



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

TRANSPARENCIAS TEMA 2: Acondicionamiento de Sensores Resistivos (2ª PARTE)

Sensores resistivos. Objetivos (II)

- Saber realizar medidas usando divisores de tensión.
- Conocer las limitaciones del puente de Wheatstone.
- Describir el método de medidas por comparación usando puentes de Wheatstone.
- Realizar ejemplos de medidas por deflexión usando puentes de Wheatstone.
- Conocer los distintos tipos de amplificadores de instrumentación.
- Definir y calcular el CMRR de un circuito.

Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
3. Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión.
5. Amplificadores de instrumentación.

Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
3. Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión.
5. Amplificadores de instrumentación.

Medida de resistencias

- Los sensores resistivos están basados en la variación de la resistencia eléctrica.
- Medir la resistencia del sensor puede no ser trivial:
 - Es necesario alimentar el sensor. Es necesaria una fuente de energía externa (de valor y estabilidad adecuados).
 - La variación de resistencia puede ser muy pequeña, lo que implica una tensión “fija” alta, alrededor de la cual se ha de medir una “variable” pequeña.
- Los métodos de medida se clasifican en dos grupos: de deflexión y de comparación.

Medida de resistencias

- Medida por comparación:
 - Se compara la variación de la magnitud con un valor conocido hasta compensar.

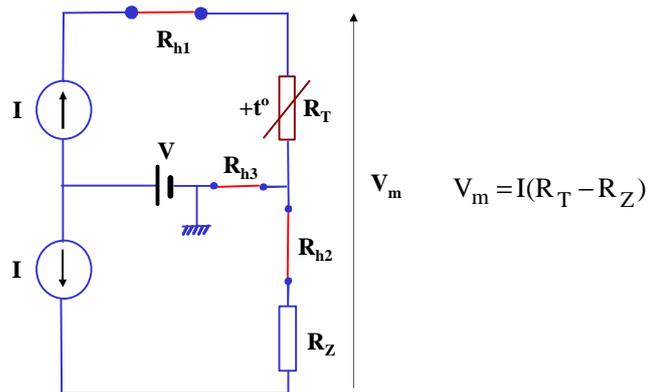


- Medida por deflexión:
 - Se deja que la magnitud provoque una variación y se intenta averiguar el valor correspondiente a dicha variación.



Medida de resistencias

- Medida con fuentes de corriente



7

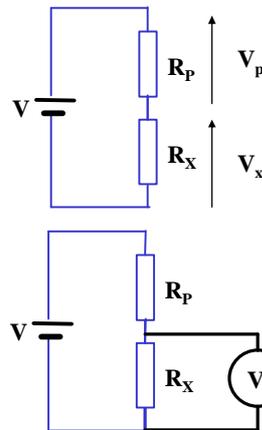
Medida de resistencias

- Medida con doble lectura

$$R_X = R_P \frac{V_X}{V_P}$$

- Divisor de tensión

$$V_X = R_X \frac{V}{R_P + R_X}$$



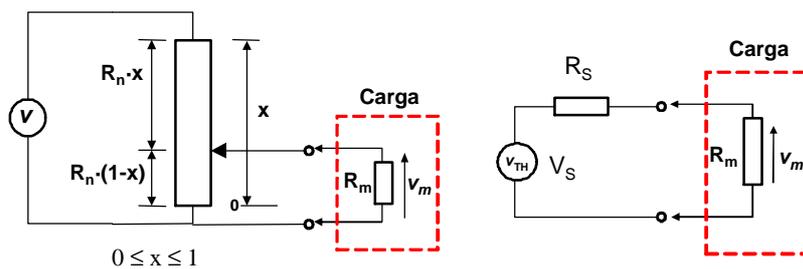
8

Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
 1. - Potenciómetros.
 2. - Aplicación a termistores.
3. Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión.
5. Amplificadores de instrumentación.

Divisores de tensión

- Uso de potenciómetros



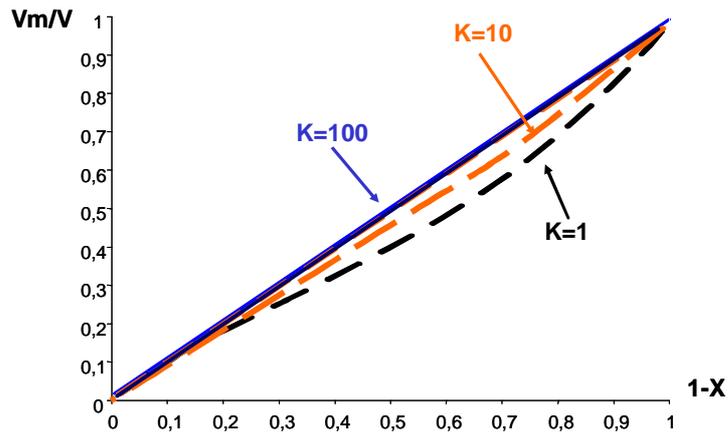
$$V_S = V(1-x)$$

$$R_S = R_n x(1-x)$$

$$V_m = \frac{V(1-x)}{R_n x(1-x) + R_m} R_m = \frac{V\alpha}{\frac{\alpha(1-\alpha)}{k} + 1} R_m$$

Divisores de tensión

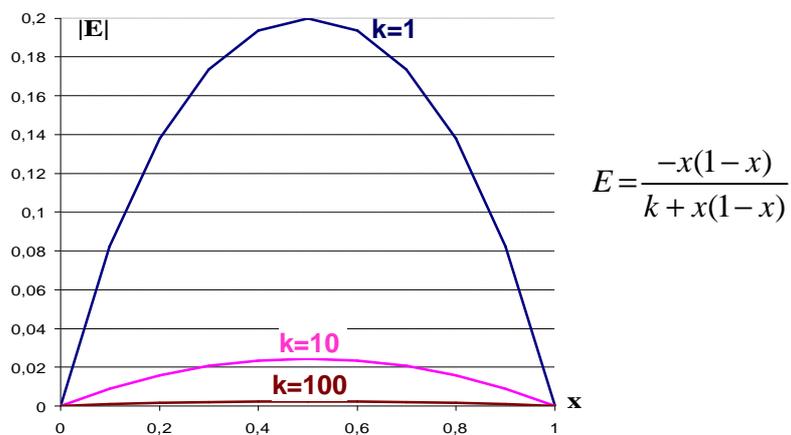
- Variación de la tensión entre contacto móvil y el fijo para distintos valores de k



11

Divisores de tensión

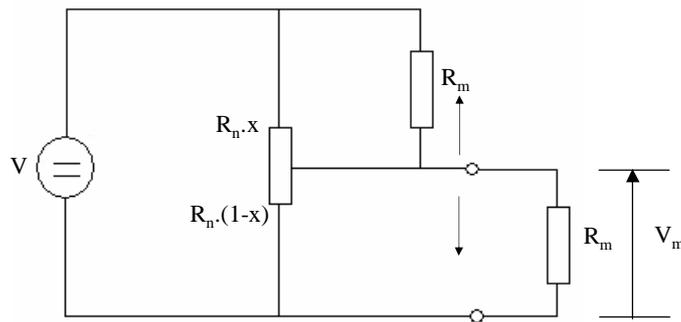
- Error relativo



12

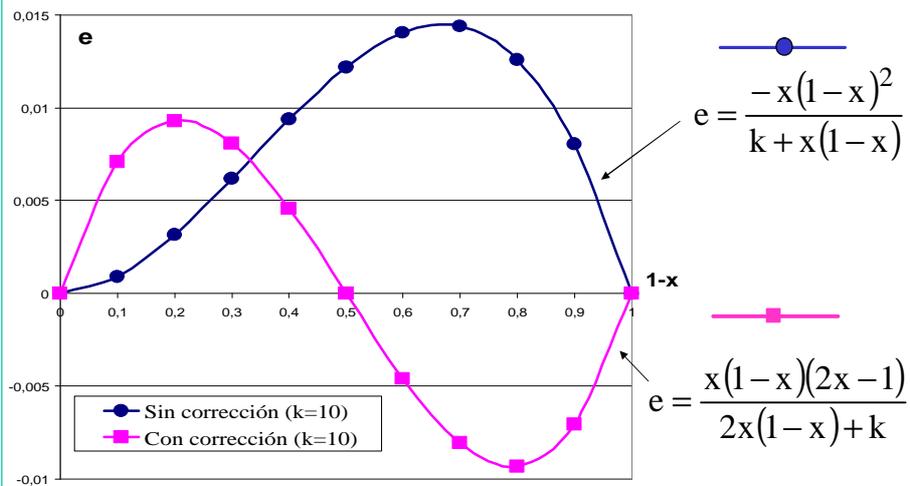
Divisores de tensión

- Reducción del error de carga



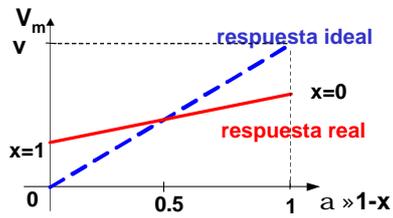
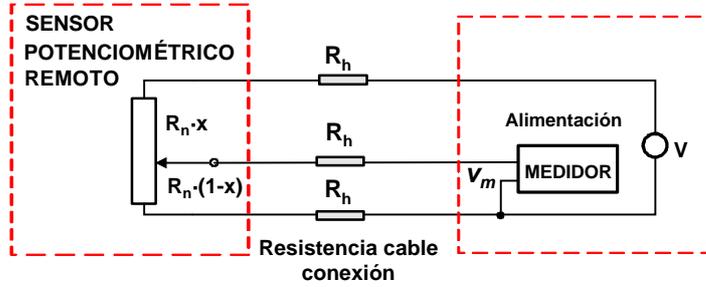
Divisores de tensión

- Error absoluto



Divisores de tensión

Influencia de los hilos de conexión

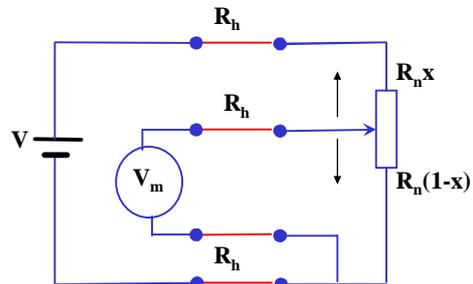


Divisores de tensión

Circuito de medida de 4 hilos

$$x = 0 \Rightarrow V_m = \frac{R_n}{R_n + 2R_h}$$

$$x = 1 \Rightarrow V_m = 0$$



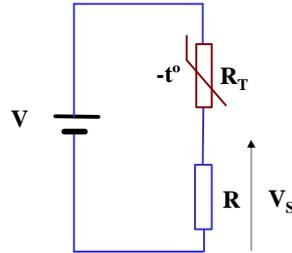
Aplicación a termistores

- Termistor en divisor de tensión

$$V_s = V \frac{R}{R_T + R} = \frac{V}{1 + \frac{R_T}{R}}$$

$$\frac{R_T}{R} = \frac{R_0}{R} f(T) = s f(T)$$

$$V_s = \frac{V}{1 + s f(T)} = V F(T)$$



Curvas de un termistor

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = R_0 f(T)$$

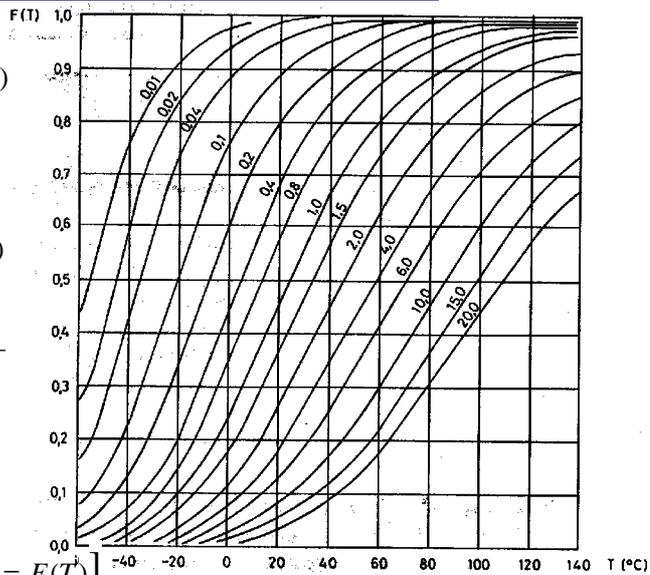
$$\frac{R_T}{R} = \frac{R_0}{R} f(T) = s f(T)$$

$$V_s = \frac{V}{1 + s f(T)} = V F(T)$$

$$R_p = R_T // R = \frac{R_T R}{R_T + R}$$

$$= R \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R_T}{R}} \right) =$$

$$= R \left(1 - \frac{1}{1 + s f(T)} \right) = R [1 - F(T)]$$

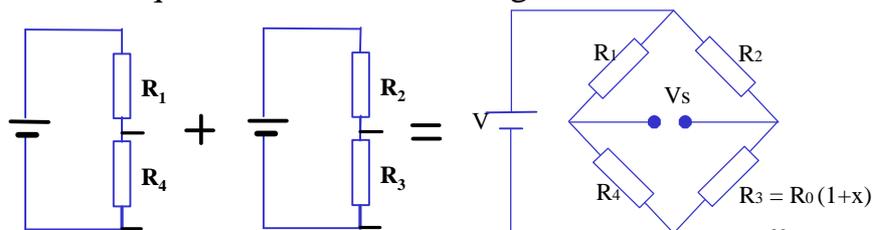


Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
3. Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión.
5. Amplificadores de instrumentación.

Medida con puentes

- ¿Qué es un puente de Wheatstone?:
 - Es un circuito con dos divisores de tensión.
- ¿Qué ventaja presenta?:
 - El brazo fijo genera una tensión constante que cancela el valor de reposo del sensor. Se obtiene una señal que varía sólo con la magnitud a medir.



Medida con puentes

- Medida por comparación:
 - Se compara la variación de la magnitud con un valor conocido hasta compensar.



- Medida por deflexión:
 - Se deja que la magnitud provoque una variación y se intenta averiguar el valor correspondiente a dicha variación.



21

Puente de Wheatstone.

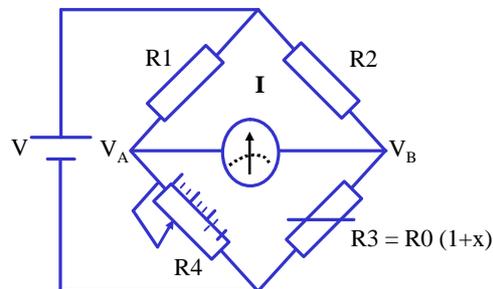
Medidas por comparación.

Circuito básico.

- En el equilibrio:

$$V_A = V_B ; I = 0$$

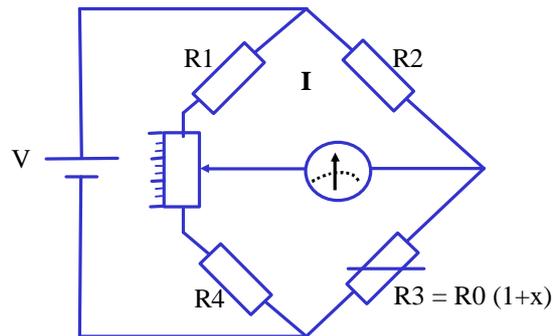
$$R_3 = R_4 \frac{R_2}{R_1}$$



22

Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.

- Disposición para eliminar la influencia en la medida de la resistencia de contacto en el brazo ajustable.

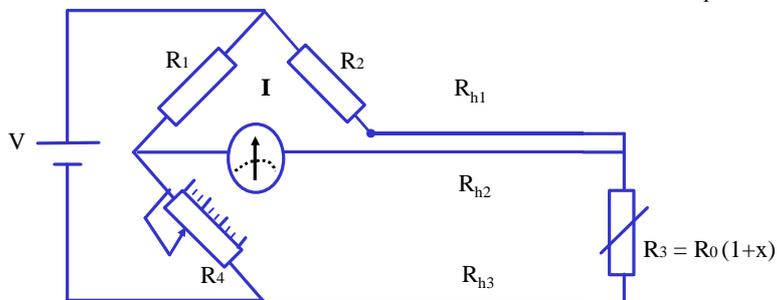


23

Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.

- Influencia de los hilos de conexión (I)

$$R'_3 = R_4 \frac{R'_2}{R_1} \begin{cases} R'_2 = R_2 + R_{h1} \\ R'_3 = R_3 + R_{h3} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Si } R_{h1} = R_{h3} = R_h \\ R_3 = R_4 \frac{R_2 + R_h}{R_1} - R_h \end{matrix}$$

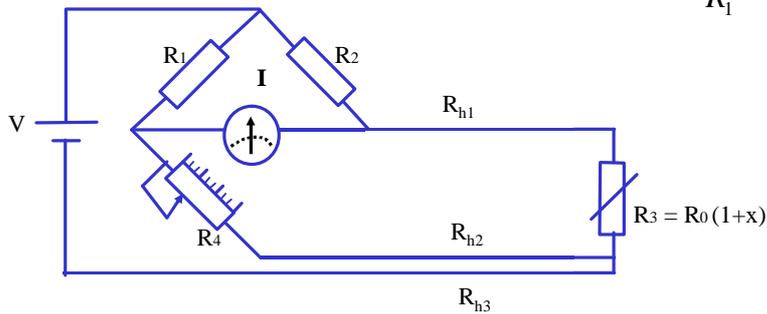


24

Puente de Wheatstone. *Medidas por comparación.*

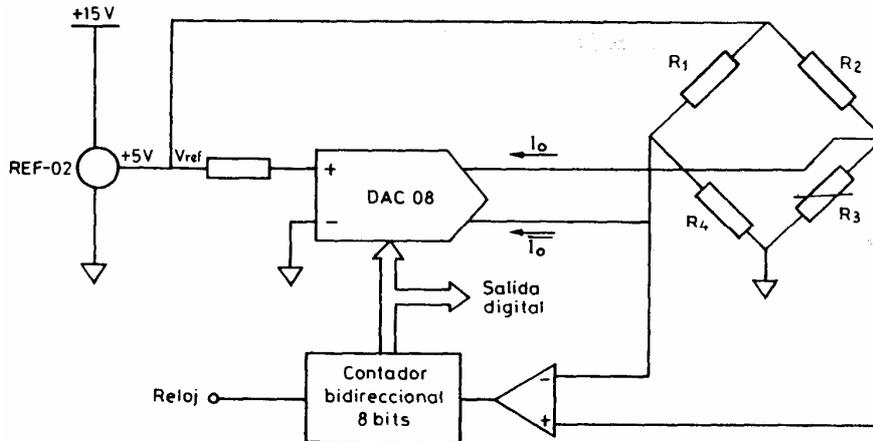
- Influencia de los hilos de conexión (II)

$$R_3' = R_4' \frac{R_2}{R_1} \begin{cases} R_3' = R_3 + R_{h1} & \text{Si } R_{h1} = R_{h2} = R_h \\ R_4' = R_4 + R_{h2} & R_3 = (R_4 + R_h) \frac{R_2}{R_1} - R_h \end{cases}$$



Puente de Wheatstone. *Medidas por comparación.*

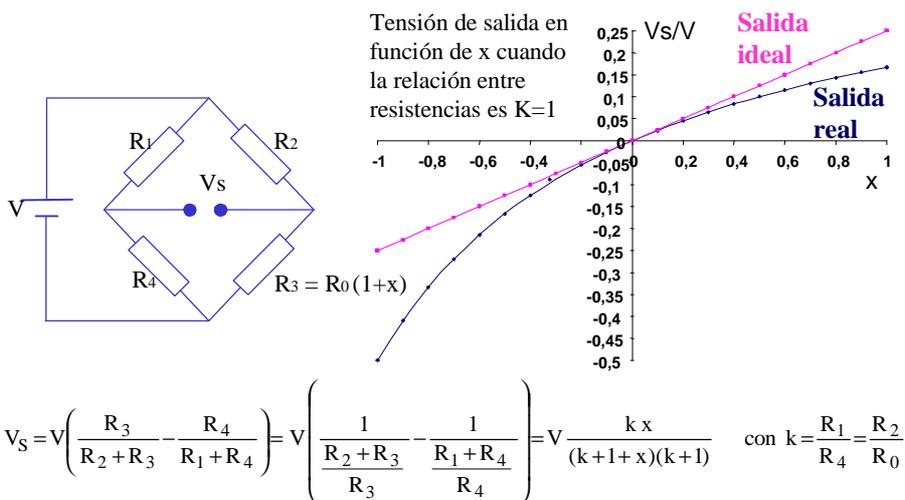
- Ajuste rápido del cero



Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
3. Punte de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Punte de Wheatstone. Medidas por deflexión.
 1. - Sensibilidad y linealidad.
 2. - Linealización analógica.
 3. - Calibración y ajuste.
 4. - Medidas diferenciales y medias.
 5. - Alimentación de puentes de Wheatstone.
 6. - Alternativas para la detección
5. Amplificadores de instrumentación.

Punte de Wheatstone. *Medidas por deflexión. Linealidad*



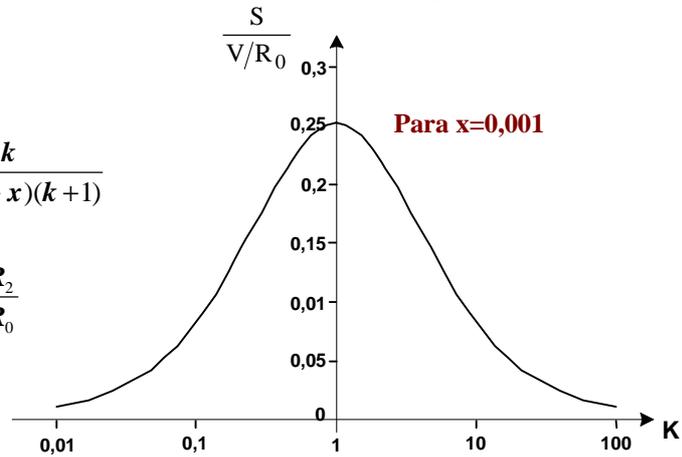
Puente de Wheatstone.

Variación de la sensibilidad en función de K

$$S = \frac{V_s}{x R_0}$$

$$S = \frac{V}{R_0} \frac{k}{(k+1+x)(k+1)}$$

$$\text{con } k = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$



Sensibilidad máxima en $K=1$

Puente de Wheatstone.

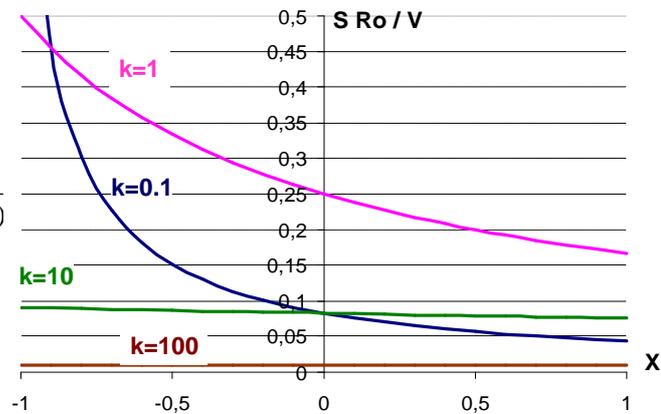
Medidas por deflexión

- Sensibilidad para diferentes valores de k

$$S = \frac{V_s}{x R_0}$$

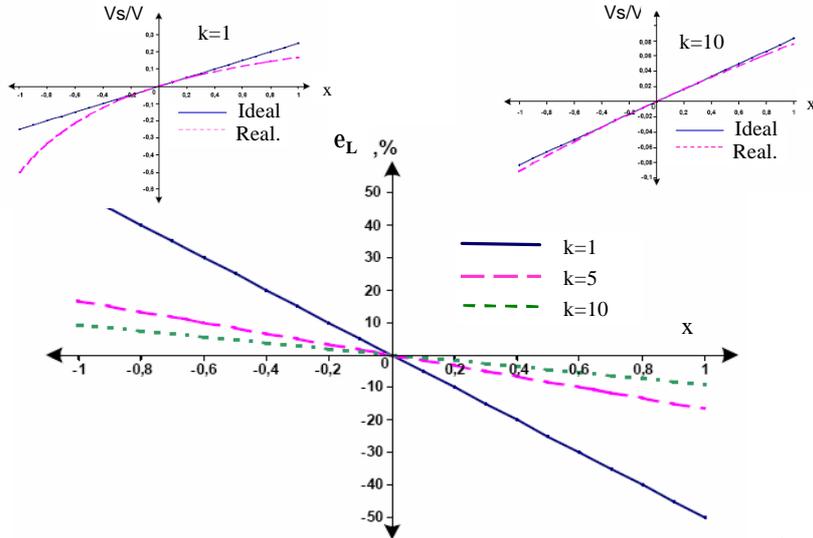
$$S = \frac{V}{R_0} \frac{k}{(k+1+x)(k+1)}$$

$$\text{con } k = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$



Puente de Wheatstone.

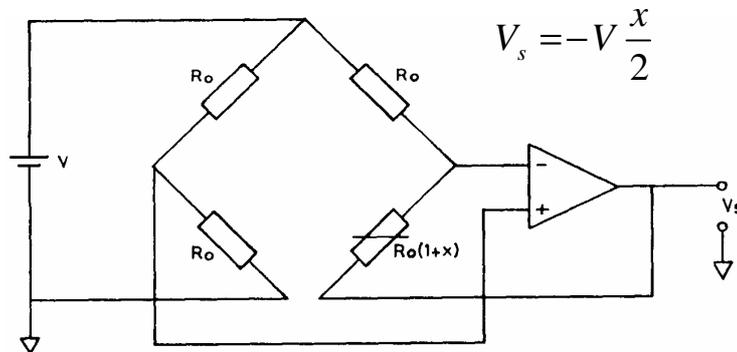
Error relativo de linealidad en función de K



Puente de Wheatstone.

Medidas por deflexión

- Linealización analógica

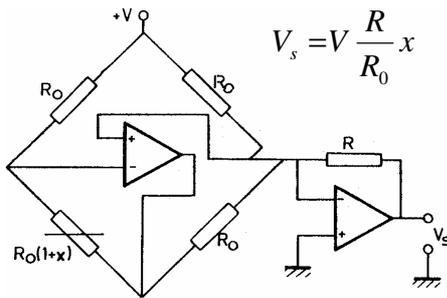


• **Circuito 1**

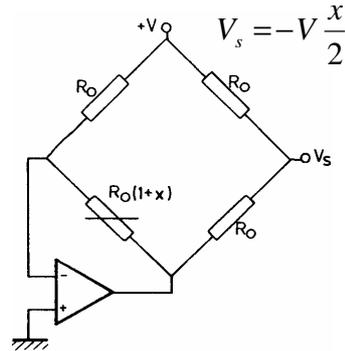
Puente de Wheatstone.

Medidas por deflexión

- Linealización analógica



• **Circuito 2**

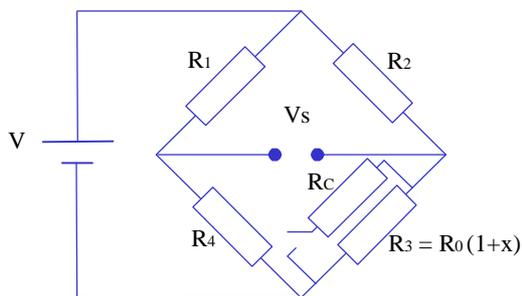


• **Circuito 3**

Puente de Wheatstone.

Medidas por deflexión

- Calibración



Si interpretamos :

$$\frac{R_0 R_C}{R_0 + R_C} = R_0 (1 + x)$$

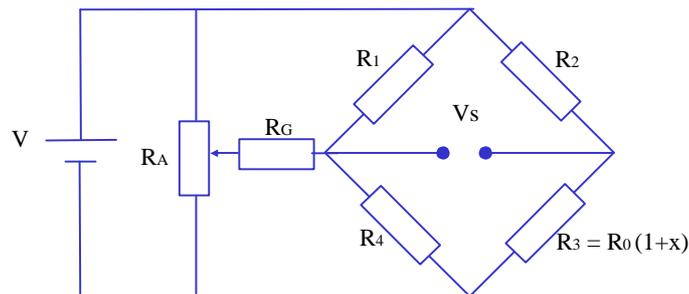
$$x = -\frac{R_0}{R_0 + R_C}$$

entonces :

$$S = \frac{V_s}{x R_0} = -\frac{V_s}{R_0} \left(1 + \frac{R_C}{R_0} \right)$$

Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión

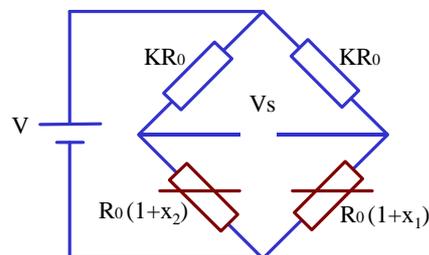
- Ajuste de k



35

Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión

- Medidas diferenciales



$$V_s = V \frac{k(x_1 - x_2)}{(k+1+x_1)(k+1+x_2)}$$

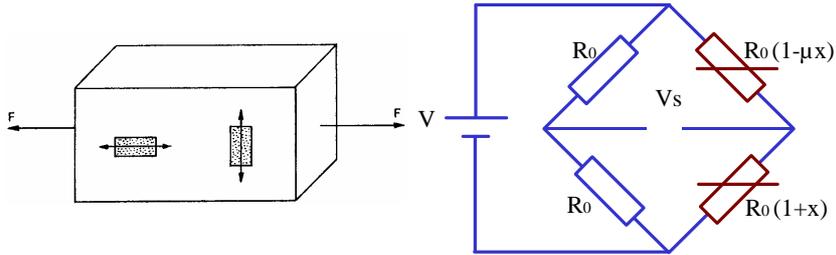
si $x_1, x_2 \ll k+1$:

$$V_s \approx V \frac{k}{(k+1)^2} (x_1 - x_2)$$

36

Puente de Wheatstone. *Medidas por deflexión*

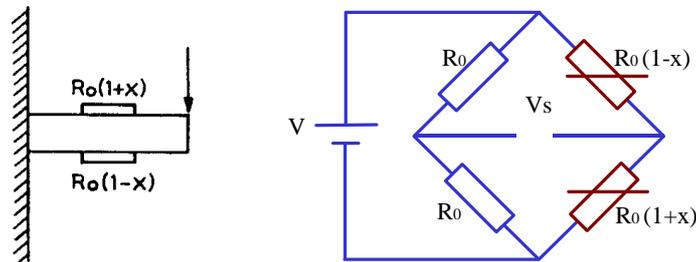
- Aumento de sensibilidad



$$V_s = V \frac{x(1+\mu)}{2[2+x(1+\mu)]} \Rightarrow V_s \approx V \frac{x(1+\mu)}{4}$$

Puente de Wheatstone. *Medidas por deflexión*

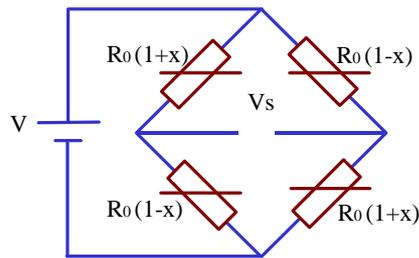
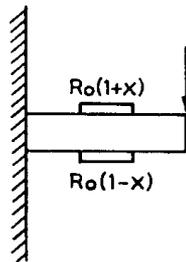
- Aumento de sensibilidad y linealidad



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

Puente de Wheatstone. *Medidas por deflexión*

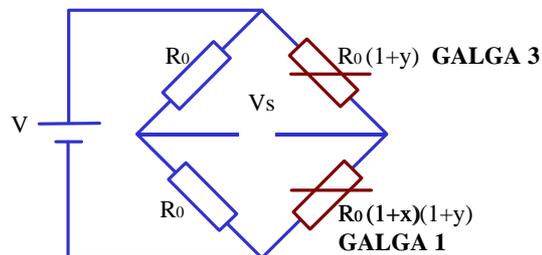
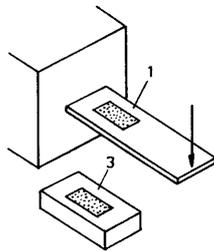
- Aumento de sensibilidad y linealidad (II)



$$V_s = V \cdot x$$

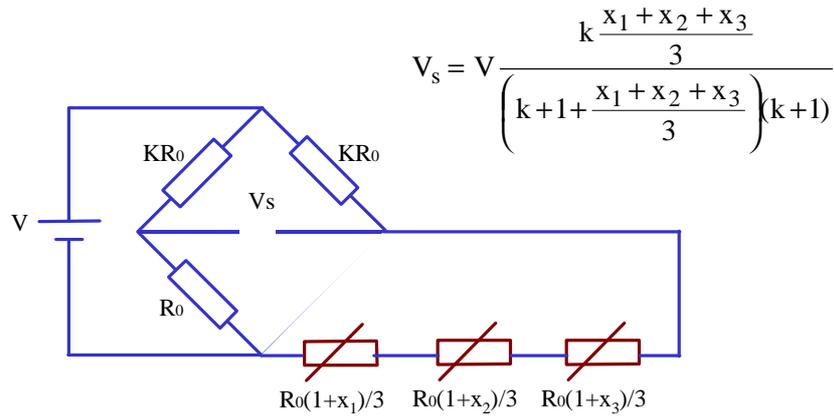
Puente de Wheatstone. *Medidas por deflexión*

- Compensación de temperatura



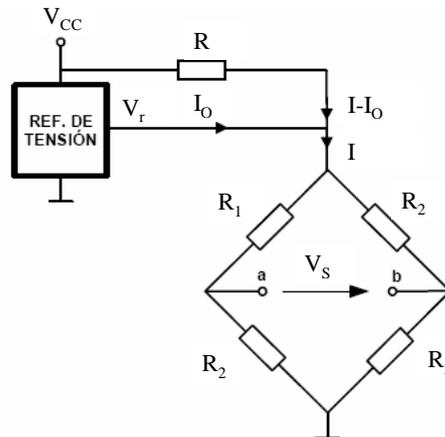
Puente de Wheatstone. *Medidas por deflexión*

- Medida de valores medios



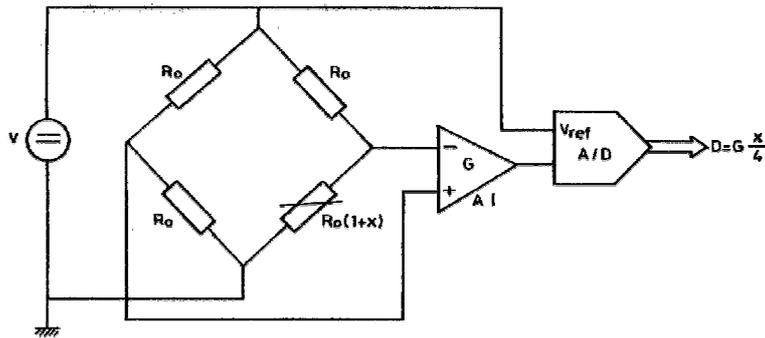
Puente de Wheatstone. *Alimentación*

- Aumento de la corriente de alimentación



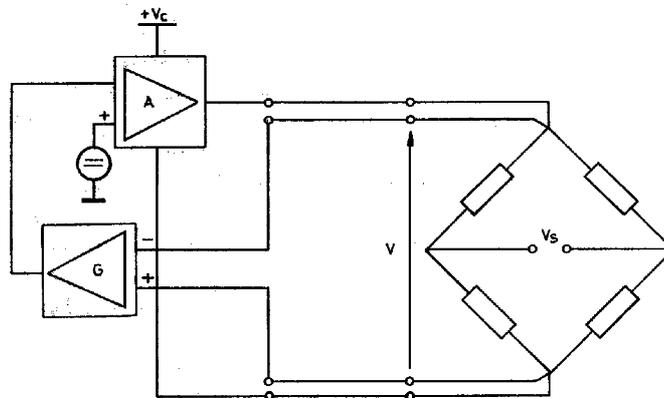
Puente de Wheatstone. Alimentación

- Medidas por relación o radiométricas



Puente de Wheatstone. Alimentación

- Medidas a cuatro hilos



Acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

1. Medida de resistencias.
2. Divisores de tensión.
3. Puente de Wheatstone. Medidas por comparación.
4. Puente de Wheatstone. Medidas por deflexión.
5. Amplificadores de instrumentación.
 1. - Amplificadores diferenciales.
 2. - Amplificador de instrumentación con dos operacionales.
 3. - Amplificador de instrumentación con tres operacionales.

Acondicionamiento General

- Amplificador adecuado para la salida de un puente:
 - El puente tiene dos salidas, el amplificador ha de tener dos terminales de entrada.
 - Como la alimentación del puente tiene un terminal a masa, el amplificador no puede tener una de las entradas a masa.
 - La impedancia de las entradas ha de ser alta e igual.
- Este amplificador recibe el nombre de diferencial.

Acondicionamiento General

- Amplificador diferencial con un único operacional.

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1}E_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3+R_4}E_2$$

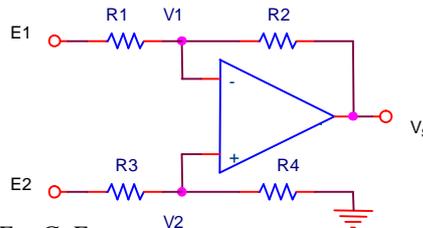
$$\text{Si sustituimos: } \begin{cases} E_d = E_2 - E_1 \\ E_c = \frac{E_1 + E_2}{2} \end{cases}$$

la tensión de salida vale: $V_s = G_c E_c + G_d E_d$

con:

$$G_c = \frac{V_s}{E_c} \Big|_{E_d=0} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

$$G_d = \frac{V_s}{E_d} \Big|_{E_c=0} = \frac{1}{2} \left[\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$



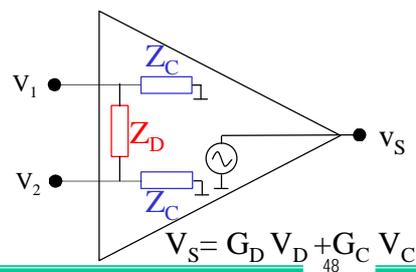
Acondicionamiento General

- Modelo con las propiedades diferenciales
 - El término G_c se denomina ganancia en modo común.
 - El término G_d se denomina ganancia en modo diferencial.
- El CMRR es la capacidad del circuito de rechazar la señal en modo común.

$$CMRR = \frac{G_d}{G_c}$$

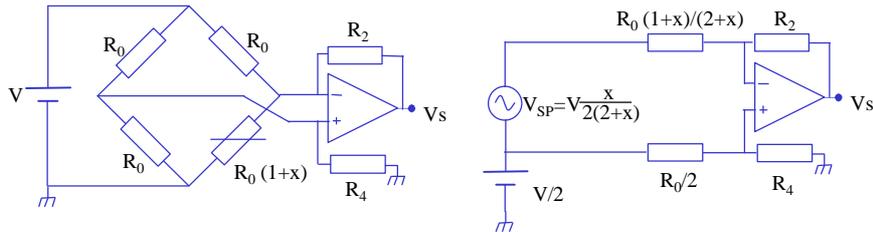
Para el operacional real:

$$\frac{1}{CMRR_{TOTAL}} = \frac{1}{CMRR_{RED}} + \frac{1}{CMRR_{AO}}$$



Acondicionamiento General

- Puente con amplificador diferencial



Esquema

Circuito equivalente

$$CMRR \approx \frac{1 + 2 \frac{R}{R_0}}{\frac{x}{2}} \quad \text{si } R_2 = R_4 = R$$

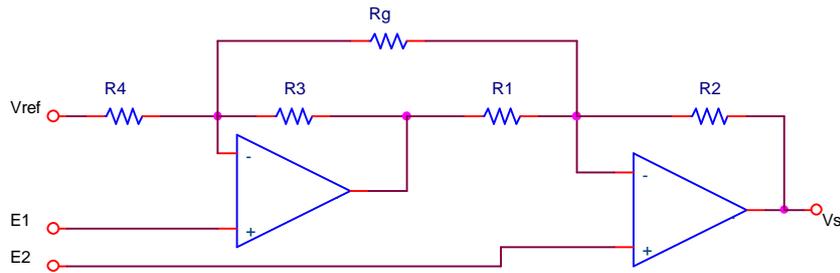
Acondicionamiento General

Amplificador de instrumentación

- Es un circuito que cumple:
 - Alta impedancia de entrada
 - Alto rechazo del modo común
 - Ganancia estable y variable con un resistor
 - Sin contraposición de ganancia y ancho de banda
 - Tensión y corrientes de desequilibrio bajas y con pocas derivas
 - Impedancia de salida baja

Acondicionamiento General

- Amplificador de instrumentación con dos operacionales



$$V_S = E_d \left(1 + k + \frac{R_2 + R_4}{R_g} \right) + E_{ref} \quad \text{con } k = \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

Acondicionamiento General

- Amplificador de instrumentación con tres operacionales

Si hacemos $k = \frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6}$

G_c vale

$$G_c = \frac{k}{1+k}$$

y si se cumple que

$$\frac{2R_1}{R_2} = \frac{2R_3}{R_2} = G$$

entonces G_d vale

$$G_d = k(1+G)$$

