

E/S Analógica

Ángel Pérez Muñoz¹, Manuel Nieto²

Informática Industrial

14 de diciembre de 2023

¹ angel.perez.munoz@upm.es – D4202

² mnieto@fi.upm.es – D4106



*dat*si

ETSIInf – Informática Industrial – T8. E/S Analógica

Contenido original de los Profesores

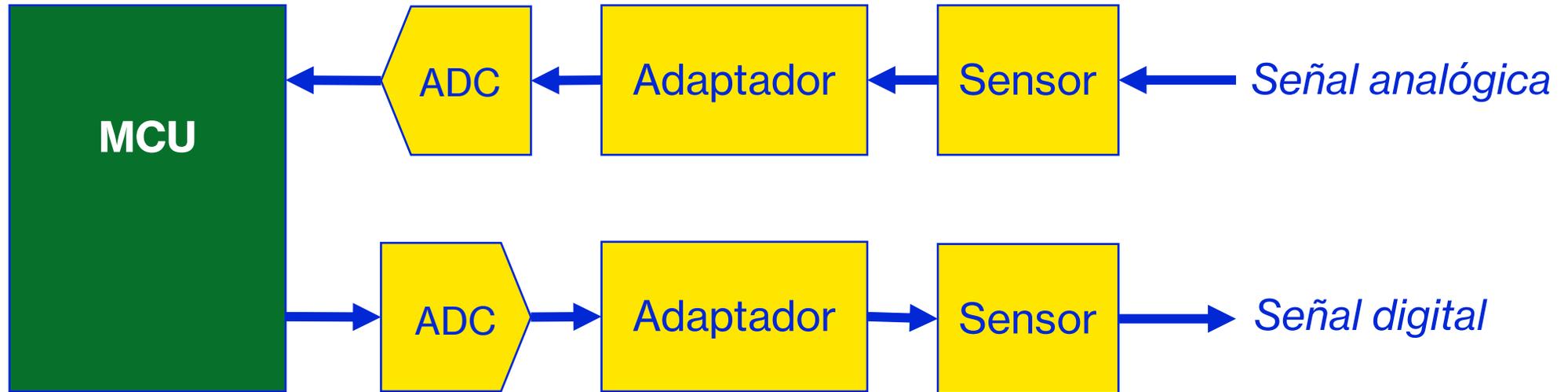
Juan Zamorano y Antonio Pérez

Introducción

Señales analógicas

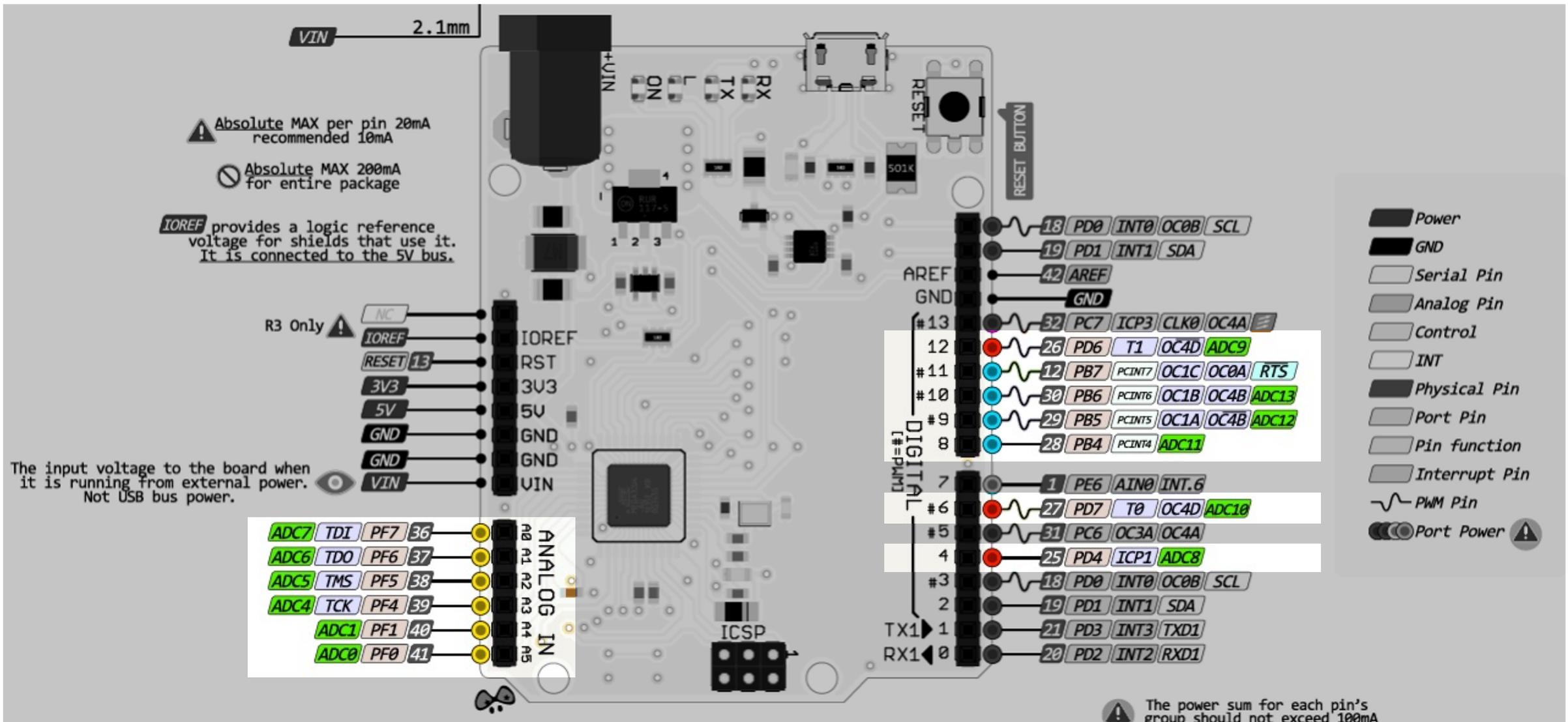
- Motivación: Las señales del entorno físico suelen ser analógicas como presión, temperatura, radiación, etc.
- Una señal analógica es continua, es decir, su valor toma un rango de valores reales a través del tiempo.
- Por ejemplo, un sensor de temperatura puede producir que produce una señal analógica (típicamente voltaje) que varía en función de la temperatura.
- Para ser procesadas por el computador, las señales analógicas deben convertirse a señales digitales:
 - Se realiza mediante Conversores Analógico-Digital (ADC por sus siglas en Inglés).
- Alternativamente, el computador puede generar señales analógicas:
 - Se realiza mediante Conversores Digital-Analógico (DAC por sus siglas en Inglés).
 - Por ejemplo: las señales de audio generadas por un altavoz.

Dispositivos analógicos



- ADCs y DACs pueden estar conectados:
 - ▶ En **Paralelo**; conectado a los buses del microcontrolador.
 - ▶ En **Serie**; a través de un puerto serie como I²C o SPI.
- El ATmega32U4 tiene un ADC paralelo con 12 canales:
 - ▶ ADC0, ADC1, ADC4 .. ADC13.

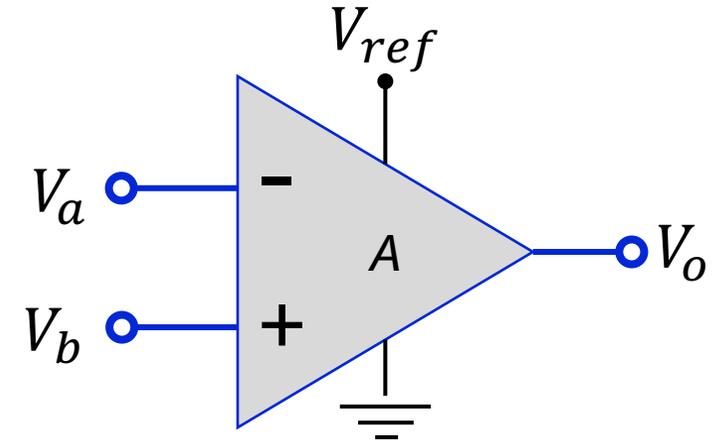
Dispositivos analógicos



Amplificador Operacional (Op Amp)

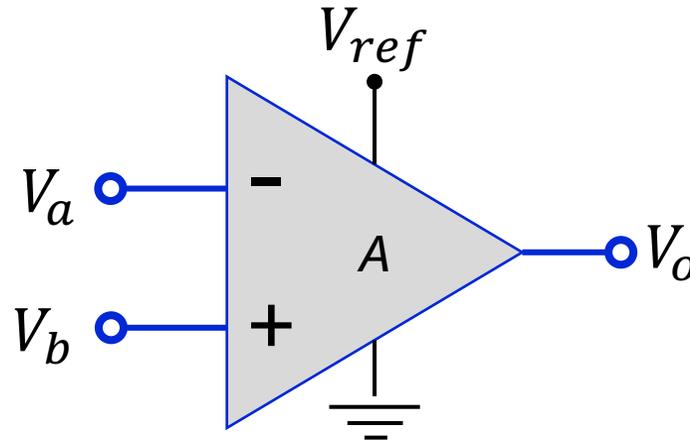
Amplificador Operacional (Op Amp)

- Un amplificador operacional es un circuito discreto construido a partir de transistores.
- Tiene dos entradas: V_a y V_b
- Tiene una salida: V_o
- Diversas configuraciones para diversos usos...

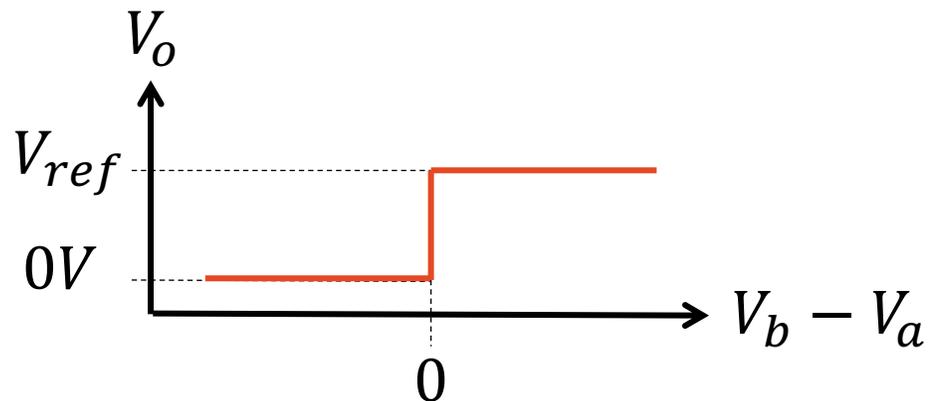


Uso I: Comparador

- En **lazo abierto**, el Op Amp realiza la función de comparador.



- Su función de transferencia es la siguiente:

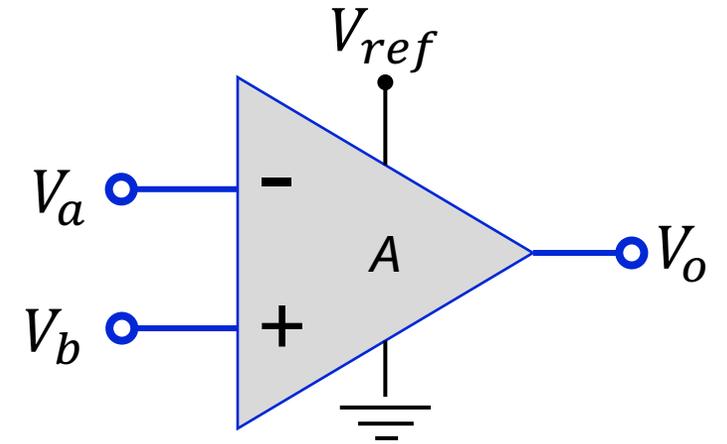


Es decir:

- cuando $V_b > V_a$: $V_o = V_{ref}$
- cuando $V_b < V_a$: $V_o = 0V$

Amplificador Operacional (Op Amp)

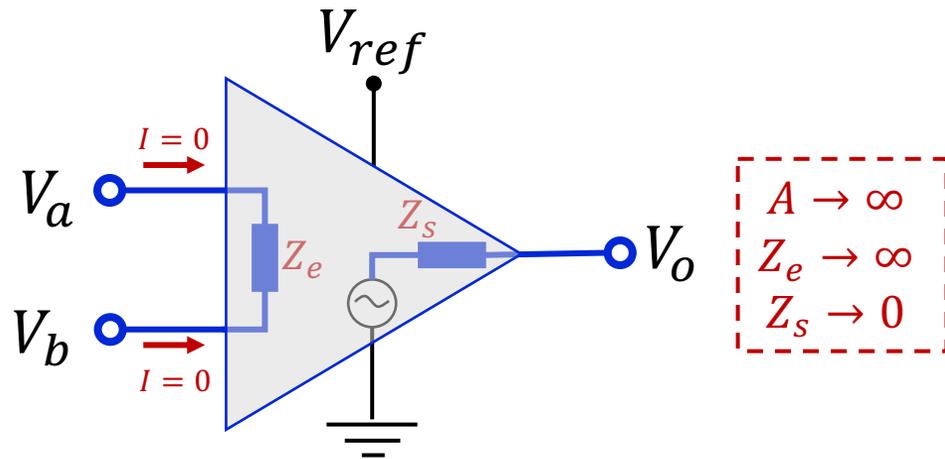
- Un amplificador operacional es un circuito discreto construido a partir de transistores.
- Tiene dos entradas: V_a y V_b
- Tiene una salida: V_o
- Tiene una ganancia A que es idealmente infinita.
- Tiene una impedancia de entrada (Z_e) que también es idealmente infinita:
 - Por lo tanto, no hay corriente de entrada.
- Diversas configuraciones para diversos usos...



$$V_o = A \times (V_b - V_a)$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$

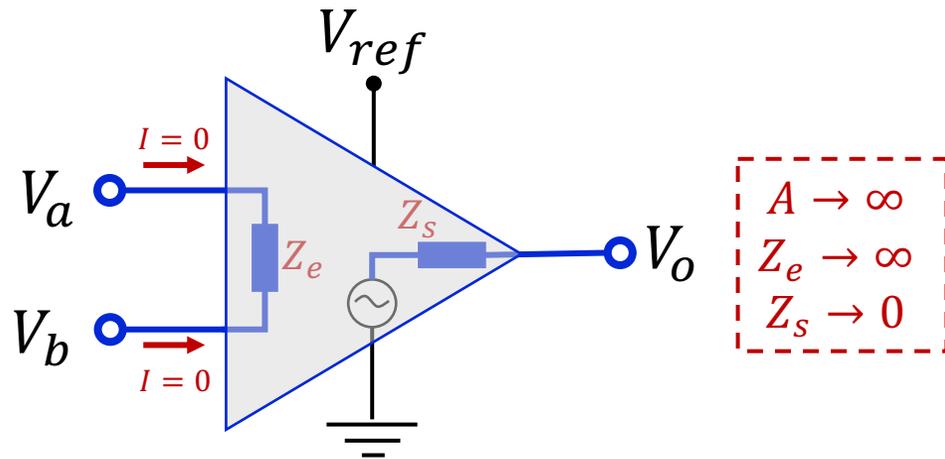


Regla 1; por la ley de OHM:

$$(V_b - V_a) = I \times Z_e$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$



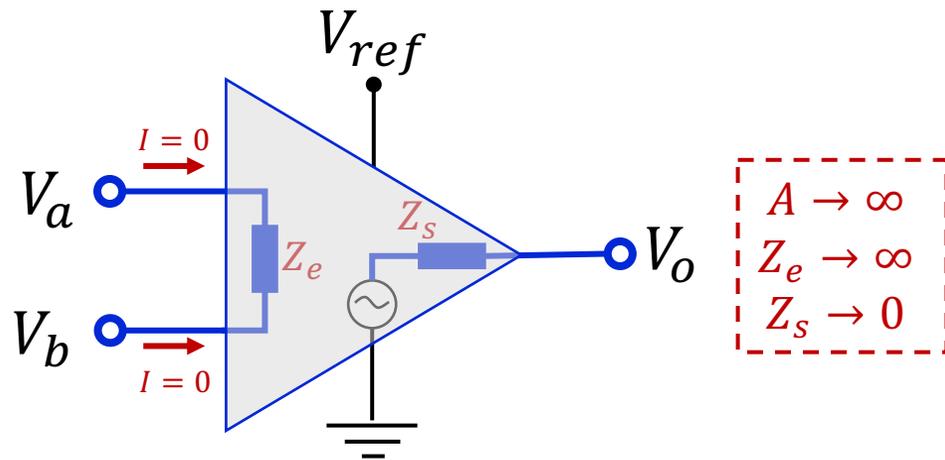
Regla 1; por la ley de OHM:

$$(V_b - V_a) = I \times Z_e$$

$$(V_b - V_a) = I \times \infty$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$



Regla 1; por la ley de OHM:

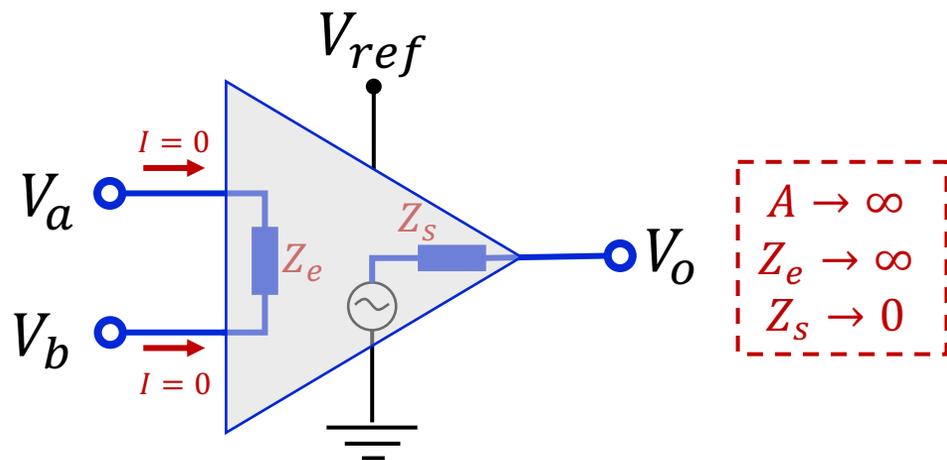
$$(V_b - V_a) = I \times Z_e$$

$$(V_b - V_a) = I \times \infty$$

$$I = \frac{(V_b - V_a)}{\infty}$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$



Regla 1; por la ley de OHM:

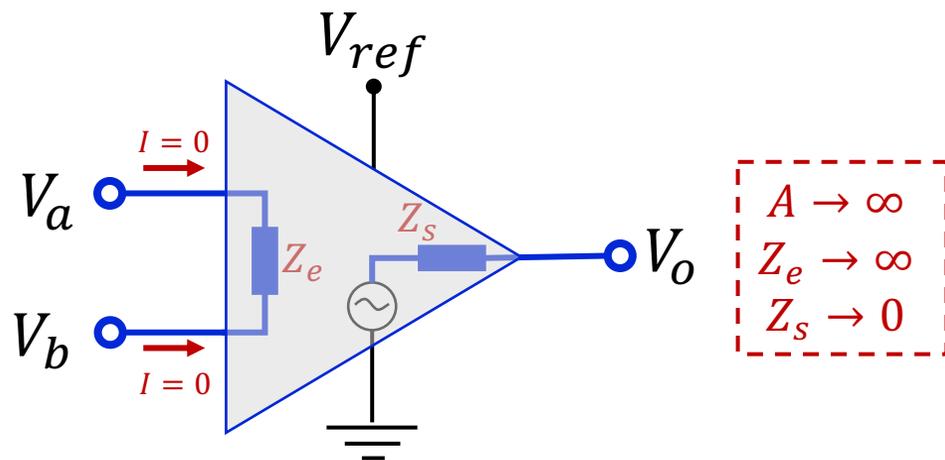
$$(V_b - V_a) = I \times Z_e$$

$$(V_b - V_a) = I \times \infty$$

$$I = \frac{(V_b - V_a)}{\infty} \Rightarrow I = 0$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$
- **Regla 2:** Efectos de una ganancia elevada (A) o "masa virtual":
 - El voltaje en la entrada inversora V_a y no inversora V_b es "la misma".
 - $V_a = V_b$

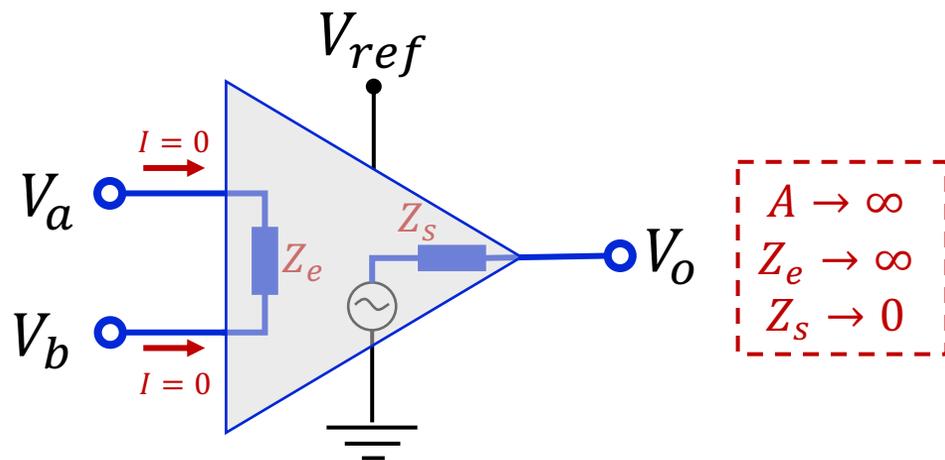


Regla 2; por la fórmula de la ganancia:

$$V_o = A \times (V_b - V_a)$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$
- **Regla 2:** Efectos de una ganancia elevada (A) o "masa virtual":
 - El voltaje en la entrada inversora V_a y no inversora V_b es "la misma".
 - $V_a = V_b$

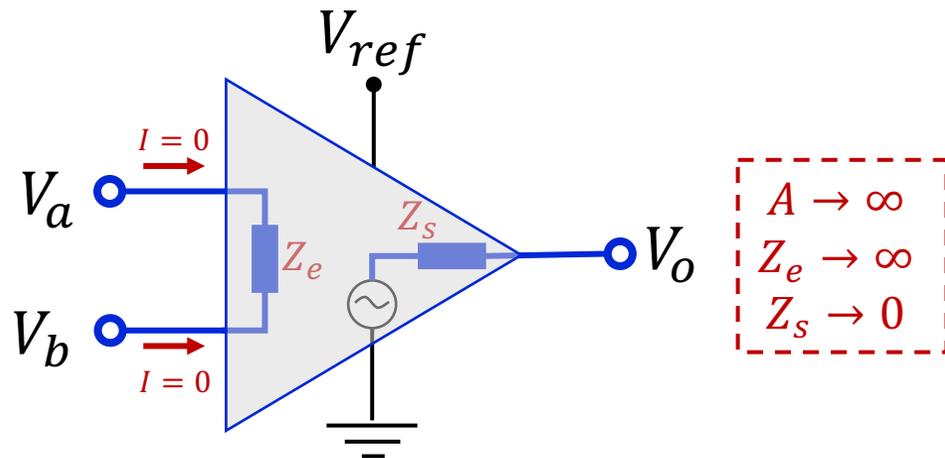


Regla 2; por la fórmula de la ganancia:

$$V_o = A \times (V_b - V_a)$$
$$(V_b - V_a) = \frac{V_o}{A} = \frac{V_o}{\infty}$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$
- **Regla 2:** Efectos de una ganancia elevada (A) o "masa virtual":
 - El voltaje en la entrada inversora V_a y no inversora V_b es "la misma".
 - $V_a = V_b$



Regla 2; por la fórmula de la ganancia:

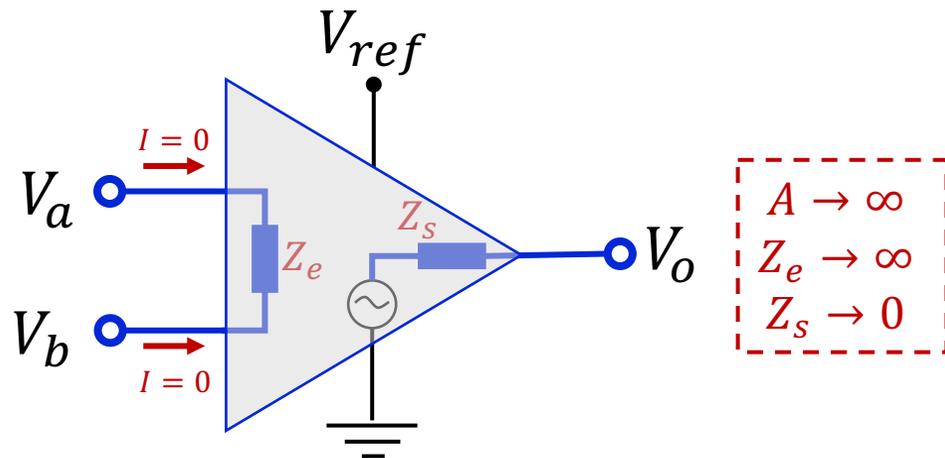
$$V_o = A \times (V_b - V_a)$$

$$(V_b - V_a) = \frac{V_o}{A} = \frac{V_o}{\infty}$$

$$(V_b - V_a) = 0$$

Amplificador Operacional (Op Amp)

- **Regla 1:** Efectos de una impedancia de entrada elevada (Z_e):
 - La intensidad I de entrada o salida en ambas entradas es (o tiende a) cero.
 - $I = 0$
- **Regla 2:** Efectos de una ganancia elevada (A) o "masa virtual":
 - El voltaje en la entrada inversora V_a y no inversora V_b es "la misma".
 - $V_a = V_b$



Regla 2; por la fórmula de la ganancia:

$$V_o = A \times (V_b - V_a)$$

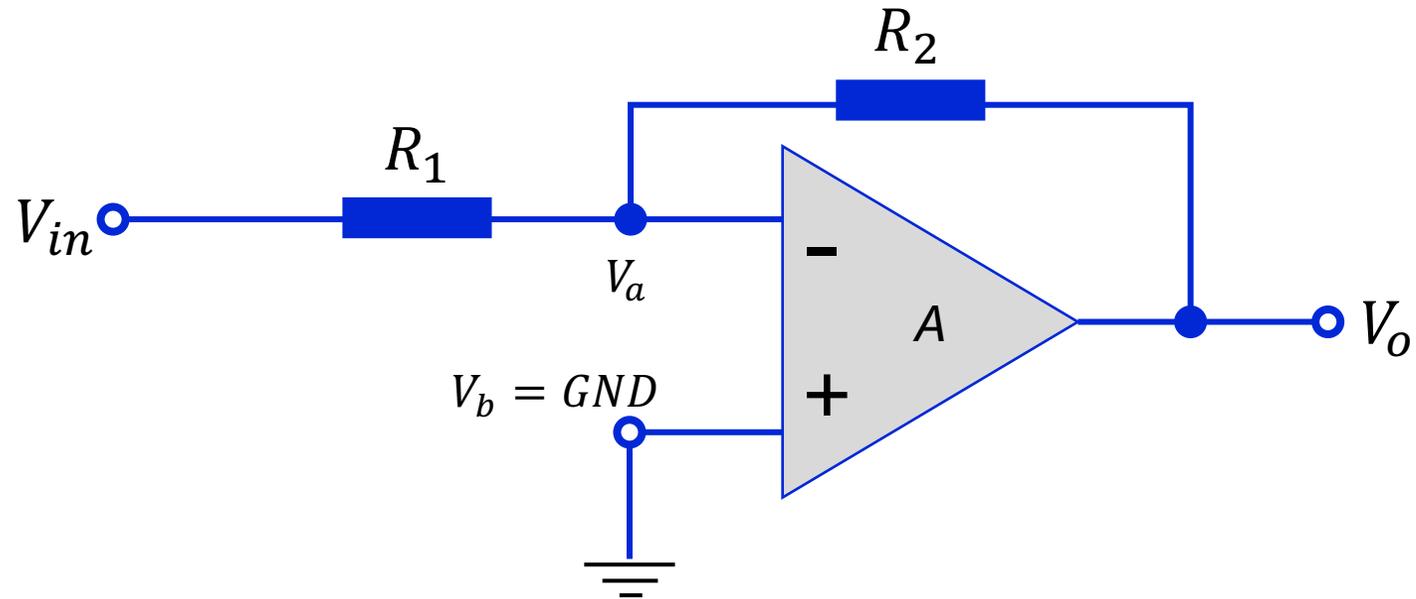
$$(V_b - V_a) = \frac{V_o}{A} = \frac{V_o}{\infty}$$

$$(V_b - V_a) = 0$$

$$V_a = V_b$$

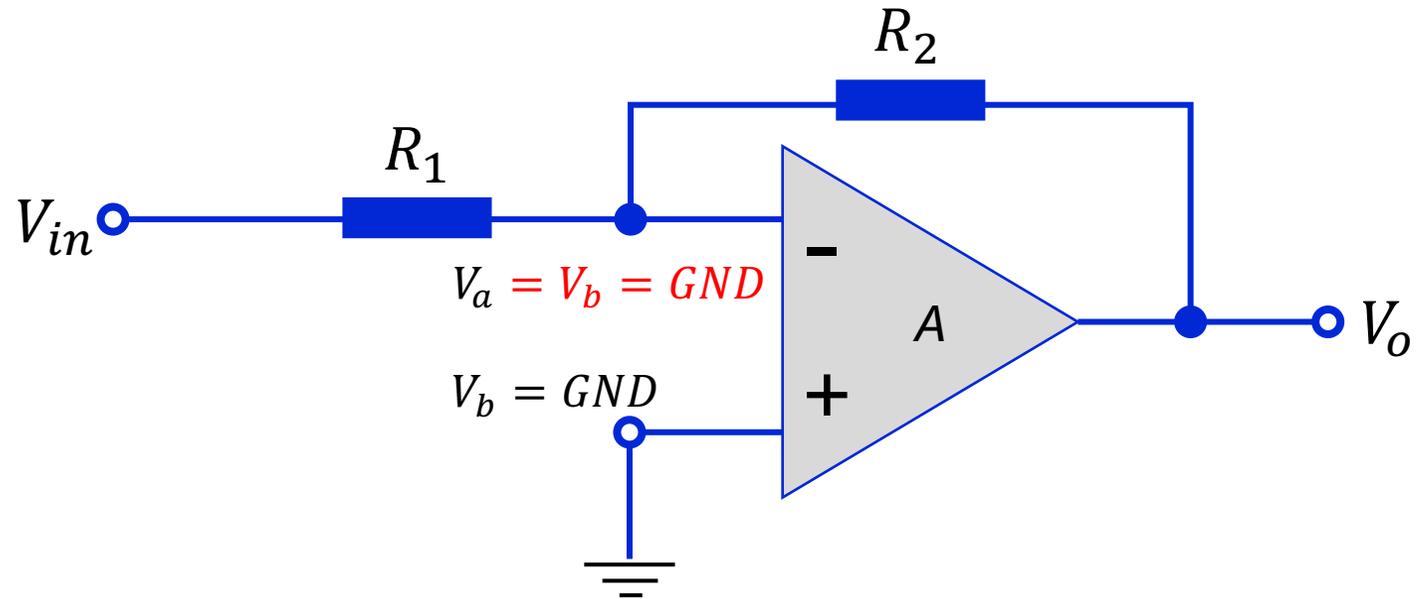
Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.



Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.

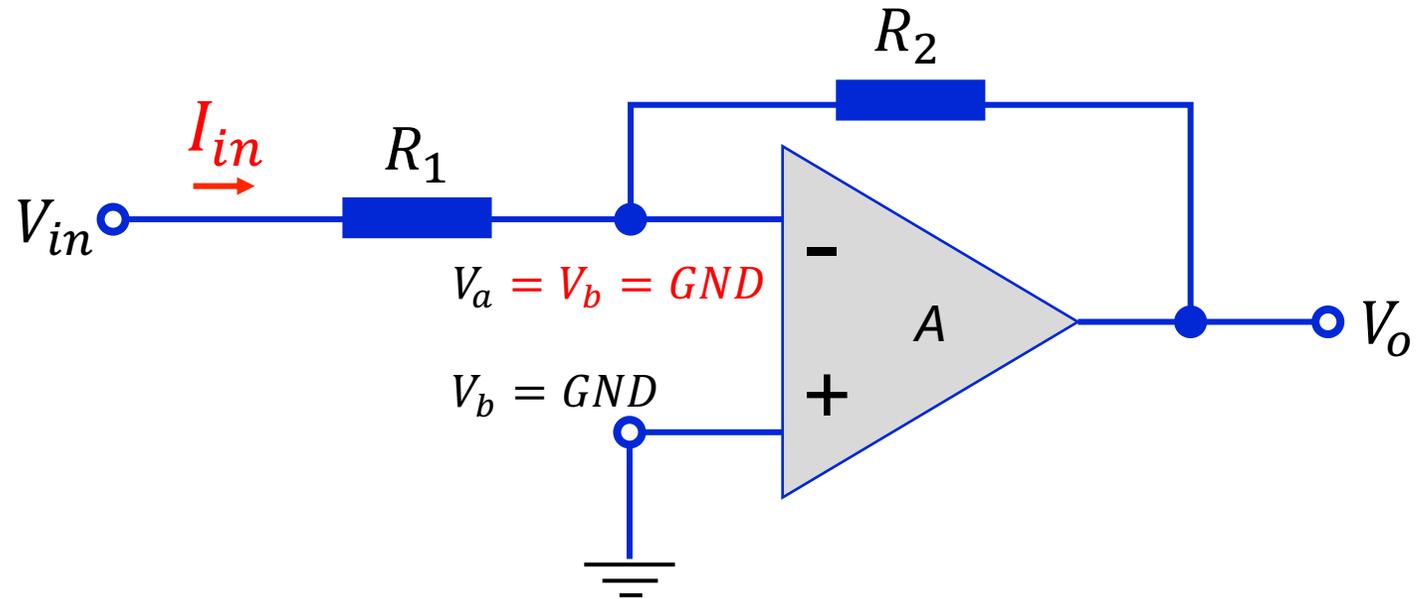


Por la Regla 2: masa virtual

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.

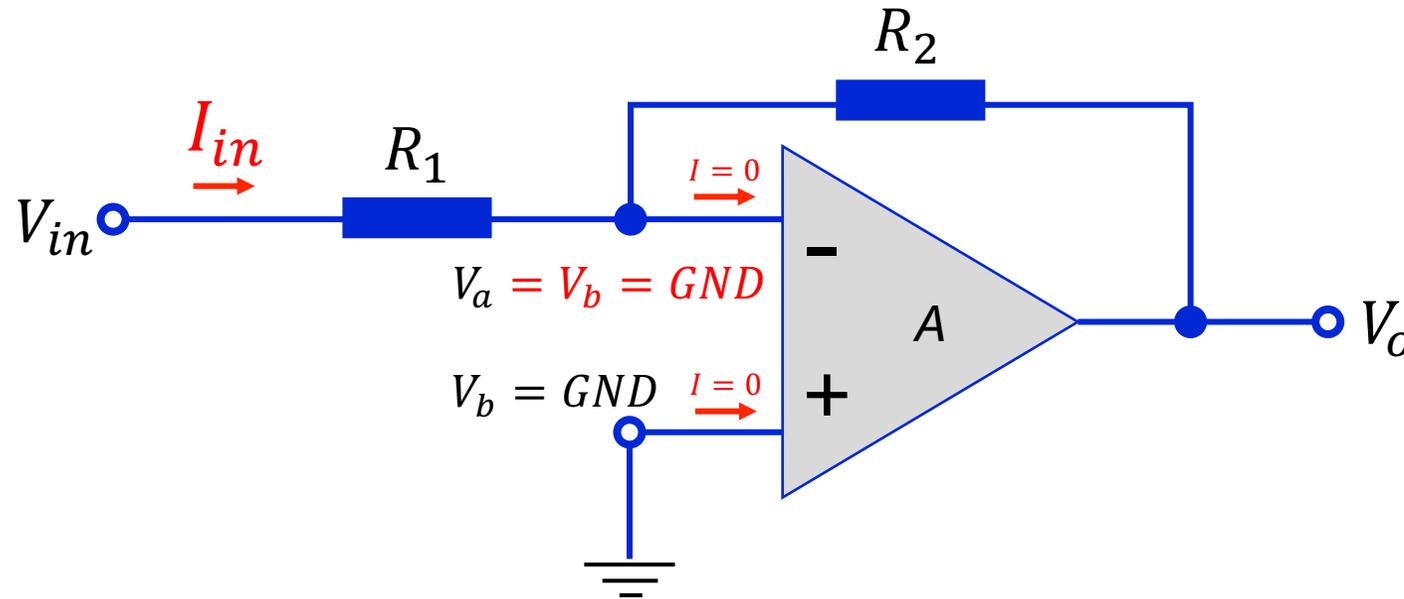


Por la Regla 2: masa virtual

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.



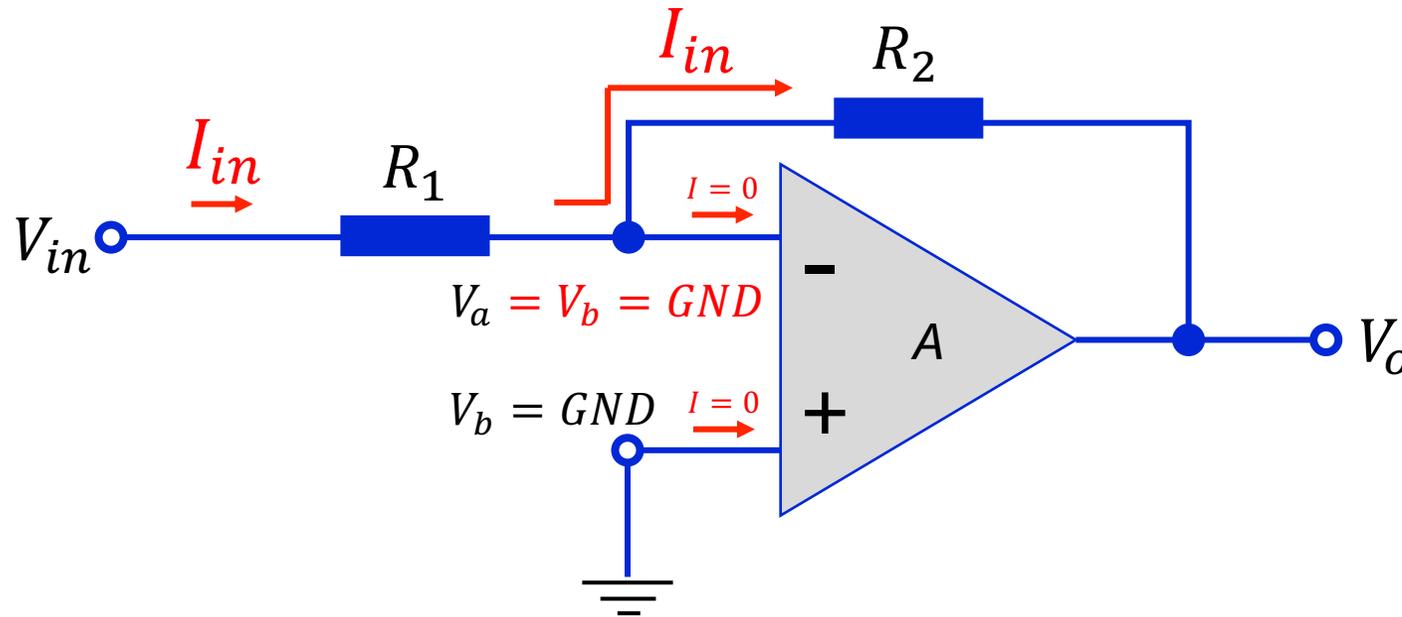
Por la Regla 2: masa virtual

Por la Regla 1: corriente de entrada es cero

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.



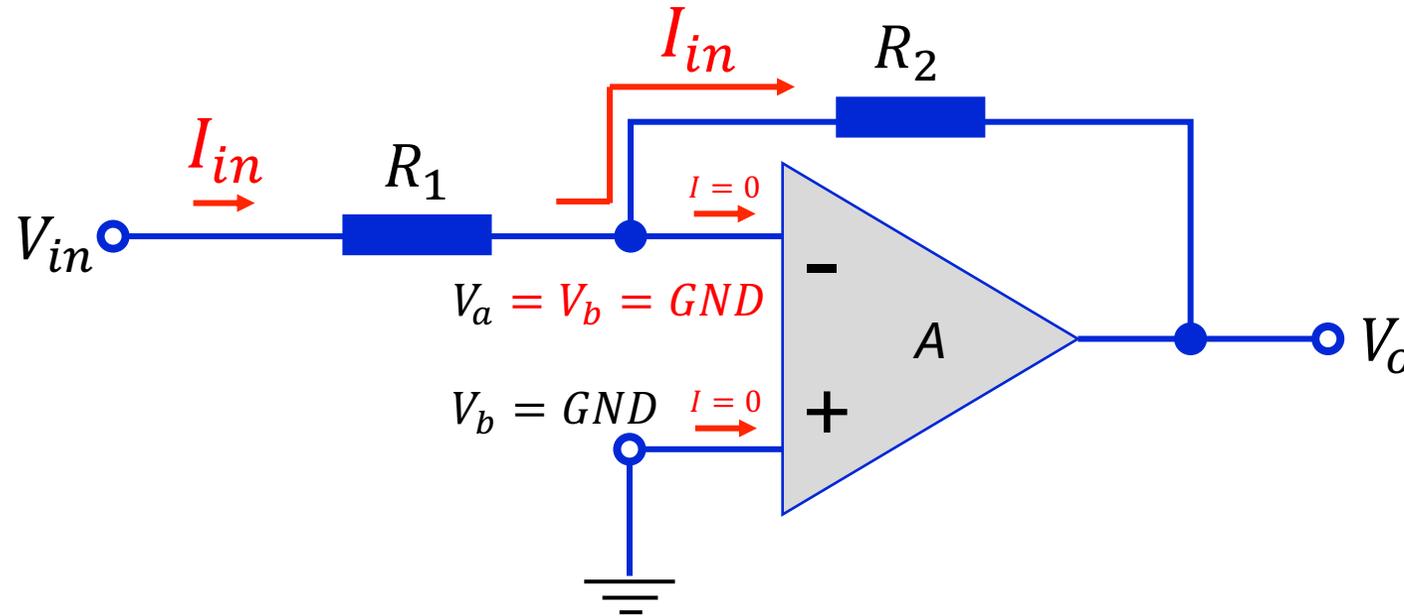
Por la Regla 2: masa virtual

Por la Regla 1: corriente de entrada es cero

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.



Por la Regla 2: masa virtual

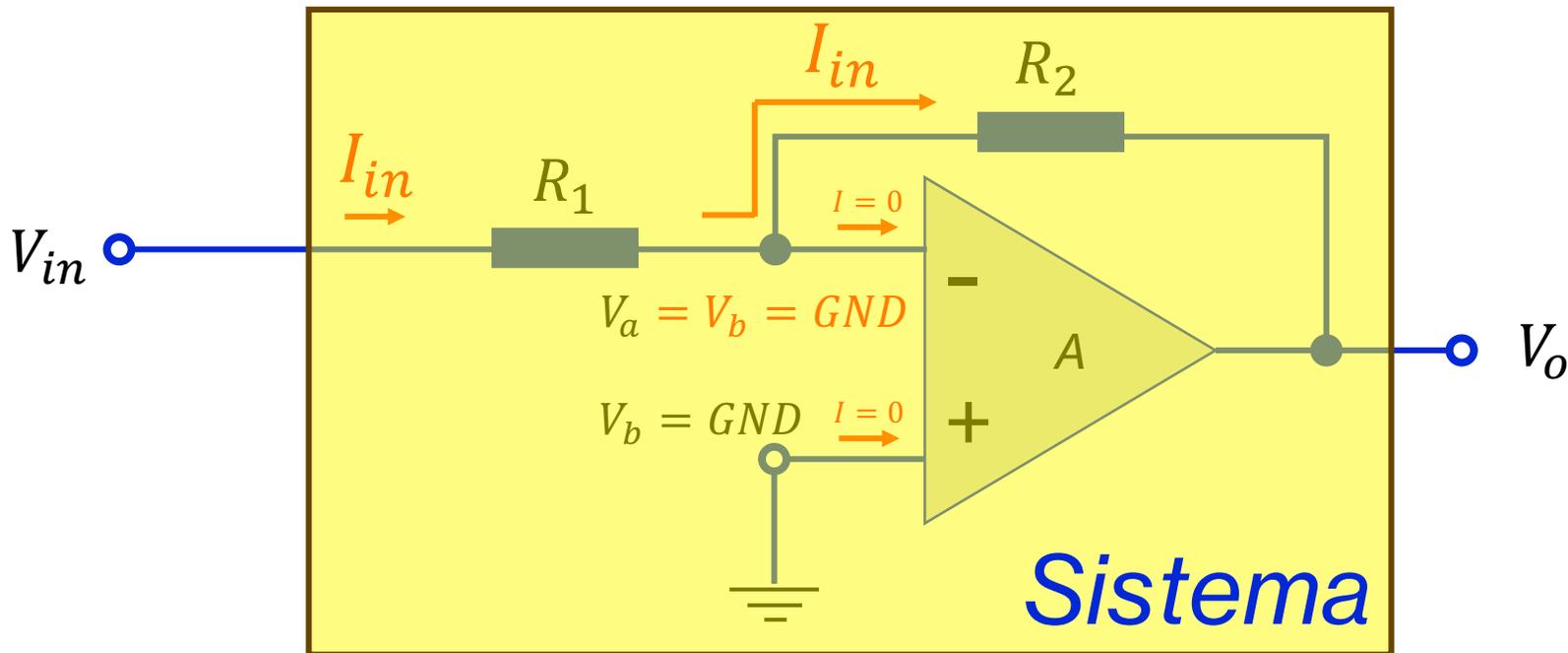
Por la Regla 1: corriente de entrada es cero

La ganancia G del sistema es el cociente de $-R_2$ y R_1 .

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \Rightarrow G = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Uso 2: Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada inversora.
- Vista como una caja negra.

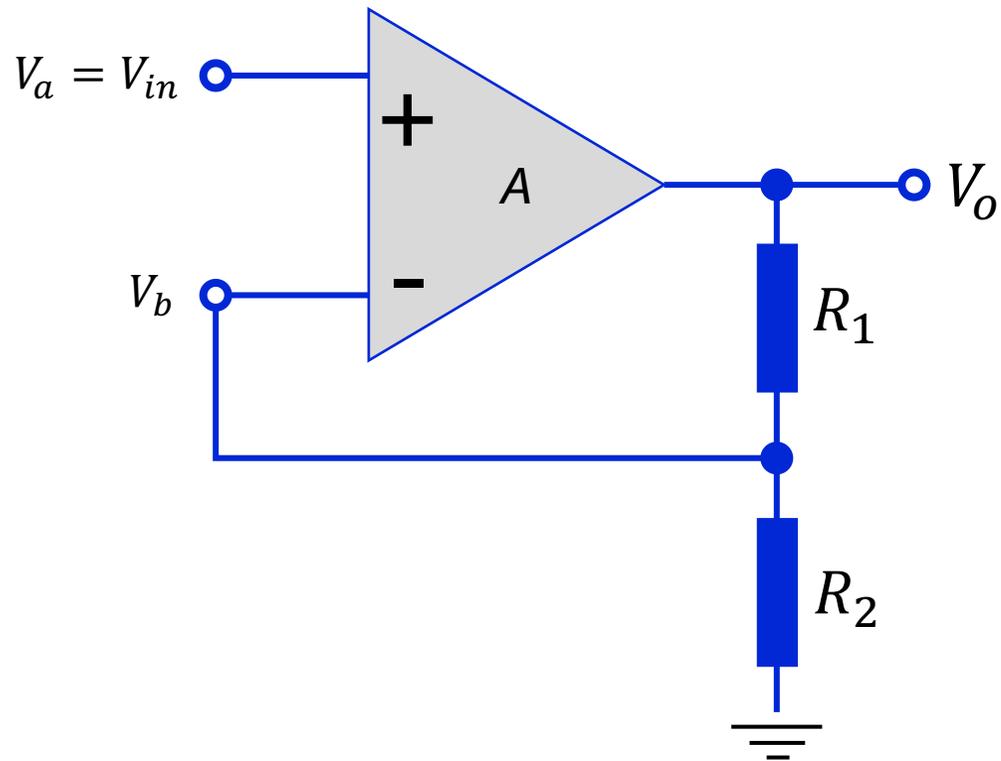


Problema:

- Impedancia de entrada R_1 es muy baja.
- Puede afectar al sistema conectado a través de V_{in}

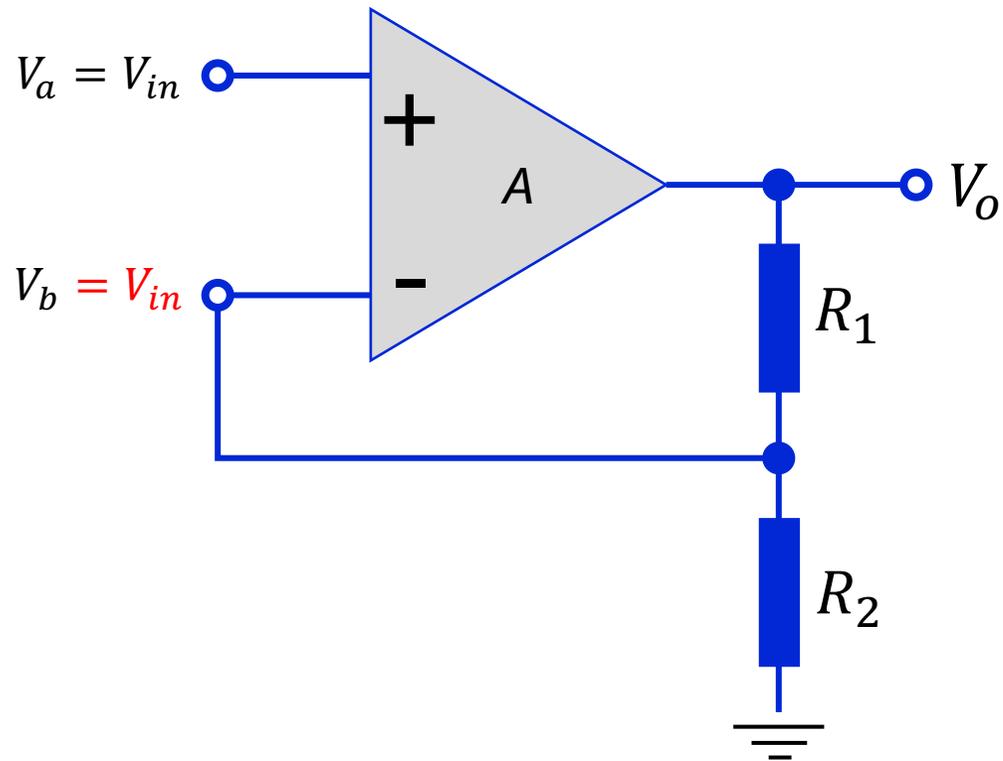
Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Uso 3: No Inversor

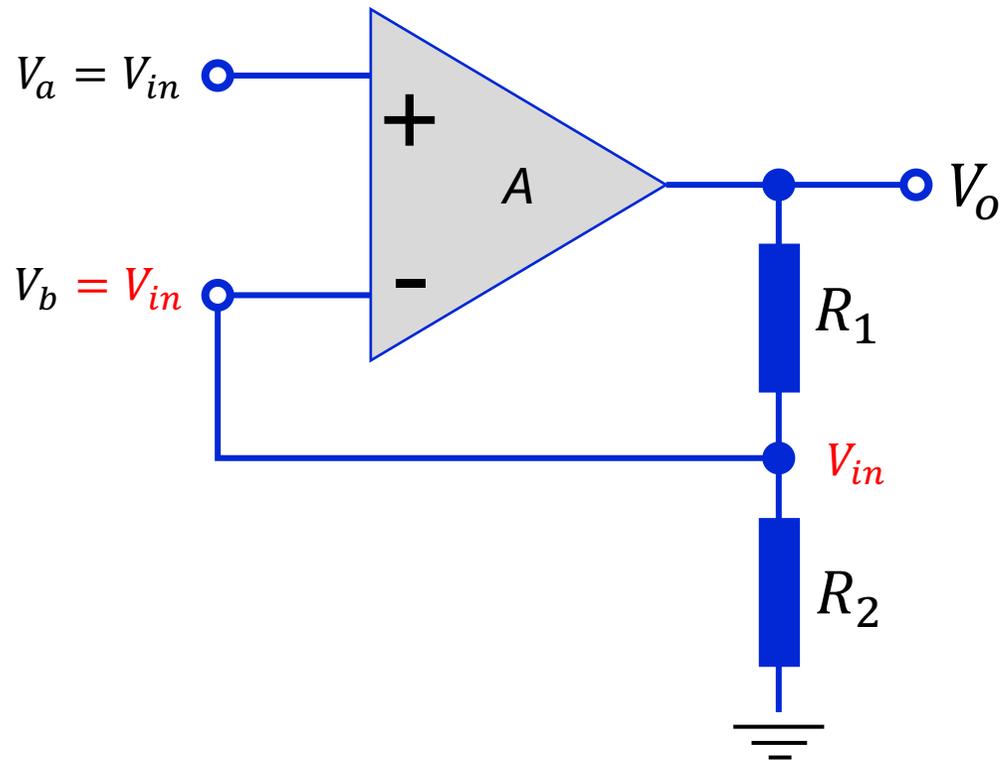
- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

Uso 3: No Inversor

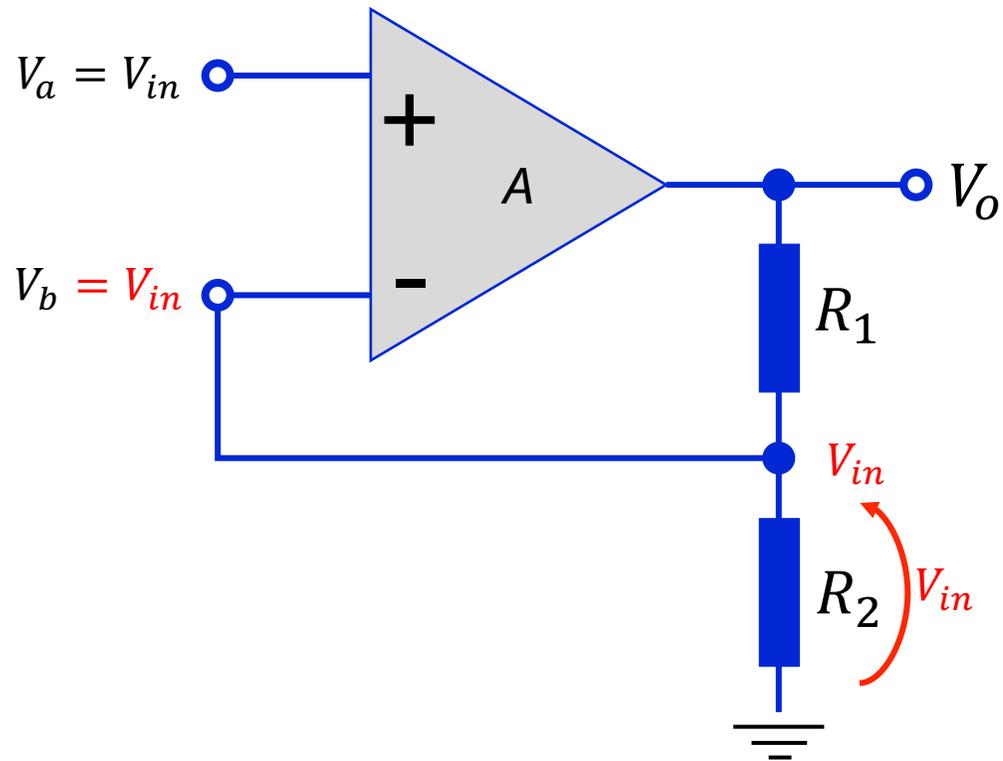
- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).

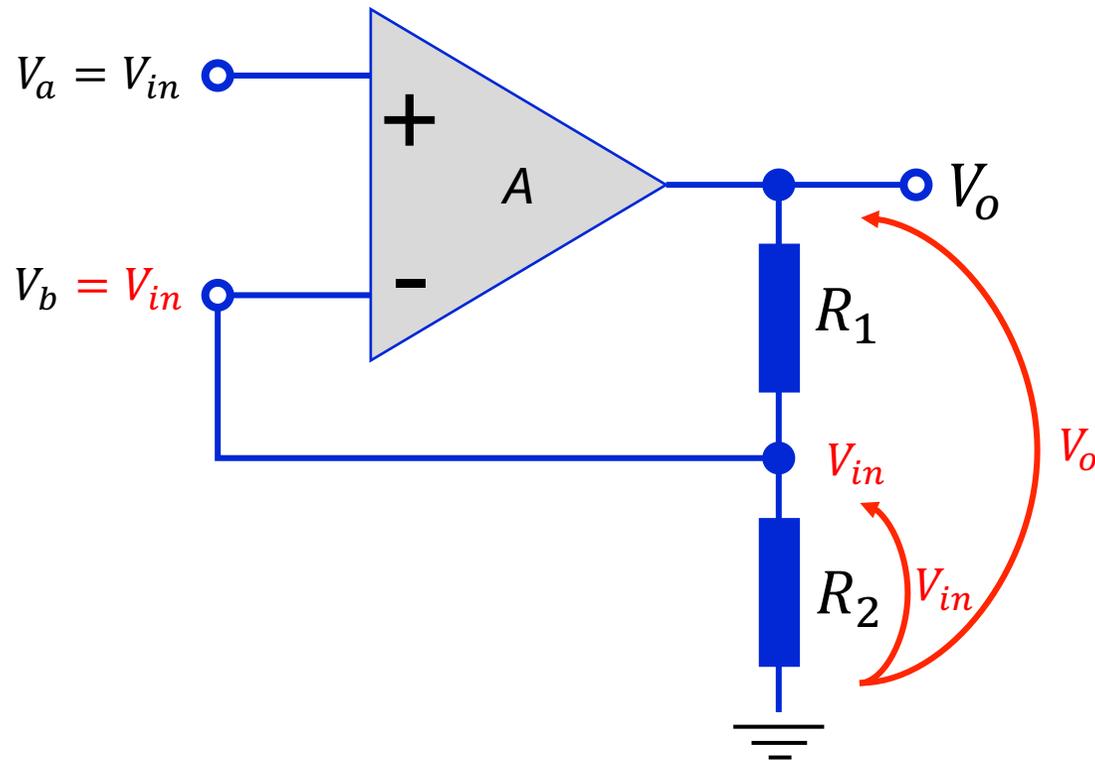


Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).

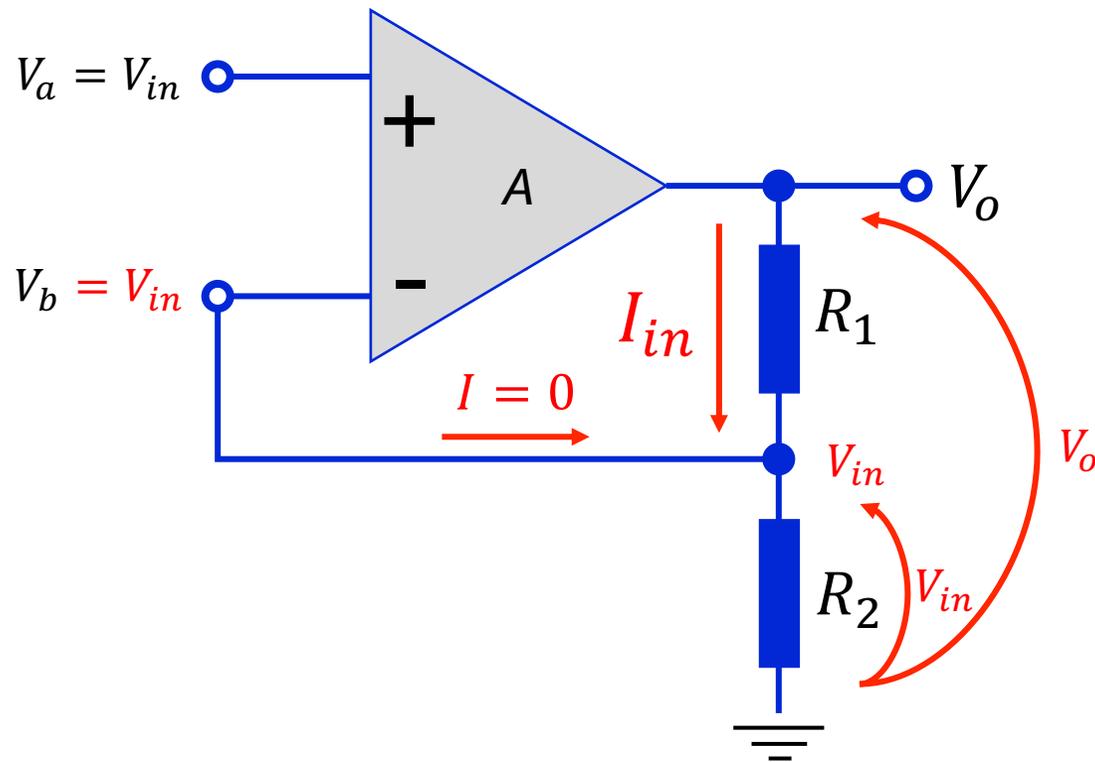


Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



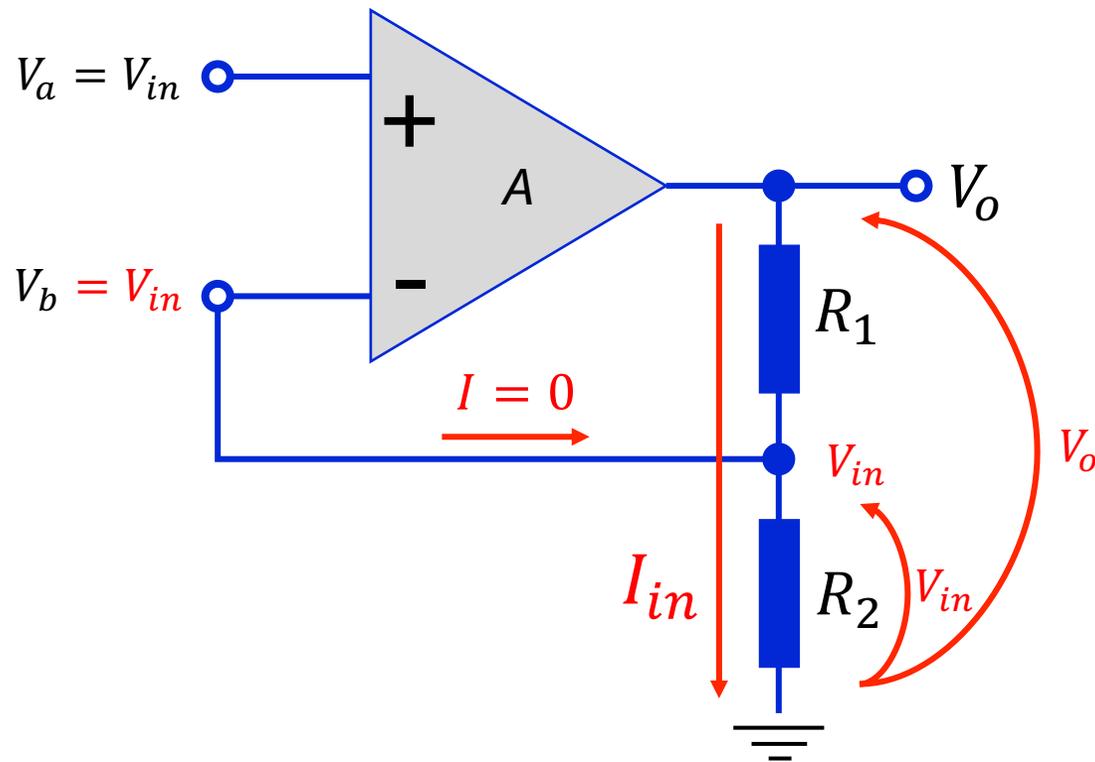
Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

Por la Regla 1: Corriente de salida es 0

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

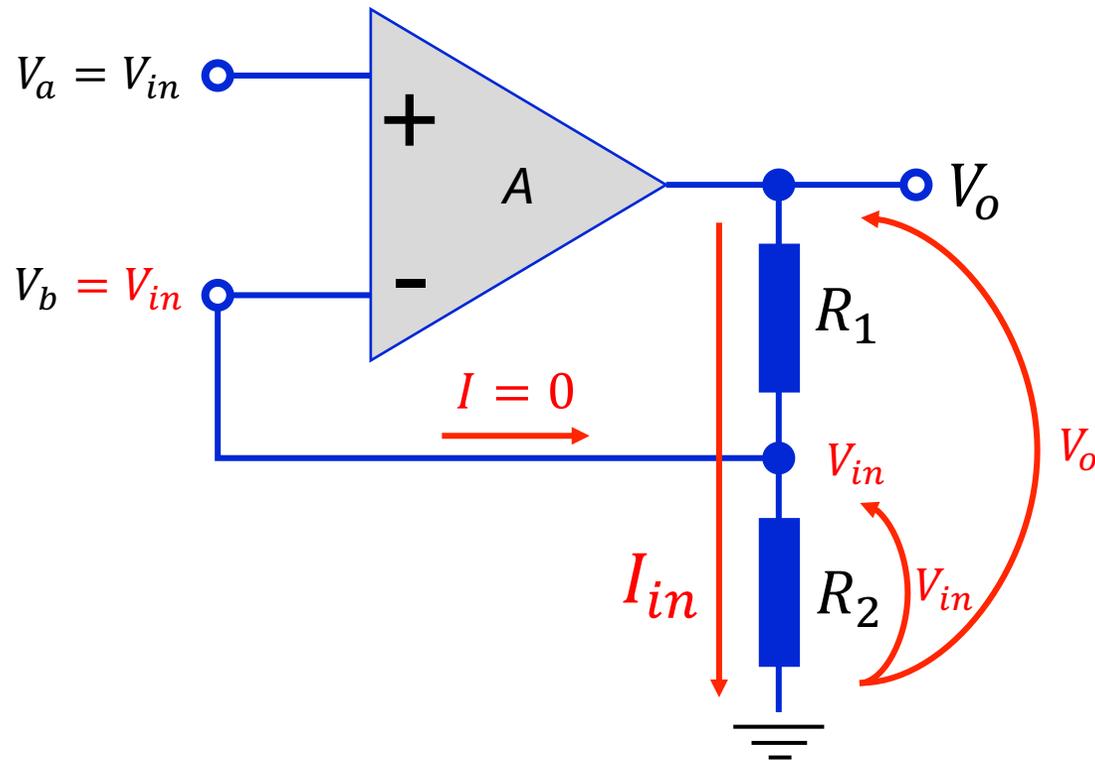
- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

Por la Regla 1: Corriente de salida es 0

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_2}$$

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

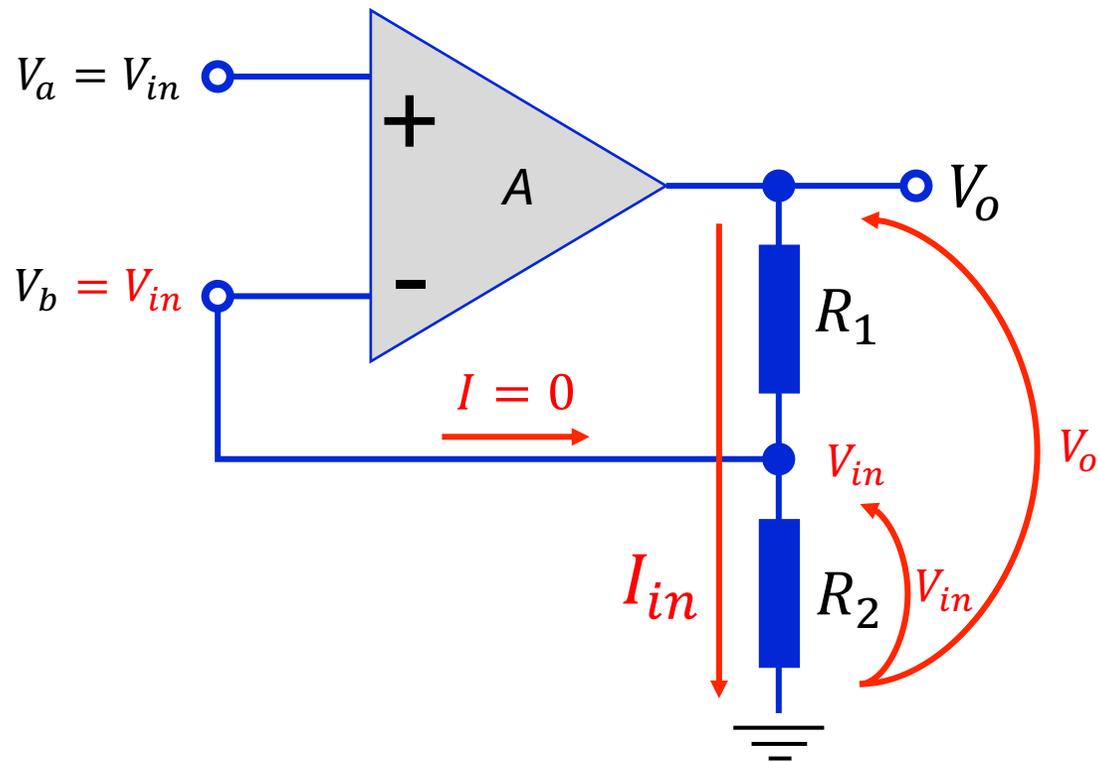
- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

Por la Regla 1: Corriente de salida es 0

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_2} = \frac{V_o}{R_1 + R_2}$$

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

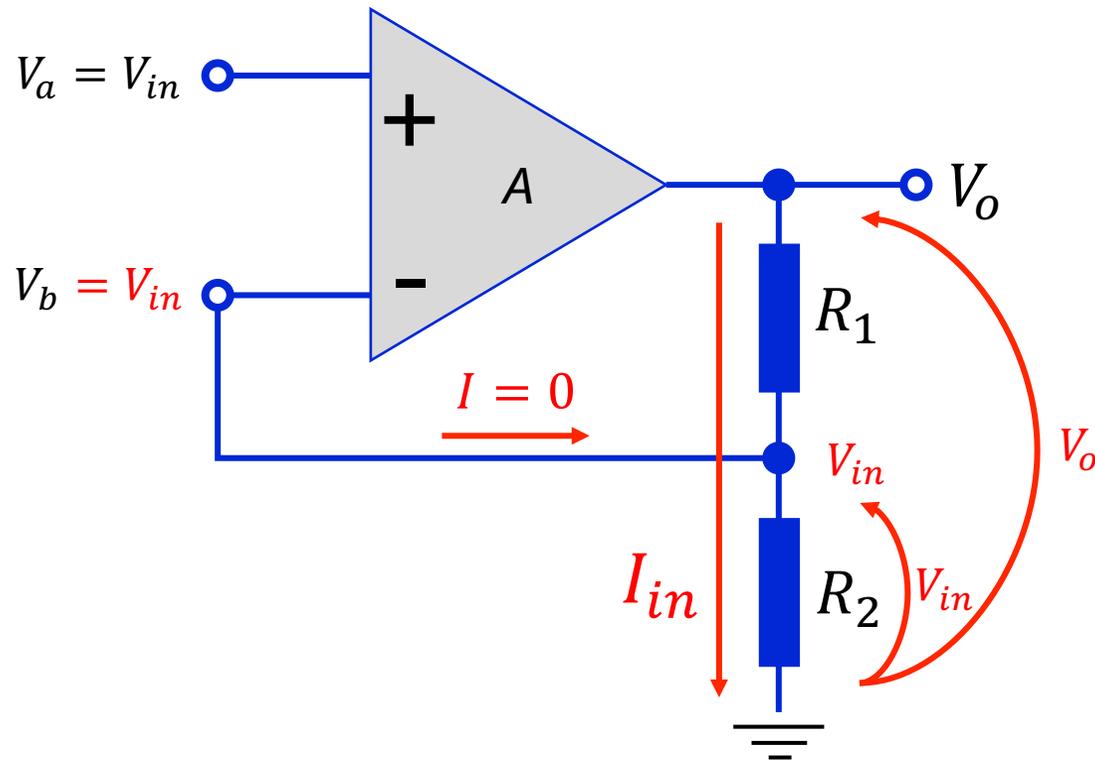
Por la Regla 1: Corriente de salida es 0

La ganancia G se calcula de la siguiente forma:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_2} = \frac{V_o}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).



Por la Regla 2: masa virtual ($V_a = V_b$)

- *La corriente que cae en R_2 es V_{in}*
- *La corriente que cae en R_1 y R_2 es V_o*

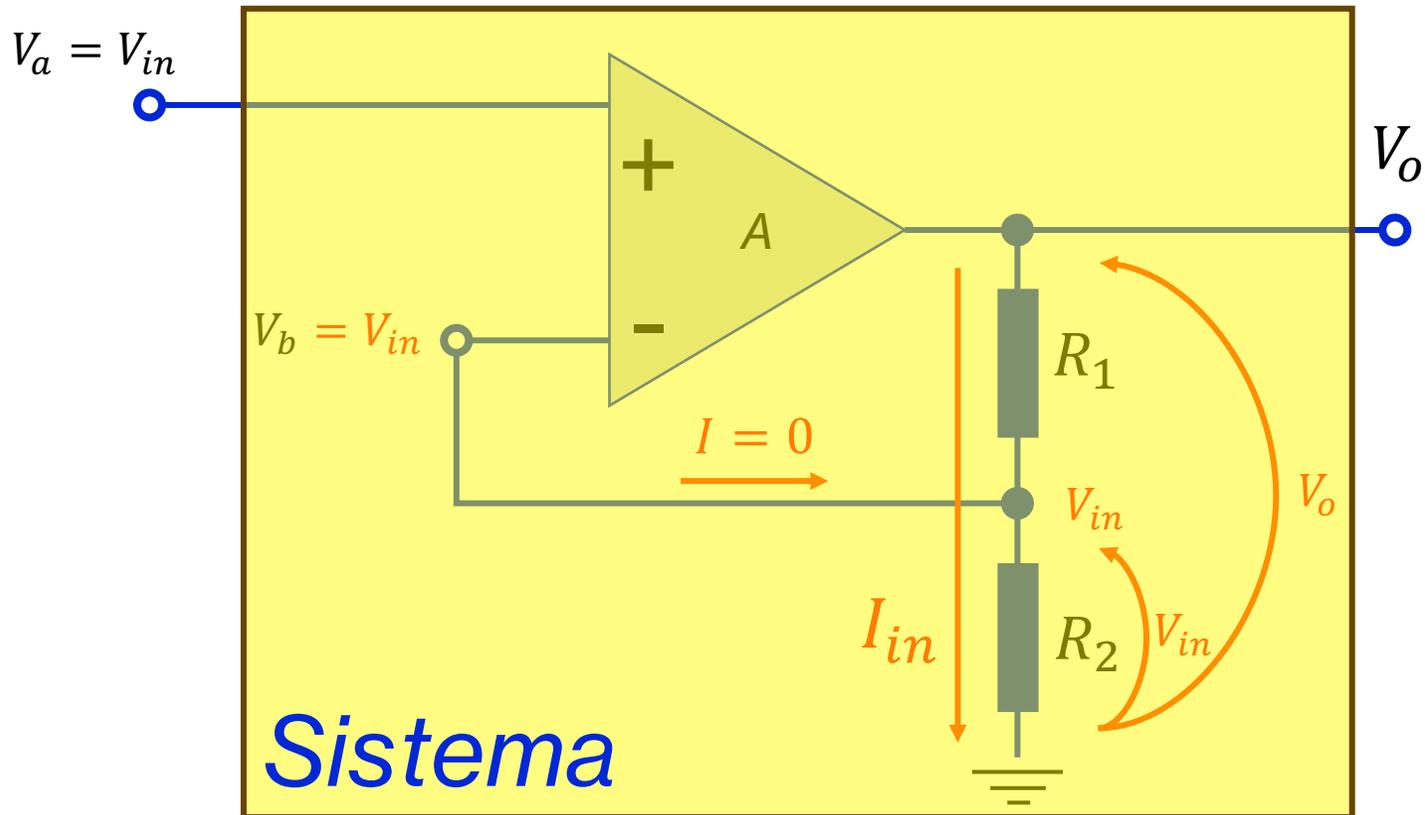
Por la Regla 1: Corriente de salida es 0

La ganancia G se calcula de la siguiente forma:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_2} = \frac{V_o}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$
$$\Rightarrow G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Uso 3: No Inversor

- Configuración en lazo cerrado por la entrada no inversora (+).
- Visto como una caja negra:

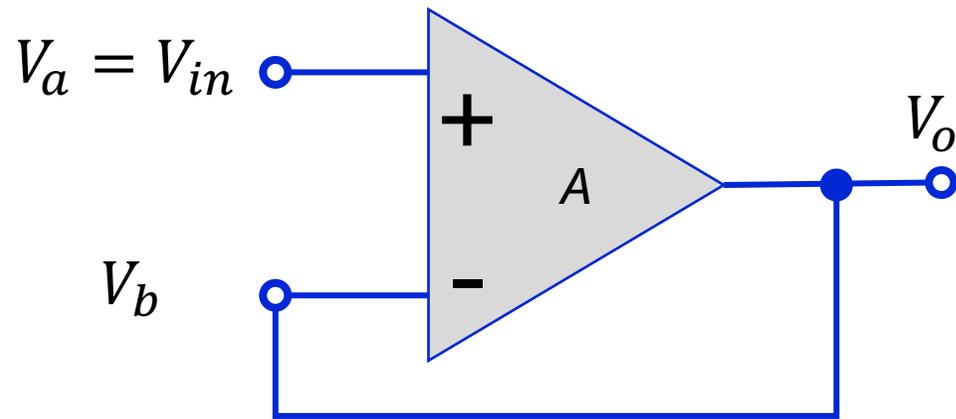


La impedancia de entrada del sistema es la del amplificador, tendiendo a infinito:

- *No afecta a la carga de entrada*

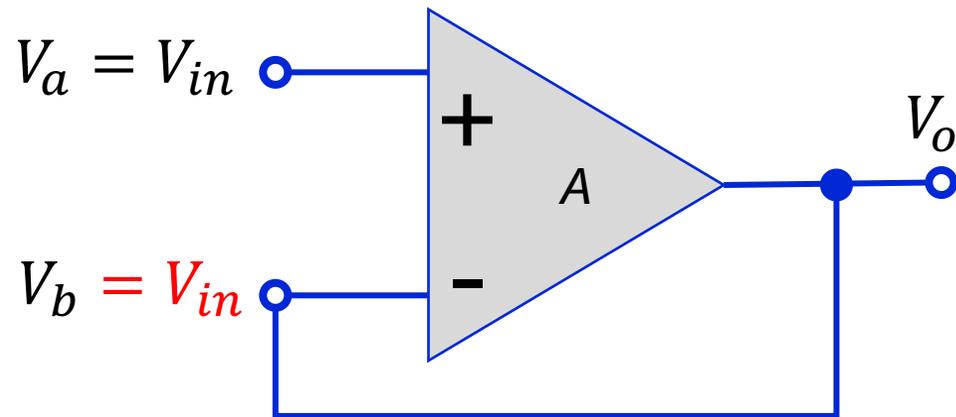
Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



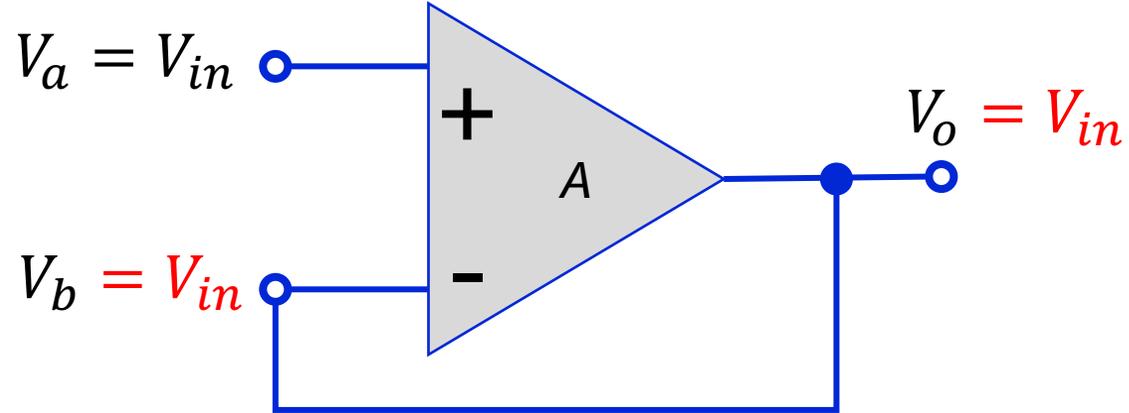
Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



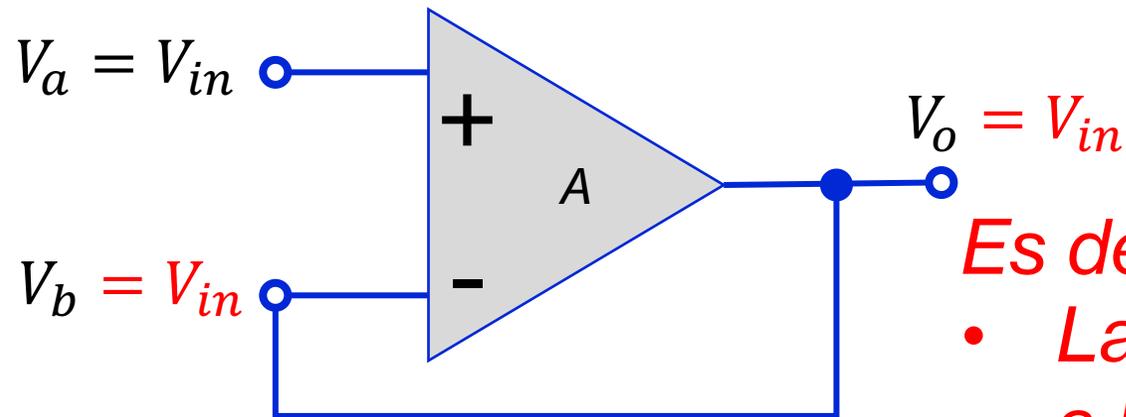
Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.

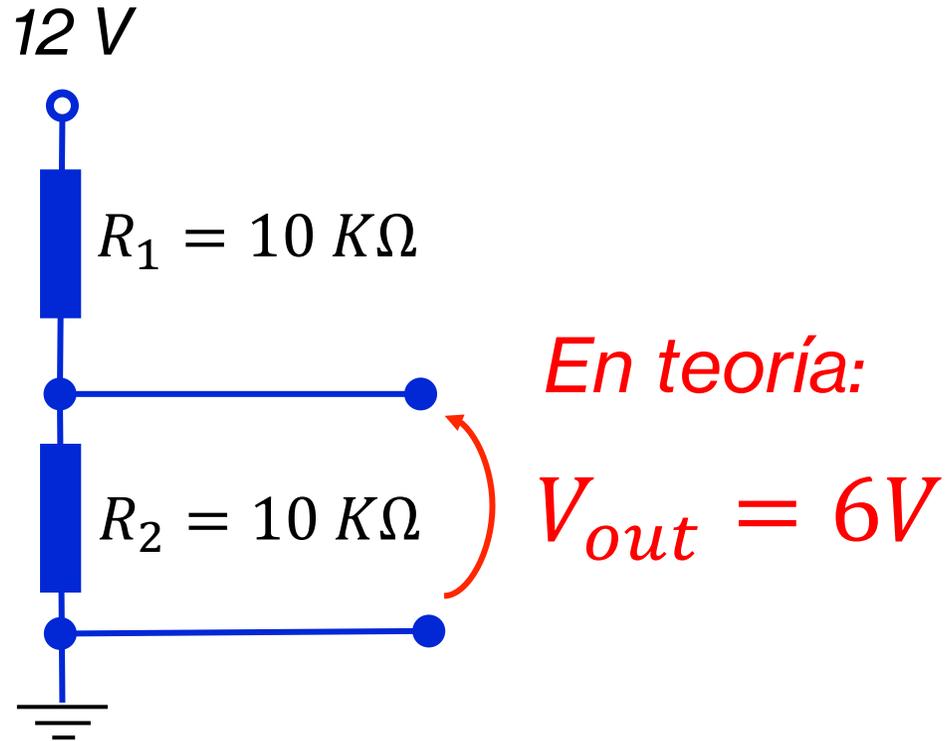


Es decir:

- *La tensión de salida V_o es igual a la tensión de entrada V_{in}*

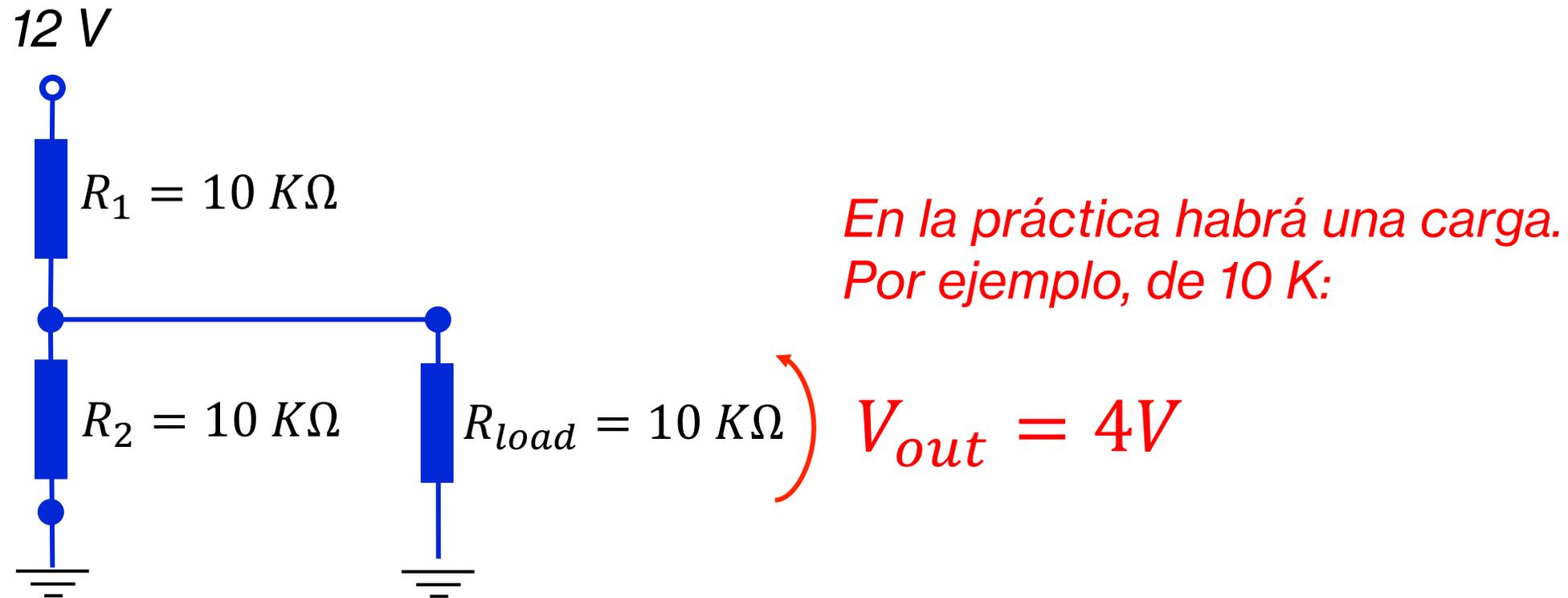
Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



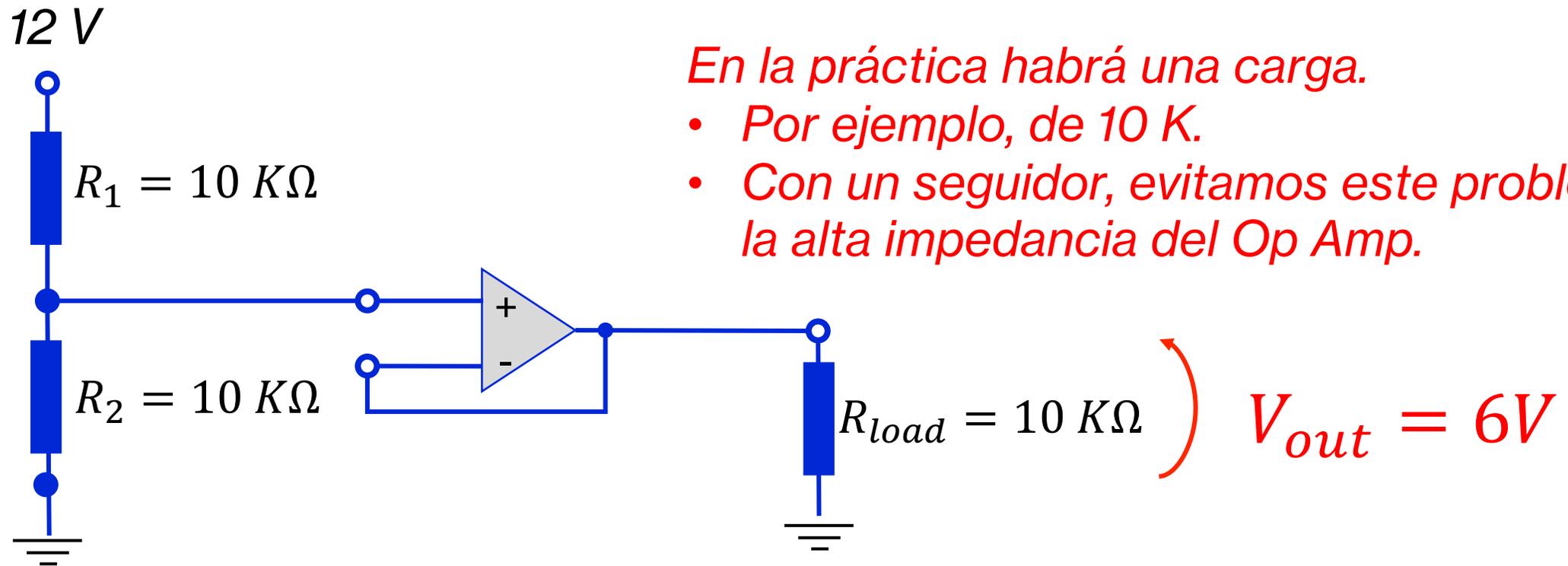
Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.

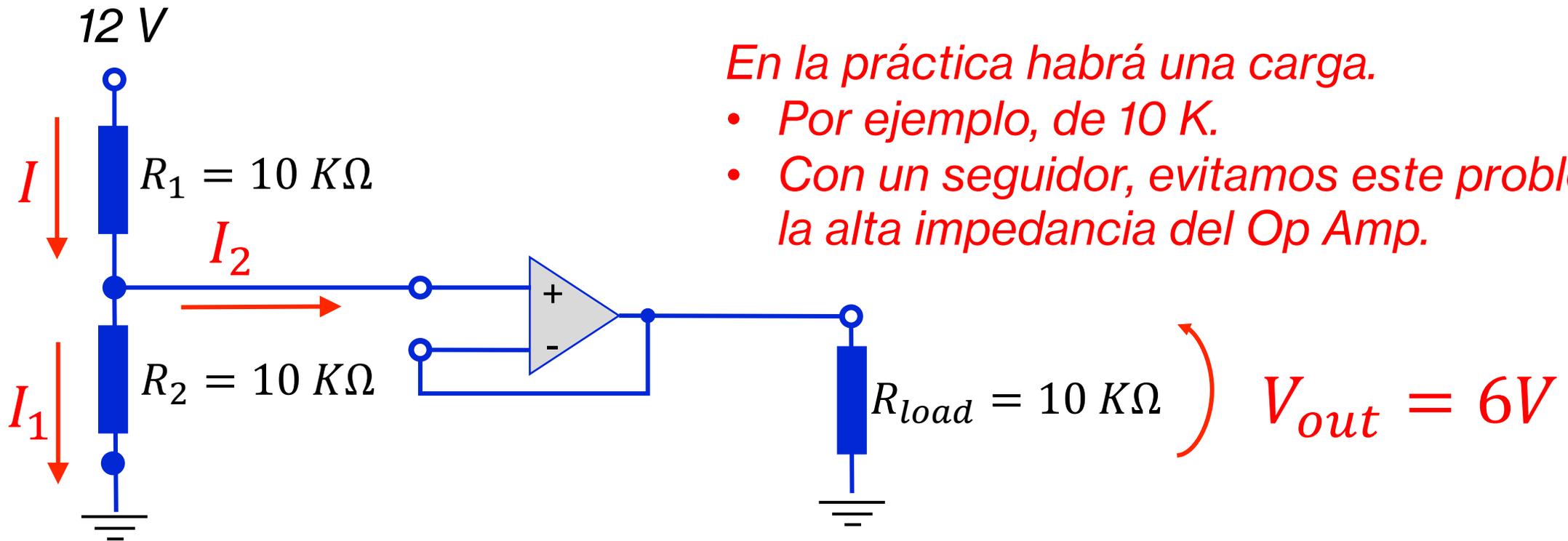


En la práctica habrá una carga.

- *Por ejemplo, de 10 K.*
- *Con un seguidor, evitamos este problema por la alta impedancia del Op Amp.*

Uso 4: Seguidor

- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.

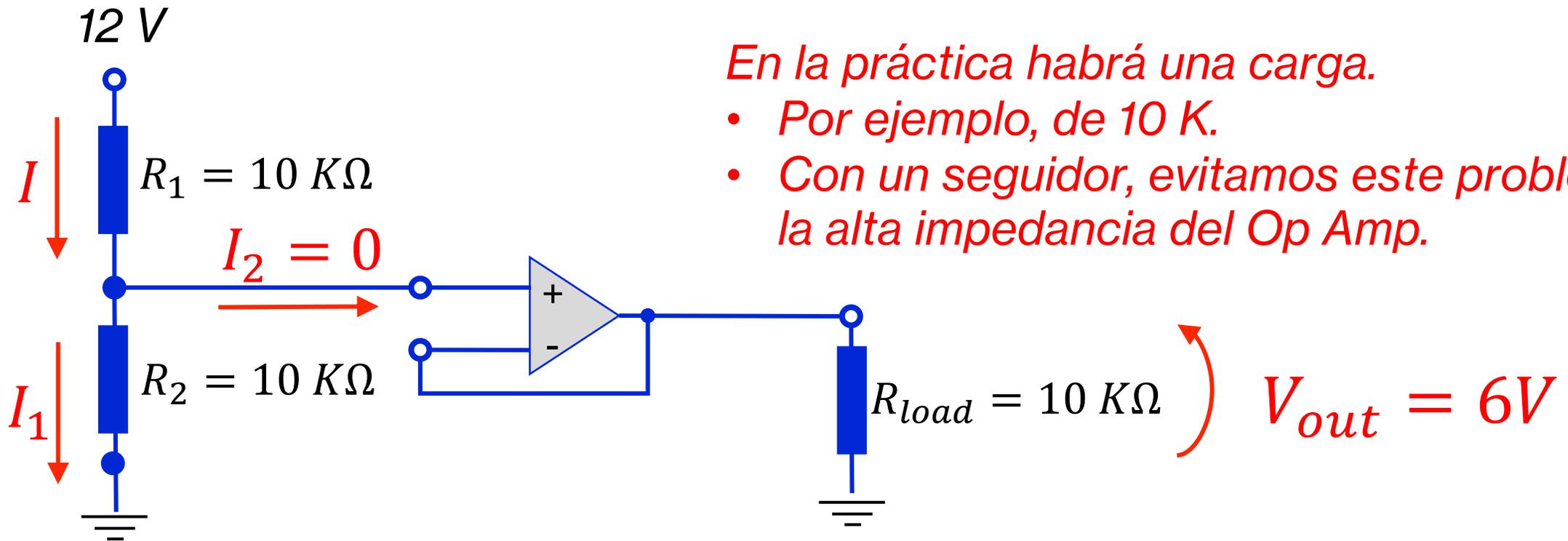


En la práctica habrá una carga.

- *Por ejemplo, de 10 K.*
- *Con un seguidor, evitamos este problema por la alta impedancia del Op Amp.*

Uso 4: Seguidor

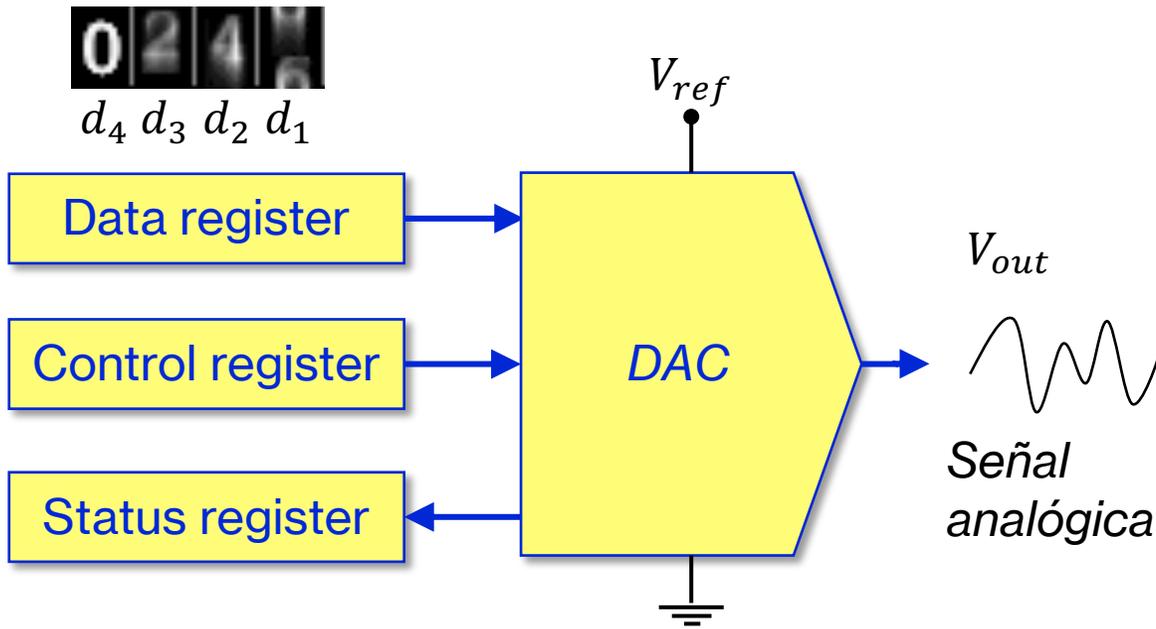
- Configuración en lazo cerrado.
- Sirve como adaptador de impedancias, buffer o seguidor de tensión.



En la práctica habrá una carga.

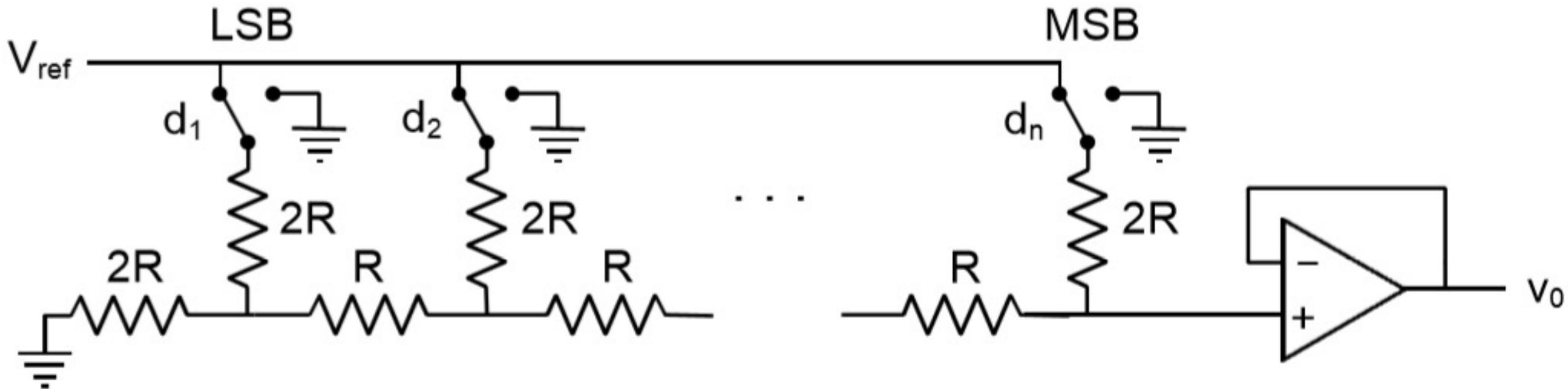
- *Por ejemplo, de 10 K.*
- *Con un seguidor, evitamos este problema por la alta impedancia del Op Amp.*

Convertor Digital Analógico (DAC)



d_4	d_3	d_2	d_1	V_{out}
0	0	0	0	0
0	0	0	1	$1 \times \frac{V_{ref}}{16}$
0	0	1	0	$2 \times \frac{V_{ref}}{16}$
0	0	1	1	$3 \times \frac{V_{ref}}{16}$
...
1	1	1	0	$14 \times \frac{V_{ref}}{16}$
1	1	1	1	$15 \times \frac{V_{ref}}{16}$

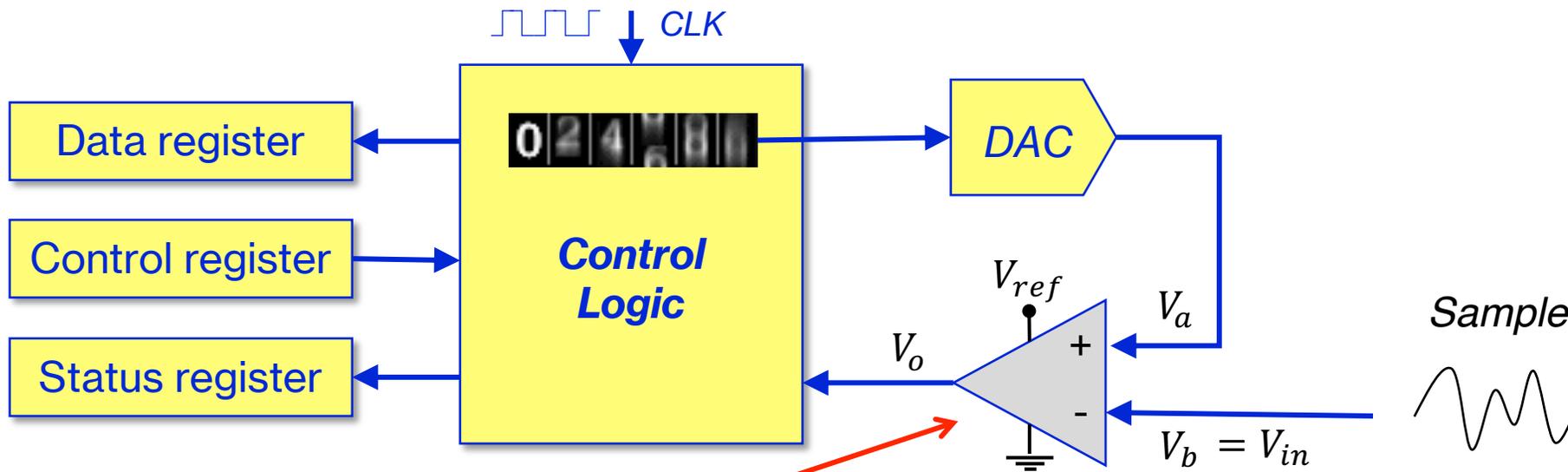
Conversor Digital Analógico (DAC)



- Se puede demostrar por el circuito equivalente de Thevenin que:

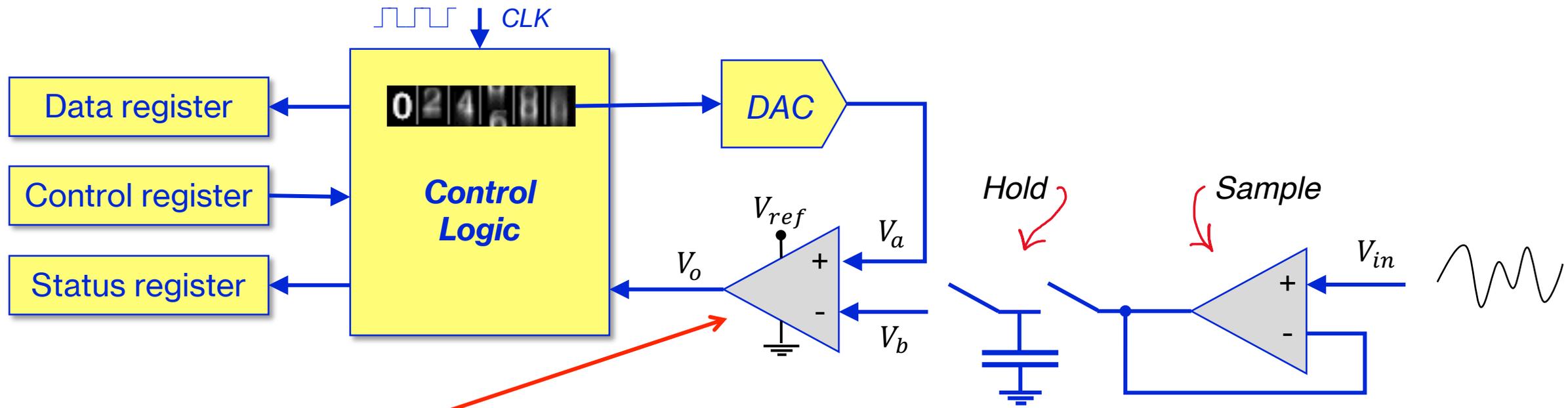
$$V_o = V_{ref} \cdot \left(\frac{d_n}{2} + \frac{d_{n-1}}{2^2} + \frac{d_{n-2}}{2^3} + \dots + \frac{d_1}{2^n} \right)$$

ADC por Aproximaciones Sucesivas



- El amplificador operacional está en circuito abierto:
 - funciona como un comparador: Si $V_b > V_a$, entonces $V_o = V_{ref}$
- PROBLEMA: La muestra (*sample*) varía constantemente:
 - debo “reterner” (*hold*) la muestra de alguna manera...

ADC por Aproximaciones Sucesivas



- El amplificador operacional está en circuito abierto:
 - funciona como un comparador: Si $V_b > V_a$, entonces $V_o = V_{ref}$
- La muestra (**sample**) se retiene (**hold**) en el condensador y su valor se compara sucesivamente con diversos valores del DAC hasta encontrar la mejor **aproximación**.

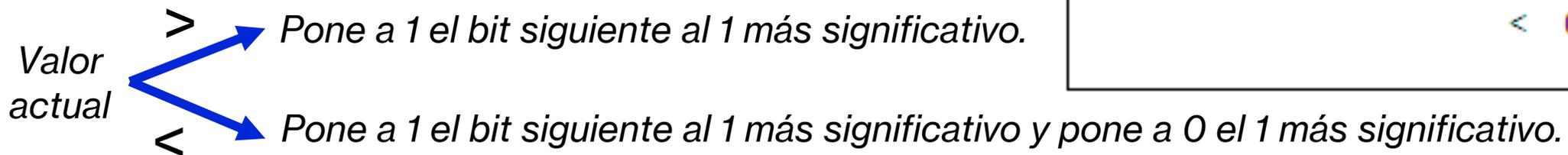
ADC por Aproximaciones Sucesivas

SAR de 2 bits			
	>	11	> 11
10		<	10
	<	01	> 01
		<	00

SAR de 3 bits			
		>	111 > 111
	>	110	< 110
		<	101 > 101
100		<	100
		>	011 > 011
	<	010	< 010
		<	001 > 001
		<	000

SAR de 4 bits			
		>	1111 > 1111
	>	1110	< 1110
		<	1101 > 1101
	>	1100	< 1100
		>	1011 > 1011
	<	1010	< 1010
		<	1001 > 1001
1000		<	1000
		>	0111 > 0111
	>	0110	< 0110
		<	0101 > 0101
	<	0100	< 0100
		>	0011 > 0011
	<	0010	< 0010
		<	0001 > 0001
		<	0000

- La **aproximación** se realiza como una búsqueda binaria.



ADC en ATMega32U4

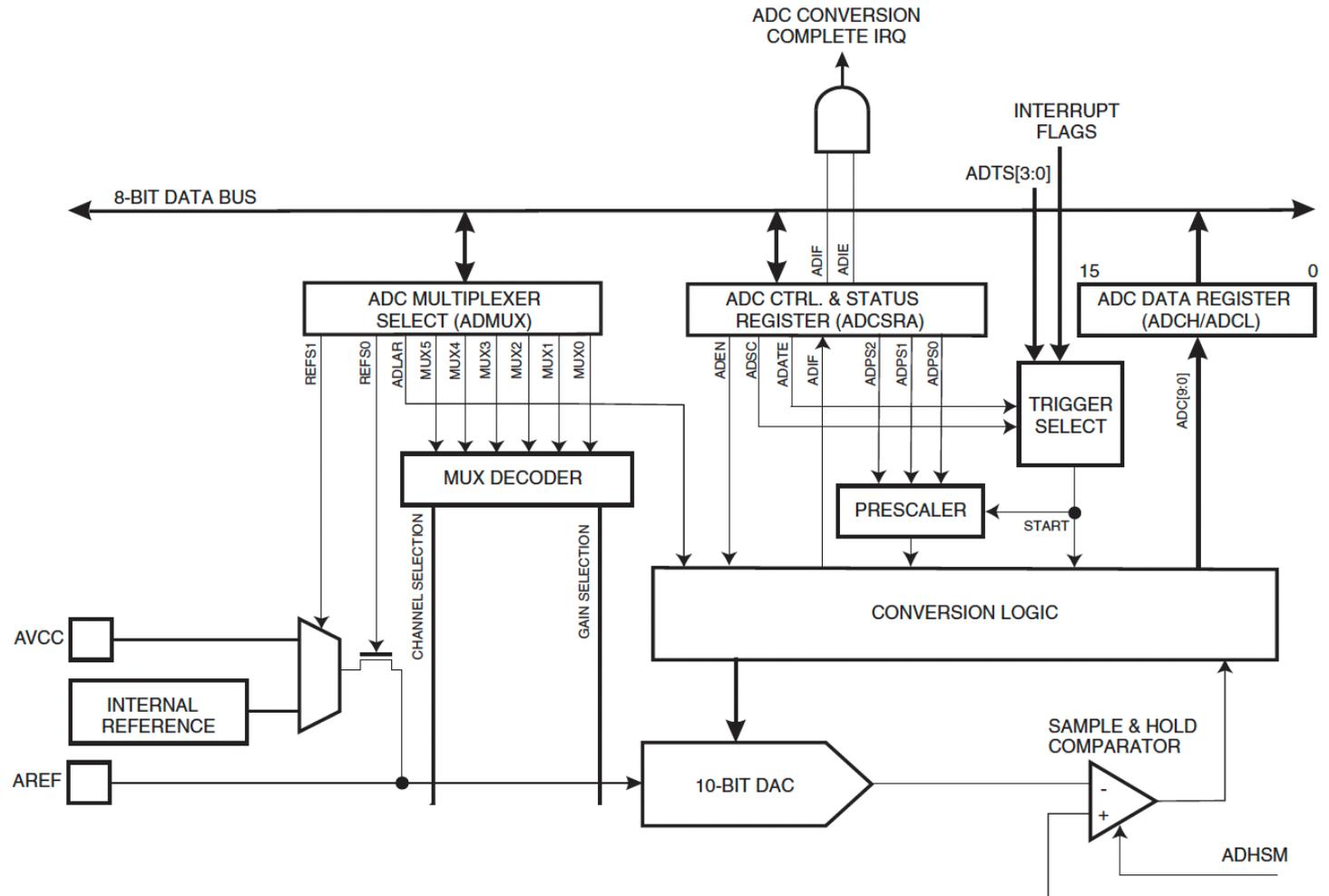
ATMega32U4

- Motivación:
 - La función `AnaLogRead(pin)` es una función bloqueante durante todo el tiempo de la conversión
 - Interesa poder usar el micro en ese intervalo.
- Resolución de 8 o 10-bit.
- 0.5 bits de Integral Non-Linearity.
- ± 2 bits de precisión absoluta.
- 65 – 250 μ secs Conversion Time.
- Hasta 15000 muestras por segundo en su mayor resolución.
- 12 canales multiplexados a una sola entrada.
- 1 amplificador de instrumentación con ganancias de 1x, 10x, 40x, 200x.
- Sensor de temperatura.
- Ajuste a la derecha o a la izquierda de lo que se ha leído.
- Rango de entrada de 0 .. Vcc = 5 V
- Voltaje de referencia Vref configurable a 2.56 V
- Conversión única o “free running”.
- Generación de interrupción cuando se completa la conversión.
- Inicio de conversión por autodisparo.
- Modo de cancelación de ruido.

Modo diferencial y no diferencial

Ver La figura 24-1, página 293 de la hoja de datos del micro.

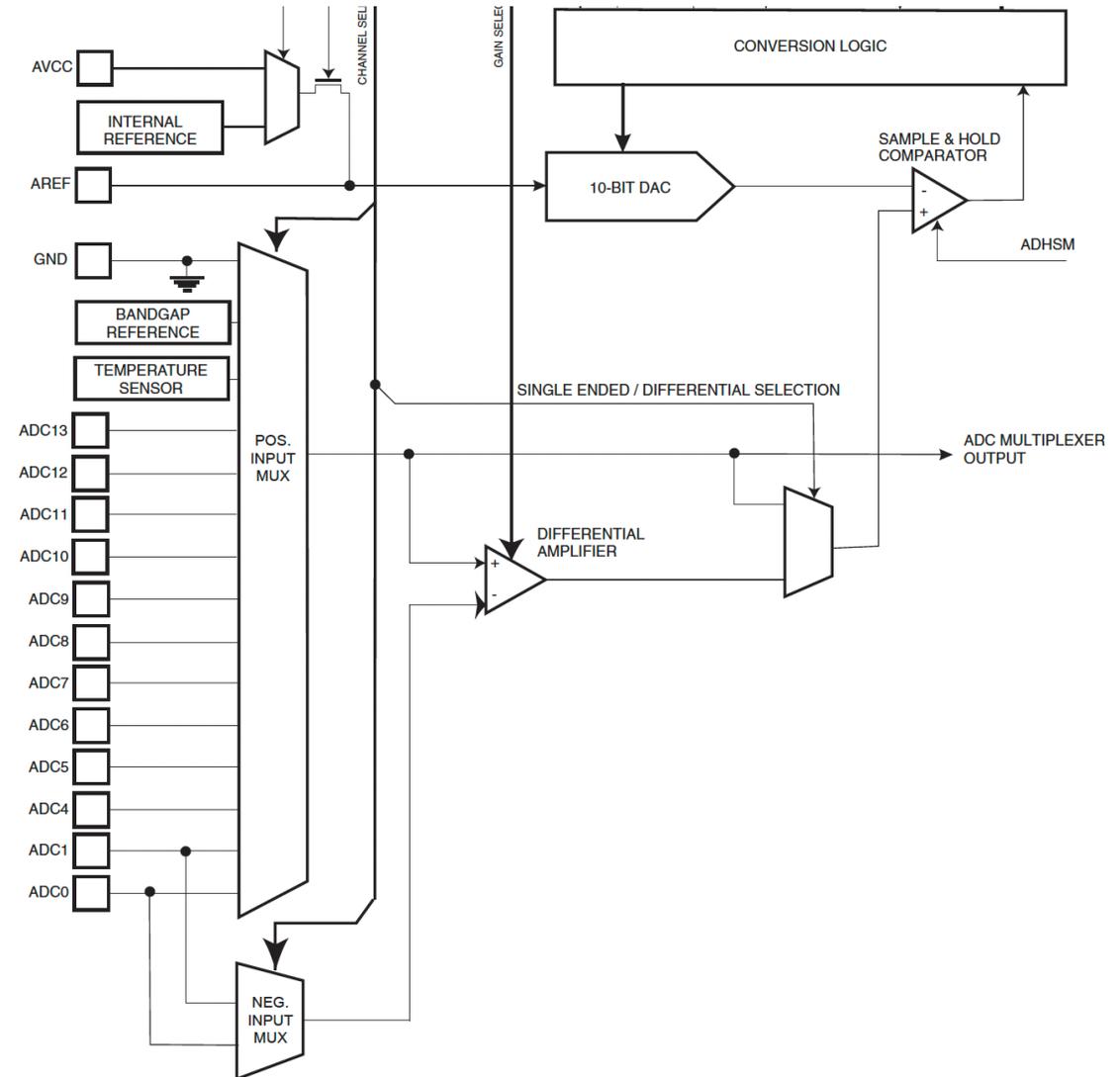
- Se observan los registros de control, estado, multiplexación y datos.
- El multiplexor ADMUX selecciona:
 - El voltaje de referencia AREF.
 - El canal de entrada.
 - El modo: single o differential.
- La salida del multiplexor alimenta al circuito Sample & Hold:
 - Comparando mediante un circuito de conversión el valor del DAC y de la muestra.
- La conversión se puede leer del registro ADCH/ADCL



Modo diferencial y no diferencial

Ver La figura 24-1, página 293 de la hoja de datos del micro.

- En modo de entrada única o single-ended:
 - La entrada es la del canal.
- En modo diferencial:
 - Entrada +: la de cualquier canal.
 - Entrada -: bien la del canal 0 o la del canal 1.



Ejemplo de I (I/I)

```
bool working = false;

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    sbi(ADCSRA, ADEN); // Turn ADC on
    sbi(ADCSRA, ADPS2); // Prescaler of /128
    sbi(ADCSRA, ADPS1);
    sbi(ADCSRA, ADPS0);

    const uint8_t ADC_PIN = 0b000111; // ADC7 = A0, see Table 24-4
    ADMUX = ADMUX | (ADC_PIN & 0b011111); // Set MUX4..MUX0 pins
    ADCSRB = ADCSRB | (ADC_PIN & 0b100000); // Set MUX5 pin
    cbi(ADMUX, REFS1); // Select VRef as Vcc
    sbi(ADMUX, REFS0);

    delay(5000); // So that Serial Monitor window has time to initialize
}
```

Ejemplo de I (1/2)

```
void loop() {  
    if (!working) {  
        sbi(ADCSRA, ADSC); //< Start conversion  
        working = true;  
    }  
  
    // The ADC clears the bit when conversion is done  
    if (getbit(ADCSRA, ADSC) == 0) {  
        working = false;  
        uint16_t value = ADC; // Read result  
        Serial.print("ADC: ");  
        Serial.println(value);  
        delay(2000);  
    }  
}
```

Ejemplo de 2 (1/3)

```
volatile bool is_converted = false;
volatile int16_t conversion = 0;

bool read_is_converted() {
    cli();
    bool value = is_converted;
    sei();
    return value;
}

int16_t read_conversion() {
    cli();
    int16_t value = conversion;
    is_converted = false;
    sei();
    return value;
}
```

Ejemplo de 2 (2/3)

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  sbi(ADCSRA, ADEN); // Turn ADC on
  sbi(ADCSRA, ADPS2); // Prescaler of /128
  sbi(ADCSRA, ADPS1);
  sbi(ADCSRA, ADPS0);
  sbi(ADCSRA, ADIE); // Enable ADC Conversion Complete IRQs

  // Select my ADC_PIN:
  const uint8_t ADC_PIN = 0b000111; // A0 = ADC7, see Table 24-4
  ADMUX = ADMUX | (ADC_PIN & 0b011111);
  ADCSRB = ADCSRB | (ADC_PIN & 0b100000);

  // Select VRef as Vcc
  cbi(ADMUX, REFS1);
  sbi(ADMUX, REFS0);

  // Continúa...
```

Ejemplo de 2 (2/3)

```
// ... Continuación:  
// Configure Timer 1 for periodic IRQ (period ~ 0.5 secs)  
cli();  
sbi(TCCR1B, CS12); // Pone el prescaler a 1024  
cbi(TCCR1B, CS11);  
sbi(TCCR1B, CS10);  
cbi(TCCR1B, WGM13); // Activa el modo CTC  
sbi(TCCR1B, WGM12);  
cbi(TCCR1A, WGM11);  
cbi(TCCR1A, WGM10);  
OCR1A = 7811; // Establece el valor del TOP  
  
sbi(TIMSK1, OCIE1A); // Habilita IRQs solo para el canal A  
cbi(TIMSK1, OCIE1B);  
sei();  
} // End of setup()
```

Ejemplo de 2 (3/3)

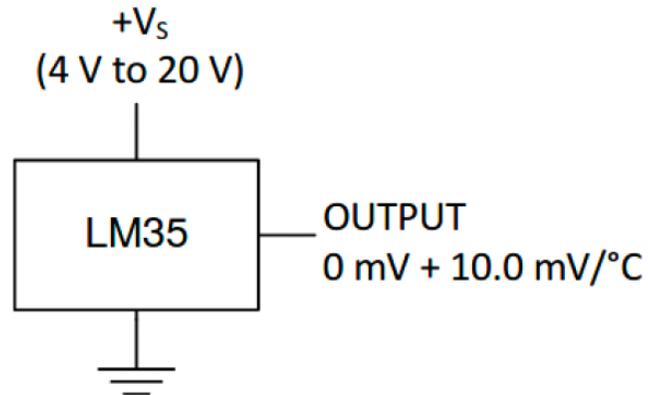
```
void loop() {
    if (read_converted()) {
        Serial.print("ADC: ");
        Serial.println(read_conversion());
    }
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect) { // Invoked periodically each 0.4 secs
    static bool first_time = true;
    if(first_time) {
        first_time = false;
    } else {
        is_converted = true;
        conversion = ADC;
    }
    sbi(ADCSRA, ADSC); // Start a new conversion
}
```

Acondicionamiento de señales

Sensor de temperatura LM35

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Non-Linearity Only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ Typical

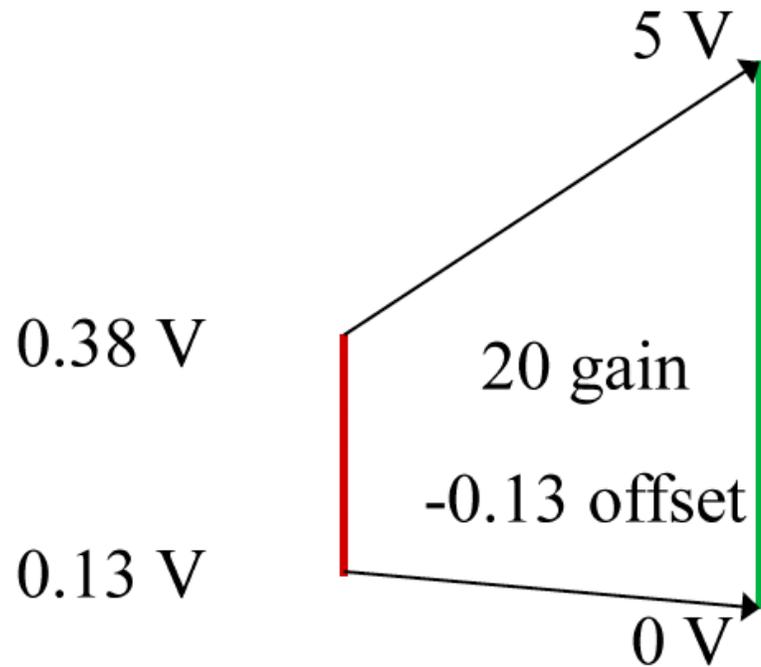
Home temperature control:
target range 15°- 40°

- Output at 15°: 130 mV
- Output at 40°: 380 mV

ADC:

- 10 bit resolution.
- 5V reference voltage.
- ADC reading at 15°?
- ADC reading at 40°?
- ADC reading range?
- How many steps per degree?

Acondicionamiento de la señal



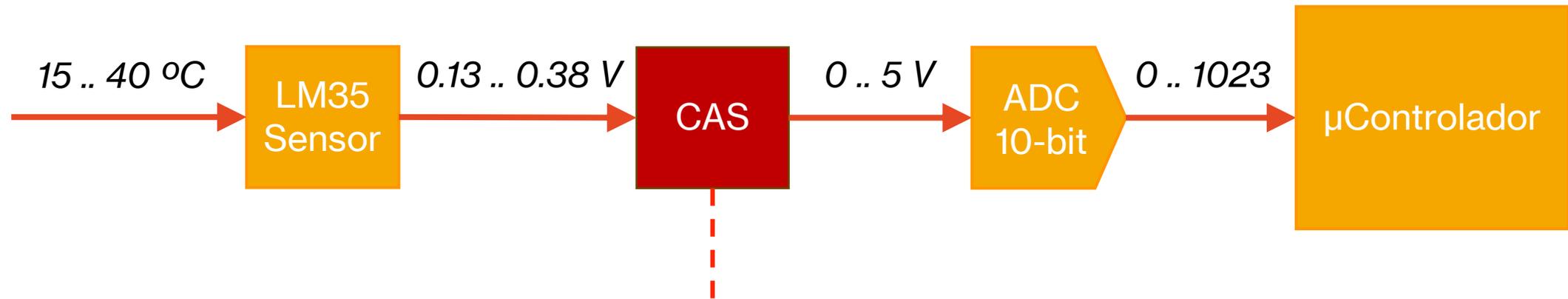
Reading at 40° : 1023

Reading at 15° : 0

41 steps per degree!

It could be convenient to have some margins. For instance, to use a range from 0.5 V to 4.5 V.

Acondicionamiento de la señal



CAS: Sistema Acondicionador de Señal.
Implementado mediante operadores de instrumentación.

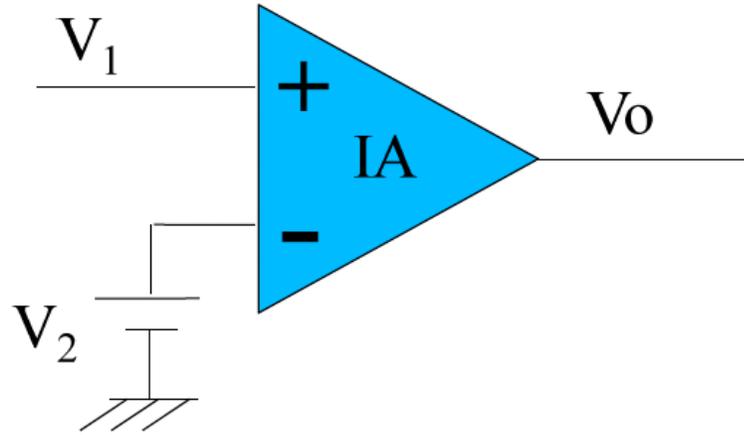
Acondicionamiento de la señal

Use 0.38 V as external reference (AREF pin) forgetting the 0.13 V offset.

How many steps per degree?

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1023}{V_{REF}}$$

Amplificador de Instrumentación



V_1 ranges from 0.13 V
to 0.38 V

V_0 ranges from 0 V to
5 V

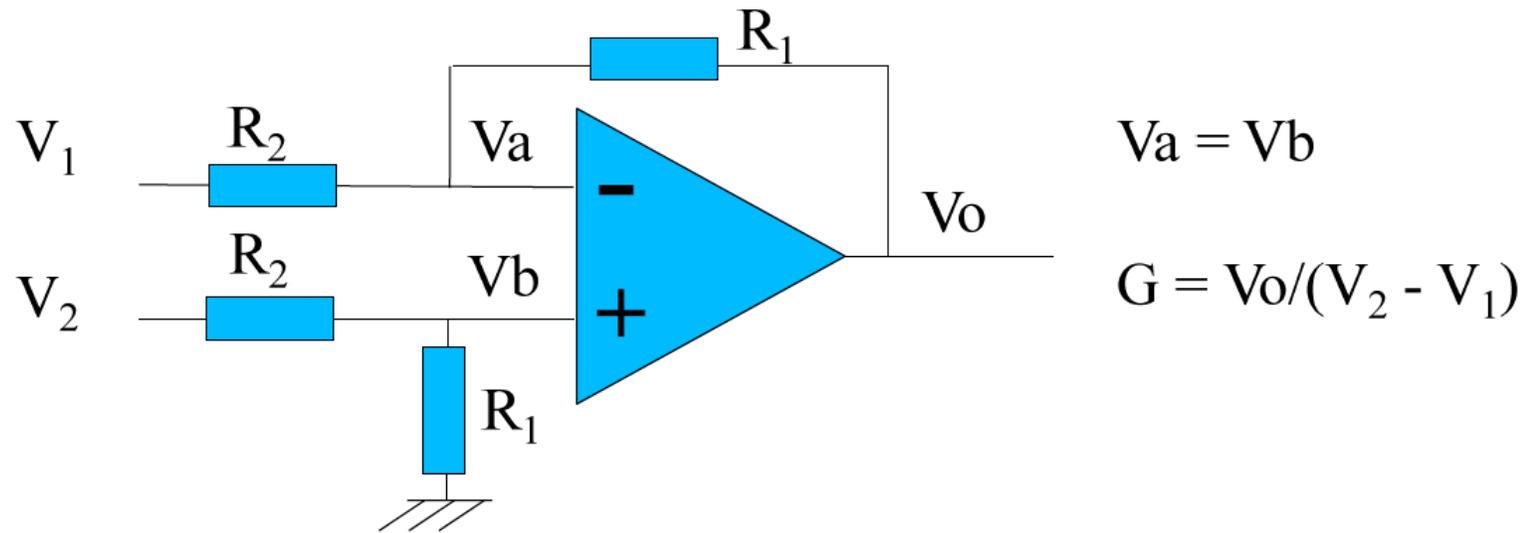
$$(0.13 \text{ V} - V_2) * G = 0 \text{ V}$$

$$V_2 = 0.13 \text{ V}$$

$$(0.38 \text{ V} - V_2) * G = 5 \text{ V}$$

$$G = 5 / (0.38 - 0.13) =$$
$$= 20$$

Amplificador de Instrumentación (Restador)



$$V_b = V_2 * R_1 / (R_2 + R_1)$$

$$V_a = (V_o - V_1) * R_2 / (R_2 + R_1) + V_1$$

$$V_2 * R_1 / (R_2 + R_1) = (V_o - V_1) * R_2 / (R_2 + R_1) + V_1$$

$$V_o / (V_2 - V_1) = R_1 / R_2 = G$$

$$R_2 = 10K; R_1 = 200K;$$

