

Los sensores de temperatura

Julio E. Rodríguez
Universidad Nacional de Colombia

1. Introducción

Algunas de las variables utilizadas para describir el estado de un sistema termodinámico, tales como el volumen y la presión, tienen un significado directo en términos de conceptos mecánicos. Sin embargo, otras son conceptualmente extrañas a la mecánica, de estas la temperatura es una de las más importantes.

El problema con esta variable es poder transformar las impresiones sensoriales subjetivas de “caliente” y “frío” en expresiones objetivas susceptibles de ser medidas. Es decir el problema consiste en definir la temperatura en términos de cambios objetivos observables en sistemas macroscópicos. Para lograr esto se puede suponer que se tienen dos fluidos aislados, los cuales se encuentran en equilibrio termodinámico dado por p_1^0, V_1^0 y p_2^0, V_2^0 , los cuales son sus correspondientes valores de sus presiones y volúmenes. Si ahora se ponen en contacto mediante una pared diatérmica. Entonces los fluidos no alcanzarán el equilibrio a valores arbitrarios de sus variables $p_1 V_1, p_2 V_2$, sino solo cuando se satisface una relación definida entre las cuatro variables:

$$F(p_1, V_1, p_2, V_2) = 0 \quad (1)$$

El Concepto de temperatura se basa en el hecho experimental conocido como *ley cero de la termodinámica*, según el cual *dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero, se encuentran en equilibrio térmico entre sí*.

Se puede demostrar que esta condición solo se cumple si la ecuación 1 adopta la forma:

$$f_1(p_1, V_1) = f_2(p_2, V_2) \quad (2)$$

Se está ahora en condiciones de utilizar uno de los sistemas como **termómetro**, de tal manera que la función toma la forma:

$$f_2(p_2, V_2) = \Theta \quad (3)$$

donde Θ se conoce como temperatura empírica, por tanto se tiene que para el sistema 1 la ecuación de estado del fluido es:

$$f_1(p_1, V_1) = \Theta \quad (4)$$

Se puede elegir cualquier función Θ como temperatura empírica, su elección sólo está limitada por razones de orden práctico.

Como indicador termométrico se puede utilizar cualquier propiedad “adecuada” del sistema, por ejemplo, la expansión de un líquido o un gas, la resistencia eléctrica de un conductor o semiconductor, la diferencia de potencial generada por un termopar (termocupla), etc. En la práctica existen numerosos tipos de termómetros basados igualmente en diferentes parámetros termométricos. Entre las diferentes familias de termómetros se pueden citar las siguientes:

- Termómetros basados en la expansión térmica de sustancias.
- Termómetros basados en los cambios de resistencia eléctrica.
- Termómetros basados en el efecto termoeléctrico.
- Termómetros basados en los cambios de las propiedades electrónicas de dispositivos semiconductores.
- Termómetros basados en el cambio de la frecuencia de oscilación de un cristal de cuarzo.
- Termómetros basados en la emisión de radiación de los cuerpos.
- Termómetros basados en el cambio de velocidad del sonido en un medio material.

En la tabla 1 se muestran algunos tipos de termómetros, junto con algunas de sus características más notables.

Tabla 1: Características más importantes de algunos termómetros comunmente utilizados.

Termómetro	Rango $^{\circ}C$	Características
Termómetro de mercurio	-10 a 300	Simple, lento y de lectura manual
Termorresistencia (RTD)	-150 a 600	Exactitud
Termopares	-150 a 1500	Alta linealidad, requiere referencia de temperatura
Termistor	-15 a 115	No es lineal, alta sensibilidad
Circuito integrado		Alta linealidad, fácil conexión a sistemas de toma de datos
Gas	-20 a 100	Buena linealidad, No es versátil
Diodos	-200 a 50	Alta linealidad y bajo costo

2. Termómetros resistivos

Existen dos tipos de termómetros resistivos, aquellos en que el parámetro termométrico es la resistencia eléctrica de un metal o aleación (platino, níquel, cobre, etc.) y aquellos en que lo es la de un material semiconductor (generalmente óxidos metálicos).

2.1. Caracterización de un termistor

Estos dispositivos semiconductores (óxido de manganeso, de níquel o de cobre, germanio o silicio), son muy usados para medir temperaturas teniendo en cuenta su bajo costo y sensibilidad. Los hay de coeficiente de temperatura negativo (NTC) y positivo (PTC). Su dependencia con la temperatura no es simple. Una expresión que describe algunos de estos dispositivos es dada por la expresión:

$$R(T) = R_0(T) \exp \left(\beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right) = R_0 \exp \left(\frac{E_g}{\kappa_B} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right) \quad (5)$$

donde T y T_0 son temperaturas absolutas, $R_0 = R(T_0)$ la resistencia a T_0 , β y E_g son constantes a determinar y κ_B la constante de Boltzmann. Qué es la constante E_g ?

2.1.1. El problema

Diseñe una estrategia experimental que le permita estudiar el comportamiento de $R(T)$ en un termistor, calcule el parámetro E_g y verifique en qué grado sus datos experimentales se ajustan al modelo propuesto.

2.2. Variación de resistencia eléctrica de un metal.

En general, la resistencia eléctrica de los materiales conductores aumenta con la temperatura, esta variación es en la mayoría de los casos lineal y puede describirse de la siguiente manera (para variaciones pequeñas de temperatura):

$$R(T) = R_0(1 - \alpha(T - T_0)) \quad (6)$$

donde α es el coeficiente de la variación de la temperatura.

Sin embargo, en forma general esta relación es dada por la ecuación de **Callendar-Van Dusen**, según la cual la resistencia eléctrica es dada por:

$$R(T) = R(0) [1 + AT + BT^2 + CT^3 + \dots + NT^n] \quad (7)$$

donde las constantes A , B , C ... son propias del material del cual esta hecha la resistencia y se relacionan con el comportamiento no lineal de la variación de R con T .

2.2.1. El problema

Realice un estudio del comportamiento de la resistencia eléctrica en función de la temperatura para algún metal y para el termómetro PT100.

- Grafique la resistencia del alambre (o RDT) en función de la temperatura.
- Obtenga el coeficiente de variación de la resistencia α y el valor de R_0 .
- Obtenga la ecuación que describe el comportamiento de la resistencia del termómetro PT100 con la temperatura y compárela con los valores esperados.

3. Caracterización de un termopar

Los termopares son quizás los transductores de temperatura más usados, esto es debido a su robustez, versatilidad, economía y especialmente porque son elementos activos, pues generan una diferencia de potencial sin necesidad de una fuente de alimentación. Es decir convierte una diferencia de temperatura en una diferencia de potencial. Estos dispositivos están constituidos por dos alambres metálicos diferentes, que unidos, desarrollan una diferencia de potencial entre sus extremos libres, siendo ésta diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre la junta de medición y los extremos libres. Los termopares se suelen fabricar con metales puros o aleaciones (caso más común) y la característica más notable es que comparados con otros sensores son empleados en un amplio rango de temperatura (70K a 1700K).

La utilización de termopares como sensores de temperatura se fundamenta en la dependencia existente entre la fuerza electromotriz térmica (FEM termoeléctrica) del termopar y la temperatura.

Dentro de las ventajas mostradas por los termómetros termoeléctricos se pueden señalar las siguientes:

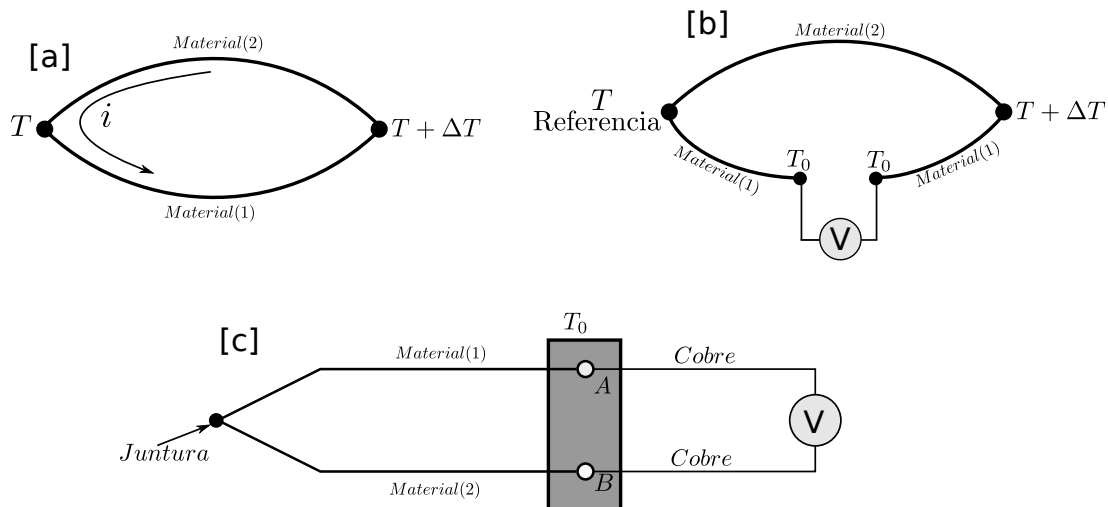


Figura 1: Esquema de la conformación de un termopar.

- Proporcionan alta exactitud en las medidas.
- Permiten la conexión de varios termómetros a un instrumento de medida, facilitando la centralización del control térmico.
- Gran versatilidad en cuanto al tamaño y forma de los termómetros.

El funcionamiento de estos instrumentos se basa en uno de los fenómenos termoeléctricos, el **efecto Seebeck**, descubierto por **Thomas Johann Seebeck** en 1821. El cual consiste en la generación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos materiales diferentes cuando éste se somete a una diferencia de temperatura entre sus juntas, como se ilustra en la figura 1a. Por lo tanto, si se coloca un voltímetro de la forma como se muestra en la figura 1b es posible medir el termovoltaje generado a partir de la diferencia de temperatura (FEM termoeléctrica).

Una termocupla mide esencialmente diferencias de temperatura y no temperaturas absolutas. Esto hace necesario el uso de una junta de referencia colocada a una temperatura de referencia, para lo cual es común emplear un baño de agua con hielo (0°C). Sin embargo, en muchas ocasiones es común utilizar un termopar simple como el ilustrado en la figura 1c, pero en estos casos es necesario hacer la corrección pertinente determinada por la temperatura ambiente.

La tabla 2 muestra los tipos de termopares más comúnmente utilizados, junto con sus rangos de temperatura de operación. Mientras que en la figura 2 se puede ver el comportamiento del termovoltaje con la temperatura para las diferentes termopares. La elección del tipo de termocupla a usar en una dada aplicación depende tanto del medio en el que se va a usar, como del rango de temperaturas.

3.1. El problema

Mida y grafique la diferencia de potencial generada por el termopar empleado en función de la temperatura y obtenga el coeficiente de variación del voltaje con la temperatura, identifique el tipo de termopar empleado, para lo cual le es útil consultar las tablas estándar existentes.

Tabla 2: Termopares comunmente utilizados, junto con sus rangos de temperatura de operación.

Tipo de termopar	Aleación	Rango $^{\circ}C$
T	Cobre/Constantan	-200 a 600
J	Hierro/Constantan	95 a 760
R	Platino/Platino-rodio 13 %	870 a 1450
K	Cromel/Alumel	95 a 1250
S	Platino/Platino-rodio 10 %	980 a 1450
B	Platino 30 %-Rodio/Platino 6 %-rodio	1370 a 1700

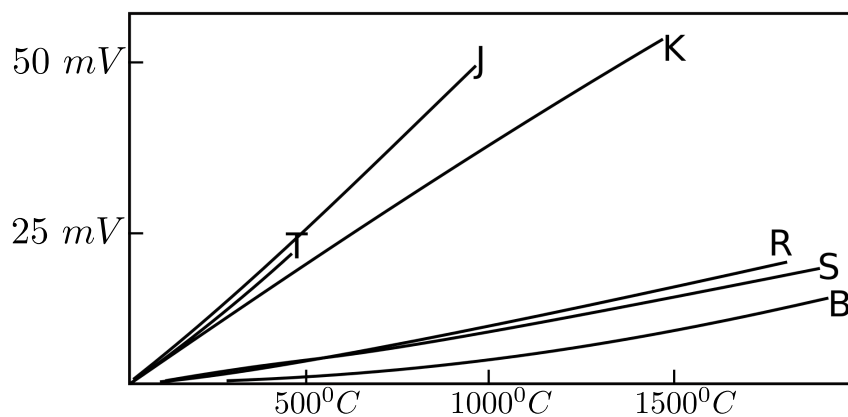


Figura 2: Respuesta eléctrica de diferentes tipos de termopares.

4. El diodo semiconductor como sensor de temperatura

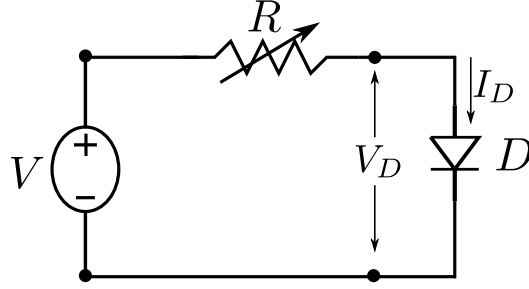


Figura 3: Diagrama del circuito empleado para medir la variación del voltaje en un diodo en función de la temperatura con I_D constante.

Cuando un diodo semiconductor está polarizado en el sentido de conducción la corriente I que circula a través de él en función de la diferencia de potencial está dada por la expresión:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{eV_0}{\kappa T}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{\kappa_B T}\right) - 1 \right] \approx I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V - V_0)}{\kappa_B T}\right) \right] \quad (8)$$

donde I_0 y V_0 son dos constantes (¿Qué representan?), κ_B es la constante de Boltzmann. La última expresión es válida cuando $e \cdot V \gg \kappa T$ (¿por qué?). En este último caso vemos que si I (la corriente que pasa por el diodo) es constante, V deberá ser proporcional a T , es decir:

$$V = V_0 - b \cdot T, \quad \text{si } I \text{ es constante} \quad (9)$$

Un modo de lograr esto ($I = \text{constante}$) es usar una fuente de corriente constante o simplemente, utilizar una fuente de voltaje y colocar una resistencia en serie varios órdenes mayor que la resistencia del diodo. En la Figura 3 se indica esquemáticamente el circuito que puede usarse. Una corriente entre 10^{-2} mA y 1 mA es adecuada.

4.1. El problema

Encuentre la relación existente entre la diferencia de potencial V en función de la temperatura para al menos dos valores de corriente constante. Obtenga los valores para V_0 y b en función de la corriente y discuta su significado físico.

5. Termómetro basado en un circuito integrado

Es posible encontrar en el mercado circuitos integrados que permiten medir la temperatura. En particular estos circuitos son adecuados para medir temperaturas cuando se usa un sistema de adquisición de datos conectado a un sistema de control. En general estos circuitos tienen tres terminales, dos para la alimentación (V_{CC} entre 5 y 15 V) y un terminal para el ajuste, como se ilustra en la figura 4. Típicamente producen una señal de salida lineal y calibrada. Por lo general producen entre 1 y 10 mV/K . Existen integrados con calibraciones para diversos sistemas de unidades de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, K). El rango usual de estos termómetros está típicamente entre los -10°C y 120°C .

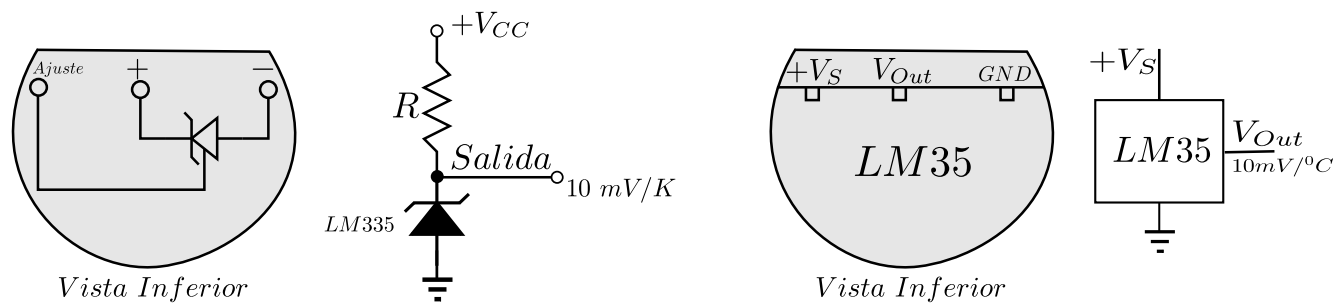


Figura 4: Sensores de temperatura integrados LM335 y LM34.

5.1. El problema

Grafique la diferencia de potencial de salida V del circuito LM335 ó LM35 en función de la temperatura y determine el coeficiente térmico del dispositivo y compárelo con el valor esperado. Verifique si la corriente permaneció constante durante todo el proceso de medición.