

Instrumentación Electrónica I

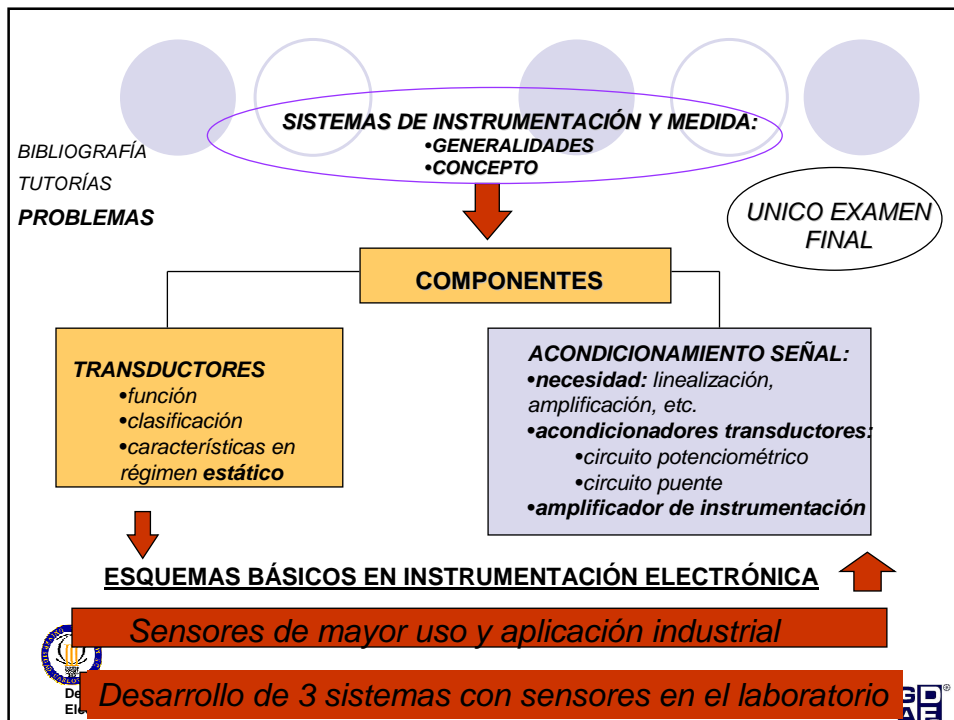
Tema 5: Medida de temperatura

Departamento Tecnología Electrónica
Carlos III University Madrid (Spain)



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Temario

TEMARIO	HTE	P	HL
TEMA 1. INTRODUCCIÓN	1 H		
TEMA 2. SENSORES Y TRANSDUCTORES	1 H	I	
TEMA 3. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE UN TRANSDUCTOR	2 H	T	
TEMA 4. ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SALIDA DE UN TRANSDUCTOR	7 H	T	
TEMA 5. TRANSDUCTORES PARA LA MEDIDA DE TEMPERATURA.	5 H	1	3 H
TEMA 6. SENSORES PARA LA MEDIDA DE DEFORMACIONES	5 H	2	3 H
TEMA 7. SENSORES DE POSICIÓN Y NIVEL	5 H	3	3 H
TEMA 8. SENSORES ÓPTICOS	6 H		
TOTAL	32 H		9 H



Departamento Tecnología
Electrónica

T - Enfoque en todas Prácticas
Instrumentación Electrónica I
CV



Medida de Temperaturas

- Introducción
- Escala de Temperaturas (absolutas, EIPT)
- Medición T por efectos mecánicos
- Termómetros de resistencia
- Termometría con Circuitos Integrados
- Termopares



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Introducción

- Es la variable que más se mide y controla en procesos industriales
- En procesos de fabricación se necesita fijar T muy exacta
- Definición : intuitiva, principios Termodinámica
- Medida a través de los efectos primarios que ocasiona ΔT :
 - Cambio estado físico o químico (puntos fijos calibración)
 - Cambio en las dimensiones físicas (termómetros)
 - Variación de las propiedades eléctricas
 - Generación f.e.m. unión de metales distintos
 - Cambio intensidad de radiación (Pirometría, cuerpo negro, T altas)



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Escalas de Temperaturas

- Necesidad: poder medir igualando T con referencia escala
- a. Ligadas propiedades de un cuerpo específico (arbitrarias)
- b. A partir Leyes Termodinámica (gases perfectos o teorema de Carnot). Escalas:
 - Kelvin
 - Rankine
- Kelvin: unidad Kelvin (K) se obtiene al fijar la T triple del agua (fácilmente reproducible) = $273,16 \text{ }^{\circ}\text{K}$
- Rankine: grado Rankine. T punto triple agua = $459,67 \text{ }^{\circ}\text{R}$
- Conversión $(^{\circ}\text{K}) = (5/9)(^{\circ}\text{R})$



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Escalas derivadas de Esc. Termodinámicas

- Por traslación: valores de escalas no absolutas
 - Escala Celsius: $T(^{\circ}\text{C})=T(^{\circ}\text{K})-273,16$
 - Escala Fahrenheit: $T(^{\circ}\text{F})=T(^{\circ}\text{R})-459,67$
- Conversión:
 - $T(^{\circ}\text{C})=(5/9)[T(^{\circ}\text{F})-32]$
 - $T(^{\circ}\text{F})=(9/5)[T(^{\circ}\text{C})+32]$
- **Escala Internacional Práctica de Temperaturas (EIPT)** basada en efectos primarios T.
Evitar los problemas de trabajar con termómetros de gases (permiten la medida de T absolutas) pero son muy delicados: dilatación (RTD), termopares, radiación cuerpo negro



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Resumen escalas T

- Definición teórica escalas temperatura

- Escalas absolutas

Rankine

Pto triple agua

$T = 459,67^{\circ}\text{R}$

Kelvin

Pto triple agua

$T = 273,16^{\circ}\text{K}$

Escalas relativas (traslación)

Fahrenheit

$T(^{\circ}\text{F})= T(^{\circ}\text{R})- 459,67$
 $(^{\circ}\text{K})-273,16$

Celsius

$T(^{\circ}\text{C})= T$

- Medida práctica de temperatura

- Escalas Internacionales Prácticas T (EIPT):

1. Termómetro de resistencia de platino
2. Termopar Pt Rd 10% /Pt
3. Radiación del cuerpo negro

(medidas basadas en efectos primarios: dilatación, termopar, radiación emitida..)

- Entre dos puntos cualesquiera la temperatura se deduce por interpolación



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Medida de T efectos mecánicos

- Cambio de las dimensiones mecánicas por efecto T
- Termómetro de vidrio o de expansión de líquido:
 - Alcohol (-110°C a +50°C). T bajas
 - Mercurio (-35°C a +538°C). T altas (a -39°C fusión Hg)
- Principio medida: aumento T líquido bulbo se dilata y asciende por el capilar (escala) mide T
- Posible error: dilatación líquido y del vidrio, evitarlo se realiza una calibración en inmersión
- Otro efecto: termómetro bimetálico. Los diferentes coeficientes de dilatación de 2 metales distintos provoca una flexión del conjunto proporcional a T.



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termómetros de resistencia

Resistencia: Elemento sensor depende T

- **Sensores T resistivos**
 - Metálicos: platino, níquel o aleación
 - Coef. Resistividad positivo
 - Constante tiempo elevada: 1 a 5 seg
- **Termistores**
 - Material semiconductor: óxido de manganeso, de níquel o de cobre, germanio o silicio
 - Coeficiente de T:
 - Negativo (NTC), más común
 - Positivo (PTC)



Departamento Tecnología
Electrónica

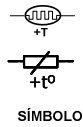
Instrumentación Electrónica I
CV



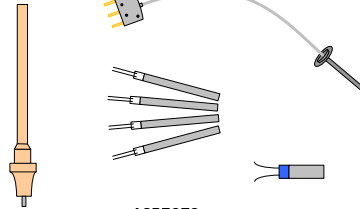
Termómetros de resistencia. Sensores metálicos (RTD)



RTD de platino de película fina (Madison Company)



SÍMBOLO



ASPECTO

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$



Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termómetros de resistencia. Sensores metálicos (RTD)

- **Funcionamiento: resistencia metal función de T**
- Requisitos:
 - Lineal: $R(T) = R_0(1 + \alpha(T - T_0))$, α : coef. temperatura; $R_0 = R(T_0)$ (aprox)
 - Coef. Temperatura alto (sensibilidad alta) y estable
 - Resistividad elevada, evitar efecto cables y reducir las dimensiones
 - Estabilidad y resistencia ante agresiones químicas
- Sólo 3 metales cumplen lo anterior: Platino, Cobre, Níquel
- Platino (Pt), mejores características EIPT 68

$$R(t) = R_0(1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3); \alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} / ^\circ \text{C}, \beta = -5,8 \cdot 10^{-7} / ^\circ \text{C}^2, \gamma = -4,3 \cdot 10^{-12} / ^\circ \text{C}^3$$

R_0 (resistencia a 0 °C) típicamente 100Ω

Disponibles comercialmente 10,50,200,400,500

Inconvenientes: precio, α baja, ρ baja pero mejor que los otros

Ventajas: pto. fusión elevado, bastante lineal, fácilmente refinable (Ni no)

Aleaciones abaratar costes.



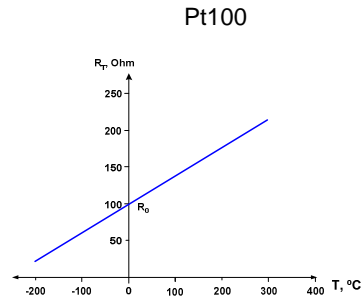
Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Sensores de temperatura de resistencia metálica. RTD

Metales	Resistividad (ρ), $\Omega\cdot m$	Coefficiente térmico, $(K)^{-1}$
Platino, Pt	$10,6\cdot 10^{-8}$	$3,9\cdot 10^{-3}$
Níquel, Ni	$6,84\cdot 10^{-8}$	$7\cdot 10^{-3}$
Wolframio, W	$5,6\cdot 10^{-8}$	$4,5\cdot 10^{-3}$
Cobre, Cu	$1,68\cdot 10^{-8}$	$4,3\cdot 10^{-3}$

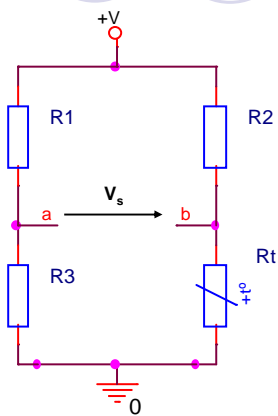


Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV

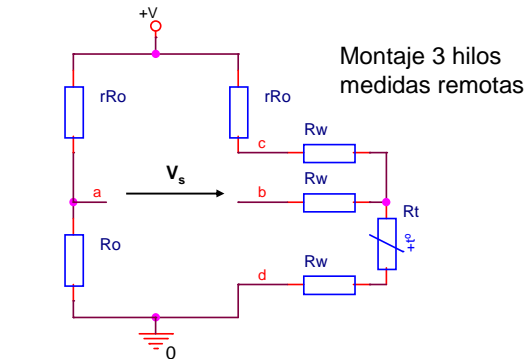


Acondicionamiento de la señal RTD



Equilibrar puente

Régimen pequeña señal



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Errores medida con RTD

- Efecto hilos unión (deriva de cero puente Wheastone, evitar montajes a 3 hilos y reequilibrar)
- Estabilidad
- Autocalentamiento
 - Limitar la corriente máxima circula RTD. Se limita la potencia máxima que disipa $< 2\text{mW}$. Limita el error en la medida de temperatura (Δt)
 - $t - t_a = \Delta t = R_{\theta} I^2 R_T$; R_{θ} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) resistencia térmica de la RTD con el medio, I corriente efectiva circula RTD
- Posible sensibilidad RTD a deformaciones (despreciable $1000 \mu\epsilon$ implican ΔT orden 1.7°C , normalmente sometida a $1 \mu\epsilon$)

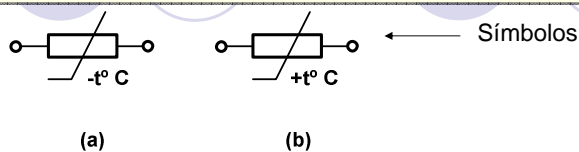


Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termistores



Posibles configuraciones:

Gota
Disco

Basados en materiales semiconductores

Funcionamiento: resistencia óxidos metálicos semiconductores función de T

NTC: Negative Temperature Coefficient

PTC: Positive Temperature Coefficient



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termómetros de resistencia. Termistores

- Características:
 - No Lineal: $R(T)=R_0 (e^{\beta(1/T-1/T_0)})$, β (en K) y $R_0=R(T_0)$ dependen material,
 - β varía de 2000 K a 6000 K
 - Sensibilidades térmicas muy superiores a sensores metálicos
 - Sensibilidad normalizada $S_n=(\Delta R/R_0)/\Delta T=-\beta/T^2$
 - $S_n=-0,045/K$ con $\beta=4000$ K a $T=298$ K frente $S_n=0,0036/K$ de Pt100 (10 veces menor)
 - Resistencia a T ambiente elevada: 100 Ω a 100K Ω
 - Menor rango de operación de -70 a 500°C
 - Se obtienen variaciones grandes, fácilmente medibles
 - Dispersión valores R_0 misma serie (calibración necesaria para precisión)
- PTC tienen pendientes de variación, S_n mayores pero son más inestables y menos repetitivas
- Son más baratas que los sensores metálicos
- Errores medida equivalentes RTD salvo problema hilos no afecta



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Linealización sensores resistivos

- Colocando Resistencia en paralelo R_f con R_T (sensor)
- Función $R_p(T) = R_T \parallel R_f$ variación cuasi-lineal con T. Tenga un punto de inflexión alrededor de la T entorno cual se busca un comportamiento lineal
- $d^2R_p/dT^2 (T=T_i) = 0$
- $R_f = (2R_T'^2)/R_T'' - R_T$

Ejercicio. Calcular el valor de R_f para

- (a) Pt100 ($\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$, $\beta = -5,8 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$)
- (b) Ni con $R_0=50\Omega$ a 25°C, ($\alpha = 6,8 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$, $\beta = 6,7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}^2$)



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Disipación potencia

- Al circular corriente se genera energía térmica por efecto Joule que parte se disipa y parte absorbe el termistor aumentando su temperatura, T_s , sobre la ambiente, T_a que se desea medir (posible fuente de error):
 - $\Delta T = T_s - T_a$ error en la medida
- Pasado un tiempo se alcanza el equilibrio térmico y toda la potencia cedida al termistor se cede al ambiente:
 - $P = V_T \times I_T = R \times I_T^2 = \delta (T_s - T_a)$
 - δ Coeficiente de disipación del termistor (mW/K)
 - Limita la precisión de la medida



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Acondicionamiento de la señal termistor

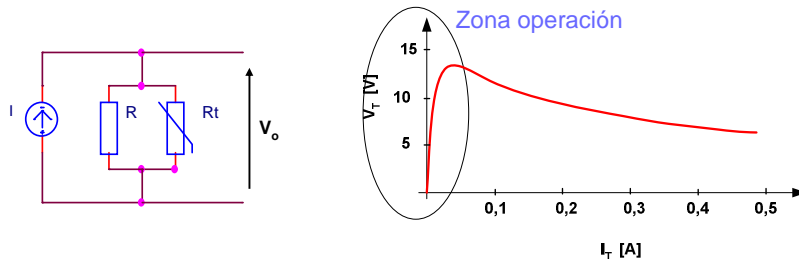
Circuitos potenciométricos alimentados:

- tensión,
- corriente

Típicamente no trabajan en régimen de pequeña señal

Se puede linealizar con una resistencia en paralelo

Se debe limitar potencia máxima disipa termistor



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Ejemplos. Hojas de características

- <http://physics.syr.edu/courses/PHY351.05/Spring/thermistor-specs.pdf>
- http://www.uib.es/depart/dfs/GTE/educacion/industrial/ins_electronica_I/NTC-RS.pdf



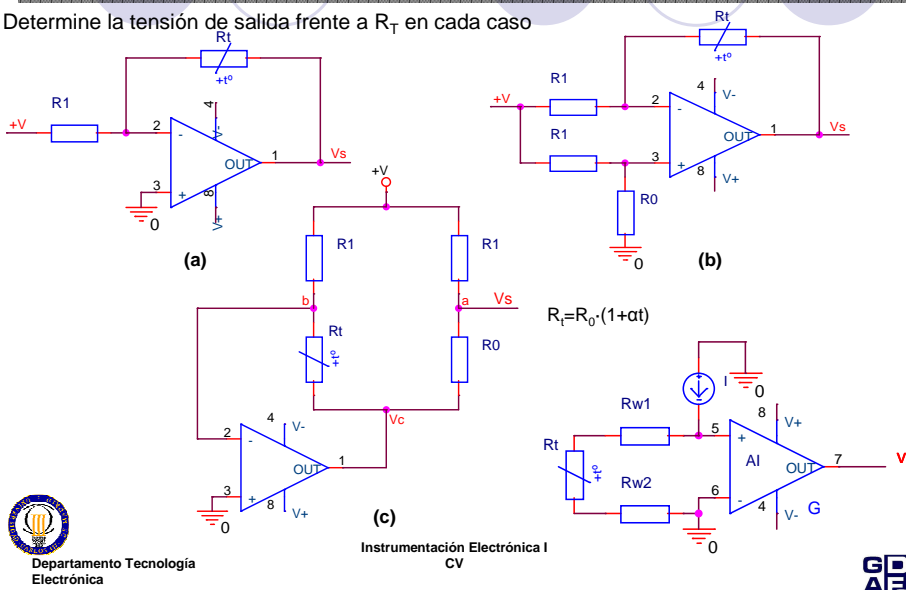
Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Ejercicios Acondicionamiento de la señal

Determine la tensión de salida frente a R_T en cada caso



Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termómetros Cl. Silicio

- Principio de funcionamiento: dependencia con la T de la caída tensión unión PN directa (V_D).
 - Diodo = transistor unión BC cortocircuitada
 - $I = I_0(e^{qV_D/KT} - 1)$ luego $V_D = KT/q \ln(I/I_0)$ si I cte y $I \gg I_0$ $V_D(T)$ lineal con T,

Sensibilidad -2,5mV/°K

Ejemplo: serie MTS Motorola, $\Delta V/\Delta T$ (Sensibilidad) -2,25mV/°K

Evitar el efecto $I_0(T)$ se realizan montajes con CI con transistores apareados en el mismo sustrato:

$$I_1 = I_0(e^{qV_1/KT} - 1) \text{ luego } V_1 = KT/q \ln(I_1/I_0)$$

$$I_2 = I_0(e^{qV_2/KT} - 1) \text{ luego } V_2 = KT/q \ln(I_2/I_0); I_1, I_2 \gg I_0$$

$$V_d = V_1 - V_2 = KT/q \ln(I_1/I_2) \quad ; \quad I_1 = 2 I_2 \text{ se obtiene } V_d (\mu V) = 59,73 T (^\circ K) \text{ Lineal con T}$$

Ejemplos:

LM335 CI 10mV/°K

AD590 1μA/°K rango: -55 a +150 °C, lineal, bajo coste (Ejercicio: obtener parámetros no linealidad, error... hoja de características)



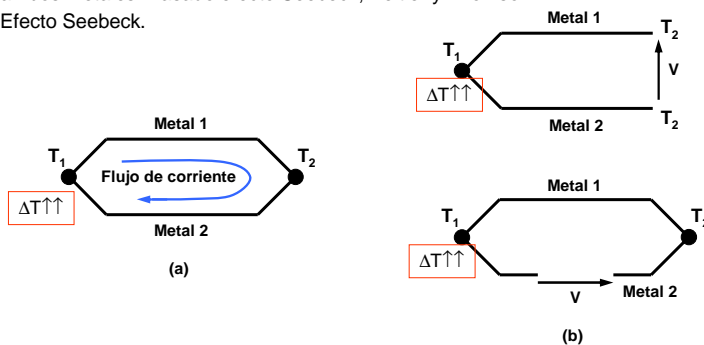
Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termopares. Principio de funcionamiento

- Sensor T formado por 2 hilos metálicos diferentes puestos en contacto térmico; produce una tensión proporcional a la diferencia de temperatura entre los puntos de unión de ambos metales. Basado efecto Seebeck, Peltier y Thomson.
- Efecto Seebeck.



$V = a(T_1) + b(T_1^2) + \dots$; a y b constantes según metales. Usualmente T_1 mide, T_2 referencia en Esta ecuación se supone $T_2 = 0^\circ C$



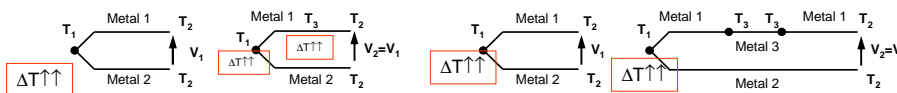
Departamento Tecnología Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



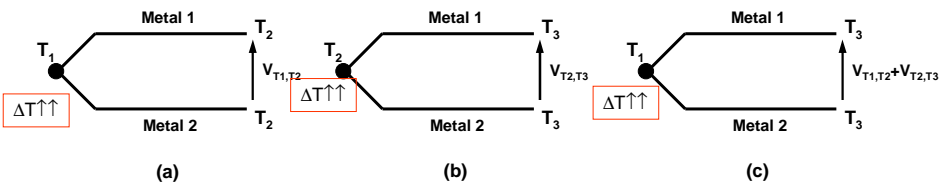
Termopares. Leyes Termoeléctricas

- Ley de los circuitos homogéneos.
- Ley de los metales intermedios.



Las temperaturas intermedias no afectan

Los metales intermedios con misma T uniones del nuevo metal, no afectan



Ley de las temperaturas intermedias



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termopares. Tipos

- Termopares prácticos: gran sensibilidad y estabilidad, bajo coste, repetibilidad..
- Cada metal tiene sensibilidad ($\mu\text{V}/^\circ\text{K}$) respecto del Pt y referida a 0°C temperatura referencia
 - Bismuto $-72 \mu\text{V}/^\circ\text{K}$; Alumen $-13,6 \mu\text{V}/^\circ\text{K}$; Cromo $25,8 \mu\text{V}/^\circ\text{K}$.
 - Ejemplo cálculo Cromo-alumen (tipo K) $S=25,8-(-13,6)=39,4 \mu\text{V}/^\circ\text{K}$

Tipo	Composición (terminal positivo - negativo)	Campo de medida recomendado	Sensibilidad (a 25°C)
J	Fe - Constantán*	0 a 760°C	$51,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Cromel [†] - Alumel [†]	-200 a 1250°C	$40,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
N	Nicrosil [†] - Nisil*	0 a 1260°C	$26,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	Cu - Constantán	-200 a 350°C	$41,0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
R	13%Pt 87%Rh - Pt	0 a 1450°C	$6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	10%Pt 90%Rh - Pt	0 a 1450°C	$6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	30%Pt 70%Rh - 6%Pt 94%Rh	800 a 1800°C	$9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (a 1000°C)



Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termopares. Tablas de calibración (tipo J)

Tensión termopar en μV , suponiendo unión referencia a 0°C .

T($^\circ\text{C}$)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	5,268	5,322	5,376	5,431	5,485	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758	5,812
110	5,812	5,867	5,921	5,976	6,031	6,085	6,140	6,195	6,249	6,304	6,359
120	6,359	6,414	6,468	6,523	6,578	6,633	6,688	6,724	6,797	6,852	6,907

¿tensión medida si la temperatura de la unión de referencia es 22°C y la otra está a 125°C ?

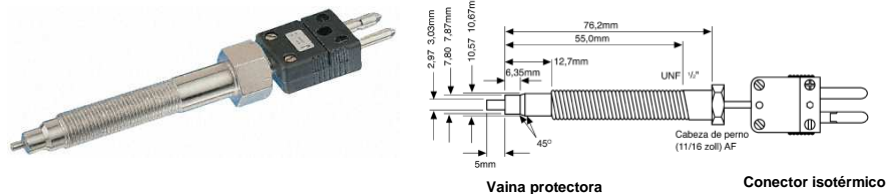
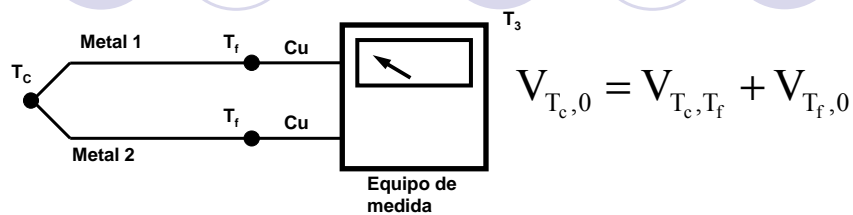


Departamento Tecnología
Electrónica

Instrumentación Electrónica I
CV



Termopares. Sistemas de medida



Termopar tipo J, 1/2 UNF 20-76mm (0-750 $^\circ\text{C}$)

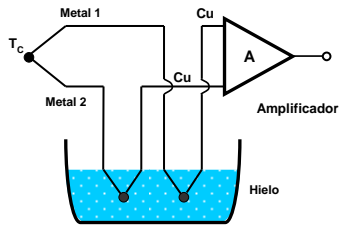


Departamento Tecnología
Electrónica

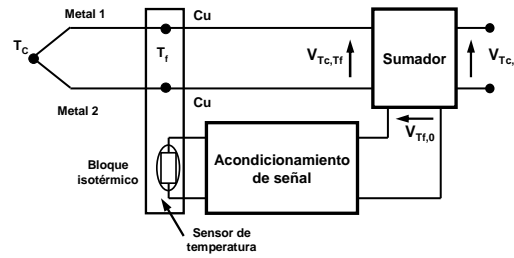
Instrumentación Electrónica I
CV



Termopares. Acondicionamiento señal



Control y determinación de la T de referencia:
 1. Fijar a un valor conocido. Métodos: baño a T constante u horno,
 2. Permitir que varíe y añadir un circuito que permita su compensación en línea



$$V_{T_c, T_f} = V_{T_c, 0} + V_{0, T_f}$$

Luego:
$$V_{T_c, 0} = V_{T_c, T_f} + V_{T_f, 0}$$



Departamento Tecnología
Electrónica

Ejemplo: puente de Wheatstone o patilla tensión referencia AD620

Instrumentación Electrónica I
CV

