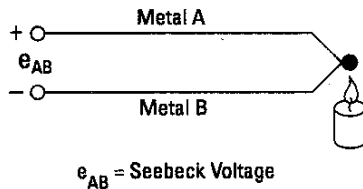


7.- SENSORES GENERADORES

7.1.- TERMOPARES



Cuando se somete a la unión de dos metales distintos a una temperatura distinta del cero absoluto, se genera una diferencia de potencial entre sus extremos e_{AB} del orden de $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Ejemplo: Medida de la resistencia de un clip mediante un multímetro de gama alta

Medida a 2 hilos de la resistencia del clip = 0,102 Ω , pero si medimos la resistencia de los cables usados obtenemos $R_c = 0,1 \Omega$. Observamos que el error es muy grande.

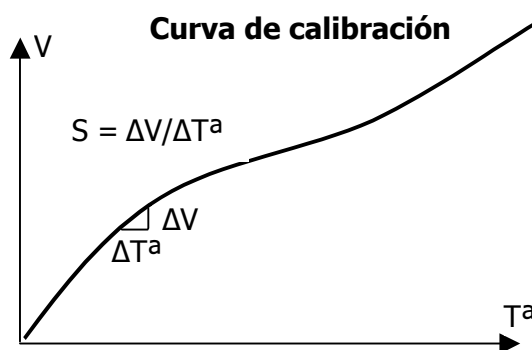
Si realizamos la medida a 4 hilos, obtenemos 0,00370429 Ω . La diferencia con lo esperado (0,002 Ω) se debe al efecto termopar que se produce por ser el clip y los cables de distinto metal. Si calentamos el clip el error aumenta.

7.1.1.- CURVA DE CALIBRACIÓN

- La relación Tensión-temperatura **NO es lineal**. Sin embargo tomando incrementos de T^a pequeños, podemos expresar:

$$\Delta V \approx S \Delta T^a$$

donde la sensibilidad del sensor S es conocida como **coeficiente de Seebeck**.



Por lo tanto el fabricante nos proporcionará la relación V/T de dos formas:

- **Tabla de calibración:** Cada tipo de termopar proporciona la **tabla de calibración** con el valor de la T^a para cada tensión.
- **Coefficientes del polinomio:** También se puede aproximar mediante un polinomio:

$$T = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + \dots + a_nV^n$$

El fabricante proporciona el valor de los coeficientes a_n hasta cierto orden.

7.1.2.- TIPOS

Según los metales que lo componen, los termopares se dividen en tipos designados por una letra:

<u>TYPE</u>	<u>COMPOSITION</u>	<u>MEASUREMENT LIMITS (°C)</u>
J	Fe vs Cu-Ni	-210 to 760
K	Ni-Cr vs Ni-Al	-270 to 1372
T	Cu vs Cu-Ni	-270 to 400
E	Ni-Cr vs Cu-Ni	-270 to 1000
R	Pt-13% Rh vs Pt	0 to 1768
S	Pt-10% Rh vs Pt	0 to 1768
B	Pt-30% Rh vs Pt-6%Rh	0 to 1820
C	W-5% Re vs W-26% Re	0 to 2320
N	Ni-14.2% Cr-1.4% Si vs Ni-4.4% Si-0.1%Mg	-270 to 1300

7.1.3.- ENCAPSULADO

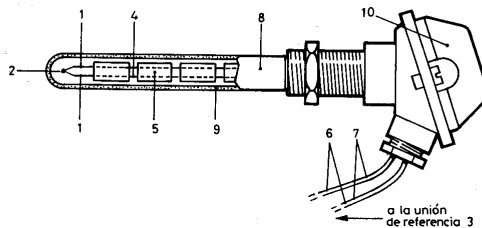


Figura 6.4 Termopar industrial con vaina

- | | |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Conductores (diferentes) | 7. Cables de compensación, diferentes de los del termopar pero con f.t.e.m. pequeña |
| 2. Unión de medida | 8. Caña pirométrica |
| 3. Unión de referencia | 9. Protector (cubierta externa) |
| 4. Hilos de termopar sin aislar | 10. Cabeza de la caña |
| 5. Hilos de termopar aislados | |
| 6. Cables de extensión iguales a los del termopar | |

7.1.4.- CARACTERÍSTICAS

VENTAJAS

- No requiere alimentación.
- Simple y robusto
- Barato
- Amplio rango de temperaturas.

INCONVENIENTES

- Alinealidad
- Baja sensibilidad del orden de $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Como se verá a continuación, su acondicionamiento requiere otro sensor que mida la temperatura de referencia.

7.1.5.- EJEMPLOS

Nat. Inst. 745690-K002 K-Type Thermocouples Wire, Fiberglass (32deg F to 900deg F) 2 m, 20 €

Nat. Inst. 745690-T001 T-Type Thermocouples Wire, Fiberglass (32 deg F to 500 deg F) 1 m, 20 €

Los demás tipos (J, E) también cuestan 20 € en longitudes de 1 ó 2 m.

7.1.5.1.- Sonda basada en termopar Agilent E2307A

La sonda de temperatura Agilent E2307A es un termopar Tipo K:



- Unión aislada con Teflon/Neoflon.
- Cable 24 AWG terminado en conector tipo banana
- El polo positivo es de aleación níquel-cromo y el negativo de níquel-aluminio.
- Puede conectarse directamente al multímetro Agilent 3458A.
- Puede conectarse al multímetro 34401A, pero requiere de software externo para la conversión de la tensión a temperatura.

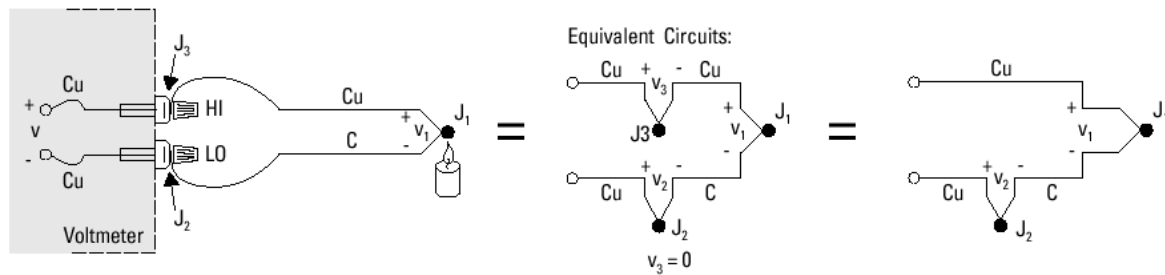
Especificaciones:

- **Rango** de temperatura: -260°C a 260°C
- **Precisión:**
2% de la lectura entre -260°C y -110°C
 $\pm 2.2^\circ\text{C}$ entre -110°C y 260°C
- **Resolución:** 1°C
- **Longitud:** 0.9 m.
- **Precio** en España del E2307A: **33 €**

7.1.6.- ACONDICIONAMIENTO

7.1.6.1.- Unión de referencia o unión fría

En la figura inferior el Termopar es de tipo T (Cobre-Constantan). El constantan es una aleación formada por un 45% de níquel y un 55% de cobre.



Para medir la tensión conectamos un voltímetro, lo que crea dos uniones distintas entre sí:

- J_2 (Cu-Constantan) que está sometida a otra T^a creando una tensión V_2
- J_3 (Cu-Cu) cuya tensión $V_3 = 0$, ya que ambos extremos son del mismo metal.

Según el circuito termoeléctrico de la figura, podemos establecer:

$$V = V_1 - V_2$$

donde

$$V_2 = S_2 \cdot T_2$$

$$V_1 = S_1 \cdot T_1$$

Como ambas uniones J_1 y J_2 estan formadas de los mismos metales, tienen el mismo coeficiente S (i.e. $S_1=S_2$) quedando:

$$V = S (T_1 - T_2)$$

Si medimos la temperatura T_2 de la unión J_2 que será una temperatura ambiente podremos saber T_1 que podrá ser una temperatura mucho más extrema.

Como el paréntesis es un incremento de T^a no importa que esta venga dada en $^{\circ}K$ ó en $^{\circ}C$:

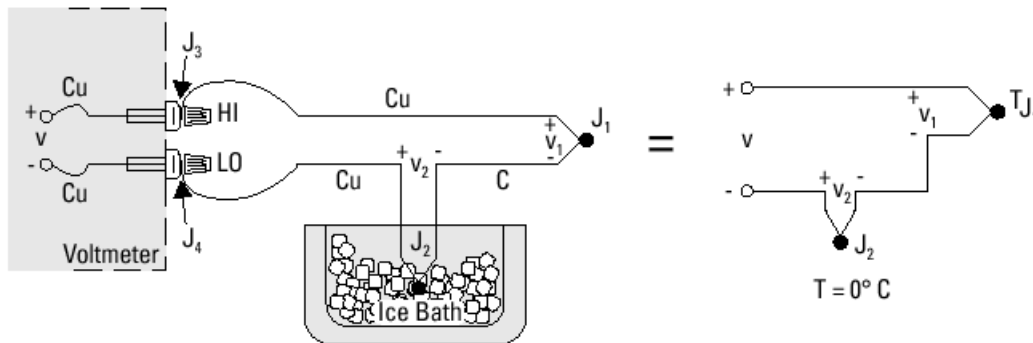
La demostración es inmediata. Si expresamos la T^a en $^{\circ}K$:

$$V = S [(T_1^{\circ}C + 273) - (T_2^{\circ}C + 273)]$$

$$V = S (T_1^{\circ}C - T_2^{\circ}C)$$

USO DE UNA UNIÓN DE REFERENCIA O UNIÓN FRÍA

Una solución aparentemente sencilla para hallar V sería sacar la unión J_2 del voltímetro y mantenerla a una temperatura $T_2 = 0$, por ejemplo sumergiendola en un baño de hielo fundente (i.e. $0^{\circ}C$)



Nos quedaría entonces:

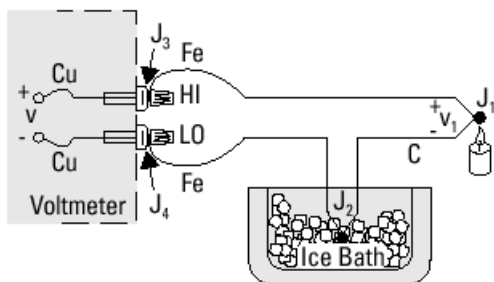
$$V = S \cdot T_1$$

Este método o alguna variación del mismo es usado por los laboratorios de calibración para la elaboración de las tablas características de los termopares, aunque no es práctico para las medidas de campo.

USO DE UN TERMOPAR FE – C (TIPO-J)

El caso anterior es un caso simple ya que uno de los metales es igual al metal de los cables (Cu), pero veamos qué ocurre con otros tipos de termopares, p. ej. Hierro-Constantan (Tipo-J):

Observar además que en vez de conectar el constantan directamente al voltímetro, se añade una unión J4 de los mismos metales que J3. Esto permite que V3 y V4 se cancelen entre sí.



Planteando el circuito termoeléctrico:

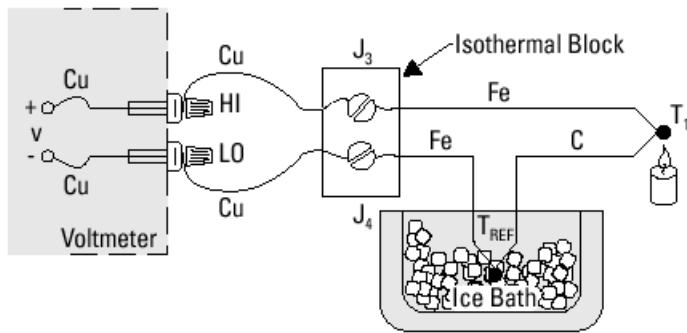
$$V = V_3 + V_1 - V_2 - V_4 \quad \text{donde } V_3 = V_4 \text{ y } V_2 \text{ es } 0$$

$$V = V_1$$

$$V = S \cdot T_1$$

USO DE UN BLOQUE ISOTÉRMICO

Por cuestiones prácticas, las uniones J3 y J4 se separan del voltímetro y se colocan en un bloque isotérmico que garantice que ambas uniones permanecen a la misma T^a:



Planteando el circuito termoeléctrico:

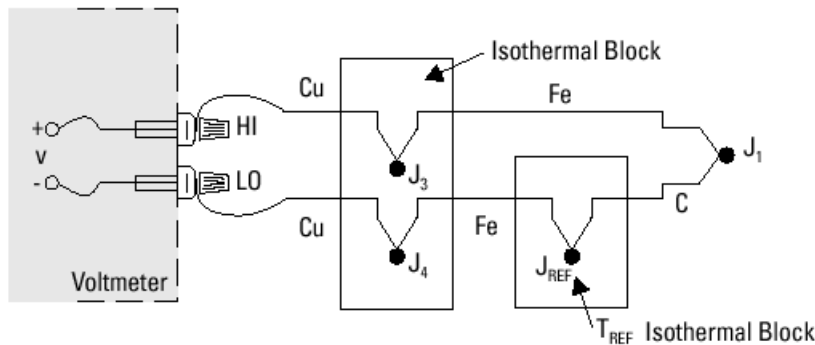
$$V = V_3 + V_1 - V_{ref} - V_4 \quad \text{donde } V_3 = V_4 \quad V_{ref} = 0$$

$$V = V_1$$

$$V = S \cdot T_1$$

ELIMINACIÓN DEL BAÑO DE HIELO

Además eliminamos el baño de hielo que no resulta práctico, poniendo la unión de referencia sobre un bloque isotérmico. El circuito equivalente quedaría:



En el circuito anterior J₃ y J₄ son iguales y por tanto sus tensiones se cancelan.

Planteemos el circuito termoeléctrico:

$$V = V_3 + V_1 - V_{ref} - V_4 \quad \text{donde } V_3 = V_4 \quad V_{ref} = S_{FE-C} \cdot T_{ref}$$

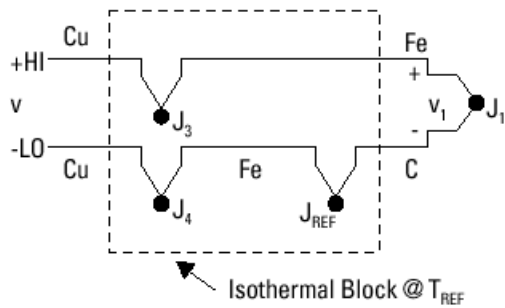
$$V = V_1 - V_{ref}$$

$$V = S_{FE-C} \cdot T_1 - S_{FE-C} \cdot T_{ref} \quad \text{sacando factor común:}$$

$$V = S_{FE-C} (T_1 - T_{ref})$$

JUNTAR LOS BLOQUES ISOTÉRMICOS

Es más práctico tener un único bloque isotérmico, por lo que juntamos las tres uniones:

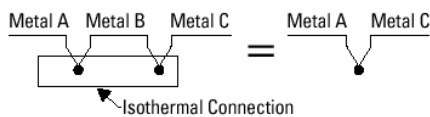


La ecuación sigue siendo válida:

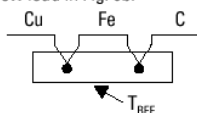
$$V = S_{FE-C} (T_1 - T_{ref})$$

SIMPLIFICAR EL CIRCUITO APLICANDO LA LEY DE LOS METALES INTERMEDIOS

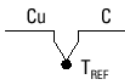
Para simplificar este circuito, aplicamos la ley de los metales intermedios que dice:



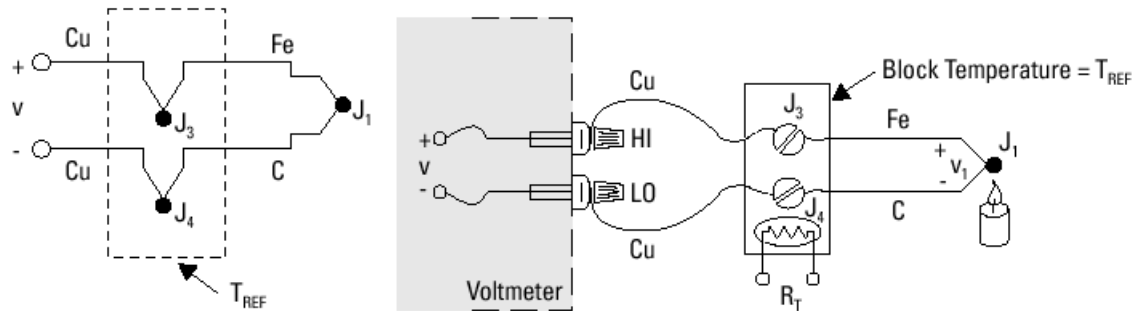
Thus the low lead in Fig. 9b:



Becomes:



Aplicando esta ley, podemos prescindir de la unión de referencia Fe-C, quedando un circuito equivalente:



Gracias a la ley de los metales intermedios, el circuito se simplifica y sin embargo la ecuación anterior a la simplificación se mantiene:

$$V = S_{FE-C} (T_1 - T_{ref})$$

O visto de otra manera

$$T_1 = (V/S_{FE-C}) + T_{ref}$$

Observar como para saber la temperatura de la unión fría (cold junction) se necesita otro sensor R_T . Los accesorios de acondicionamiento para termopares suelen incorporar dicho sensor (Termistor o RTD).

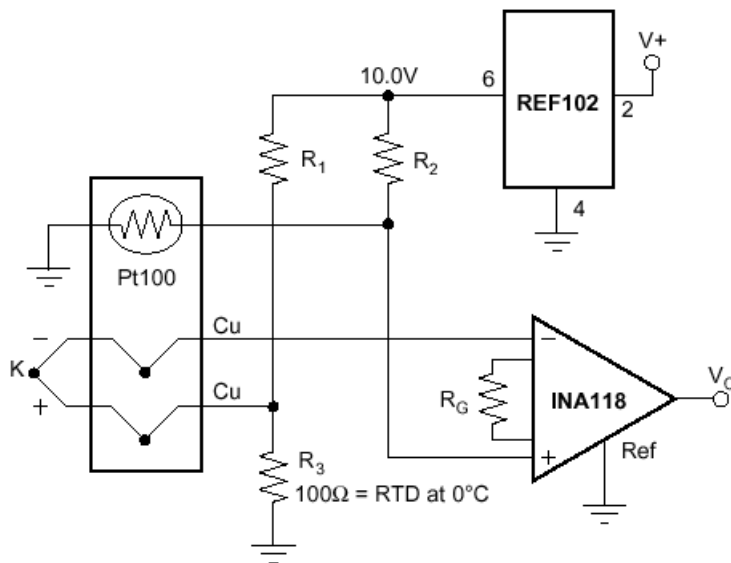
El uso de otro sensor que mida la T^a de la unión fría suele plantear una duda: ¿Por qué no prescindir del termopar y medir directamente con el otro sensor?. La respuesta está en que para la medida de T^a de la unión fría se utiliza una RTD o un termistor que NO pueden utilizarse en los rangos de T^a que soportan los termopares ni en ambientes tan hostiles (Los termopares suelen ser mucho más robustos).

7.1.6.2.- Compensación de la unión fría

HARDWARE

Un circuito especial aplica la tensión adecuada para cancelar la producida en la unión fría.

Ejemplo de acondicionamiento: Estudiar el siguiente circuito.



ISA TYPE	MATERIAL	SEEBECK COEFFICIENT ($\mu V/^{\circ}C$)	R_1, R_2
E	+ Chromel - Constantan	58.5	66.5k Ω
J	+ Iron - Constantan	50.2	76.8k Ω
K	+ Chromel - Alumel	39.4	97.6k Ω
T	+ Copper - Constantan	38.0	102k Ω

$$V^+ - V^- = 10 \frac{R_T}{R_T + R_2} + V_K - 10 \frac{R_3}{R_3 + R_1}$$

- La resistencia de la PT100 viene definida por $R_T = R_0 + \Delta R_T$
- Como $R_3 = 100 \Omega$ que es la resistencia nominal de la PT100 es decir, $R_3 = 100 \Omega = R_0$
- Además sabemos que en el termopar se cumple $V_k = V - V_{ref}$

$$V^+ - V^- = 10 \frac{R_0 + \Delta R_T}{R_0 + \Delta R_T + R_2} + (V - V_{ref}) - 10 \frac{R_0}{R_0 + R_1}$$

Descompiendo el primer término:

$$V^+ - V^- = 10 \frac{R_0}{R_0 + \Delta R_T + R_2} + 10 \frac{\Delta R_T}{R_0 + \Delta R_T + R_2} + (V - V_{ref}) - 10 \frac{R_0}{R_0 + R_1}$$

Si hacemos $R_2 = R_1$ y tomamos un valor elevado para estas resistencias podemos cancelar el primer y el último término ya que $R_0 + R_2 \gg \Delta R_T$ quedando:

$$V^+ - V^- = 10 \frac{\Delta R_T}{R_0 + \Delta R_T + R_2} + V - V_{ref} \quad \text{Hemos cancelado el offset de la PT100}$$

Ahora se trata de cancelar la tensión de referencia, para lo cual basta con que se cumpla

$$10 \frac{\Delta R_T}{R_0 + \Delta R_T + R_2} = V_{ref}$$

Donde $V_{ref} = S \cdot T_{ref}$ y $\Delta R_T = R_0 \alpha T_{ref}$

$$10 \frac{R_0 \alpha T_{ref}}{R_0 + R_0 \alpha T_{ref} + R_2} = S \cdot T_{ref}$$

Si volvemos a aproximar $R_0 + R_2 \gg \Delta R_T$

$$10 \cdot \frac{R_0 \alpha T_{ref}}{R_0 + R_2} = S \cdot T_{ref}$$

Para que se cumpla la igualdad:

$$10 \cdot \frac{R_0 \alpha}{R_0 + R_2} = S$$

Si despejamos R_2 que es nuestra incognita queda:

$$R_2 = 10 \cdot \frac{R_0 \alpha}{S} - R_0$$

Si damos valores $R_0 = 100$, $\alpha = 0.00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y tomamos el coeficiente de Seebeck del termopar tipo K $S_K = 39.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, obtenemos:

$$\mathbf{R_2 = 97,6 \text{ K}\Omega}$$

SOFTWARE

Hoy día, casi todos los equipos de medida se basan o al menos contienen un microprocesador. Si a esto añadimos que el código software necesario es muy simple hace que sea la opción más utilizada:

1. Medir la temperatura de la unión fría y calcular la tensión equivalente del termopar usando tablas de referencia o polinomios.
2. Medir la tensión de la unión de medida y sumar (no restar) la tensión calculada en el paso anterior.
3. Convertir la tensión resultante en temperatura utilizando tablas de referencia o polinomios.

Multímetros de propósito general permiten visualizar directamente la T° si conectamos un termopar, ya que incluyen estas rutinas. Esto ahorra al usuario la compensación con circuitos externos.

Los paquetes software de instrumentación como LabView, HP-VEE, LabWindows/CVI incluyen rutinas de conversión T° -Tensión y Tensión- T° para los termopares más comunes.

7.1.6.3.- Medida de la tensión generada

AMPLIFICACIÓN DE LA PEQUEÑA SEÑAL

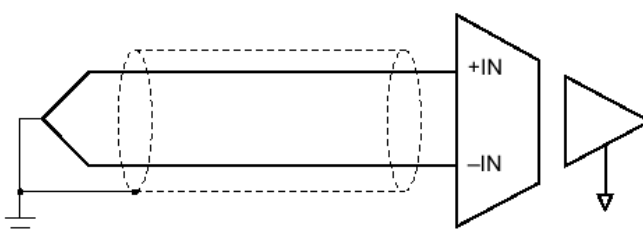
- La sensibilidad del termopar se sitúa entre $7 \mu V/^{\circ}C$ y $50 \mu V/^{\circ}C$ → Amplificador de bajo ruido, medida diferencial y alta ganancia.
- Un amplificador externo cercano al termopar minimiza la corrupción de señal debida al ruido.

Ej. Tarjeta DAQ con rango $\pm 5V$, Ganancia 100, 12 bits:

$$\text{Resolución} = 10 \text{ V} / (2^{12} * 100) = 24,4 \text{ uV/bit}$$

Con un preamplificador de ganancia 10 (i.e. ganancia total = 1000) podríamos aumentar la resolución a $2,4 \mu V/\text{bit}$ lo que supone una décima de $^{\circ}C$.

APANTALLAMIENTO



Grounded Thermocouple

El termopar de la imagen está puesto a masa en el punto de medida. Como ya se mencionó en el tema de interferencias, el apantallamiento se conecta a dicha masa.

Blindaje magnético

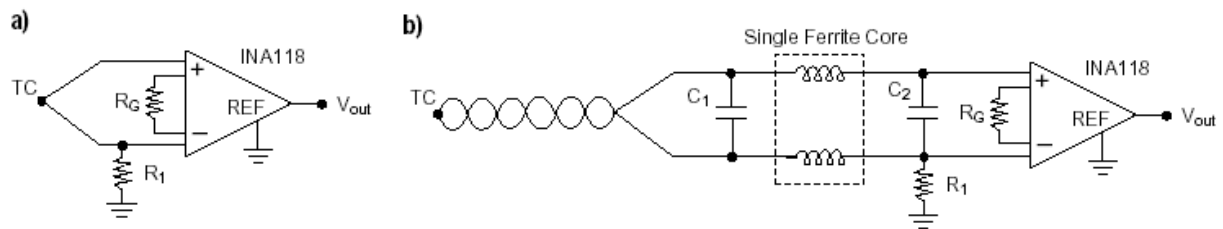
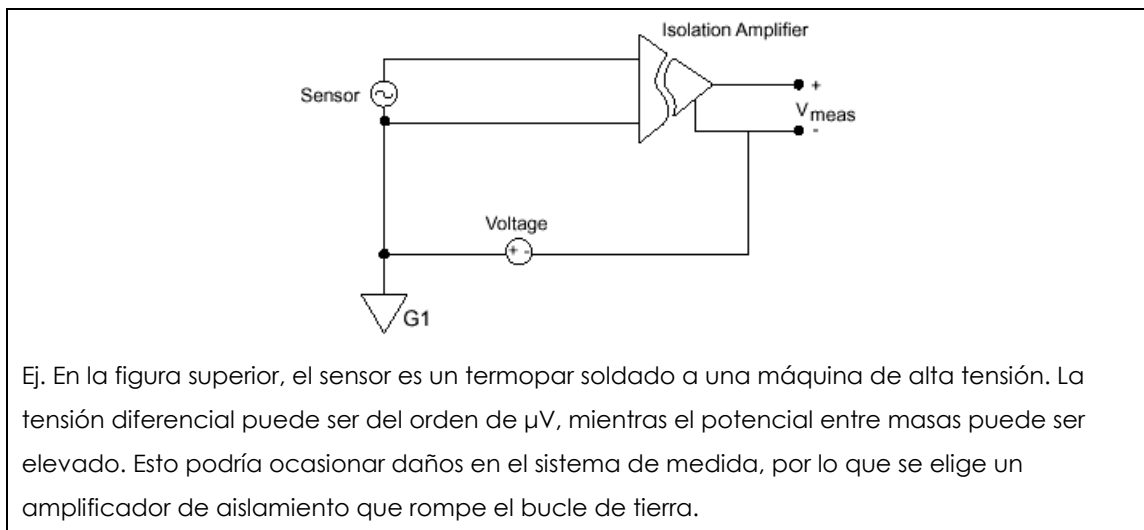


Figura a) Interfaz simple para termopar. R1 permite la polarización de las entradas del AI.

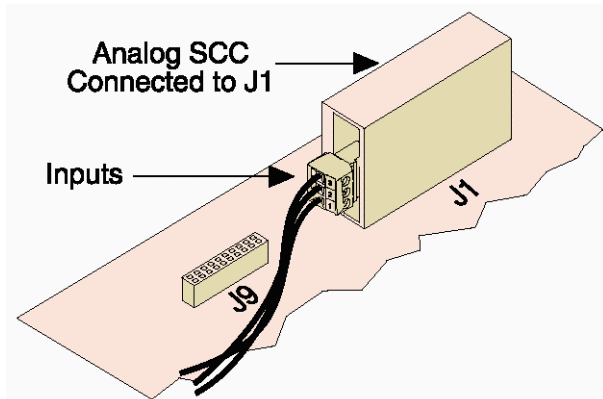
Figura b) Evita la captación de ruido inducido en los cables. El núcleo de ferrita y los dos condensadores forman un filtro para el modo común. Observar además el par trenzado.

PRESENCIA DE ELEVADAS TENSIONES DE MODO COMÚN

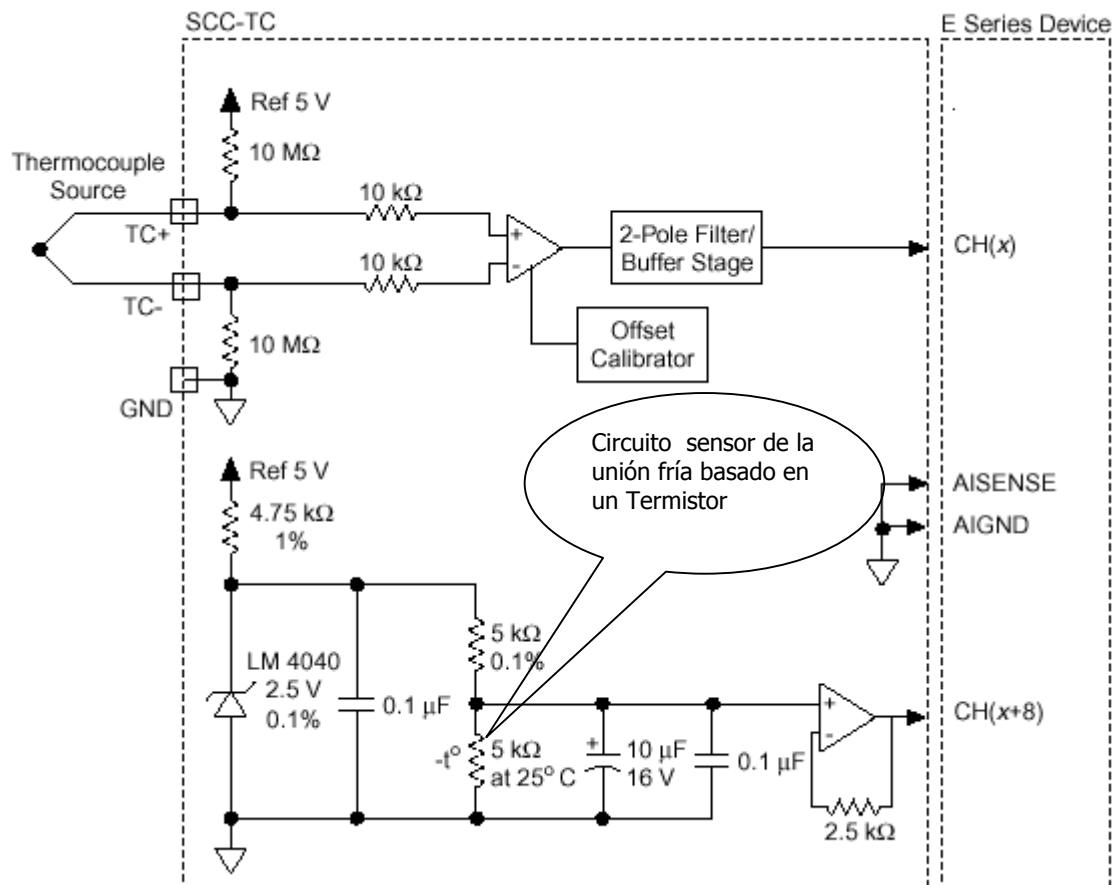
La presencia de elevadas tensiones de modo común puede requerir la presencia de amplificadores de aislamiento.



7.1.6.4.- Ejemplo: Módulo acondicionador de termopar SCC-TC02



Vista de un módulo acondicionador de la serie SCC de National Instruments



Esquema del módulo acondicionador de termopares SCC-TC02.

OBSERVACIONES:

- Conectable directamente a las tarjetas de adquisición de datos del mismo fabricante.
- Permite conectar la masa del sistema de medida (GND) con la del termopar (en el caso de estar conectado a otra masa y no ser flotante).

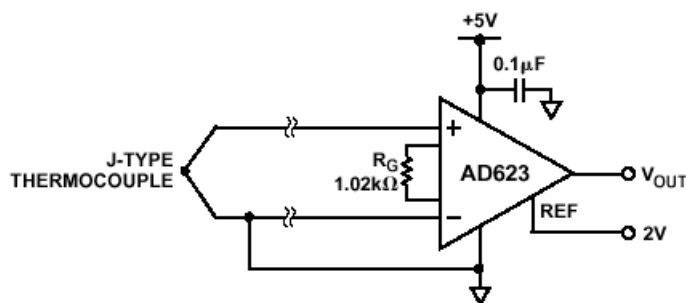
- El circuito sensor de temperatura para la compensación de la unión fría, basado en un termistor. Los condensadores hacen la función de filtros. El operacional tiene configuración de buffer con una resistencia de realimentación de 2'5 K Ω para compensar las corrientes de polarización.
- La señal de temperatura de compensación ocupa otro canal de la tarjeta, aunque el mismo circuito nos serviría para compensar otros termopares que conectáramos a los otros canales de la tarjeta.
- Las resistencias de 10 M Ω permiten la polarización del amplificador si la señal del termopar es flotante.
- El amplificador de instrumentación conectado al termopar tiene una ganancia de 100.
- Filtro paso-bajo de segundo orden (2-pole) para el ruido con frecuencia de corte de 2 Hz.
- Sensor (NTC) de la unión fría:

Precisión $\pm 0,4^\circ$ max entre 15° y 35° C, $\pm 0,75^\circ$ max en los rangos 0° - 15° C, y 35° - 55° C

Salida.....1,91 V (0° C) to 0,58 V (55° C)

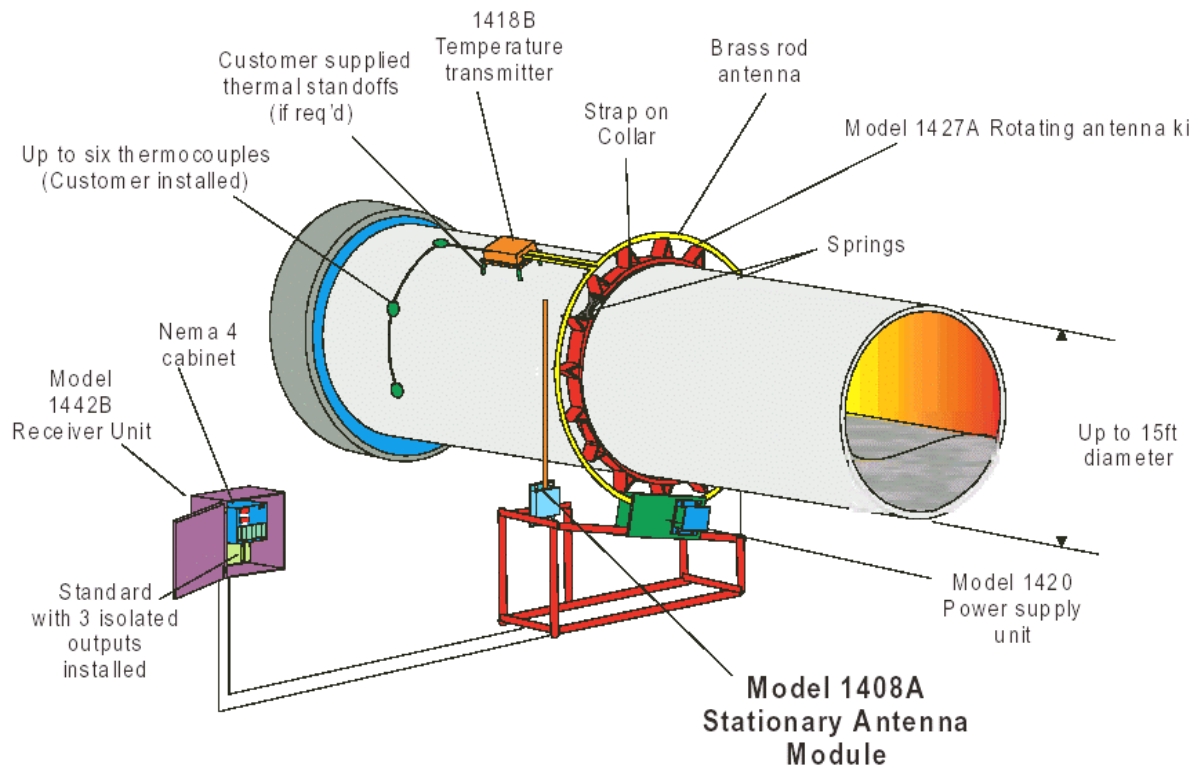
7.1.6.5.- Ejemplo: Amplificación con baja tensión de modo común:

Como el rango de entrada de modo común del AD623 se extiende $0,1$ V por debajo de masa, es posible medir señales diferenciales débiles que tengan poca o ninguna tensión en modo común. En la figura podemos observar un termopar con uno de sus metales conectado a masa.



En un rango de temperatura de -200°C a $+200^\circ\text{C}$, el termopar tipo J, proporciona una tensión entre $-7,890$ mV a $10,777$ mV. Configuramos el AD623 con una ganancia de 100 (i.e. $R_G = 1.02$ K Ω) y una tensión de referencia de 2 V en la patilla REF del AD623, obtenemos un rango de tensión de salida entre $1,110$ V a $3,077$ V.

7.1.7.- APLICACIONES DE LOS TERMOPARES



Sistema de monitorización de temperatura en un horno industrial rotativo (cemento, incineradoras).

- En **criotécnia** se usan termómetros basados en termopares para la medida de temperaturas por encima de los -200°C . El material usado en los termopares es hilo de platino de aproximadamente $0,05\text{ mm}$ de diámetro. Estos poseen gran velocidad de reacción y muy alta precisión en intervalos que van desde -200°C hasta $+1000^{\circ}\text{C}$.
- Se usan en la industria textil para medir temperaturas en los tejidos, en la industria alimenticia para medir la temperatura en procesos de fermentación.
- Se utilizan además para medir temperaturas de la sangre en el interior del cuerpo humano usando minielementos térmicos con diámetros de $0,45\text{ mm}$, estos se adaptan directamente a la aguja hipodérmica de la jeringa, para aislar los alambres se colocan dos perfiles en forma de ranuras longitudinales