

Tema 3
SENSORES RESISTIVOS
PARTE 2

Introducción

¿Por qué hay tantos sensores resistivos?

La resistencia eléctrica es uno de los parámetros físicos cuyo valor depende más claramente de las condiciones externas.

En este tema, trataremos:

- 1) Potenciómetros
- 2) Sensores de temperatura metálicos (RTD)
- 3) Sensores de temperatura semiconductores (NTC)
- 4) Sensores de luz (LDR)
- 5) Galgas extensiométricas
- 6) Sensores de gases

Y aún nos quedarían por ver:

- PTC
- Magnetorresistencias
- Sensores de humedad
- Sensores de nivel
- ...

Potenciómetros

¿Un potenciómetro es un sensor?

En general, un potenciómetro es un sensor resistivo cuyo valor depende de parámetros mecánicos (p.e., rotación)

Pueden presentar multitud de aspectos.



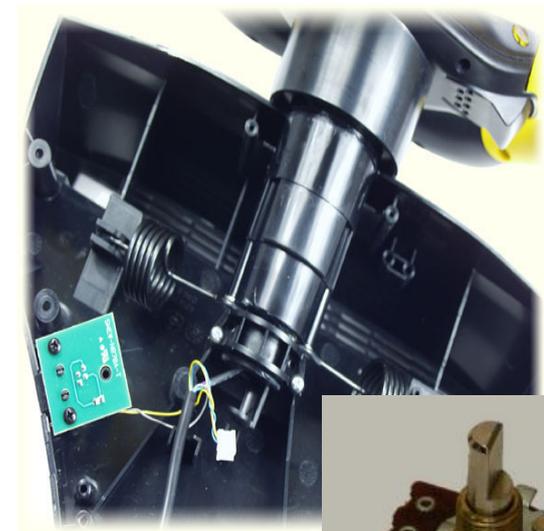
Regulador de volumen

Source: <https://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer>



Joystick con doble potenciómetro

Source: AliBaba



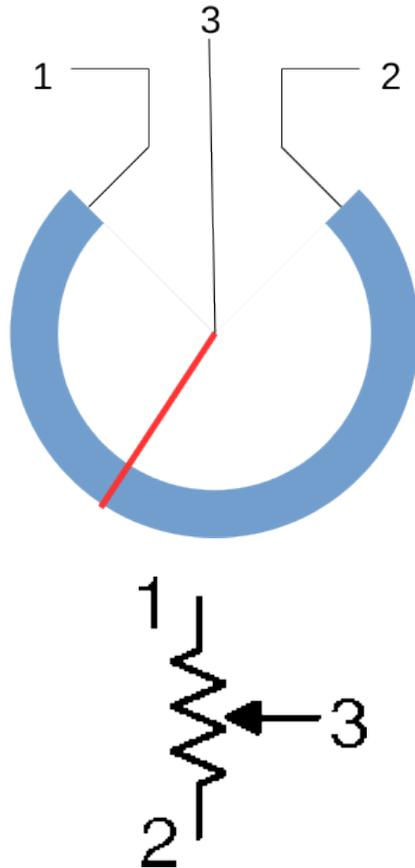
Volante de un coche



Potenciómetros

Técnica de construcción

Grosso modo, tienen forma de corona circular donde la resistencia es bien el sustrato, bien un fino hilo enrollado.



Acondicionamiento de señal

Normalmente, basta con polarizar 1 y 2 con tensión conocida y medir la tensión en 3.

Ajuste a cero con puente de Wheatstone

Al ser un dispositivo mecánico, puede presentar deriva con el uso.

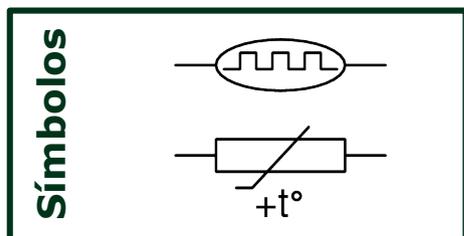
Inmune a cambios de temperatura.

RTD

Resistive Temperature Detector

Resistencias de película metálica.

- En algunos metales, la resistividad crece linealmente con la temperatura (aunque también sufren dilataciones)



Source: <https://es.rs-online.com>

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

{

↙

↘

↘

↘

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + a_1 \cdot (T - T_0) + a_2 \cdot (T - T_0)^2 + \dots)$$

$$L = L_0 \cdot (1 + b_1 \cdot (T - T_0) + b_2 \cdot (T - T_0)^2 + \dots)$$

$$S = S_0 \cdot (1 + b_1 \cdot (T - T_0) + b_2 \cdot (T - T_0)^2 + \dots)^2$$

Con lo que, en general

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (T - T_0) + \alpha_2 \cdot (T - T_0)^2 + \dots)$$

Positivo

Términos despreciables en el rango

RTD

Propiedades como sensor

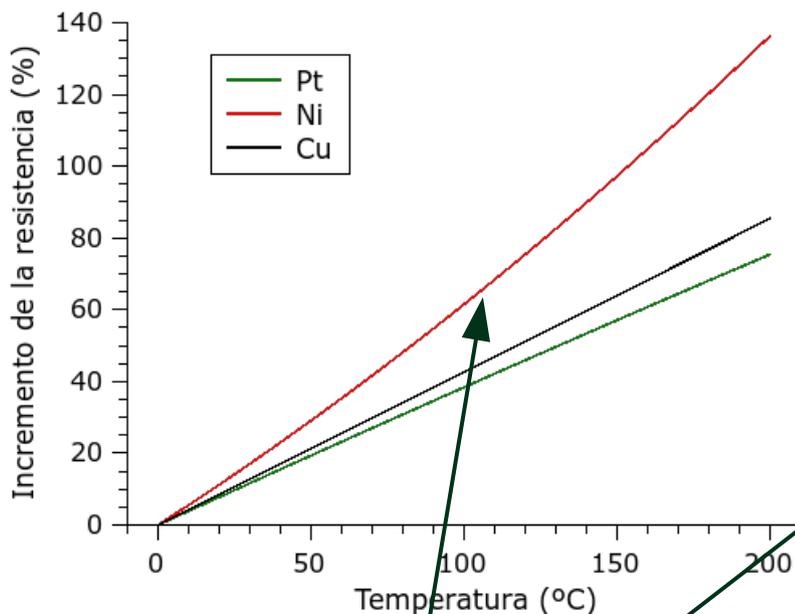
No todos los metales tienen utilidad. Los coeficientes pueden variar si hay impurezas o estrés durante la fabricación.

Metal	α_1	α_2	α_3	Rango
Platino	3902	-0,5775	$-4,183 \cdot 10^{-4}$	-260 - 900
Níquel	5485	6,65	$2,805 \cdot 10^{-5}$	-200 - 430
Cobre	4284	-0,3526	$1,494 \cdot 10^{-3}$	-200 - 260
Wolframio	4500	¿?	¿?	-100 - 1200
	ppm/K	ppm/K ²	ppm/K ³	°C

RTD

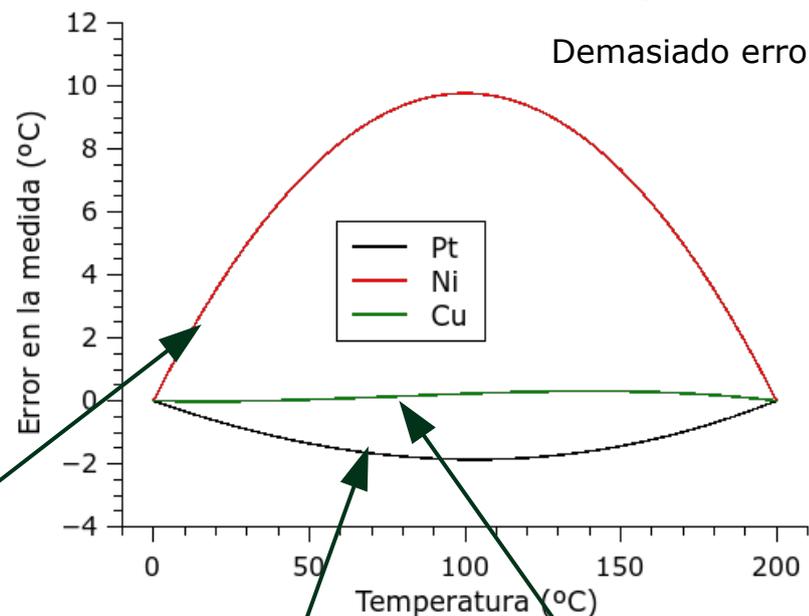
Propiedades como sensor

Distintos RTDs frente a temperatura



El níquel presenta mayor sensibilidad que los otros dos pero también un error muy grande.

Distintos RTDs frente a temperatura



Demasiado error

El platino presenta un comportamiento intermedio y mayor rango de temperaturas.

La linealidad del cobre es casi perfecta

RTD

Pero también hay que mirar más cosas:

- **Tamaño:** Cuanto más pequeño, mejor. Alcanza con mayor rapidez el equilibrio con el sistema e influye menos.
- **Forma:** Mejor cuanto mayor sea la relación área/volumen.
- **Estabilidad química:** Metales nobles como el platino no se degradan en ambientes corrosivos

El platino es el rey de las RTD

Sobre la nomenclatura

Los sensores se nombran como Metal+R₀:

Pt100, Pt1000, Ni120, ...

Tras lo que hay que añadir la clase del sensor, que da cuentas de su calidad y fiabilidad: **Clase A, B**, etc.

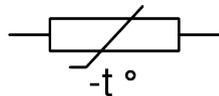
NTC

Negative Temperature Coefficient Resistor

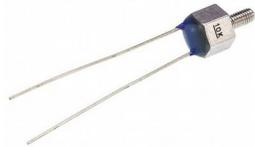
Resistencias basadas en semiconductor

- También llamados "Termistores" (**Thermal Resistor**)
- Decrecimiento con la temperatura muy no lineal.
- Semiconductor: Óxidos de Ni, Co, Mn, Fe, ... muy dopados

Símbolo



Source: <https://es.rs-online.com>



Ecuación de Steinhart y Hart

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln R_{NTC} + C \cdot (\ln R_{NTC})^2 + D \cdot (\ln R_{NTC})^3 + \dots$$

¡¡Muy precisa pero inaplicable!!

Ecuación alternativa (tipo Arrhenius):

$$R_{NTC} = R_{T_0} \cdot \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)$$

¡¡Imprecisa pero aplicable!!

NTC

Negative Temperature Coefficient Resistor

Para trabajar con un NTC, es necesario conocer tanto R_{T_0} como B . Comercialmente, se suele dar el valor de R_{T_0} a 25°C y $B_{25/85} \equiv B$

Normalmente, los NTC se polarizan con una resistencia en serie que linealiza la respuesta en torno a la temperatura central T_c .

Pasos que seguir

- 1) Calcular la resistencia del NTC en torno a la temperatura central (R_{T_c}).
- 2) Determinar la resistencia en serie buscando la máxima linealidad. Se requiere desarrollo en serie de potencias:

$$R_{NTC} = R_{T_c} \cdot \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_c}\right) \approx R_{T_c} + \alpha \cdot (T - T_c) + \beta \cdot (T - T_c)^2 + O((T - T_c)^3)$$

NTC

Negative Temperature Coefficient Resistor

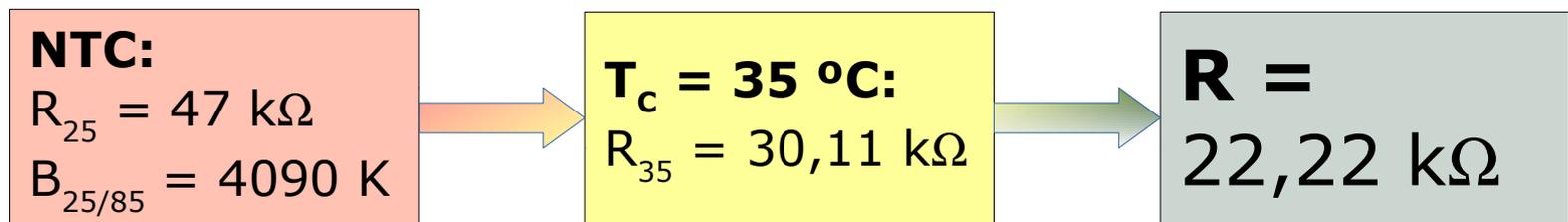
$$\alpha = \left\{ \frac{\partial R_{NTC}}{\partial T} \right\}_{T_c} = \frac{-B \cdot R_{Tc}}{T_c^2}$$

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 R_{NTC}}{\partial T^2} \right\}_{T_c} = \frac{B \cdot (B + 2 \cdot T_c)}{2 \cdot T_c^4} \cdot R_{Tc}$$

Por tanto:

$$R = \frac{\alpha^2}{\beta} \cdot R_{Tc} = R_{Tc} \cdot \frac{B - 2 \cdot T_c}{B + 2 \cdot T_c}$$

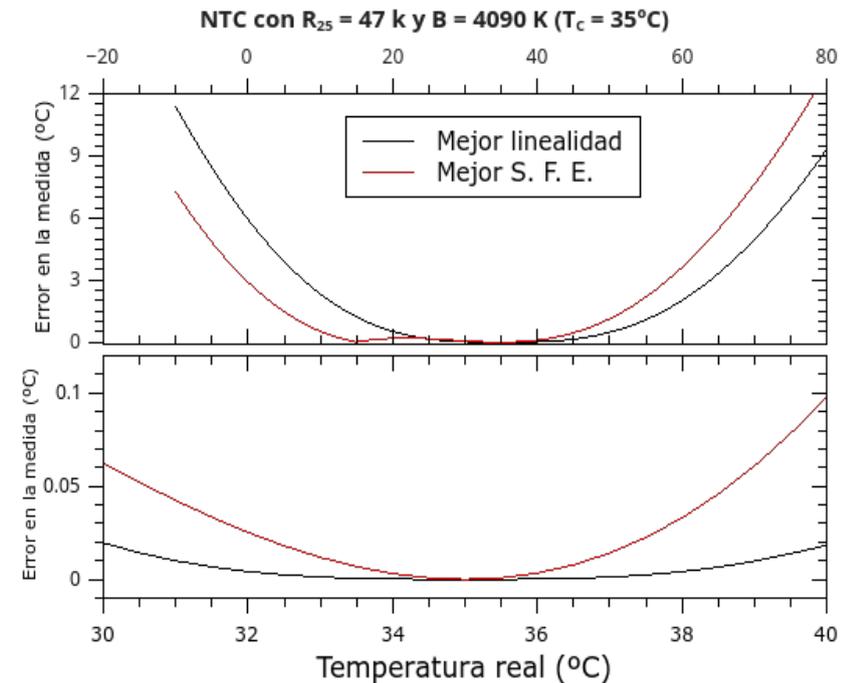
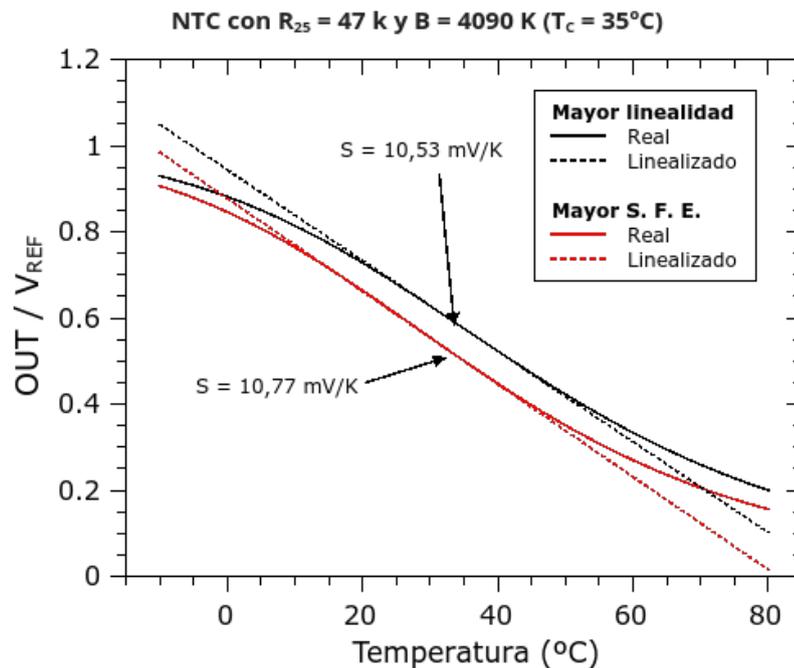
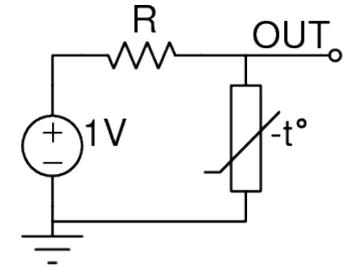
Un ejemplo:



NTC

Negative Temperature Coefficient Resistor

Aparentemente, sólo aparece un desplazamiento en las curvas de salida. Sin embargo, al representar el error, sobre todo muy cerca del centro, el error es mínimo en el caso de escoger el criterio de mayor linealidad.



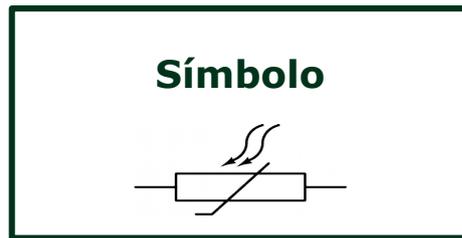
Pero no se puede cantar victoria. La ecuación tipo Arrhenius está viciada y sólo la de Steinhart-Hart es válida.

LDR

Light-Dependent Resistor

Resistencias basadas en semiconductor

- Disminuyen al ser iluminadas (efecto fotoeléctrico).
- Semiconductor: CdS, CdSe,... :Semiconductores directos y con $E_G \sim 2,5 \text{ eV}$ para obtener máximo en el visible
- Dispuesto en zigzag sobre capa cerámica por optimización.



Source: <https://es.rs-online.com>



Semiconductores también usados como pigmentos

Source: www.alibaba.com

Ecuación característica

$$R_{LDR}(L) = R_0 \cdot \left(\frac{L_0}{L} \right)^a$$

Notas

- R_0, L_0 : Valores de referencia
- $0,7 < a < 1,5$
- Respuesta lenta ($\sim 0,03-0,5 \text{ s}$)
- R_0 : $\pm 20\%$ en $-20^\circ\text{C} < T < 70^\circ\text{C}$

LDR

Usos

Dada su lenta respuesta pero su gran robustez, se utilizan para medir la luminosidad ambiental.

La linealización con resistencia serie no siempre es posible

$$R_{LDR}(L) = R_0 \cdot \left(\frac{L_0}{L}\right)^a \approx R_0 - \frac{a \cdot R_0}{L_0} \cdot (L - L_0) + \frac{a \cdot (a+1) R_0}{2 \cdot L_0^2} \cdot (L - L_0)^2 + O((L - L_0)^3)$$

$$R = \frac{\alpha^2}{\beta} - R_0 = \frac{a-1}{a+1} \cdot R_0$$

Sólo tiene sentido si $a > 1$.

$$S_L = -\frac{V_{REF}}{L_0} \cdot \frac{a^2 - 1}{4 \cdot a}$$

Mayor sensibilidad cuanto más lejos de 1.
 En $a = 1$, sólo hay componentes no lineales (cúbicas).

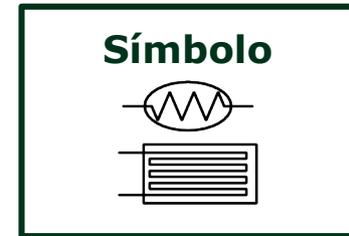
En cualquier caso, siempre se pueden utilizar con comparadores o en osciladores de relajación ($f_{osc} \sim L^a$).

Galgas extensiométricas

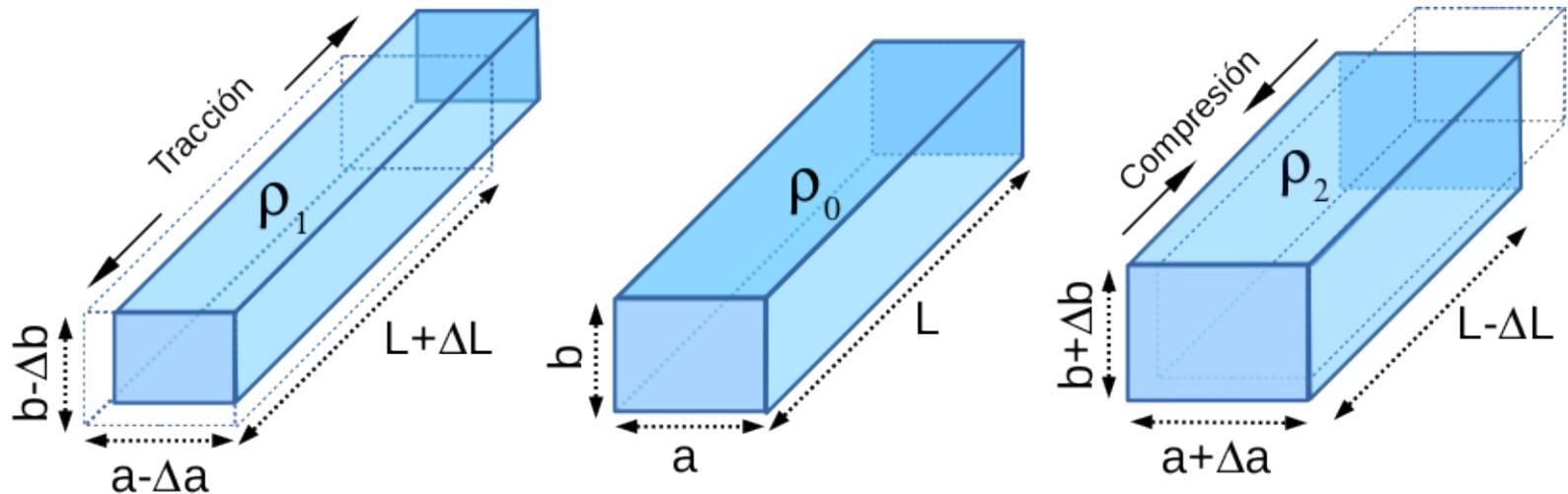
Principio de funcionamiento

Son resistencias cuyo valor varía según la tensión **mecánica** a la que estén sometidas.

- Dilatación y compresión
- Efecto piezorresistivo



¿Por qué ocurre esto?



El esfuerzo modifica la longitud y sección del conductor

Galgas extensiométricas

Un poco de matemáticas...

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{a \cdot b} \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta b}{b} \quad \longleftarrow$$

Propagación de
incertidumbre
NO aleatoria

Y un poco de física:

Al someter a tensión un material, el incremento relativo en la dirección del esfuerzo está relacionado con las direcciones transversales por el **módulo de Poisson**, ν , idealmente 0,5 pero entre 0,24 y 0,40 en metales rígidos, y aún menos en metales maleables.

$$\frac{-\Delta a/a}{\Delta L/L} = \frac{-\Delta b/b}{\Delta L/L} = \nu \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta R}{R} = \left(1 + 2 \cdot \nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L} \right) \cdot \frac{\Delta L}{L} = K \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$K = 1 + 2 \cdot \nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L}$$

Factor de galga

Es habitual medir la deformación de la galga en **microdeformaciones**, $\mu\epsilon$, que se define como un incremento de longitud de 1 p.p.m: $\Delta L = 10^{-6} \cdot L$

La deformación de la galga es la del objeto estudiado

Galgas extensiométricas

Algo más de física

El incremento relativo de la longitud es proporcional al esfuerzo, e inversamente proporcional a la sección del material ($S = a \cdot b$) y al **módulo de Young, E**, del material en cuestión (experimental).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{S \cdot E} \cdot F$$

¿Qué controla el factor de galga, K?

Es importante saber si la resistividad cambia con la deformación.

- **METALES:** Interviene el **factor de Bridgman, C**.

$$\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta L / L} = C \cdot (1 - 2 \cdot \nu)$$

	C	ν	K
Pt	4,4	0,1	6
Cu-Ni	1,13	0,33	2

- **SEMICONDUCTORES:** Efecto **piezorresistivo**. Experimentalmente, a 25°C:

$$\text{Tipo p} \quad \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 119,5 + 4 \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$\text{Tipo n} \quad \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = -110 + 10 \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Claramente, el factor de galga es mucho más alto que en metales.

Galgas extensiométricas

¿Qué otras cosas afectan a la galga?

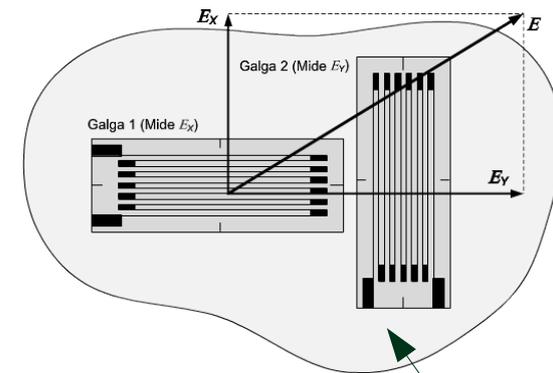
- **Límite elástico:** No se puede superar el límite que impide el retorno a la posición de equilibrio al inutilizar la galga. Este límite es de $3000 \mu\epsilon$ en semiconductores, $40000 \mu\epsilon$ en metales (Deformación del 4%).
- **Deriva térmica:** La resistencia de las galgas cambia con la temperatura. Por tanto, se debe proporcionar el coeficiente térmico para eliminar este efecto en el procesamiento posterior de datos. Toda galga debe estar cerca acompañada de un sensor de temperatura
- **Ciclos de vida:** Una galga no puede ser estirada y comprimida de manera indefinida. Puede soportar 10^5 ciclos de contracción/expansión.

¿Cómo se mide la deformación de una galga?

Se recomienda un puente de Wheatstone.

- Galgas pasivas
- Galgas simétricas para aumentar sensibilidad.

Debe medirse simultáneamente la temperatura.

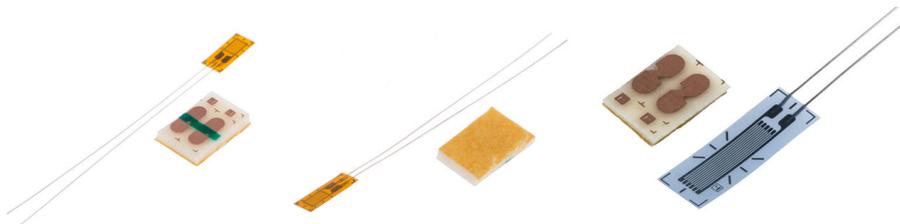
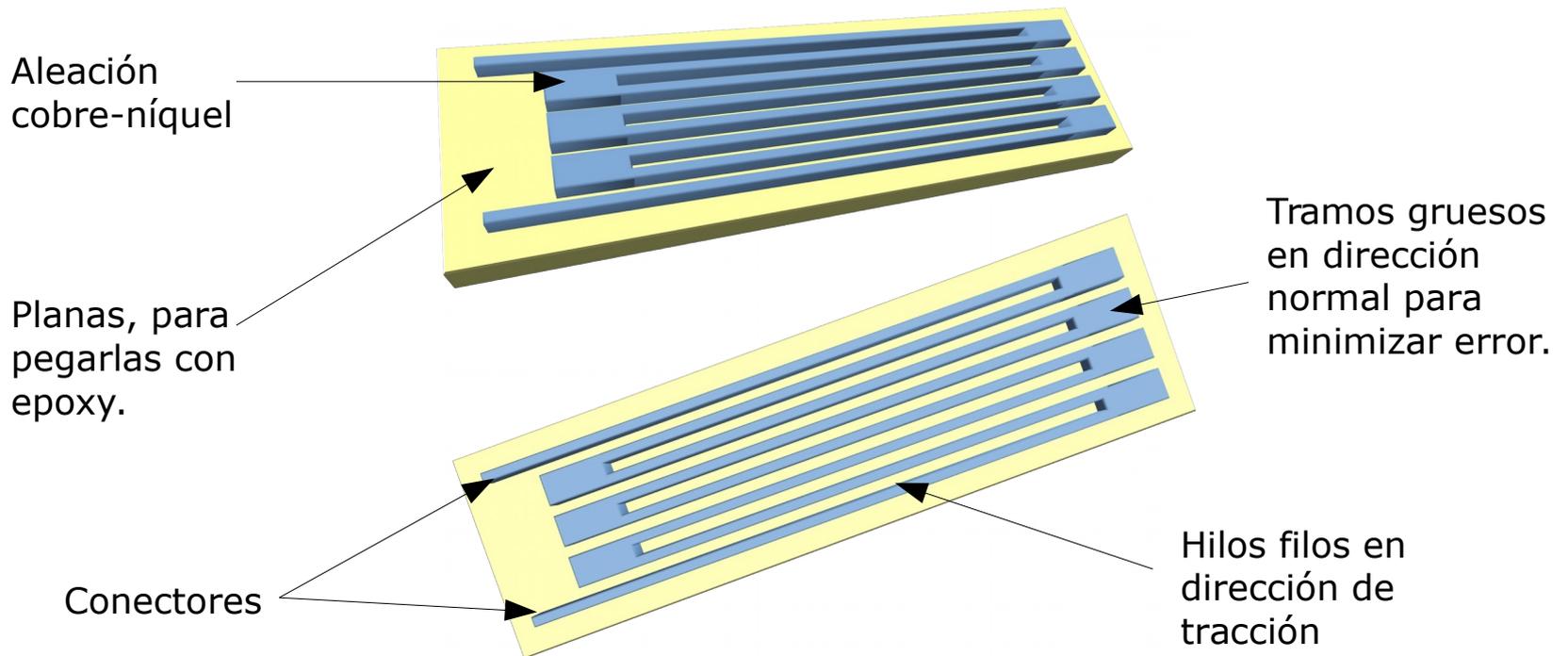


Autor: Miguel A. Pérez García.
Ver bibliografía

*Como medir
dirección de
esfuerzo*

Galgas extensiométricas

Métodos de fabricación: Galgas de película metálica



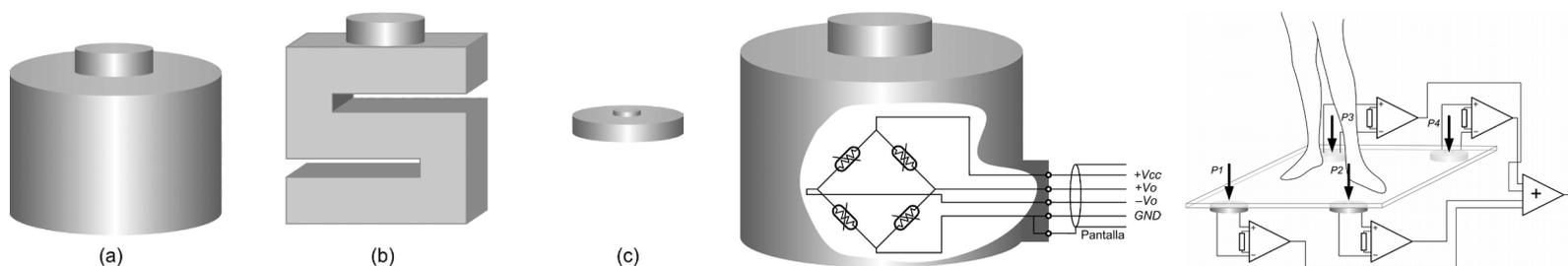
Source: <https://es.rs-online.com>

Pueden tener otras formas para medir otro tipo de esfuerzos como torsión

Galgas extensiométricas

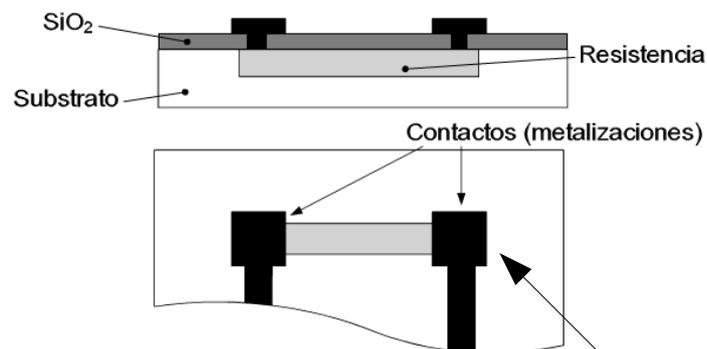
Métodos de fabricación: Otras galgas

Celdas de carga para medir pesos:



Autor: Miguel A. Pérez García. Ver bibliografía

Celdas semiconductoras:



Autor: Miguel A. Pérez García. Ver bibliografía

Preguntas pendientes

En general, el campo de las galgas requiere una gran especialización y se debe adquirir experiencia previa:

- ¿Cómo elegir los puntos de colocación?
- ¿Cómo pegarlas adecuadamente al objeto?

Sólo se ha hecho una breve introducción.

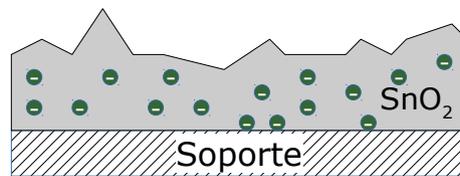
*Pueden
incluirse en IC.*

Sensores de gases

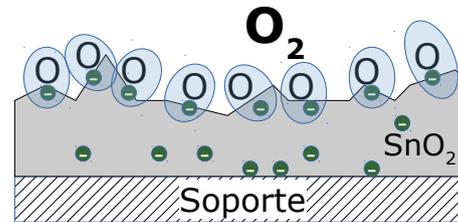
Principio de funcionamiento

Óxidos metálicos semiconductores que adsorben oxígeno y que substraen portadores del sustrato. Principalmente, **SnO₂**.

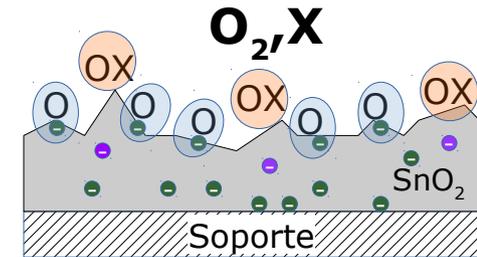
Explicación



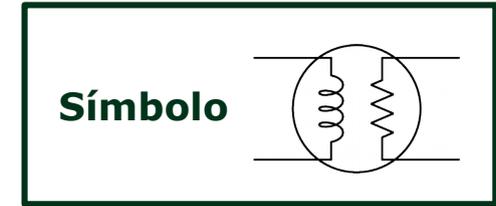
El dióxido de estaño tiene carácter semiconductor y es dopado para ser tipo *n*.



Al ser expuesto al oxígeno natural, el oxígeno se rompe, se adhiere a la superficie e inmoviliza electrones.



Si hay gases reductores (**X**), algunos átomos de oxígeno se recuperan y los electrones vuelven al material.



Símbolo



Source: <https://es.rs-online.com>

Sensores de gases

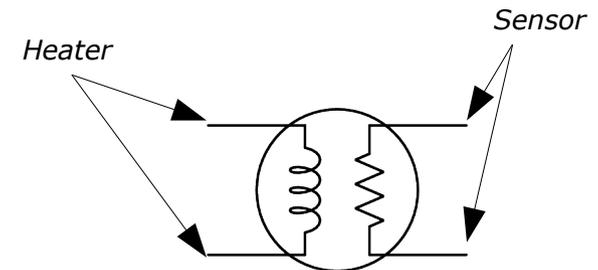
Algunos detalles interesantes...

- **Detección de concentración de oxígeno:** Experimentalmente, se ha comprobado que la ecuación que controla la resistividad depende de la **presión parcial del oxígeno, p_{O_2}** :

$$\rho = A \cdot \exp\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T}\right) \cdot p_{O_2}^{1/N}$$

Constante propia del dispositivo (pointing to A)
 Energía de activación (pointing to E_A)
 La resistividad decrece con la temperatura (pointing to $k_B \cdot T$)
 Depende de los defectos del óxido. Entre 4 y 6. (pointing to $1/N$)

- **Influencia de la temperatura:** En general, **es necesario calentar** el sensor hasta varios cientos de grados para que funcione. Necesita dos terminales de alimentación adicionales aunque el consumo no es muy alto: El sensor es prácticamente puntual.



Sensores de gases

Algunos detalles interesantes...

- **Detección de otros gases:** Los sensores reaccionan ante cualquier otro gas reductor (CO, NO_x, etc.) que libera electrones. Experimentalmente:

$$R = R_0 \cdot \left[\frac{X}{X_0} \right]^{-a}$$

[X]: Concentración del gas en p.p.m.

a : Número real mayor que 0.

- **Inespecificidad:** La respuesta ante algunos gases no es conocida y debe ser estimada con antelación. Por otra parte, en ambientes reales están mezclados.
 - Uso de redes neuronales
 - Narices electrónicas

Utilidad de sensores

Un hecho obvio...

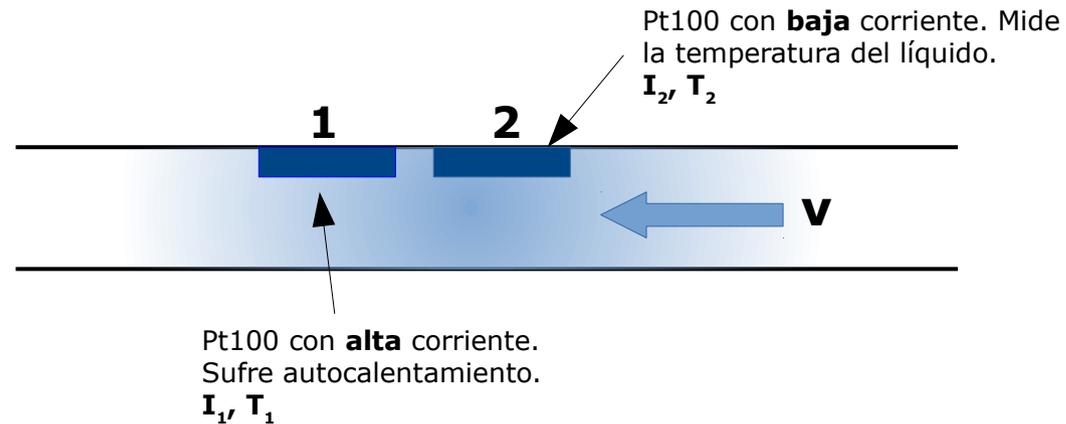
El sensor puede utilizarse para medir la variable para la que fue diseñado.

- **Temperatura:**
 - Se busca precisión en amplio rango → PT100
 - Se busca precisión en un corto intervalo y el coste debe ser bajo → NTC
 - Alternativas: *Bandgap*, Termopar, piroeléctricos, etc. → Próximos temas.
- **Luminosidad:**
 - LDR: Control día/noche, ajuste de apertura de objetivo en cámaras, etc.
 - Pulsos de luz: Fotodiodos, fotomultiplicadores → Próximos temas.
- **Esfuerzo:**
 - Galgas: Tensión, compresión, presión, etc.
 - Otra opción: Sensores capacitivos → Próximos temas.
- **Contaminación, humedad, etc:** Sensores resistivos específicos (o capacitivos → Próximos temas)

Pero el ingenio también ayuda...

Utilidad de sensores

Medida de caudal



$$T_1 = T_2 + R_\theta \cdot R_{RTD} \cdot I_1^2$$

$$R_\theta = \frac{R_{\theta,0}}{1 + K \cdot \sqrt{v}}$$

El autocalentamiento forzado del sensor depende de la disipación del líquido.
 Obviamente, hay que realizar calibración.

¿Podría hacerse algo parecido con galgas?