

# Tema 2

---

## Transductores y Circuitos para Transductores Resistivos

# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

# Concepto de Transductor

*Dispositivo capaz de transferir energía entre dos sistemas.*

Ejemplo:

- ❑ De energía térmica a energía eléctrica: sensor de temperatura basado en semiconductor

Magnitud  
de  
Entrada



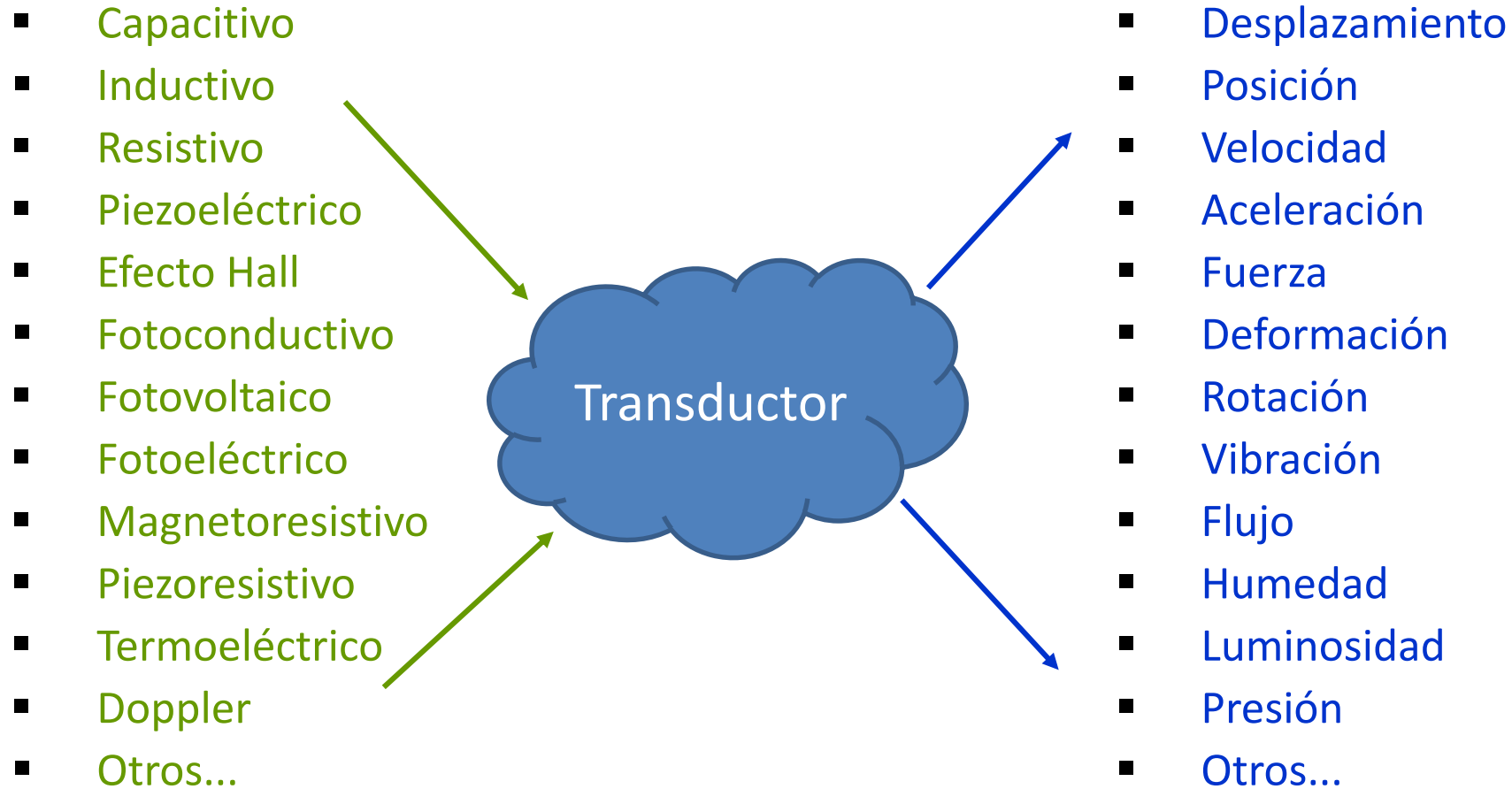
Magnitud  
de  
Salida

# Índice

1. Concepto de transductor
- 2. Sensores: sensor de temperatura RTD**
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

# Sensores: Mecanismo y Mensurando

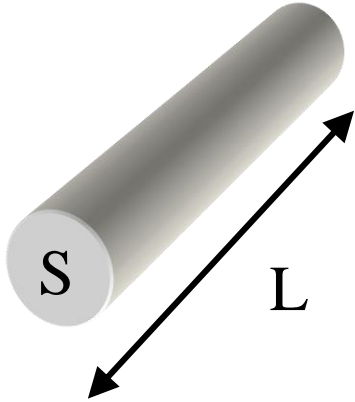
*Magnitud que se pretende medir*



# Sensores: Ejemplos

- ✍ Resistencia: RTD, LDR, Potenciómetros,...
- ✍ Capacidad: humedad, proximidad, ...
- ✍ Inducción: distancia, posición, ...
- ✍ Voltaje: termopares, semiconductores...
- ✍ Corriente: fototransistores, proximidad...
- ✍ Frecuencia: encoders, tacómetros, ...

# Sensores resistivos



$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

❑ Puede variar:

- ✓ Resistividad  $\rho$
- ✓ Longitud  $L$
- ✓ Sección  $S$

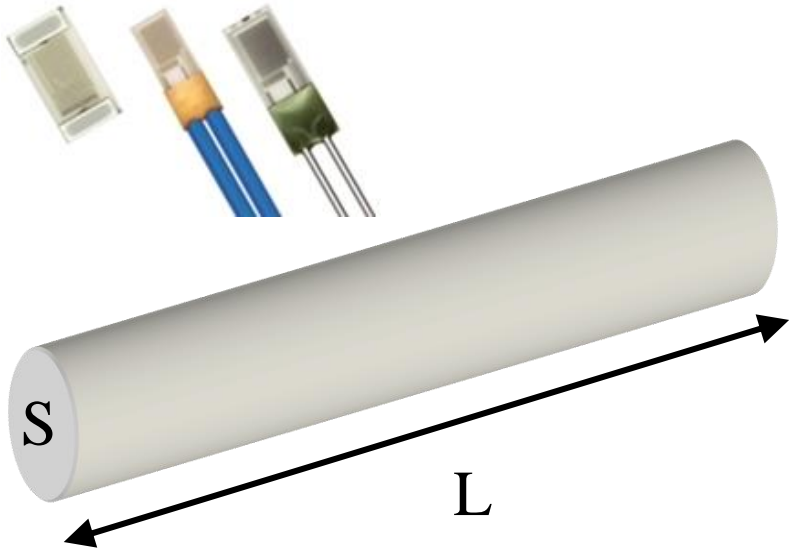


# Sensores resistivos

Galgas extensiométricas	120 $\Omega$ -3500 $\Omega$
Células de carga	350 $\Omega$ -3500 $\Omega$
Presión	350 $\Omega$ -3500 $\Omega$
Humedad relativa	100k $\Omega$ -10M $\Omega$
Temperatura – RTD	100 $\Omega$ -1k $\Omega$
Temperatura –Termistor	100 $\Omega$ -10M $\Omega$

# Sensor RTD

Resistance Temperature Detector



$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

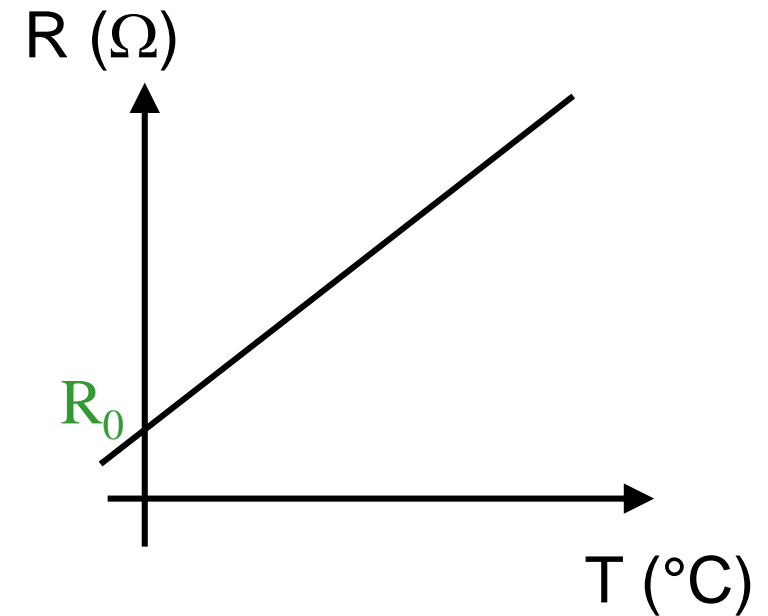
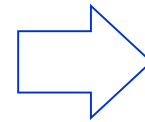
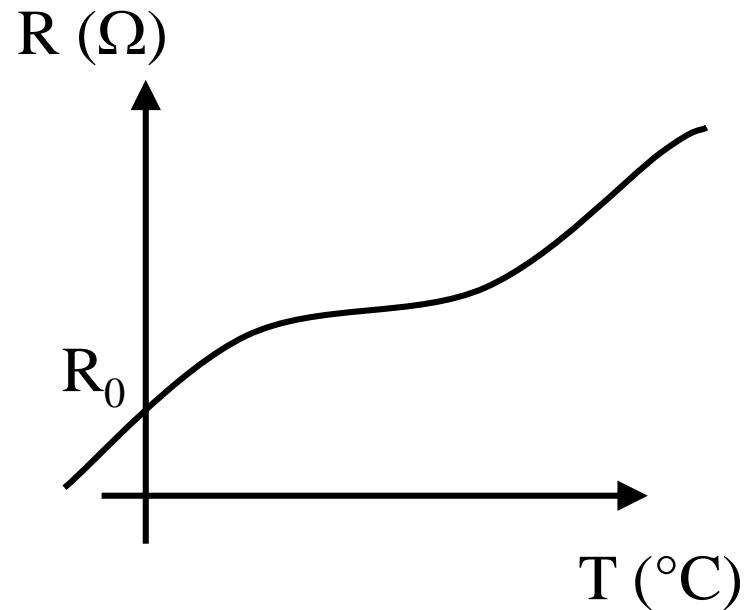
... pero  $\rho$  depende de la Temperatura:

$$R = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots]$$

# Sensor RTD

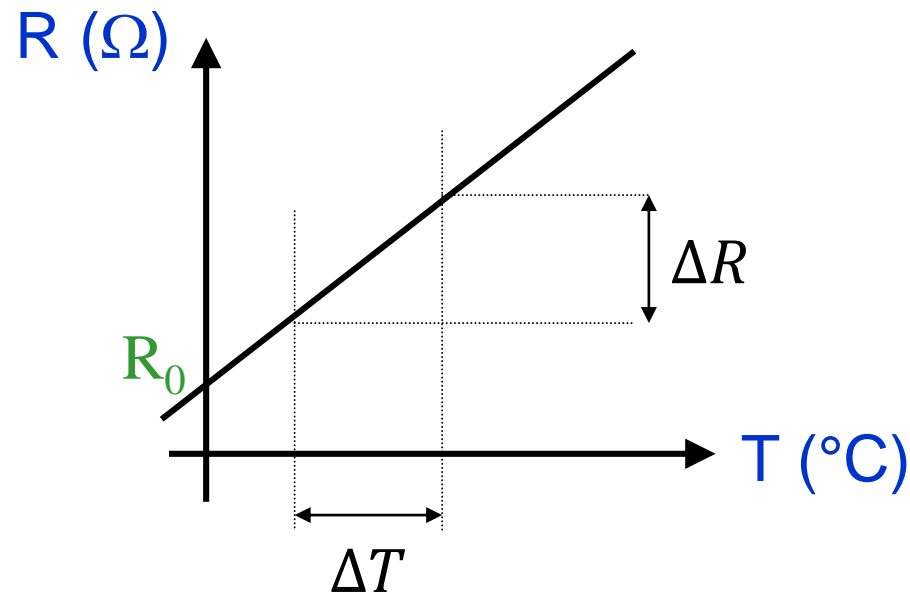
$$R = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots]$$

... pero normalmente  $A > B > C > \dots$  por lo que:  $\Rightarrow R \cong R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$



# Sensor RTD: Coeficiente de temperatura ( $\alpha$ )

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$



$$\Rightarrow \alpha = \frac{\Delta R / R_{T_{REF}}}{\Delta T} \left( \frac{\Omega/\Omega}{^{\circ}\text{C}} \right)$$

$$\Rightarrow \text{TCR} = \alpha = \frac{\Delta R / \Delta T}{R_{T_{REF}}} = \frac{\text{pendiente}}{R_{T_{REF}}}$$

# Sensor RTD: Parámetros

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

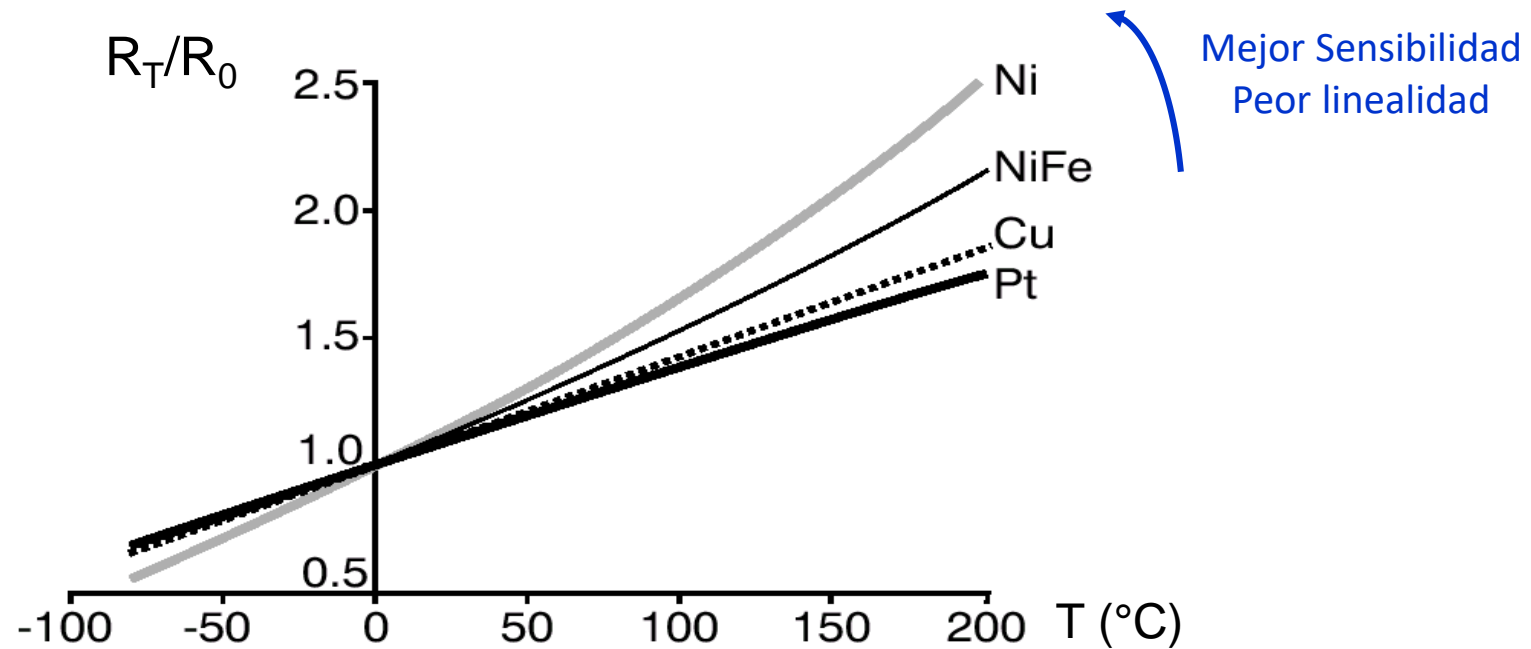
- ✍ **Resistencia nominal ( $R_0$ )** medida a una  $T_{REF}$  ( $0^\circ\text{C}$ )
- ✍ **Coeficiente de temperatura (TCR)** en ( $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ )
- ✍ **Sensibilidad** ( $\neq$  precisión)
- ✍ **Rango de funcionamiento** (Ex:  $-270^\circ\text{C} \rightarrow 850^\circ\text{C}$ )
- ✍ **Tolerancia a  $T_{REF}$**  (Clase A:  $\pm 0.06\%$  @  $0^\circ\text{C}$ , Clase B:  $\pm 0.12\%$  @  $0^\circ\text{C}$ )
- ✍ **Tolerancia del TCR** ( $0.00385 \pm 0.000012$  [ $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ ])

# Sensor RTD: Parámetros

- ✍ **Autocalentamiento** (Ex:  $0.24 [^{\circ}\text{C}/\text{mW}]$ )
  - ❑ Ejemplo: Pt100 midiendo entre 0 y  $100^{\circ}\text{C}$  con una fuente de corriente de 1 mA el error máximo es de  $0.033^{\circ}\text{C}$ .
- ✍ **Constante de tiempo** (Típico 2 seg @ 63% del valor final)
- ✍ **Repetibilidad** (Típico  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  @  $0^{\circ}\text{C}$ )
- ✍ **Estabilidad** (Típico  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{año}$ )

# Sensor RTD: Materiales

Cualquier R es un sensor de Temperatura... pero ¿vale cualquier resistor?



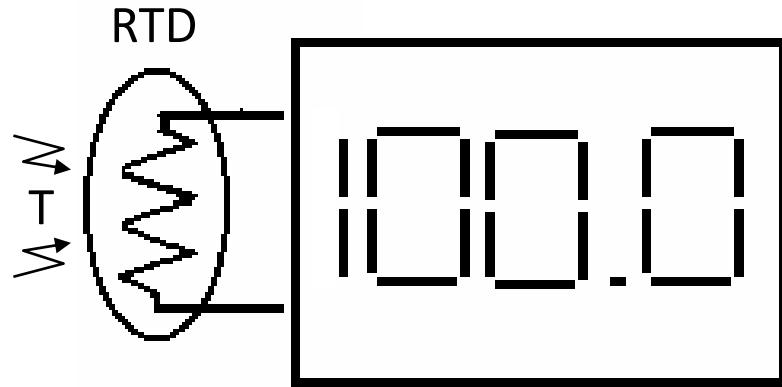
# Sensor RTD: Materiales

$$\frac{dR}{dT} = R_0 \cdot \alpha$$

Material	Rango ( °C )	Resistividad (Ω·m)	Ventajas	R <sub>0</sub> (Ω @ 0°C)	TCR ( Ω/Ω°C )	Sensibilidad ( Ω/°C )
Pt	-260 a 700	10.6·10 <sup>-8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Rango</li> <li>□ Estabilidad</li> <li>□ Linealidad</li> </ul>	100 100 1000	0.003926 0.003850 0.003850	0.392 0.385 3.850
Cu	-100 a 260	1.68·10 <sup>-8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Linealidad</li> </ul>	10*	0.00427	0.039
Ni	-100 a 260	6.84·10 <sup>-8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Coste</li> <li>□ Sensibilidad</li> </ul>	120	0.00672	0.806
Ni – Fe	-100 a 204		<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Coste</li> <li>□ Sensibilidad</li> </ul>	604 1000* 2000*	0.00518 0.00527 0.00527	3.133 4.788 9.576

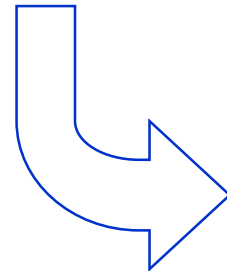


# Sensor RTD: Ejemplo de circuito de medida

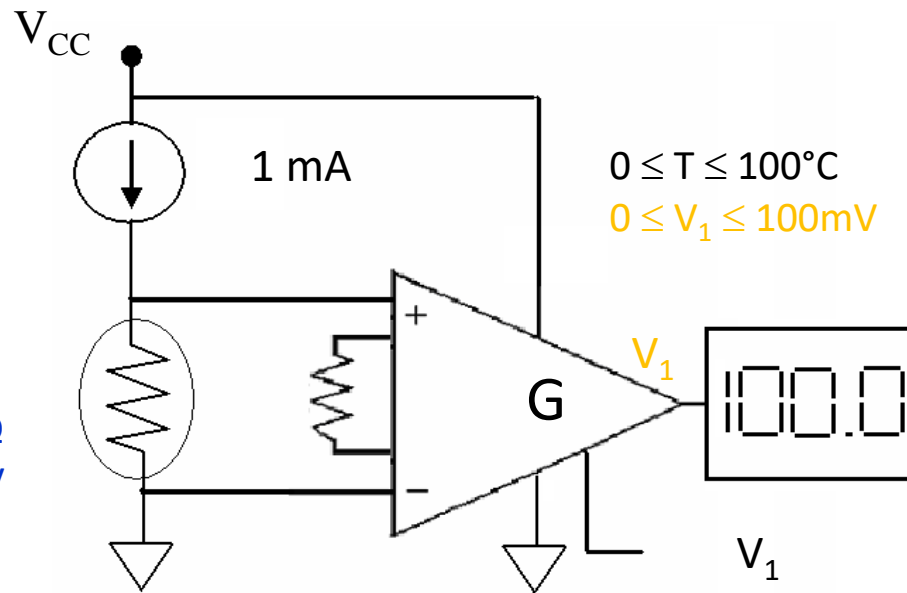


1. Convertir  $R_{RTD}$  en  $V_D$
2. Acondicionar  $V_D$
3. Medir la  $V_1$
4. Convertir  $V_1$  en  $T$  (despejar)

Ejemplo: medir entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$  (con Pt100)



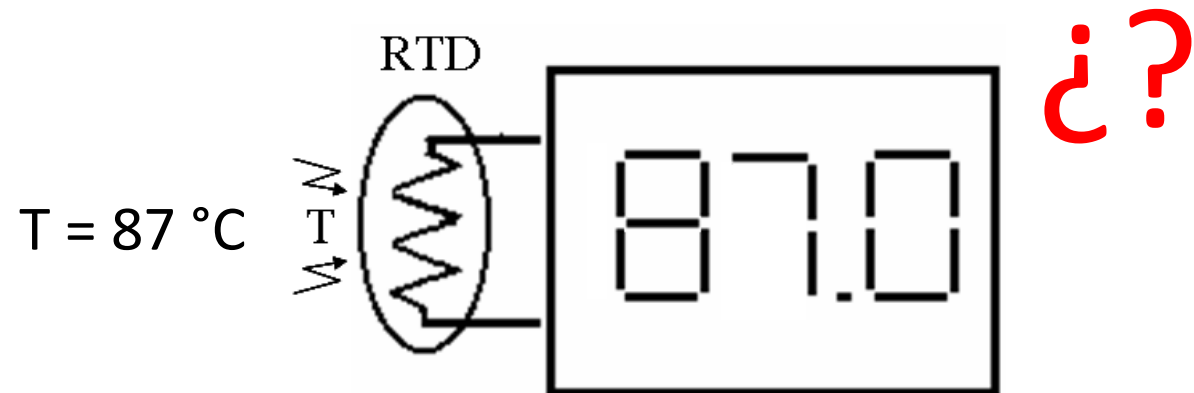
$$\begin{aligned} 0 &\leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 100 &\leq R_{RTD} \leq 138,5\Omega \\ 100 &\leq V_D \leq 138,5\text{mV} \end{aligned}$$

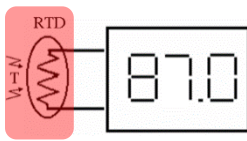


# Sensor RTD: Reflexión...

En el circuito anterior se supone que si  $V = 87 \text{ mV}$  es porque  $T = 87 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero atendiendo a lo anterior...

1. ... es lineal el sensor?
2. ... cómo se ha conectado el sensor al circuito?
3. ... es lineal el circuito de acondicionamiento?





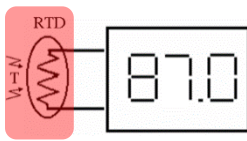
# 1. ¿Es lineal el sensor?...

## Ecuación de Callendar-Van Dussen (Pt)

$$T < 0 \quad R(T) = R(0) \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100)]$$

$$T \geq 0 \quad R(T) = R(0) \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2]$$

TCR	A	B	C
0.003926	$3.9848 \cdot 10^{-3}$	$-5.870 \cdot 10^{-7}$	$-4 \cdot 10^{-12}$
0.003911	$3.9692 \cdot 10^{-3}$	$-5.8495 \cdot 10^{-7}$	$-4.2325 \cdot 10^{-12}$
0.003850	$3.9080 \cdot 10^{-3}$	$-5.8019 \cdot 10^{-7}$	$-4.2735 \cdot 10^{-12}$



# 1. ¿Es lineal el sensor?...

¿Cómo se puede despejar T a partir de R?

- ❑ Búsqueda de las raíces de un polinomio de grado 2, 3...
- ❑ Tabla look-up cada 5°C más interpolación lineal entre puntos
- ❑ Respuesta lineal y cuantificación del error
- ❑ Circuitos de linealización

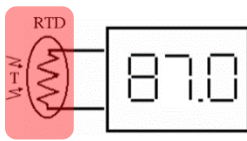
Pt 1000  
Resistor table

Präzisionselektronik  
Solarelektronik  
Batterie-Ladesysteme  
Kabeltechnik



Pt 1000: Temperature / resistor table

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-80	683,25	687,27	691,29	695,3	699,31	703,32	707,33	711,34	715,34	719,34	723,35
-70	723,35	727,35	731,34	735,34	739,34	743,33	747,32	751,32	755,3	759,29	763,28
-60	763,28	767,26	771,25	775,23	779,21	783,19	787,17	791,14	795,12	799,09	803,06
-50	803,06	807,03	811	814,97	818,94	822,9	826,87	830,83	834,79	838,75	842,71
-40	842,71	846,66	850,62	854,57	858,53	862,48	866,43	870,38	874,33	878,27	882,22
-30	882,22	886,16	890,1	894,04	897,99	901,92	905,86	909,8	913,73	917,67	921,6
-20	921,6	925,53	929,46	933,39	937,32	941,24	945,17	949,09	953,02	956,94	960,86
-10	960,86	964,78	968,7	972,61	976,53	980,44	984,36	988,27	992,18	996,09	1000
0	1000	1003,9	1007,8	1011,7	1015,6	1019,5	1023,4	1027,3	1031,2	1035,1	1039
10	1039	1042,9	1046,8	1050,7	1054,6	1058,5	1062,4	1066,3	1070,2	1074	1077,9
20	1077,9	1081,8	1085,7	1089,6	1093,5	1097,3	1101,2	1105,1	1109	1112,9	1116,7



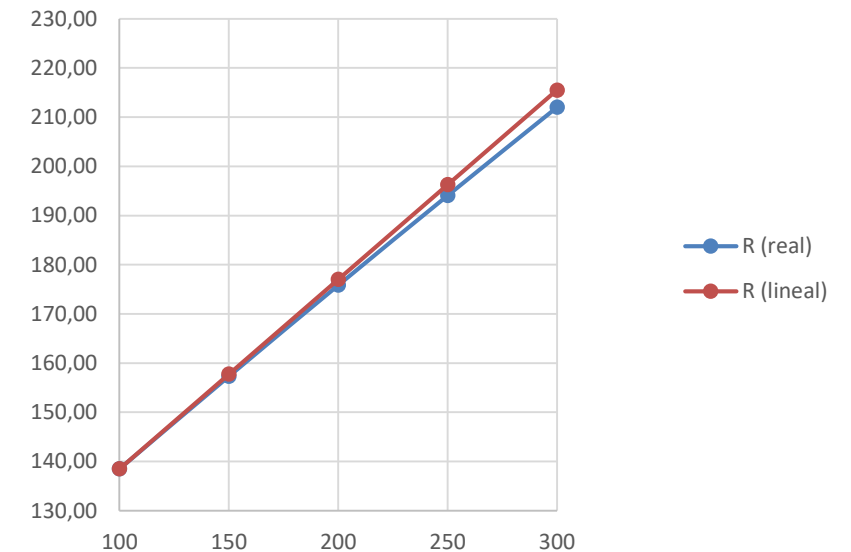
# 1. ¿Es lineal el sensor?...

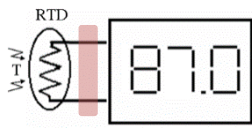
$$\alpha = 0.00385 \text{ } [\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}]$$

R (Ω)	T <sub>REAL</sub> (°C)	T <sub>LINEAL</sub> (°C)	Error (°C)
138.5	100	100	0 °
157.32	150	148.8	-1.2 °
175.84	200	196.9	-3.1 °
194.08	250	244.3	-5.7 °
212.03	300	290.9	-9.1 °

$$R_{RTD} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

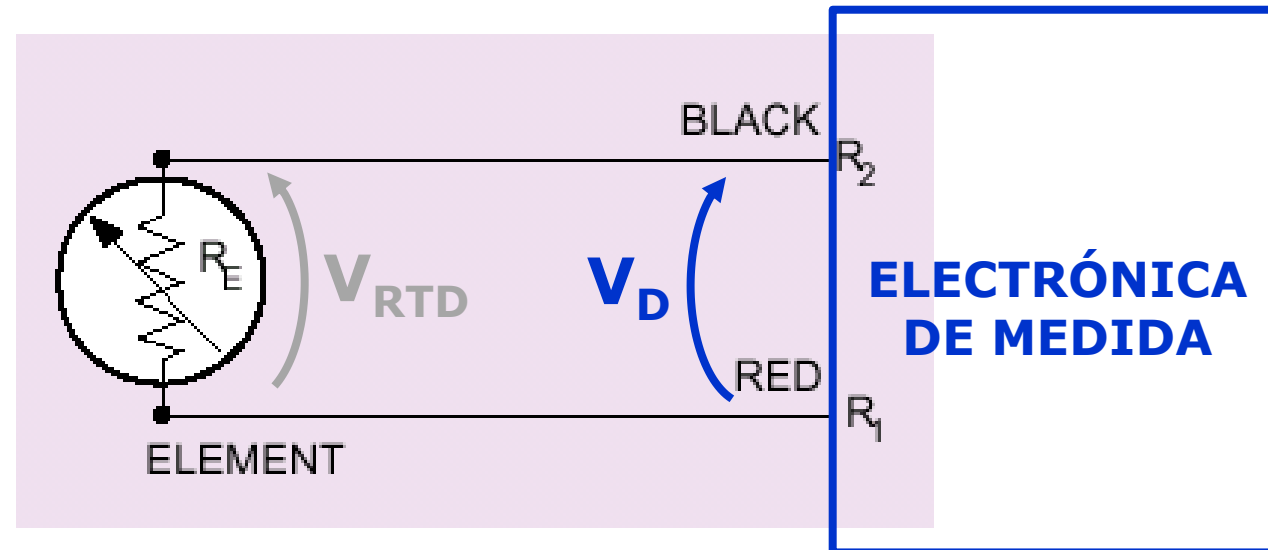
$$T_{Lineal} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{R_{RTD}}{R_0} - 1 \right)$$





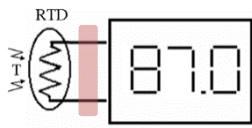
## 2. ¿Cómo se ha conectado al circuito?...

RTD de 2 hilos



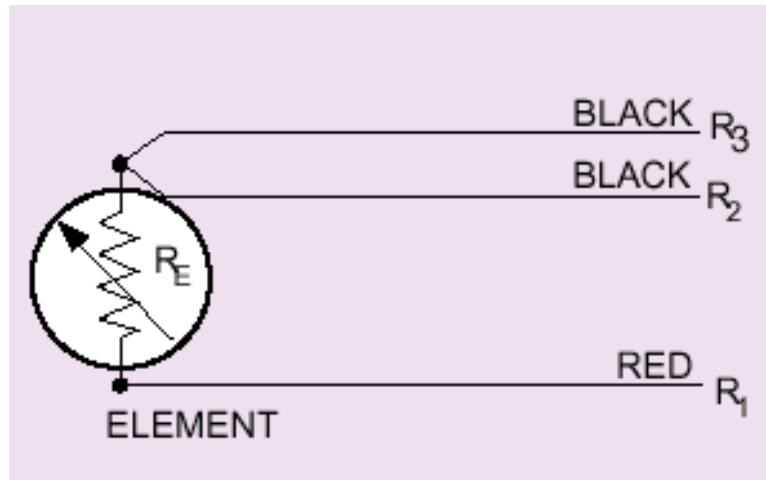
$$R_{\text{TOTAL}} = R_1 + R_2 + R_E \approx 2R_h + R_E$$

Un cable ( $R_1 + R_2$ ) de  $0.4 \, \Omega$  introducirá un error de  $\sim 1^\circ\text{C}$  (Pt100)



## 2. ¿Cómo se ha conectado al circuito?...

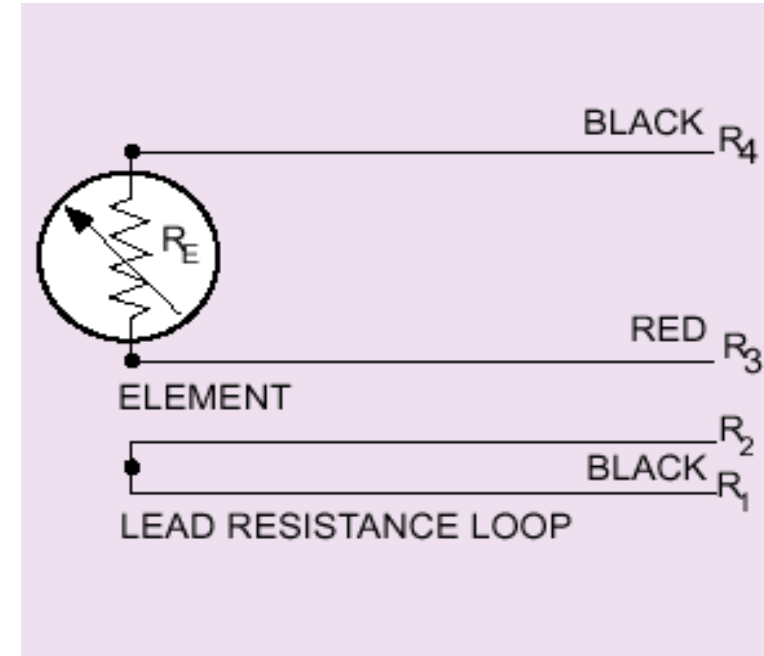
Solución: RTD de 3 hilos



$$R_{1,2} = R_1 + R_2 + R_E$$

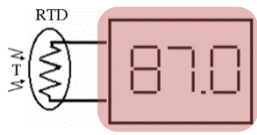
$$R_{2,3} = R_2 + R_3$$

Solución: Medida a 4 hilos

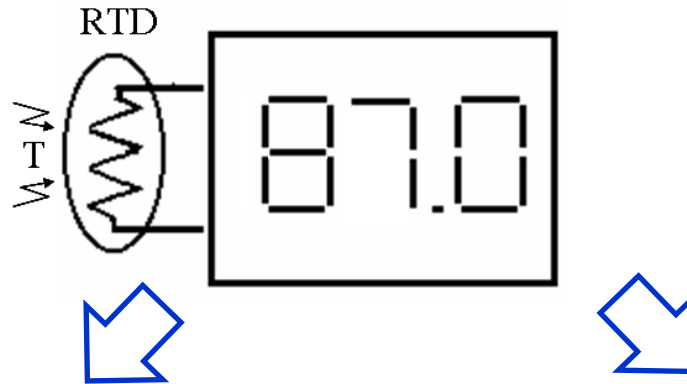


$$R_{3,4} = R_3 + R_4 + R_E$$

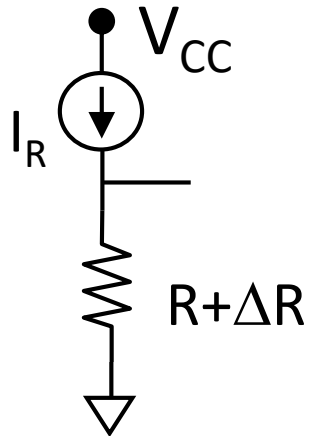
$$R_{1,2} = R_1 + R_2$$



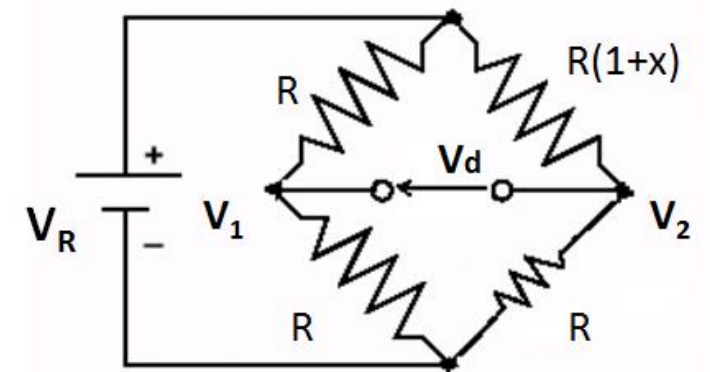
### 3. ¿Es lineal el acondicionador?...



FUENTE DE CORRIENTE



PUENTE DE MEDIDA  
(PUENTE DE WHEATSTONE)



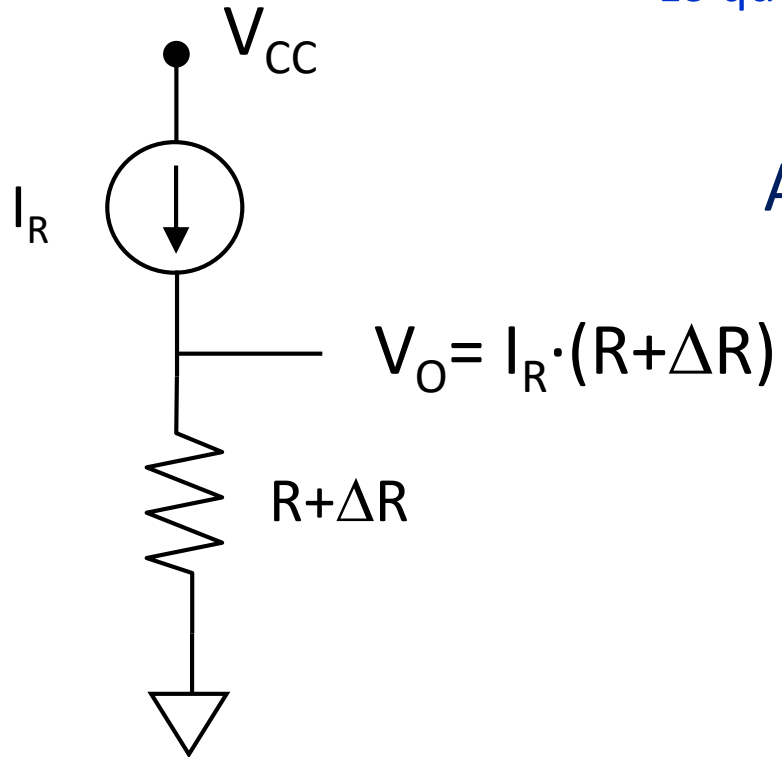


# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
- 3. Medida mediante fuente de corriente**
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

# Medida con Fuente de Corriente

Lo que se desea es detectar las variaciones de  $V_O$  debidas a variaciones de  $R$ ,  $\Delta R$



A tener en cuenta:

- ☐  $I_R$  debe ser muy estable

- ☐ Para mayor sensibilidad:

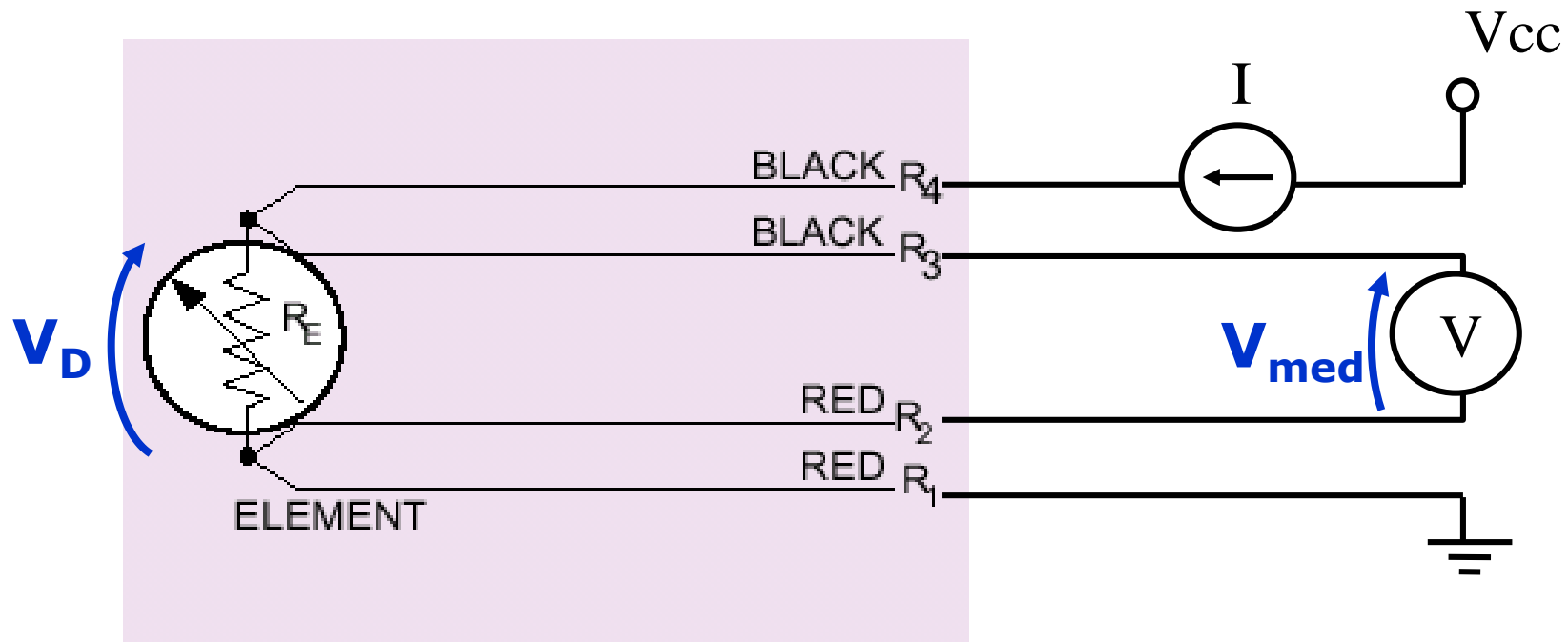
  - $I_R$  debe ser grande

- ☐ Para menor error por autocalentamiento

  - $I_R$  debe ser pequeña

# Medida con Fuente de Corriente

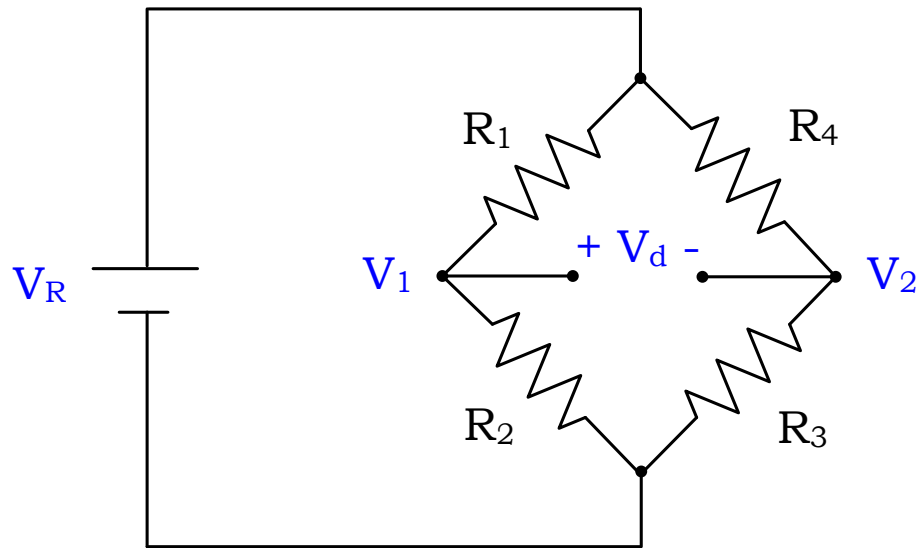
Solución para evitar  $R_{hilos}$ : RTD de 4 hilos



# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
- 4. Puentes de medida**
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

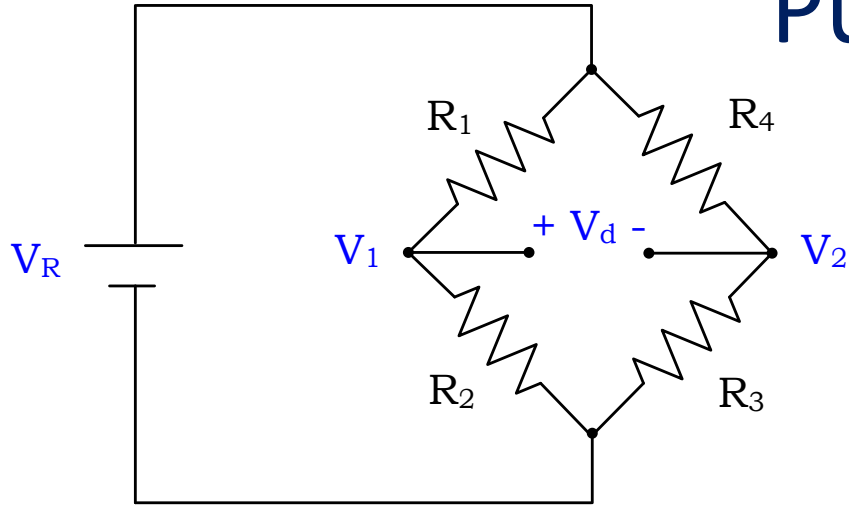
# Puente de Wheatstone



- Interesante para medir pequeños cambios de resistencia con exactitud
- Puede trabajar:
  - Como detector de cero: sistemas realimentados
- Leyendo el valor de  $V_d$
- En ellos, la exactitud en la medida no podrá ser mayor que la exactitud de su alimentación:  $V_R$

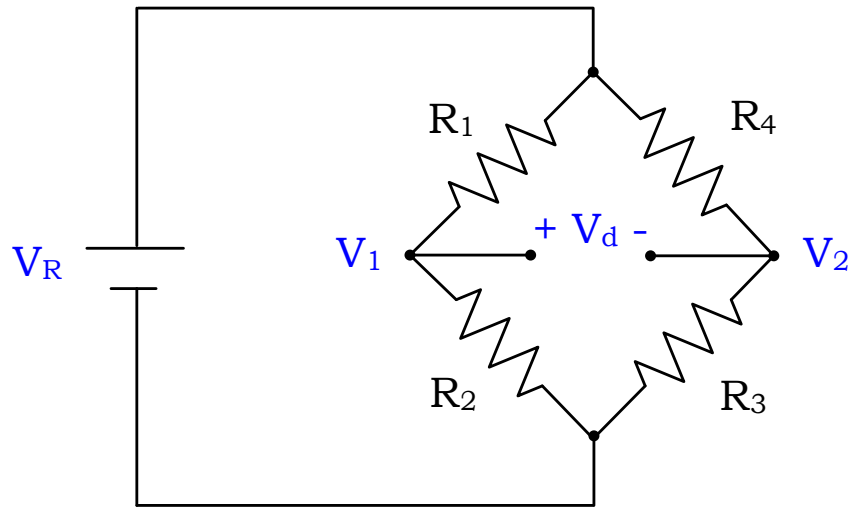
# Puente de Wheatstone

Cálculo de la tensión  $V_d$



¿Cuándo decimos que el puente está balanceado?

# Puente de Wheatstone

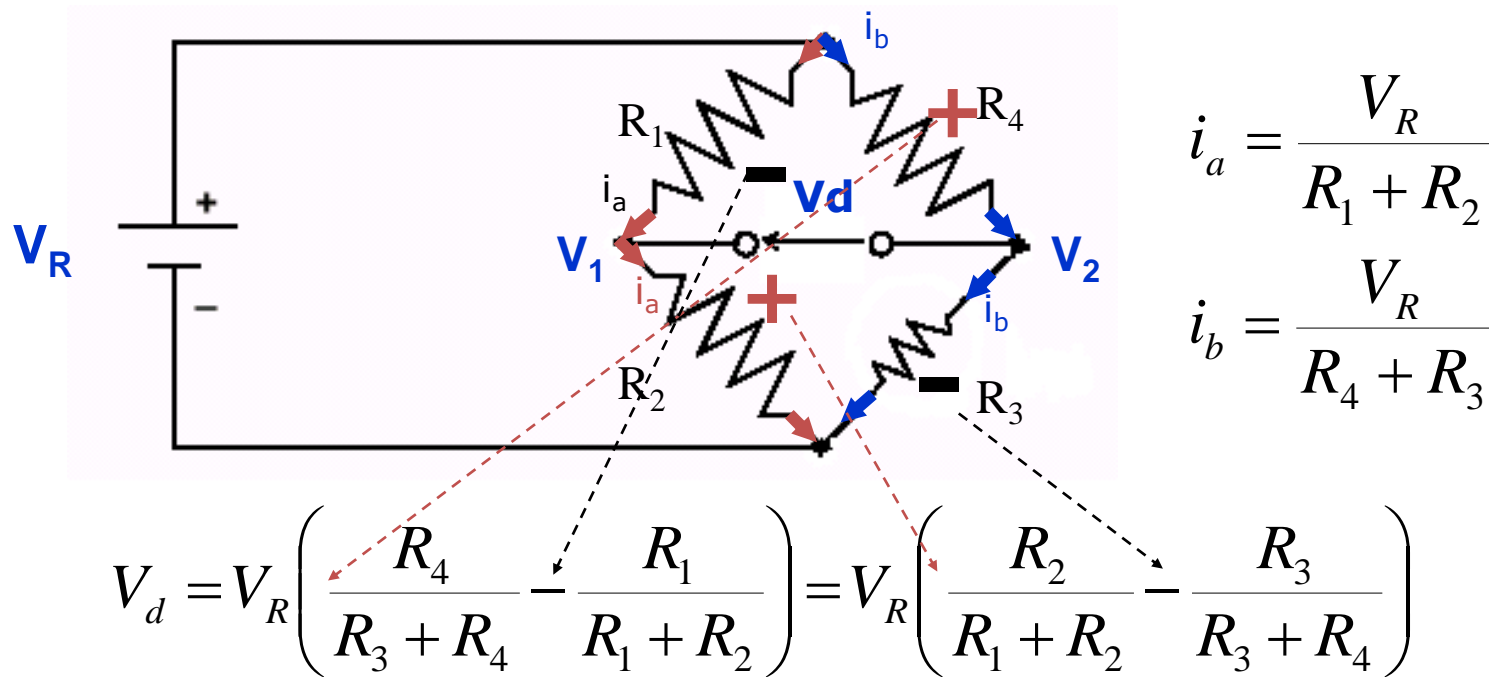


$$V_d = V_1 - V_2 = V_R \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Condición  $V_d = 0$ :  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$

¿Qué relación hay entre el signo del incremento de  $V_d$  y el del incremento de los resistores que forman el puente?

# Puentes de Medida: Puente de Wheatstone



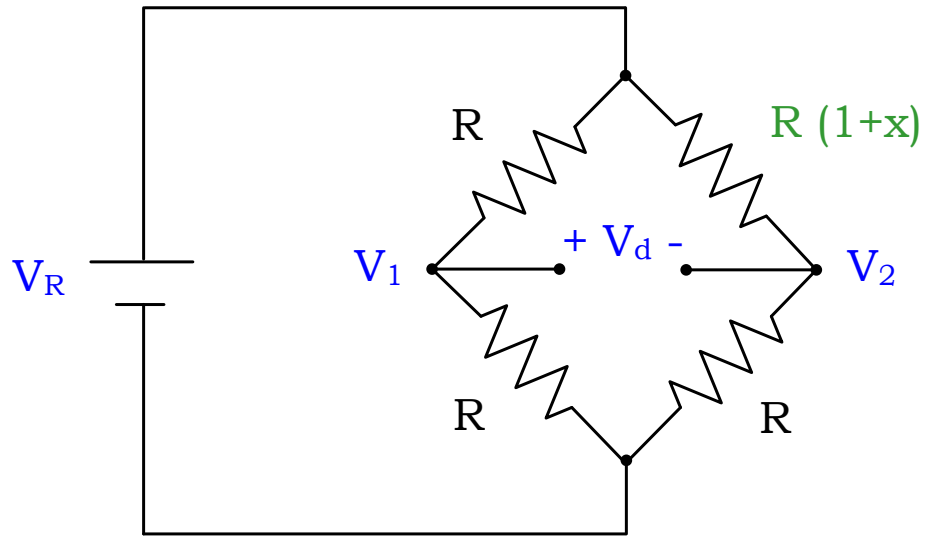
□ Si  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ ;  $V_d = 0$

□ Signo  $\Delta V_d =$  Signo  $\Delta R_i \cdot$  Signo Rama Puente



# Puente con 1 rama activa

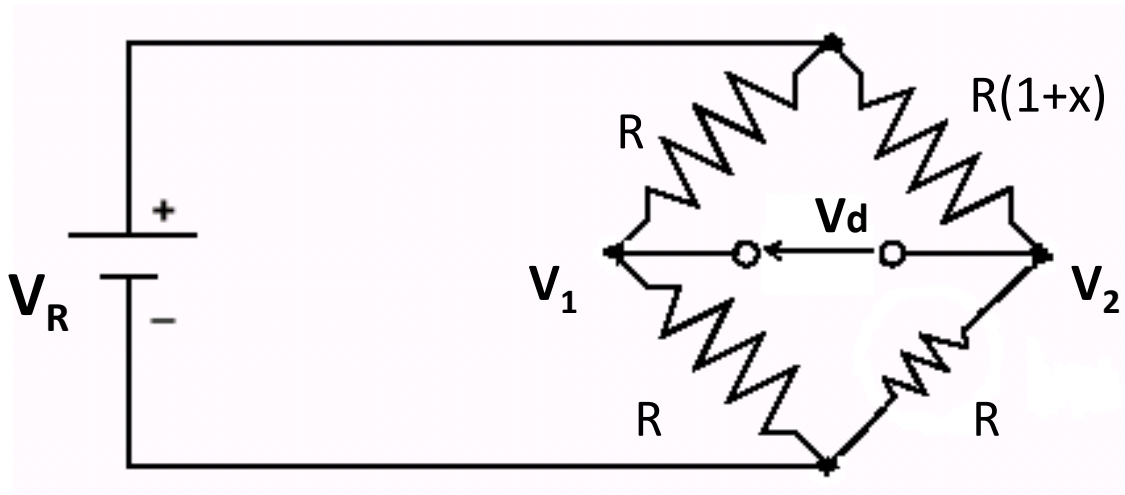
Cálculo de la tensión  $V_d$



# Puente de Wheatstone:

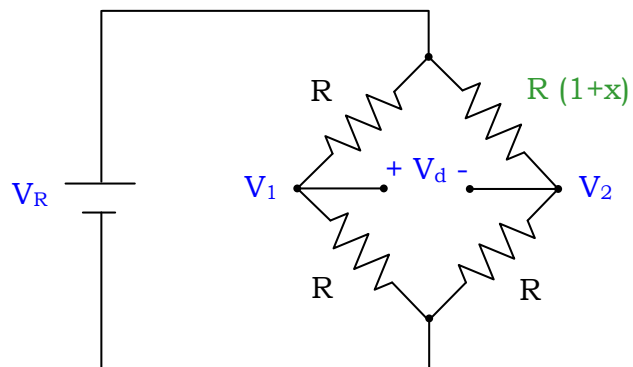
## Configuración con 1 rama activa

- ✍  $V_R$  debe ser muy estable
- ✍  $V_d$  no es lineal



$$V_d = \frac{V_R}{4} \cdot \frac{x}{1 + \frac{x}{2}}$$

# Puente con 1 rama activa

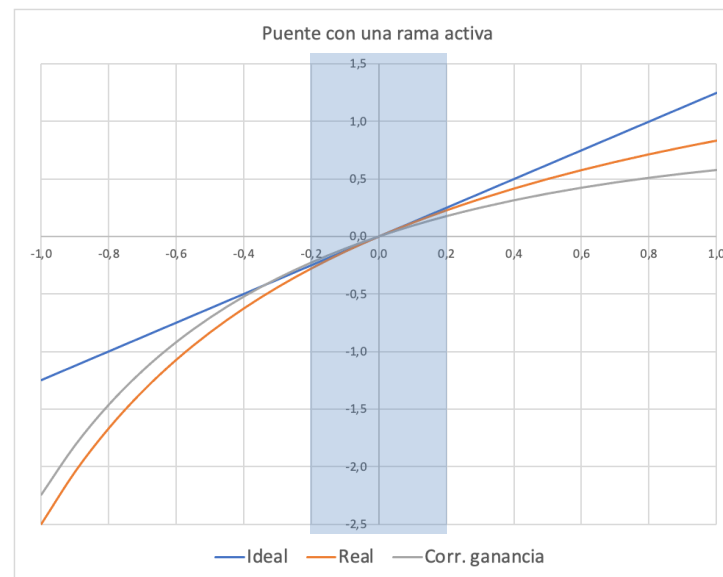


¿Cómo calcular el error de NL del puente?

$$V_d(\text{real}) = \frac{V_R}{4} \left( \frac{x}{1 + \frac{x}{2}} \right)$$

$$V_d(\text{ideal}) = \frac{V_R}{4} x$$

x	Vd (real)	Vd (ideal)	Vd corr. ganancia	NL corr. ganancia	NL sin corr. Ganancia
-1,000	-2,500	-1,250	-2,243	-0,993	-1,250
-0,900	-2,045	-1,125	-1,814	-0,689	-0,920
-0,800	-1,667	-1,000	-1,461	-0,461	-0,667
-0,700	-1,346	-0,875	-1,166	-0,291	-0,471
-0,600	-1,071	-0,750	-0,917	-0,167	-0,321
-0,500	-0,833	-0,625	-0,705	-0,080	-0,208
-0,400	-0,625	-0,500	-0,522	-0,022	-0,125
-0,300	-0,441	-0,375	-0,364	0,011	-0,066
-0,200	-0,278	-0,250	-0,226	0,024	-0,028
-0,100	-0,132	-0,125	-0,106	0,019	-0,007
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,100	0,119	0,125	0,093	-0,032	-0,006
0,200	0,227	0,250	0,176	-0,074	-0,023
0,300	0,326	0,375	0,249	-0,126	-0,049
0,400	0,417	0,500	0,314	-0,186	-0,083
0,500	0,500	0,625	0,372	-0,253	-0,125
0,600	0,577	0,750	0,423	-0,327	-0,173
0,700	0,648	0,875	0,468	-0,407	-0,227
0,800	0,714	1,000	0,509	-0,491	-0,286
0,900	0,776	1,125	0,545	-0,580	-0,349
1,000	0,833	1,250	0,577	-0,673	-0,417

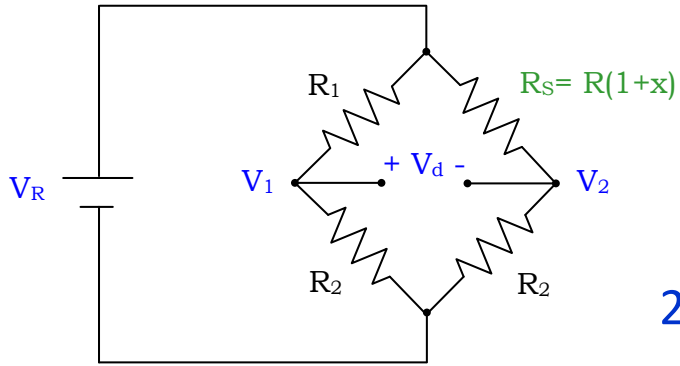


Si:  $[-0.2 < x < 0.2] \quad (x \ll 2) \rightarrow NL = 100 \cdot \frac{-x}{2} \downarrow \rightarrow V_d \cong \frac{V_R}{4} x$

Transductores RTD y Acond. para transductores resistivos



# ¿Cómo diseñar un puente con 1 rama activa

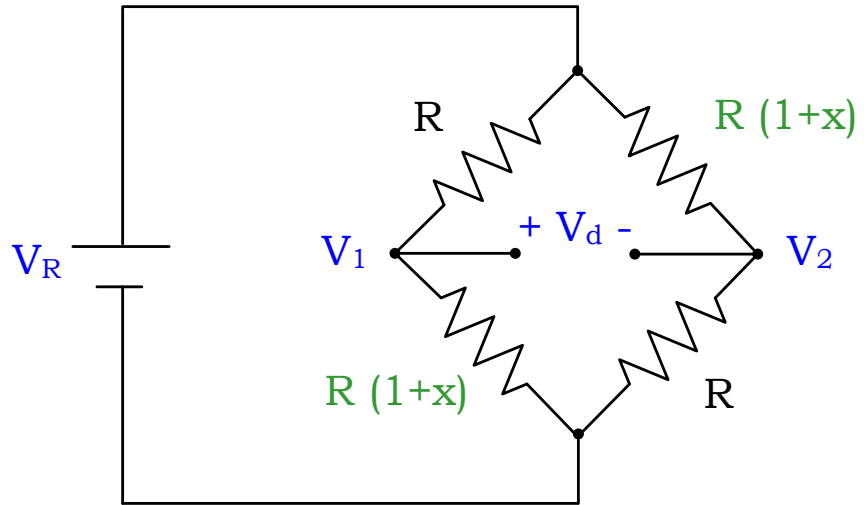


1.-  $R_1$  determina el valor de  $R_S$  que lleva a:  $V_d = 0$



2.- El valor de  $R_2$  influye en la ganancia (sensibilidad) del puente y en su linealidad.

3.- El valor de  $V_R$  influye en la ganancia (sensibilidad) del puente y en el autocalentamiento del sensor por efecto Joule.

# Puente con 2 ramas activas



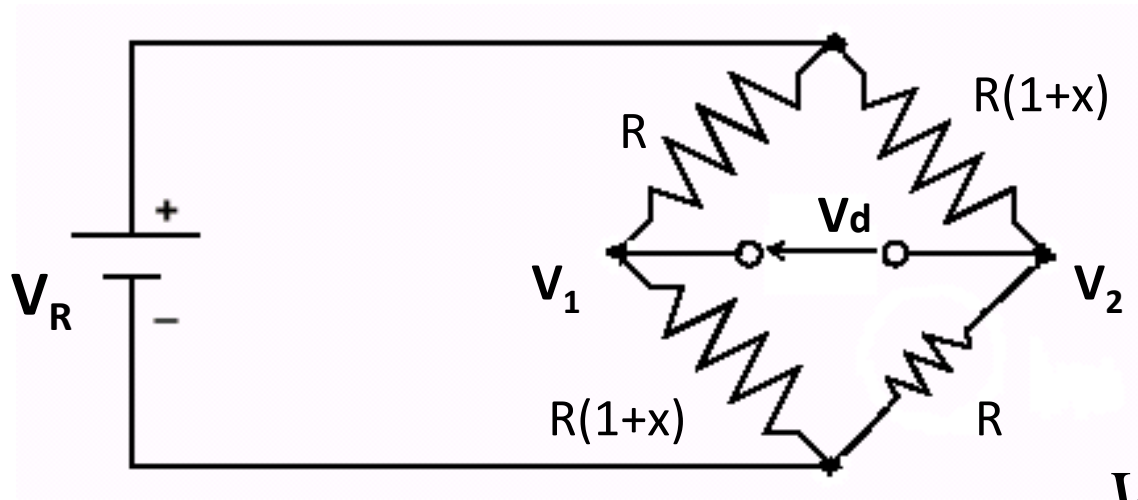
Cálculo de la tensión  $V_d$

-  Se duplica la sensibilidad.
-  Se mantiene la NL.

# Puente de Wheatstone:

## Configuración con 2 ramas activas

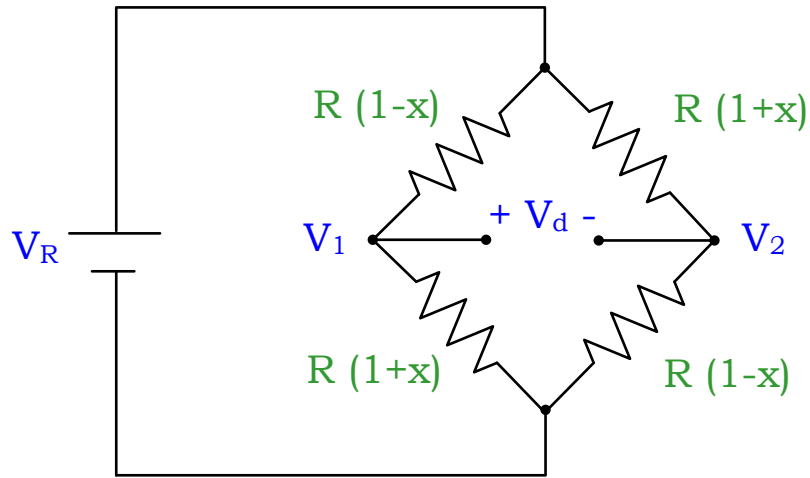
✍  $V_R$  debe ser muy estable



$$V_d = \frac{V_R}{2} \cdot \frac{x}{1 + \frac{x}{2}}$$

# Puente con 4 ramas activas

Cálculo de la tensión  $V_d$

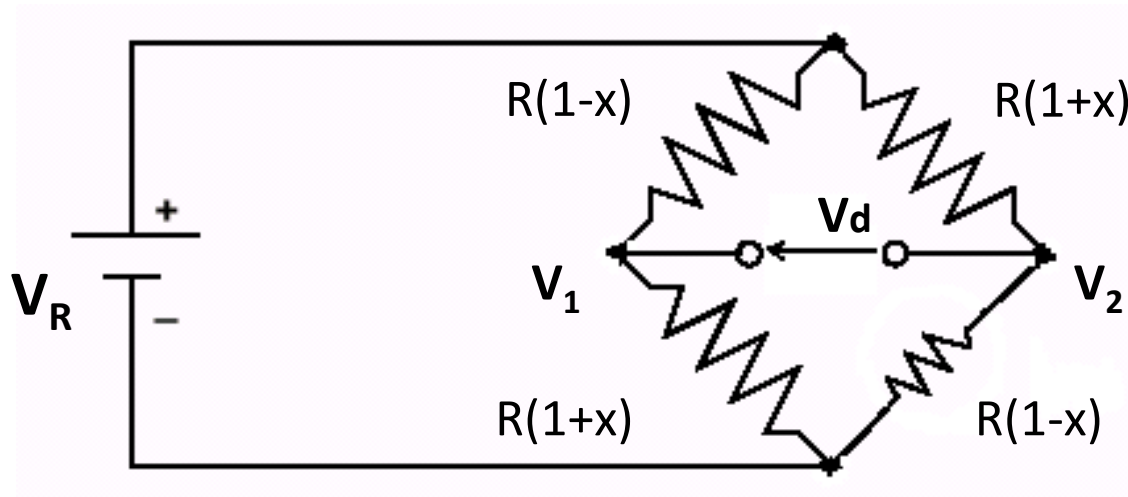


- ✍ El puente es lineal (podrá haber no linealidad por la tolerancia de los resistores, pero no por el puente).
- ✍ Doble sensibilidad respecto a 2 ramas (cuatro veces más sensibilidad respecto a 1 rama)

# Puente de Wheatstone:

## Configuración con 4 ramas activas

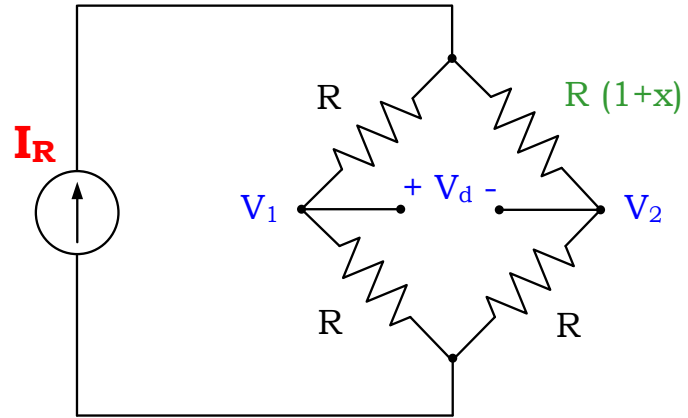
✍  $V_R$  debe ser muy estable



$$V_d = V_R \cdot x$$

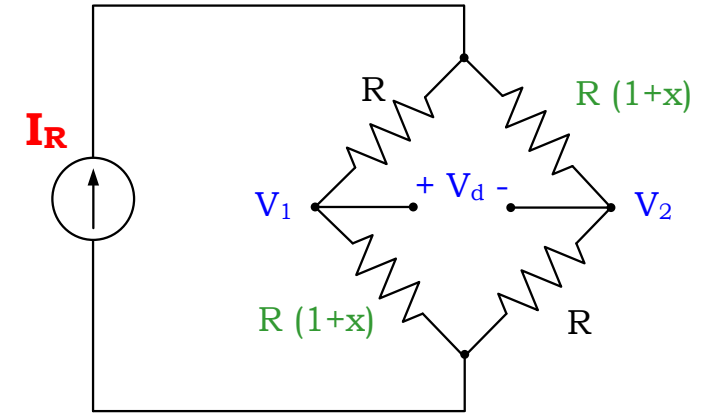


# Puente excitado en corriente



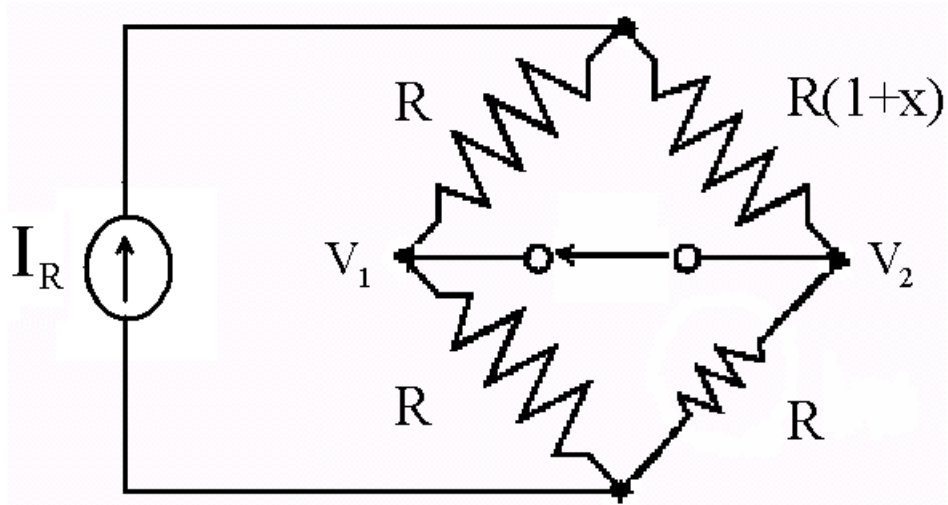
1 rama activa

Cálculo de la tensión  $V_d$



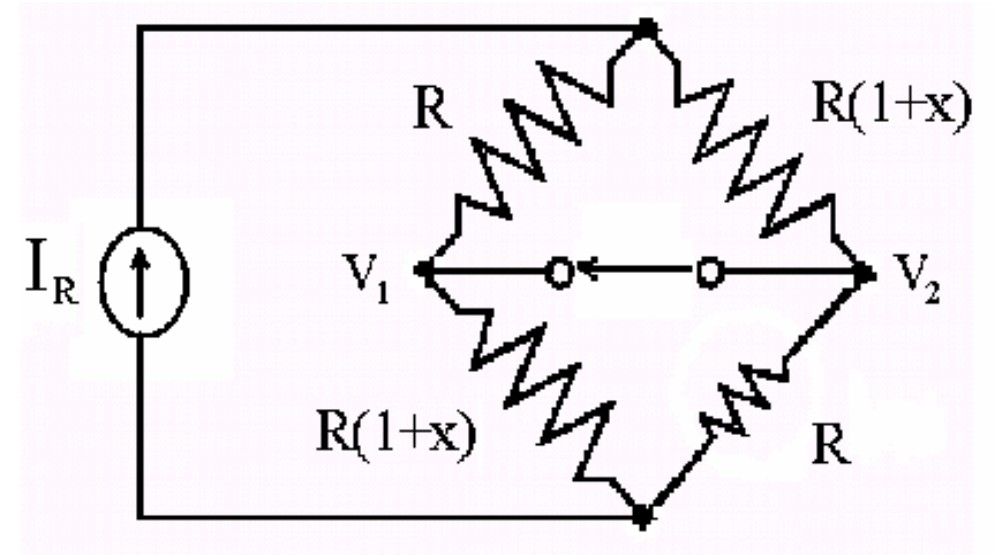
2 ramas activas

# Puente de Wheatstone: Excitado con corriente



$$V_d = \frac{I_R \cdot R}{4} \cdot \frac{x}{1 + \frac{x}{4}}$$

Es más lineal  
que el excitado  
en tensión



$$V_d = \frac{I_R}{2} \cdot R \cdot x$$

# Puente de Wheatstone: Consideraciones de diseño

- ✍ Cuanto mayor sea la excitación, mayor será la sensibilidad del puente (**más fácil de medir**)...pero mayor será la potencia que se disipa en los sensores (**autocalentamiento**)
- ✍ Cuanto menor sea la excitación, mayor deberá ser la ganancia de la siguiente etapa y más sensible al ruido será el circuito
- ✍ La **estabilidad de la excitación** influye directamente en la calidad de la medida

# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
- 5. Efecto de los hilos de conexión**
6. Circuito de Linealización
7. Otros sensores

# Puente de Wheastone: Efecto de los hilos de conexión

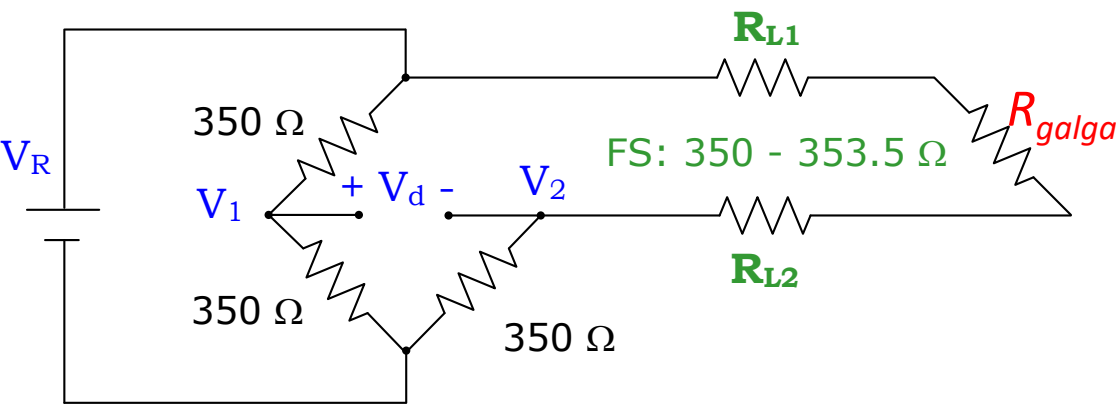
✍ Resistencia no despreciable  $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$

AWG (American Wire Gauge)

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg/Km)	Resistencia (Ω/100m.)	Capacidad (A)
20	0,81	0,520	4,61	3,3	1,6
21	0,72	0,410	3,64	4,1	1,2
22	0,64	0,330	2,89	5,2	0,92
23	0,57	0,260	2,29	5,6	0,73
24	0,51	0,200	1,82	8,5	0,58
25	0,45	0,160	1,44	10,6	0,46
26	0,40	0,130	1,14	13,1	0,37
27	0,36	0,100	0,91	17,0	0,29
28	0,32	0,080	0,72	21,3	0,23
29	0,29	0,064	0,57	26,6	0,18
30	0,25	0,051	0,45	33,3	0,15

# Efecto de los hilos de conexión

- Medida a 2 hilos. EJEMPLO -

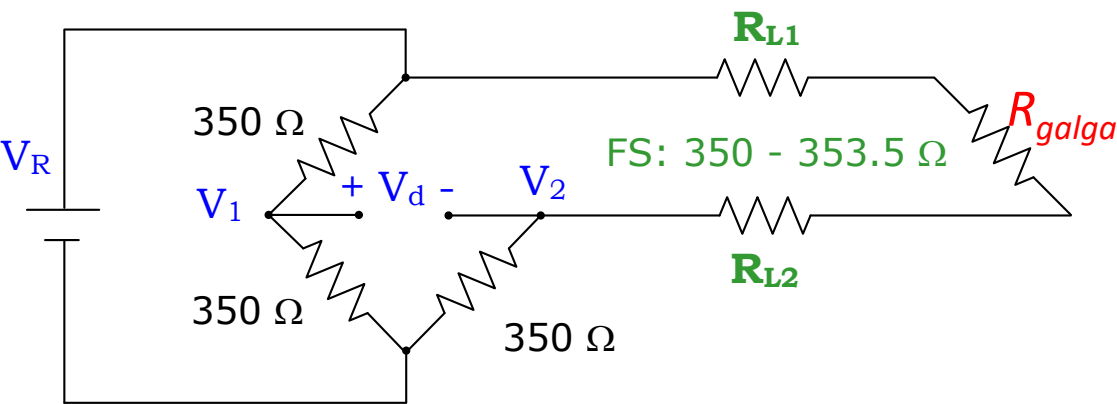


$V_R = 10 \text{ V}$   
L1 y L2: AWG30 ( $0,35 \Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )

Caso (0-FS)	$R_{galga} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
0				

# Efecto de los hilos de conexión

- Medida a 2 hilos. EJEMPLO -



$V_R = 10\text{ V}$   
L1 y L2: AWG30 ( $0,35\Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )

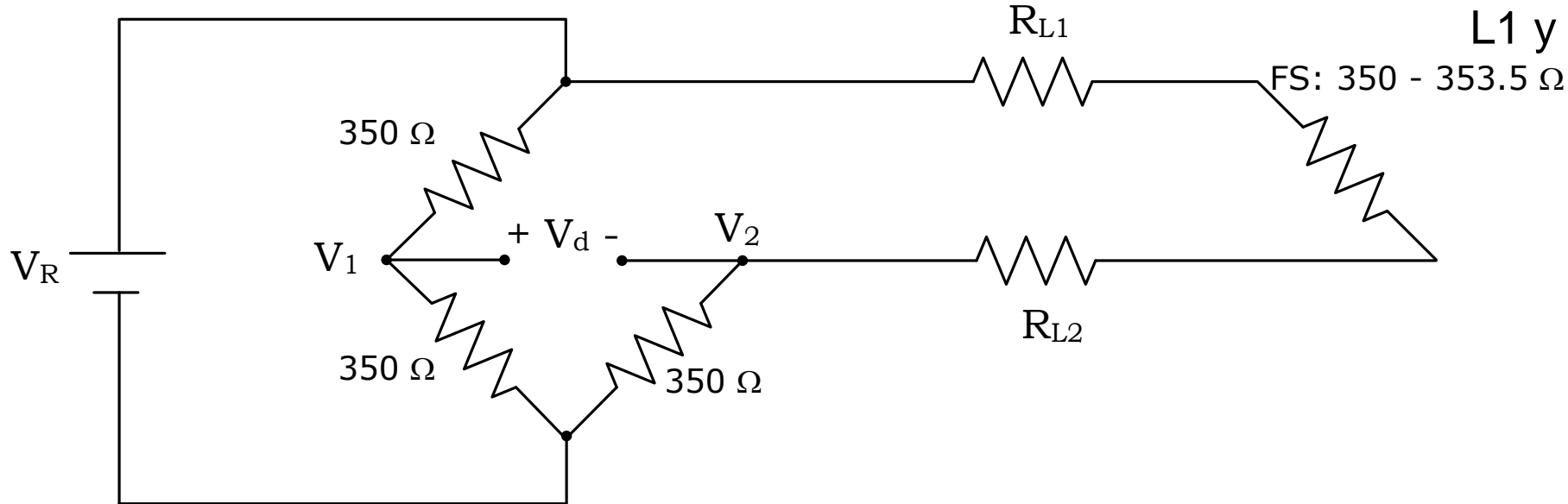
Caso (0-FS)	$R_{galga} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
FS				

# Efecto de los hilos de conexión

- Medida a 2 hilos. EJEMPLO -

$$V_R = 10 \text{ V}$$

L1 y L2: AWG30 ( $0,35\Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )



Caso (0-FS)	$R_{\text{galga}} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
0	350	0	145,63	585
FS	353,5	24,88	169,08	580

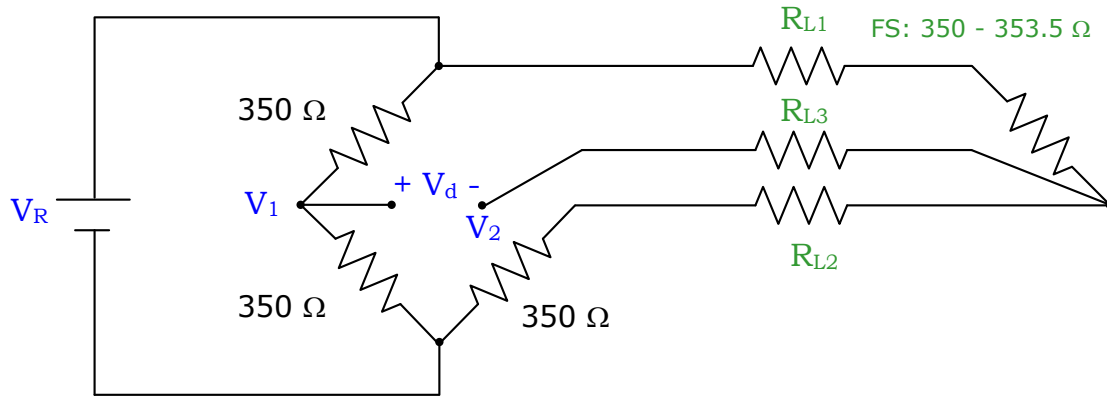


# Efecto de los hilos de conexión

- Medida a 3 hilos. EJEMPLO -

$$V_R = 10 \text{ V}$$

L1 y L2: AWG30 ( $0,35\Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )



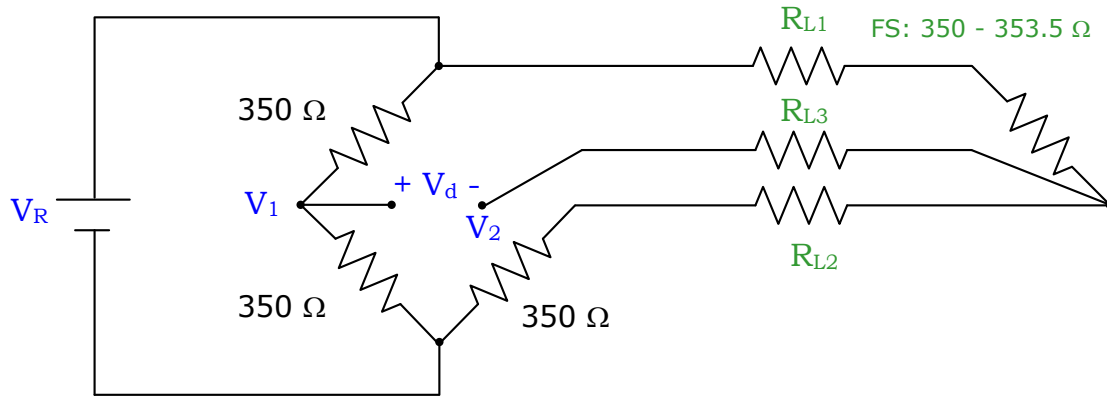
Caso (0-FS)	$R_{\text{galga}} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
0				

# Efecto de los hilos de conexión

- Medida a 3 hilos. EJEMPLO -

$$V_R = 10 \text{ V}$$

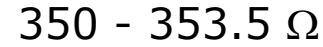
L1 y L2: AWG30 ( $0,35\Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )



Caso (0-FS)	$R_{\text{galga}} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
FS				

- Medida a 3 hilos. EJEMPLO -

L1 y L2: AWG30 ( $0,35\Omega/\text{m} - 30\text{m}$ )



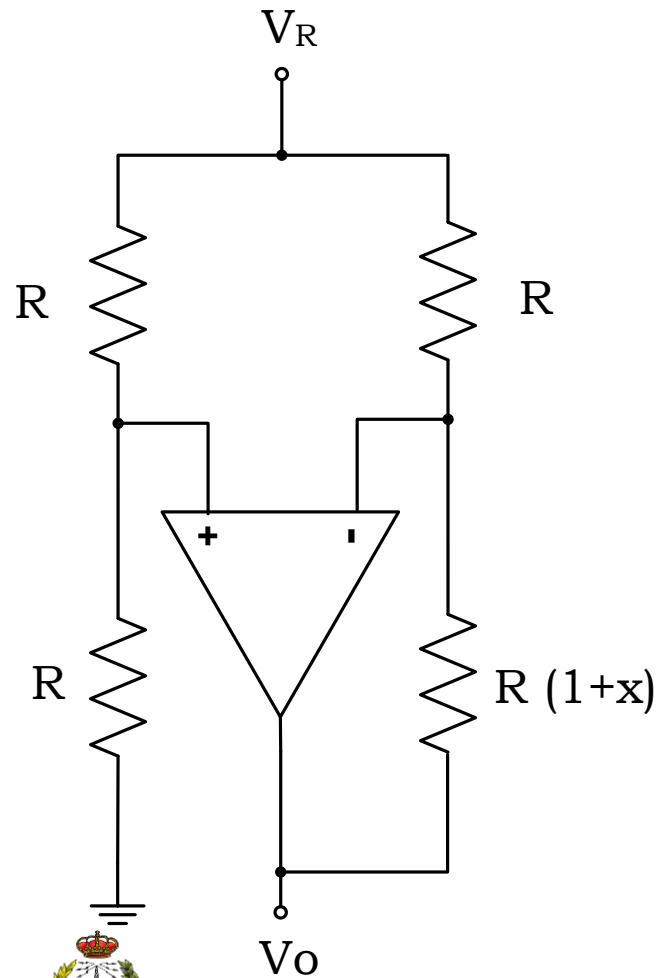
	$R_{galga} (\Omega)$	$V_d$ IDEAL sin hilos (mV)	$V_d$ REAL con hilos (mV)	ERROR (%FS)
0	350	0	0	0
FS	353,5	24,88	24,16	-2,9

# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
- 6. Circuito de Linealización**
7. Otros sensores

# Circuito de linealización

Cálculo de la tensión de salida  $V_o$



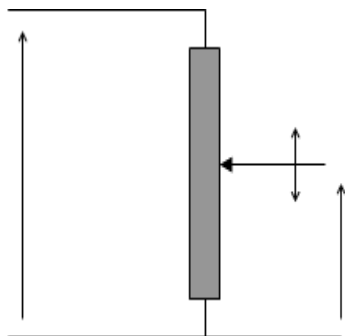
# Índice

1. Concepto de transductor
2. Sensores: sensor de temperatura RTD
3. Medida mediante fuente de corriente
4. Puentes de medida
5. Efecto de los hilos de conexión
6. Circuito de Linealización
- 7. Otros sensores**

# Sensores: Ejemplos

- ✍ Resistencia: RTD, LDR, Potenciómetros,...
- ✍ Capacidad: humedad, proximidad, ...
- ✍ Inducción: distancia, posición, ...
- ✍ Voltaje: termopares, semiconductores...
- ✍ Corriente: fototransistores, proximidad...
- ✍ Frecuencia: encoders, tacómetros, ...

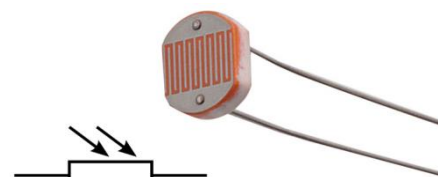
# Ejemplos de sensores resistivos



Potenciométricos



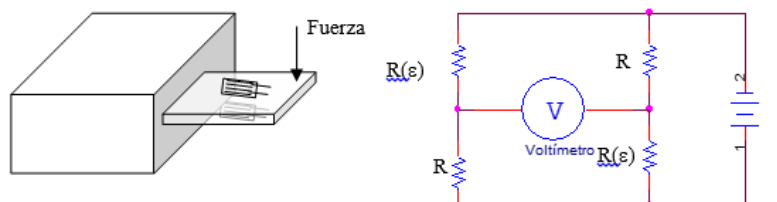
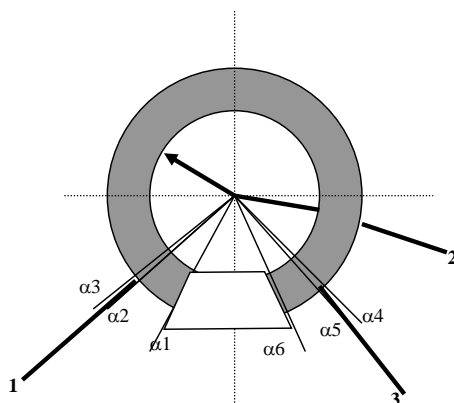
Galgas extensiométricas



Fotorresistencias  
LDR Light Dependent Resistor



Termistores Thermal resistor  
NTC Negative Temperature Coefficient  
PTC Positive Temperature Coefficient



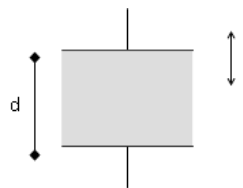
$$V_s = \frac{EK\varepsilon}{2 + 2K\varepsilon} \xrightarrow{\text{pequeñas deformaciones}} V_s \approx \frac{EK\varepsilon}{2}$$



Resistance Temperature  
Detector (RTD)

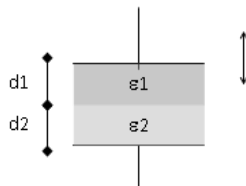


# Ejemplos de sensores capacitivos



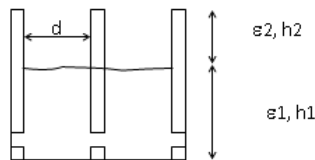
a)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3.7)$$



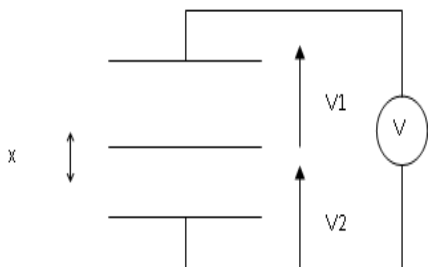
b)

$$C = \frac{A}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}$$



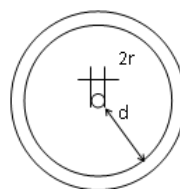
$$C \approx \frac{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2}{2L \ln \left( 1 - \frac{d}{r} \right)}$$

## Medida de desplazamientos

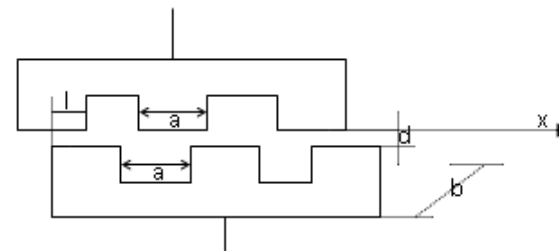


$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d+x}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{d-x}$$



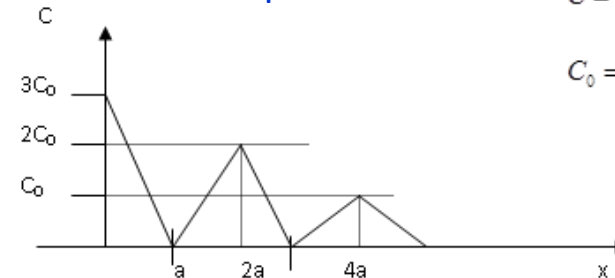
## Medida de líquidos en depósitos



$$C = \epsilon_0 \frac{b \cdot n}{d} l$$

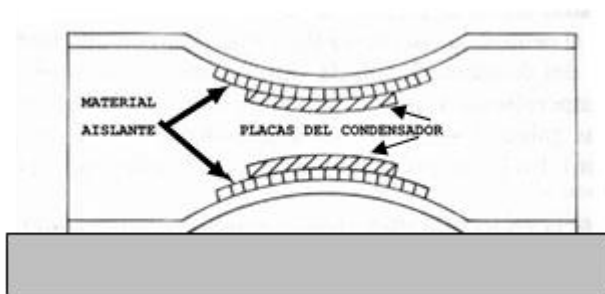
b indica la profundidad

## Medida de micro desplazamientos



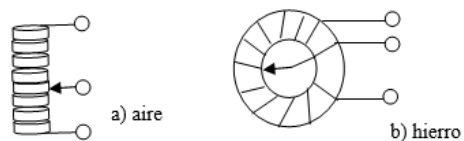
$$C = \epsilon_0 \frac{b \cdot 3}{d} l$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{b \cdot 3}{d} a$$

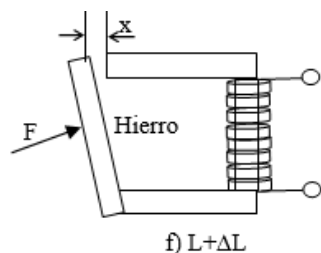


## Medida de presión

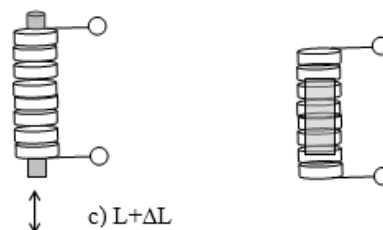
# Ejemplos de sensores inductivos



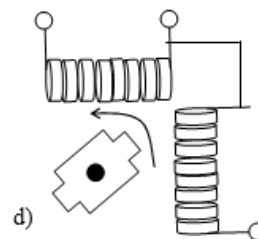
$L$ 's: sin y con núcleo magnético



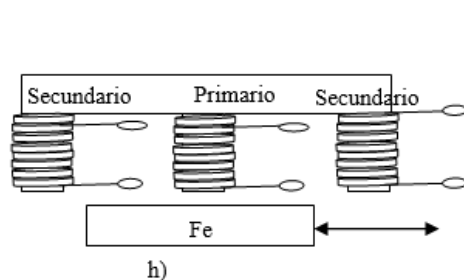
Medida de espesores



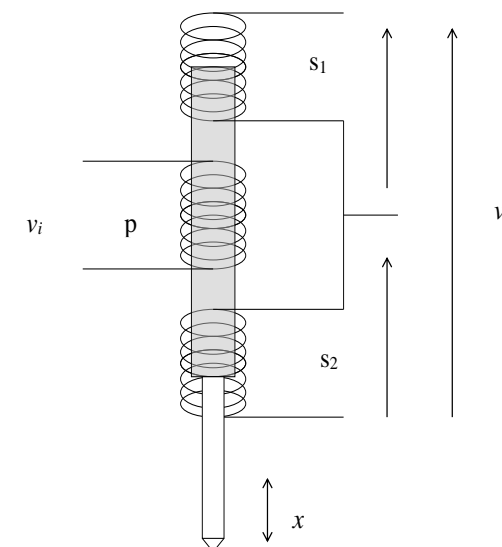
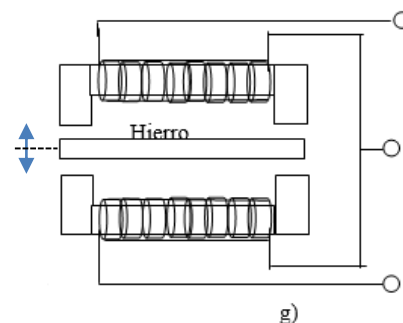
Medida de desplazamientos lineales



Medida de posición angular (diferencial)



Medida de posición lineal (diferencial)

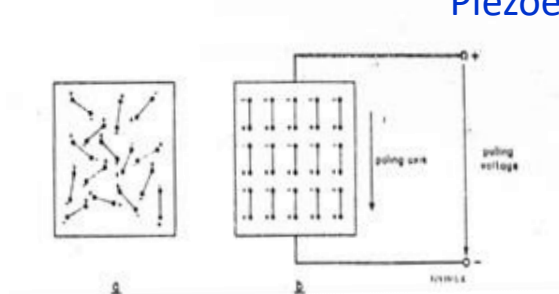


Medida de desplazamientos:  
LVDT Linear Variable Differential Transformer

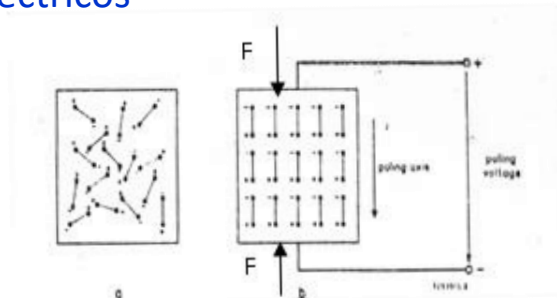


# Ejemplos de sensores: varios tipos

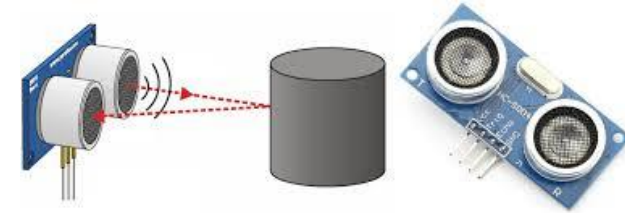
## Piezoeléctricos



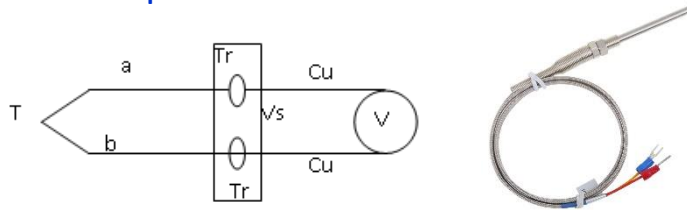
Emisor de ultrasonidos  
Posicionador



Receptor de ultrasonidos  
Medidor de fuerza , presión y aceleración

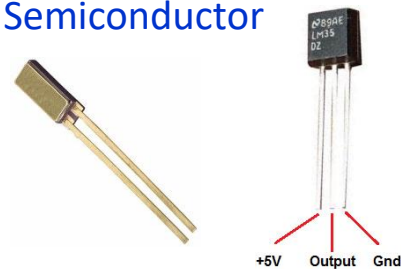


## Termopar



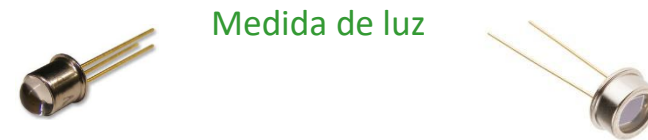
Medida de temperatura

## Semiconductor



Medida de temperatura

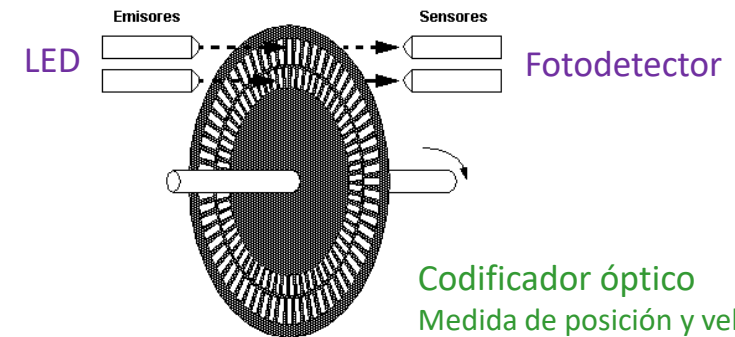
## Sensores optoelectrónicos



Fototransistor

Fotodiodo

Medida de luz



Codificador óptico  
Medida de posición y velocidad angular o lineal

# Sensor: Criterios de Selección

- ✍ Sensibilidad
- ✍ Rango
- ✍ Propiedades físicas
- ✍ Efectos de carga
- ✍ Impedancia de salida
- ✍ Variable de salida
- ✍ Alimentación
- ✍ Ruido
- ✍ Errores
- ✍ Durabilidad
- ✍ Calibración
- ✍ Ambiente
- ✍ Respuesta en frecuencia
- ✍ Coste