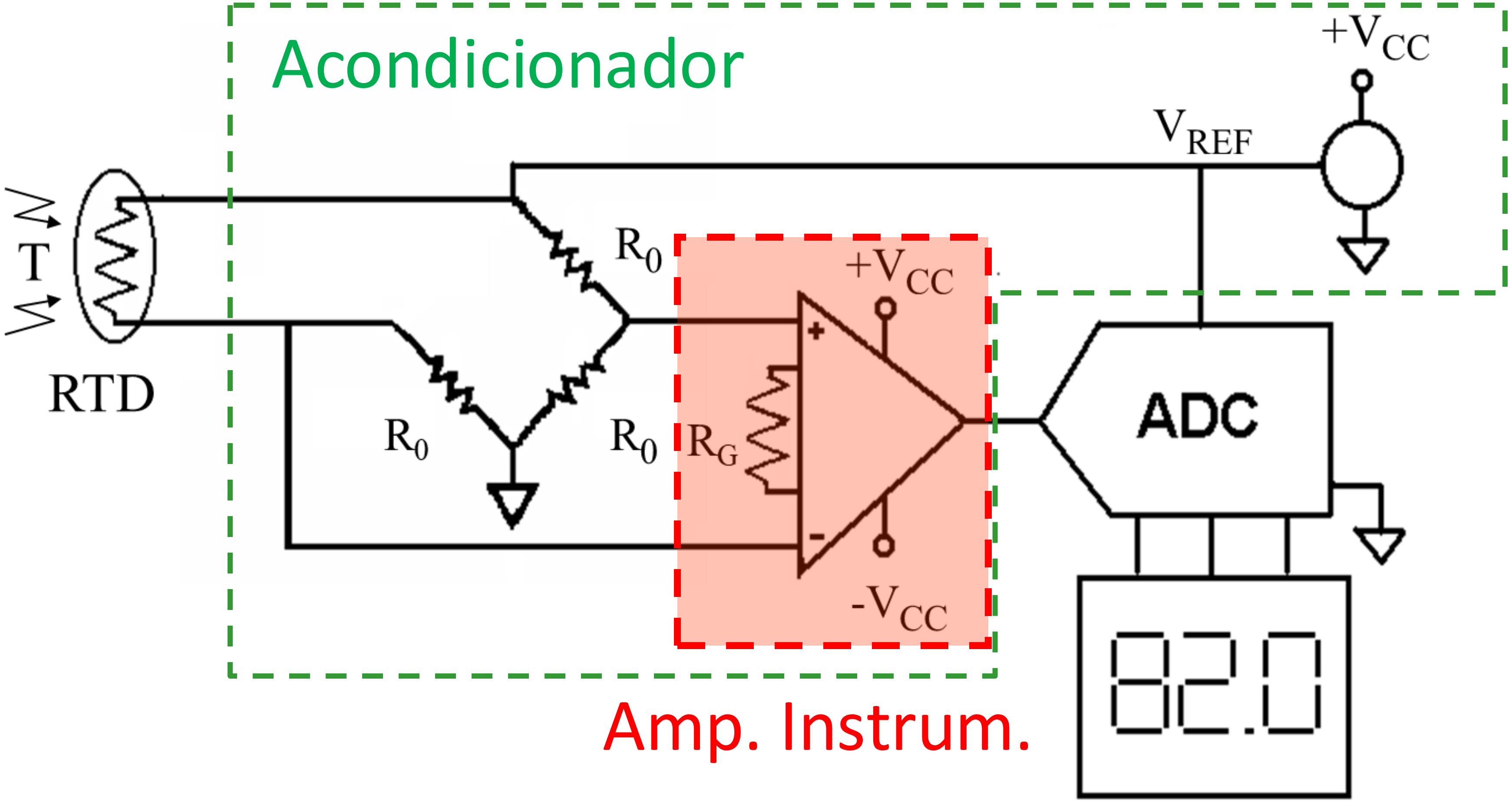
TEMA 1:

Circuitos Acondicionadores de Señal.
Amplificador de Instrumentación

¿Qué parte veremos del sistema de medida?



Índice

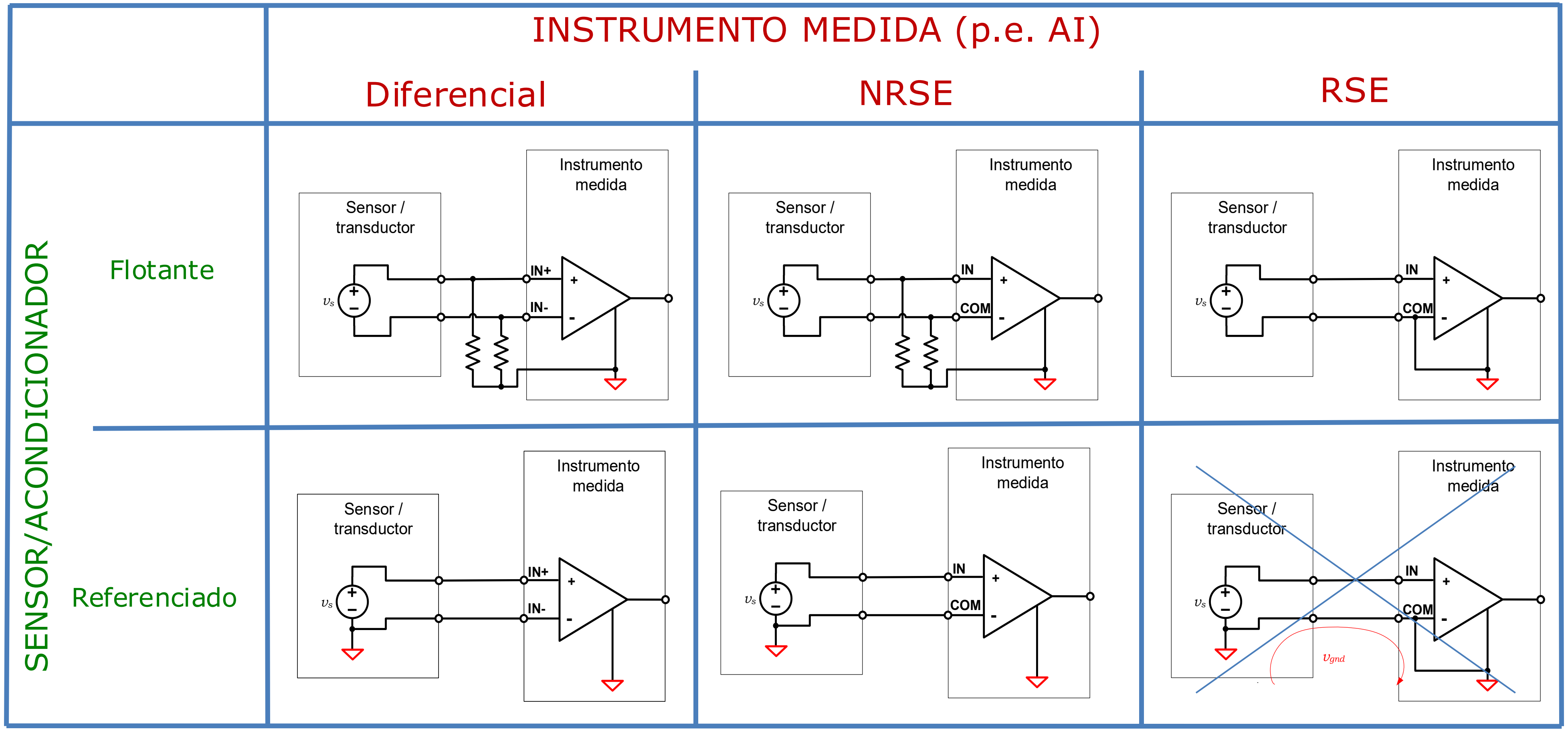
0.- ¿Cómo conectar el sensor/transductor al acondicionador o instrumento de medida?

1.- Amplificador Diferencial.

2.- Amplificador de Instrumentación.

3.- Errores en el Amplificador de Instrumentación.

¿Cómo conectar el sensor/transductor al acondicionador o instr. de medida?



Recursos para el estudio en Moodle:

- Transparencias: Referencia de una señal
- Vídeo: Referencia de una señal.

Índice

0.- ¿Cómo conectar el sensor/transductor al acondicionador o instrumento de medida?

1.- Amplificador Diferencial

2.- Amplificador de Instrumentación

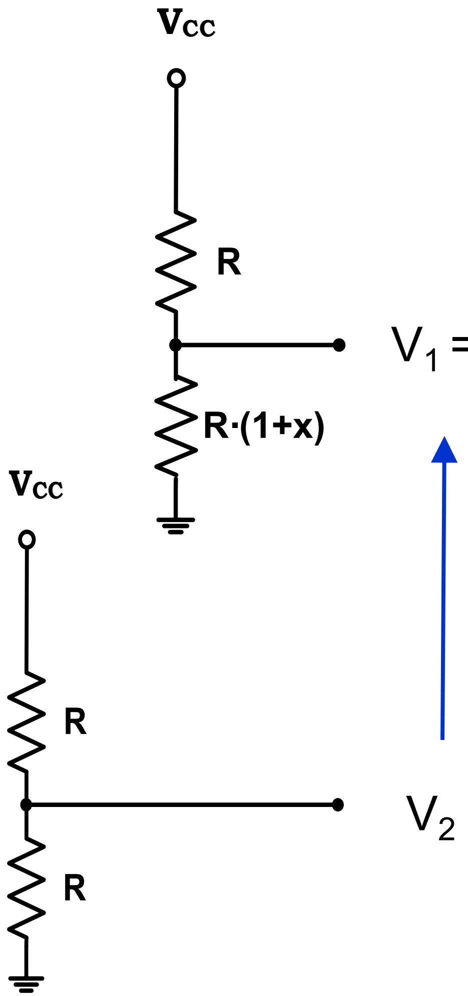
3.- Errores en el Amplificador de Instrumentación

Ideal y real

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

… se emplea para amplificar señales de
tipo diferencial.

Ejemplo de señal de tipo diferencial



$V_1 = f(x)$ ... pero $\neq 0$ cuando $x = 0$

$V_D = V_1 - V_2 = 0$ cuando $x=0$

V_2

Ejemplo de señal de tipo diferencial:
Salida de un puente de medida

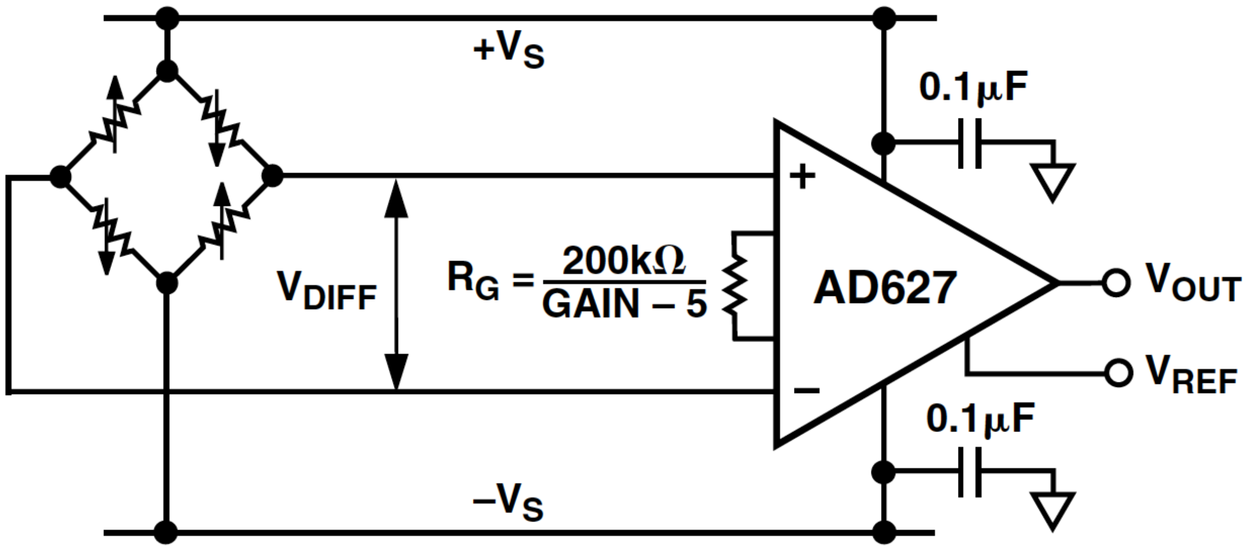
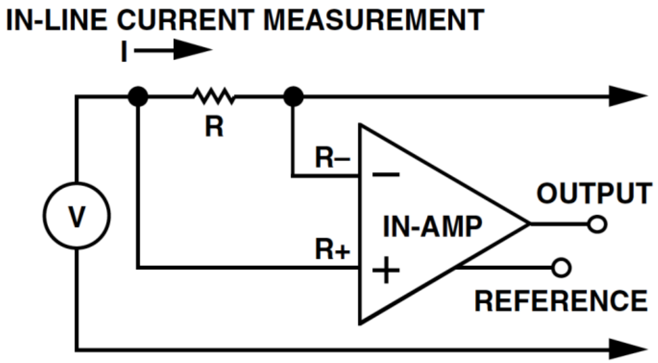


Figure 6-43. A classic bridge circuit for low power applications.

Ejemplo de señal de tipo diferencial
Medida de la corriente por una línea



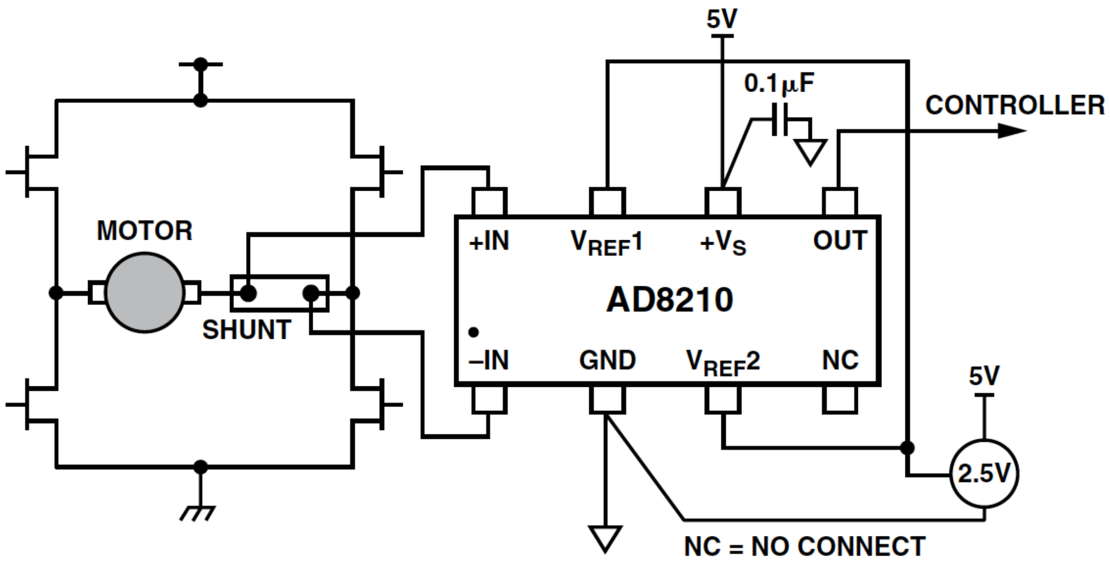
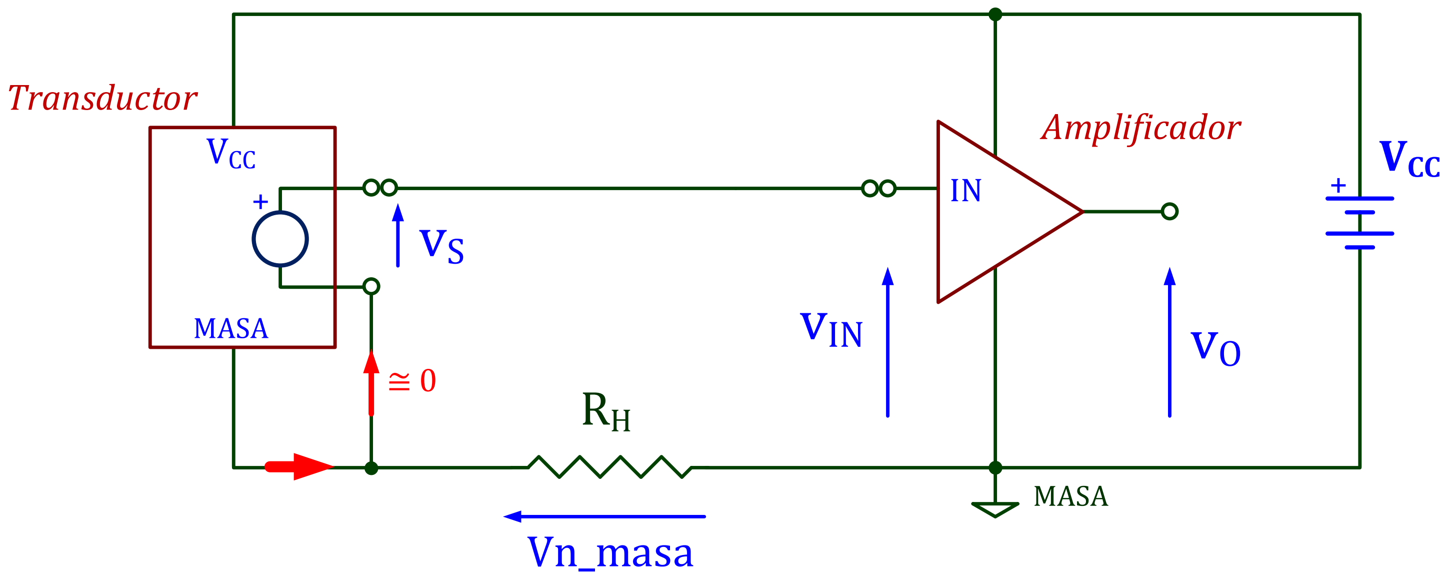


Figure 6-42. Motor control application.

También empleados para *medir señales débiles en presencia de ruido*

Ejemplo: Ruido en pistas que unen masas alejadas

Amp. No diferencial: $A_V = v_O / v_{IN}$



$$\left.\begin{aligned} v_O &= A_V \cdot v_{IN} \\ v_{IN} &= v_S + v_{n\_masa} \end{aligned}\right\} \quad v_O = A_V \cdot v_S + \underbrace{A_V \cdot v_{n\_masa}}_{}$$

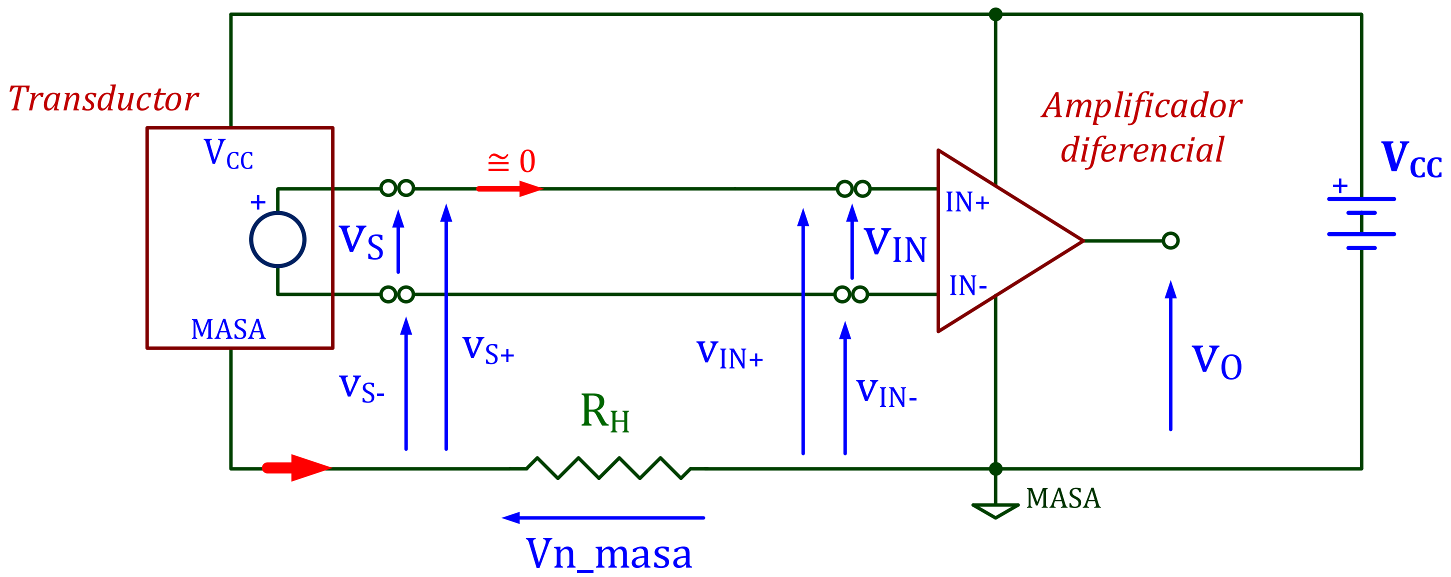
¡Problema!

Término no deseado. Ruido añadido

También empleados para *medir señales débiles en presencia de ruido*

Ejemplo: Ruido en pistas que unen masas alejadas. ***Una solución***

Amp. Diferencial: $A_V = v_O/v_{IN} = v_O/(v_{IN+} - v_{IN-})$



$$v_O = A_V \cdot v_{IN}$$
$$v_{IN} = (v_{IN+} - v_{IN-})$$
$$v_{IN+} = v_S + v_{S-} + v_{n\_masa}$$
$$v_{IN-} = v_{S-} + v_{n\_masa}$$

$$v_O = A_V \cdot (v_S + v_{S-} + v_{n\_masa} - v_{S-} - v_{n\_masa})$$

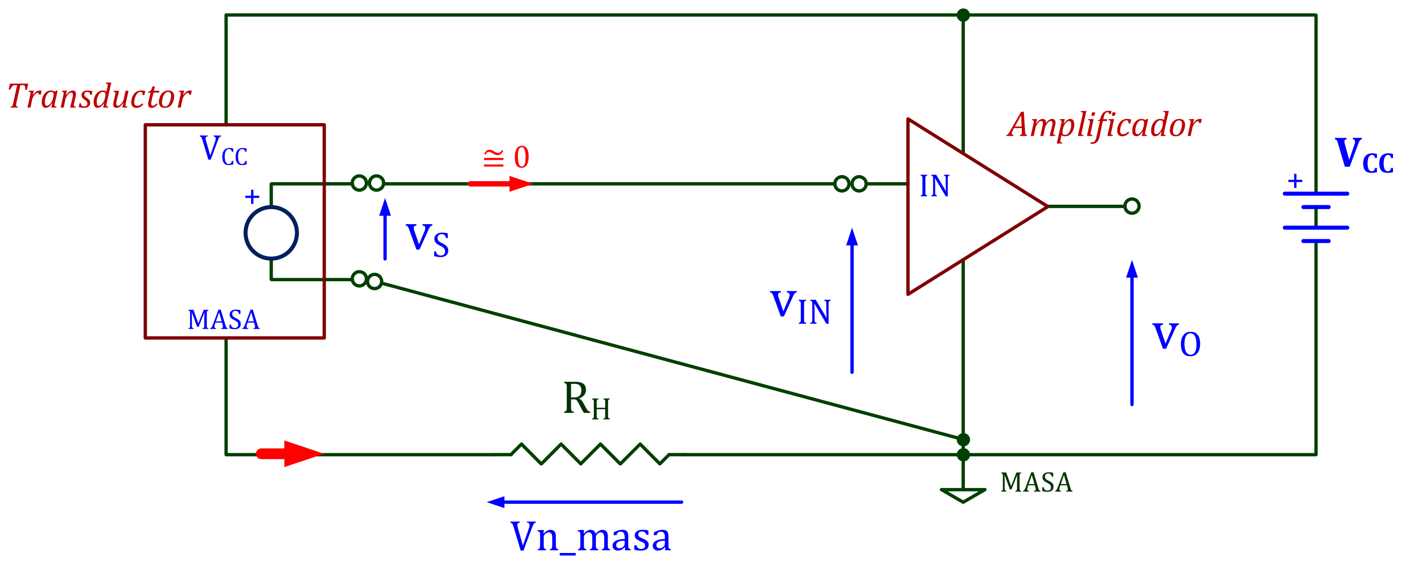
$$v_O = A_V \cdot v_S$$

¡Sólo se amplifica la señal deseada!

También empleados para *medir señales débiles en presencia de ruido*

Ejemplo: Ruido en pistas que unen masas alejadas. ***Otra solución***

Amp. No diferencial: $A_V = v_O / v_{IN}$

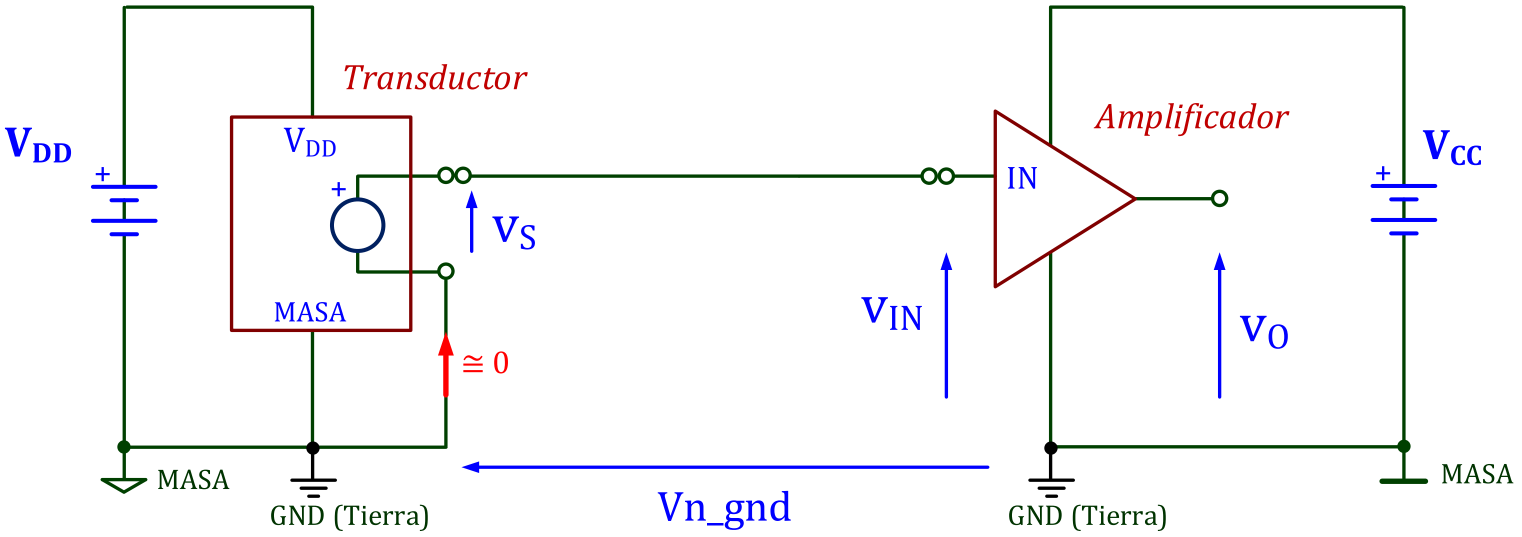


$$\left.\begin{aligned} v_O &= A_V \cdot v_{IN} \\ v_{IN} &= v_S \end{aligned}\right\} \quad v_O = A_V \cdot v_S$$

También empleados para *medir señales débiles en presencia de ruido*

Otro ejemplo: Ruido en tomas de tierra alejadas

Amp. No diferencial: $A_V = v_O / v_{IN}$



$$\left.\begin{array}{l} v_O = A_V \cdot v_{IN} \\ v_{IN} = v_S + v_{n\_gnd} \end{array}\right\} \quad v_O = A_V \cdot v_S + \underbrace{A_V \cdot v_{n\_gnd}}$$

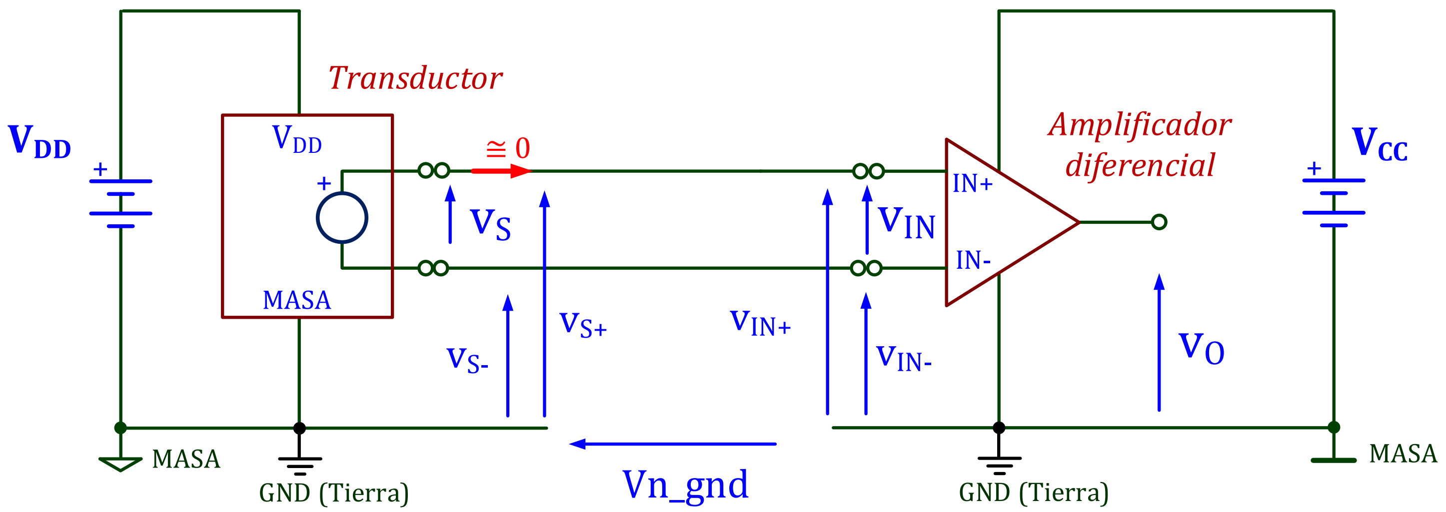
¡Problema!

Término no deseado. Ruido añadido

También empleados para *medir señales débiles en presencia de ruido*

Ejemplo: Ruido en tomas de tierra alejadas. ***Una solución***

Amp. Diferencial: $A_V = v_O/v_{IN} = v_O/(v_{IN+} - v_{IN-})$



$$\left.\begin{aligned} v_O &= A_V \cdot v_{IN} \\ v_{IN} &= (v_{IN+} - v_{IN-}) \\ v_{IN+} &= v_S + v_{S-} + v_{n\_gnd} \\ v_{IN-} &= v_{S-} + v_{n\_gnd} \end{aligned}\right]$$

$$v_O = A_V \cdot \left(v_S + v_{S-} + v_{n\_gnd} - v_{S-} - v_{n\_gnd}\right)$$

$$v_O = A_V \cdot v_S$$

¡Sólo se amplifica la señal deseada!

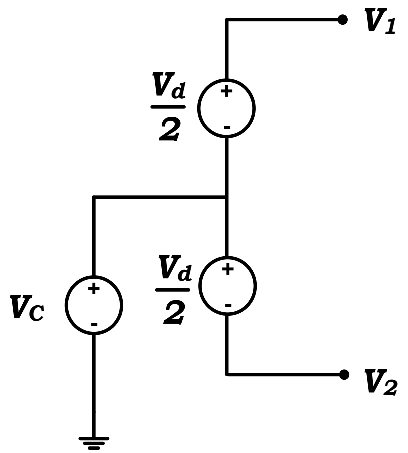
Señal diferencial y en modo común

- Señal diferencial: $V_d = V_1 - V_2$

- Por desgracia a todos los amplificadores que responden a una V_d así definida, también les afecta la parte común de ambas señales V_1 y V_2… denominada la **señal en modo común V_c:**

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

- Para estudiar la respuesta de los circuitos ante ambas señales utilizaremos el siguiente modelo



$$\begin{cases} V_1 = V_c + \dfrac{V_d}{2} \\ V_2 = V_c - \dfrac{V_d}{2} \end{cases}$$

Otro ejemplo de señal de tipo diferencial
Circuito para electrocardiograma

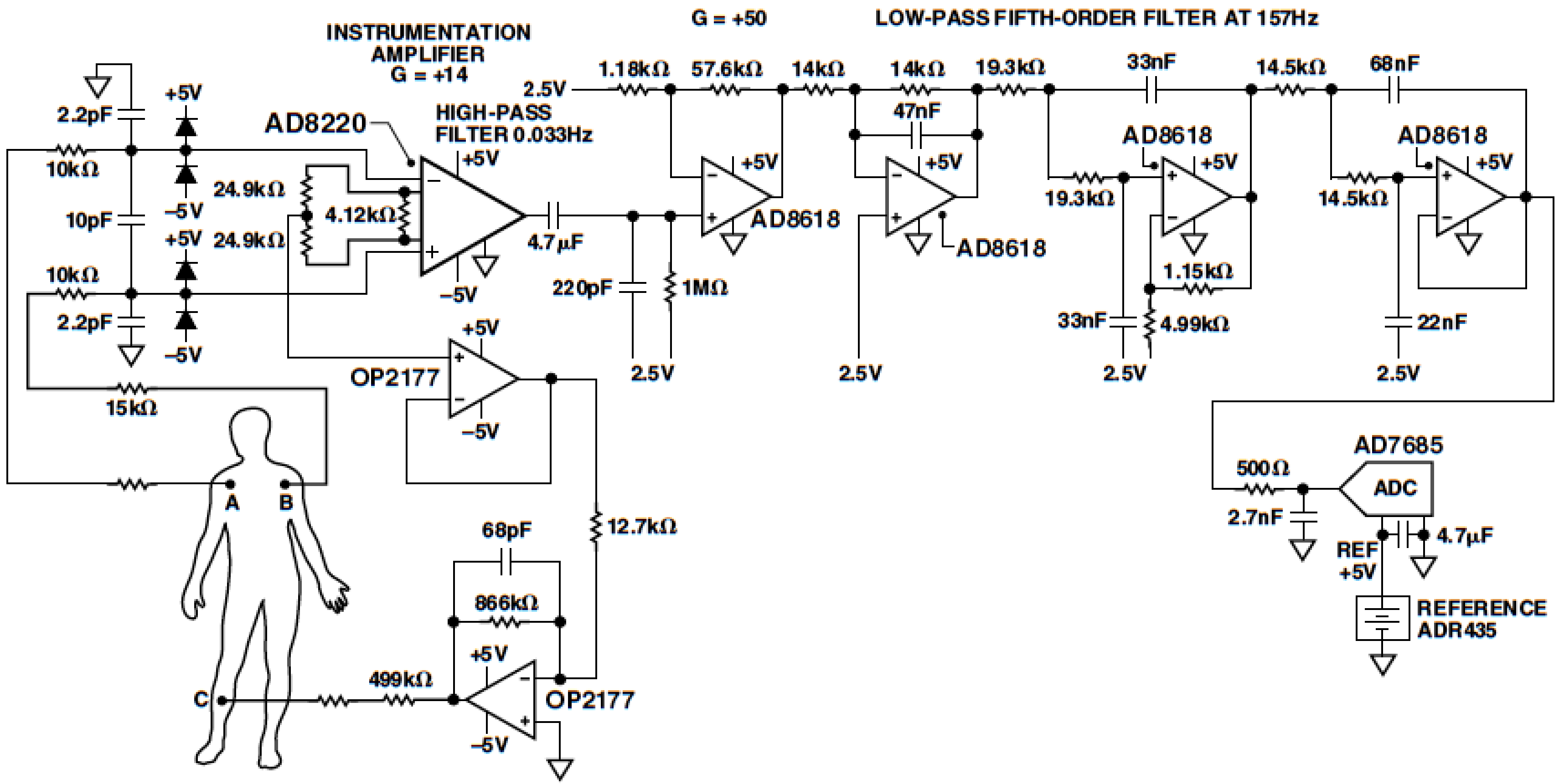
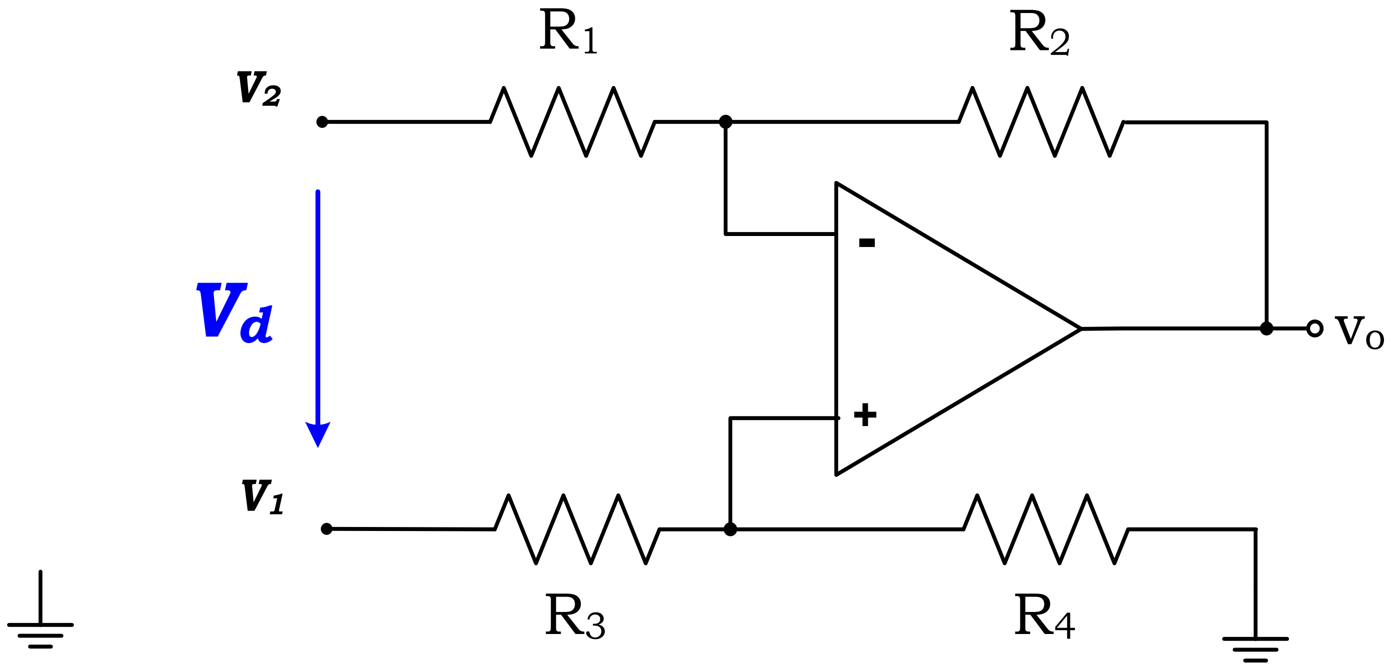


Figure 6-46. An example of an ECG schematic.

Análisis del *Amplificador Diferencial*. Circuito

Ideal

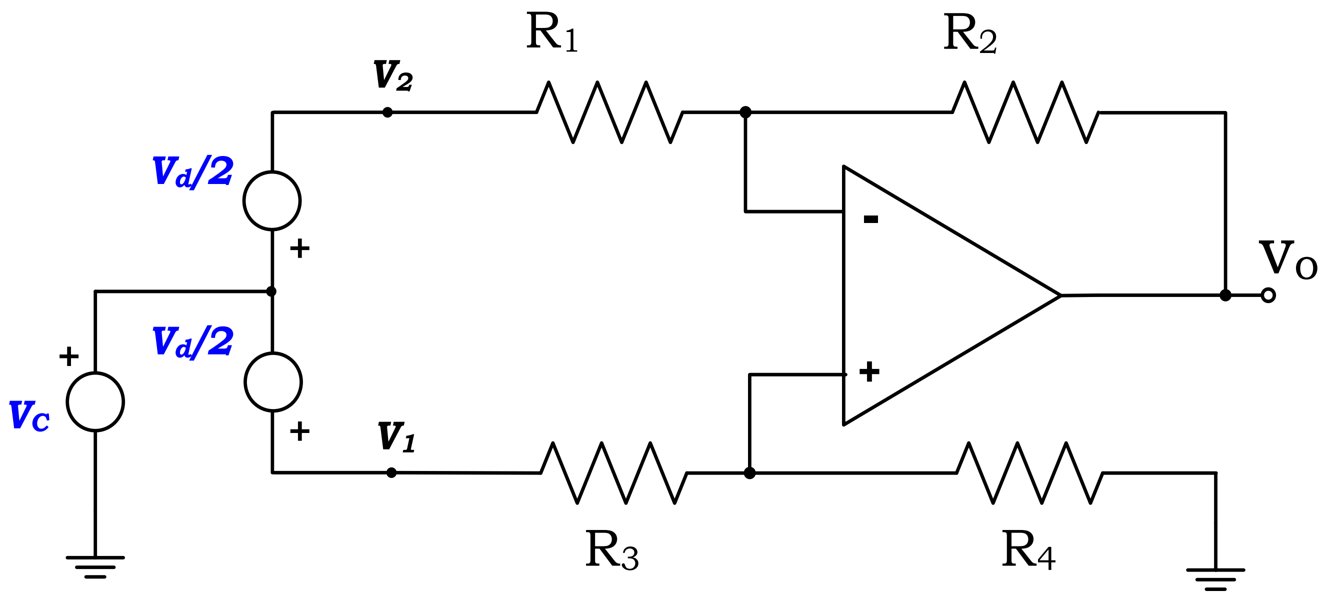


Su función ideal es: $V_o = f(V_d)$

Amplificador Diferencial: Análisis

Ideal

Para estudiar su comportamiento ante señal diferencial y señal común, modelamos V_1 y V_2 mediante los generadores de tensión diferencial: V_d y tensión común: V_c.



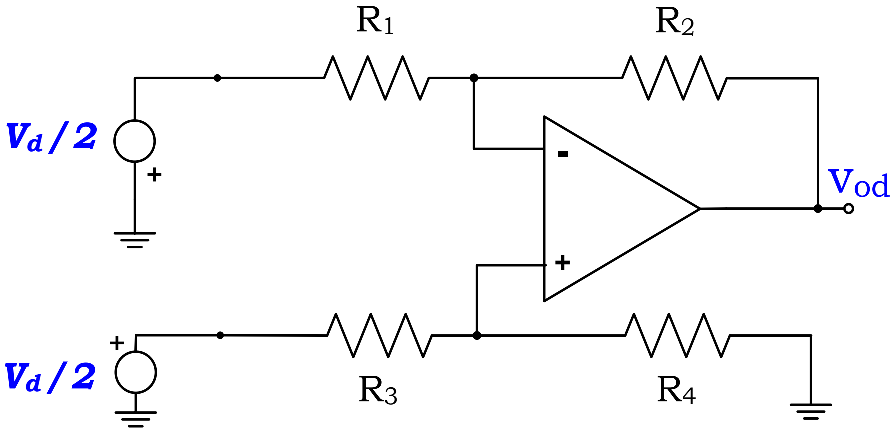
$$V_d = V_1 - V_2$$

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\begin{cases} V_1 = V_c + \dfrac{V_d}{2} \\ V_2 = V_c - \dfrac{V_d}{2} \end{cases}$$

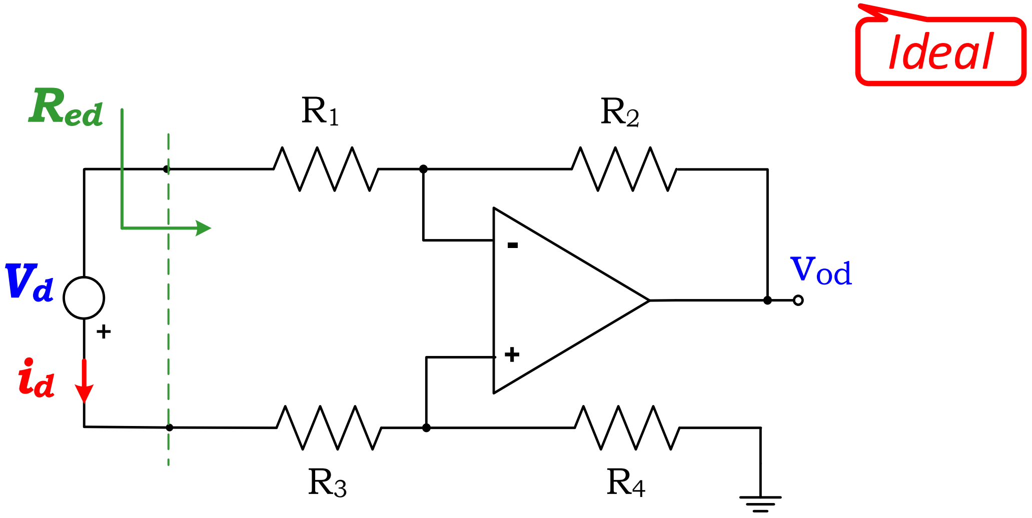
Amplificador Diferencial: Análisis al modo diferencial

Ideal



¿Ganancia de tensión diferencial? $A_d = \frac{v_{od}}{v_d}$

Amplificador Diferencial: Análisis al modo diferencial

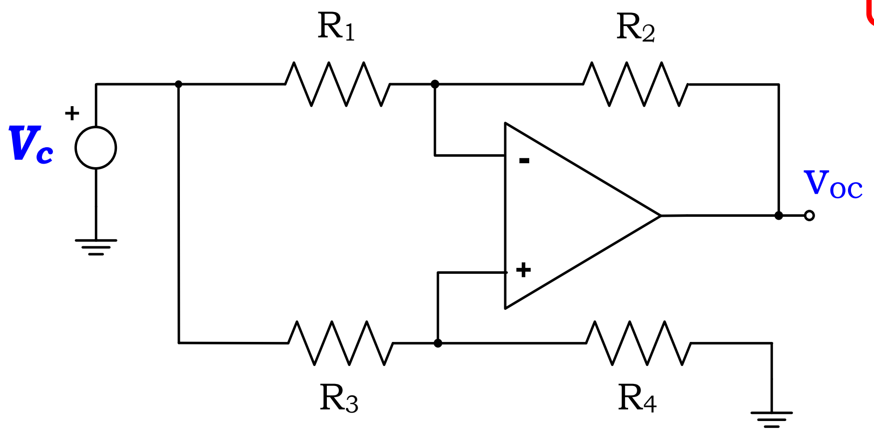


¿Resistencia de entrada a la señal diferencial?

$$R_{ed} = \frac{v_d}{i_d}$$

Amplificador Diferencial: Análisis al modo común

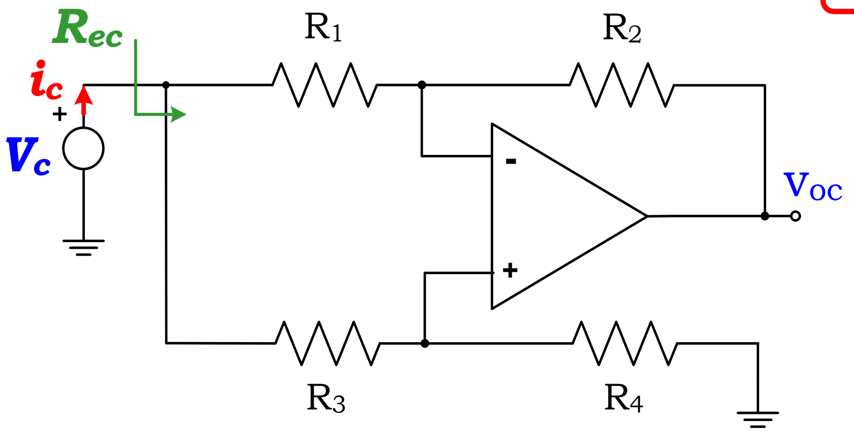
Ideal



¿Ganancia de tensión común? $A_c = \dfrac{v_{oc}}{v_c}$

Amplificador Diferencial: Análisis al modo común

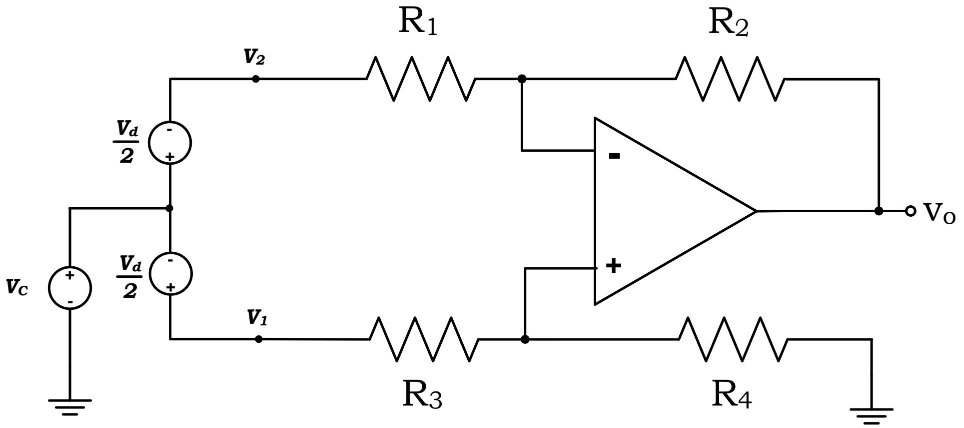
Ideal



¿Resistencia de entrada a la señal común? $R_{ec} = \frac{v_c}{i_c}$

Amplificador Diferencial: Análisis (resumen)

Ideal



P. superposición:

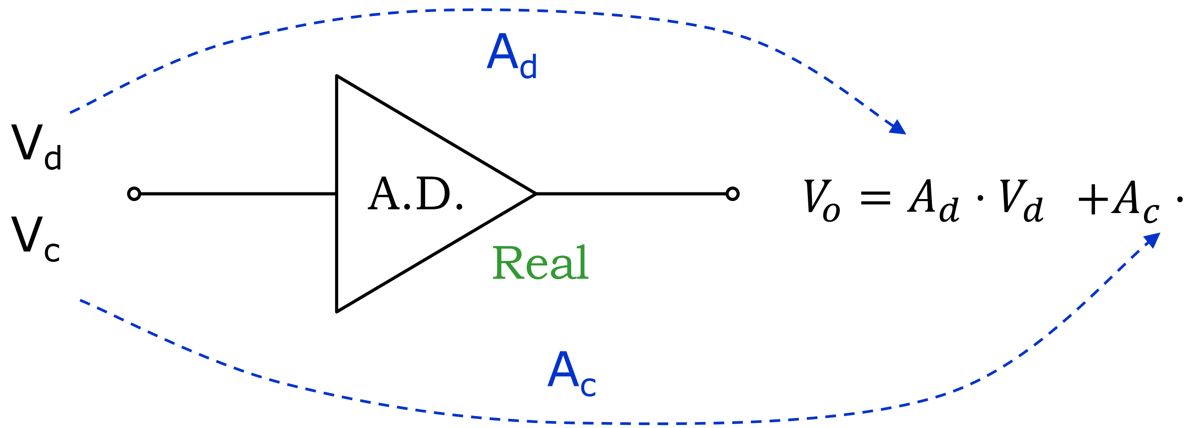
$$Vo = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - V_2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_1 = V_C + \frac{V_d}{2}$$
$$V_2 = V_C - \frac{V_d}{2}$$

$$V_o = \underbrace{\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{1}{2}}_{A_d} \cdot V_d + \underbrace{\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1}\right)}_{A_c} \cdot V_c$$

Para que $V_O \neq f(V_C)$ $\quad \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{R_2}{R_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$

Amplificador diferencial real



$$V_o = A_d \cdot V_d \; + A_c \cdot V_c$$

Para medir cuánto se acerca al ideal se define la *Relación de Rechazo al Modo Común*:

$$\boxed{CMRR = 20\,log\frac{A_d}{A_c}\;[dB] \;\text{ ó }\; CMR = \frac{A_d}{A_c}}$$

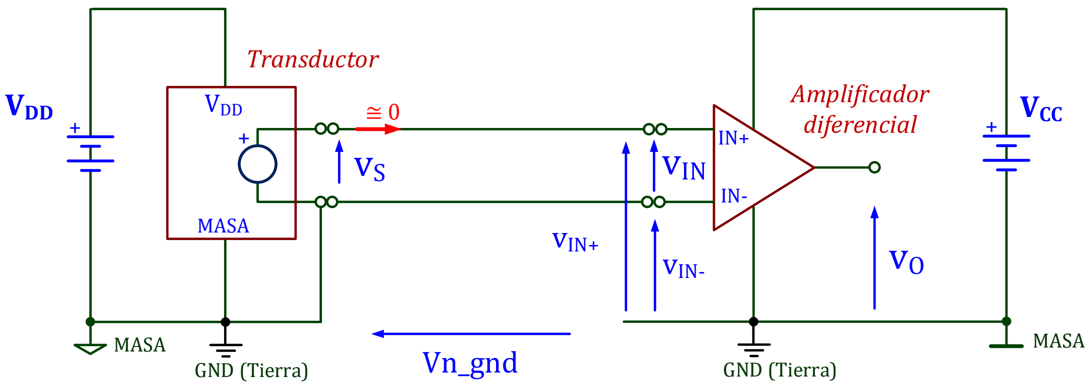
Observa:

$$si \quad A_d \uparrow\uparrow \;\rightarrow\; CMRR \;\uparrow\uparrow$$

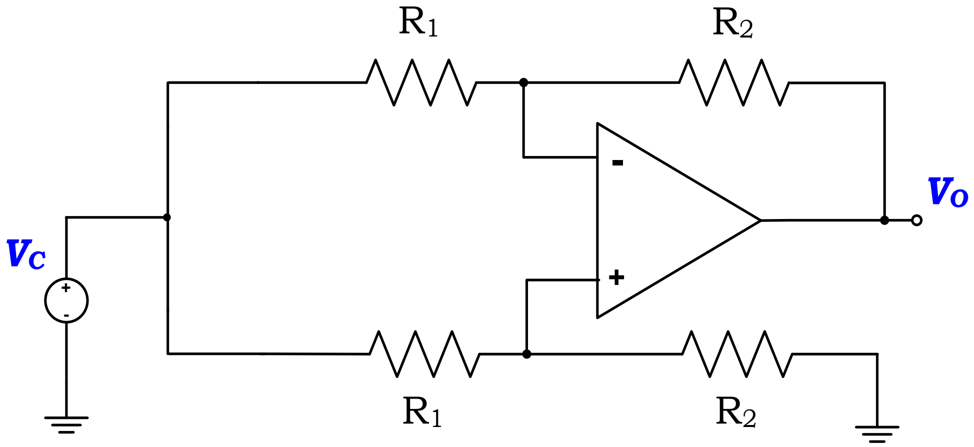
$$CMR = A_d\frac{V_c}{V_{oc}}$$

Ejemplo

Para el siguiente circuito, obtenga la tensión de error a la salida del amplificador diferencial debida a $v_{n\_gnd} = 1\ V$ y al parámetro $CMRR = 80\ dB$ del amplificador diferencial que tiene una ganancia (diferencial) de valor $100\ [V/V]$. Exprese el resultado en % del valor ideal de la tensión a la salida del amplificador cuando la tensión ofrecida por el transductor es de $v_S = 50\ mV$.



Amplificador Diferencial Real



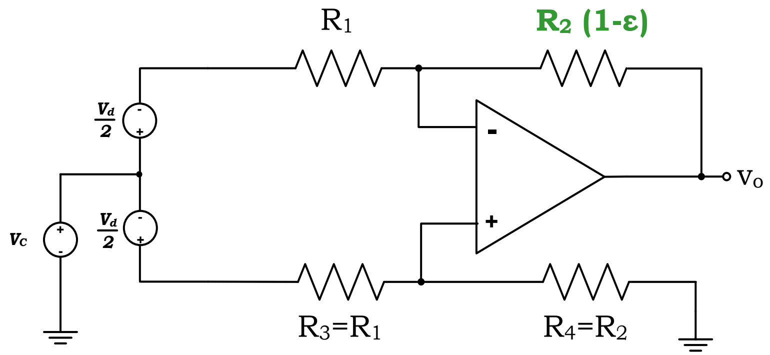
✍ ¿Qué parámetros contribuyen a hacer que $V_o = f(V_C)$? :

- ❑ La tolerancia de las resistencias.
- ❑ El CMRR del amplificador operacional.

✍ Veamos su repercusión aplicando el teorema de superposición…

AD real: tolerancias de los resistores

Tengamos en cuenta la tolerancia ε de sólo un resistor



¿Valor del CMR_R?

Vimos que:

$$V_o = \underbrace{\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\cdot\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{1}{2}}_{A_d}\cdot V_d + \underbrace{\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\cdot\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)-\frac{R_2}{R_1}\right)}_{A_c}\cdot V_c$$

$$\Downarrow$$

$$V_o = \underbrace{\frac{R_2}{R_1}\cdot\left(1-\frac{R_1+2\cdot R_2}{R_1+R_2}\cdot\frac{\varepsilon}{2}\right)}_{A_d}\cdot V_d + \underbrace{\frac{R_2\cdot\varepsilon}{R_1+R_2}}_{A_c}\cdot V_c$$

AD real: tolerancias de los resistores

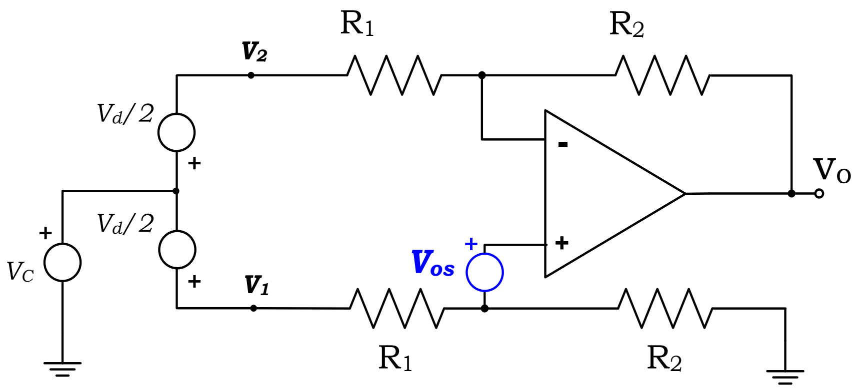
Pero… ¿a qué resultado se llega si tenemos en cuenta la tolerancia de otro cualquiera de los resistores?

Se obtiene el mismo resultado:

$$CMR_{tol\,un\,resistor} \cong \frac{\left(1+(R_2/R_1)\right)}{\varepsilon}$$

¿Qué valor tendría el CMR_R del amplificador diferencial si consideramos la misma tolerancia en los cuatro resistores?

AD real: tenemos en cuenta ahora el CMRR del AO

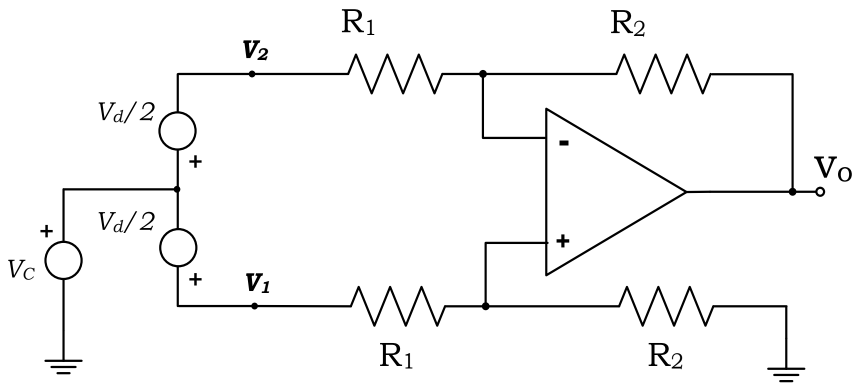


Con:

$$V_{os} = \frac{\frac{v_p + v_n}{2}}{CMR_{AO}} = \frac{v_{cAO}}{CMR_{AO}}$$

¿Valor de CMR_{AD}?

AD real: considerando CMR_R y CMR_{AO}



$$¿Valor\ de\ CMR_{AD}?$$

$$v_o = A_D \times v_d + A_D \frac{v_c}{CMR_R} + A_D \frac{v_c}{CMR_{AO}}$$

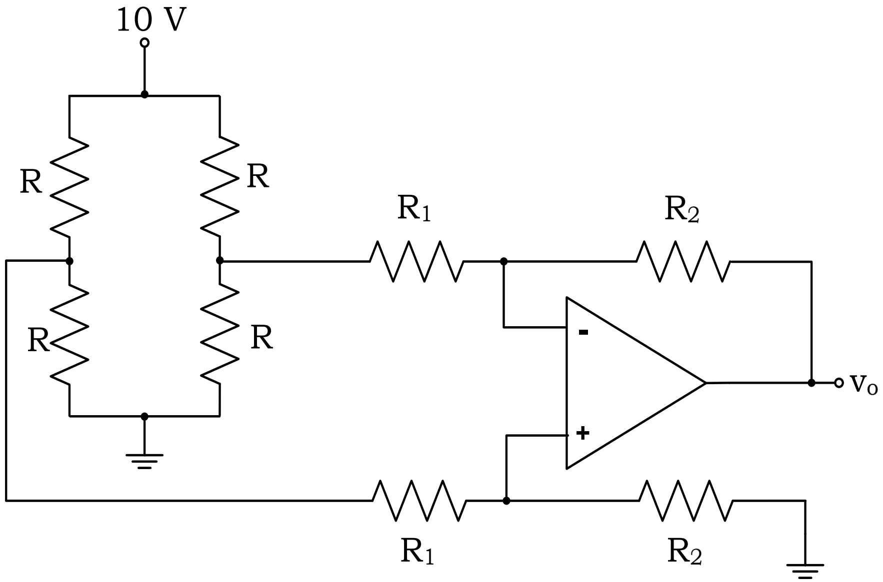
$$v_o = A_d \times v_d + \underbrace{\left(A_d \frac{1}{CMR_R} + A_d \frac{1}{CMR_{AO}}\right)}_{A_c} \times v_c$$

$$CMR_{AD} = \frac{A_d}{A_c} = \frac{1}{\frac{1}{CMR_R} + \frac{1}{CMR_{AO}}} = CMR_R || CMR_{AO}$$

$$CMR_R = \frac{(1 + (R_2/R_1))}{4\varepsilon}$$

¡Cuidado!, sólo en unidades lineales

Ejemplo



$R_1 = 10\ k\Omega\ @\ 1\%$ $R_2 = 100\ k\Omega\ @\ 1\%$ $R_1 \gg R$

¿Qué valor tendrá v_o?

Alguncas conclusiones del *Amplificador Diferencial* real

- ✍ Idealmente el A.D. responde únicamente a la componente diferencial de la tensión de entrada.

- ✍ Las desigualdades de los componentes hacen que el amplificador responda también a la tensión en modo común.

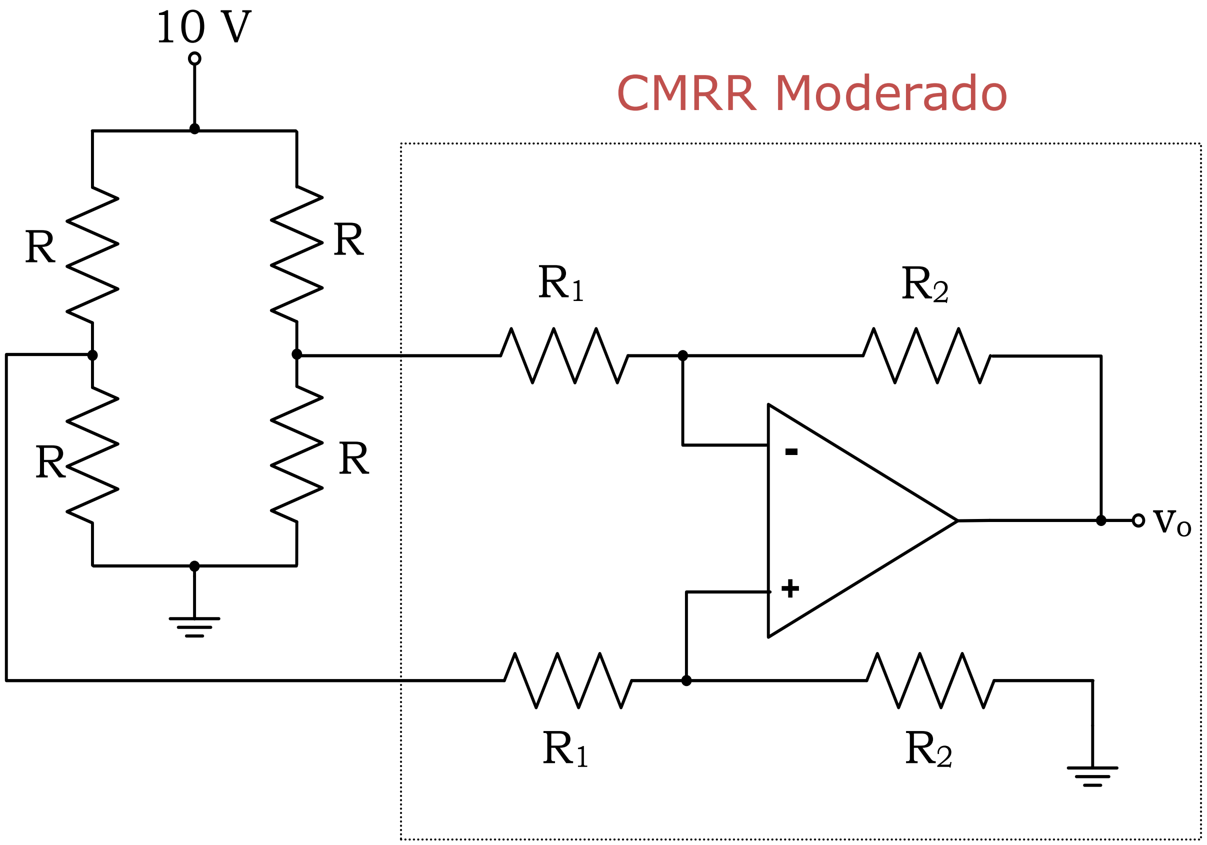
- ✍ El CMRR mide cuánto se aproxima el amplificador al modelo ideal.

- ✍ Cuanto mayor sea la A_D mayor será el CMRR.

Amplificadores diferenciales comerciales

Fabricante	Dispositivo	V_{OS} μV	TCV_{OS} $\mu v/ºC$	CMRR (dB)	PSRR (dB)	N.L. (%)	E G (%)	Vcc (V)
Analog Dev.	AD626	50	1	90	80	0,045	0,2	±6
Maxim	MAX4198	30	0,5	90	115	0,0003	0,01	±3,75
Burr Brown	INA105	50 (RTO)	5	90		0,0002	0,005	±15
Burr Brown	INA106	50 (RTO)	0,2	100		0,0002	0,01	±15
Burr Brown	INA117	120 (RTO)	8,5	80	90	0,0002	0,01	±15

Algunas limitaciones del Amp. Diferencial



Efecto de carga
del amplificador
Ze ↓↓

$$\cancel{V_1 = \frac{10}{2} = 5V}$$
$$\cancel{V_2 = \frac{10}{2} = 5V}$$

Ejercicio

Se tiene un sistema de medida, de la tensión de una de las celdas de una batería (Fig. 1). En la Fig. 2 se muestra la etapa de entrada (un A.D.) del acondicionador. Estimar el error, en tanto por ciento, que se espera a la salida del A.D., teniendo en cuenta sólo la ganancia en modo común del mismo.

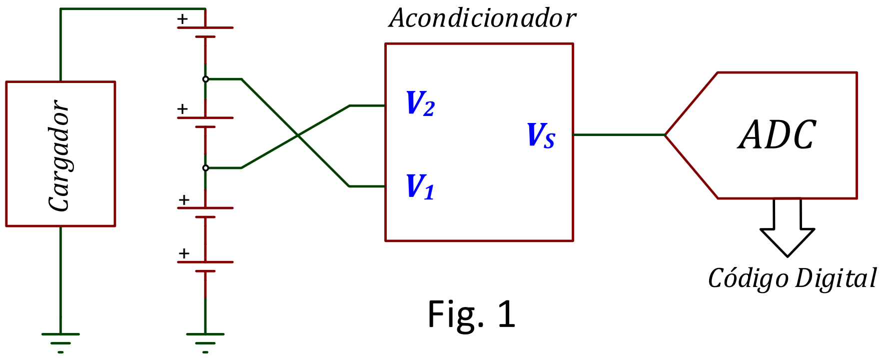


Fig. 1

Datos: $R_1 = 100\ k\Omega\ @\ 5\ \%$ $R_2 = 200\ k\Omega\ @\ 5\ \%$ $CMRR_{AO} = 60\ dB$

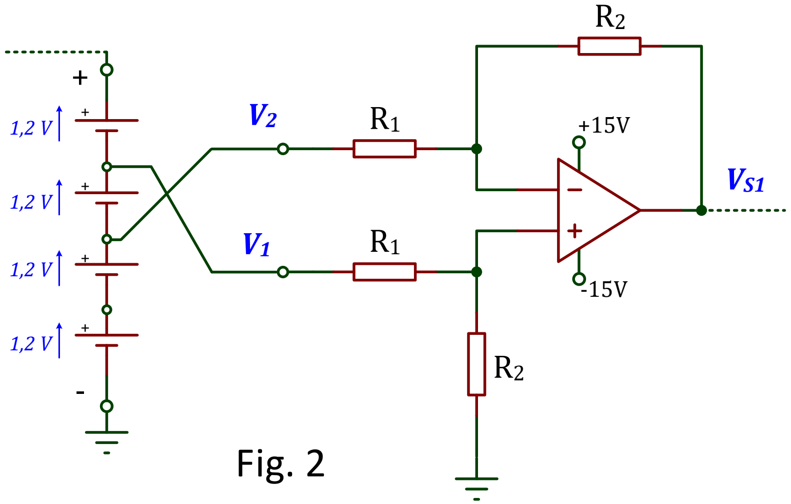


Fig. 2

Índice

0.- ¿Cómo conectar el sensor/transductor al acondicionador o instrumento de medida?

1.- Amplificador Diferencial

2.- Amplificador de Instrumentación

3.- Errores en el Amplificador de Instrumentación

Ideal y real

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

… también se emplea para amplificar señales de tipo diferencial.

Del A. Diferencial al *A. de Instrumentación* Ideal

Aumento de la impedancia de entrada e igualdad de la impedancia "vista" desde cada una de las entradas.

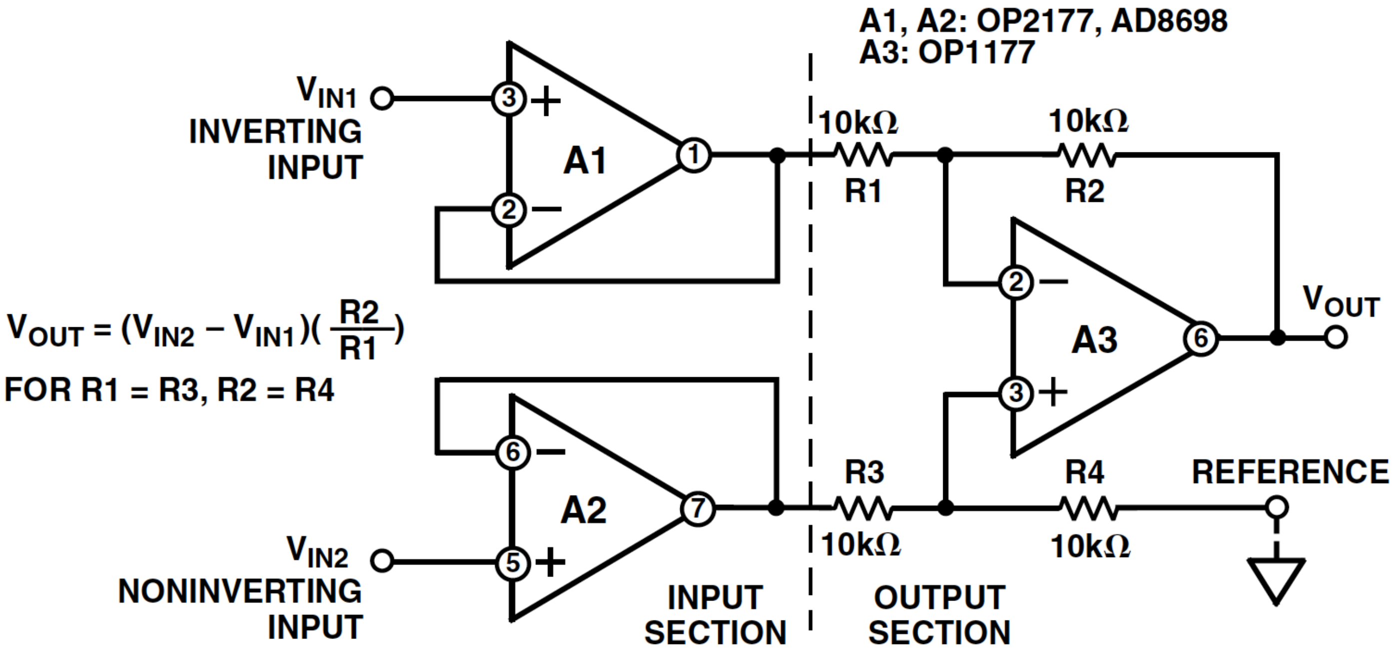


Figure 2-2. A subtractor circuit with input buffering.

Del A. Diferencial al *A. de Instrumentación* Ideal

Seguimos la mejora, añadiendo ganancia a la etapa de entrada.

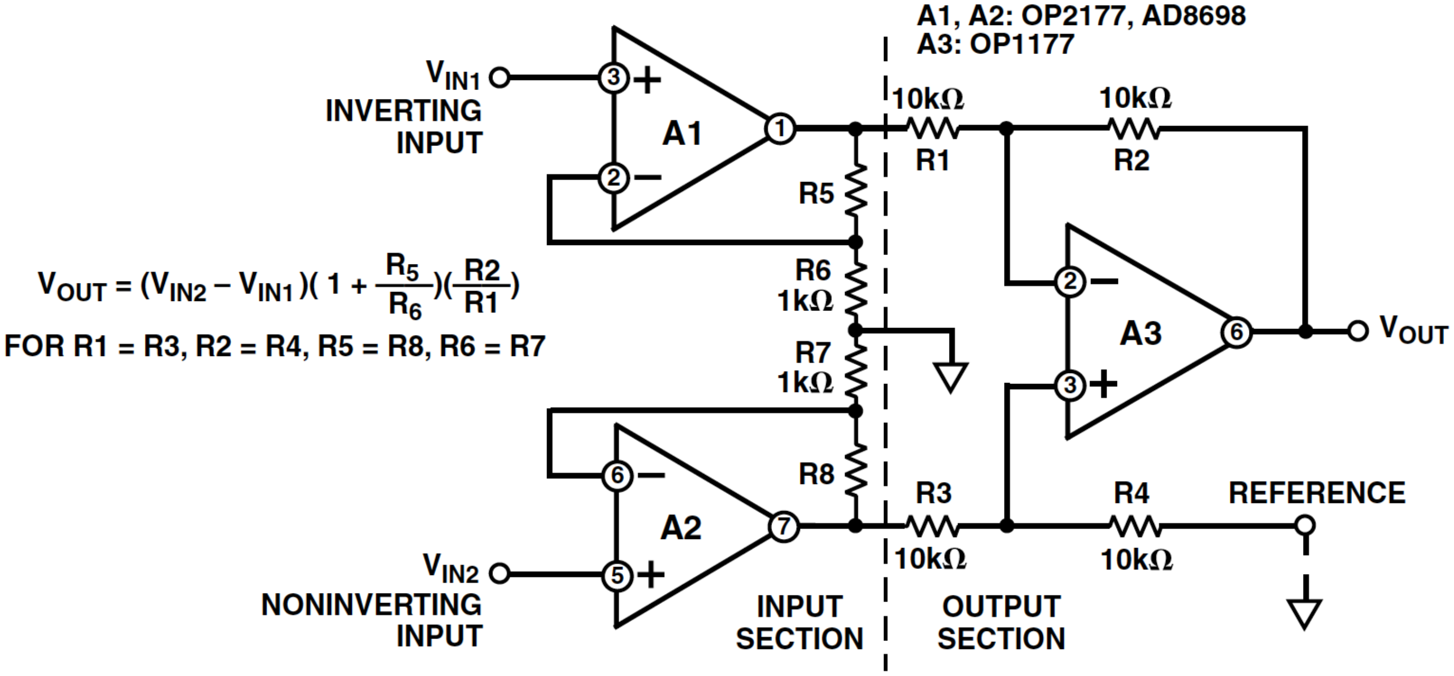


Figure 2-3. A buffered subtractor circuit with buffer amplifiers operating with gain.

El cambio propuesto aumenta la ganancia diferencial, pero a la vez, también amplifica la ganancia al modo común.

Del A. Diferencial al *A. de Instrumentación* Ideal

Solución final: El A.I. formado por tres AO's.

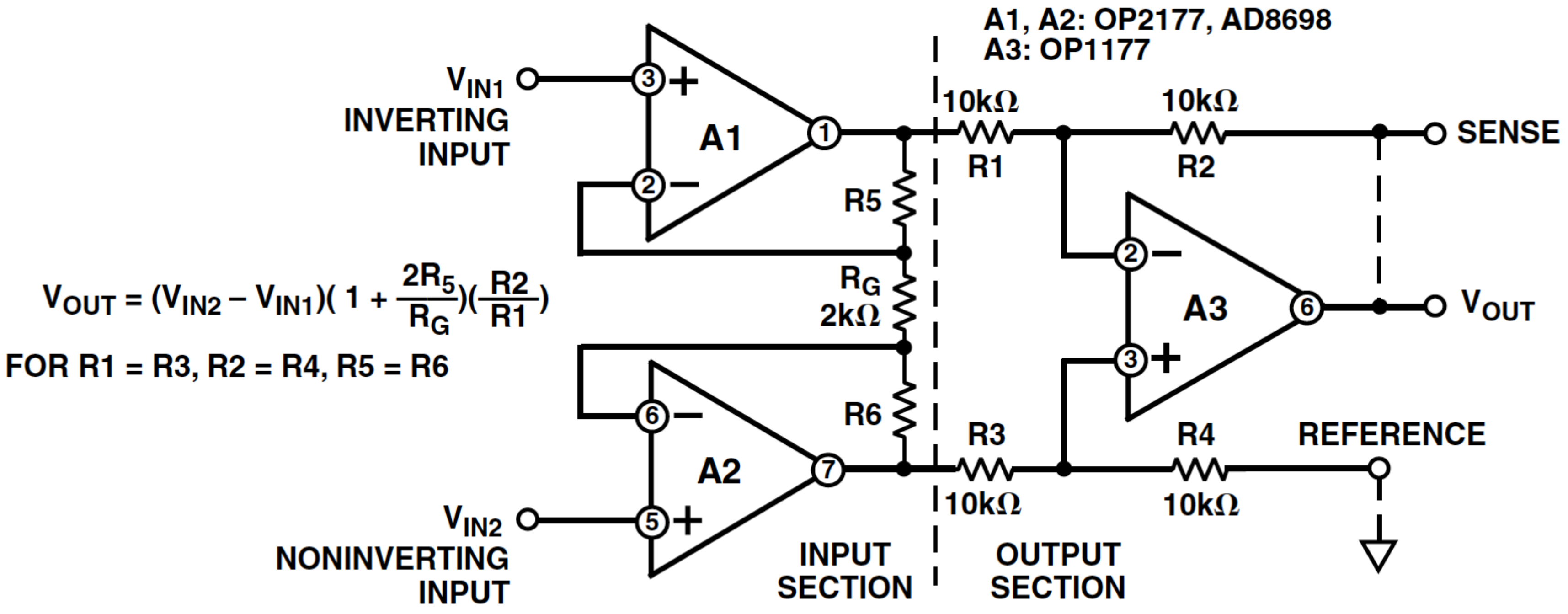
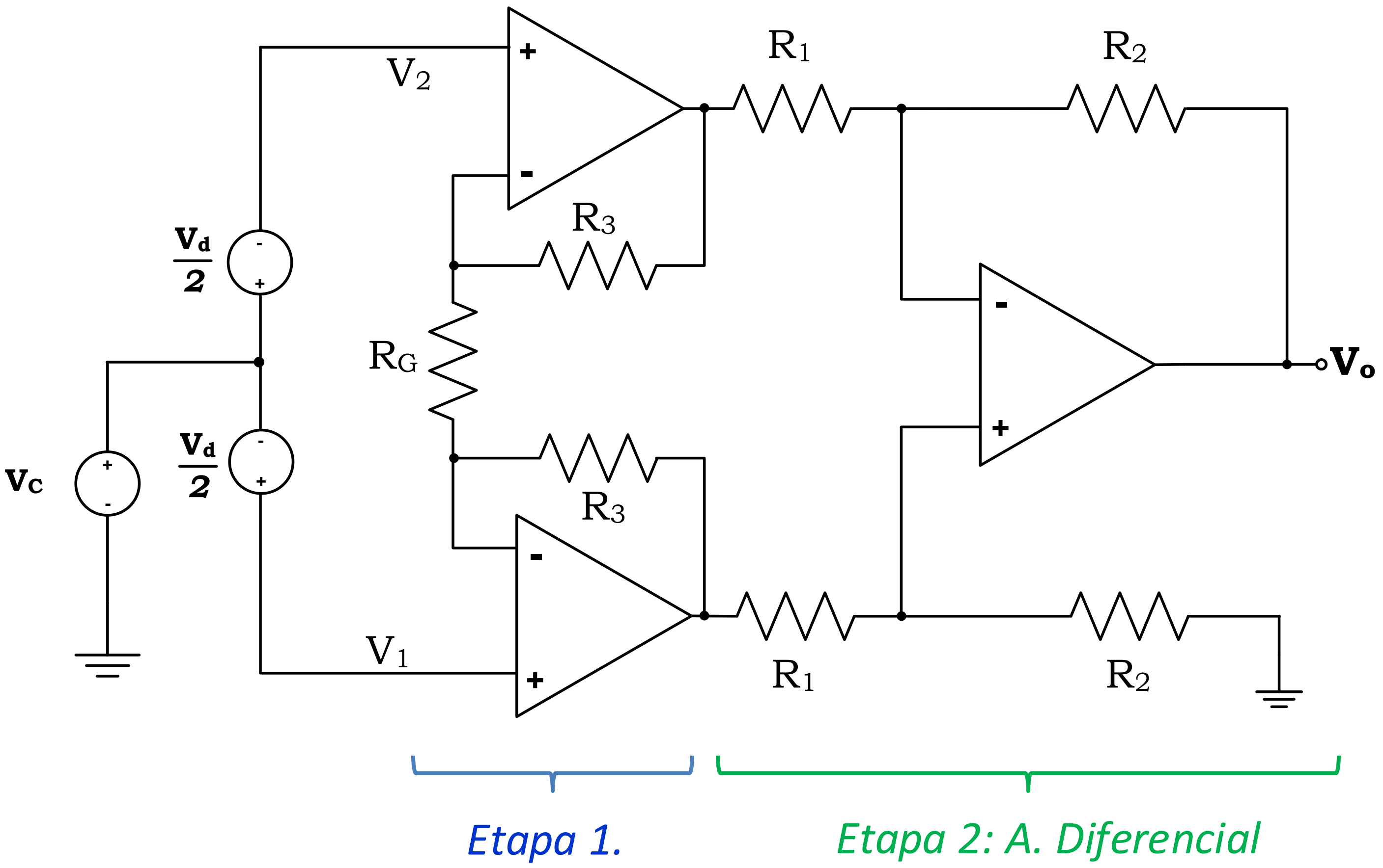


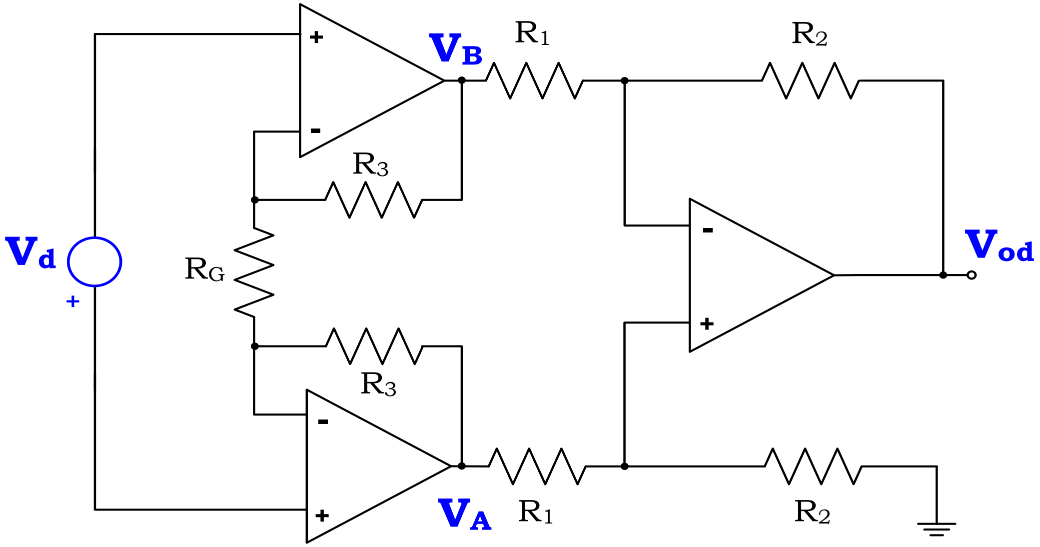
Figure 2-4. The classic 3-op amp in-amp circuit.

Amplificador de Instrumentación Ideal



A. Instrumentación: Análisis al modo diferencial

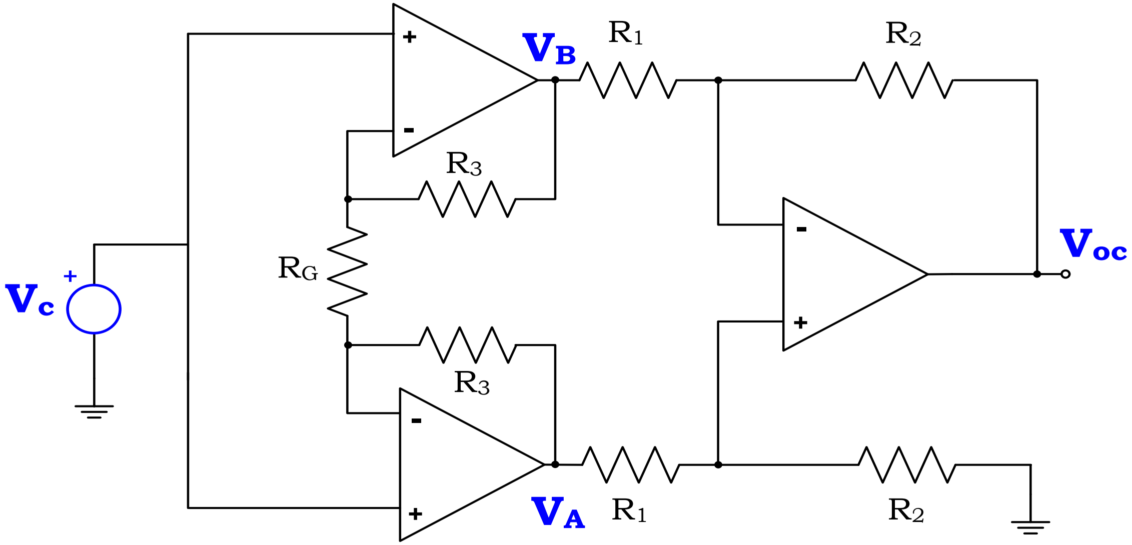
Ideal



¿Ganancia de tensión diferencial? $A_D = \dfrac{v_{od}}{v_d}$

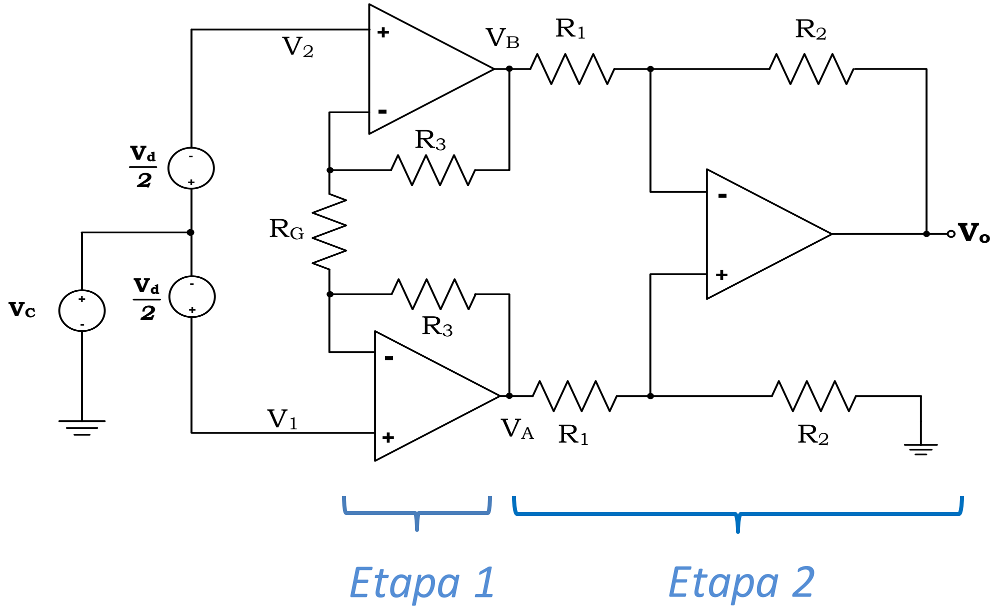
A. Instrumentación: Análisis al modo común

Ideal



¿Ganancia de tensión común? $A_C = \dfrac{v_{oc}}{v_c}$

Amplificador de Instrumentación Ideal

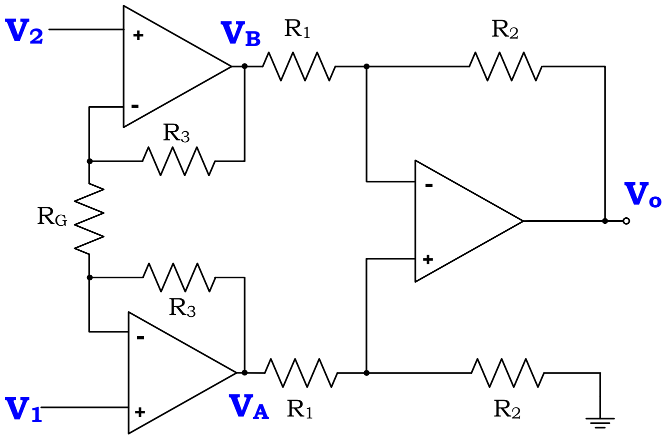


- La etapa 1 proporciona A_D ajustable con R_G
- R_G suele ser un resistor añadido, externo al C.I. Por ejemplo, un potenciómetro.
- La etapa 1 proporciona impedancia de entrada muy alta.
- La etapa 2 puede aportar una A_D fija adicional.
- La etapa 2 proporciona una impedancia de salida muy baja.

$$A_{d1} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_3}{R_G}\right) \qquad A_{d2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \longrightarrow \quad A_d = A_{d1} \cdot A_{d2} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_3}{R_G}\right)\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_{c1} = 1 \qquad A_{c2} = 0 \quad \longrightarrow \quad A_c = A_{c1} \cdot A_{c2} = 0$$

Una limitación del A.I.: *valor máximo de V_c*

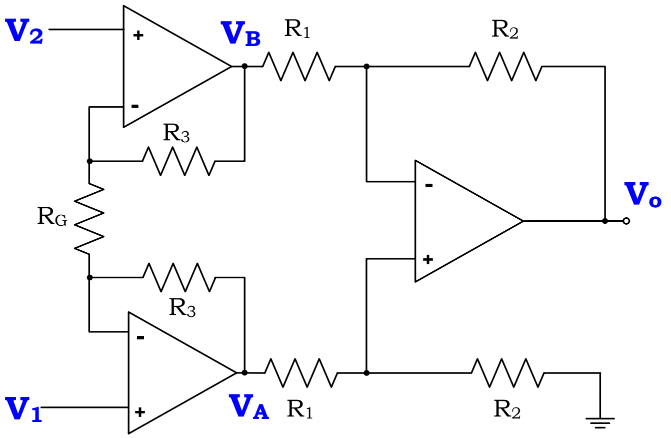


- Queremos amplificar V_d=5mV
- Para ello escogemos A_D=1000
- Alimentamos con ± 15 V
- Ponemos toda la ganancia en la primera etapa

¿Funciona con cualquier valor de V_c?

V_d	V_c	V_1	V_2	V_A	V_B	V_o
5 mV	1 V					
5 mV	10 V					
5 mV	20 V					

Una limitación del A.I.: *valor máximo de V_c*

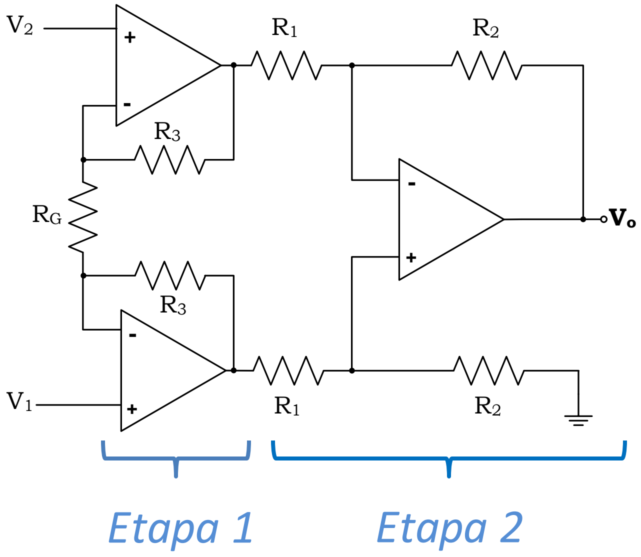


- Queremos amplificar V_d=5mV
- Para ello escogemos A_D=1000
- Alimentamos con ± 15 V
- Ponemos toda la ganancia en la primera etapa

¿Funciona con cualquier valor de V_c?

V_d	V_c	V_1	V_2	V_A	V_B	V_o
5 mV	1 V	1,0025 V	997,5 mV	3,5 V	-1,5 V	5 V
5 mV	10 V	10,0025 V	9,9975 V	12,5 V	7,5 V	5 V
5 mV	20 V	20,0025 V	19,9975 V	22,5 V	17,5 V	5 V

Otra limitación del A.I.: *valor del CMR_{AI}*



… es muy elevado, pero ¿qué relación tiene con el CMR de la etapa 1 y 2?

A.I.: *influencia del reparto de la ganancia*

$$V_{Bmax} = -\frac{V_{dmax}}{2} A_{d1} + V_{cmax} = -\text{Ouput Voltage Swing}$$

$$V_{Amax} = \frac{V_{dmax}}{2} A_{d1} + V_{cmax} = \text{Ouput Voltage Swing}$$

$$|V_{cmax}| = |Ouput\ Voltage\ Swing| - |\frac{V_{dmax}}{2} A_{d1}|$$

$$CMRR_{AI} = CMRR_1 + CMRR_{AD}$$

$$CMR_1 = A_{d1} \quad \rightarrow \quad CMRR_1 = 20 log A_{d1}$$

$$CMR_{AD} \cong \frac{(1 + (R_2/R_1))}{4 \times Tol} \rightarrow CMRR_{AD} \cong 20 log \frac{(1 + (R_2/R_1))}{4 \times Tol}$$

A_d	100		
Tol resist.	5		
$V_{d(max)}$	0,10		
Vcc	15		
A_{d1}	100	10	1,0
A_{d2}	1	10	100
$CMRR_1$			
$CMRR_2$			
CMRR			
$V_{o(max)}$			
$V_{c(max)}$			

A.I.: *influencia del reparto de la ganancia*

$$V_{Bmax} = -\frac{V_{dmax}}{2}A_{d1} + V_{cmax} = -\text{Ouput Voltage Swing}$$

$$V_{Amax} = \frac{V_{dmax}}{2}A_{d1} + V_{cmax} = \text{Ouput Voltage Swing}$$

$$|V_{cmax}| = |Ouput\ Voltage\ Swing| - |\frac{V_{dmax}}{2}A_{d1}|$$

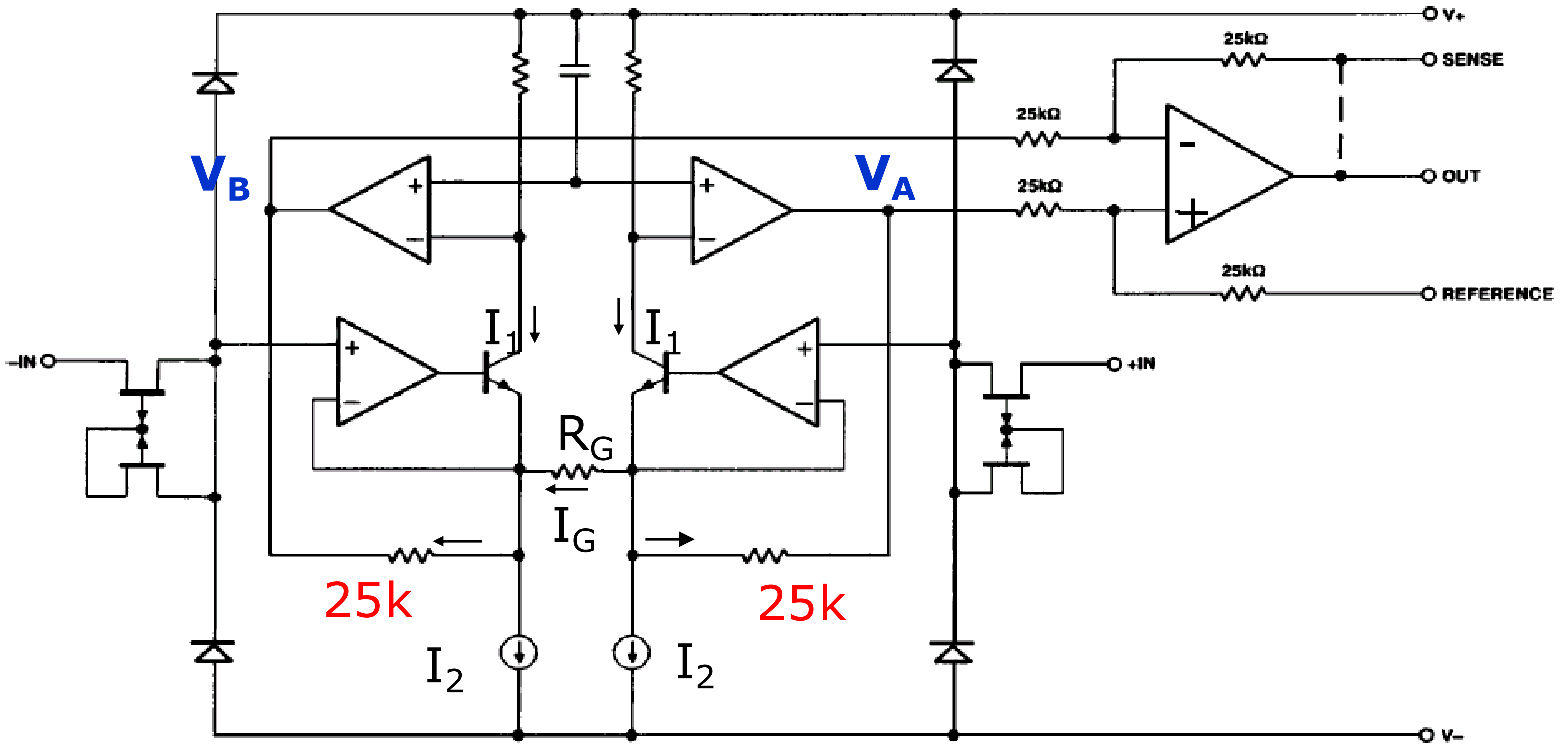
$$CMRR_{AI} = CMRR_1 + CMRR_{AD}$$

$$CMR_1 = A_{d1} \quad \rightarrow \quad CMRR_1 = 20logA_{d1}$$

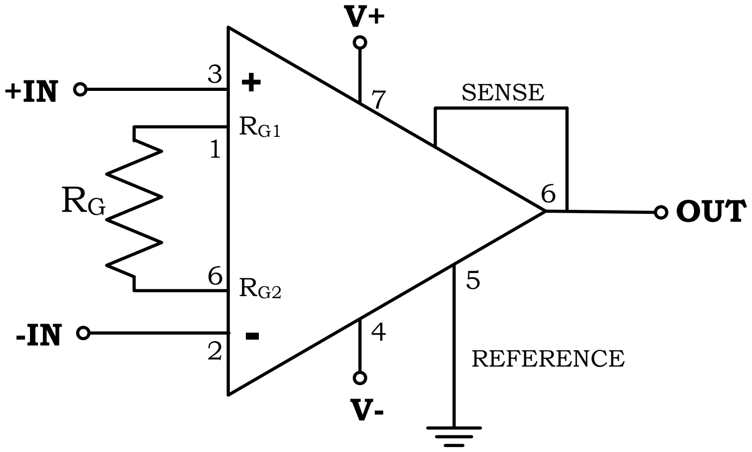
$$CMR_{AD} \cong \frac{(1 + (R_2/R_1))}{4 \times Tol} \rightarrow CMRR_{AD} \cong 20log\frac{(1 + (R_2/R_1))}{4 \times Tol}$$

A_d	100		
Tol resist.	5		
$V_{d(max)}$	0,10		
Vcc	15		
A_{d1}	100	10	1,0
A_{d2}	1	10	100
$CMRR_1$	40 dB	20 dB	0 dB
$CMRR_2$	20 dB	34,8 dB	54 dB
CMRR	60 dB	54,8 dB	54 dB
$V_{o(max)}$	11 V	12,64 V	12,98 V
$V_{c(max)}$	10 V	14,5 V	14,95 V

Ejemplo de A.I. comercial (AMP02)



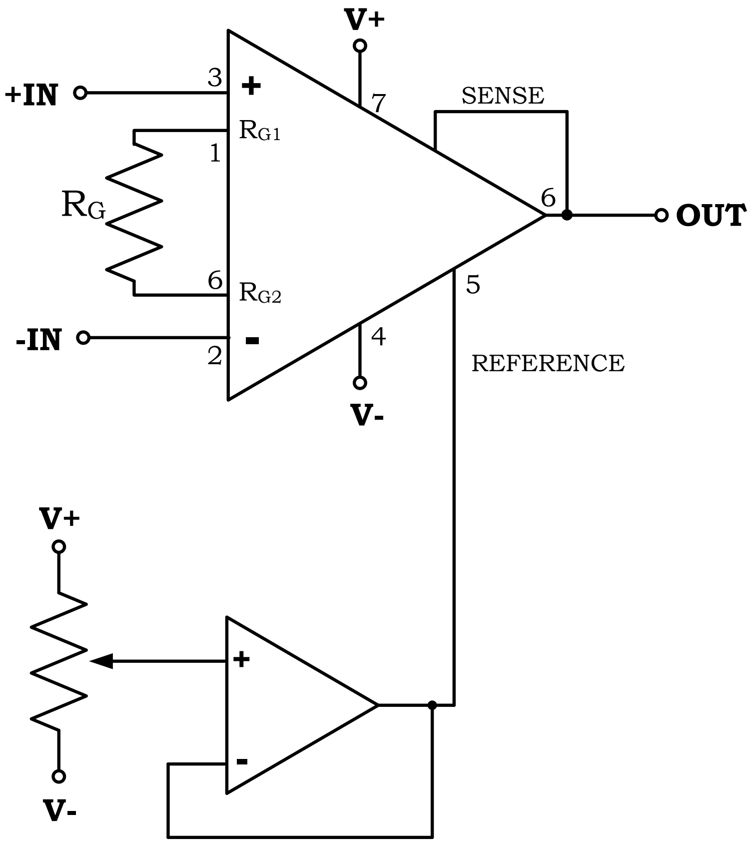
A.I.: *terminales SENSE y REFERENCE*



Si el terminal *REFERENCE* está conectado a masa:

$$V_{OUT} = (V_{+IN} - V_{-IN}) \cdot A_D$$

A.I.: *terminales SENSE y REFERENCE*

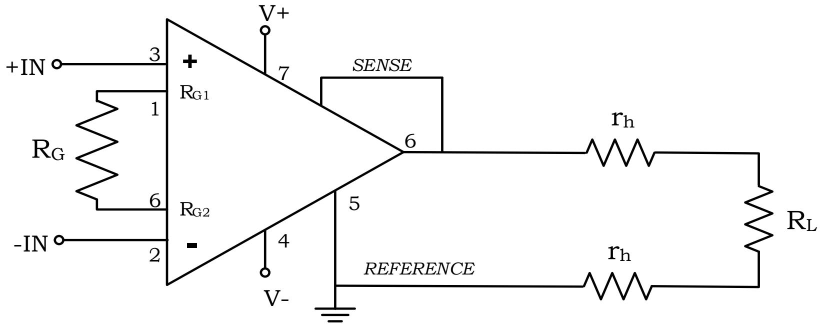


Si el terminal *REFERENCE* NO está conectado a masa:

$$V_{OUT} = (V_{+IN} - V_{-IN}) \cdot A_D + V_{REFERENCE}$$

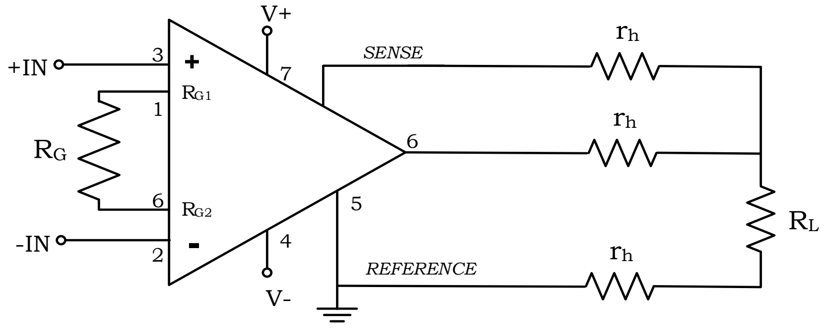
A.I. terminales SENSE y REFERENCE: *ejemplo de uso*

CASO A



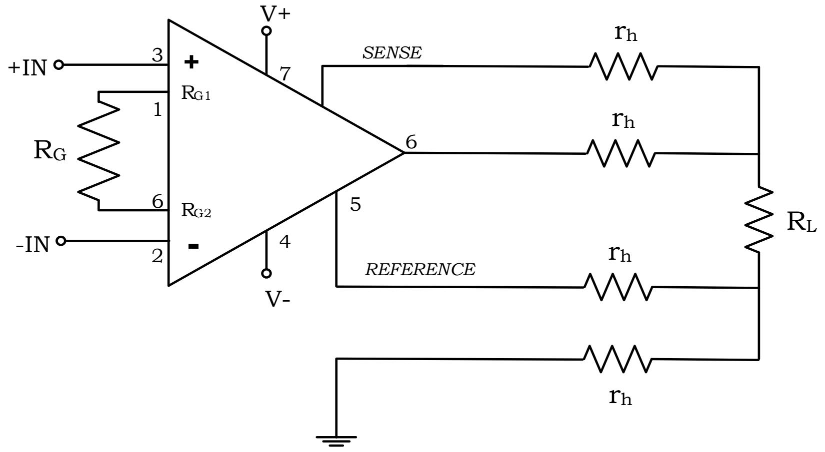
A.I. terminales SENSE y REFERENCE: *ejemplo de uso*

CASO B



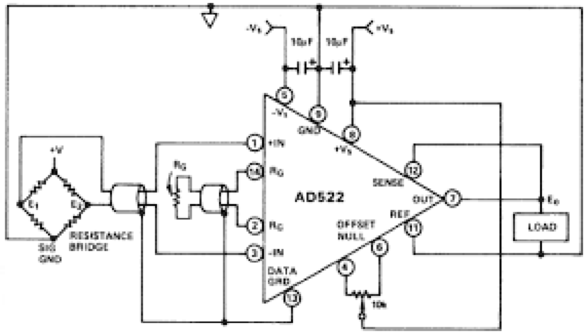
A.I. terminales SENSE y REFERENCE: *ejemplo de uso*

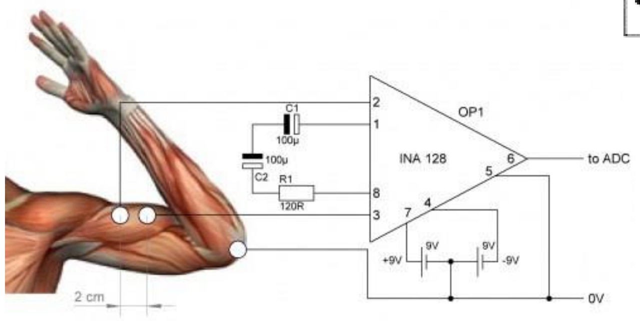
CASO C



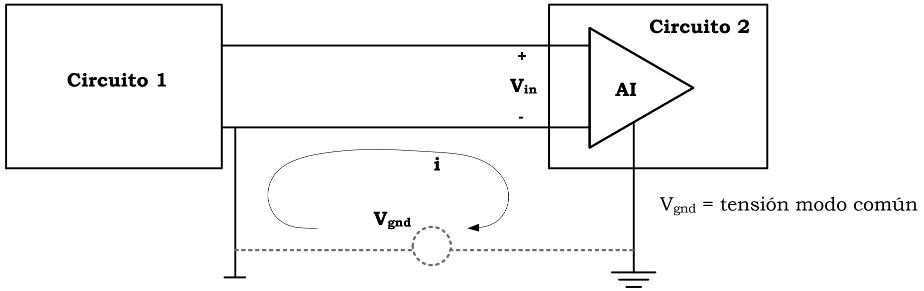
A. Instrumentación: Aplicaciones

- Medida de tensiones diferenciales
  - ❑ Puentes de medida.
  - ❑ Biopotenciales.
  - ❑ Etc.





- Eliminación de bucles de masa



- Circuitos de alta precisión