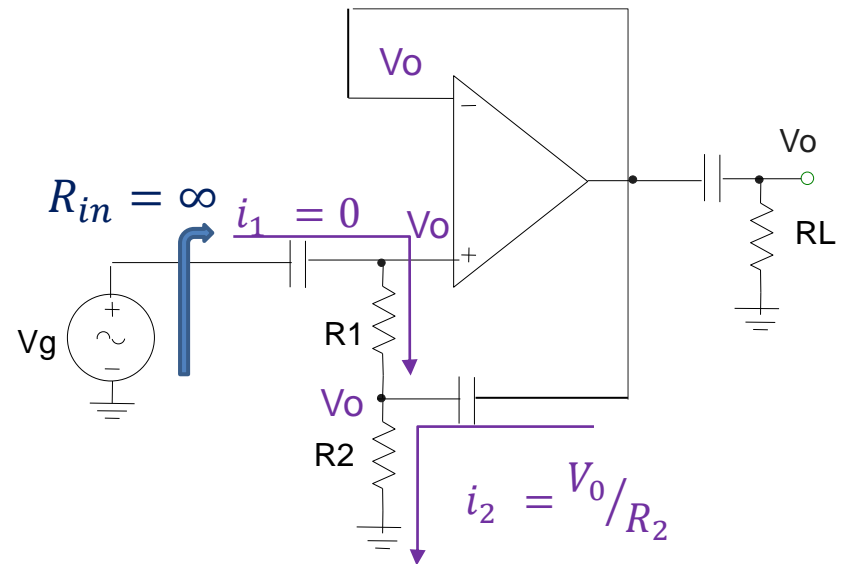
Acoplamiento Capacitivo

Buffer: el problema de pérdida de resistencia de entrada de la configuración no-inversora se vuelve crítico en el buffer, que pierde su propiedad principal: $R_{in} < \infty$.



Bootstrapping: técnica para recuperar $R_{in} = \infty$ del buffer:

En alta frecuencia las C están en cc:

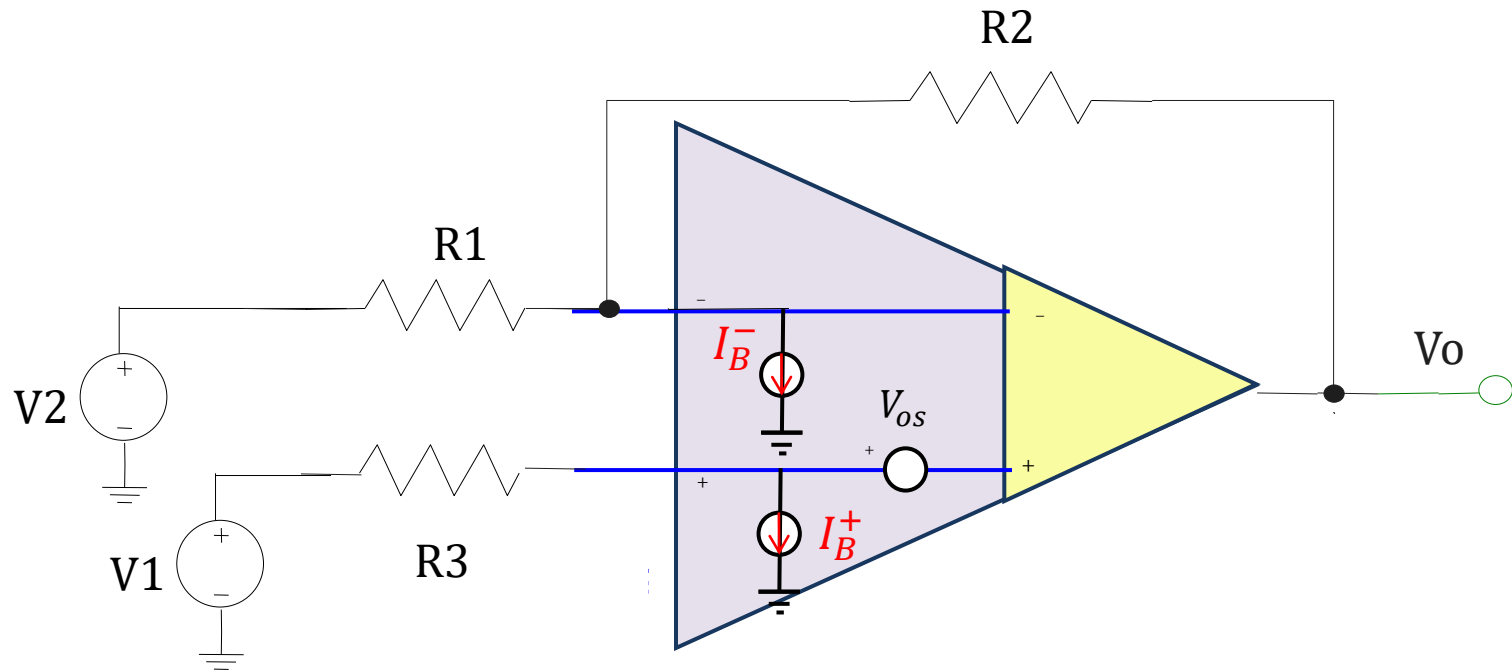


ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Acoplamiento Directo

Corrientes de polarización y tensión de offset afectan la salida

Configuración Inversora ($V1=0$) / No-Inversora ($V2=0$)



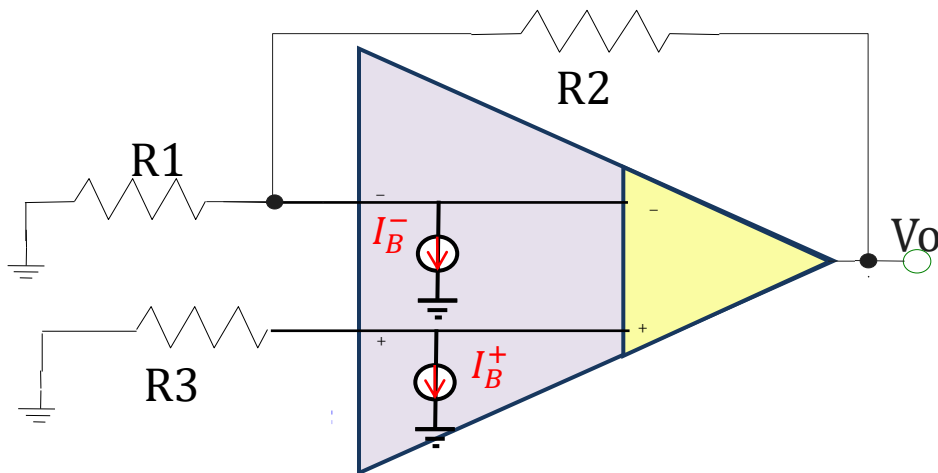
Agregamos $R3$ que no tiene efecto para señales $V1$ y $V2$ (OA ideal: $I_{R3}=0$)

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

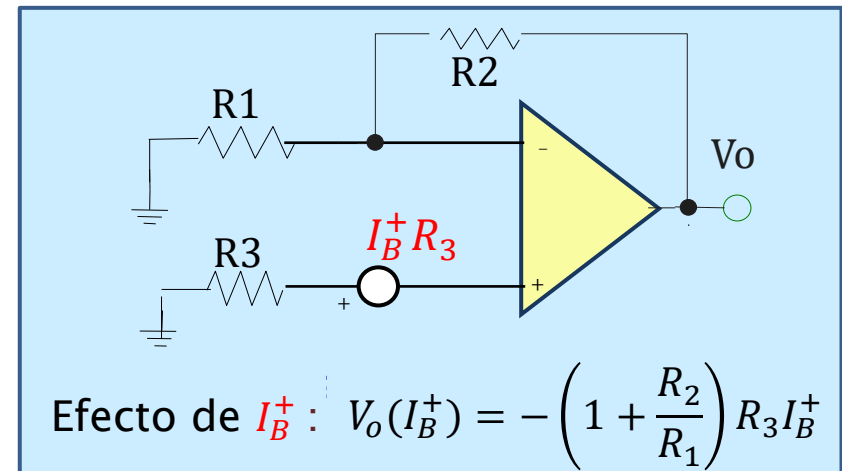
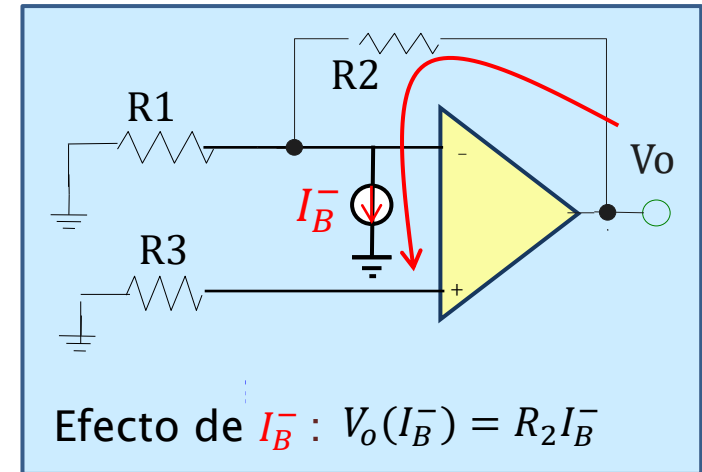
Acoplamiento Directo

Corrientes de polarización afectan la salida

Efecto de la Polarización Configuración Inversora / No-Inversora



$$V_o = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_3 I_B^+ + R_2 I_B^-$$

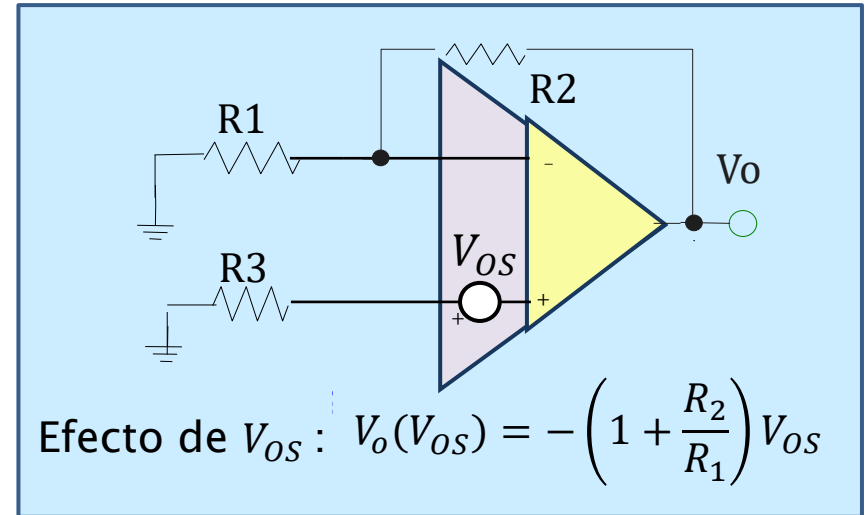


ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Acoplamiento Directo

Tensión de offset afecta la salida

Efecto de la Polarización Configuración
Inversora / No-Inversora



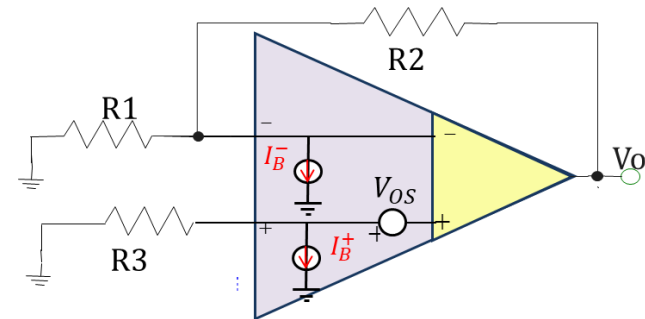
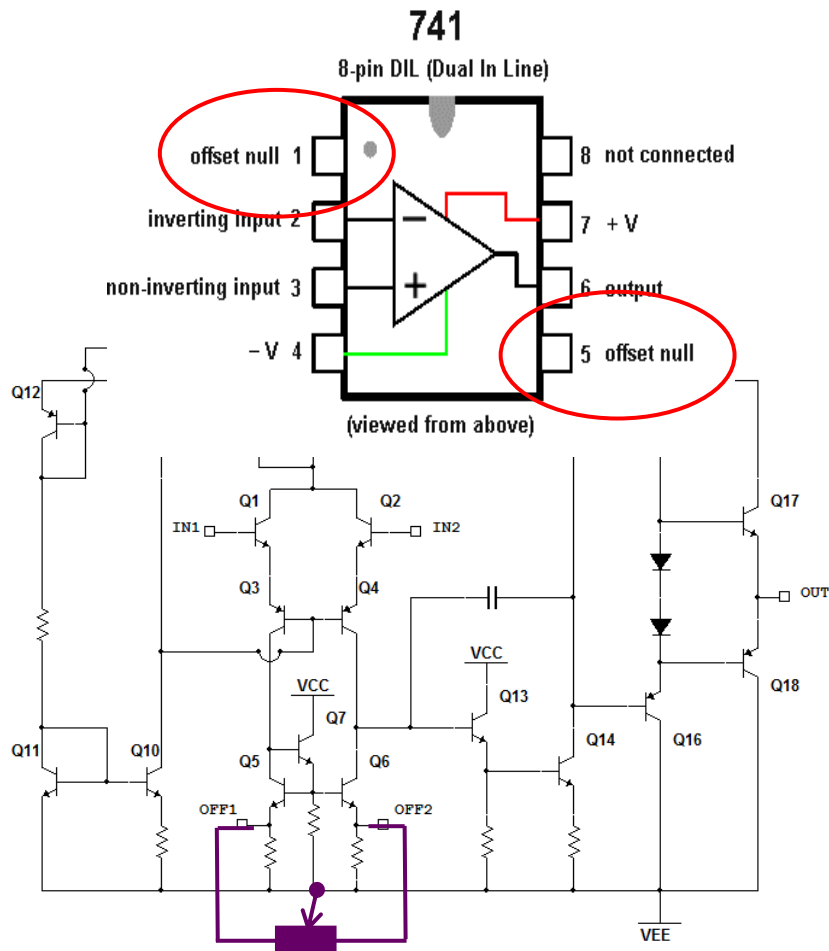
Corrientes de polarización y tensión de offset:

$$V_o = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{OS} - \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_3 I_b^+ + R_2 I_b^-$$

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Acoplamiento Directo

Compensación de la polarización



Compensación empleando el ajuste del OA con potenciómetro externo.

Con el ajuste de offset se compensan también las corrientes de polarización.

Compensación válida para el OA puntual y el circuito puntual

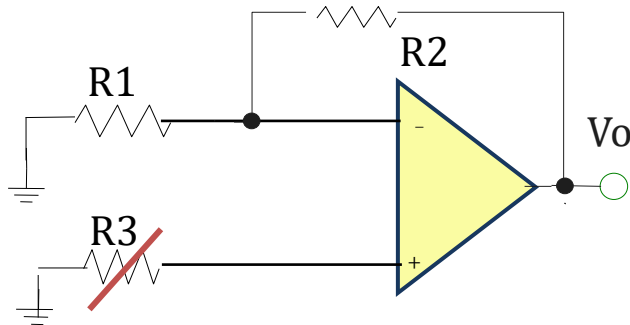
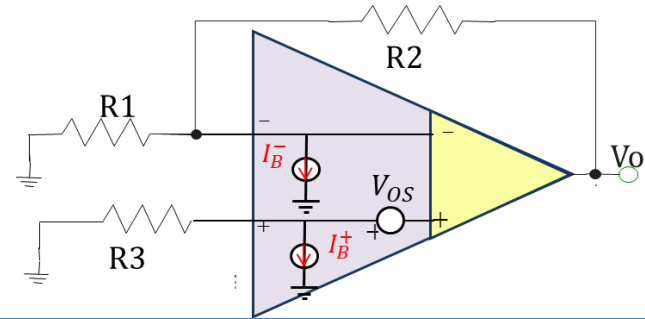
Sensible a deriva térmica

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Acoplamiento Directo

Compensación de la polarización

$$V_o = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{OS} - \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)R_3I_B^+ + R_2I_B^-$$

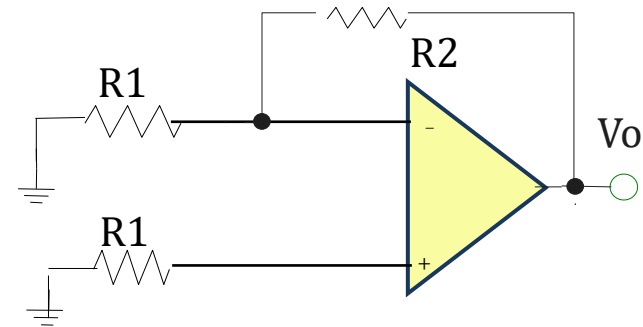


Compensación de OA sin terminales de compensación.

No asegura compensación total.

Compensación válida para el OA puntual y el circuito puntual

Sensible a deriva térmica



Para $R_3 = R_1 || R_2 \cong R_1$:

$$-\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)R_3I_B^+ + R_2I_B^- = R_2I_{OS}$$

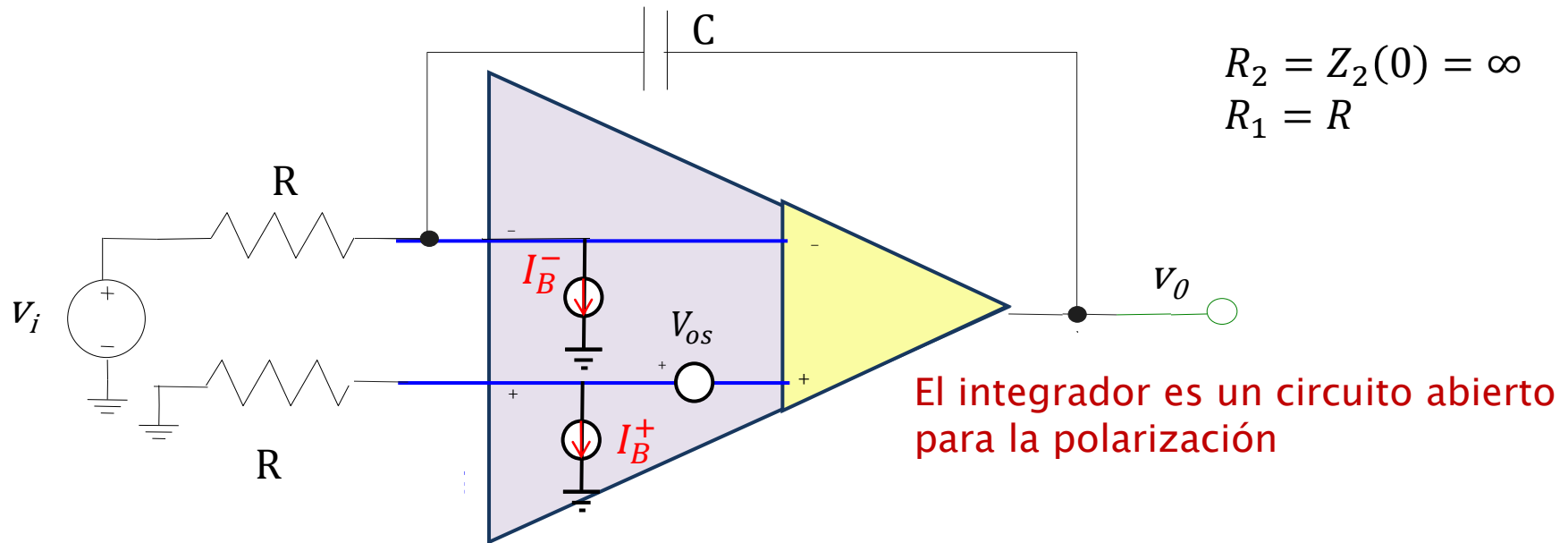
queda acotado el efecto de las I_B^- , I_B^+

Solución parcial pero simple y genérica.

Útil cuando el OA no tiene compensación interna de I_B^- , I_B^+ ($I_{OS} \ll I_B^-$, I_B^+)

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Corrientes de polarización y tensión de offset en el Integrador Operacional

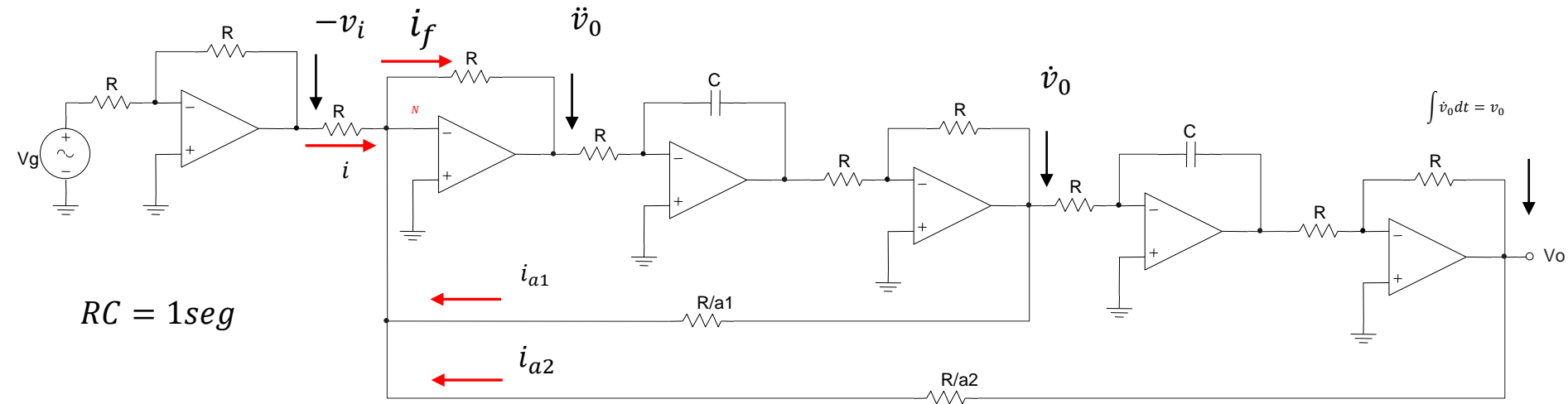


$$V_o(s) = -\left(1 + \frac{Z_2(s)}{R_1}\right)V_{os}(s) + Z_2(s)I_{os}(s) \rightarrow v_o(t) = -V_{os} + \left(\frac{I_{os}}{C} - \frac{V_{os}}{RC}\right)(t - t_0)$$

$v_o(t)$ crece linealmente hasta que el OA satura. Ídem si $v_i(t)$ tiene componente de cc.
No funciona.

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Corrientes de polarización y tensión de offset en el Integrador Operacional como parte de un circuito realimentado.

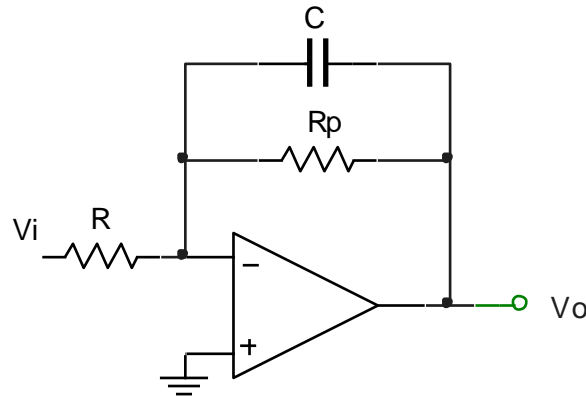


$$\ddot{v}_0(t) + a_1 \dot{v}_0(t) + a_2 v_0(t) = v_i(t)$$

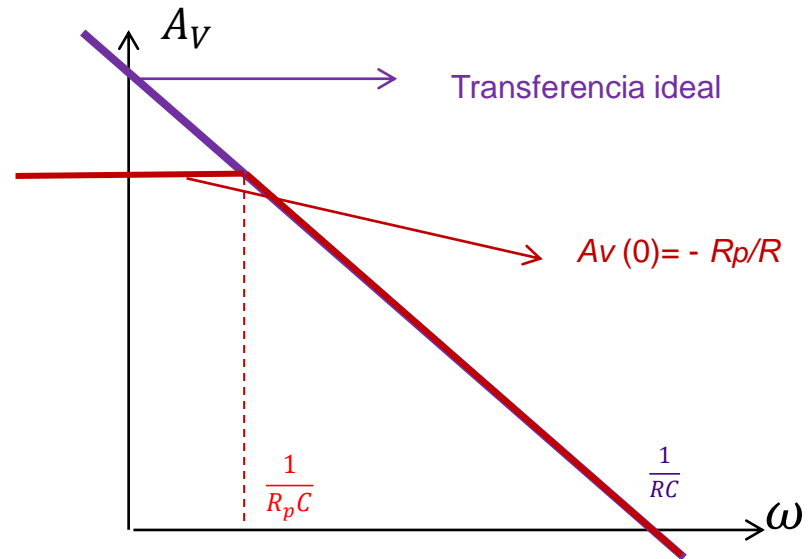
Para las corrientes de polarización y tensión de offset, los OA están sin realimentar (a lazo abierto), pero la cadena de amplificadores están realimentados a través de Ria1 y Ria2. Los OA no saturan.

ACOPLAMIENTO DE SEÑAL A AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Corrientes de polarización y tensión de offset en el Integrador Operacional



$$A_V(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = -\frac{R_p}{R} \cdot \frac{1}{1 + s(R_p C)}$$



Una solución a los problemas de corriente continua en el integrador consiste en brindar un camino de realimentación a frecuencia nula. La resistencia R_p cumple esa función.

El efecto de las corrientes de polarización y tensión de offset es el correspondiente a config inversora/no-inversora con $R_1 = R$ y $R_2 = R_p$