



Sensores

Susana Borromeo
Ángel Luis Álvarez
Dpto. Ingeniería Telemática y Tecnología Electrónica



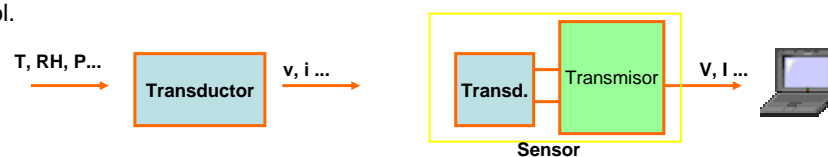
Concepto de Transductor y Sensor. Especificaciones

- **Def. Transductor:**

Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de magnitud física de entrada, en otra diferente de salida. En nuestro caso, la magnitud de salida será eléctrica: corriente o tensión.

- **Ej. :** Un micrófono incorpora un transductor electroacústico (por ejemplo piezo-eléctrico) que convierte la energía acústica (vibraciones sonoras: oscilaciones en la presión del aire) en energía eléctrica (variaciones de voltaje).

- **Nota.** El transductor es la cabeza sensible del **sensor**. El sensor electrónico incluirá, además, lo que se llama un TRANSMISOR, que es un circuito acondicionador de señal y, en muchos casos, electrónica de procesamiento y control.





Tipos de sensores

1.- Según la magnitud eléctrica que varía en función de la magnitud física

a. Pasivos

- Resistivos: Potenciómetros, NTC, PTC, LDR, Magnetoresistivos
- Inductivos: Inductancia Variable, LVDT
- Capacitivos
- Ópticos (semiconductores): fotodiodos, fototransistores, CCDs

Activos

- Termopares
- Efecto Hall
- Piezoeléctricos

2.- Según la conversión magnitud física- magnitud eléctrica

- Directo
- Elemento de acondicionamiento intermedio



Especificaciones de un sensor

- Linealidad
- Precisión (error en la medida)
- Sensibilidad (variación de la medida respecto a cambios de entrada)
- Repetitividad de la medida.
- Poder de resolución
- Intercambiabilidad (necesidad de recalibración o no)
- Estabilidad a largo plazo. Resistencia a los contaminantes físicos o químicos.
- Tiempo de respuesta. Capacidad de recuperación.
- Tamaño
- Encapsulado.
- Electrónica integrada. Salidas procesables.
- Coste.

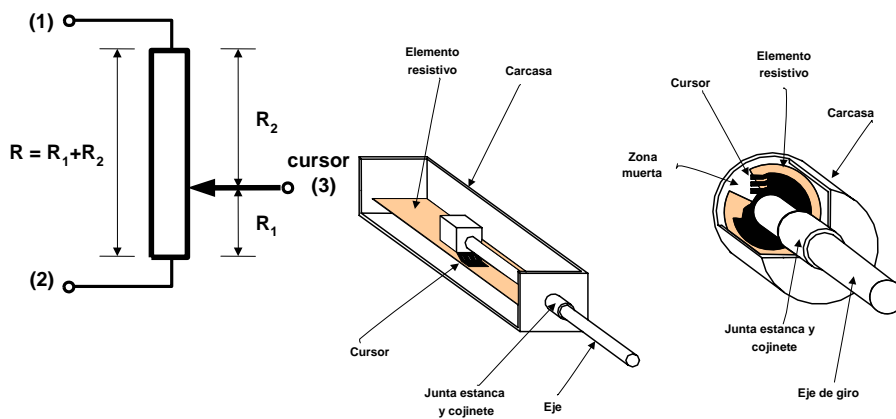


Transductores Resistivos

- Potenciómetros: sensor de desplazamiento (lineal, angular)
- Termistores: NTC, PTC
- LDR (sensor de luminosidad)
- galgas extensiométricas (sensor de deformación)
- Magnetoresistencias (campo magnético)
- RTD (sensor lineal de temperatura)

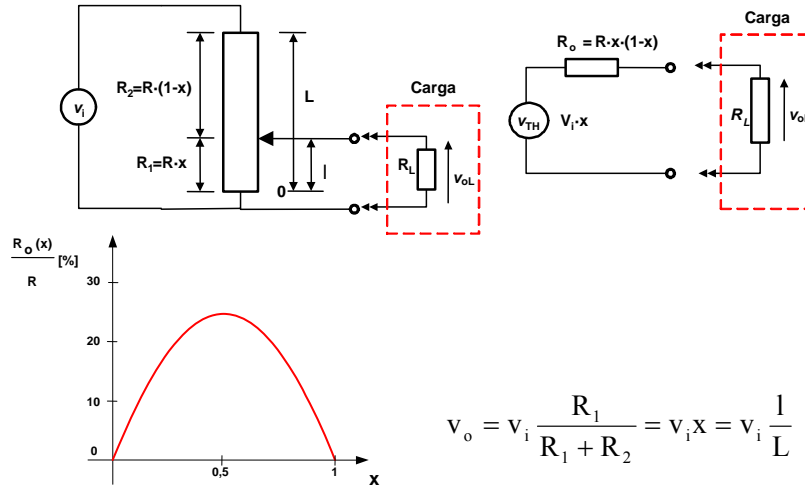


Potenciómetros





Acondicionamiento de Potenciómetros (sin carga)



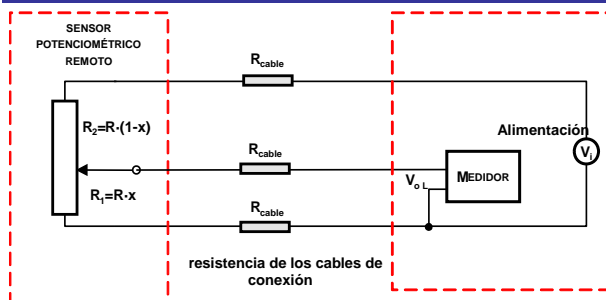
2006-2007

Instrumentación Electrónica

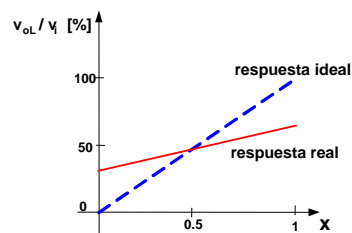
7



Técnica de medida a 3 hilos



$$V_{oL} = V_i \frac{Rx + R_{cable}}{R + 2R_{cable}} = V_i \frac{x + h}{1 + 2h}$$



$$V_{oL}(0) = V_i \frac{h}{1 + 2h}$$

$$S = V_i \frac{1}{1 + 2h}$$

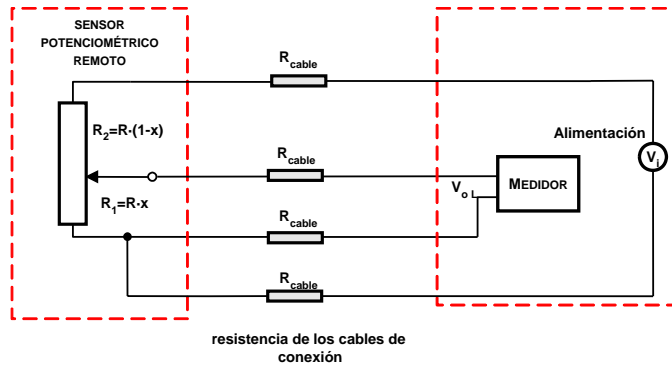
2006-2007

Instrumentación Electrónica

8



Técnica de medida a 4 hilos



$$V_{oL} = V_i \frac{Rx}{R + 2R_{cable}} = V_i \frac{x}{1 + 2h} \quad \text{siendo } h = R_{cable}/R.$$



Ejemplo

Calcular el error de offset y de sensibilidad de un sistema de medida a 3 hilos si la longitud del cable es de 200 m y se utiliza cable de $20\Omega/\text{Km}$. Proponer un sistema para corregir ambos errores. Considere un potenciómetro de 100Ω de resistencia nominal y una tensión de alimentación de 5V



Tipos de sensores: Control de Temperatura

RTD (*Resistance Temperature Detector*):

Sensor de temperatura de resistencia METÁLICA. Se basan en que la resistencia eléctrica de metales puros aumenta con la T. En algunos de forma casi lineal. Típico ejemplo: **Pt100**

Termistor. NTC (Negative Temperature Coefficient), o PTC (Positive Temperature Coefficient).

NTCs: Son resistencias de material semiconductor (óxidos metálicos) cuyo valor DISMINUYE cuando aumenta la temperatura.

PTCs: Son termistores que presentan la propiedad de experimentar un AUMENTO brusco de la resistencia cuando la T supera un valor crítico, característico del material.

Termopar (*themocouple*)

Sensor de T constituido por la unión de dos metales diferentes, que produce una tensión (\approx mV) proporcional a la diferencia de temperaturas entre los puntos de la unión de ambos metales.



RTDs

- Son muy lineales en un amplio rango de temperaturas (-240°C a 650°C)

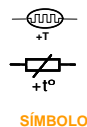
$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot T)$$

R_0 da nombre a la RTD,

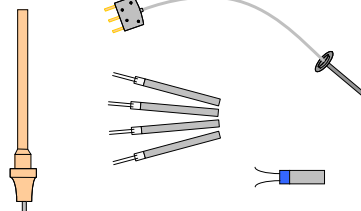
p.ej. Pt100 (RTD de platino con $R_0=100\Omega$)

En la Pt100, $\alpha = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

- Estables y muy resistentes a contaminantes.
- Caras : varias decenas de €
- Cte. de tiempo larga, dependiendo del tamaño: varios segundos.
- Diversos tamaños: de cápsula tubular, de lámina

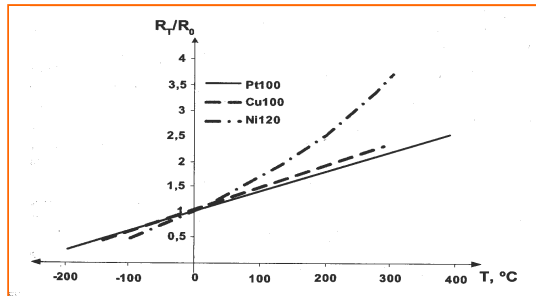


SÍMBOLO

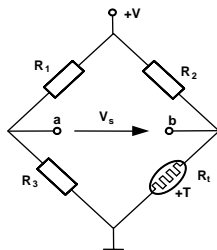


ASPECTO

Metal	Margen útil de temperatura (°C)	Valores de R ₀ (Ω)
Platino	-260 ÷ 900	25, 100, 400, 500, 1000 y 2000
Wolframio	-100 ÷ 1200	10, 50, 100, 1000 y 2000
Níquel	-200 ÷ 430	120, 1000
Cobre	-200 ÷ 260	10, 100, 1000
Balco	-100 ÷ 230	100, 1000 y 2000



Resistencia normalizada de varias RTDs en función de T



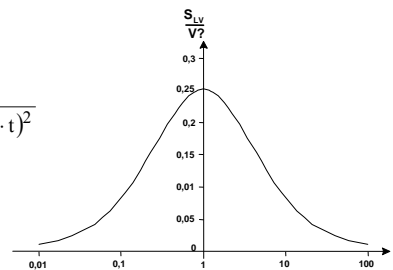
$$V_s = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0(1 + \alpha t)}{R_0(1 + \alpha t) + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$\frac{R_0}{R_0 + R_2} = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$R_1 = R_2 = R = r \cdot R_0$$

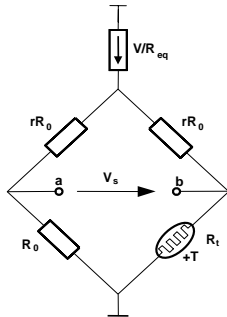
$$V_s = V \cdot \frac{r \cdot \alpha t}{(r + 1) \cdot (r + 1 + \alpha t)}$$

$$S_V = \frac{dV_s}{dt} = V \cdot \alpha \cdot \frac{r}{(r + 1 + \alpha t)^2}$$





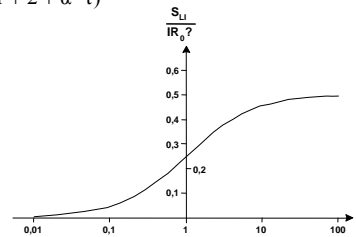
Acondicionador de señal



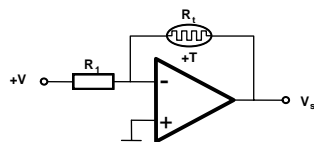
$$R_{eq} = \frac{R_0 \cdot (r+1) \cdot (r+1 + \alpha \cdot t)}{2r + 2 + \alpha \cdot t}$$

$$V_s = I \cdot R_0 \cdot \frac{r \cdot \alpha \cdot t}{2 \cdot (r+1) + \alpha \cdot t}$$

$$S_I = \frac{dV_s}{dt} = 2IR_0\alpha \cdot \frac{r \cdot (r+1)}{(2r + 2 + \alpha \cdot t)^2}$$

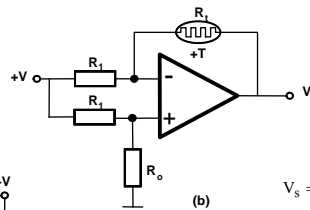


Acondicionador de señal



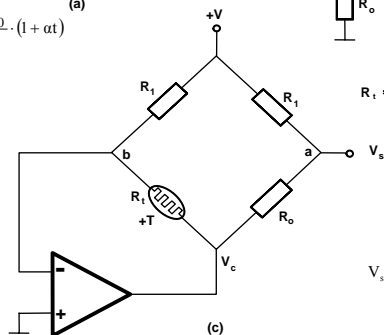
$$V_s = -\frac{V \cdot R_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha t)$$

(a)



$$V_s = -\frac{V \cdot R_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha t$$

(b)



$$R_1 = R_0 \cdot (1 + \alpha t)$$

$$V_s = -\frac{V \cdot R_0}{R_1 + R_0} \cdot \alpha t$$

$$V_c = -\frac{V \cdot R_0}{R_1} \cdot (1 + \alpha t)$$

(c)



RTD: ejemplo

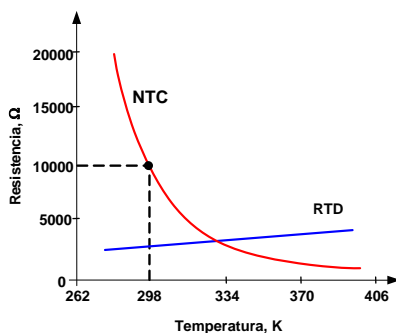
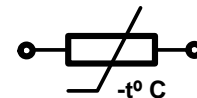
Se dispone de una RTD de platino de 100Ω que tiene un coeficiente de disipación térmica de 6 mW/K en aire y 100 mW/K en agua. Si se desea que el error por calentamiento sea inferior a $0,1^\circ\text{C}$.

¿Cuánta corriente puede circular por la resistencia según que esté al aire o inmersa en agua?



NTCs

- Mezcla de óxidos metálicos (Ni-Mn-O, Ti-Fe-O, Ni-Cu-Mn-O)
- Muy alta sensibilidad 100 ohmios/grado (la PT100: $0.385 \text{ ohmios por grado}$)
- Muy baratos y pequeños (\Rightarrow menor cte. de tiempo). Pvp: $\approx 1 \text{ €}$
- Problemas de estabilidad: hay que “envejecerlos”, si no, pueden durar pocos años (típico 3-5 años)



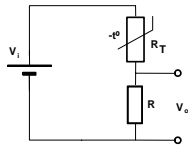
Respuesta en T comparada de una Pt100 y una NTC

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (T, \text{ en K})$$

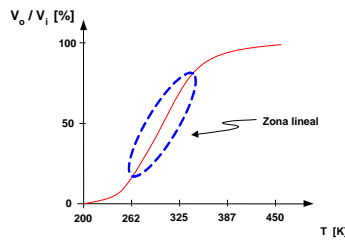
$$\alpha = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

NTCs

- No lineal $R(T) = R(T_0) \exp\{-B(1/T-1/T_0)\}$. Requiere linealizar en torno al punto de trabajo.
- Rango pequeño de T. Termostatos de hogar: 5°-45° → Útil para T ambiente
- Menos precisión (a veces no interesa más)



$$v_o(T) = v_i \frac{R}{R + R_T}$$



Linealizar: punto de inflexión en el punto medio del rango de medida (T_c):

$$\frac{d^2V}{dT^2} = 0 \Rightarrow R = \frac{B - 2T_c}{B + 2T_c} R_{TC}$$

Fuente de alimentación limitada por la potencia máxima que puede disipar la NTC:

$$P_{\max} = \frac{(V_{i\max}/2)^2}{R} \Rightarrow v_{i\max} = \sqrt{4P_{\max}R}$$

$$P_{\max} = \delta \cdot \Delta T$$

NTCs: Ejemplo

Diseñe un sistema de medida de temperatura entre 50 y 100°C con un error inferior a 2°C, utilizando una NTC con los siguientes datos:

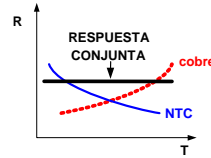
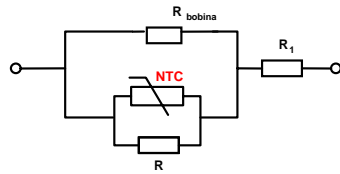
- B = 4600K,
- $R_0 = 100K @ 25^\circ C$
- $\delta = 100 \text{ mW}/^\circ C$

La salida debe llevarse a un convertor A/D con rango 0-5V

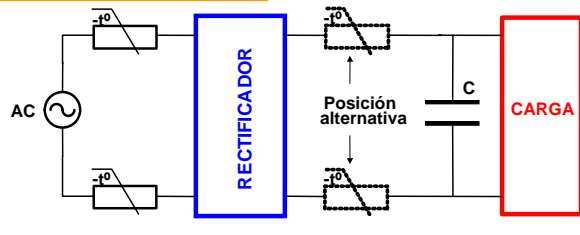


NTCs: aplicaciones

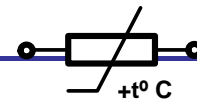
Compensación



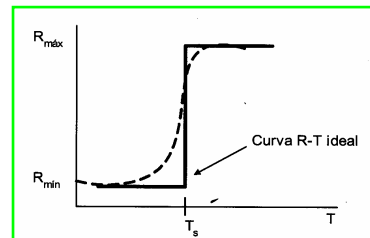
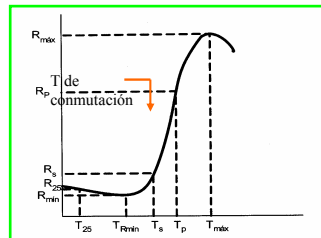
Protección sobre corrientes



PTCs



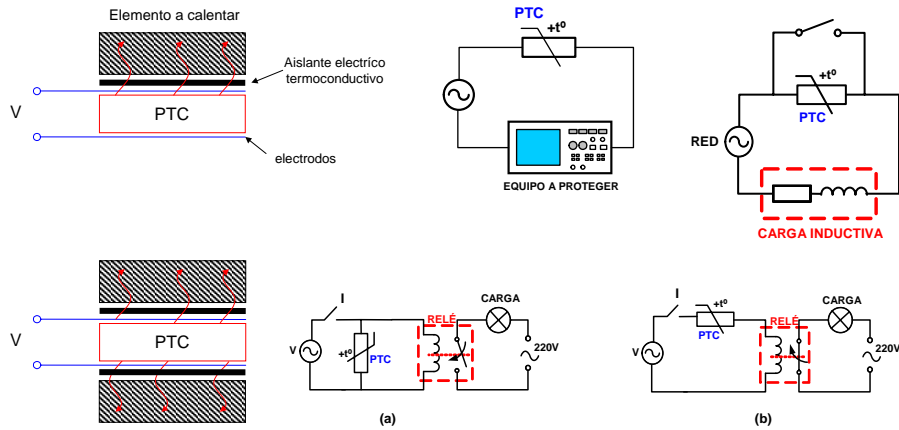
- Experimentan un cambio brusco en su valor resistivo cuando la temperatura supera un valor crítico que depende del material (la sensibilidad puede ser entre 15%-50% / °C)
- La mayoría de T_s varían entre 50°-160° C
- Más como sensor de temperatura se usa como protector



Curva resistencia vs. T de una PTC para conmutación



PTCs: aplicaciones



2006-2007

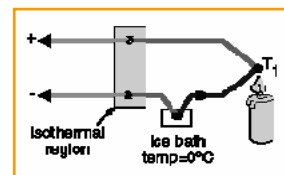
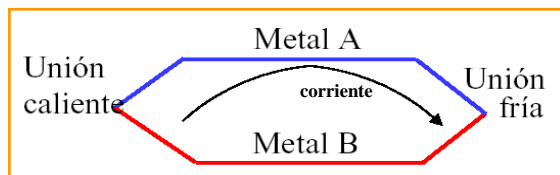
Instrumentación Electrónica

23



Termopares

- **Sensores activos.** Usan el efecto Seebeck, Peltier y Thomsom: circula una corriente cuando dos hilos de metales distintos se unen y se calienta uno de los extremos.
- En abierto, se puede medir el voltaje (\approx mV), que es proporcional a la diferencia de temperaturas.
- Presentan el problema de la calibración. Necesita conocerse la "unión fría". Señal de salida muy baja y necesitan acondicionamiento de la señal.
- Sensibilidad baja: microvoltios por grado
- Aguantan muy bajas y muy altas temperaturas (p.e. calderas y hornos)
- Bastante lineales.
- Precio: pocas decenas de €



2006-2007

Instrumentación Electrónica

24



Termopares: Tipos

- **Termopar J: Hierro y Constatan (Cu-Ni).**

Afectado por corrosión

Rango: 0°C a +760°C. Precisión: 0.5%. Sensibilidad: 51.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

- **Termopar K: Cromo y Alumel (Al-Ni).**

Buena resistencia a la oxidación, excepto por encima de 816° (Cr)

Rango: 0°C a +1.300°C y 600°C a 1.000°C en atm. oxidantes

Precisión: 1%. Sensibilidad: 40.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

- **Termopar T: Cu y constantán.**

Adecuado para atmósferas oxidantes, inertes o reductoras.

Rango: -200°C a +350°C. Sensibilidad: 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

- **Termopar R: Pt y Pt-13% Rodio.**

- **Termopar S: Pt y Pt-10% Rodio.**

Rango de medida más amplio (0°C a +1.600°C), pero más caros.

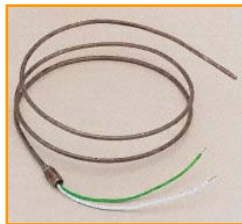
Precisión: 0.5%. Sensibilidad: 6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

- **Termopar W: Wolframio-5% Renio y Wolframio-26% Renio.**

Rango: 0°C a +2.800°C en atm. inertes o vacío. Precisión: 1%

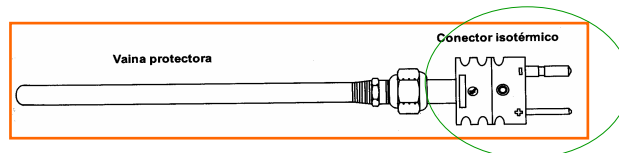


Termopares



Ref: <http://www.watlow.com/reference/refdata/TOP>

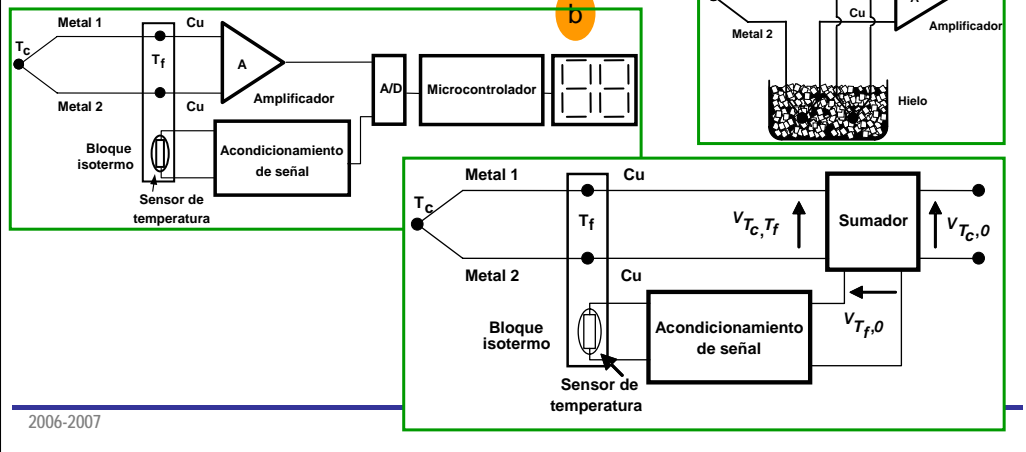
<http://www.picotech.com/applications/thermocouple.html>





Termopares: circuitos de acondicionamiento

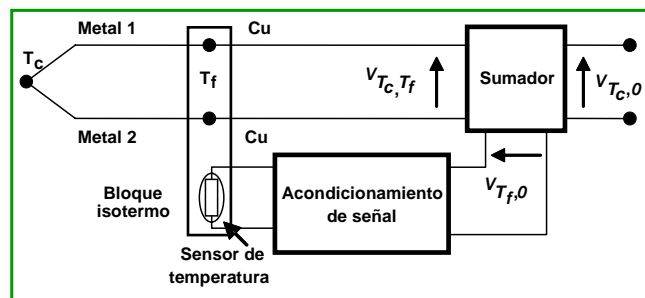
- 1.- Amplificador de tensión
- 2.- Necesidad de conocer la temperatura de la otra unión
 - a.- Compensación mediante uniones de referencia
 - b.- Compensación digital
 - c.- Compensación analógica



Termopares: ejemplo

Diseñe un circuito de acondicionamiento para un termopar de tiempo K para un campo de medida entre 0°C y 100°C de forma que su salida esté comprendida en el margen 0-1V. Se compensará la unión fría analógicamente mediante una Pt100 (suponga que la unión fría pueda estar comprendida entre 10°C y 30°C)

- 1.- Linealizar la curva
- 2.- Pt100 puente





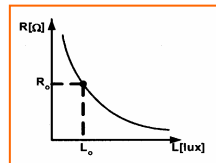
Sensores de temperatura

	Acondicionamiento de señal requerido	Precisión	Sensibilidad	Comparación
Termopar	<ul style="list-style-type: none"> Amplificación Filtrado Unión fría. Compensación 	Buena	Razonable	<ul style="list-style-type: none"> Activo: genera señal Baratos Robustos Muy amplio rango de temperatura. Relativamente lineales
RTD	<ul style="list-style-type: none"> Amplificación Filtrado Excitación en tensión o corriente 	La mejor	Mejor	<ul style="list-style-type: none"> Pasivas Muy precisas Muy estables Muy lineales Caras
Termistor	<ul style="list-style-type: none"> Amplificación Filtrado Excitación en tensión o corriente 	Mejor	La mejor	<ul style="list-style-type: none"> Pasivos Alta resistencia Pequeña masa térmica Casi sin coste

• **Nota.** Existen medidores de temperatura por radiación: **pirómetros**



LDR

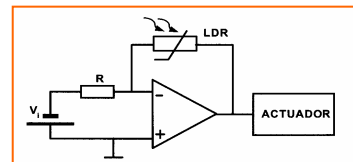
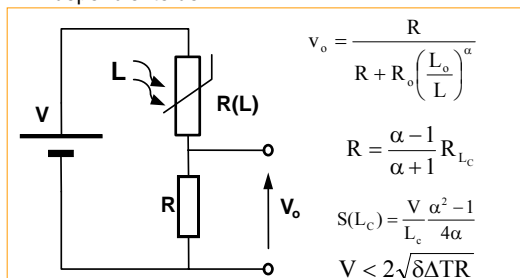


• Dependencia típica de la resistencia de una LDR con la luz incidente:

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

$\alpha \approx (0.7 - 1.5)$, $R_0 \approx 2K-200K @ 10 \text{ lux}$

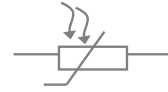
• **Nota:** La diferencia entre la R_{LDR} con niveles altos de luz y en oscuridad puede ser enorme: 4 órdenes de magnitud. La sensibilidad para bajos niveles de luz es muy acusada, y dependiente de T.



Acondicionador de una LDR para activación del control de persianas



LDR: sensor de iluminación



Hay una enorme variedad de detectores de luz (fotodiodos, fototransistores, fotomultiplicadores, CCDs, etc.), dependiendo de su finalidad: comunicaciones, monitores, etc.

En domótica, una aplicación elemental es la detección de presencia-ausencia de luz ambiente, o de iluminación por encima de un umbral. También, alarmas de paso.

• **Def. LDR (Light Dependent Resistor):**

- Película delgada de material fotoconductor (CdS, etc) sobre sustrato cerámico protegida por un recubrimiento plástico delgado.
- Aplicaciones: Control automático de luminosidad, control de tiempo de exposición en cámaras, de ganancia automática, de iluminación pública, sensor de posición y detección de ruptura de haz (seguridad, etc)
- Más caras (> 1 €) que muchos fotodiodos, pero de acondicionamiento mas sencillo. Respuesta algo más lenta y variable (ms-s), pero de sobra para domótica.



VT900 series

<http://www.perkinelmer.com/opto/>



Transductores de Reactancia Variable

- Sensores Inductivos
- Transformador diferencial lineal: LVDT
- Capacitivos

<http://www.dte.uvigo.es/recursos.php#sensores>

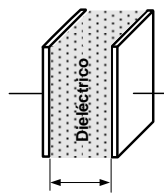


Sensores Capacitivos

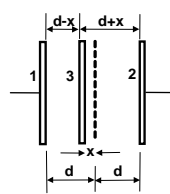
- Se basan en la variación de la capacidad de dos o más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de una magnitud física.
- Permiten detectar pequeños desplazamientos (hasta 10^{-10} mm)
- Fácilmente integrables en un chip de silicio
- No se ven afectados ni por la temperatura ni por el alimniamiento mecánico
- Muy estables en entornos hostiles
- Muy bajo consumo
- Cuota de mercado reducida
- Aplicaciones:
 - Detectores de presencia
 - Medidas de desplazamiento, presión, nivel y aceleración (integrados en Silicio)



Sensores Capacitivos: geometrías básicas

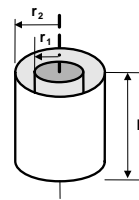


$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$



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

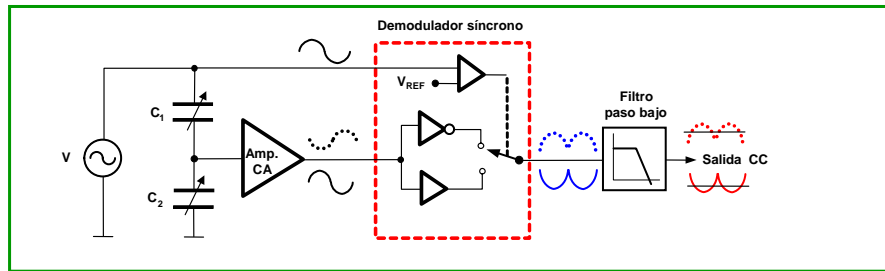
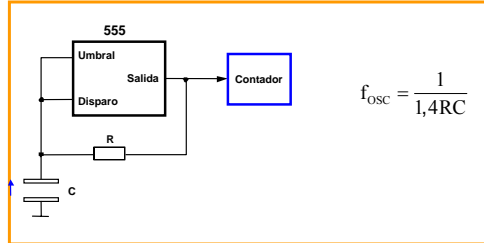
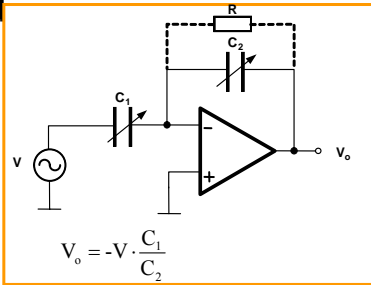
$$C_2 = \frac{\epsilon A}{d+x}$$



$$C = \frac{2\pi\epsilon h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$



Sensores Capacitivos: circuitos de acondicionamiento



2006-2007

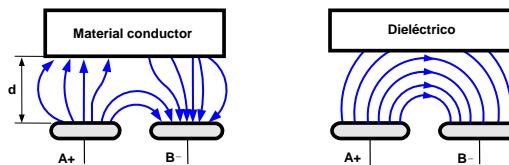
Instrumentación Electrónica

35

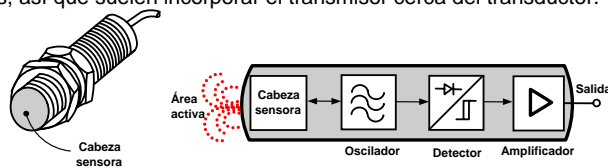


Sensores capacitivos: detector de proximidad

- Los **sensores de proximidad capacitivos** se basan en los cambios en el campo eléctrico entre placas que genera la cercanía de cualquier objeto.



- La capacidad se mide en AC, por lo que requieren un acondicionamiento complejo.
- No admiten fácilmente la detección a larga distancia, por las capacidades parásitas de los cables largos, así que suelen incorporar el transmisor cerca del transductor.



- Son de corto alcance: varios mm. Sirven como interruptores de contacto o detectores de nivel de líquidos

2006-2007

Instrumentación Electrónica

36



Sensores de proximidad

- Pueden estar basados en sensores capacitivos o en ultrasonidos

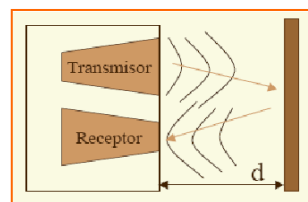
- Los **sensores basados en ultrasonidos** constan de un emisor de ondas sonoras de alta frecuencia (entre 20 y 40 kHz) que se propaga por el aire hasta que choca con el objeto o pared, se refleja y alcanza el receptor situado en el mismo punto que el emisor.

- El tiempo entre la emisión de la onda y la recepción del eco es inversamente proporcional a la distancia al obstáculo. existe una distancia mínima d (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión.

- El tiempo depende de la T , por lo que hay que compensar las medidas.

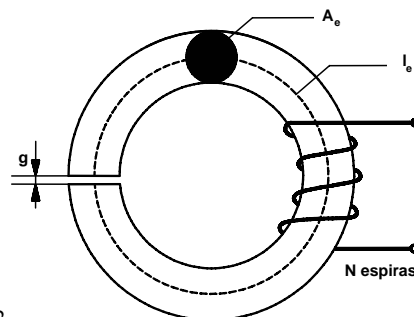
- Pueden ser sensibles al estado de la superficie del obstáculo (zonas porosas, espumas).

- Son muy utilizados en robótica, así como método no invasivo de medida de caudal



Sensores Inductivos

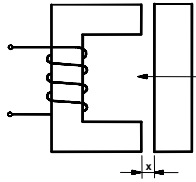
- Se basan en el efecto que las distintas variables físicas ocasionan sobre los parámetros que afectan a los valores de auto-inductancia o de acoplamiento magnético de las bobinas.



$$L = \frac{A_e N^2}{\frac{g}{\mu_0} + \frac{l_e}{\mu}} \longrightarrow L \approx \frac{\mu_0 A_e N^2}{g}$$



Sensores Inductivos



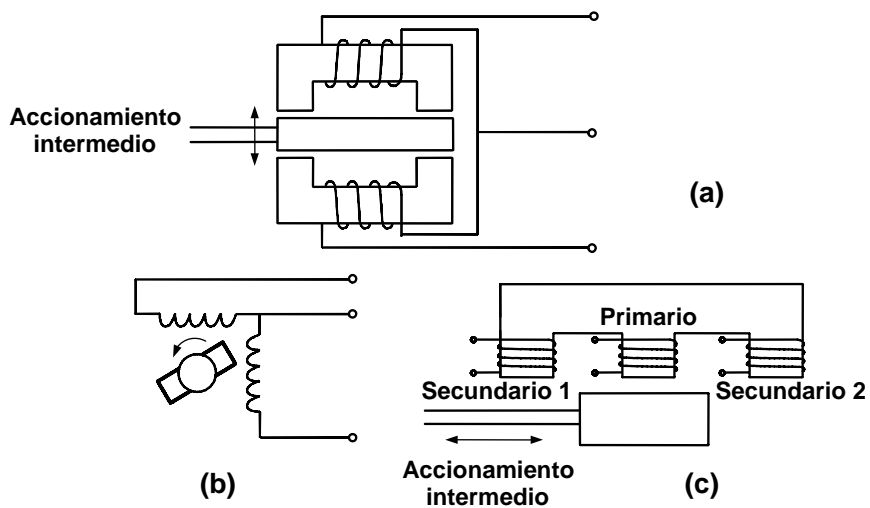
$$L = \frac{K}{x}$$

Sistema para la medida de desplazamiento basado en el cambio de la longitud del entrehierro:

- K depende del área efectiva y del nº de espiras
- No es lineal
- No válido para valores de entrehierro grandes

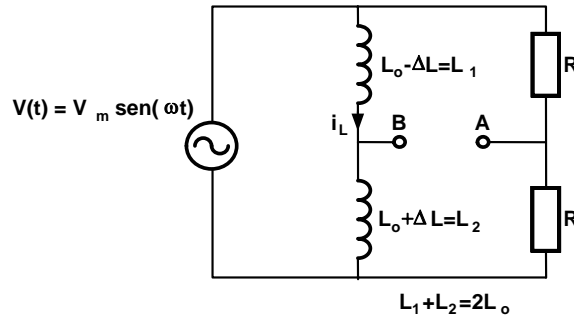


Sensores Inductivos





Sensores Inductivos: circuitos de medida



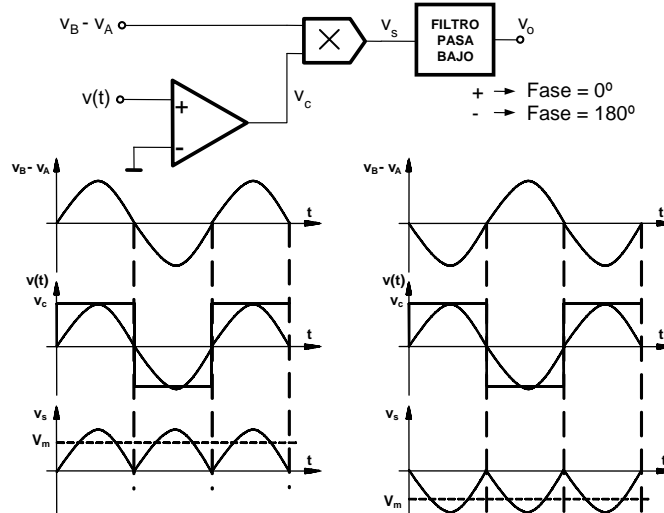
$$V_B - V_A = \frac{\Delta L}{2L_0} V_m \text{sen}(\omega \cdot t)$$

La magnitud del cambio se conoce por medio del valor de la señal de tensión entre los puntos A y B.

No detecta el signo, sólo el valor absoluto de L



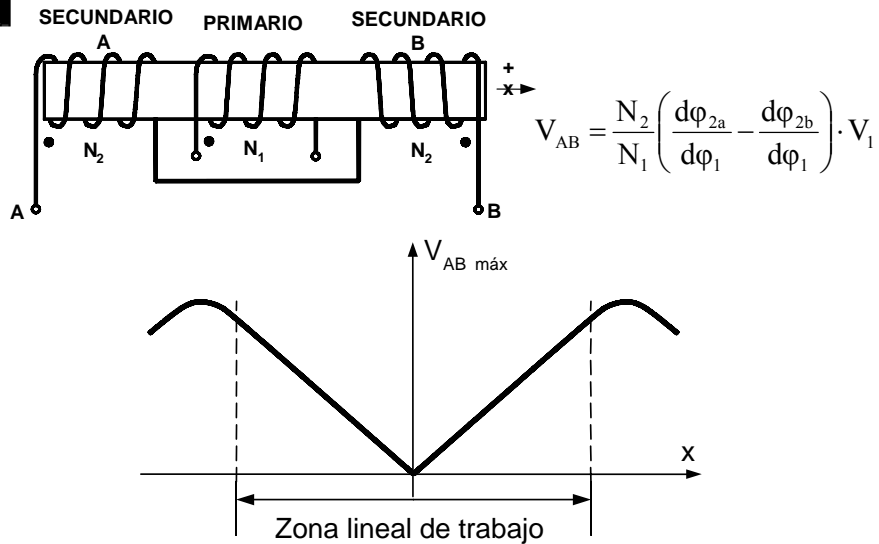
Sensores Inductivos: circuitos de medida



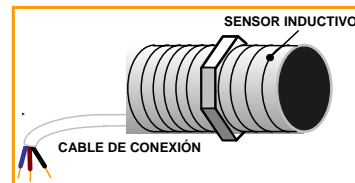
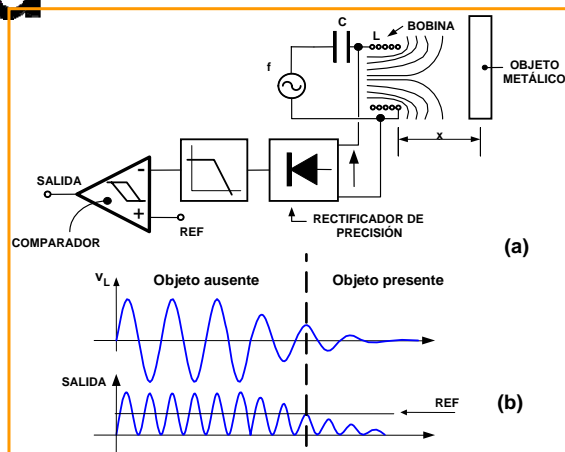
Detección de signo del desplazamiento basado en la detección de fase



El transformador Diferencial Lineal: LVTD



Sensores inductivos de proximidad



Sensor ECKO (Eddy Current Killed Oscillator)