

Tema 3
SENSORES RESISTIVOS
PARTE 1

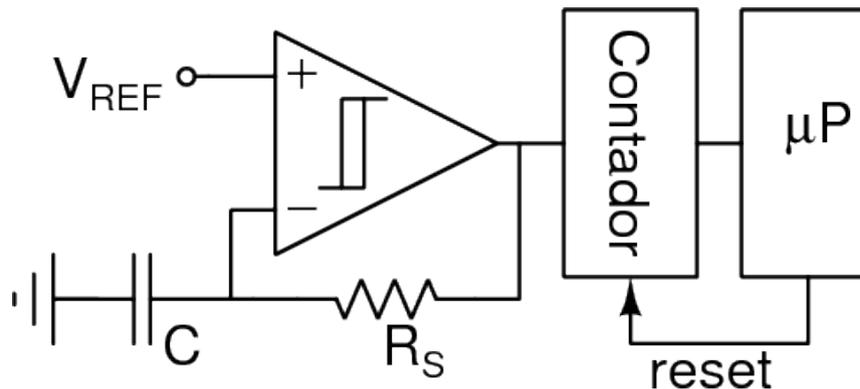
Introducción

¿Cómo se puede medir una resistencia?

En la práctica, los sistemas de instrumentación terminan en un conversor analógico/digital preparado para convertir tensión en niveles de referencia.

HAY QUE TRANSFORMAR RESISTENCIA EN TENSION

O recurrir a estrategias más heterodoxas:



La resistencia del sensor controla el ciclo del oscilador de relajación, de modo que la salida del contador en intervalos fijos cambia.

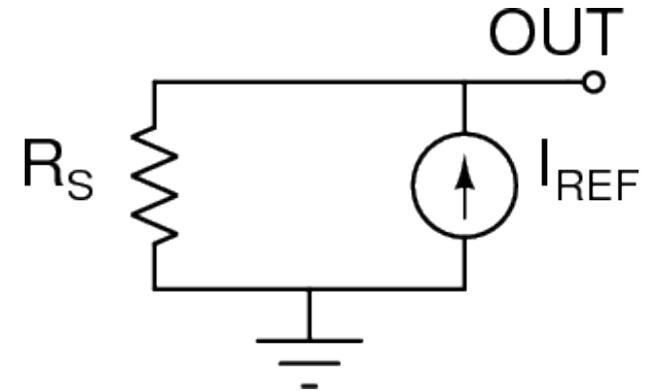
Estrategia: Fuente de corriente

Excitar la resistencia con una fuente conocida

Probablemente, la solución más fácil de entender...

PROS

- Si la resistencia es lineal, sigue siendo lineal.
- Ganancia conocida.



$$V_{OUT} = R_S \cdot I_{REF} = (R_{S0} + \alpha \cdot X) \cdot I_{REF}$$

CONTRAS

- Tensión de salida no nula con valor cero de la variable.
- No resuelve el problema de la no linealidad del sensor.
- Construcción relativamente compleja.

Estrategia: Resistencia serie

Polarizar con referencia y resistencia patrón

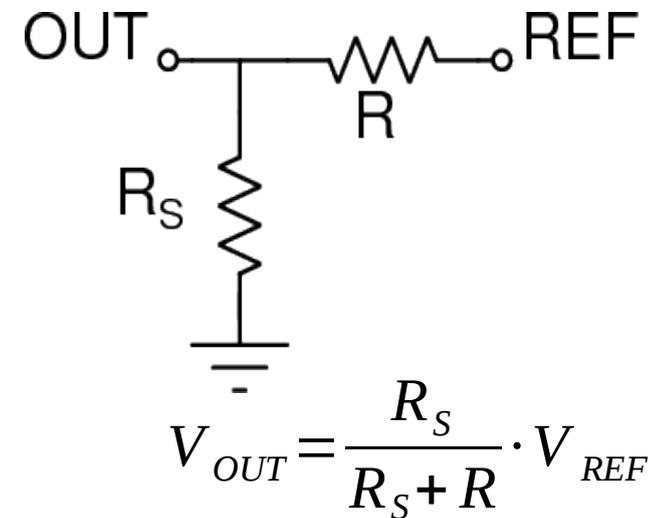
Probablemente, la solución más sencilla...

PROS

- Fácilmente construible
- Elimina la no linealidad

CONTRAS

- Introduce una gran no linealidad
- Tensión de salida no nula
- ¿Cómo se elige el valor de R?



Estrategia: Resistencia serie

Elección de R: Máximo fondo de escala

El objetivo es que la tensión de salida abarque todo el rango de tensiones de salida: Punto medio en $0,5 \cdot V_{REF}$

$$R_S(x) = R_{S0} + \alpha \cdot x \longrightarrow R = R_{S0}$$

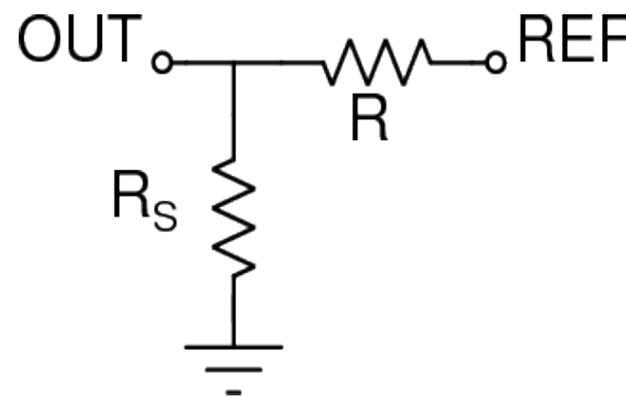
$$\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} = \frac{R_S}{R_S + R} = \frac{R_{S0} + \alpha \cdot x}{2 \cdot R_{S0} + \alpha \cdot x}$$

$$V_{OUT} \approx \frac{V_{REF}}{2} + \frac{\alpha \cdot V_{REF}}{4 \cdot R_{S0}} \cdot x - \frac{\alpha^2 \cdot V_{REF}}{8 \cdot R_{S0}^2} \cdot x^2$$

Offset en la medida

Nueva sensibilidad

No linealidad



¡Los sensores pierden la linealidad!

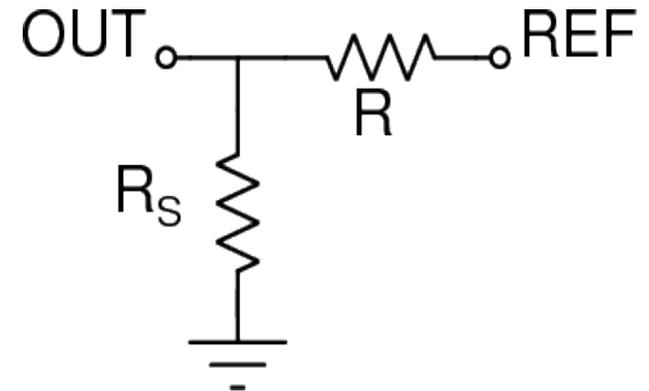
Estrategia: Resistencia serie

Elección de R: Eliminación de la no linealidad

El objetivo es compensar la no linealidad del sensor con la introducida por la resistencia de referencia

$$R_S(x) = R_{S0} + \alpha \cdot x + \beta \cdot x^2$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} = \frac{R_S}{R_S + R} = \frac{R_{S0} + \alpha \cdot x + \beta \cdot x^2}{R + R_{S0} + \alpha \cdot x + \beta \cdot x^2}$$



$$V_{OUT} \approx \frac{R_{S0}}{R + R_{S0}} \cdot V_{REF} + \frac{\alpha \cdot R \cdot V_{REF}}{(R + R_{S0})^2} \cdot x + \frac{R \cdot V_{REF} \cdot ((R_{S0} + R) \cdot \beta - \alpha^2)}{(R + R_{S0})^3} \cdot x^2$$

Offset en la medida

Nueva sensibilidad

No linealidad

Dos términos compiten en el término no lineal

Estrategia: Resistencia serie

Elección de R: Eliminación de la no linealidad

Si $\beta > 0$, el término no lineal se cancela si $(R_{S0} + R) \cdot \beta = \alpha^2$

Por tanto:
$$R = \frac{\alpha^2}{\beta} - R_{S0}$$

$$V_{OUT} \approx \underbrace{\frac{\beta \cdot R_{S0}}{\alpha^2} \cdot V_{REF}}_{\text{Offset en la medida}} + \underbrace{\frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\beta \cdot R_{S0}}{\alpha^2}\right) \cdot V_{REF}}_{\text{Nueva sensibilidad}} \cdot x + \underbrace{O(x^3)}_{\text{No linealidad}}$$

Importante:

- 1) Esta técnica no siempre es válida: Necesitamos segunda derivada positiva y β suficientemente pequeña.
- 2) Quizás sea inaplicable si se pierde salida a fondo de escala.
- 3) Muy útil con NTC.

El problema de la temperatura

Corrección en la medida

En general, toda resistencia se ve afectada por la temperatura además de por el parámetro.

Por tanto, o la temperatura se mantiene constante o se debe realizar una corrección *a posteriori* midiendo la temperatura del sistema con un sensor adicional.

Autocalentamiento por efecto Joule

En todos los ejemplos estudiados, la sensibilidad es proporcional a la excitación, sea V_{REF} , sea I_{REF} .

Incremento de temperatura controlado por resistencia térmica, R_θ

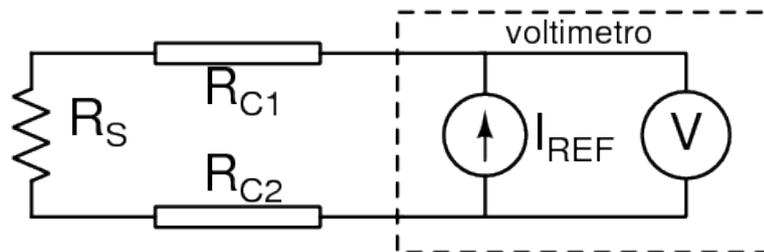
$$T_{SENSOR} = T_{AMB} + R_\theta \cdot R_S \cdot I_{REF}^2 \qquad T_{SENSOR} = T_{AMB} + R_\theta \cdot \frac{R_S \cdot V_{REF}^2}{(R_S + R)^2}$$

ΔT debe ser menor que la precisión requerida, o corregida por software

El problema del cableado

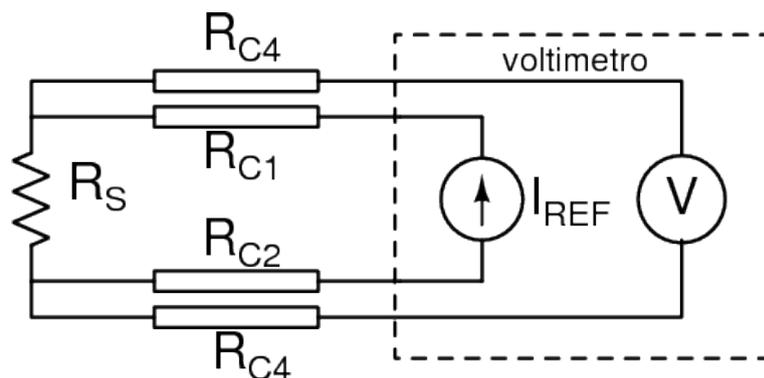
Incertidumbre añadida en la medida

En algunos casos, el sensor se encuentra a gran distancia del sistema de medida y hay que tener en cuenta los cables.



Medida a 2 hilos

- Muy simple
- Imprecisa:
 $R_{S,MED} = R_S + R_{C1} + R_{C2}$



Medida a 4 hilos

- Complicada
- Más precisa:
 $R_{S,MED} = R_S$

Medir a 4 hilos siempre y cuando $R_{C1} + R_{C2}$ sea superior a la precisión requerida.

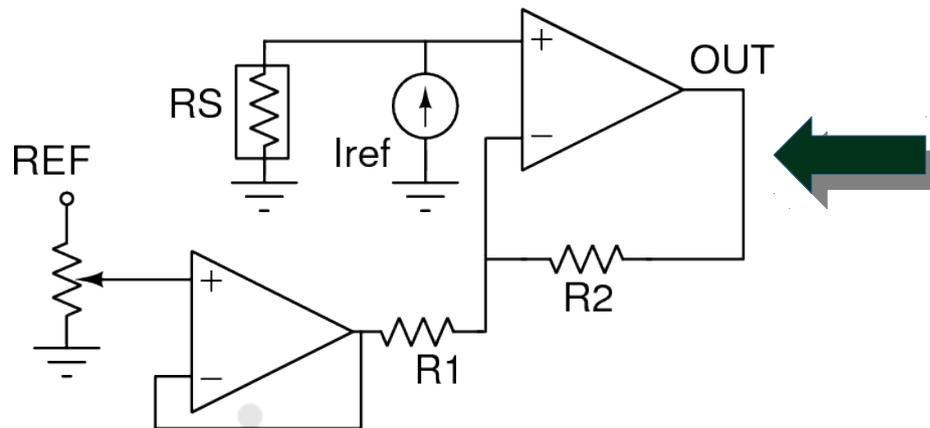
Ajuste de cero

Eliminación del *offset* intrínseco en la medida

Ya se vio anteriormente que, en muchos casos, en el nivel de referencia de la variable la salida del sistema no es nula.

Por ejemplo...

$$V_{OUT} = R_{S0} \cdot I_{REF} + \alpha \cdot I_{REF} \cdot \Delta X \quad \Rightarrow \quad V_{OUT}(\Delta X = 0) = R_{S0} \cdot I_{REF} \neq 0$$



Una posible técnica

- No muy complicado
- Sin embargo, requiere ajuste manual

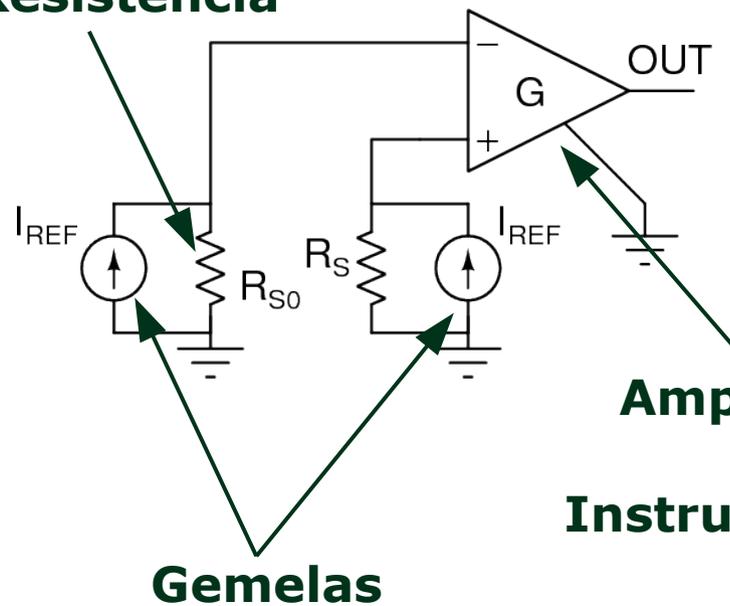
Hay que buscar técnicas que no necesiten ajuste manual

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* intrínseco en la medida

A veces, es más sencillo replicar el sensor y medir la tensión diferencial.

Resistencia



$$R_S = R_{S0} + \alpha \cdot \Delta x$$

$$V_{OUT} = G \cdot \alpha \cdot I_{REF} \cdot \Delta x$$

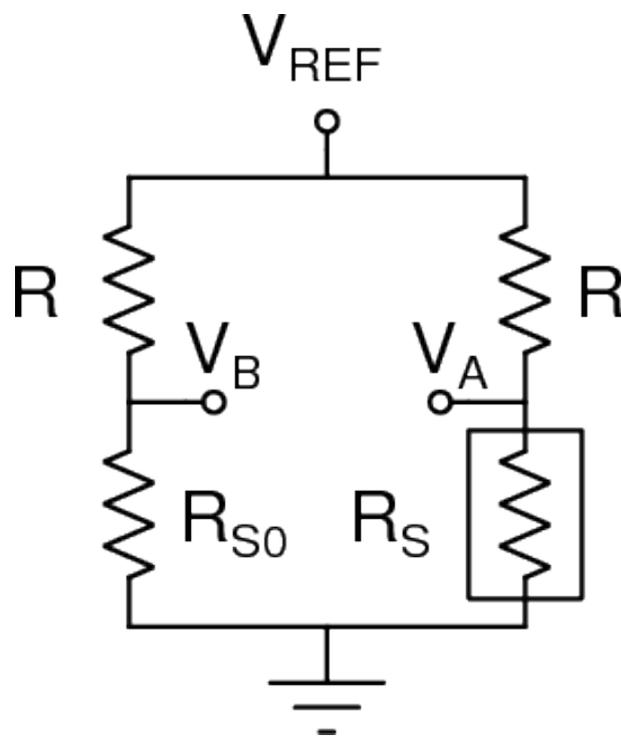
**Amplificador
de
Instrumentación**

**Más elementos, pero no requiere ajuste.
Mucho más fácil en caso de usar resistencias.**

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* intrínseco en la medida

En resistencias, hay que usar el **punte de Wheatstone**



$$R_S = R_{S0} + \alpha \cdot \Delta X$$

$$V_A = \frac{R_S}{R + R_S} \cdot V_{REF} \quad V_B = \frac{R_{S0}}{R + R_{S0}} \cdot V_{REF}$$

$$V_{AB} \approx \frac{\alpha \cdot R \cdot V_{REF}}{(R + R_{S0})^2} \cdot \Delta X$$

Medible con A. I.

La tensión diferencial es directamente proporcional a la variación de la variable física.

Ajuste de cero

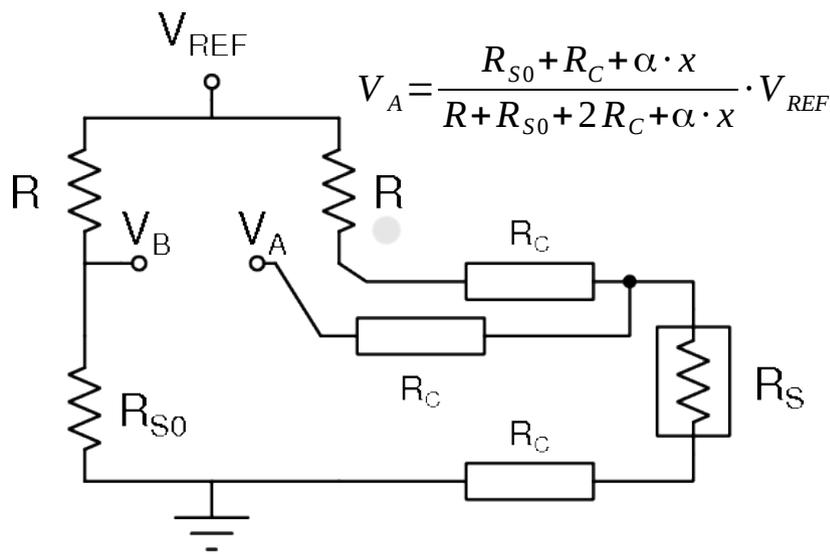
Eliminación del *offset* intrínseco en la medida

El puente de Wheatstone puede mejorarse:

- La resistencia **R** puede elegirse buscando eliminar la no linealidad o el máximo rango.
- Además, con un único cable adicional se compensan los efectos del cable a larga distancia
- A veces, se pueden usar sólo cuatro sensores iguales, donde sólo uno se expone a variaciones y el resto se mantiene en un ambiente controlado (sensores pasivos).
- O dos sensores cruzado en el puente se exponen a la misma variación para doblar la sensibilidad.

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* intrínseco en la medida



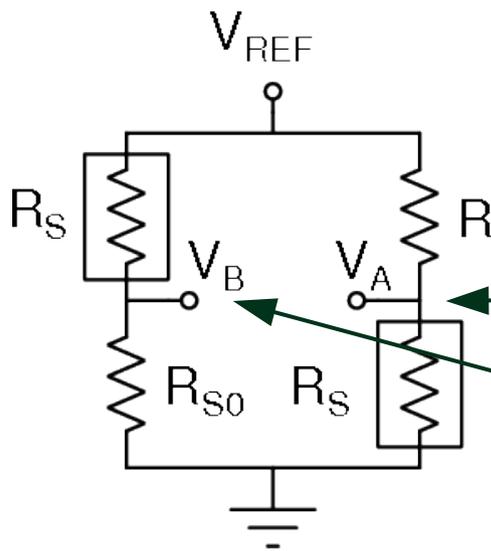
$$V_A = \frac{R_{S0} + R_C + \alpha \cdot x}{R + R_{S0} + 2R_C + \alpha \cdot x} \cdot V_{REF}$$

P.e., si $R = R_{S0}$

$$V_A \approx \frac{V_{REF}}{2} + \frac{\alpha \cdot V_{REF}}{4 \cdot (R_{S0} + R_C)} \cdot x$$

No cambia

Menor ganancia



Si R_S crece...

V_A aumenta

V_B decrece

Más sensibilidad

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* del sistema

Se entiende por *offset* del sistema como el introducido por los dispositivos, sobre todo por aquellos encargados de la amplificación.

Dado que el sistema puede sufrir derivas por envejecimiento, temperatura, etc., y que requiere intervención de un operario:

NO SE RECOMIENDA AJUSTAR CON POTENCIÓMETROS

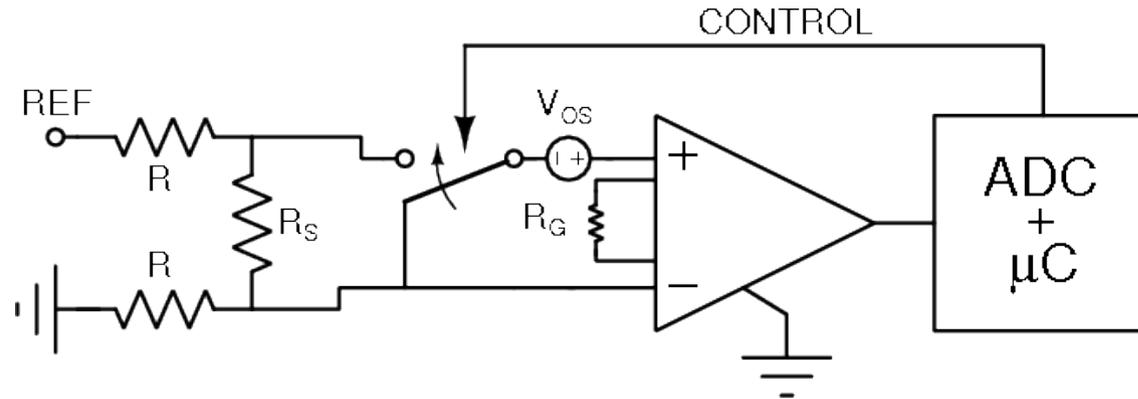
Las técnicas más habituales son:

- **Calibración automática del *offset***
 - Sistemas **con** memoria digital
 - Sistemas **sin** memoria digital
- **Sistemas basados en la técnica del *chopper***

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* del sistema: Autocalibración

En un sistema digital, la autocalibración es extremadamente sencilla: Basta con configurar el sistema para tener entrada nula, medir, guardar datos y restar este valor en las siguientes medida.



Switch ON:

$$OUT = G_D \cdot (V_{RS} + V_{OS})$$

Switch OFF:

$$OUT = G_D \cdot V_{OS}$$



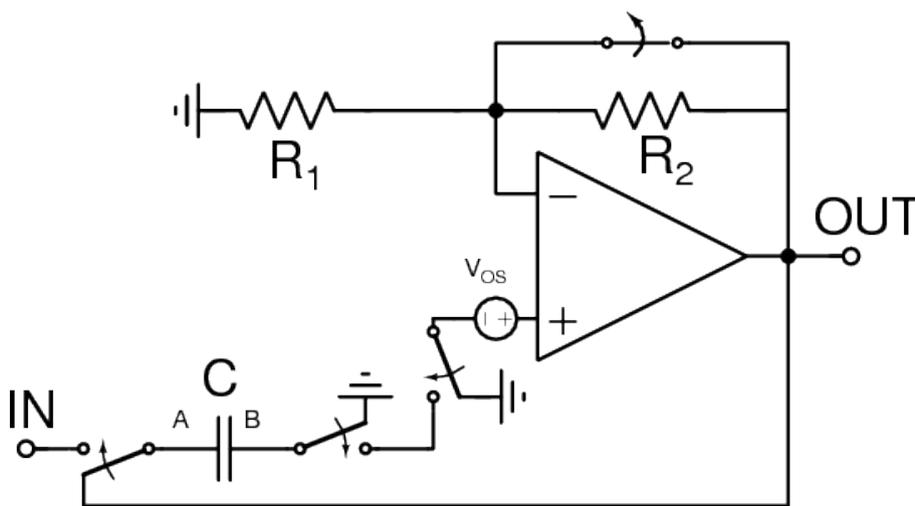
Ya en el microcontrolador

$$G_D \cdot (V_{RS} + V_{OS}) - G_D \cdot V_{OS} = G_D \cdot V_{RS}$$

Ajuste de cero

Eliminación del *offset* del sistema: Autocalibración

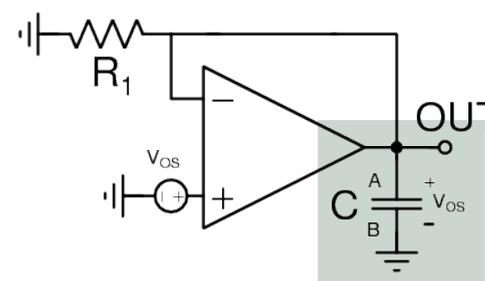
En otros casos, se puede guardar la tensión de offset en un condensador y restarla.



Un ejemplo (puramente académico):

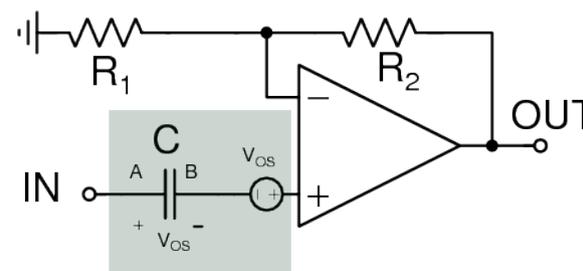
Eliminar la tensión de *offset* en un amplificador no inversor. Los switches están controlados por un reloj digital.

Switches en REPOSO



En reposo, la tensión de offset se almacena en el condensador.

Switches ACTIVOS



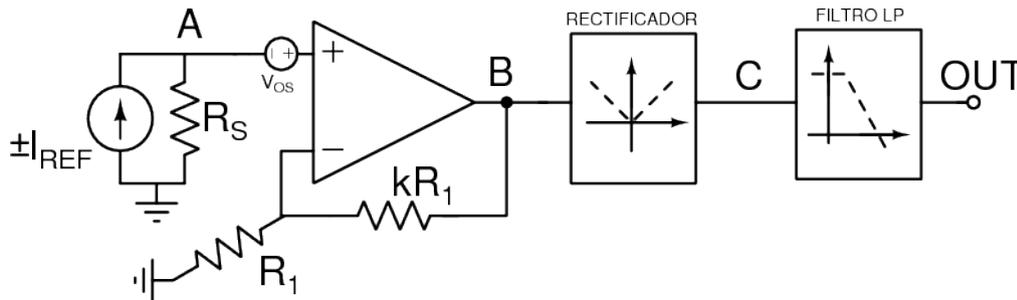
Al reconfigurar el circuito, la tensión de offset se cancela con la del condensador.

Técnica también válida para comparadores

Ajuste de cero

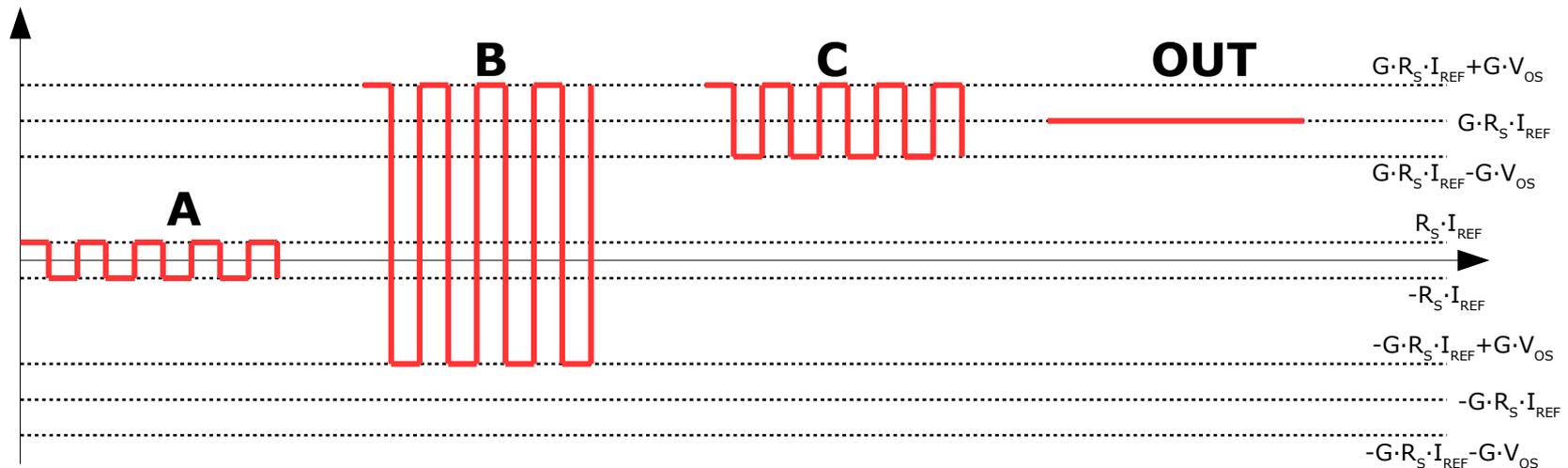
Eliminación del *offset* del sistema: Técnicas Chopper

Bajo este nombre se recogen técnicas diversas que eliminan el offset convirtiendo una señal DC en variable, rectificando y filtrando con un filtro LP.



Ejemplo:

Medir con fuente de corriente conmutada una resistencia con un amplificador no inversor

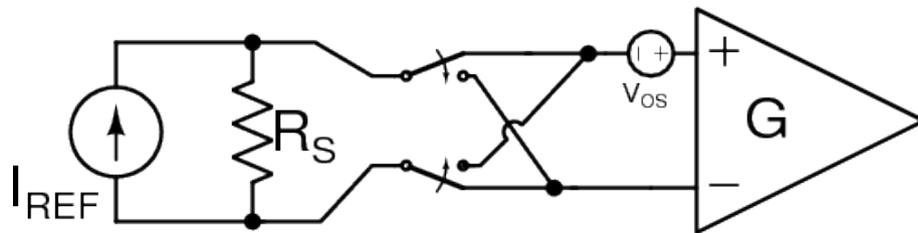


Ajuste de cero

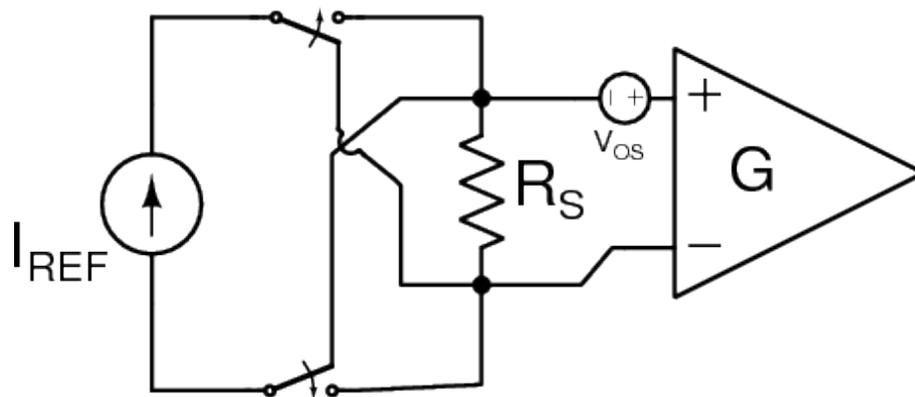
Eliminación del *offset* del sistema: Técnicas Chopper

¿Cómo crear la fuente de corriente o de tensión variable?

- Habría que hacer un ajuste perfecto entre las dos fases, y no siempre es factible. Es mejor fijar la corriente y:



Fijar la corriente e intercambiar los terminales de medida



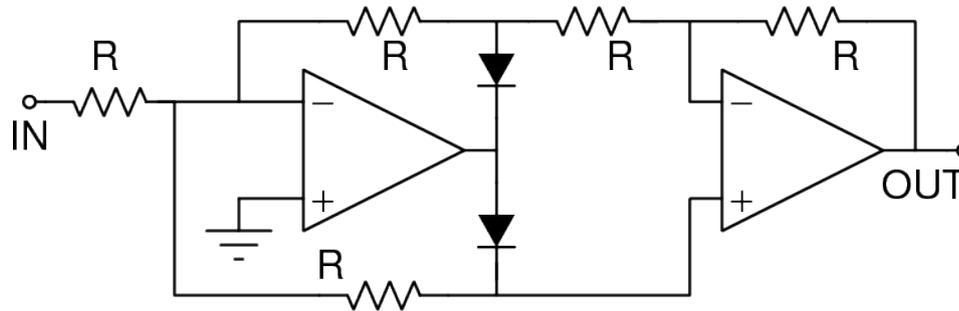
Reordenar el circuito para que la corriente fluya en sentido inverso

Ajuste de cero

Eliminación del offset del sistema: Técnicas Chopper

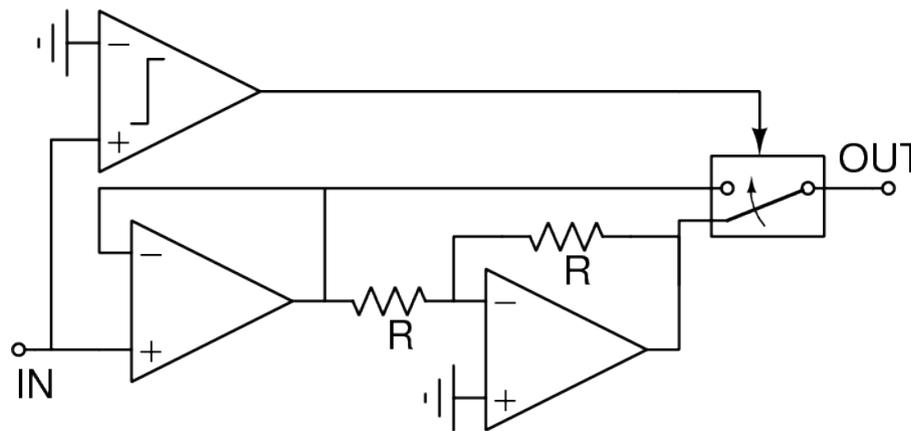
La rectificación debe ser de precisión.

- Los diodos sencillos están descartados



Rectificador de onda completa

Estructura sencilla, fabricable con pocos elementos, pero relativamente lenta.



Demodulador síncrono

Estructura sencilla, y bastante rápida.

Circuitos integrados como el AD630 realizan esta función