

## Objetivos

Estudiar las características básicas de diferentes termómetros y sensores de temperatura. Calibrar alguno de dichos sensores. Usar el termómetro calibrado en experimentos de transferencia de calor [1].

## Introducción

Cualitativamente, la temperatura está asociada a la sensación de frío y calor. Sin embargo, para poder definir operacionalmente este concepto es necesario disponer de alguna propiedad termométrica, es decir, una propiedad que varíe con la temperatura, para poder usar dicha propiedad para definir una escala de temperatura [2]. Luego, podemos definir la temperatura como aquella propiedad que miden los termómetros. El volumen de un líquido, la resistencia eléctrica de un conductor, la tensión eléctrica generada por un par termoeléctrico (termocupla), el voltaje de un diodo, etc., son ejemplos de propiedades termométricas.

En la actualidad existen numerosos tipos de termómetros o sensores de temperatura que pueden ser usados para diferentes aplicaciones. En la Tabla I se indican algunos tipos de termómetros usuales junto a algunas de sus características más notables. Una lista más completa puede encontrarse en la Ref. [3].

En los experimentos propuestos se busca estudiar y calibrar un termómetro o un sensor de temperatura respecto de un *termómetro de referencia* o *patrón*. Es una buena práctica disponer en el laboratorio de un termómetro que reúna las características de

exactitud y estabilidad (es decir, que dé valores reproducibles) para que pueda adoptarse como “patrón local de temperatura”. Supondremos que para estos experimentos se dispone de un termómetro patrón en el laboratorio. Un simple termómetro de mercurio bien calibrado puede servir de patrón para estos experimentos.

**Tabla 1.** Tipos de termómetros y sus características básicas.

| <b>Tipo de termómetro</b>  | <b>Rango Nominal<br/>[°C]</b> | <b>Costo</b> | <b>Linealidad</b> | <b>Características<br/>notables</b>        |
|--|-------------------------------|--------------|-------------------|--|
| <b>Termómetro de mercurio en vidrio</b>  | -10 a 300                     | Bajo         | Buena             | Simple, lento y de lectura manual          |
| <b>Termorresistencia (Pt, Ni)<br/>RTD (<i>Resistance Temperature Device</i>)</b> | -100 a 600                    | Medio        | Alta              | Exactitud                                  |
| <b>Termocupla</b>  | -150 a 1500                   | Bajo         | Alta              | Requiere referencia de temperatura         |
| <b>Termistor</b>   | -15 a 115                     | Medio        | No lineal         | Muy sensible                               |
| <b>Integrado lineal</b>  |                               | Medio        | Muy alta          | Fácil conexión a sistemas de toma de datos |
| <b>Termómetro de gas</b>   | -20 a 100                     | Medio        | Buena             | No muy versátil                            |
| <b>Diodos</b>  | -200 a 50                     | Bajo         | Alta              | Bajo costo                                 |

## Experimental

### A) Calibración del termómetro

Un termorresistor está construido con un material que presenta una variación significativa de su resistencia eléctrica con la temperatura. Entre los dispositivos de este tipo más usuales se encuentran los termorresistores de platino (Pt), que son alambres finos o películas delgadas encapsuladas en un material cerámico. Un termorresistor de Pt presenta adecuadamente dos de las características exigibles a un sensor: sensibilidad y especificidad. La sensibilidad se refiere al valor de la respuesta de su propiedad termométrica (la resistencia  $R$  en este caso) frente a cambios de la temperatura ( $T$ ), y se

mide con la derivada  $dR/dT$  ( $W/^\circ C$ ). La especificidad se refiere a que el sensor sea mucho más sensible a cambios de la temperatura que a cambios de otras magnitudes  $X_i$  que puedan afectarlo, es decir:  $dR/dT \gg dR/dX_i$ .

En el laboratorio se cuenta con termorresistores Pt-100 (esta denominación indica una resistencia de  $100 \Omega$  a  $0^\circ C$ ) asociados a electrónica adecuada, de manera que pueden ser leídos con un sistema de adquisición de datos por computadora. El sensor está alimentado con una corriente estable  $I$  y la variación de la resistencia se mide a través de la variación de la tensión,  $V = I R$  (ley de Ohm). De esta manera, con el sistema de toma de datos podemos registrar en tiempo real las variaciones de temperatura del entorno que estudiamos mediante mediciones de tensión eléctrica.

*Actividad:*

Obtener la curva de calibración de un termorresistor de Pt. Para esto, se debe colocar en un mismo baño térmico al termorresistor junto al termómetro calibrado que se usará como patrón (termómetro de mercurio). Representar gráficamente la tensión  $V$  de salida del termorresistor como función de la temperatura medida. Mediante un ajuste de los datos experimentales, obtener la curva  $T(V)$  de calibración del termorresistor. Definir la sensibilidad del sensor.

### **B) Constante de tiempo del termómetro**

Se desea estudiar la “constante de tiempo” del termorresistor ya calibrado. Para llevar a cabo este estudio se usarán dos recipientes, uno con agua fría y otro con agua caliente. Se debe sumergir el dispositivo en el agua fría (temperatura  $T_1$ ) y esperar que se estabilice su temperatura. Luego, retirar del agua y pasarlo al recipiente con agua caliente (temperatura  $T_2$ ). Medir  $T$  en función del tiempo hasta que el termómetro haya alcanzado una temperatura final de equilibrio. La constante de tiempo,  $\tau_1$ , puede definirse, por ejemplo, como el tiempo que tarda el termómetro en cambiar su temperatura desde su temperatura inicial  $T(t=0) = T_1$  hasta una temperatura  $T(t = \tau_1)$  tal que cumpla con  $T(t = \tau_1) - T_1 \approx 0.7 \times (T_2 - T_1)$ , es decir cuando el cambio de temperatura corresponde aproximadamente al 70% del cambio total de  $(T_2 - T_1)$ . Finalmente, analizar cualitativamente de qué factores puede depender el tiempo característico de un dado termómetro.

### C) Ley de enfriamiento de Newton

El enfriamiento del cuerpo corresponde a su tránsito hacia el *equilibrio térmico* con la masa de aire circundante. Si el enfriamiento se produce debido a la convección natural del aire en la superficie del cuerpo, el ritmo de transferencia de calor entre el termómetro y el aire se describe de la siguiente manera

$$\dot{Q} = hA(T - T_0) \quad (1)$$

donde  $h$  se conoce como el coeficiente de convección de la transferencia de calor,  $A$  es el área de contacto entre el cuerpo (a la temperatura  $T$ ) y el medio circundante (a  $T_0$ ).

Igualando la ecuación (1) al ritmo de pérdida del calor del cuerpo, dado por

$$\dot{Q} = -mc \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

donde  $m$  es la masa del cuerpo y  $c$  su calor específico, se obtiene una ecuación para describir el enfriamiento

$$mc \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_0) \quad (3)$$

La solución de esta ecuación diferencial, sujeta a las condiciones  $T(t = 0) = T_i$  (temperatura inicial del cuerpo) y  $T(t \rightarrow \infty) = T_0$ , es

$$T(t) = T_0 + (T_i - T_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (4)$$

que se conoce como *ley de enfriamiento de Newton*. El parámetro  $\tau_2$  es la *constante de tiempo del enfriamiento*, y es fácil demostrar que

$$\tau_2 = \frac{mc}{hA} \quad (5)$$

y depende de propiedades del cuerpo ( $m$ ,  $c$ ,  $A$ ) y del medio que lo contiene ( $h$ ).

### Actividades:

- 1) Recubrir el termómetro calibrado con papel de aluminio tratando de formar una pelotita compacta de unos 2 ó 3 cm de diámetro que quede bien anclada térmicamente al sensor. Calentar el cuerpo hasta unos 90 °C, y dejarlo que se enfríe naturalmente en contacto con el aire circundante. Durante el enfriamiento medir la temperatura en función del tiempo.
- 2) Representar gráficamente los datos experimentales en distintos gráficos:
  - $T$  en función de  $t$  (considere escalas lineales y semilogarítmicas),
  - $T - T_0$  en función de  $t$  (considere escalas lineales y semilogarítmicas),
  - $\frac{dT}{dt}$  en función de la temperatura.
- 3) Analizar si el enfriamiento del cuerpo estudiado puede ser descripto mediante la ley de enfriamiento de Newton.
- 4) Determinar el parámetro  $\tau_2$  usando las representaciones gráficas.
- 5) Si hay discrepancias entre el modelo propuesto y sus datos experimentales, analizar a qué factores pueden deberse [3].

### D) Opcional

La ecuación (5) predice que la constante de tiempo del enfriamiento ( $\tau_2$ ) depende del cociente entre la masa del cuerpo  $m$  y el área  $A$  del cuerpo expuesta al medio. Dado que la masa es directamente proporcional al volumen ( $m = \delta \times V$ , donde  $\delta$  es la densidad), también puede esperarse que  $\tau_2$  sea proporcional al cociente  $V/A$ . Puesto que tanto el volumen del cuerpo como el área pueden relacionarse con alguna dimensión característica  $R$  del cuerpo –por ejemplo, en el caso de una esfera,  $R$  es el radio; para un cubo  $R$  es la longitud de una arista–, resultan  $V \propto R^3$  y  $A \propto R^2$ , lo que implica que  $\tau_2 \propto R$ .

*Actividad:*

Analizar experimentalmente si estas reglas de escala explican razonablemente el enfriamiento de cuerpos del mismo material pero de diferentes tamaños que se enfrían en el mismo medio [1].

**Referencias**

[1] S. Gil y E. Rodríguez, *Física re-Creativa: Experimentos de Física usando nuevas tecnologías*, Prentice Hall, Buenos Aires (2001) ([www.fisicarecreativa.com](http://www.fisicarecreativa.com)) y referencias citadas.

[2] Para ver aspectos históricos del concepto de temperatura se puede consultar el sitio <http://www.unidata.ucar.edu/staff/blynds/acerca.html>.

[3] P. Childs, J. Greenwoods and C. Long, “Review of temperature measurements”, *Rev. Sc. Instrum.* **71**, 2959 (2000).