



SENSORES Y ACONDICIONADORES

TEMA 15 (1)

CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SENSORES ANALÓGICOS CIRCUITOS ADAPTADORES Y AMPLIFICADORES

**Profesores: Enrique Mandado Pérez
Antonio Murillo Roldan**



DEFINICIÓN

Se denominan acondicionadores los circuitos que convierten una característica del elemento sensor en una señal eléctrica analógica, digital o temporal.

Se puede considerar también que forman parte del circuito acondicionador los circuitos convertidores que proporcionan variables que pueden ser memorizadas en un procesador digital. Algunos autores los denominan circuitos electrónicos de interfaz (*Interface electronic circuits*) porque están situados entre uno o mas sensores y un procesador digital.

Los circuitos acondicionadores están formados por uno o más de los siguientes tipos de circuitos:

- Circuitos adaptadores
- Circuitos amplificadores
- Circuitos de excitación
- Circuitos convertidores de parámetro y formato



TIPOS DE CIRCUITOS ACONDICIONADORES

- **Circuitos adaptadores**
- Circuitos amplificadores
- Circuitos de excitación
- Circuitos convertidores de parámetro y formato



CIRCUITOS ADAPTADORES

DEFINICIÓN

Se denominan adaptadores a los circuitos que convierten el cambio de una resistencia, una capacidad o una inductancia en una tensión eléctrica. El conjunto formado por el elemento sensor y el circuito adaptador constituye un sensor modulador o pasivo.

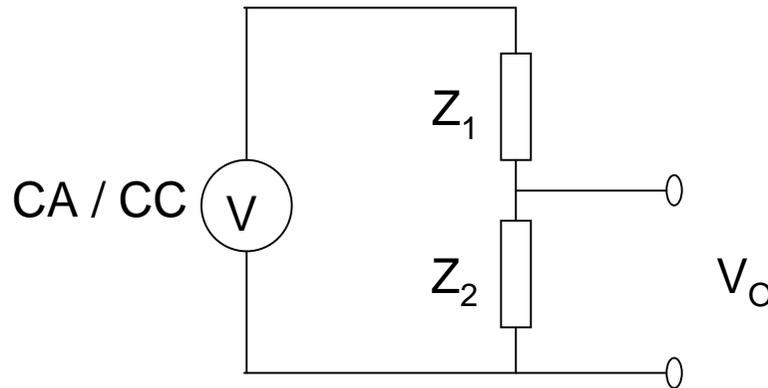
Principales circuitos adaptadores:

- Divisor de tensión**
- Puente de medida**



CIRCUITOS ADAPTADORES

DIVISOR DE TENSION



$$V_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V$$

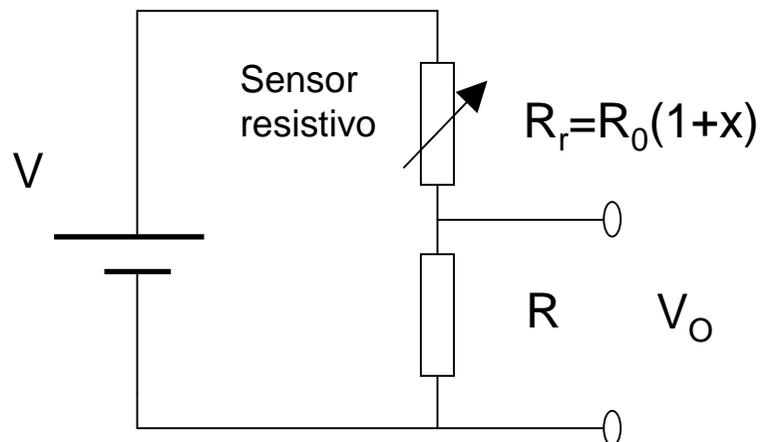
El método de medida basado en un divisor de tensión se denomina medida por deflexión.



CIRCUITOS ADAPTADORES

DIVISOR RESISTIVO DE TENSIÓN

Se basan en la medida de la caída de tensión en bornes de una resistencia, la corriente a su través o ambos valores. El divisor resistivo es adecuado cuando la variación x de resistencia por unidad de variación de la variable de entrada es elevada. Por el contrario, no es apropiado en sensores en los que las variaciones de la resistencia son pequeñas, porque exigen que se midan cambios muy pequeños de variables que poseen un valor medio muy elevado.



$$V_o = \frac{V}{R + R_r} R$$

$$R_r = R \frac{V - V_o}{V_o}$$

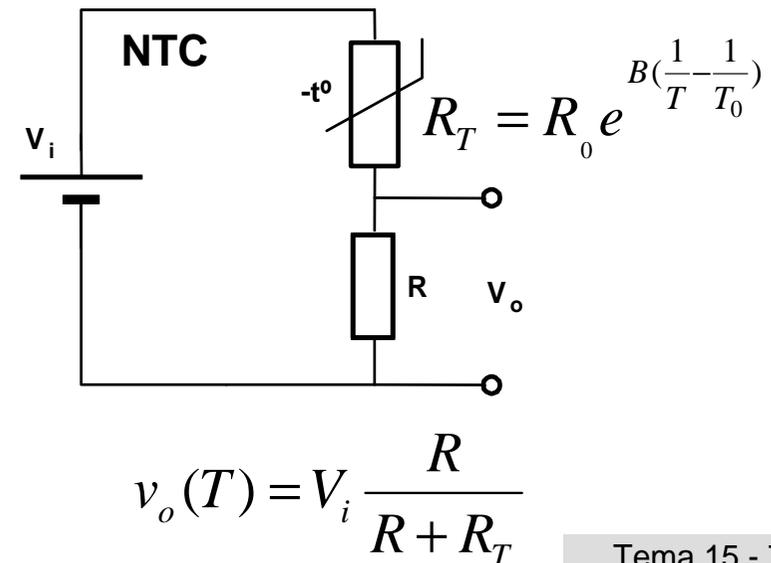
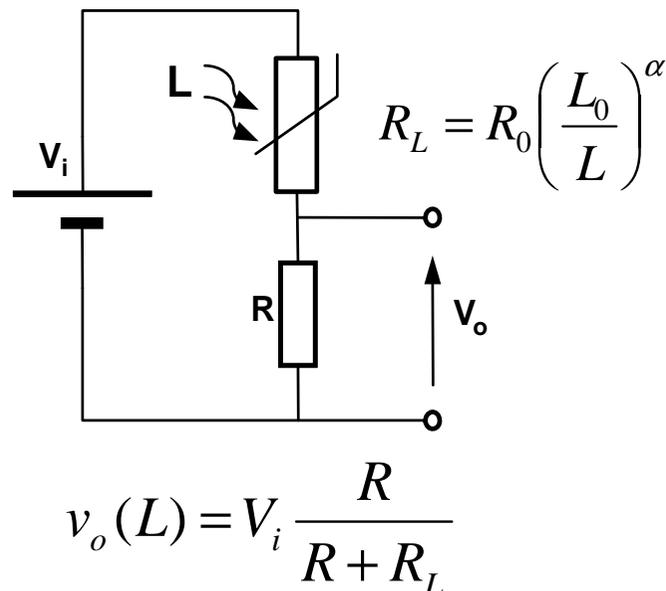


CIRCUITOS ADAPTADORES

DIVISOR RESISTIVO DE TENSIÓN

Se utiliza fundamentalmente en potenciómetros (sin resistencia R de referencia), LDR y termistores.

En los termistores se puede linealizar la relación entre V_o y R_T si se elige un valor adecuado de R.

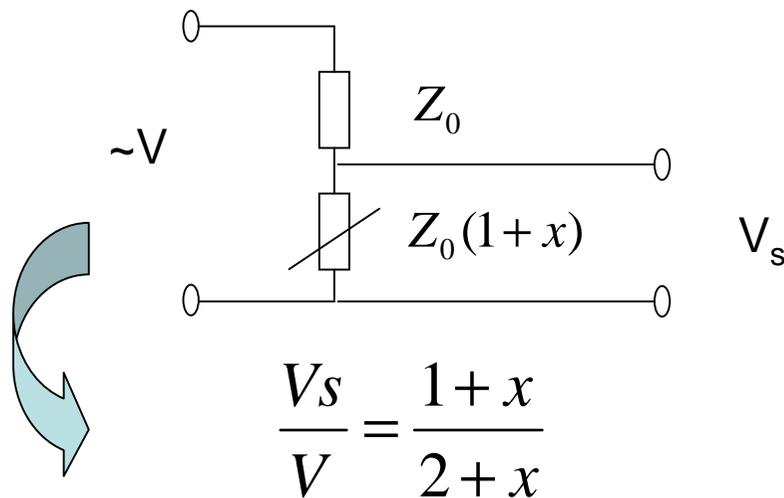




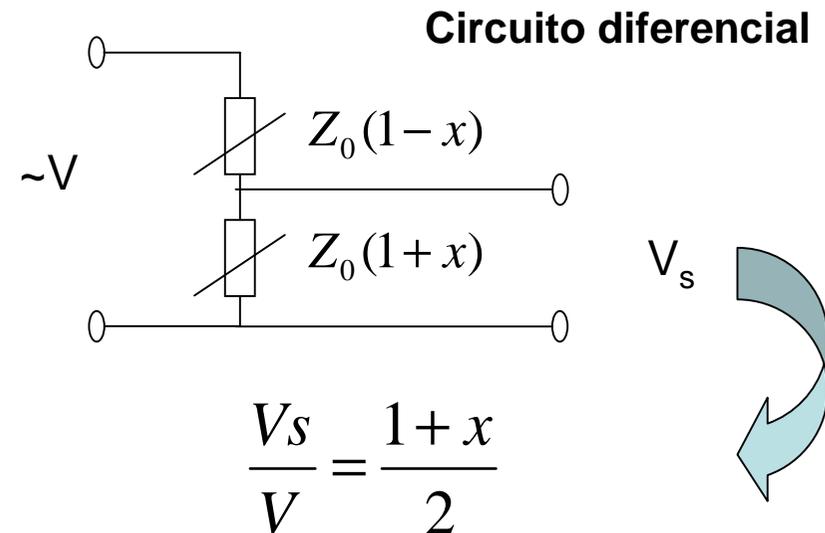
CIRCUITOS ADAPTADORES

DIVISOR DE TENSIÓN DE ALTERNA

El montaje diferencial cancela el efecto de las impedancias parásitas que pueden existir en paralelo con el sensor. Además la relación entre la tensión de entrada y la de salida es lineal, aunque existe un término fijo en la expresión de la tensión de salida.



La relación V_s/V no es lineal



La relación V_s/V es lineal



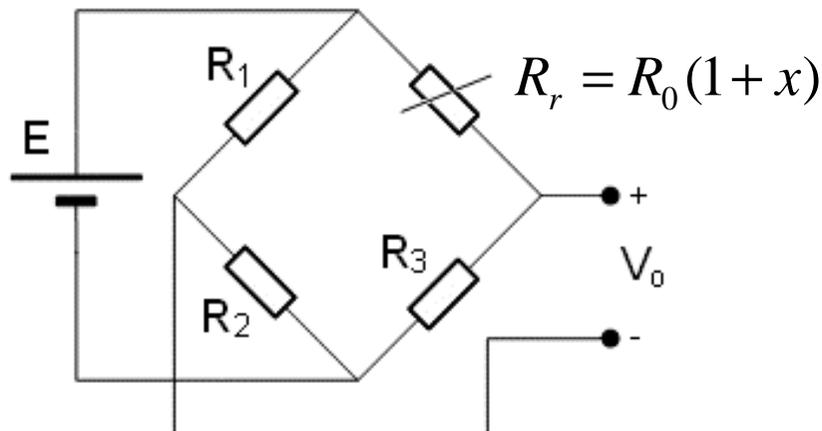
CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE WHEATSTONE

Esta formado por dos divisores de tensión en paralelo y la tensión de salida es la diferencia entre las tensiones de salida de ambos divisores.

Las RTD y las galgas extensiométricas son los sensores resistivos típicos que utilizan el puente de Wheatstone.

El método de medida basado en un puente de Wheatstone se denomina medida por comparación.

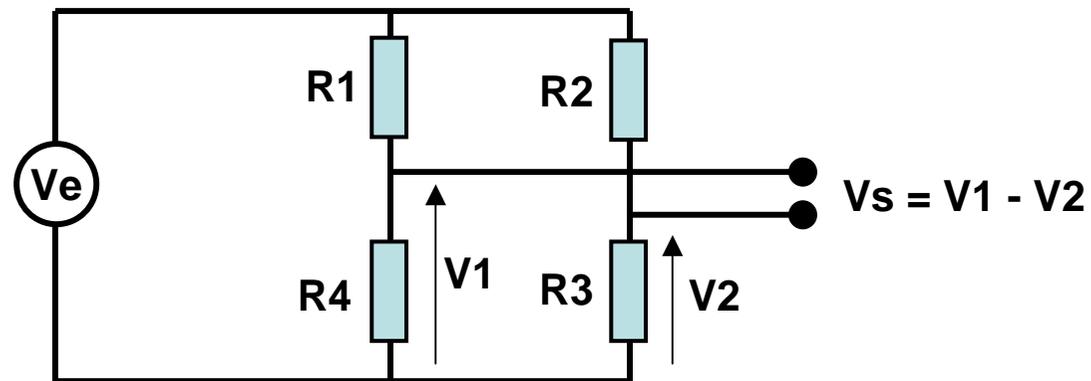


Puente de Wheatstone
alimentado en tensión



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE WHEATSTONE



Condición de equilibrio del puente:

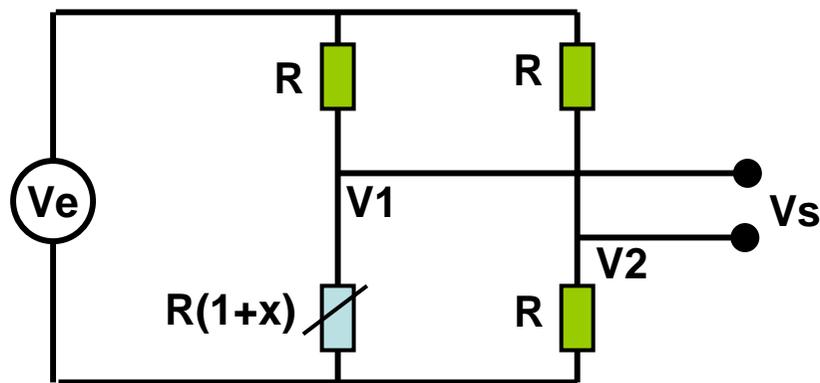


En puentes resistivos V_e puede ser continua o alterna



CIRCUITOS ADAPTADORES

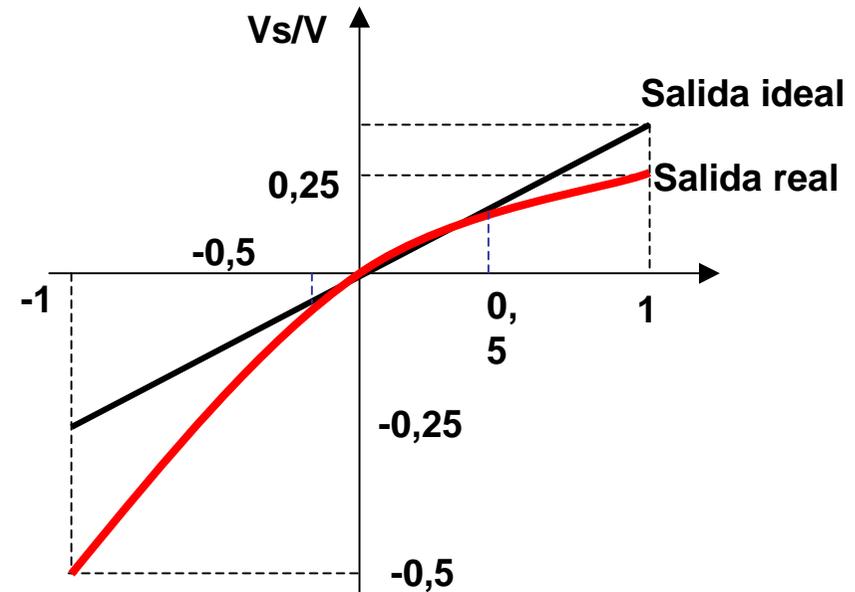
PUENTE DE WHEATSTONE RESISTIVO DE UN SOLO SENSOR



$$V_s = V_e \frac{x}{4 \left[1 + \frac{x}{2} \right]}$$

Para valores pequeños de x :

$$V_s' = \frac{V_e}{4} x$$



La **sensibilidad** del puente es:

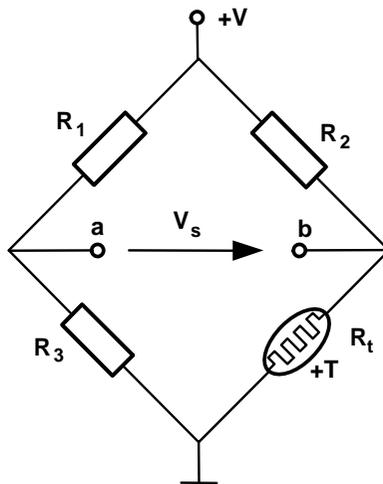
$$S = \frac{dV_s}{dV_e} = \frac{x}{4}$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE WHEATSTONE RESISTIVO DE UN SOLO SENSOR

Ejemplo: Medida de temperatura mediante una RTD



$$V_O = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha t)}{R_0(1 + \alpha t) + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

Quando V_O es nula y $T^a = 0^\circ\text{C}$ $\Rightarrow \frac{R_0}{R_0 + R_2} = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$

Se suele hacer $R_1 = R_2 = R = r R_0$ y $R_3 = R_0$

RTD linealizada

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

$$V_O = V \cdot \frac{r \cdot \alpha t}{(r + 1) \cdot (r + 1 + \alpha t)} \quad r = R/R_0$$



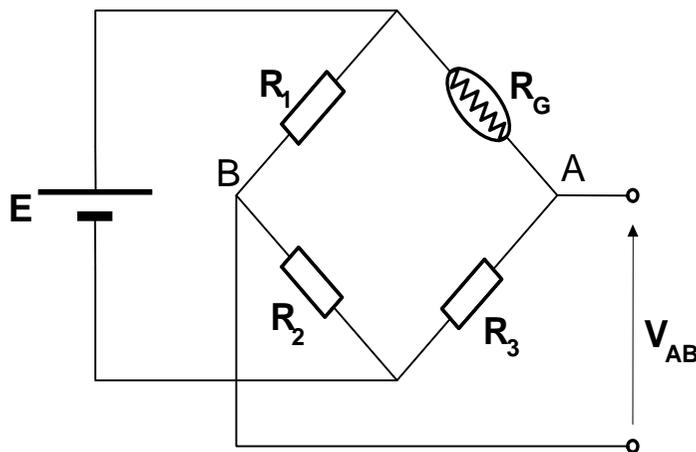
$$V_O \approx V \cdot \frac{r \cdot \alpha t}{(r + 1)^2}$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE WHEATSTONE RESISTIVO DE UN SOLO SENSOR

Ejemplo: Medida de fuerzas mediante una galga extensométrica



$$R_G = R + \Delta R$$

$$\Delta R/R = K\varepsilon$$

K: factor de galga
 ε : deformación unitaria ($\Delta L/L$)

$$V_{AB} = E \left(\frac{R_3}{R_3 + R_G} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Se suele hacer $R_1=R_2=R_3=R$

$$V_{AB} = \frac{\Delta R}{4} \frac{1}{R + \frac{\Delta R}{2}} E$$

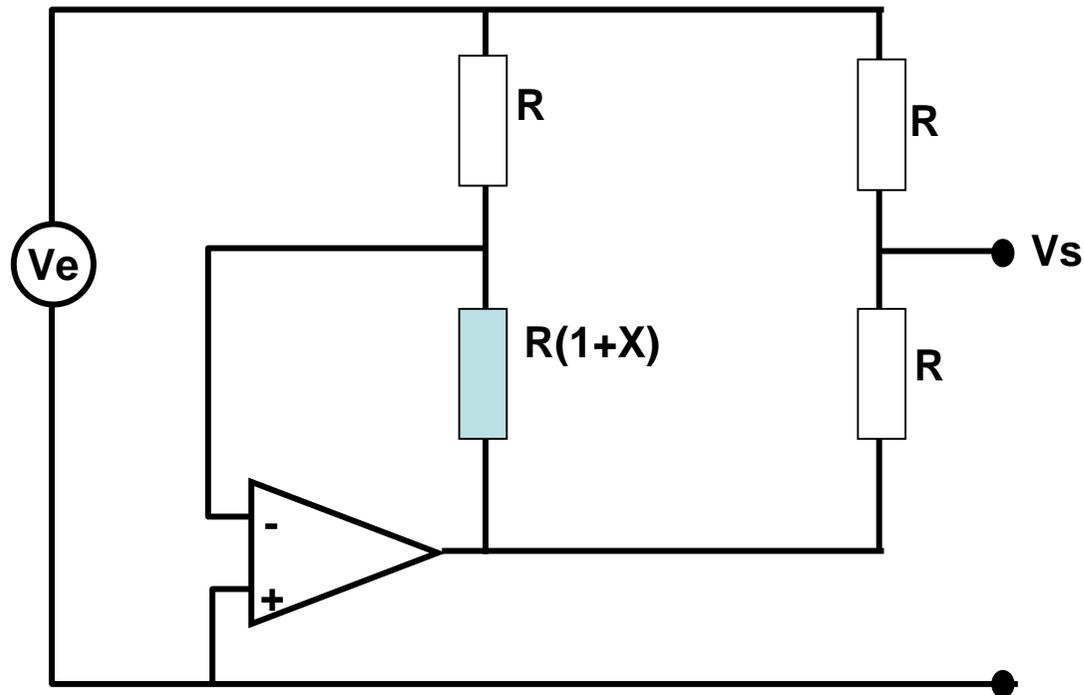
$$V_{AB} = \frac{K\varepsilon}{4} \frac{1}{1 + \frac{K\varepsilon}{2}} E \cong \frac{K\varepsilon}{4} E$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

LINEALIZACIÓN ANALÓGICA

Para obtener una tensión directamente proporcional a las variaciones de una de las resistencias se puede utilizar el circuito de la figura.

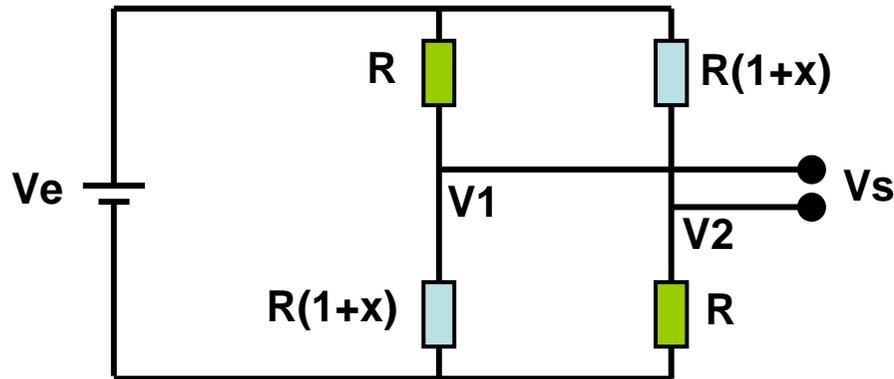


$$V_s = \frac{V_e}{2} x$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE DOS SENSORES



$$V_s = V_e \frac{x}{2 \left[1 + \frac{x}{2} \right]}$$

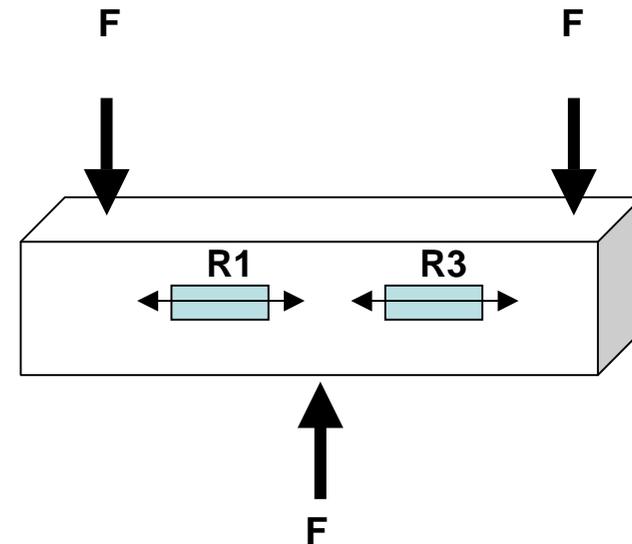
Para valores de x pequeños

$$V_s' = \frac{V_e}{2} x$$

La **sensibilidad** del puente es:

$$S = \frac{dV_s}{dV_e} = \frac{x}{2}$$

GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS



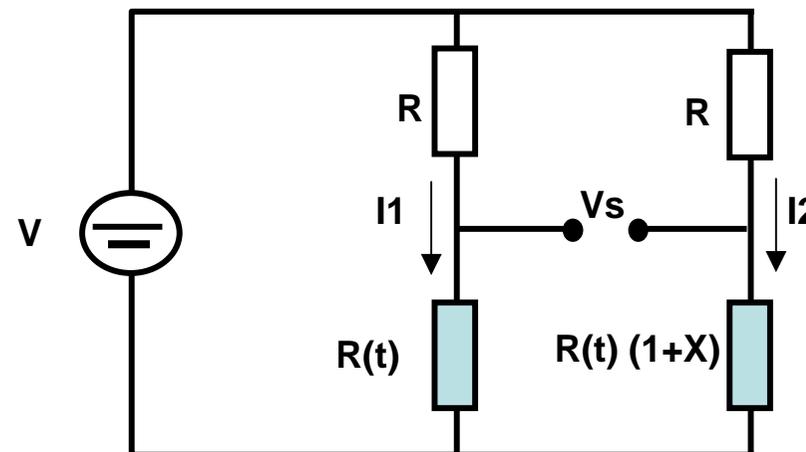
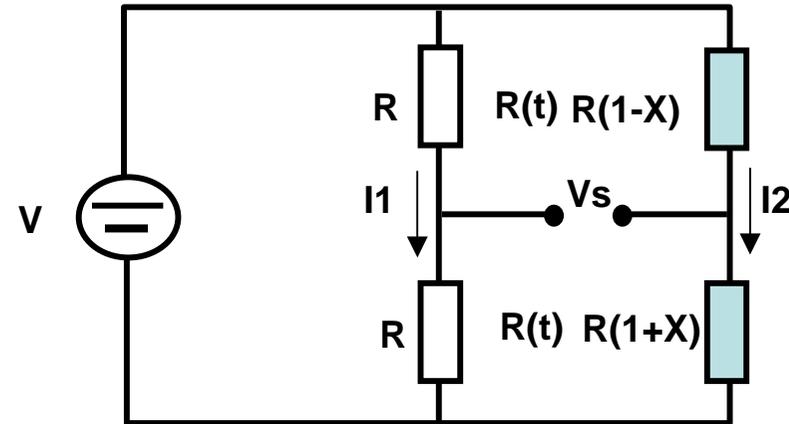
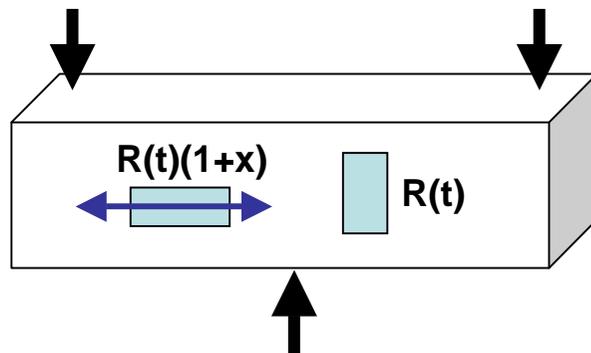
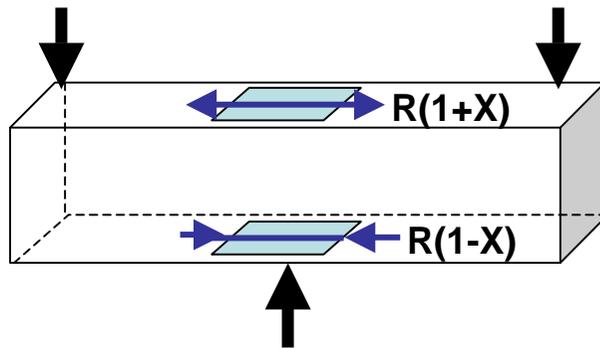
En este caso la tensión Vs es:

$$V_s = \frac{K \varepsilon V_e}{2}$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

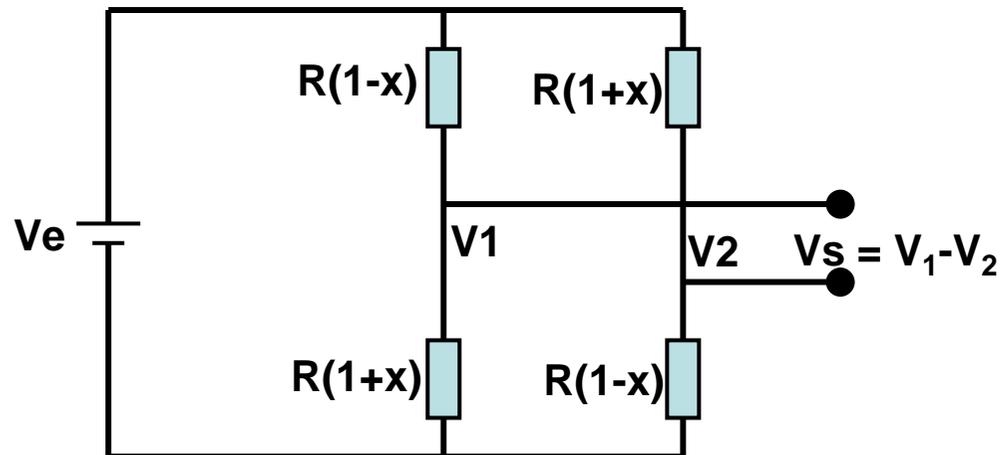
PUENTE CON DOS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS QUE COMPENSAN LAS VARIACIONES DE LA TEMPERATURA





CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE CUATRO SENSORES

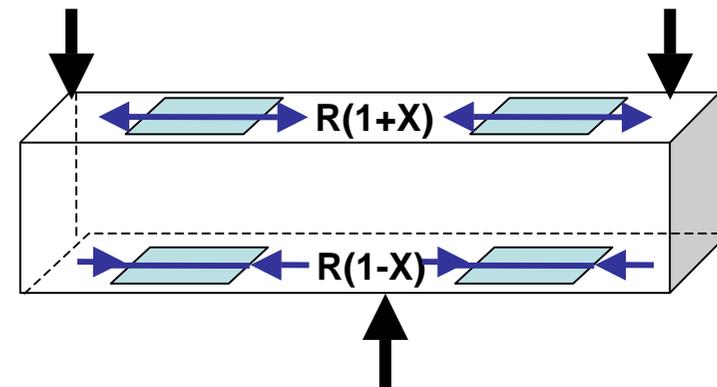


$$V_s = \frac{R(1+x)}{2R} - \frac{R(1-x)}{2R} \cdot V_e = x \cdot V_e$$

La sensibilidad del puente es:

$$S = \frac{dV_s}{dV_e} = x$$

Galgas extensiométricas



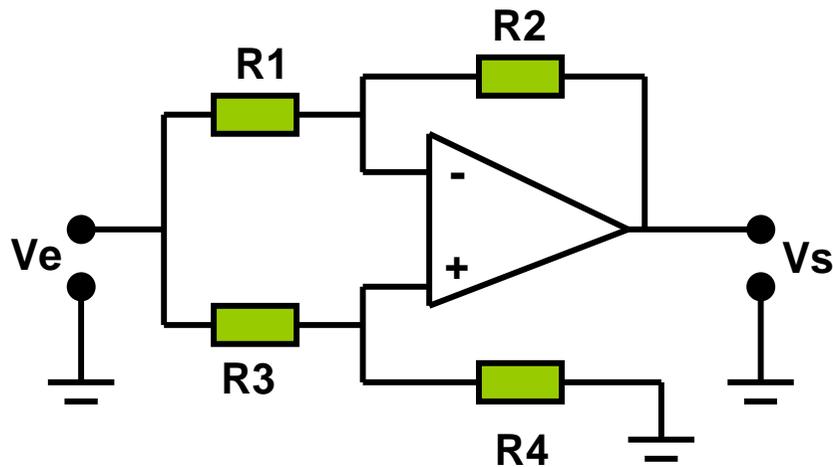
En este caso la tensión V_s es:

$$V_s = K \varepsilon V_e$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE RESISTIVO ACTIVO



$$V^- = V_s + \frac{(V_e - V_s) \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V^+ = V_e \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

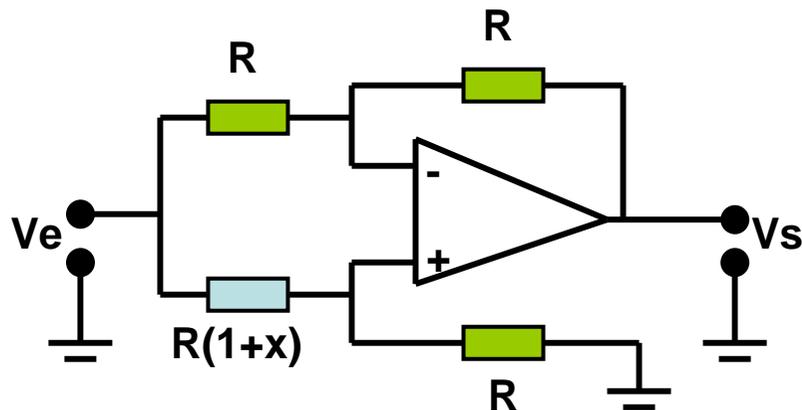
$$V_s = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_1 (R_3 + R_4)} V_e$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE RESISTIVO ACTIVO

Elemento sensor en R3



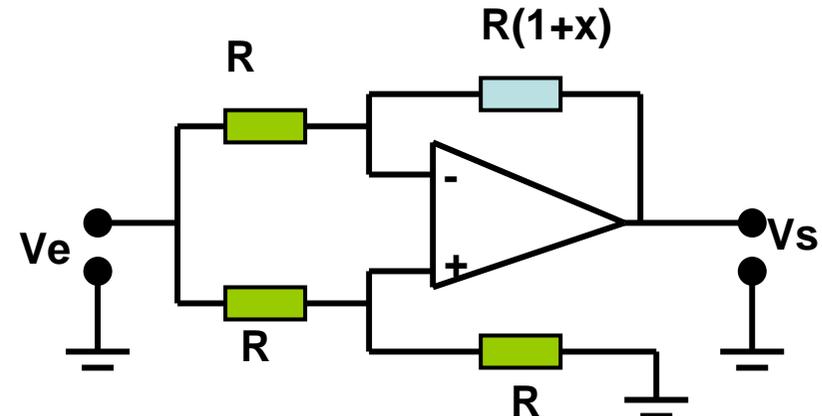
$$V_s = \frac{x}{2+x} V_e$$

Si x es pequeño:

$$V_s' = \frac{x}{2} V_e$$

$$S = \frac{x}{2}$$

Elemento sensor en R2



$$V_s = \frac{R - R(1+x)}{2R}$$

Si x es pequeño:

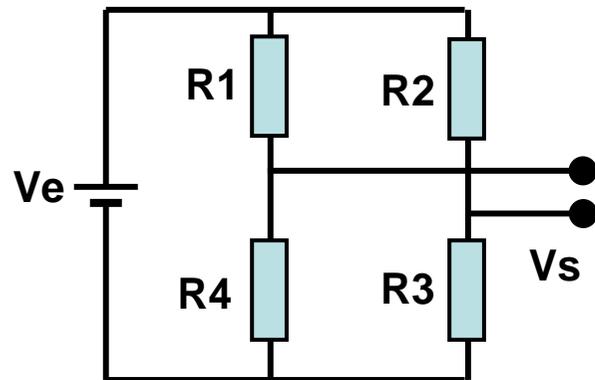
$$V_s' = -\frac{x}{2} V_e$$

$$S = -\frac{x}{2}$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

DIFERENTES COMBINACIONES DE RESISTENCIAS EN LOS DIVISORES DEL PUENTE



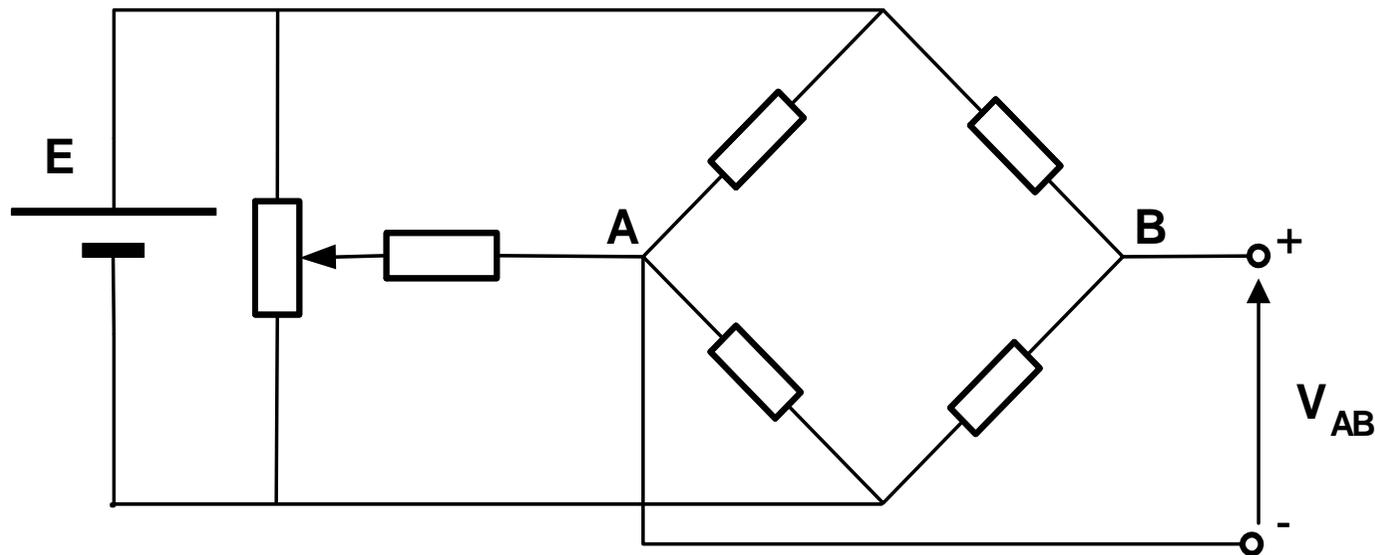
R1	R2	R3	R4	V_s cte	I cte
R_o	R_o	$R_o(1+x)$	R_o	$V \frac{x}{2(2+x)}$	$I R_o x/(x+4)$
$R_o(1+x)$	R_o	$R_o(1+x)$	R_o	$V \frac{x}{2+x}$	$I R_o x/2$
R_o	R_o	$R_o(1+x)$	$R_o(1-x)$	$V \frac{2x}{4-x^2}$	$I R_o x/2$
R_o	$R_o(1-x)$	$R_o(1+x)$	R_o	$V \frac{x}{2}$	$I R_o x/2$
$R_o(1+x)$	R_o	$R_o(1-x)$	R_o	$V \frac{-x^2}{4-x^2}$	$I R_o x^2/2$
$R_o(1-x)$	$R_o(1+x)$	$R_o(1-x)$	$R_o(1+x)$	$V x$	$I R_o x$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE WHEATSTONE CON AJUSTE DEL CERO

Para ajustar el nivel de la variable medida que produce una tensión de salida nula se puede utilizar un potenciómetro.



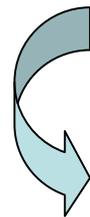
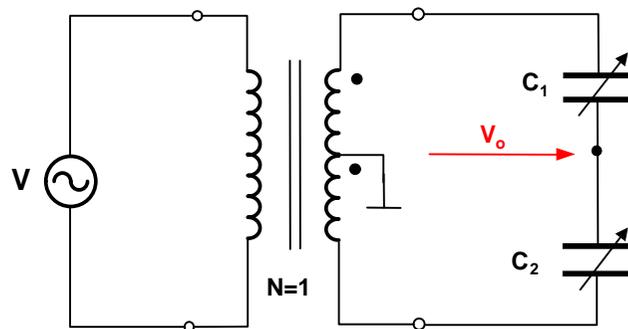


CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE ALTERNA CAPACITIVO

Se utiliza para eliminar la tensión fija que existe a la salida de un divisor de tensión, incluso cuando se basa en un sensor diferencial. Si se utilizan brazos resistivos, sus capacidades parásitas introducen errores. Por ello se utilizan puentes de alterna con transformador (ramas inductivas) en los que la toma central se conecta a tierra, para que las capacidades parásitas no influyan en el desequilibrio del puente.

La estructura en puente hace que cualquier cambio de las ramas adyacentes se cancele.



$$V_o = \frac{V}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

Condensador diferencial

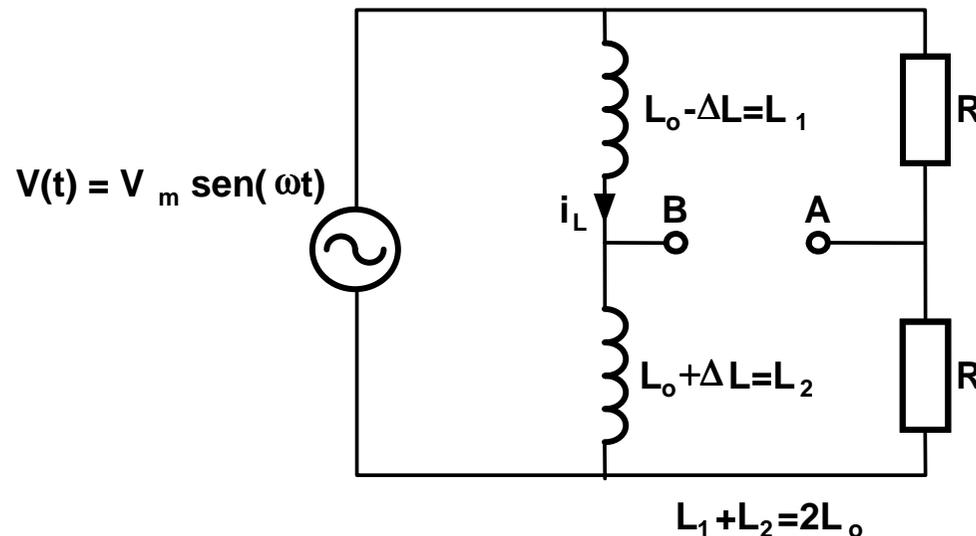
$$V_o = \frac{V}{\epsilon A} x \quad (\text{lineal})$$



CIRCUITOS ADAPTADORES

PUENTE DE ALTERNA INDUCTIVO

El circuito en puente es el más adecuado cuando se utilizan topologías diferenciales. La salida es lineal en función de la variación de inductancia si la distribución es la de la figura. Si se sitúan las resistencias en las dos ramas inferiores se obtiene un puente de alterna no lineal, pero se logra una sensibilidad doble para variaciones de L pequeñas.



$$V_B - V_A = \frac{\Delta L}{2L_0} V_m \text{ sen}(\omega \cdot t)$$



TIPOS DE CIRCUITOS ACONDICIONADORES

- Circuitos adaptadores
- **Circuitos amplificadores**
- Circuitos de excitación
- Circuitos convertidores de parámetro y formato



CIRCUITOS AMPLIFICADORES

Son circuitos que amplifican la señal proporcionada por un circuito adaptador o por un elemento sensor generador.

En función de las características de las señales que se deben amplificar se pueden utilizar amplificadores operacionales de aplicación general, amplificadores operacionales de características mejoradas o amplificadores especiales, que se describen en los temas 13 y 14.

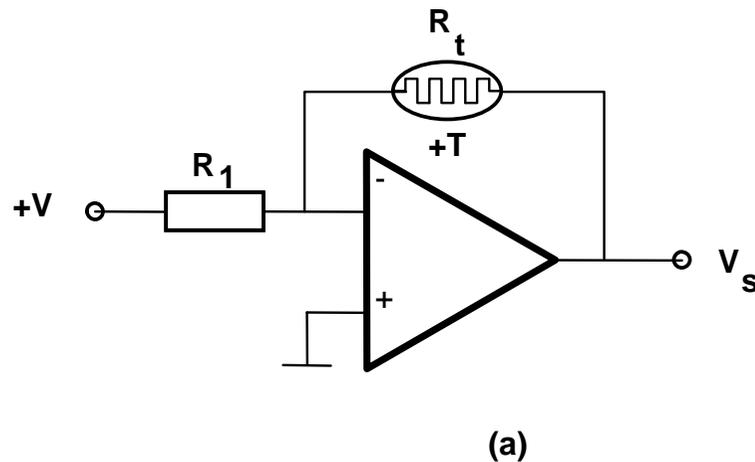


CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES MODULADORES

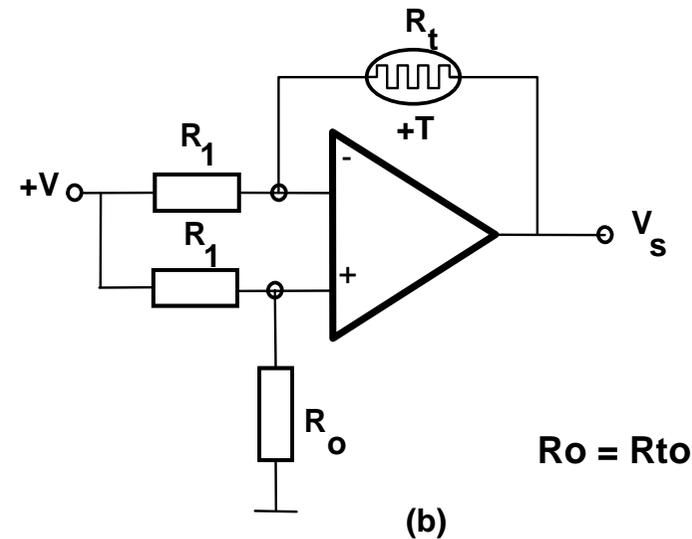
SENSORES RESISTIVOS DE GRAN SENSIBILIDAD. EJEMPLO: RTD

RTD con amplificador diferencial

RTD con amplificador inversor



$$V_s = - \frac{V R_o}{R_1} [1 + \alpha(t-t_o)]$$



$$V_s = - \frac{V \cdot R_o}{R_1 + R_o} \cdot \alpha(t-t_o)$$

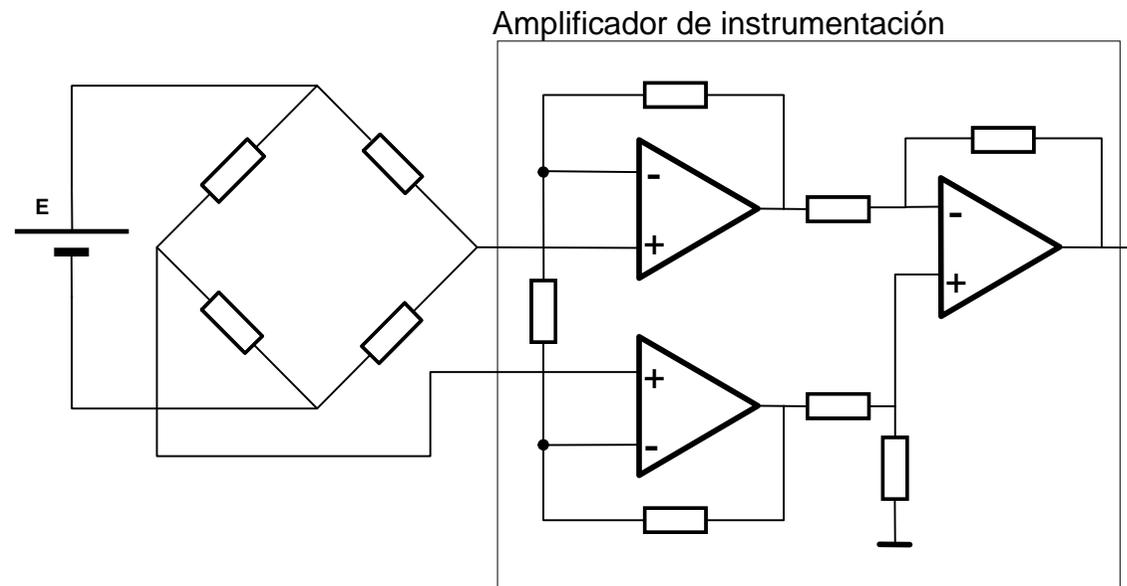


CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES MODULADORES MEDIANTE CIRCUITOS ADAPTADORES Y AMPLIFICADORES

SENSORES RESISTIVOS DE PEQUEÑA SENSIBILIDAD

Se suelen realizar mediante un puente de Wheatstone y un amplificador de instrumentación.

Ejemplo: Galga extensométrica (*Strain gage*)



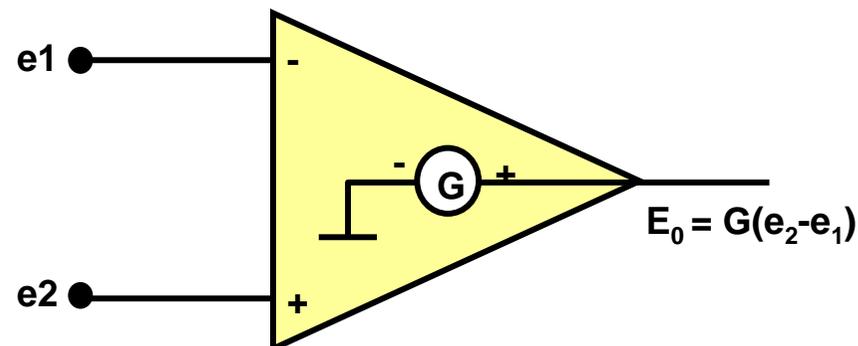


CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES MODULADORES

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

La mayoría de los sensores suministran una señal muy pequeña (algunos mV). En este caso la señal que generan se debe amplificar mediante un amplificador de instrumentación que, tal como se indica en el tema 14, posee unas características que lo asemejan a un amplificador ideal:

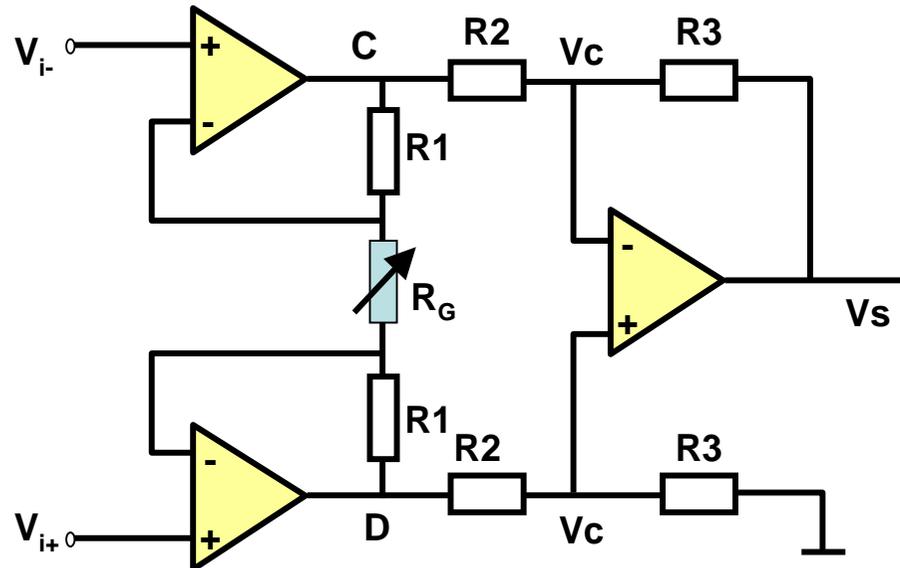
- Impedancia de entrada muy alta (infinita) e impedancia de salida muy baja (nula).
- Tensión de salida proporcional a la diferencia de tensiones de entrada ($e_2 - e_1$)
- Ganancia constante y muy precisa (no hay no linealidades).
- Ancho de banda "muy elevado".





CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES MODULADORES

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN (AI)



Configuración típica de un AI

Los terminales de entrada son las entradas no inversoras de los AO lo que proporciona una elevada impedancia de entrada. El tercer AO es un amplificador de modo diferencial y la ganancia global del conjunto se ajusta mediante la resistencia externa R_G .

La tensión de salida V_o en función de la tensión entre los dos terminales de entrada es:

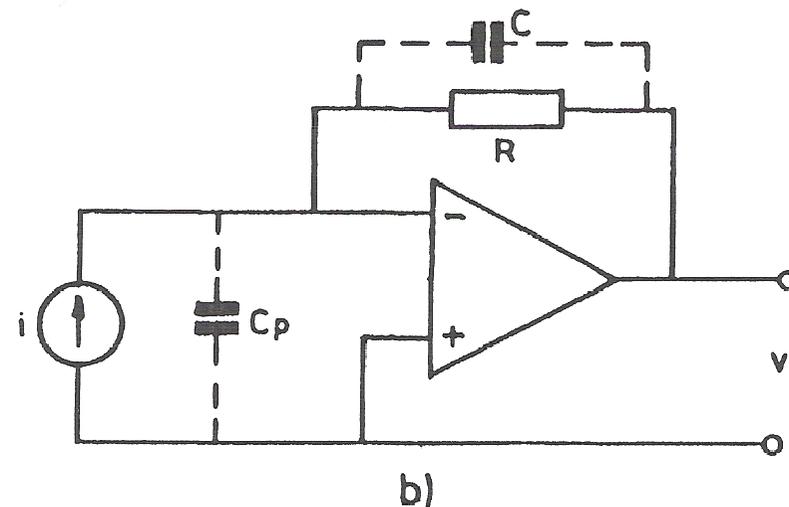
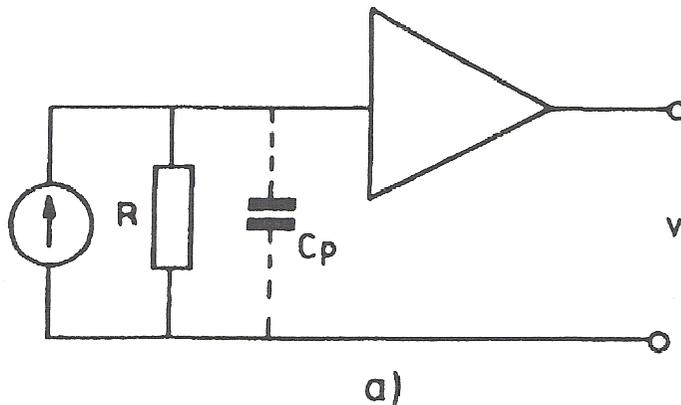
$$V_o = V_{DC} \cdot \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) (v_{i+} - v_{i-})$$



CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

AMPLIFICADOR ELECTROMÉTRICO

La medida de la corriente se puede realizar midiendo directamente la caída de tensión en una resistencia de valor elevado (Figura a) o realizando una conversión corriente-tensión mediante un amplificador de transimpedancia (Figura b). Los primeros presentan problemas de respuesta cuando el valor de la resistencia es muy elevado, por lo que en general se utilizan convertidores corriente-tensión.



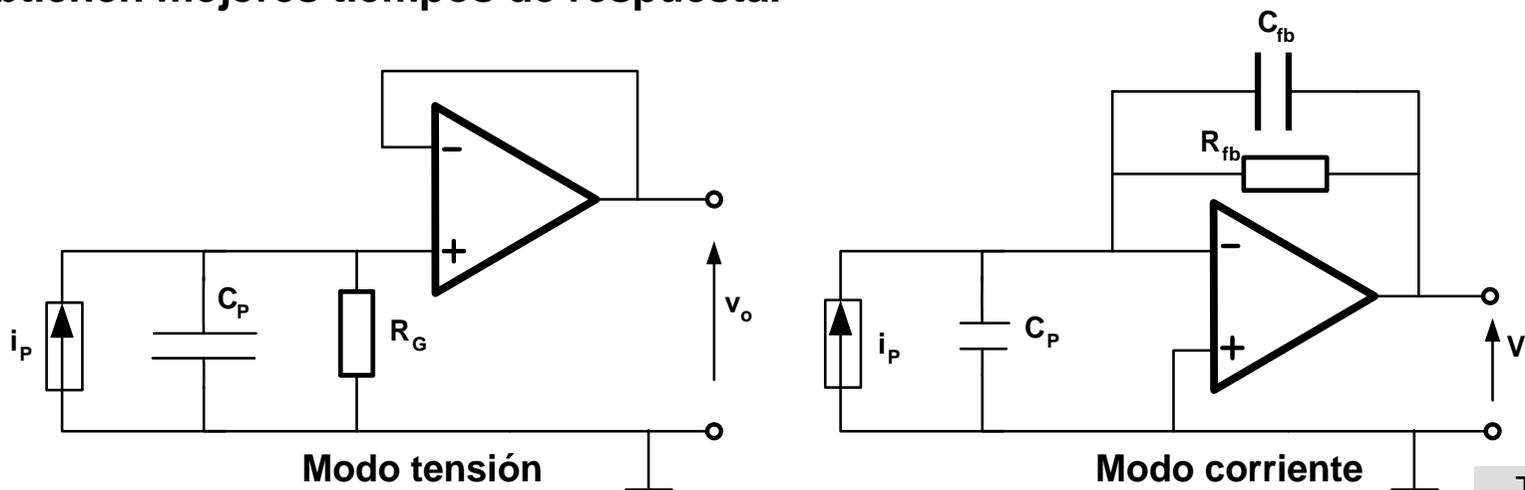


CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

APLICACIÓN DEL AMPLIFICADOR ELECTROMÉTRICO CON SENSORES PIROELÉCTRICOS

Los sensores piroeléctricos poseen una elevada impedancia de salida y proporcionan una corriente muy pequeña, lo que hace necesario amplificar la señal generada por ellos mediante un amplificador de alta impedancia de entrada (amplificador electrométrico).

El modo tensión se implementa con un seguidor de tensión y el modo corriente mediante un convertidor corriente-tensión. En el modo corriente la constante de tiempo puede ser menor y se obtienen mejores tiempos de respuesta.





CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

AMPLIFICADOR DE CARGA

Es un circuito amplificador que se utiliza para suministrar una tensión proporcional a la carga de un condensador (convertidor carga-tensión). Su impedancia de entrada es un condensador lo que hace que tenga una elevada impedancia de entrada a baja frecuencia. Se implementa mediante un amplificador de continua de características electrométricas, es decir, que tiene unas corrientes de polarización prácticamente nulas.



CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

APLICACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE CARGA CON SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

En los sensores piezoeléctricos la utilización de los amplificadores electrométricos o de carga es imprescindible para realizar medidas estáticas porque en ellas el sensor genera una energía que se disipa sin utilizar un condensador externo. Esto hace que la señal de salida se anule (hasta que se produce un nuevo cambio en la señal de entrada).

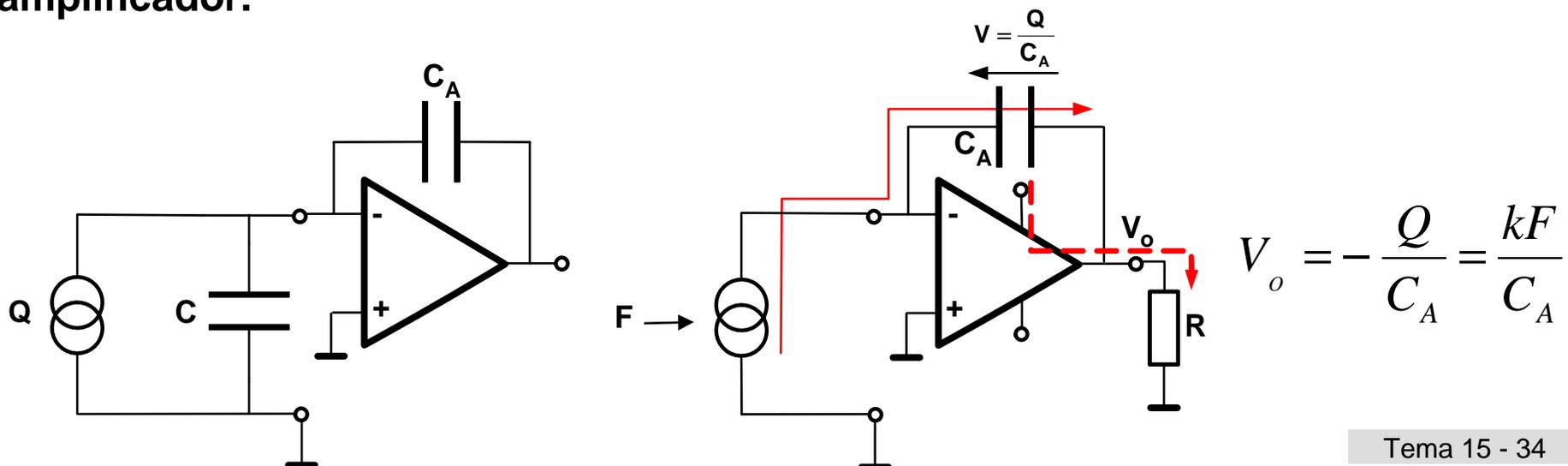
En general, los amplificadores de carga son la mejor opción ya que para obtener buenos resultados mediante amplificadores electrométricos es necesario que estén situados próximos al sensor.



CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

APLICACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE CARGA CON SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Mediante un amplificador de carga se consigue que la carga eléctrica Q , producida por una fuerza constante F aplicada al sensor, se acumule en forma de tensión en el condensador C_A . Esta tensión aparece directamente en la salida del amplificador con signo contrario, y se mantiene aunque la fuerza aplicada sobre el sensor permanezca constante. La capacidad del sensor desaparece porque se cortocircuita virtualmente a masa a través del amplificador.

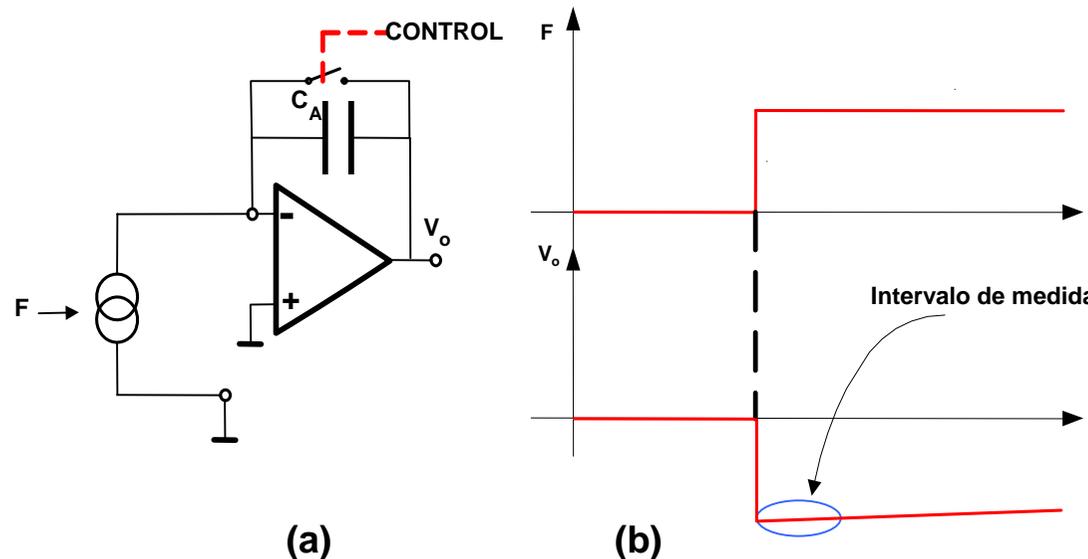




CIRCUITOS AMPLIFICADORES PARA SENSORES GENERADORES

APLICACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE CARGA CON SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Las tensiones de asimetría y las corrientes de polarización del amplificador ocasionan una rápida disminución de la tensión en bornes del condensador debida a la integración de los errores hasta llevar el amplificador a saturación. Debido a ello el circuito deja de amplificar la carga y la señal de salida no sigue a la de entrada. Para resolver este problema hay que garantizar que el condensador C_A está descargado antes de iniciar la medida. Para ello se utiliza un interruptor que cortocircuita el condensador de forma permanente excepto durante el tiempo de medida.



Para limitar los picos negativos de la tensión de salida se suele colocar una R en serie con la entrada aunque introduce retardos adicionales en la medida.