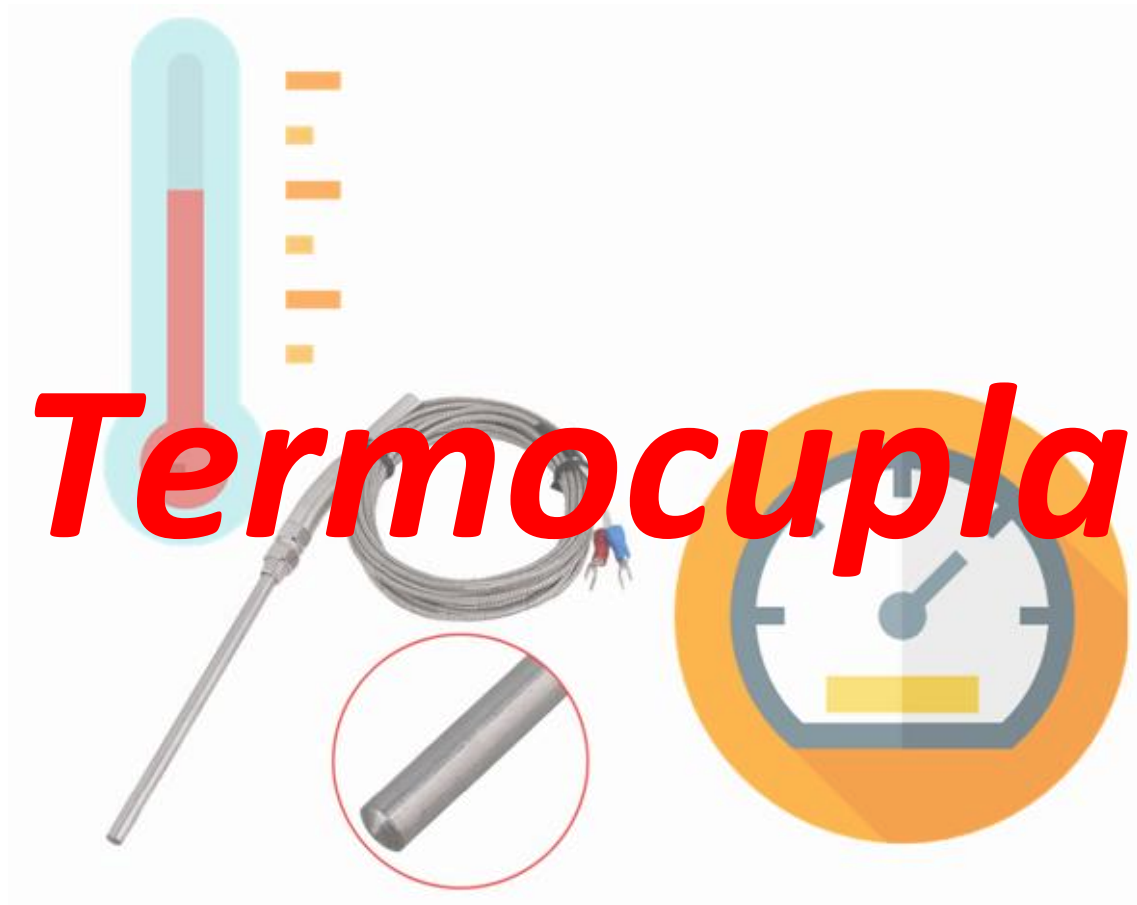


Termocupla



Introducción histórica

En 1822, Thomas Johann Seebeck, un médico estoniano, accidentalmente unió piezas semicirculares de bismuto y cobre mientras estudiaba los efectos.

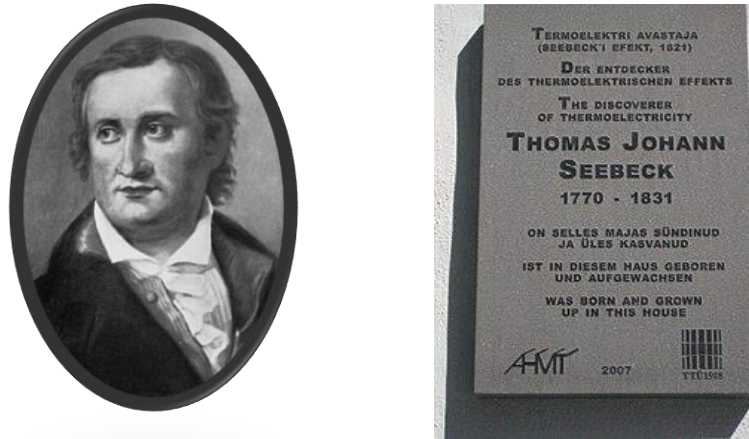


Figura 1: izquierda, Thomas Seebeck; derecha, placa conmemorativa en Estonia

Una brújula cercana indicó una perturbación magnética. Seebeck experimentó repetidamente con diferentes combinaciones de metales a varias temperaturas, observando las relativas intensidades del campo magnético. Curiosamente no creía que fluyera corriente eléctrica y prefirió describir el efecto como “termo magnetismo”. Publicó sus resultados en un artículo, “Magnetische Polarization der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz”, que hoy en día se puede ver en:

https://books.google.com.ar/books?id=1u0ZWscprXkC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

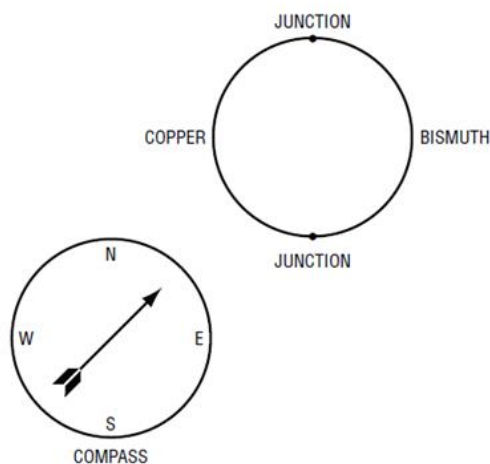


Figura 2: Experimento de Thomas Seebeck



Investigaciones posteriores han demostrado el “efecto Seebeck” es fundamentalmente de naturaleza eléctrica, repetible y bastante útil. Hoy en día los termopares, son los transductores más comunes, descendientes de Seebeck.

Termopares en perspectiva

La temperatura es fácilmente la medida más común de un parámetro físico. Varios transductores sirven para medir la temperatura. Cada uno tiene ventajas y consideraciones. Antes de hablar sobre termopares, vale la pena colocar estos sensores en perspectiva. El cuadro de la tabla 1 muestra algunas características comunes de sensores de temperatura. En general, los termopares son económicos y de amplio rango. Su pequeño tamaño los hace rápidos y su baja impedancia de salida es una ventaja.

Tensión Seebeck

Dos metales diferentes se unen en una unión llamada “*juntura*” para el sensado de temperatura (T_{TC}) para crear un termopar. La tensión es medida a una temperatura de referencia (T_{CJ}) a través de los dos metales. Se requieren que los cables del termopar permanezcan a la misma temperatura y, a menudo, están conectados a un ADC a través de un bloque isotérmico.

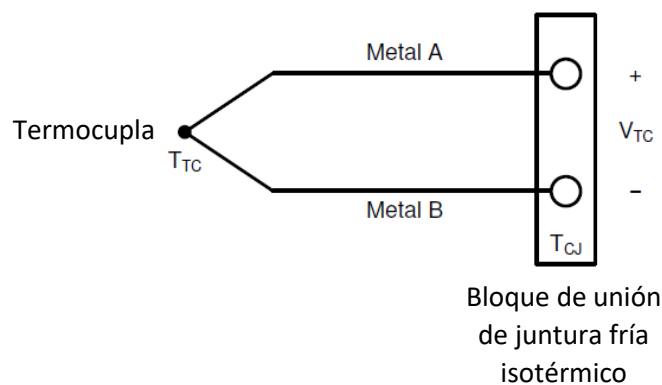


Figura 3: Elementos de una termocupla

La conexión del termopar a un bloque isotérmico es importante para la medición de temperatura. Para una medición precisa del termopar, los cables de retorno de diferentes metales deben estar a la misma temperatura conocida.

Cualquier conexión entre dos metales diferentes crea una nueva unión termopar, causando errores de medición.



Tipo	Rango de operación	Sensibilidad a 25 °C	precisión	Linealidad	Velocidad	Costo	Comentarios
Termocuplas (de todos los tipos)	-270 °C a 1800 °C	típicamente menor que $50 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$	$\pm 0,5^{\circ}C$ con referencia	Pobre dentro de un rango ancho.	Típico 1 seg	\$1 a \$50	Requiere referencia. Bajos niveles de tensión, requieren acondicionamiento de señal
Termistores	-100 °C a 450 °C	$\cong \frac{5\%}{^{\circ}C}$	$\pm 0,1^{\circ}C$ (-40 °C a 100 °C)	Buena para unidades linealizadas	1 a 10 seg	\$2 a \$10	Sensibilidad grande a altas temperaturas. Buena estabilidad a largo plazo por encima de 100°C
Platino (RTD)	-250 °C a 900 °C	$\cong \frac{0,5\%}{^{\circ}C}$	$\pm 0,1^{\circ}C$	Buena	Mala	\$25 a \$1000	Establece un estándar de estabilidad a largo plazo. Tienen un rango de temperatura mayor que un Termistor.
Diodos y transistores	-85 °C a 125 °C	$-2,2 \frac{mV}{^{\circ}C}$	$\pm 2^{\circ}C$ a $\pm 5^{\circ}C$	Buena dentro del rango de op.	1 a 10 seg.	\$ 0,5	Requiere calibración. Es necesaria una fuente de corriente para un rendimiento óptimo. Extremadamente económico.

Tabla 1: comparación de los distintos sensores de temperatura



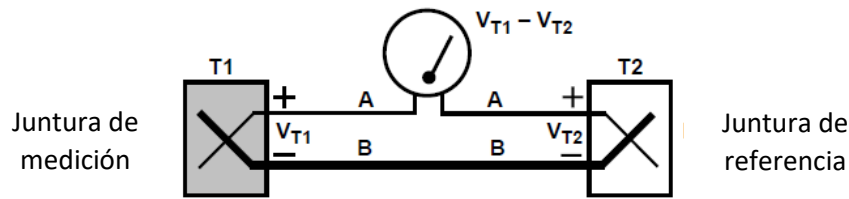


Figura 4: medición con una junta de referencia

A medida que la señal del termopar se conecta al circuito integrado ADC, cada paso a lo largo del camino puede encontrar varios termopares adicionales. Esto se convierte en un problema de medición si hay un gradiente de temperatura a lo largo del circuito. Cada conexión, desde el terminal del cable hasta la soldadura, la traza de cobre, el pin IC, el cable de unión y el chip. Sin embargo, si la señal es diferencial y cada uno de los pares de termopares **están a la misma temperatura**, la tensión del termopar se cancela y no tienen ningún efecto neto en la medición. Las entradas diferenciales incluyen tensiones de termopares no intencionales que no se cancelan si los termopares no están ubicados muy juntos, o si hay un gradiente térmico en la placa o dispositivo.

Una mezcla de (hielo y agua) proporciona una temperatura bien definida de 0 °C para la unión de referencia. Esto se ha convertido en un estándar punto de referencia para tensión de salida del termopar en tablas de temperatura para varias combinaciones de metales.

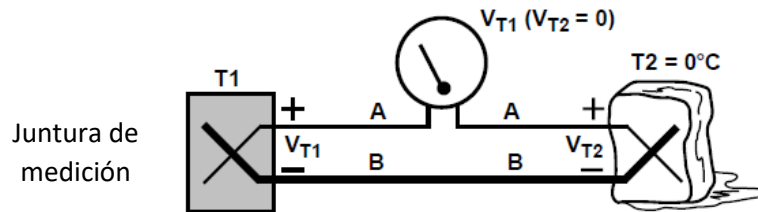


Figura 5: medición con una junta de referencia a 0 °C

Se utiliza comúnmente un voltímetro para medir la tensión Seebeck. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado al interconectar al termopar. Refiriéndose a la figura 6, se forman dos uniones adicionales, J2 y J3, en la conexión entre el termopar y el medidor.

Estas dos uniones producen tensiones opuestas. Utilizando un bloque isotérmico en el punto de conexión mantiene estas uniones en temperatura equilibrio y produce una fem iguales pero opuestas. La tensión medida ahora es la diferencia de potencial entre la unión de medición y el bloque isotérmico que sirve como unión de referencia.



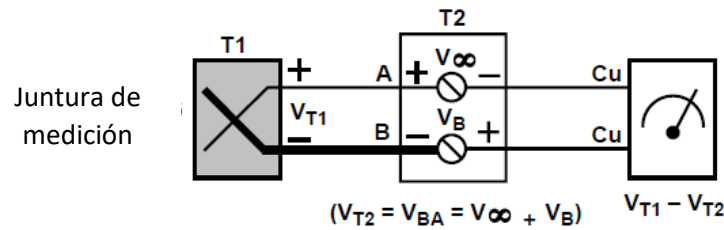


Figura 6: medición de tensión Seebeck

Tipos de termocuplas

Todos los metales diferentes utilizados para construir un termopar muestran un cambio de tensión debido al efecto Seebeck, pero se utilizan varias combinaciones específicas para fabricar termopares. Estos se pueden clasificar en dos diferentes tipos de construcción: termopares de metales comunes y termopares de metales nobles.

Los termopares de metales nobles se componen de metales como el platino y el rodio, son más caros y se utilizan en aplicaciones de mayor temperatura.

Independientemente del tipo de termocupla, cada tipo de termopar se designa con una sola letra para indicar los dos metales utilizados. Por ejemplo, un termopar tipo J está construido con hierro y constantan. Con cada tipo, las propiedades termoeléctricas están estandarizadas para que las mediciones de temperatura sean repetibles. Los cables y conectores están estandarizados con clavijas de colores, indicando el tipo de termopar. La tabla 2 muestra varios tipos de termopares comunes y sus características.

Tipo de termocupla	Metal A (+)	Metal B (-)	Rango de temperatura (°C)	Fuerza electromotriz (mV)	Coefficiente de Seebeck ($\frac{\mu V}{^{\circ}C}$ a 0 °C)
J	Hierro	Constantan	-210 a 1200	-8,095 a 69,553	50,37
K	Chromel	Alumel	-270 a 1370	-6,458 a 54,886	39,48
T	Cobre	Constantan	-200 a 400	-6,258 a 20,872	38,74
E	Chromel	Constantan	-270 a 1000	-9,385 a 76,373	58,70
S	Platino y 10% de Rodio	Platino	-50 a 1768	-0,236 a 18,693	10,19

Tabla 2: tipos de termocuplas

Sensibilidad de medición del termopar

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) ha analizado la tensión de salida versus la temperatura para los distintos tipos de termopares. La figura 7 ilustra las respuestas típicas para estos termopares.



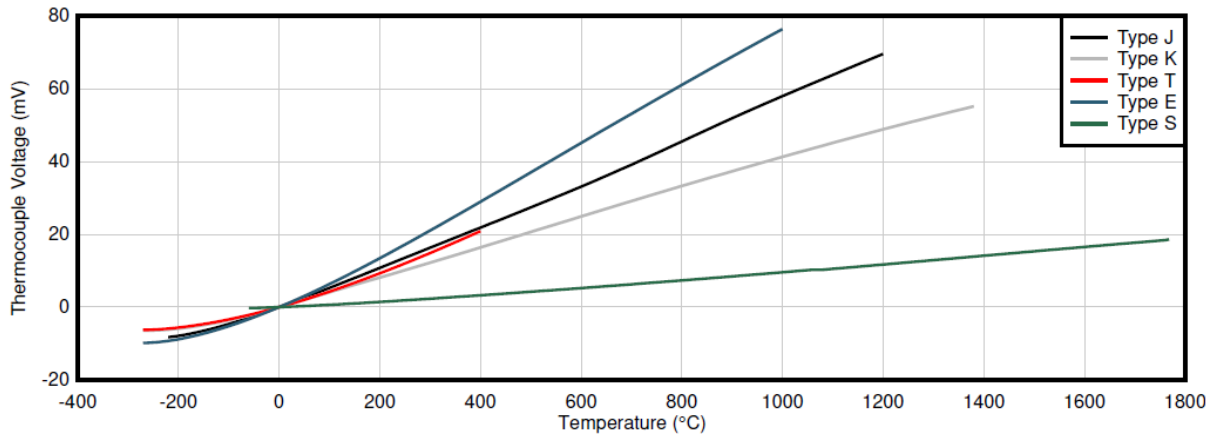


Figura 7: tensión Seebeck vs temperatura

Varias ecuaciones polinómicas están definidas por el estándar de la Escala Internacional de Temperatura que correlaciona la temperatura y la tensión de salida. Estos datos se encuentran en el sitio web del NIST. Estas ecuaciones se utilizan para calcular la tensión termoeléctrica a partir de la temperatura o para calcular temperatura de la tensión termoeléctrica. Link: <http://srdata.nist.gov/>

Construcción de un termopar

Los termopares vienen en varios tipos de construcción diferentes, como se muestra en la figura 8. Los cables del termopar están protegidos por una capa de aislamiento y, a menudo, tienen una funda protectora en la punta de unión del termopar para proteger el elemento sensor.

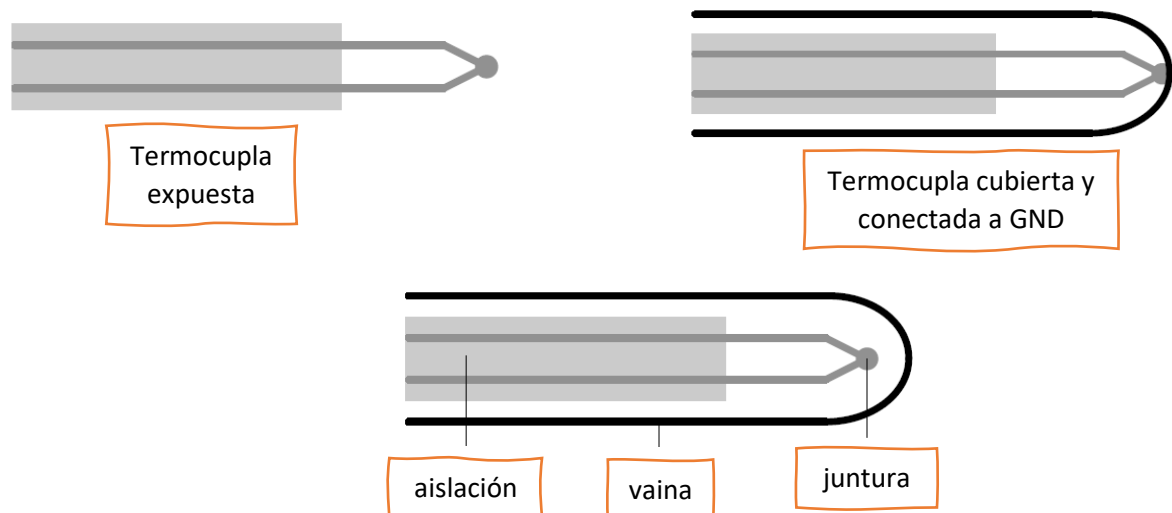


Figura 8: distintas construcciones



Un termopar sin funda protectora se conoce como termopar expuesto. Esto permite una transferencia directa de calor desde el objeto medido. Este tipo de termopar proporciona una respuesta rápida.

En un termopar conectado a GND, el sensor está soldado a la funda. A menudo esta funda está compuesta de metal, que También permite la transferencia de calor, pero agrega una protección adicional para ambientes hostiles. Sin embargo, porque el termopar está soldado a la funda metálica, hay contacto eléctrico. Esto hace que la medición susceptible al ruido de ground loop.

Un termopar sin conexión a tierra se aísla de la funda, agregando una capa de aislamiento entre el termopar el objeto medido. Este tipo de termopar tiene la respuesta de temperatura más lenta porque hay una capa de aislamiento.

Como se mencionó, tanto los termopares conectados a tierra como los expuestos tienen respuestas de temperatura más rápidas debido a la excelente transferencia de calor del contacto metálico. Sin embargo, con el contacto directo del metal hay contacto eléctrico entre el circuito de medición.

Temperatura relativa y absoluta

Los termopares son dispositivos de medición relativa. En otras palabras, miden la diferencia de temperatura entre dos regiones térmicas. Algunas aplicaciones son sólo de interés esta diferencia térmica, pero la mayoría de las aplicaciones requieren la temperatura absoluta del dispositivo a prueba. La temperatura absoluta se encuentra fácilmente sumando la temperatura del termopar y la temperatura del bloque isotérmico. En la figura 9, se observan los errores y linealidad de los diferentes termopares.

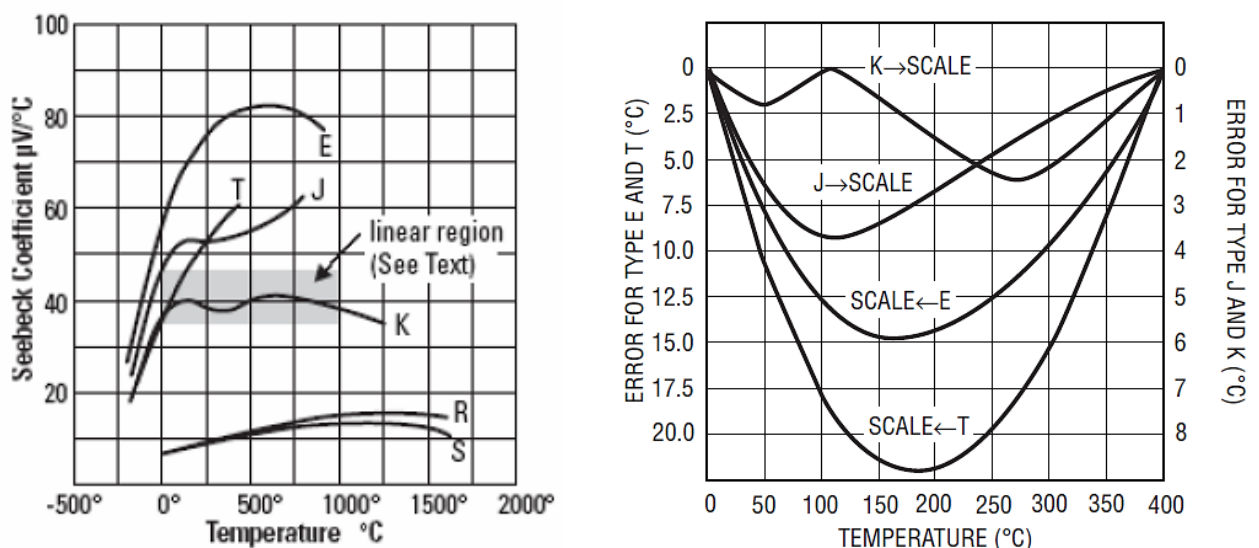


Figura 9: análisis de error y linealidad



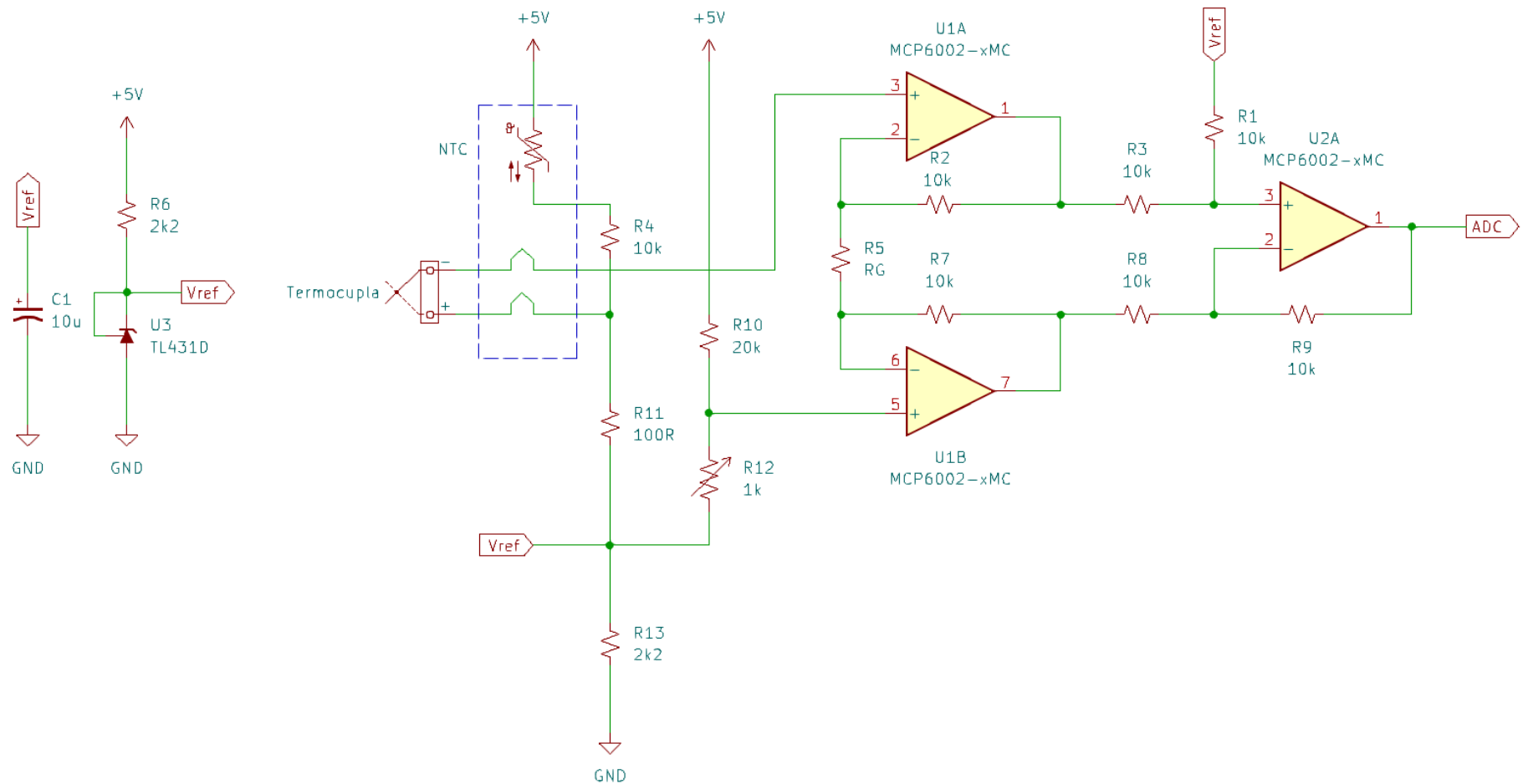


Figura 10: Circuito de medición analógico

El termopar está polarizado en 2,5 V. Esto permite utilizar el termopar para medir Temperaturas más cálidas y más frías que las del bloque isotérmico. El termistor ajusta la tensión de polarización haciendo que el termopar entregue una tensión absoluta. Ambos el termistor y el termopar no son lineales.



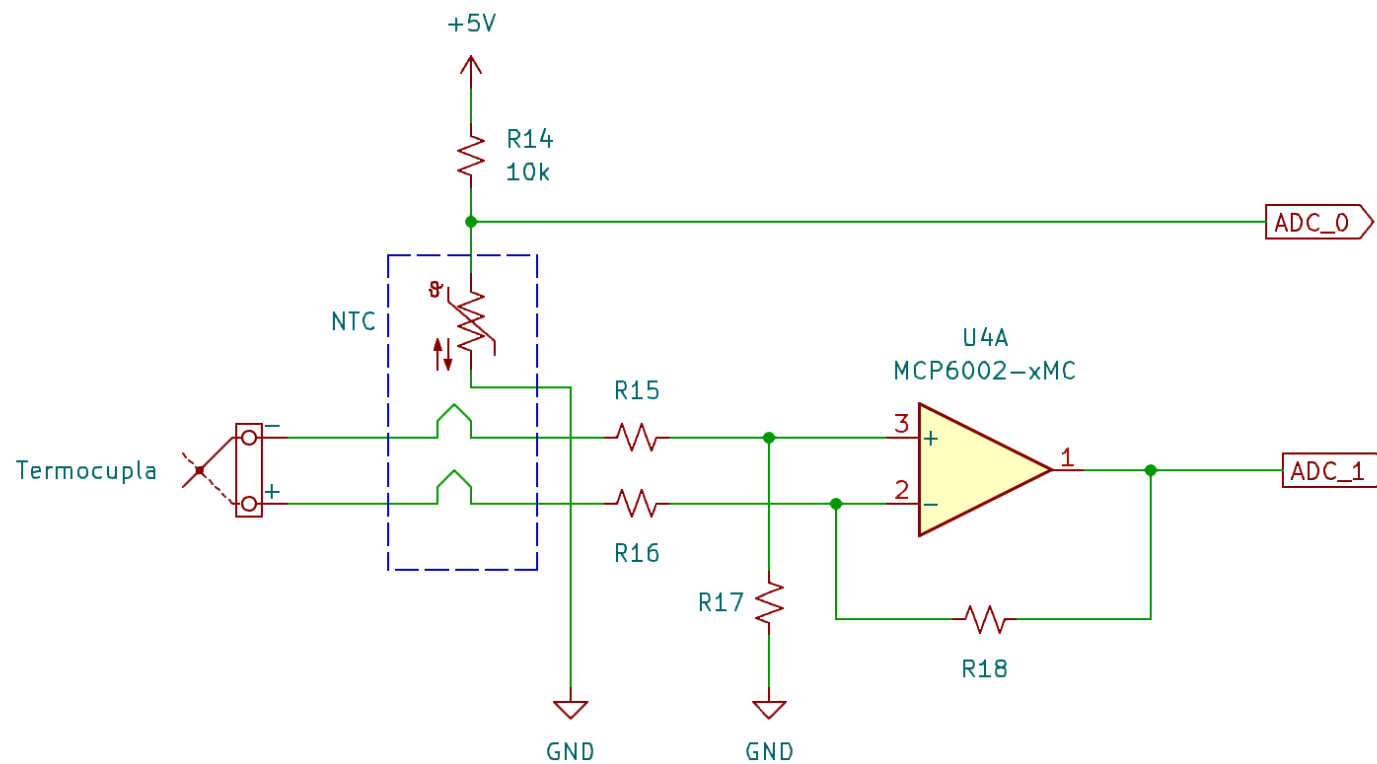


Figura 11: Circuito de medición analógico simplificado



Compensación de junta fría

Para mayor precisión, la compensación de unión fría requiere que la temperatura de la unión se sume a la tensión termoeléctrica para la medición.

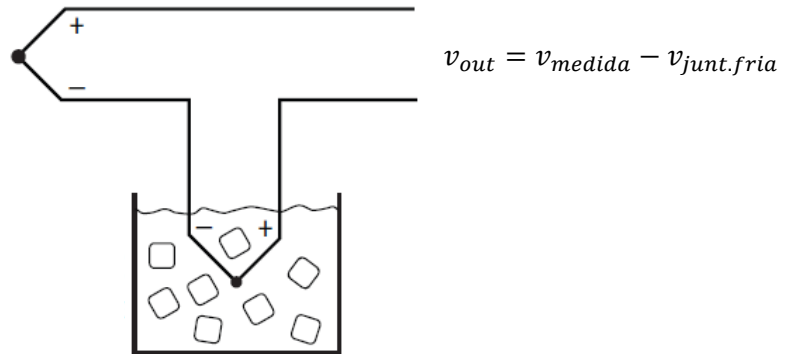


Figura 12: junta fría con agua y hielo

Para una medición precisa, el bloque de unión fría actúa como temperatura de referencia. Esta medición de referencia a menudo se realiza a través de un diodo, termistor o RTD. Si la temperatura de referencia es conocida, entonces la temperatura del termopar se calcula en función de la tensión del termopar.

Conversión a temperatura

La conversión de datos del ADC requiere mediciones de tensión del termopar y de la unión fría. A menudo, las mediciones de cada uno se entrelazan para garantizar una medición precisa de ambos. La figura siguiente, muestra los bloques para llevar a cabo la medición.

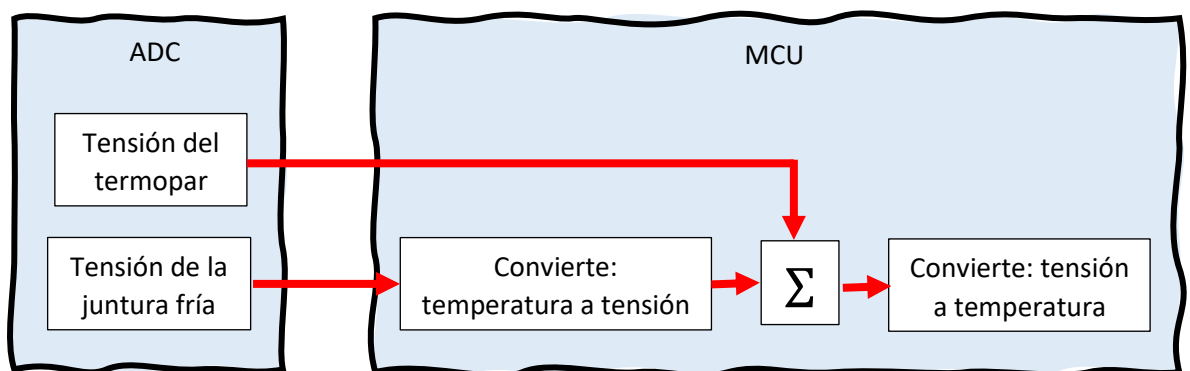
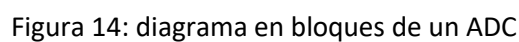


Figura 13: diagrama en bloques de la medición





Haciendo la conversión inversa, las funciones polinómicas inversas calculan la temperatura en función de la tensión del termopar. Las ecuaciones para funciones polinomiales inversas tienen la forma que se muestra en la Ecuación siguiente:

En donde:

 $E = \text{microVolts}$

t_{90} = temperatura en grados Celcius

Como ejemplo, la función inversa para un termopar tipo K se muestra en la tabla 3. Los polinomios son contruidos en tres rangos más pequeños. Para cada rango, la temperatura es descrito con un polinomio de orden superior.

Rango de temperatura	-200 °C a 0 °C	0 °C a 500 °C	500 °C a 1372 °C
Rango de tensión:	-5891 µV a 0 µV	0 µV a 20644 µV	20644 µV a 54886 µV
d0	0.000 000 0	508 355 x 10 ⁻²	
d1	2.517 346 2 x 10 ⁻²	7.860 106 x 10 ⁻⁸	-1.318 058 x 10 ²
d2	-1.166 287 8 x 10 ⁻⁶	-2.503 131 x 10 ⁻¹⁰	4.830 222 x 10 ⁻²
d3	-1.083 363 8 x 10 ⁻⁹	8.315 270 x 10 ⁻¹⁴	-1.646 031 x 10 ⁻⁶
d4	-8.977 354 0 x 10 ⁻¹³	-1.228 034 x 10 ⁻¹⁷	5.464 731 x 10 ⁻¹¹
d5	-3.734 237 7 x 10 ⁻¹⁶	9.804 036 x 10 ⁻²²	-9.650 715 x 10 ⁻¹⁶
d6	-8.663 264 3 x 10 ⁻²⁰	-4.413 030 x 10 ⁻²⁶	8.802 193 x 10 ⁻²¹
d7	-1.045 059 8 x 10 ⁻²³	1.057 734 x 10 ⁻³⁰	-3.110 810 x 10 ⁻²⁶
d8	-5.192 057 7 x 10 ⁻²⁹	-1.052 755 x 10 ⁻³⁵	
d9			
Error	0.04 °C a -0.02 °C	0.04 °C a -0.05 °C	0.06 °C a -0.05 °C

Tabla 3: coeficientes del polinomio para una termocupla K

