

5. Sensores y Transductores

F. Hugo Ramírez Leyva

Cubículo 3

Instituto de Electrónica y Mecatrónica

hugo@mixteco.utm.mx

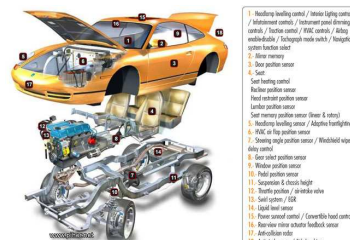
Junio 2013

1

Sistemas de acondicionamiento

5. Sensores y Transductores

- Temperatura
- Sensores de Luz
- Desplazamiento, posición y proximidad
- Velocidad y movimiento
- Fuerza
- Presión de fluidos
- Flujo de líquidos
- Nivel de líquidos



<http://www.potenciometros.es/>

2

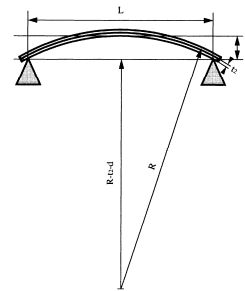
Tipos de Medidores de Temperatura

- Termómetro bimetalico. Usa la expansión térmica de 2 metales. Transformar las variaciones de temperatura en variaciones mecánicas.
- Resistivos. Cambio de la resistencia en función de la temperatura RTD (*Resistive Temperature Detectors*). Metales, Termistores.
- Termo acoplador. Efecto *Seebeck effect*, Transforma variaciones de temperatura en voltaje mediante la unión de 2 metales.
- Termómetros de unión de semiconductor. Unión PN de semiconductor.
- Infrarrojo. Medición de la intensidad de la radiación electromagnética en el rango del infrarrojo (radiación térmica)
- Piro eléctricos. Materiales cristalinos que generan voltaje ante cambios del flujo de calor
- Termómetros líquidos. Mediante la expansión térmica de mercurio contenido en un envase de vidrio.
- Manométricos. Miden la presión del gas y a partir de ella obtiene la medición de la temperatura.
- Fibra óptica. Cambio de las propiedades de la luz en función de la temperatura. Fase (Interferometría 10^{-14} m). Efecto Doppler, Cambio de polarización, estimulación de emisión secundaria (color o polarización).
- Indicadores de temperatura. Deformación de un cuerpo en función de la temperatura (conos pirométricos,

3

Termómetro bimetalico

- Se genera un cambio de longitud en 2 metales con diferente coeficiente de expansión térmica.
- Esta diferencia provoca que el dispositivo se mueva fuera del plano, el cual puede ser utilizado como actuador electromecánico.
- Para maximizar el efecto del doblado, se utilizan materiales con una gran diferencia en sus coeficientes de expansión térmica.
- El metal con el mayor coeficiente se llama *elemento activo*, y el de menor es el elemento pasivo (hierro níquel $0.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$).
- Las configuraciones de los elementos bimetalicos son: Puente, trampolín, espiral o helicoidal.



4

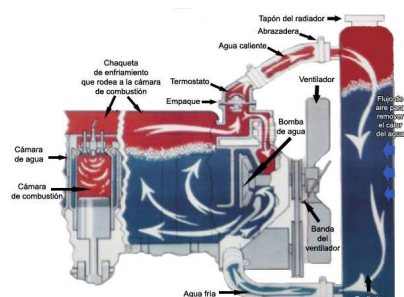
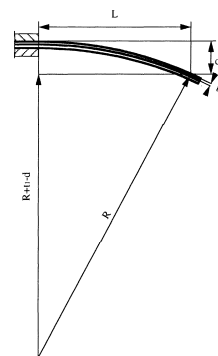
http://www.calderasdelnorte.com.mx/detalle_producto.asp?id_Product=82

Termómetro Bimetálico

- La ecuación que controla la curvatura esta dada por:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{6(1+m)^2(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)}{t \left[3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + 1/mn) \right]}$$

- 1/R0= Curvatura inicial a la temperatura T0
- Coefficiente de expansión térmica (2 el activo y 1 pasivo).
- $n=E1/E2$ módulos de Young's
- $m=t1/t2$ espesores
- $t=t1+t2$ espesor de las 2 tiras.
- La mayoría de medidores industriales $m=1$.



5

Termómetro Bimetálico

TABLE 32.2 Table of Selected Industrially Available ASTM Thermostatic Elements

Type (ASTM)	Flexivity $10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	Max. sensitivity temp. range ($^{\circ}\text{C}$)	Max. operating temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Young's Modulus (GPa)
TM1	$27.0 \pm 5\%$ ^a $26.3 \pm 5\%$ ^b	-18-149	538	17.2
TM2	$38.7 \pm 5\%$ ^a $38.0 \pm 5\%$ ^b	-18-204	260	13.8
TM5	$11.3 \pm 6\%$ ^a $11.5 \pm 6\%$ ^b	149-454	538	17.6
TM10	$23.6 \pm 6\%$ ^a $22.9 \pm 6\%$ ^b	-18-149	482	17.9
TM15	$26.6 \pm 5.5\%$ ^a $25.9 \pm 5.5\%$ ^b	-18-149	482	17.2
TM20	$25.0 \pm 5\%$ ^a $25.0 \pm 5\%$ ^b	-18-149	482	17.2

^a 10-93°C. From ASTM Designation B 388 [15].

^b 38-149°C. From ASTM Designation B 388 [15].

TABLE 32.3 Composition of Selected Industrially Available ASTM Thermostatic Elements Given in Table 32.2

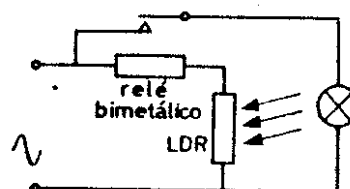
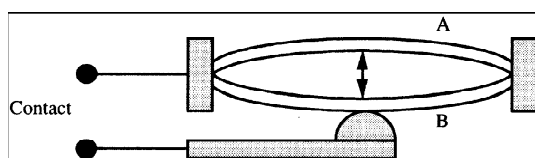
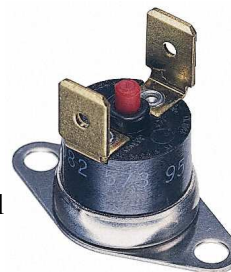
	Element	TM1	TM2	TM5	TM10	TM15	TM20
High-expansive material chemical composition (% weight)	Nickel	22	10	25	22	22	18
	Chromium	3	72	8.5	3	3	11.5
	Manganese	—	18	—	—	—	—
	Copper	—	—	—	—	—	—
	Iron	75	—	66.5	75	75	70.5
	Aluminum	—	—	—	—	—	—
Intermediate nickel layer	Carbon	—	—	—	—	—	—
	No	No	No	Yes	Yes	No	No
Low-expansive material chemical composition (% weight)	Nickel	36	36	50	36	36	36
	Iron	64	64	50	64	64	64
	Cobalt	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—
Component ratio (% of thickness)	High	50	53	50	34	47	50
	Intermediate	—	—	—	32	6	—
	Low	50	47	50	34	47	50

From ASTM Designation B 388 [15].

6

Termómetro Bimetálico

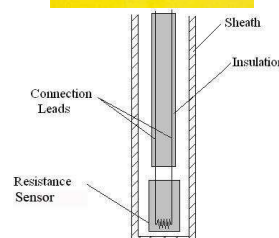
- Las principales aplicaciones son:
 - Control de temperatura en procesos industrial
 - Actuador de tipo *on/off* (encendido/apagado)
 - Encendido y apagado de contactos eléctricos (*snap*) en foto celdas.
- Micro sensores y micro actuadores



7

Termómetro Resistivos (RTD)

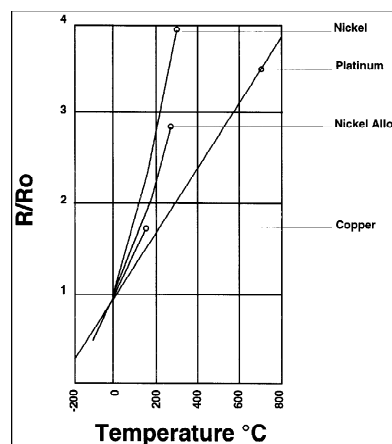
- Detectores resistivos de temperatura (*Resistive Temperature Detectors* RTD).
- Son tipos especiales de metales que cambian su resistencia en función de la temperatura. Cuando ésta aumenta, la resistencia se incrementa.
- Se pueden conseguir precisiones estándares de ± 0.1 °C y con platino hasta ± 0.0001 °C (SPRTs).
- Los metales mas usados son el platino, el cobre y el níquel. Entre más puros sean éstos, se tiene una mejor respuesta.
- El platino es el mejor, debido a que es químicamente inerte, no se oxida y tiene un rango grande de temperaturas de operación.
- Para medir la resistencia, se le aplica una corriente constante (0.8 mA a 1mA), y se mide el voltaje. Para ello se usa un multímetro o un puente de Wheatstone



8

Termómetro Resistivos (RTD)

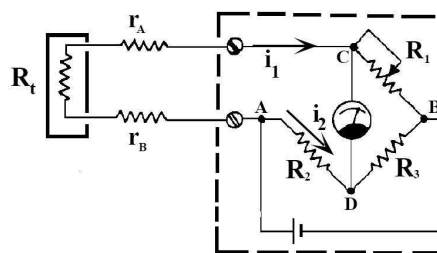
- El platino se puede usar desde -184.44°C a 648.88°C.
- La sensibilidad se define como el cambio de resistencia en el sensor por grado centígrado.
- El níquel se comporta muy no lineal a temperaturas mayores de 300°C, el cobre a 150°C se oxida.
- El coeficiente de temperatura, α . Es el cambio promedio en la resistencia por °C por la resistencia.
- R_0 = Resistencia a 0°C.
- R_{100} = Resistencia a 100°C.
- El coeficiente de temperatura para el níquel es de 0.00672, para el cobre 0.00427 y para el platino 0.003925.
- La resistencia nominal es de 100 Ω .



9

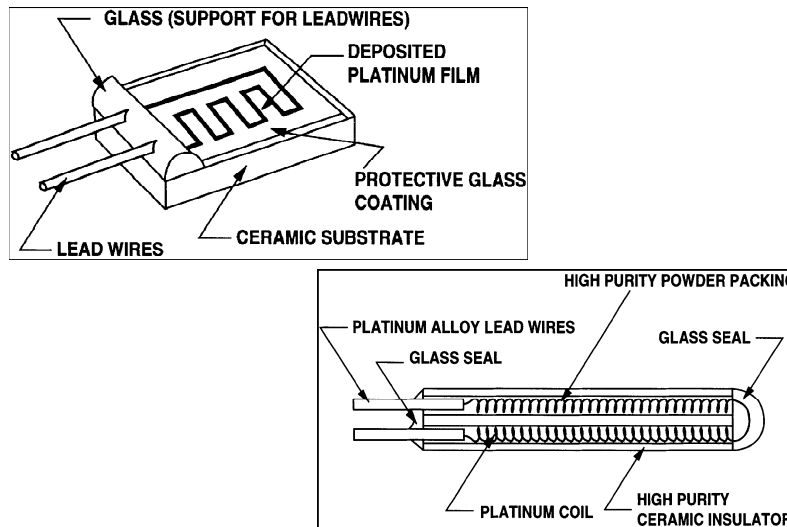
Termómetro Resistivos (RTD)

- Existen 3 tipos de RTD's de platino
 - *Standard Platinum Resistance Thermometers (SPRTs).*
 - *Secondary Standard Platinum Resistance Thermometers (Secondary SPRTs).*
 - *Industrial Platinum Resistance Thermometers (IPRTs).*
- Ecuación de comportamiento:
- t = temperatura
- R_0 = Resistencia a 0°C.
- A y B = Constantes de calibración.



10

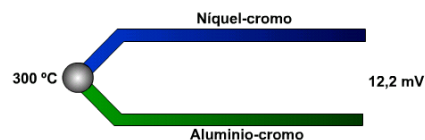
Resistivos (RTD)



11

Termo Acopladores

- Es uno de los elementos más ampliamente usados para la medición de la temperatura, a pesar de la gran cantidad de tipos de sensores que existen en nuestros días.
- Un termo acoplador, es cualquier unión de 2 conductores eléctricos con características termo eléctricas diferentes.
- El efecto Seebeck genera un voltaje entre 2 conductores eléctricos diferentes cuando no se encuentran a una temperatura uniforme.
- Cualquier interfaz eléctrica entre estos 2 conductores es una unión termo eléctrica real.
- Las terminales libres en los termo elementos son llamadas terminales
- La disponibilidad de equipo a bajo costo, ha creado la ilusión de que la medición es fácil y simple. Sin embargo esto no es cierto ya que la precisión y el error son mal entendidos y cuestan mucho dinero.
- En un termo acoplador ocurren 3 fenómenos: Seebeck, Peltier y Thomson. Pero solo el primero convierte la energía térmica a eléctrica. Los otros 2 efectos son despreciables para aplicaciones de termometría.



12

Termo Acopladores

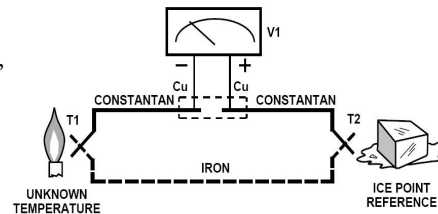
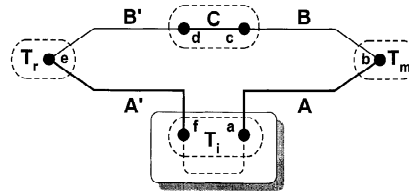
- La fuente de voltaje Seebeck EMF con una temperatura en su unión T_m a una temperatura física de referencia T_r es:

$$E_{AB}(T, T_r) = E_A(T_m, T_r) - E_B(T_m, T_r)$$

- El efecto Seebeck es

$$\sigma_{AB}(T, T_r) = \sigma_A(T_m, T_r) - \sigma_B(T_m, T_r)$$

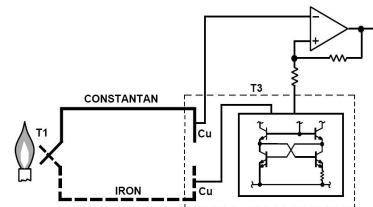
- es el que se puede observar.
- El voltaje se mide en circuito abierto, por lo cual no tiene sentido conexiones en paralelo de varios termopares.
- T_m = Temperatura en la unión.
- T_r = Temperatura de referencia (normalmente 0°C).
- T_i = Temperatura



13

Termo Acopladores

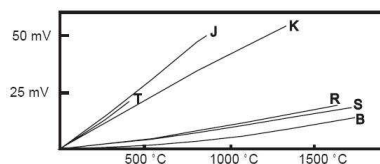
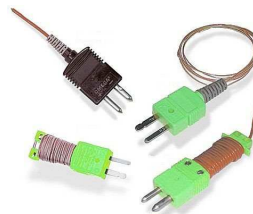
- Las 2 configuraciones más usuales para conectar los termopares son:
 - Unión con una sola referencia.
 - Es conveniente cuando se tiene una referencia de temperatura disponible.
 - Es necesario que $T_i = T_a = T_f$.
 - Normalmente tiene 4 termo elementos distintos.
 - No es recomendable usar esta configuración, con circuitos que internamente proporcionen compensación.
 - Unión con 2 referencias.
 - Es el más usado en la termometría moderna.
 - Este circuito solo tiene un termo acoplador principal (A-B).
 - Internamente posee unas terminales de extensión (C-D) (extensión Leads). Su uso es Neutral (no genera Fuerza Electromotriz EMF), Acoplamiento (hace que T_s T_i) o Compensación (generan una EFM para compensar la diferencia entre $(T_s$ y $T_i)$).
 - La unión de referencia (A'-B') son usadas para compensar.



14

Termo Acopladores

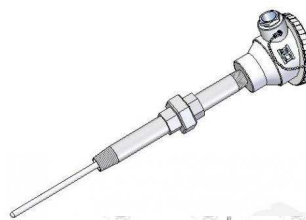
- El estándar ANSI clasifica a los termopares en 8 tipos, y les asigna un color en específico, estos son: B, E, J, K, N, R, S y T
- Tipo K (Cromo (Ni-Cr) Chromel / Aluminio (aleación de Ni -Al) Alumel): De bajo costo, rango de temperatura de -200°C a $+1.200^{\circ}\text{C}$ y sensibilidad $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aprox.
- Tipo E (Cromo / Constantán (aleación de Cu-Ni)): No son magnéticos y se usan en el ámbito criogénico. Sensibilidad de $68\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- Tipo J (Hierro / Constantán): Rango de temperatura de -40°C a $+750^{\circ}\text{C}$ y sensibilidad de $\sim 52\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo N (Nicrosil (Ni-Cr-Si) / Nisil (Ni-Si))**: es adecuado para mediciones de alta temperatura gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S que son más caros.



15

Termo Acopladores

- A bajas temperaturas es recomendable usar el J, K o T. El J es más barato y el K es más caro pero tiene una mejor linealidad.
- Para altas temperaturas, el más recomendado es el tipo R y S, el mejor es R por tener una mayor sensibilidad.
- Si operan en ambientes corrosivos o muy agresivos, se debe usar un termopozo.
- El termopar tipo B tiene una menor sensibilidad que el tipo E (10 veces), por lo cual se usa a altas temperaturas.
- El tipo E es el que tiene la mayor sensibilidad $81\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Genera 76 mV a 0°C .
- Existen termopares con grado comercial y Premium.



16

Termo Acopladores

TABLE 32.12 Characteristics of U.S. Letter-Designated Thermocouples

Type	Common name	Color code	M.P. (°C)	Recommended range, (°C) ^d	emf at 400°C, (mV)	Uncertainty, +/- Special tolerance Normal tolerance	ρ ($\mu\Omega$ -cm)
B	—	Brown ^a	1810	870 to 1700	0.787	0.25%	34.4
BX	—	Gray ^a	—	—	—	0.50%	—
BP	Pt30Rh	Gray	1910	—	—	—	18.6
BN	Pt6Rh	Red	1810	—	—	—	15.8
E	—	Brown ^a	1270	-200 to 870	28.946	1.0°C or 0.40%	127
EX	—	Purple ^a	—	—	—	1.7°C or 0.50%	—
EP	Chromel ^b	Purple	1430	—	—	—	80
EN	Constantan	Red	1270	—	—	—	46
J	—	Brown ^a	1270	0 to 760	21.848	1.1°C or 0.40%	56
IX	—	White ^a	—	—	—	2.2°C or 0.75%	—
JP	Iron	White	1536	—	—	—	10
JN	Constantan	Red	1270	—	—	—	46
K	—	Brown ^a	1400	-200 to 1260	16.397	1.1°C or 0.40%	112
KX	—	Yellow ^a	—	—	—	2.2°C or 0.75%	—
KP	Chromel	Yellow	1430	—	—	—	80
KN	Alumel ^b	Red	1400	—	—	—	31

17

Termo Acopladores

R	—	Brown ^a	1769	0 to 1480	3.408	0.6°C or 0.10%	29
RX	—	Green ^a	—	—	—	1.5°C or 0.25%	—
RP	Pt13Rh	Green	1840	—	—	—	19
RN	Pt	Red	1769	—	—	—	10
S	—	Brown ^a	1769	0 to 1480	3.259	0.6°C or 0.10%	30
SX	—	Green ^a	—	—	—	1.5°C or 0.25%	—
SP	Pt10Rh	Green	1830	—	—	—	20
SN	Pt	Red	1769	—	—	—	10
T	—	Brown ^a	1083	-200 to 370	20.810	0.5°C or 0.40%	48
TX	—	Blue ^a	—	—	—	1.0°C or 0.75%	—
TP	Copper	Blue	1083	—	—	—	2
TN	Constantan	Red	1270	—	—	—	46

From References [1, 4, 9, 10]

^a Overall jacket color.

^b Chromel and Alumel are trademarks of Hoskins Mfg. Co.

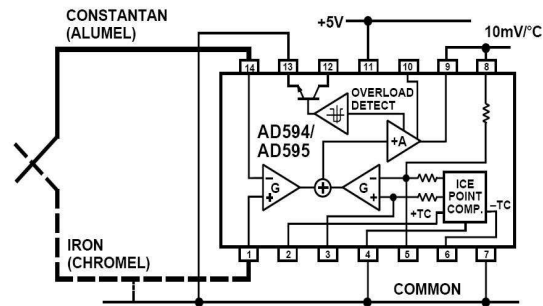
^c Initial tolerances are for material as manufactured and used within recommended temperature range, Table 32.15, protected in a benign environment.

^d Recommended temperature range is a guideline for service in compatible environments and for short durations.

18

Termo Acopladores

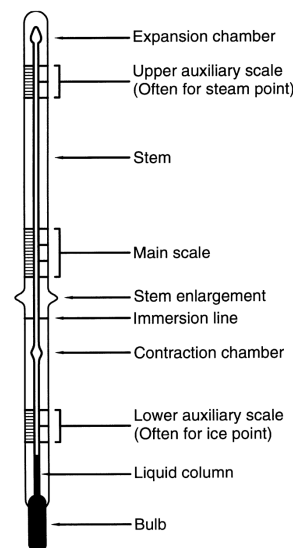
- Comercialmente existen CI que acondicionan el voltaje de salida de los termopares. El AD594 o AD595, acondiciona termopares tipo J y K respectivamente.
- En ambos casos el voltaje de salida es de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.



19

Termómetros líquidos

- Este tipo de termómetros se basa en un líquido contenido en un empaque de vidrio. Fueron los primeros que se usaron. Existen en el rango de -190°C a 600°C
- El mercurio es uno de los líquidos mas usados, ya que proporcionan una precisión de 0.1°C . Las partes que lo conforman son:
 - El bulbo que es el contenedor de vidrio el cual mantiene en su interior el líquido. Su espesor es esencial para realizar una correcta medición
 - El tallo es el cuerpo de vidrio mantenido al vacío que permite la expansión del líquido por capilaridad
 - El líquido normalmente mercurio
 - Las marcas que dan la escala de temperatura



20

Termómetros líquidos

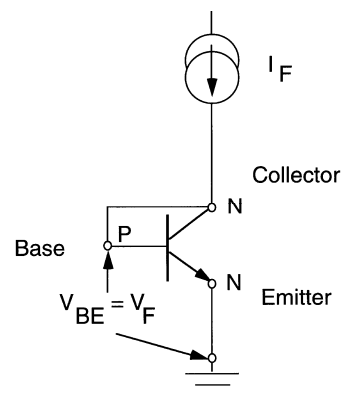
- La ecuación que describe la expansión del mercurio esta dada por: $V = V_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$
- donde V_0 = Volumen del mercurio a 0 °C
- α y β = Coeficiente de expansión térmica del mercurio ($\alpha = 1.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ y $\beta = 5 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}^2$).
- Problemas de medición
 - Constante de temperatura
 - Capacidad térmica
 - Errores de inmersión



21

Termómetros de Semiconductor

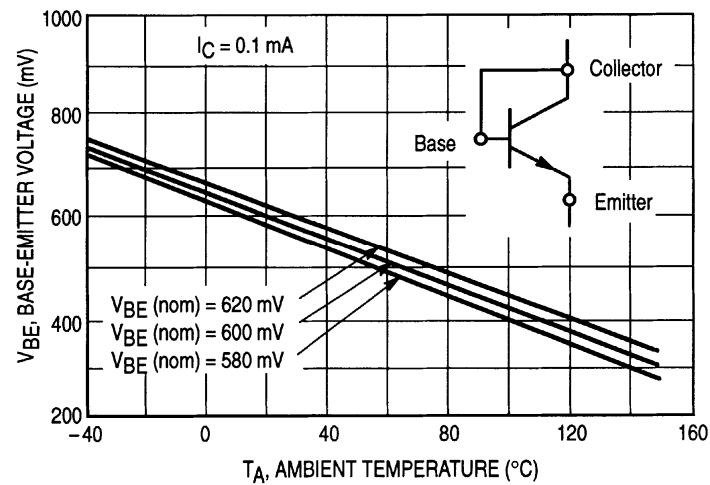
- Los termómetros semiconductores usan las características de las uniones PN y su dependencia de la temperatura
- Rango de operación de -55°C a +150°C
- La mayoría de los sensores de semiconductores usan la unión de un transistor bipolar
- La sensibilidad es mayor al RTD y es mas lineal que el termoacoplador o el RTD
- Es fácilmente puesto en circuito integrado con otras funciones MSP430



$$V_F = V_{be} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(I_F / I_S \right)$$

22

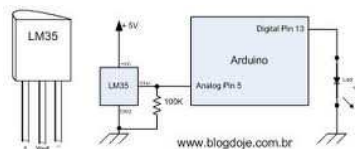
Termómetros de Semiconductor



23

Sensor LM35

- El LM35 es un sensor de temperatura con una precisión de 1°C
- Rango de medición de -55°C a 150°C y Sensibilidad de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
- No requiere circuitos adicionales para calibrarlo, tiene baja impedancia de salida y genera poco autocalentamiento



24

Desplazamiento, posición y proximidad

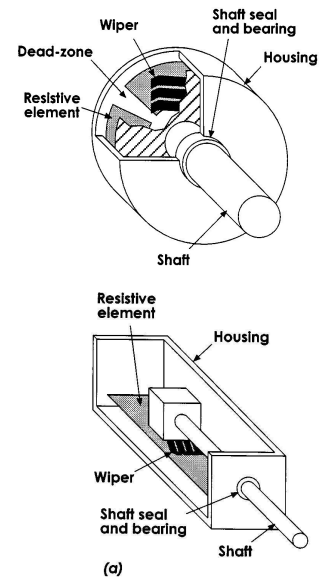
- Tipos
 - Resistivos
 - Inductivos
 - Capacitivos
 - Piezoeléctricos
 - Interferometría con laser
 - Bore Gaging
 - Ultrasónicos
 - Ópticos
 - Magnéticos
 - Resolver
 - Fibra óptica
 - Rayo óptico



25

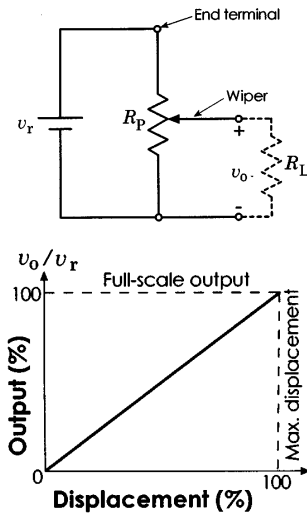
Sensores de Desplazamiento Resistivos

- Los sensores de movimiento resistivos normalmente son potenciómetros.
- Normalmente es alambrado en configuración de divisor de voltaje
- Se requiere que sean potenciómetros de precisión



Sensores Resistivos

- Ventajas
 - Uso fácil
 - Bajo costo
 - No es electrónico
 - Amplitud de salida grande
 - Tecnología probada
- Desventajas
 - Ancho de banda limitado
 - Fricción
 - Carga inercial
 - Desgaste



Sensores Resistivos

- Tipos de potenciómetros de precisión:
 - Rotatorios
 - De 3, 5 o 10 vueltas
 - Lineales
 - Desde 5mm a 4m
 - De Cuerda (String)
 - Hasta 50m
- Tipos de pot
 - Wirewound
 - El incremento discreto de resistencia
 - Nonwirewound
 - Incremento lineal de la resistencia
- Elemento resistivo
 - Plastico conductor
 - Hibrido
 - Cement (Cerámico)

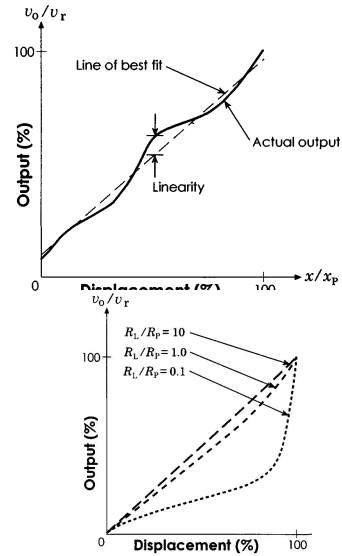
Carbon



<http://www.betatronix.com/>

Sensores Resistivos

- Características
- Viaje eléctrico
 - Es la más pequeño rango de movimiento sobre el cual la salida eléctrica es válida
- Linealidad en el rango de 0.1% a 1%
- Razón de potencia
- Coeficiente de temperatura
- Resistencia
- Excitación (AC o DC)
- Características mecánicas
 - Carga mecánica
 - Viaje mecánico
 - Temperatura de operación
 - Vibración y aceleración
 - Velocidad
 - Vida
 - Des alineamiento



Tipos de sensores Resistivos



<http://www.betatronix.com/product-elementwiper.html#top>

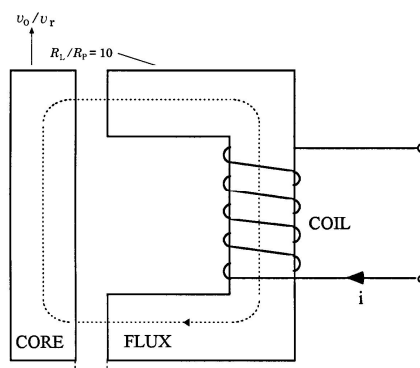
Desplazamiento (Encoder)

31

Sensor de Desplazamiento Inductivo

- Son robustos y compactos y es menos afectado por cambios ambientales
- Se base en el principio de un circuito magnético
- Se clasifica en Auto generador y Pasivo

- $l = \frac{\mathcal{R}}{\mu\mu_0} A$ $\mathcal{R}$ = reluctance of the magnetic circuit material
- μ_0 = the permeability of free space ($= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- A = the cross-sectional area of the flux path



Velocidad y movimiento

33

Fuerza

34

Presión de fluidos

35

Flujo de líquidos

36

Nivel de líquidos

37

Sensores de Luz

38