

MEDICIÓN E INSTRUMENTACIÓN

SENSORES RESISTIVOS

Roberto Giovanni Ramírez-Chavarría

`RRamirezC@iingen.unam.mx`

Elaborado gracias al Proyecto PAPIME PE115319

2020



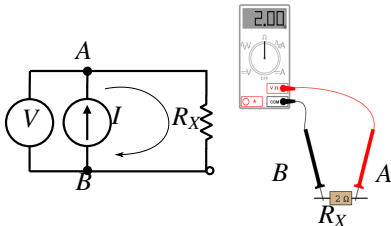
Sensores Resistivos

- Varían su resistencia eléctrica en función de la variable a medir.
- Eléctricamente simples de analizar.
- Medición de temperatura, luz, humedad, posición, campo magnético, etc...
- Técnicas de medición de resistencia eléctrica?

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Medición a dos puntas Ohmetro Ideal (MULTÍMETRO)

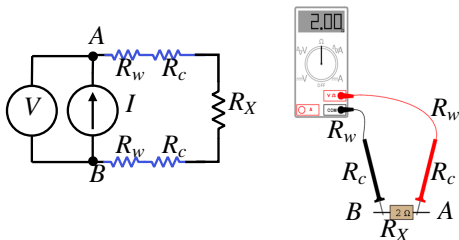


- Fuente de corriente I : Fluye por R_x
 - Resistencia a medir R_x
- Voltmetro V : Mide el voltaje en R_x
 - Puntas A y B

Con ley de Ohm $R_x = V/I$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Medición a dos puntas Ohmetro Real (MULTÍMETRO)
Sin embargo, existen elementos que afectan la medición



- Resistencias de contacto R_c
- Resistencias de los cables R_w

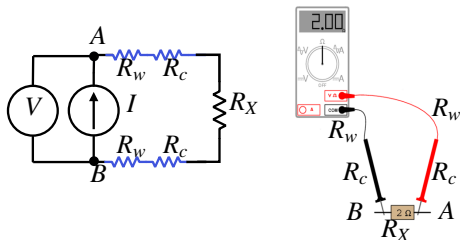
Forman una resistencia equivalente (están en serie)

$$R_{eq} = R_x + 2 \cdot R_c + 2 \cdot R_w$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Medición a dos puntas Ohmetro Real

Sin embargo, existen elementos que afectan la medición



Por lo que el voltaje medido es (ley de Ohm)

$$V = I \underbrace{(R_X + 2 \cdot R_c + 2 \cdot R_w)}_{R_{eq}}$$

En donde el error es $\epsilon = 2 \cdot R_c + 2 \cdot R_w$, ya que se está añadiendo a la variable de interés R_X

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Medición a dos puntas Ohmetro Real

R_c y R_w son de valor bajo $< 10\Omega$, pero si R_x también lo es, el error ϵ será grande.

Minimización del error

- 1 Antes de medir R_x , ponemos la puntas A y B en corto circuito (las juntamos) y medimos V_1

$$V_1 = I (R_c + 2 \cdot R_w)$$

- 2 Colocamos a R_x en el circuito y medimos V_2

$$V_2 = I (R_x + 2 \cdot R_c + 2 \cdot R_w)$$

- 3 Restamos

$$V_2 - V_1 = I (R_x + R_c)$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Medición a dos puntas Ohmetro Real

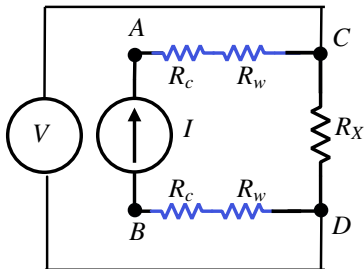
$$V_2 - V_1 = I(R_x + R_c)$$

Eliminamos la resistencia de los cables pero aún así queda la de contacto.

**EL MÉTODO DE 2 PUNTAS NO SIRVE CUANDO
NECESITAMOS MEDIR RESISTENCIAS PEQUEÑAS
(ALTA PRECISIÓN)**

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

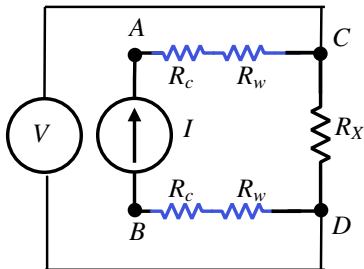
Medición a cuatro puntas



- La corriente I se aplica por las puntas A y B
- El voltaje en el resistor R_x se mide en las puntas C y D .

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Medición a cuatro puntas



- Únicamente se mide la caída de potencial en el resistor de interés.

$$V = IR_x$$

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Medición a cuatro puntas

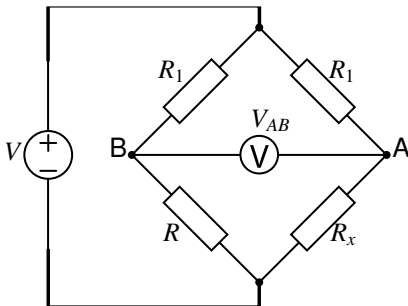
Permite medir resistencia de valor bajo o cuando se requiere alta precisión.

Muchos sensores resistivos varían su resistencia en décimas, centésimas o milésimas de ohms.

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone: Cuatros resistores en configuración puente

Implementación común del método de cuatro puntas



Entrada del puente: R_x

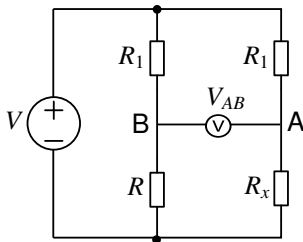
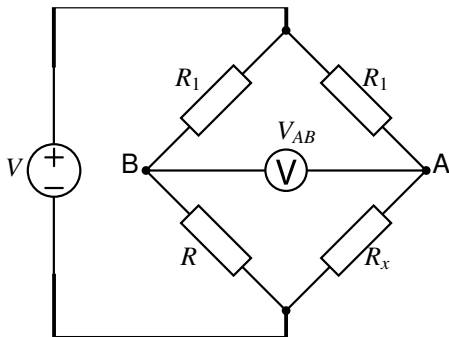
Salida del puente: V_{ab}

$$R_x := f(V_{AB})$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Figura izq. y der. son exactamente iguales (observalo!)

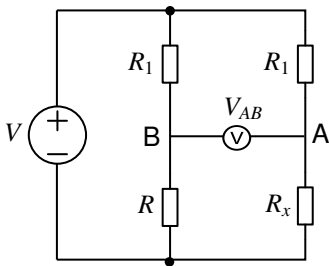


Debemos obtener una expresión para el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B



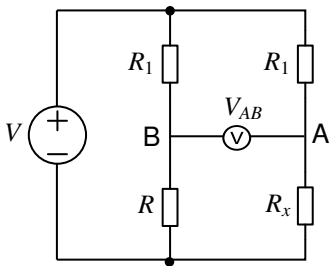
Calcular el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B



$$V_B = V \left(\frac{R}{R_1 + R} \right)$$

Calcular el voltaje V_{AB}

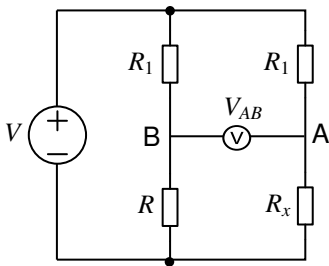
Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B

$$V_B = V \left(\frac{R}{R_1 + R} \right)$$

Paso 2: Calculamos un divisor de voltaje en A



Calcular el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

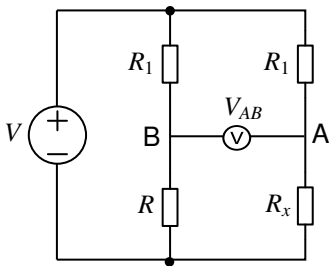
Puente de Wheatstone-Análisis

Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B

$$V_B = V \left(\frac{R}{R_1 + R} \right)$$

Paso 2: Calculamos un divisor de voltaje en A

$$V_A = V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} \right)$$



Calcular el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

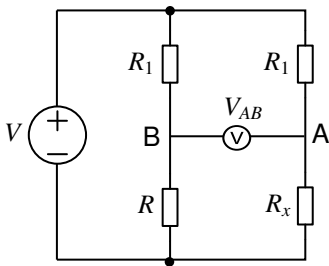
Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B

$$V_B = V \left(\frac{R}{R_1 + R} \right)$$

Paso 2: Calculamos un divisor de voltaje en A

$$V_A = V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} \right)$$

La diferencia es



Calcular el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Paso 1: Calculamos un divisor de voltaje en B

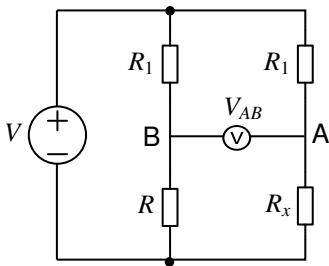
$$V_B = V \left(\frac{R}{R_1 + R} \right)$$

Paso 2: Calculamos un divisor de voltaje en A

$$V_A = V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} \right)$$

La diferencia es

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B \\ &= V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R}{R_1 + R} \right) \end{aligned}$$



Calcular el voltaje V_{AB}

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B \\ &= V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R}{R_1 + R} \right) \\ &= V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) \end{aligned}$$

El voltaje V_{AB} aumenta sí el valor de R_x de aumenta.

¿Qué pasa si $R_x = R$?

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B \\ &= V \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R}{R_1 + R} \right) \\ &= V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) \end{aligned}$$

El voltaje V_{AB} aumenta si el valor de R_x de aumenta.

¿Qué pasa si $R_x = R$?

$$V_{AB} = 0$$

Condición de EQUILIBRIO del puente

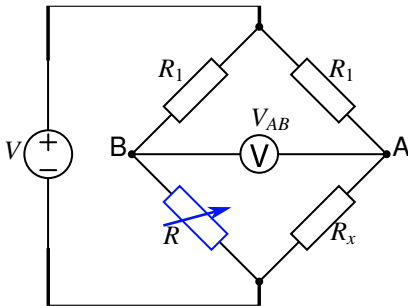
Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

Condición de EQUILIBRIO del puente

En la práctica la resistencia R del puente, se llama de compensación y es variable (potenciómetro).

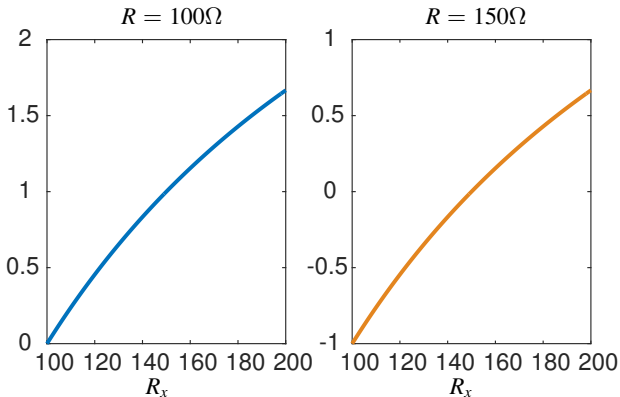


Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Veamos la curva de un Puente de Wheatstone (salida V_{ab} vs entrada R_x)

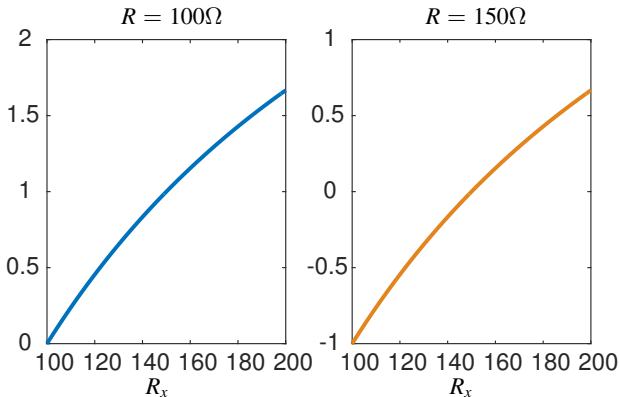
$$V_{AB} = V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) \quad \forall R_x \in [100, 200]$$



Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Izquierda $R = 100\Omega$ y derecha $R = 150\Omega$: **Cambia la escala de salida!!!**

$$V_{AB} = V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) \quad \forall R_x \in [100, 200]$$



Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

$$V_{AB} = V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right)$$

Es una función **NO LINEAL**. Para linealizar $R_1 \gg R_x$

$$\begin{aligned} V_{AB-\text{lin}} &\approx V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1} \right) \\ &\approx V \left(\frac{R_x - R}{R_1 + R} \right) \end{aligned}$$

La sensibilidad (suponiendo $R_1 \gg R$) es

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

$$V_{AB} = V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right)$$

Es una función **NO LINEAL**. Para linealizar $R_1 \gg R_x$

$$\begin{aligned} V_{AB-\text{lin}} &\approx V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1} \right) \\ &\approx V \left(\frac{R_x - R}{R_1 + R} \right) \end{aligned}$$

La sensibilidad (suponiendo $R_1 \gg R$) es

$$S = \frac{\partial V_{AB-\text{lin}}}{\partial R_x} = \frac{V}{R_1}$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Análisis

La sensibilidad (suponiendo $R1 \gg R$) es

$$S = \frac{\partial V_{AB-\text{lin}}}{\partial R_x} = \frac{V}{R1}$$

- La sensibilidad **AUMENTA** incrementando V
- La sensibilidad **DISMINUYE** incrementando $R1$

***Take Home Message:* Al diseñar un puente de Wheatstone se debe cuidar la selección de los parámetros $R1$ y V , para linealizar y no perder sensibilidad.

Una mejor alternativa para linealizar es usando **MÍNIMOS CUADRADOS**

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Ejercicio

Se pretende medir resistencias entre 100 y 150Ω usando un puente de Wheatstone alimentado con 10 V . Determine el voltaje de salida con $R1 = 10\text{K}$, tanto el real como el linealizado.

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Ejercicio

Se pretende medir resistencias entre 100 y 150Ω usando un puente de Wheatstone alimentado con 10 V . Determine el voltaje de salida con $R1 = 10\text{K}$, tanto el real como el linealizado.

Eligiendo $R = 100$ (equilibrio),

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Ejercicio

Se pretende medir resistencias entre 100 y 150Ω usando un puente de Wheatstone alimentado con 10 V. Determine el voltaje de salida con $R_1 = 10K$, tanto el real como el linealizado.

Eligiendo $R = 100$ (equilibrio),

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) = 10 \left(\frac{10000}{10000 + 100} \cdot \frac{R_x - 100}{10000 + R_x} \right) \\ &= 9.901 \left(\frac{R_x - 100}{10000 + R_x} \right) \end{aligned}$$

Evaluando los extremos del campo de medida

sí $R_x = 100\Omega \rightarrow V_{AB} = 0V$

sí $R_x = 150\Omega$

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Ejercicio

Se pretende medir resistencias entre 100 y 150Ω usando un puente de Wheatstone alimentado con 10 V. Determine el voltaje de salida con $R_1 = 10K$, tanto el real como el linealizado.

Eligiendo $R = 100$ (equilibrio),

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V \left(\frac{R_1}{R_1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R_1 + R_x} \right) = 10 \left(\frac{10000}{10000 + 100} \cdot \frac{R_x - 100}{10000 + R_x} \right) \\ &= 9.901 \left(\frac{R_x - 100}{10000 + R_x} \right) \end{aligned}$$

Evaluando los extremos del campo de medida

$$\text{sí } R_x = 100\Omega \rightarrow V_{AB} = 0V$$

$$\text{sí } R_x = 150\Omega \rightarrow V_{AB} = 48.77mV$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Ejercicio (continuación)...

Linealizando ($R_1 \gg R_x$),

$$\begin{aligned} V_{AB-\text{lin}} &= V \left(\frac{10000}{10000 + 100} \cdot \frac{R_x - 1000}{10000} \right) \\ &= 0.0009901 (R_x - 100) \end{aligned}$$

Evaluando los extremos del campo de medida

sí $R_x = 100\Omega \rightarrow V_{AB-\text{lin}} = 0V$

sí $R_x = 150\Omega$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Ejercicio (continuación)...

Linealizando ($R_1 \gg R_x$),

$$\begin{aligned} V_{AB-\text{lin}} &= V \left(\frac{10000}{10000 + 100} \cdot \frac{R_x - 1000}{10000} \right) \\ &= 0.0009901 (R_x - 100) \end{aligned}$$

Evaluando los extremos del campo de medida

$$\text{sí } R_x = 100\Omega \rightarrow V_{AB-\text{lin}} = 0V$$

$$\text{sí } R_x = 150\Omega \rightarrow V_{AB-\text{lin}} = 49.50\text{mV}$$

Sensores Resistivos

- Medición de Resistencia -

Ejercicio (continuación)...

El error de linealización, cuando $R_x = 150\Omega$

$$\epsilon = \left| \frac{V_{AB} - V_{AB-\text{lin}}}{V_{AB}} \right| \times 100$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Ejercicio (continuación)...

El error de linealización, cuando $R_x = 150\Omega$

$$\epsilon = \left| \frac{V_{AB} - V_{AB-\text{lin}}}{V_{AB}} \right| \times 100$$

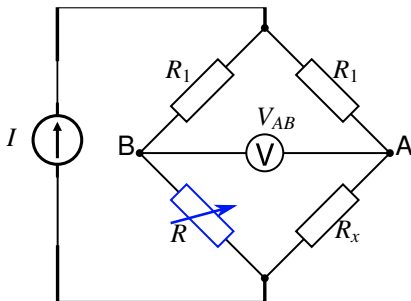
$$\epsilon = 1.5$$

También lo podemos calcular como

$$\epsilon = \frac{R_x}{R1}$$

Sensores Resistivos - Medición de Resistencia -

Puente de Wheatstone-Alimentado con fuente de corriente



TAREA

Obtenga las expresiones del voltaje V_{AB} real y linealizada, de la sensibilidad y del error de linealidad.

Análisis completo del circuito

Gracias!

Contact:

<https://rgunam.github.io>

`RRamirezC@iingen.unam.mx`