

# Circuitos Electrónicos I

Instrumentación Electrónica

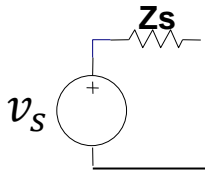


# ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

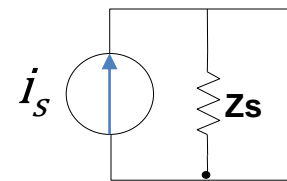
Una de las principales aplicaciones de la electrónica analógica es acondicionar señales continuas provistas por sensores para su conversión a señal digital por medio de ADCs y posterior procesamiento digital.

Las fuentes de señal (sensores) se caracterizan por su alta/baja impedancia, frecuencias dc/ac, a tierra/flotantes/diferenciales, etc.

Fuentes de baja impedancia (modelo Thevenin): termocuplas, strain-gages



Fuentes de baja impedancia (modelo Norton): fotodiodos, electrodos pH, piezoeléctricos



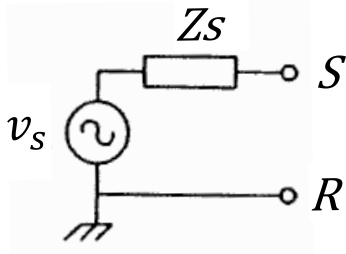
Fuentes de dc (acoplamiento directo): termocuplas, etc.

Fuentes de ac (acoplamiento capacitivo): medición de impedancias, biopotenciales (EEG, ECG, EMG)

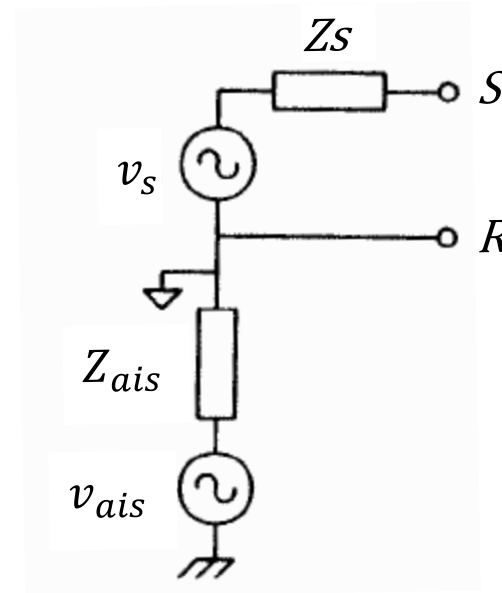
## ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Una señal de tensión es siempre una diferencia de potencial entre dos puntos.

**Fuentes de señal de terminal simple:** cuando uno de esos puntos se toma como referencia de tensión.



**Fuentes de señal a tierra:**  
cuando el punto de  
referencia es la tierra

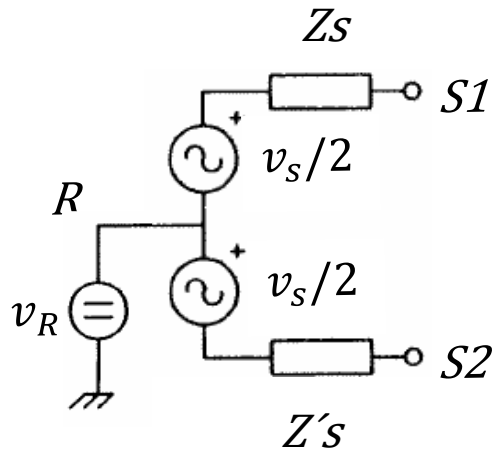


**Fuentes de señal flotante:** el punto  
de referencia está vinculado a tierra  
a través de una impedancia y/o  
potencial de aislación

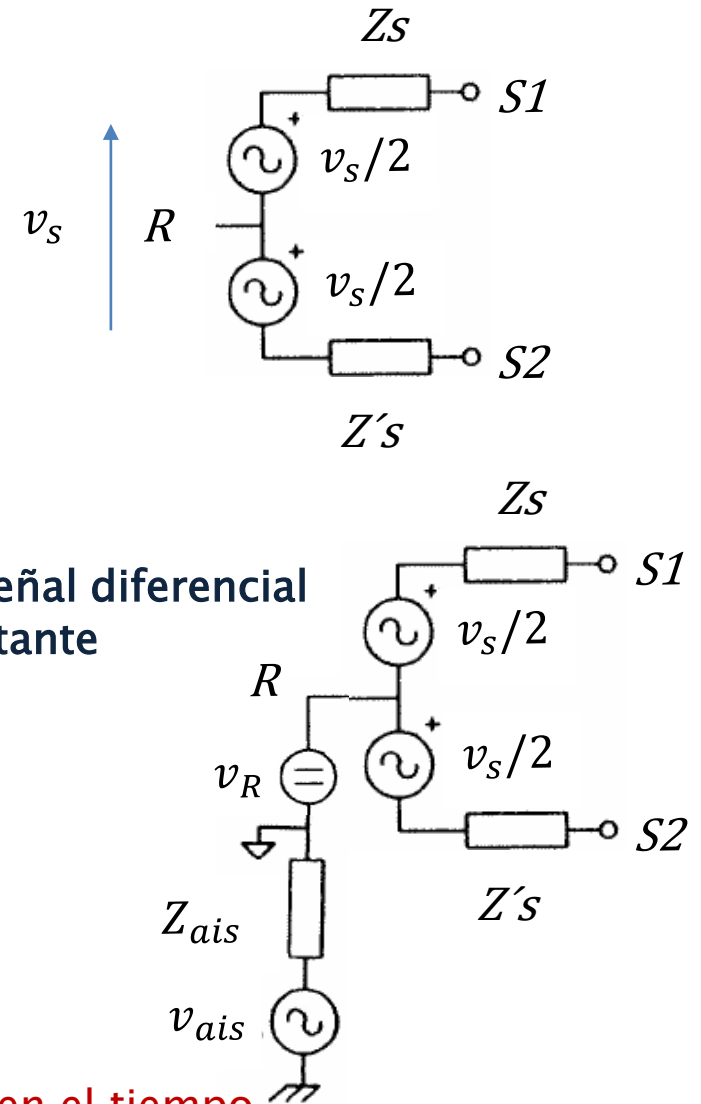
## ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

**Fuentes de señal de diferencial:** cuando las diferencias de potencial entre cada uno de los dos terminales y el punto de referencia son iguales y opuestas.

### Fuentes de señal diferencial a tierra



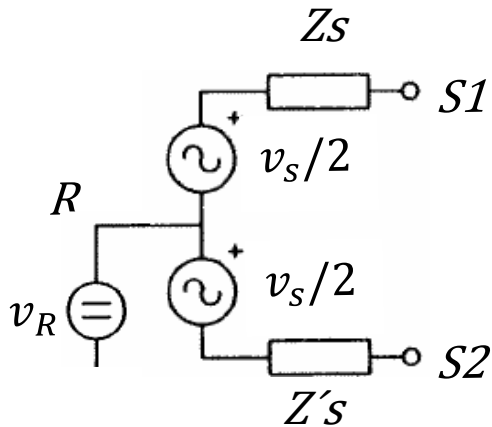
### Fuentes de señal diferencial flotante



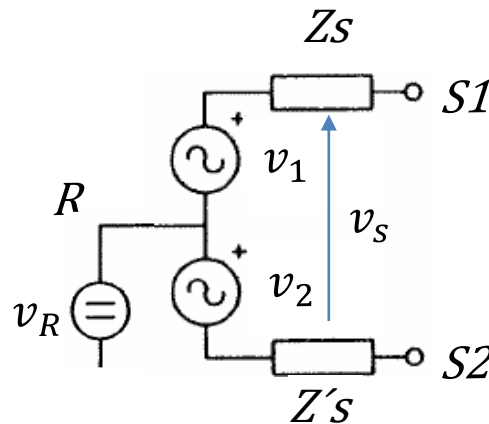
$v_R$  puede ser un potencial nulo, constante o variante en el tiempo

## ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

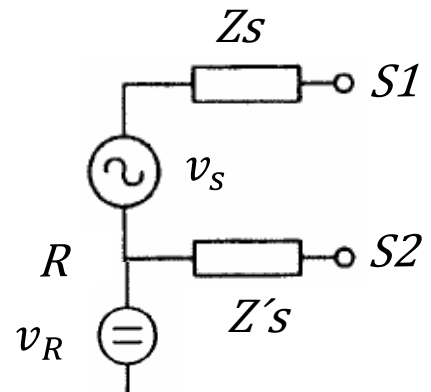
**Fuentes de señal pseudodiferencial:** cuando el potencial del punto de referencia no está en la mitad de los potenciales de los terminales ( $v_1 \neq v_2$ )



Fuente de señal diferencial



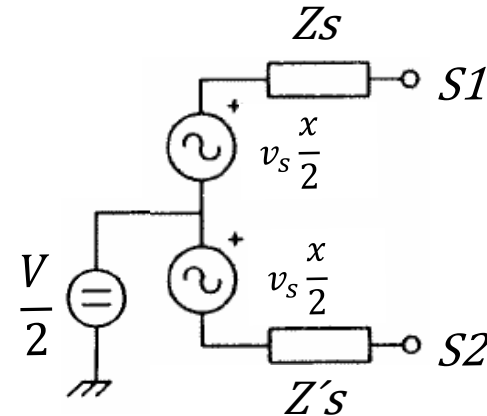
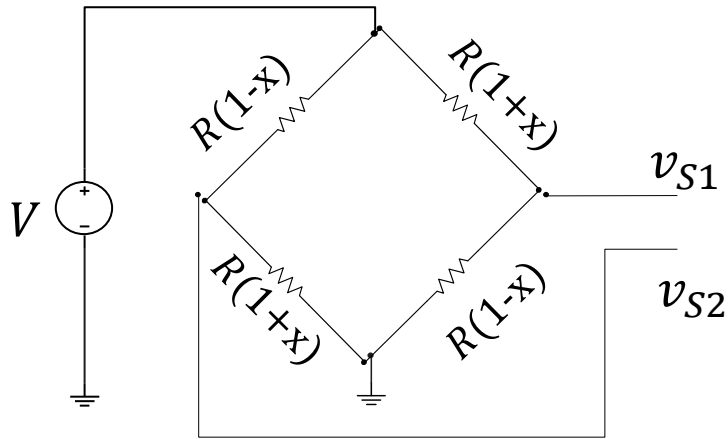
Fuentes de señal pseudodiferencial



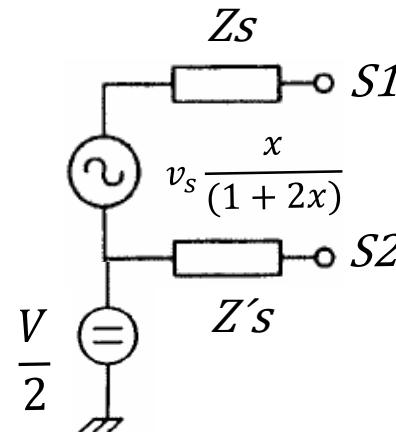
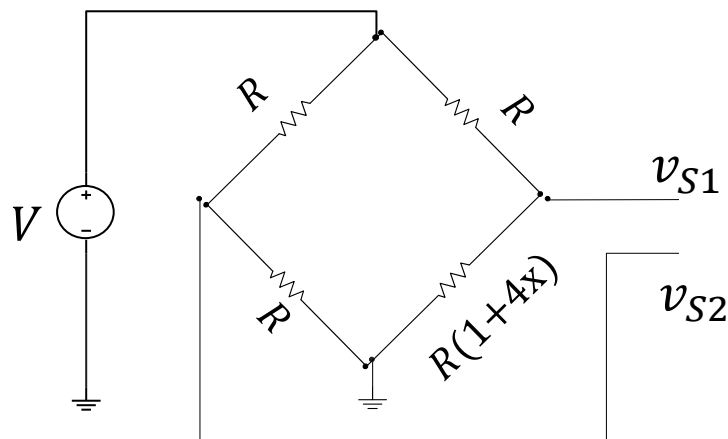
Si  $v_R \gg v_s$  las tres fuentes de señal son equivalentes.

# ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Medición con puente simétrico (medición de presión, etc)



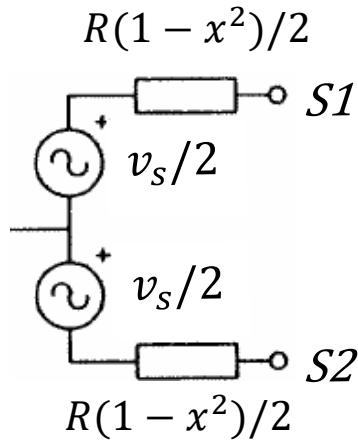
Medición con puente asimétrico (detección resistiva de temperatura, etc)



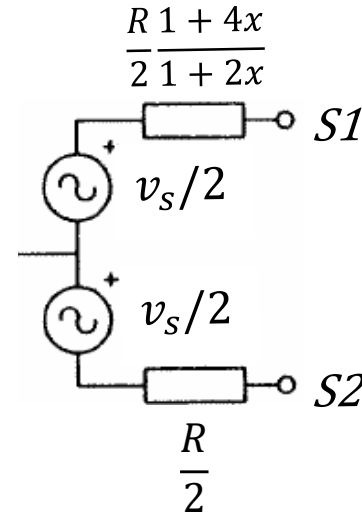
Si  $x \ll 1$  ambos  
modelos de señal  
son equivalentes.

# ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

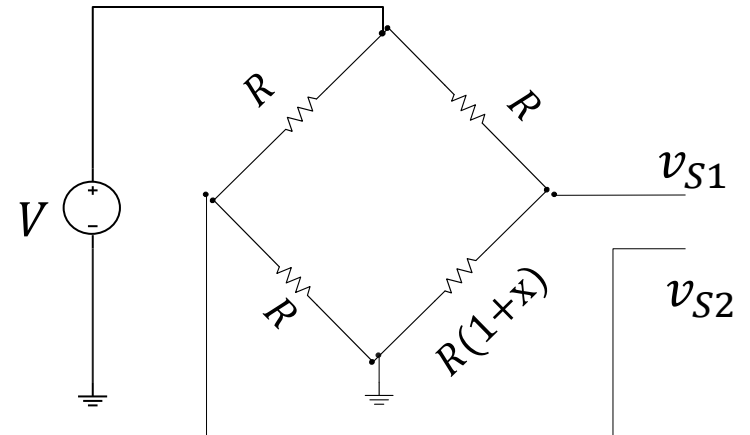
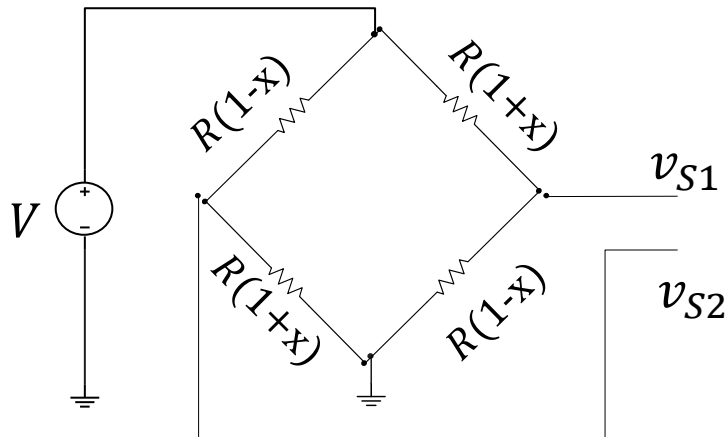
Fuentes de señal de diferencial  
balanceada:  $Z_s = Z'_s$



Fuentes de señal de diferencial  
desbalanceada:  $Z_s \neq Z'_s$

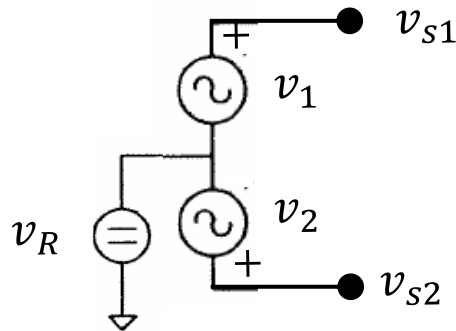


Si  $x \ll 1$  ambos  
modelos de señal  
son equivalentes.



# ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

## Descomposición modo diferencial (MD) – modo común (MC)



$$v_d = v_{s1} - v_{s2}$$

$$v_d = v_1 - v_2$$

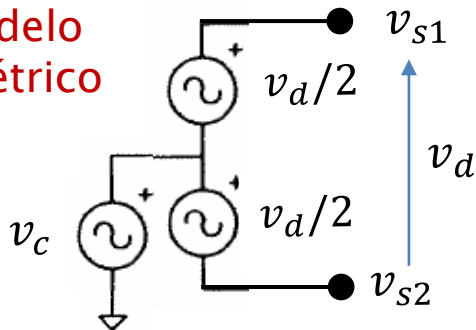
$$v_c = \frac{v_{s1} + v_{s2}}{2}$$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} + v_R$$

**modo diferencial:** señal que transmite la información.

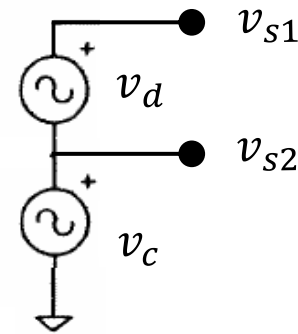
**modo común:** señal espuria o parásita que contamina la información.

Modelo  
simétrico



$$v_{s1} = \frac{v_d}{2} + v_c$$

$$v_{s2} = -\frac{v_d}{2} + v_c$$



Modelo  
aproximado  
simplificado

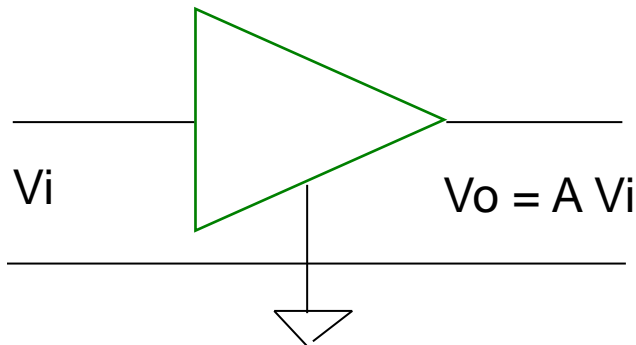
Si  $v_c \gg v_d$  ambos modelos son equivalentes.



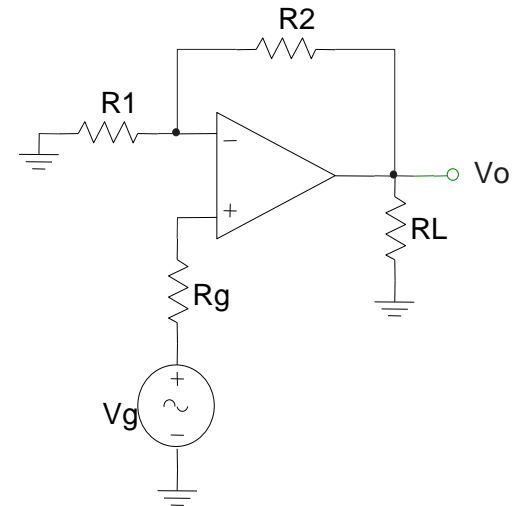
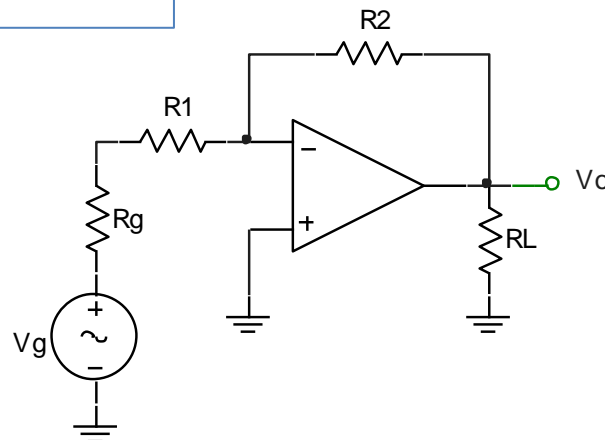
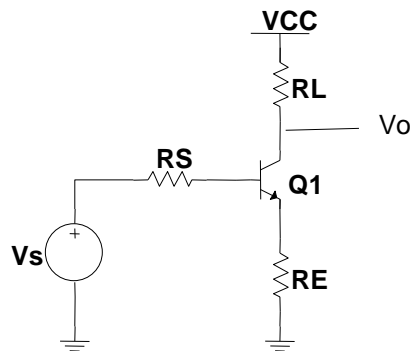
# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

La mayoría de los circuitos integrados analógicos y ADCs procesan tensiones. Estudiaremos distintos esquemas de amplificadores de tensión en función del tipo de fuente de señal.

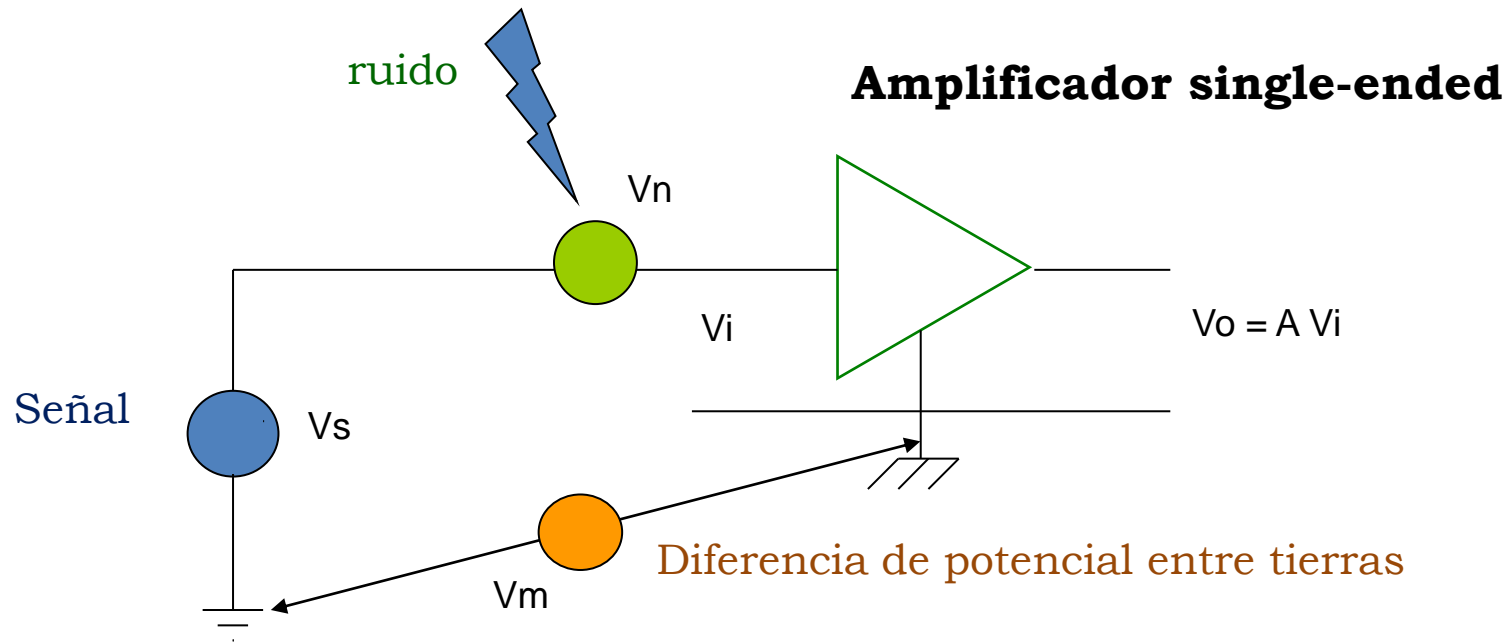
## Amplificador single-ended



Las tensiones de entrada y salida del amplificador están referidas a tierra.



# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA



Una fuente de señal alejada del amplificador sufre **interferencias** por el campo electromagnético circundante que induce tensiones y corrientes en los conductores.

Además puede haber **diferencias de potencial** entre las tierras de la señal y del amplificador.

$$v_i = v_s + v_n + v_m$$

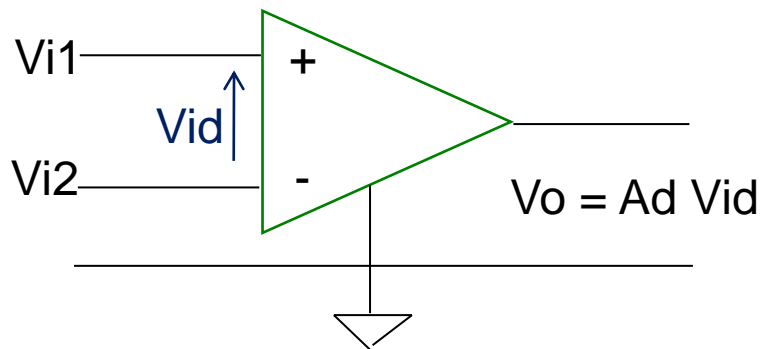
La señal se contamina con ruido electromagnético y caídas de potencial entre tierras

$$v_o = A(v_s + v_n + v_m)$$

El amplificador es incapaz de discernir la información de las señales espurias

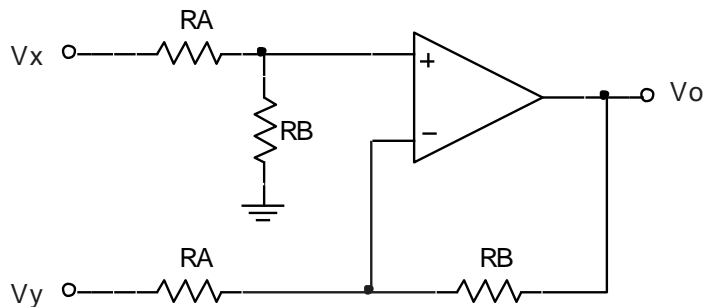
# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## Amplificador diferencial



El amplificador diferencial tiene entrada diferencial y salida single-ended.

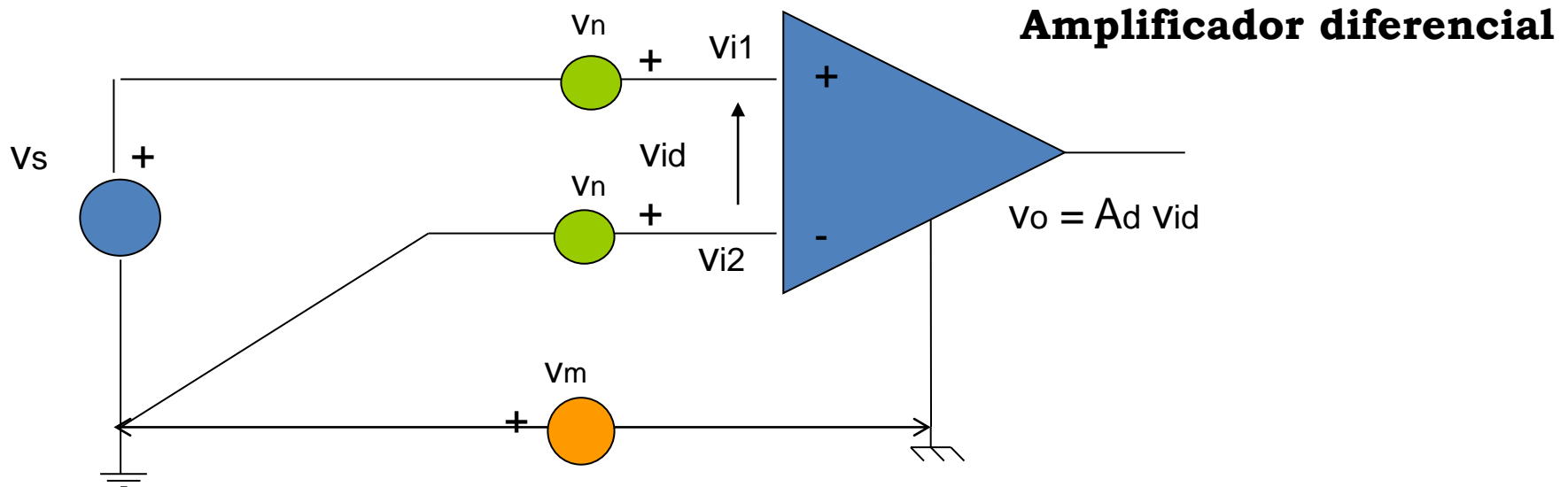
La tensión de salida es función de la diferencia de tensión entre las entradas.



Rechazo de señales de modo común

Conversión señal diferencial a single-ended

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA



Si los conductores 1 y 2 tienen la misma longitud y están trenzados o blindados en la mayor parte del recorrido, se inducirá la misma tensión  $v_n$  en ambos.

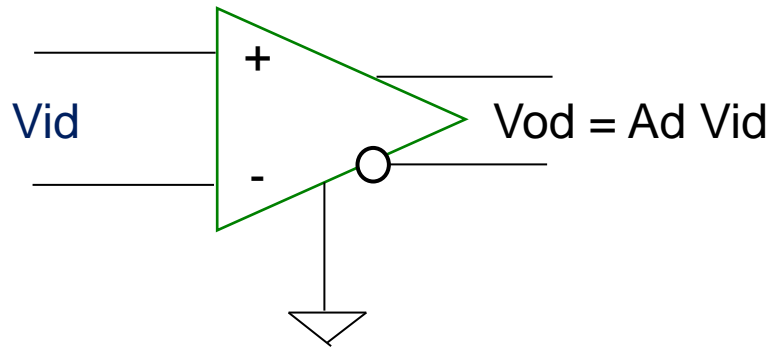
Puede existir además diferencia de potencial entre las tierras del amplificador y de la fuente

$$\left. \begin{aligned} v_{i1} &= v_s + v_n + v_c \\ v_{i2} &= v_n + v_c \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{id} = v_s \Rightarrow v_o = A_d \cdot v_s$$

Con un montaje diferencial podremos reducir el efecto de las señales parásitas

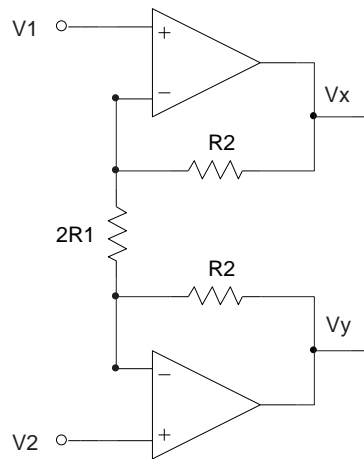
# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## Amplificador 'full' diferencial



El amplificador 'full' diferencial tiene entrada y salida diferencial.

La tensión de salida es función de la tensión de entrada diferencial.



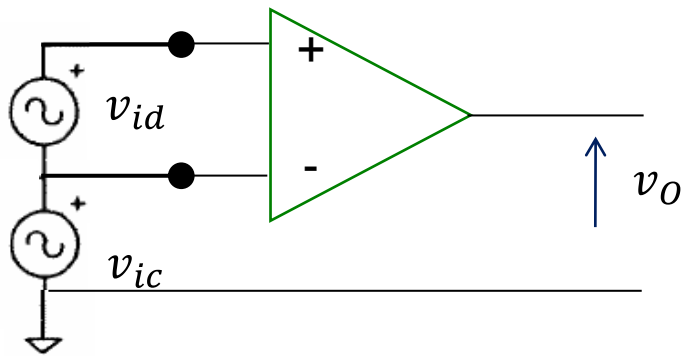
Rechazo de señales de modo común

Rechazo de interferencias a la salida

Ataca etapa diferencial (multiplexers y ADCs diferenciales)

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## FACTORES DE MÉRITO



### Amplificador diferencial

$$v_o = A_d v_{id} + A_c v_{ic}$$

La salida (respecto a tierra) de un Amplificador Diferencial contiene MC y MD.

La señal se contamina inevitablemente con señales parásitas.

El amplificador ideal tiene  $A_c = 0$

La capacidad del D.A. para rechazar el modo común es un factor de mérito del amplificador

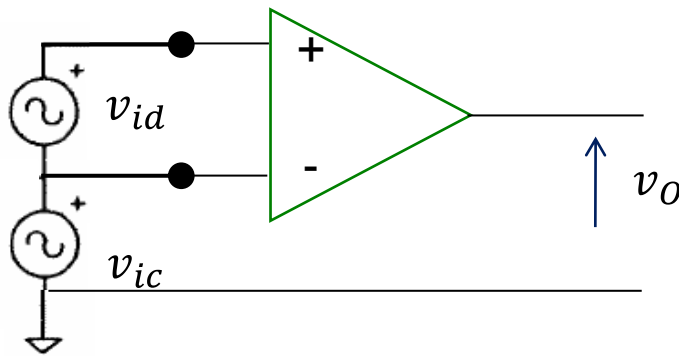
Para D.A (con salida single-ended) se define  
Factor de Rechazo de MC (CMRR):

$$CMRR \equiv \frac{A_d}{A_c}$$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador diferencial

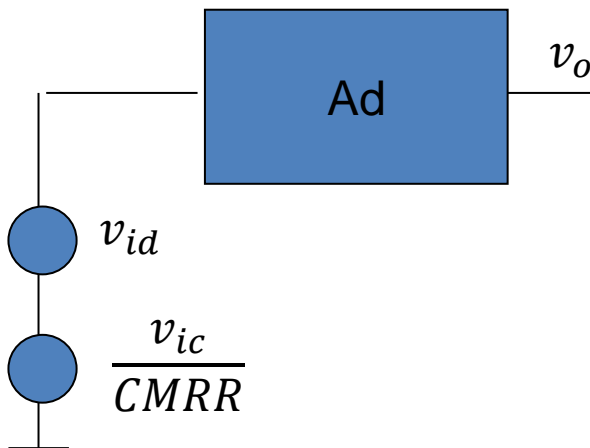


$$v_o = A_d v_{id} + A_c v_{ic}$$

$$v_o = A_d \left( v_{id} + \frac{A_c}{A_d} v_{ic} \right)$$

$$v_o = A_d \left( v_{id} + \frac{v_{ic}}{CMRR} \right)$$

$$CMRR \equiv \frac{A_d}{A_c}$$



• Equivale a aplicar dos señales diferenciales (una real y otra ficticia) a un amplificador diferencial ideal

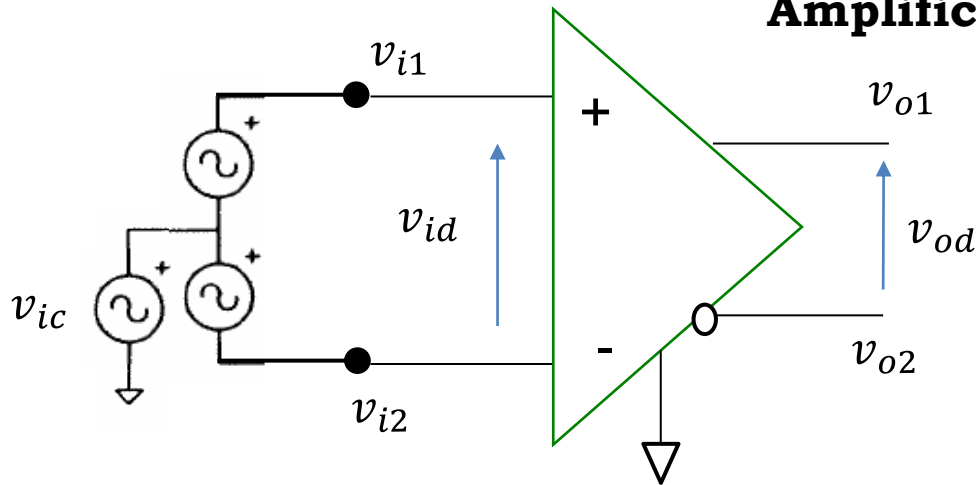
• La salida es menos sensible al MC que al MD, es decir que hay un rechazo de las señales de MC.

• CMRR es cuánto mayor ha de ser  $V_{ic}$  para tener el mismo efecto a la salida que  $V_{id}$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

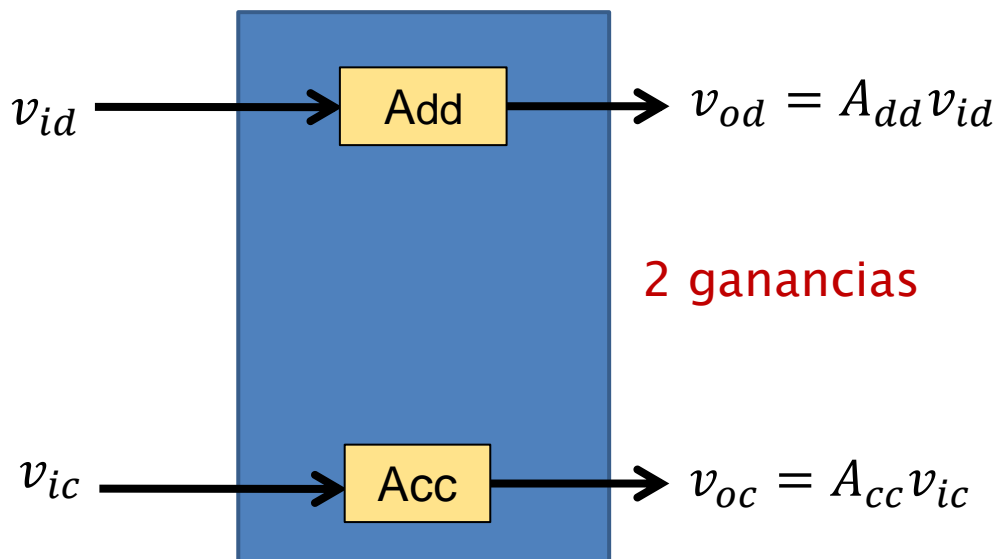
## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador 'full' diferencial balanceado



$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$

$$v_{o2} = -\frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$



Si el amplificador está balanceado, no mezcla MD con MC.

Información (MD) no contaminada con interferencias (MC)

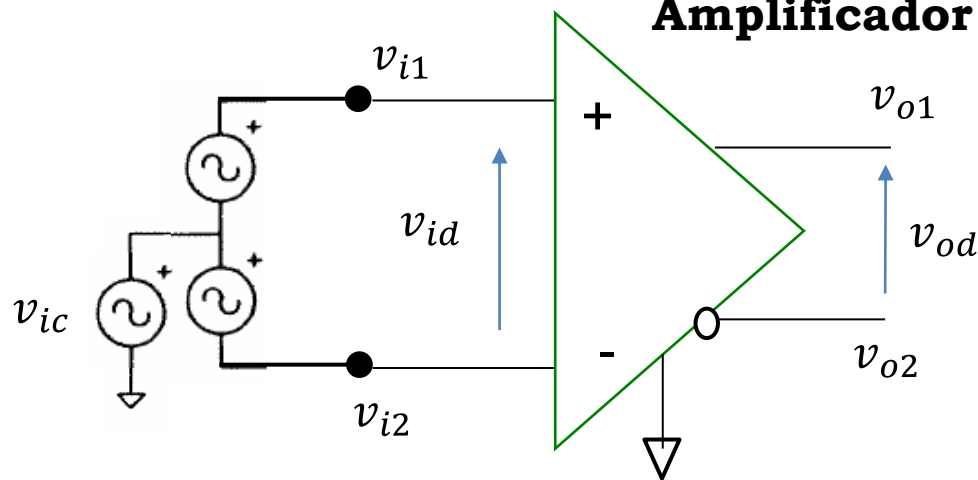
El rechazo del modo común es total



# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

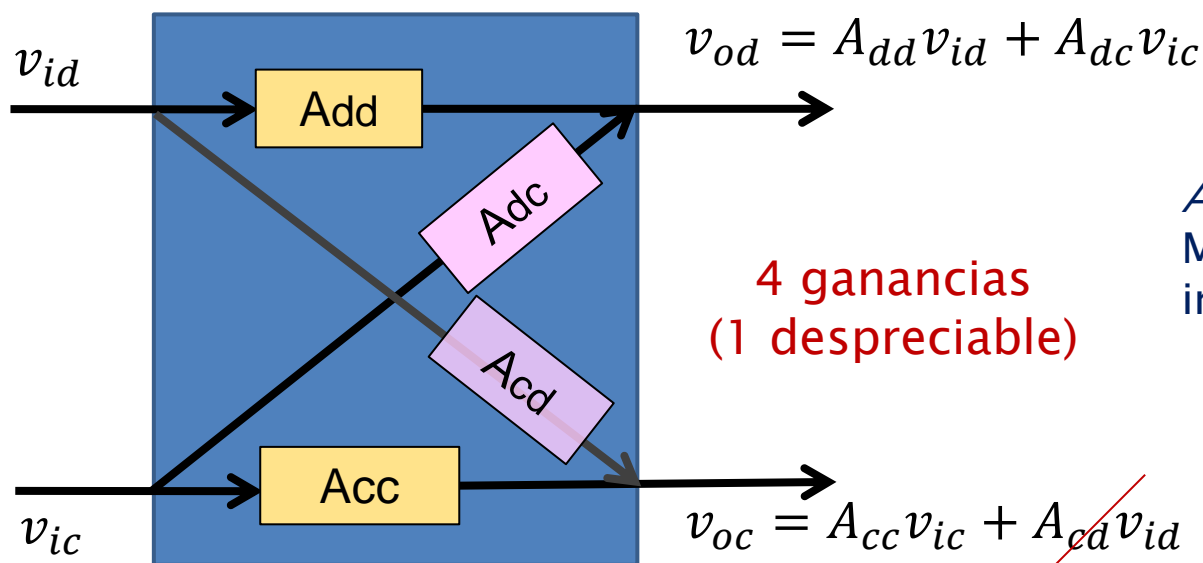
## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador 'full' diferencial (desbalanceado)



$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$

$$v_{o2} = -\frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$



Si el amplificador está desbalanceado, mezcla MD con MC.

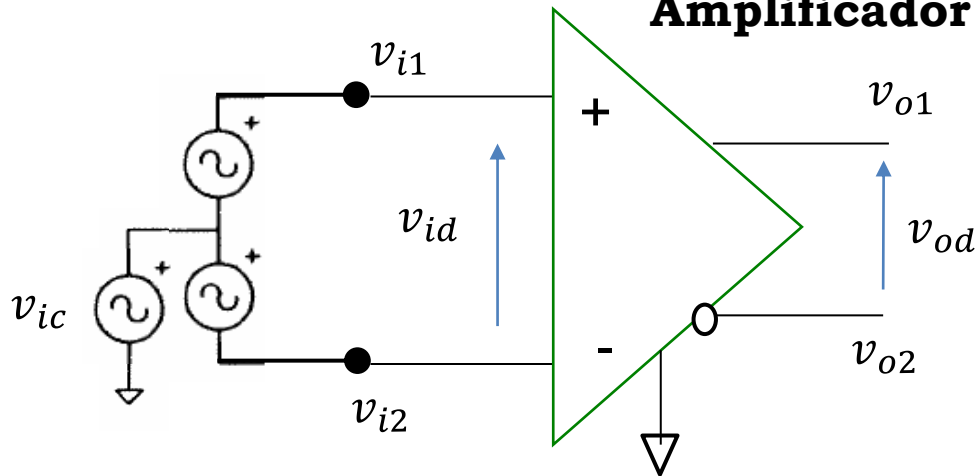
$A_{dc}$  transforma MC de entrada en MD de salida, a partir de ahora indistinguible de la señal  $V_{id}$

Información (MD) contaminada con interferencias (MC)

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador 'full' diferencial

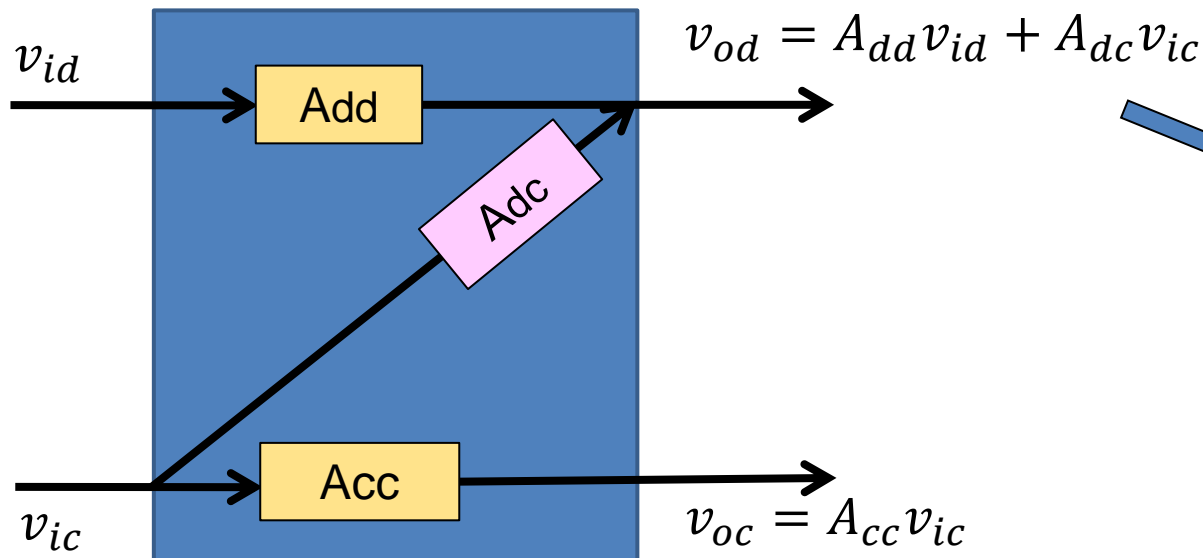


Para F.D.A se define Factor de Rechazo de MC (CMRR):

$$CMRR \equiv \frac{A_{dd}}{A_{dc}}$$



$$v_{od} = A_{dd} \left( v_{id} + \frac{v_{ic}}{CMRR} \right)$$

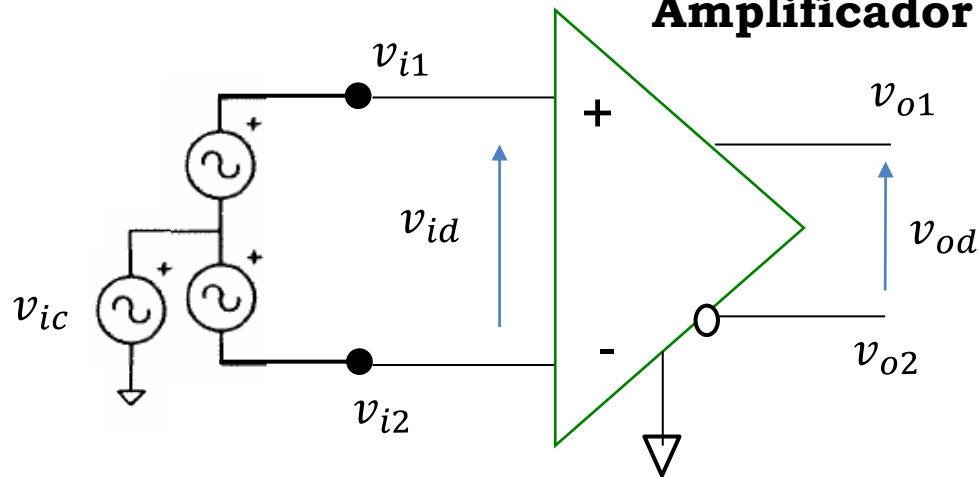


Cuanto mayor es CMRR mejor es el amplificador: mayor capacidad de rechazar interferencias

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

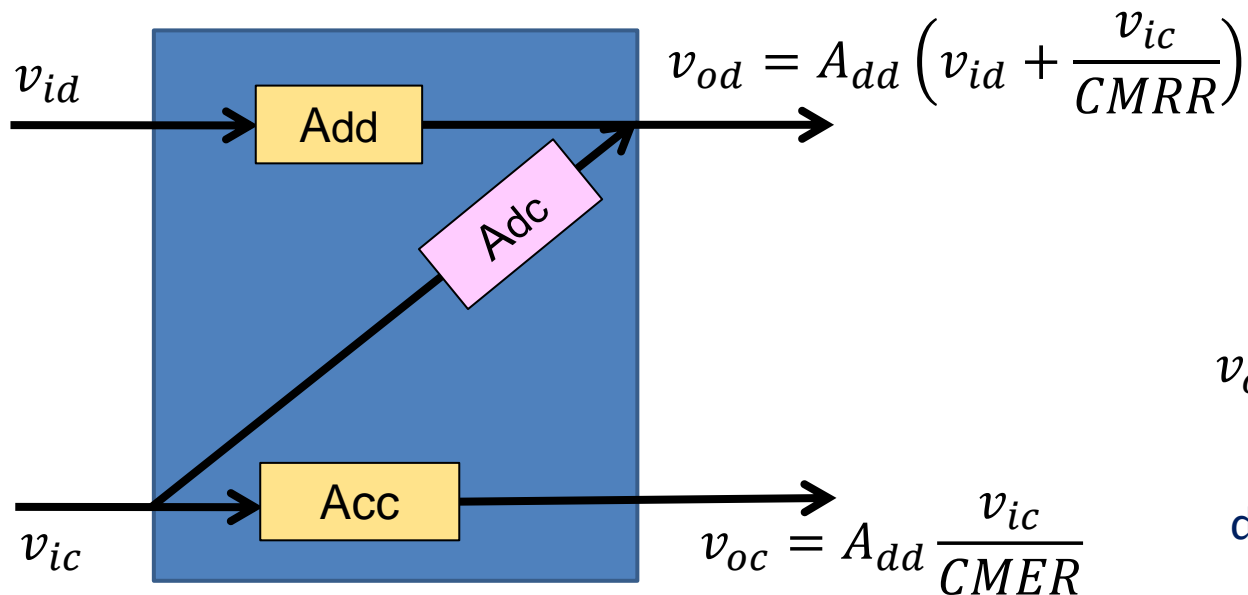
## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador 'full' diferencial



$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$

$$v_{o2} = -\frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$



Para F.D.A se define también el Factor de Exclusión del MC (CMER):

$$CMER \equiv \frac{A_{dd}}{A_{cc}}$$

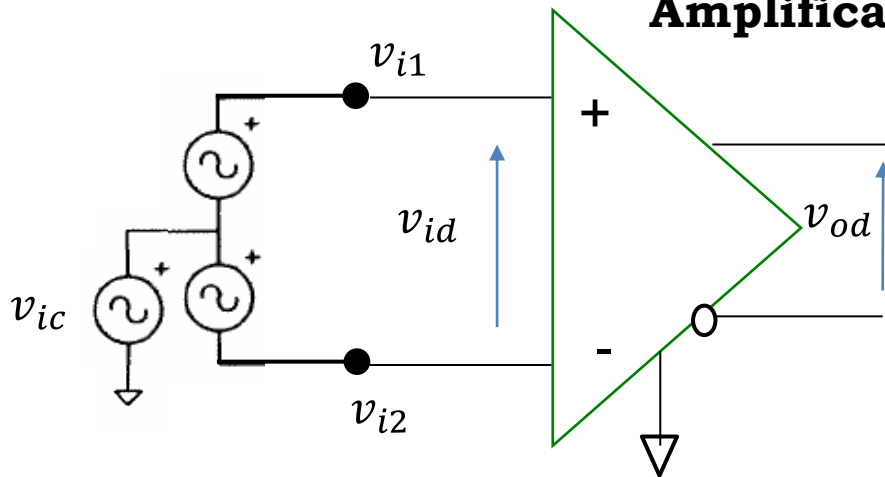
$$v_{oc} = A_{cc} v_{ic} = A_{dd} \frac{v_{ic}}{CMER}$$

En muchas aplicaciones se desea que el F.D.A bloquee o atenúe el MC

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## FACTORES DE MÉRITO

### Amplificador 'full' diferencial



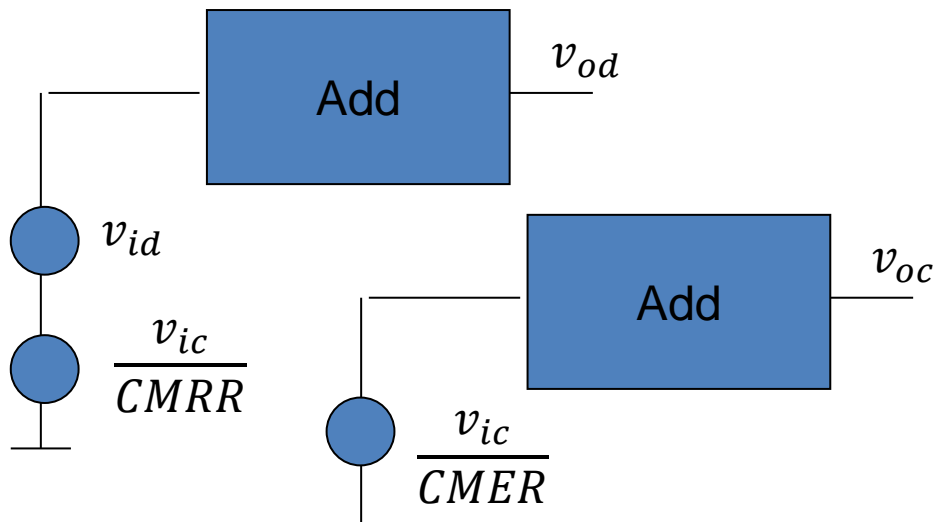
$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$

$$CMRR \equiv \frac{A_{dd}}{A_{dc}}$$

$$v_{o2} = -\frac{v_{od}}{2} + v_{oc}$$

$$CMER \equiv \frac{A_{dd}}{A_{cc}}$$

$$v_{oj} = A_{dd} \left( \pm \frac{1}{2} \left( v_{id} + \frac{v_{ic}}{CMRR} \right) + \frac{v_{ic}}{CMER} \right)$$

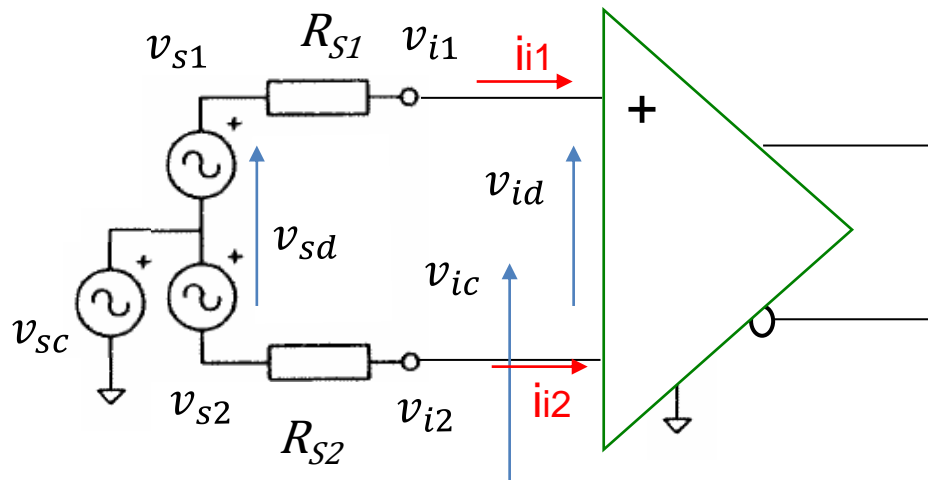


• CMRR da idea de la contaminación de la señal (MD) con modo común. Es debida a desbalances en el F.D.A. Se desea que sea muy elevada

• CMER da idea de la relación MC/MD a la entrada y a la salida. Está presente aún en F.D.A balanceados. En algunas aplicaciones se desea que sea elevada.

## AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

### IMPEDANCIAS DE ENTRADA



$$R_{i1} = \frac{v_{i1}}{i_{i1}} \quad , \quad R_{i2} = \frac{v_{i2}}{i_{i2}}$$

$$v_{i1} = \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_{S1}} v_{s1} \quad ,$$

$$v_{i2} = \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{S2}} v_{s2}$$

Si la resistencia de salida de la fuente de señal ( $R_s$ ) no es despreciable, habrá una atenuación debida a la caída de tensión en esa resistencia.

Este fenómeno ocurre principalmente con los A.D. BJT por su menor resistencia de entrada.

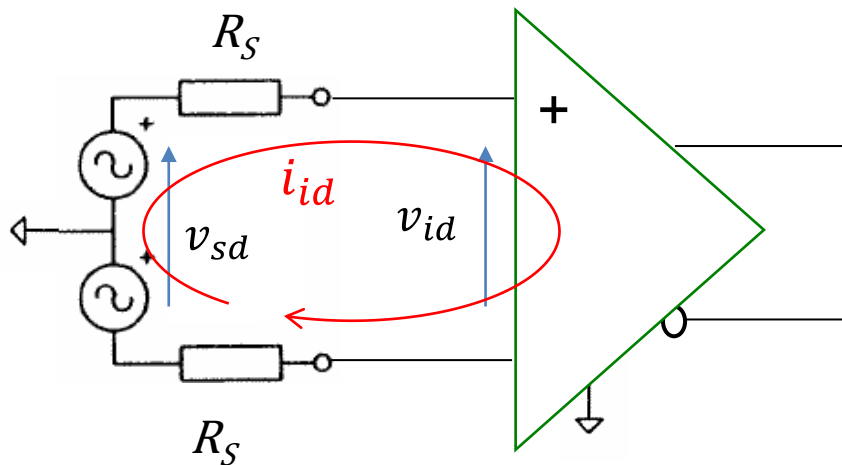
A.D son usados a menudo como etapa de entrada en circuitos de instrumentación, por lo que la resistencia de entrada es una consideración de diseño muy importante.

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## IMPEDANCIAS DE ENTRADA

Sin embargo, como las señales de interés/perturbación son de MD/MC, es conveniente definir las resistencias de MD y MC

Aplicamos MD puro, fuente balanceada



### Impedancia de MD

$$R_{id} = \left. \frac{v_{id}}{i_{id}} \right|_{v_{ic}=0}$$

$$v_{id} = \frac{R_{id}}{R_{id} + 2 R_S} v_{sd}$$

Cuanto mayor es la resistencia de entrada, menor es la atenuación producida por la caída de tensión en la resistencia interna de la fuente, sensor o etapa previa.

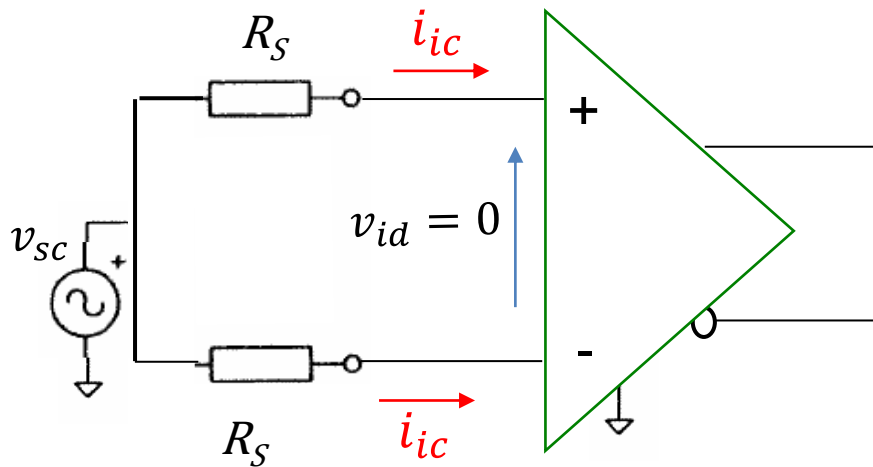
En muchos casos, la tecnología usada MOS/BJT queda definida por el requerimiento de alta impedancia de entrada.

## AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

### IMPEDANCIAS DE ENTRADA

Sin embargo, como las señales de interés/perturbación son de MD/MC, es conveniente definir las resistencias de MD y MC

Aplicamos MC puro, fuente balanceada



### Impedancia de MC

$$R_{ic} = \left. \frac{v_{ic}}{i_{ic}} \right|_{v_{id}=0}$$
$$v_{ic} = \frac{R_{ic}}{R_{ic} + R_s} v_{sc}$$

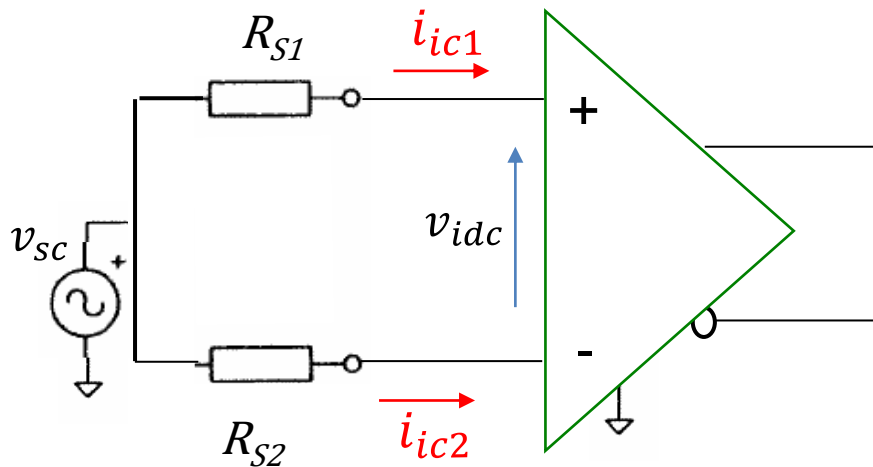
La atenuación del MC no es un problema en sí mismo, por lo que a priori una alta resistencia de entrada de MC no parece importante. Sin embargo ...

## AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

### IMPEDANCIAS DE ENTRADA

Sin embargo, como las señales de interés/perturbación son de MD/MC, es conveniente definir las resistencias de MD y MC

Aplicamos MC puro, fuente **desbalanceada**



$$i_{ic1} = \frac{R_{ic}}{R_{ic} + R_{S1}} v_{sc}$$

$$i_{ic2} = \frac{R_{ic}}{R_{ic} + R_{S2}} v_{sc}$$

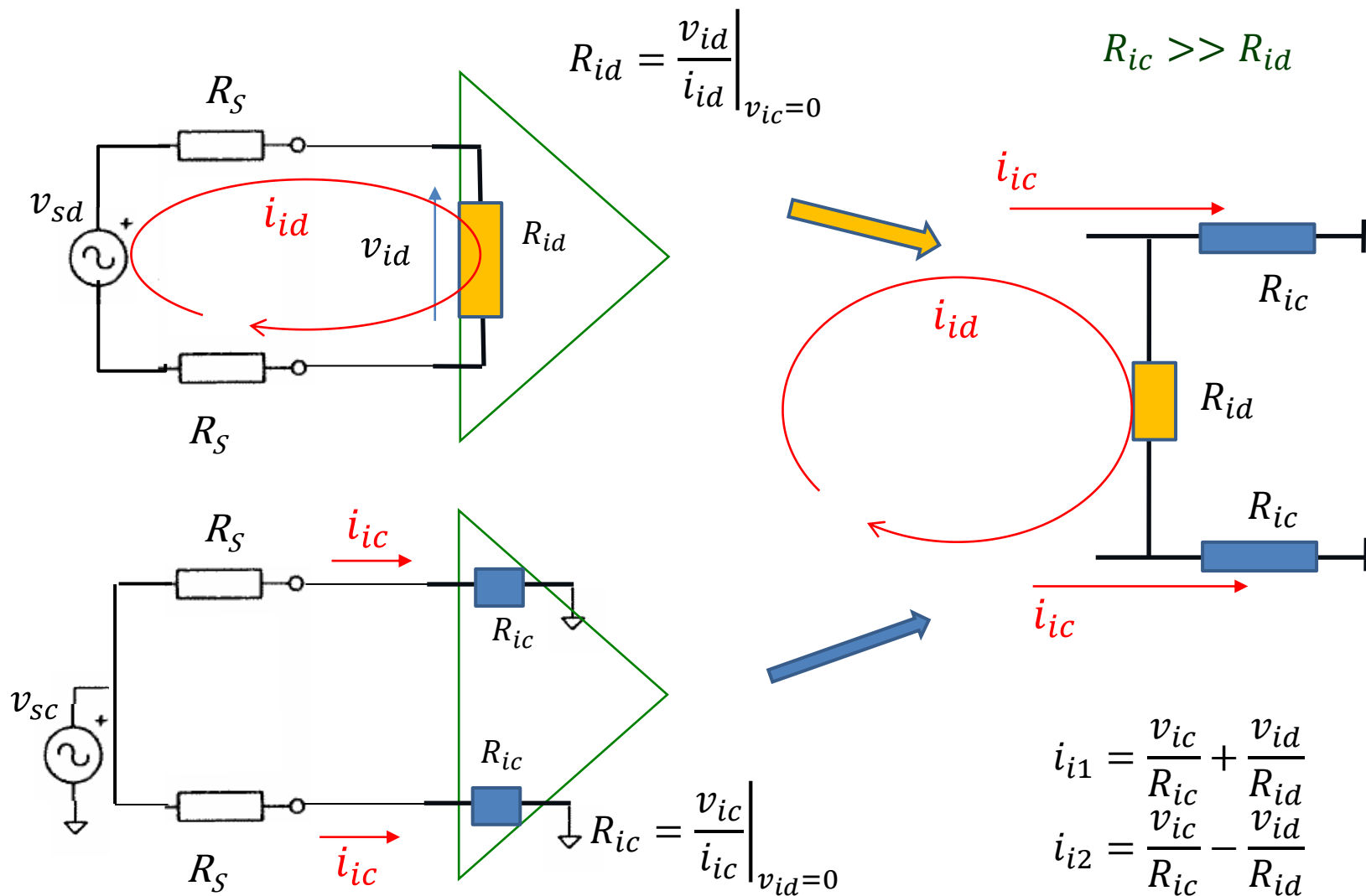
Alta resistencia de entrada de MC evita que señales de MC se transformen en MD debido a desbalances en impedancias de fuente / conductores

$$v_{idc} = \left( \frac{R_{ic}}{R_{ic} + R_{S1}} - \frac{R_{ic}}{R_{ic} + R_{S2}} \right) v_{sc} \simeq \frac{R_{S1} - R_{S2}}{R_{ic}} v_{sc} \quad \text{si } R_{ic} \gg R_S$$



# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## IMPEDANCIAS DE ENTRADA



# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## IMPEDANCIAS DE ENTRADA

### Modelos circuitales de entrada:

$$R_{ic} = \left. \frac{v_{ic}}{i_{ic}} \right|_{v_{id}=0}$$

$$R_{id} = \left. \frac{v_{id}}{i_{id}} \right|_{v_{ic}=0}$$

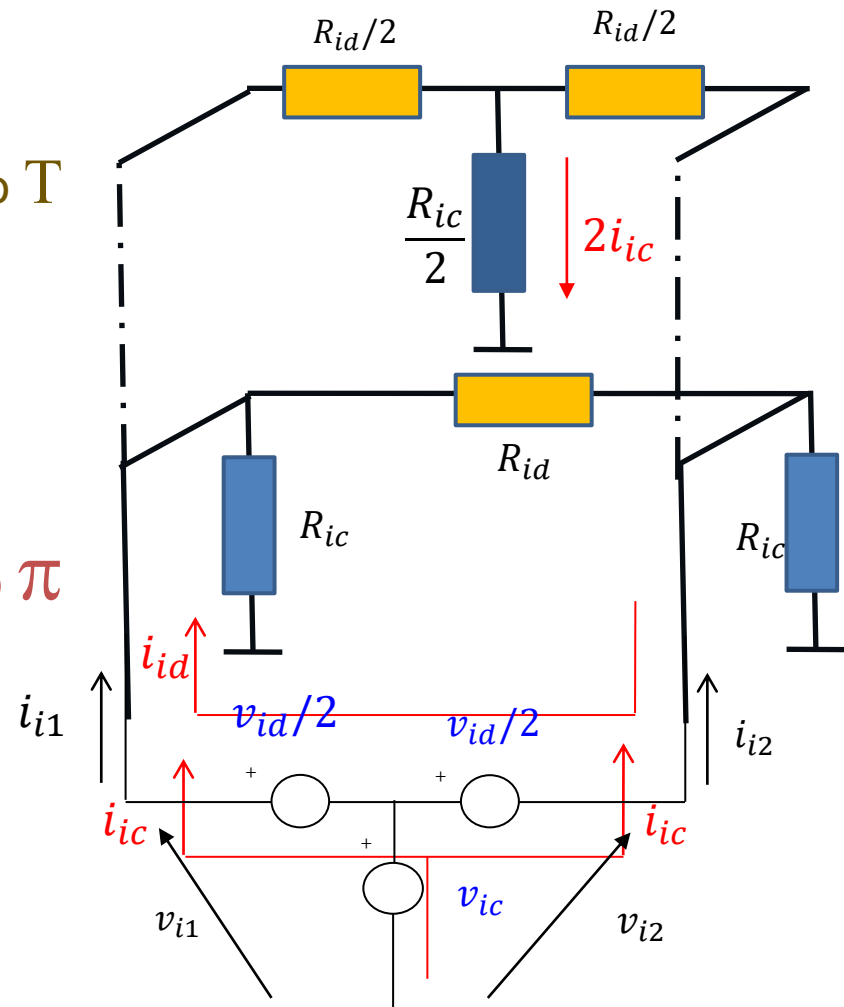
Si  $R_{ic} \gg R_{id}$

$$i_{i1} = \frac{v_{ic}}{R_{ic}} + \frac{v_{id}}{R_{id}}$$

$$i_{i2} = \frac{v_{ic}}{R_{ic}} - \frac{v_{id}}{R_{id}}$$

Modelo T

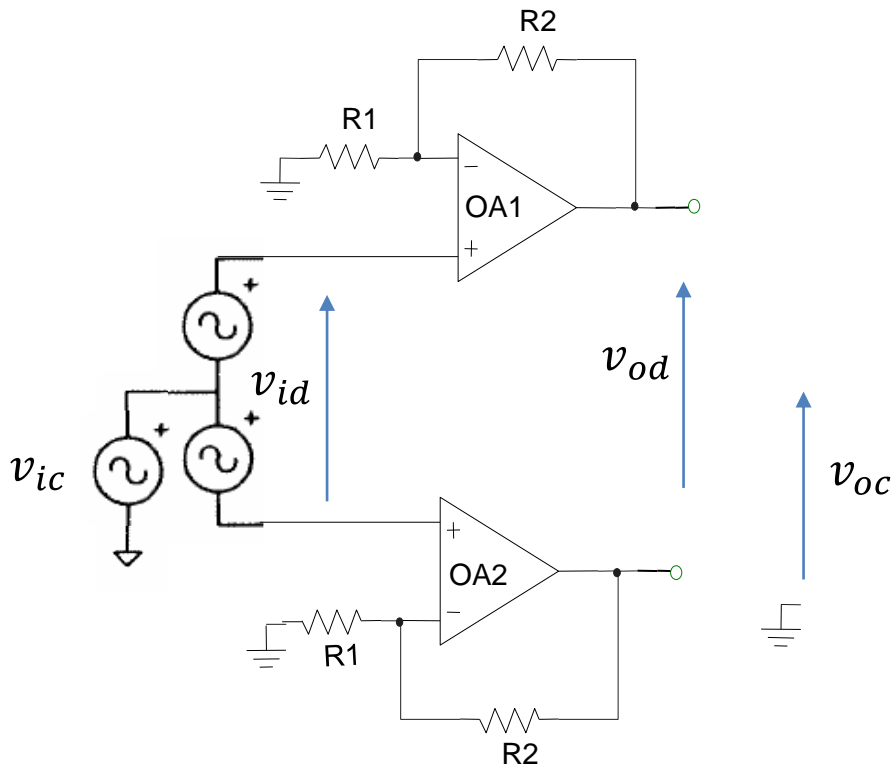
Modelo  $\pi$



# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador FDA básico (dos amplificadores en paralelo, balanceados)



$$A_{dd} = A_{v1,2} = 1 + R2/R1$$

$$A_{cc} = A_{v1,2} = 1 + R2/R1 = A_{dd}$$

$$A_{dc(OA)} = A_{dd}/CMRR_{OA}$$

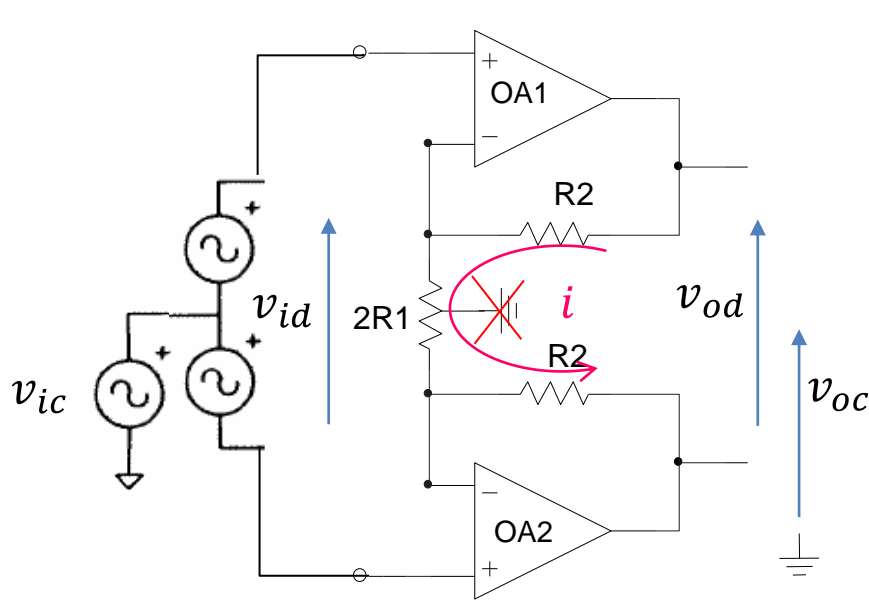
$$CMRR_{FDA} = CMRR_{OA}$$

$$CMER_{FDA} = 1$$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador FDA de 2 OA



$$\left. \begin{array}{l} i_d = v_{id} / 2 R_1 \\ v_{od} = i_d (2 R_2 + 2 R_1) \end{array} \right\} A_{dd} = 1 + R_2 / R_1$$

$$\left. \begin{array}{l} i_c = 0 \\ v_{oc} = v_{ic} \end{array} \right\} A_{cc} = 1$$

$$A_{dc(OA)} = A_{dd} / CMRR_{OA}$$

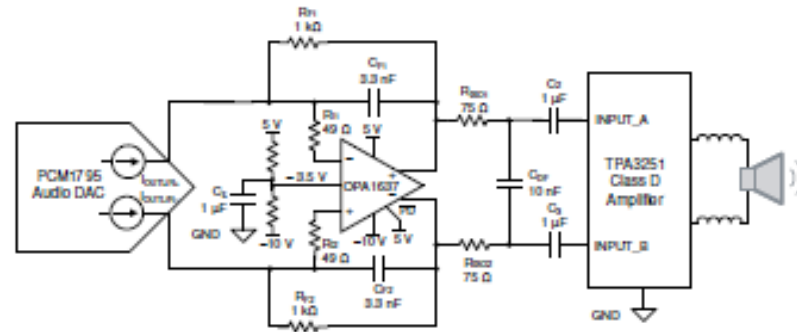
$$CMRR_{FDA} = CMRR_{OA}$$

$$CMER_{FDA} = A_{dd} = 1 + R_2 / R_1$$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA CIRCUITOS E INTEGRADOS

**Amplificadores FDA integrados. Muy utilizados para atacar ADCs diferenciales**

OPA1637 High-Fidelity, Low-Noise, Fully-Differential, Burr-Brown™ Audio Operational Amplifier



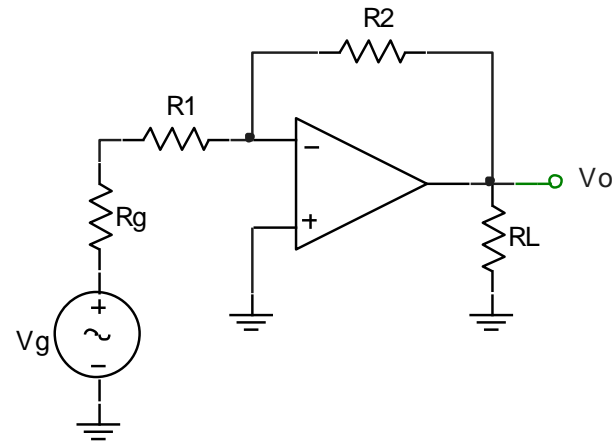
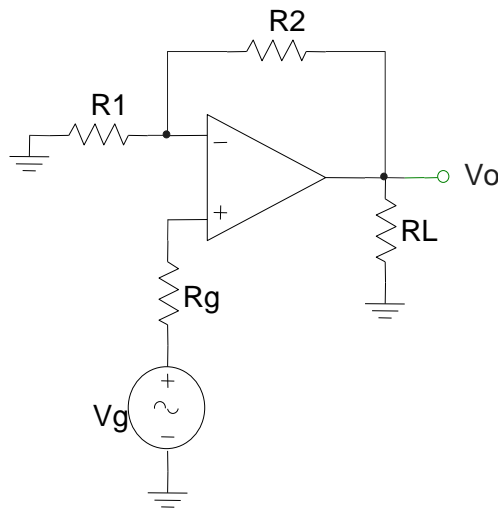
LMH5485-SEP Radiation Tolerant Negative Rail Input, Rail-to-Rail Output, Precision, 850 MHz Fully Differential Amplifier

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador DA single-ended básico

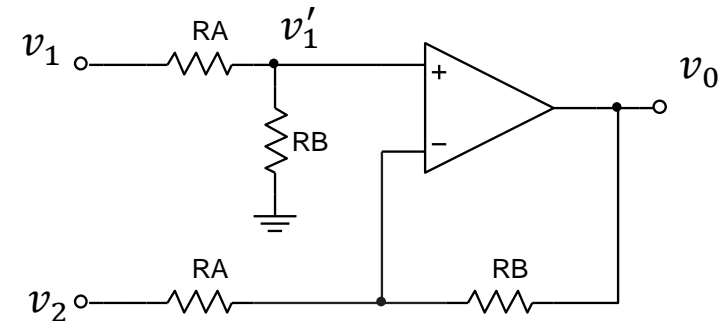
El OA es un amplificador diferencial, cuya ganancia de tensión no se conoce de manera precisa. Los OA son diseñados para funcionar realimentados. La ganancia de tensión puede fijarse con las impedancias de realimentación. Al realimentar, se pierde la entrada diferencial y se transforma en un amplificador single-ended de entrada y salida.



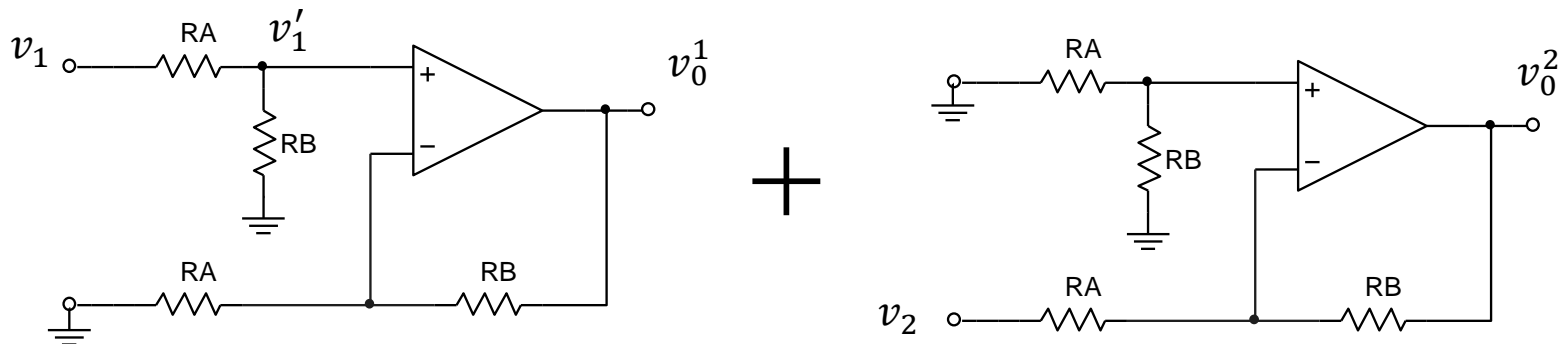
# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador DA single-ended básico



La estructura DA se recupera mediante la superposición de la configuración inversora con la no-inversora.  
(El divisor resistivo de la entrada no-inversora equipara las ganancias)



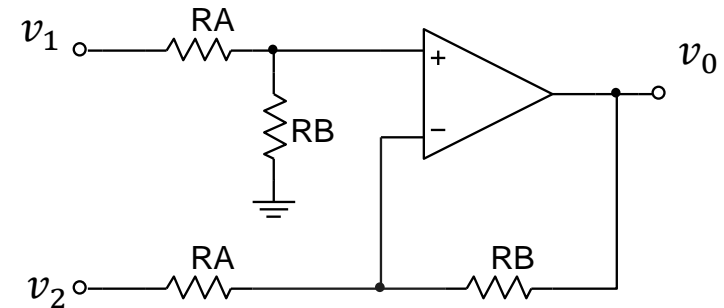
Si bien se puede resolver por superposición, lo resolveremos con enfoque MD-MC

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

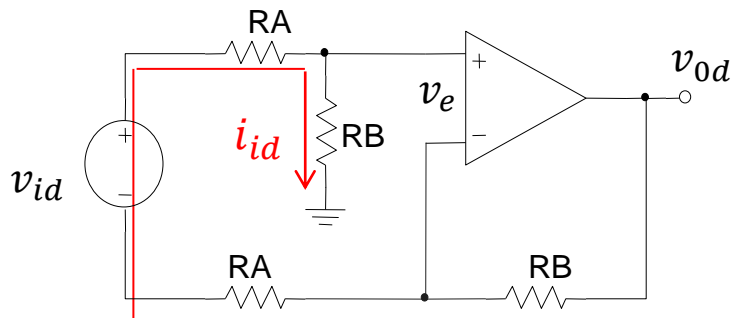
## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador DA single-ended básico (balanceado)

$$v_o = A_d v_{id} + A_c v_{ic}$$



### Modo diferencial



Resistencia de entrada de MD:

$$v_e = 0 \Rightarrow v_{id} = 2R_A i_{id} \Rightarrow R_{id} = 2R_A$$

Ganancia de MD:  $v_e = 0 \Rightarrow v_{0d} = 2R_B i_{id} \Rightarrow$

$$A_d = \frac{R_B}{R_A}$$

Resistencia de salida:  $R_0 = 0$

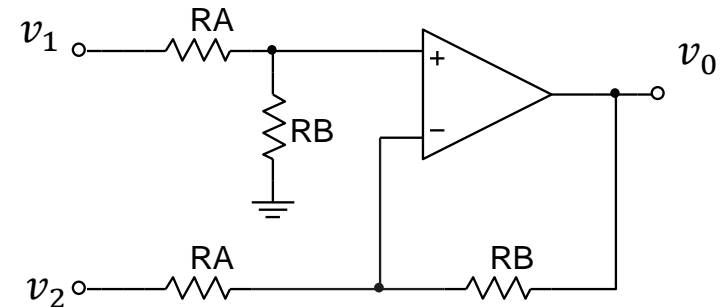


# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

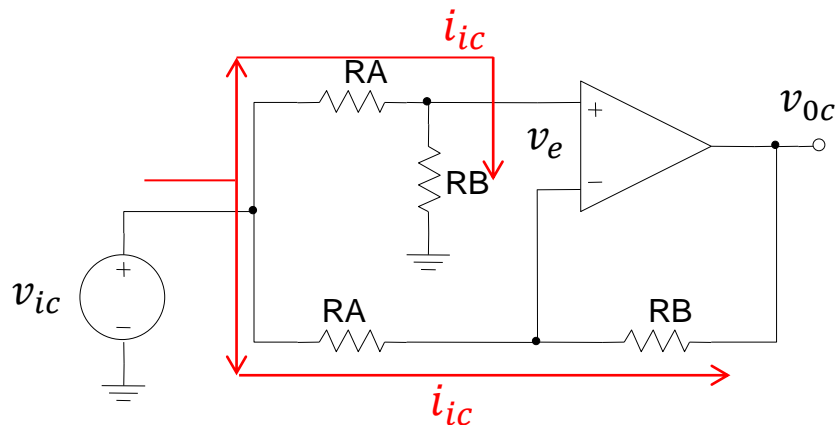
## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador DA single-ended básico (balanceado)

$$v_o = A_d v_{id} + A_c v_{ic}$$



Modo común



Ganancia de MC:  $v_e = 0 \Rightarrow i_{ic}^+ = i_{ic}^- \Rightarrow v_{0c} = 0$

$$A_c = 0$$

$$CMRR \equiv \frac{A_d}{A_c} = \infty$$

Resistencia de entrada de MC:

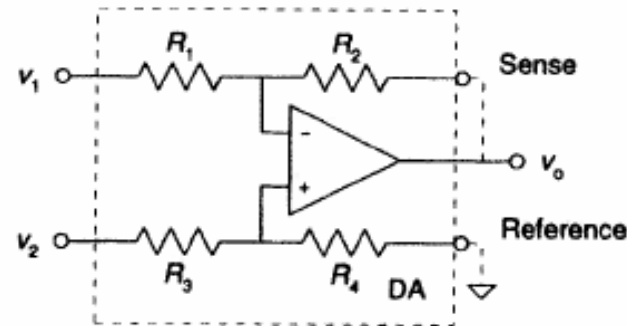
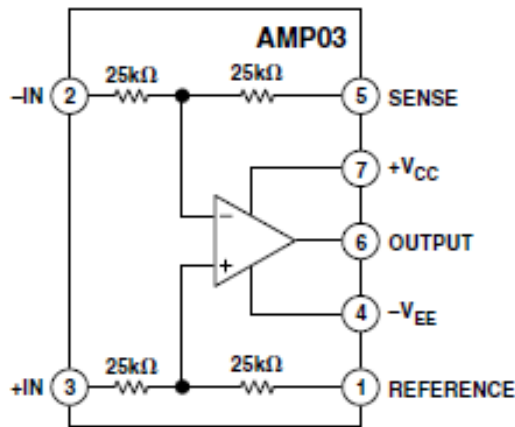
$$v_{ic} = (R_A + R_B) i_{ic} \Rightarrow R_{ic} = R_A + R_B$$

Resistencia de salida:  $R_0 = 0$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificador DA single-ended integrados (Difference amplifiers)



Conectando (5) a (6) y (1) a masa construimos el amplificador diferencial.

Ejemplos: INA105, AMP03, INA117 tienen  $A_d=1$ ,  $CMRR=80 - 100\text{dB}$ . Otros tienen ganancias  $A_d=10$  (INA106) o seteables (AD626), por ejemplo.

Los resistores se construyen en el mismo chip con films de metal para mayor precisión.

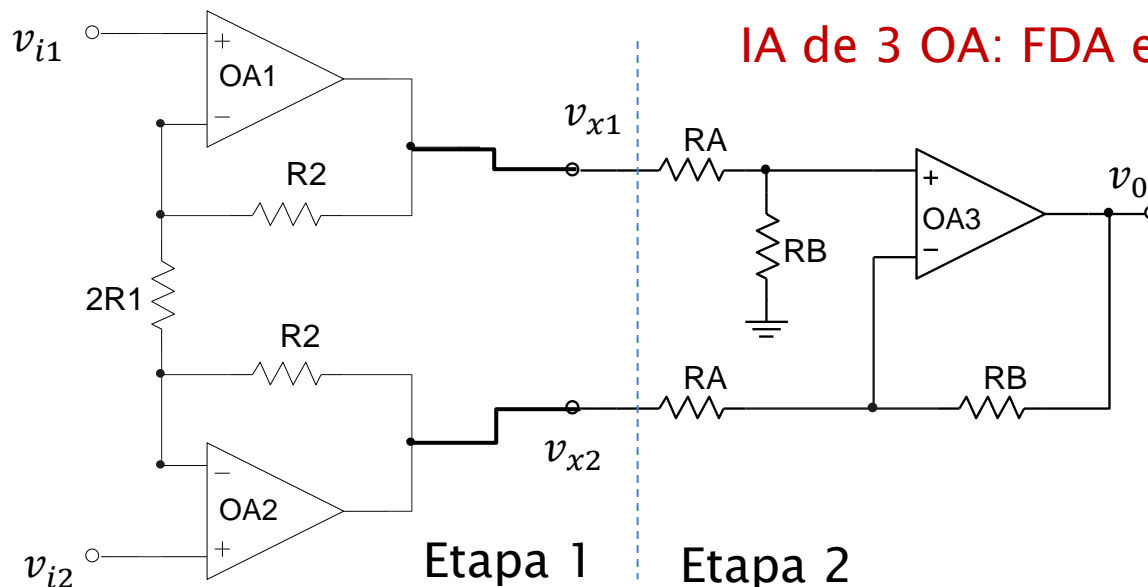
# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificadores de Instrumentación

Los amplificadores de diferencia tienen la capacidad de bloquear el MC pero tienen baja impedancia de entrada. En general no son adecuados para instrumentación de sensores.

Los IA son amplificadores de entrada diferencial y salida single-ended con capacidad de bloqueo de MC y alta impedancia de entrada.



$$v_o = A_d v_{id} + A_c v_{ic}$$

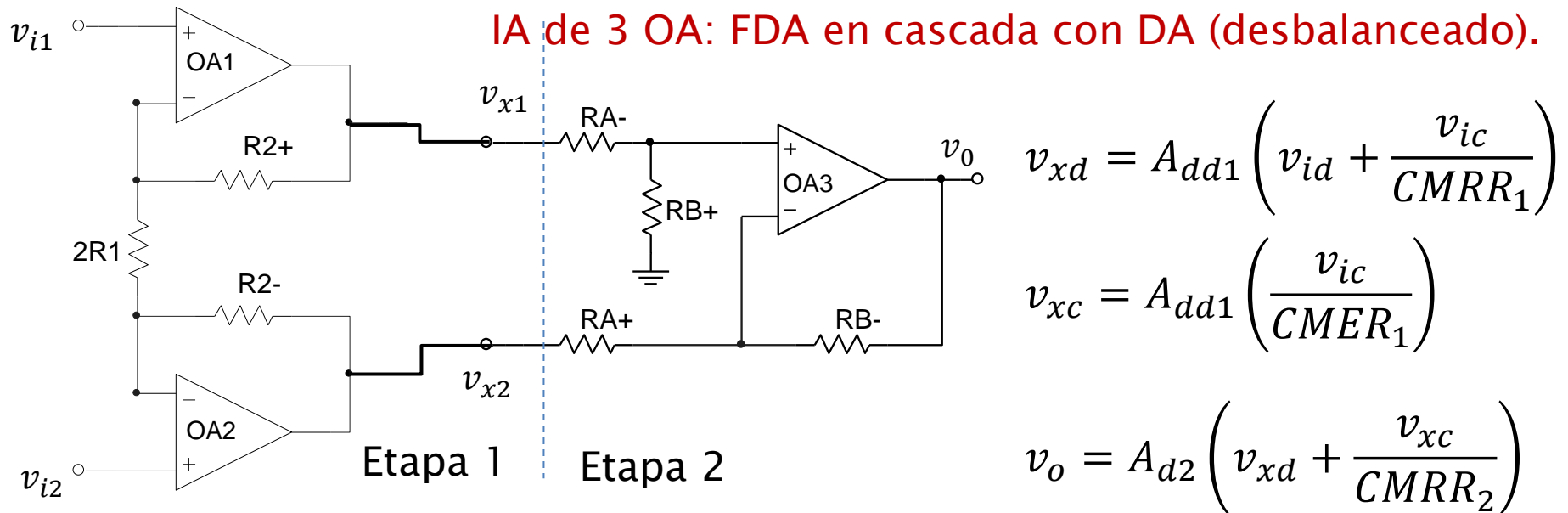
$$A_c = A_{cc1} \times A_{c2} = 0$$

$$A_d = A_{dd1} \times A_{d2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_B}{R_A}$$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificadores de Instrumentación



$$v_o = A_{d(tot)} \left( v_{id} + \frac{v_{ic}}{CMRR_{(tot)}} \right)$$

$$A_{d(tot)} = A_{d2} \times A_{dd1}$$

$$\frac{1}{CMRR_{(tot)}} = \frac{1}{CMRR_1} + \frac{1}{CMER_1 CMRR_2}$$

# AMPLIFICADORES PARA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## CIRCUITOS E INTEGRADOS

### Amplificadores de Instrumentación Integrados

AD8228:

