

# Termodinámica I: implementación de un sensor de temperatura con un termistor.

## Versión 2.0

Héctor Cruz Ramírez<sup>1</sup>  
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM  
<sup>1</sup>hector.cruz@ciencias.unam.mx

enero 2017

## Índice

<b>1. Resumen</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>3. Los <i>RTD</i></b>	<b>2</b>
3.1. Los <i>RTD</i> basados en conductores . . . . .	2
3.2. Los <i>RTD</i> basados en semiconductores . . . . .	3
<b>4. Caracterización del termistor</b>	<b>3</b>
<b>5. Métodos de medición</b>	<b>5</b>
5.1. Método por deflexión simple . . . . .	5
5.2. Método por un puente de Wheastone . . . . .	6
<b>6. Experimento</b>	<b>7</b>
6.1. Implementación de un termómetro con un <i>ARDUINO</i> . . . . .	7
<b>7. Pormenores de la práctica</b>	<b>7</b>
<b>8. Agradecimientos</b>	<b>8</b>



## A. Ley de enfriamiento de Newton

8

### 1. Resumen

El objetivo de esta práctica es implementar un sensor de temperatura con un termistor, además de ser una introducción a la instrumentación y teoría de circuitos. El primer paso es determinar las características físicas del transductor, después realizar la instrumentación (método de medición). La instrumentación es una parte fundamental en la formación del físico experimental. En concreto, los objetivos son

1. Determinación de los parámetros  $R_0$ ,  $T_0$  y  $\beta$ . Descritos más abajo.
2. Implementación de un sensor con un circuito simple y usando un *AR-DUINO*.
3. Probar el termómetro mediante la Ley de Enfriamiento de Newton.

### 2. Introducción

La instrumentación es la solución de varios problemas de medición, diagnósticos y control en la industria y laboratorios de investigación científica. La instrumentación comprenderá como primer punto el diseño un transductor (sensor o detector) [1, 2] que transforma una cantidad física (temperatura, presión, etc.) a una señal eléctrica. Un segundo punto es acondicionar esta señal eléctrica; por ejemplo, formar pulsos TTL o pulsos NIM. Como parte del acondicionamiento sería eliminar pulsos espurios mediante *discriminadores*. Un tercer punto posible comprendería la digitalización y multiplexión de las señales. El cuarto punto sería el procesamiento, análisis y control. Como ejemplos de este punto sería procesar señales mediante compuertas lógicas y contar pulsos eléctricos, etc. Un quinto punto sería la automatización de los instrumentos mediante protocolos de comunicación, como por ejemplo: USB, GPIB, RS232, puertos paralelos, internet, CAN y PXI. Por último, las señales procesadas y acondicionadas pueden utilizarse en actuadores que disparan otros procesos[2].

A continuación se describe la implementación de parte de los dicho anteriormente con un detector de temperatura resistivo (termistor).

### 3. Los *RTD*

Los detectores de temperatura que están basados en sistemas (como metales, aleaciones y semiconductores) que cambian su resistencia eléctrica al cambiar su temperatura se les denomina *RTD* por sus siglas en inglés *resistance temperature detector*.

#### 3.1. Los *RTD* basados en conductores

Los *RTD* basados en conductores pueden ser de los siguientes materiales: platino, níquel, cobre y tungsteno. Los cuales están caracterizados mediante el *coeficiente de temperatura de resistencia* ( $\alpha$ ), el cual cuantifica el cambio de la resistencia eléctrica del conductor por el cambio de un grado de temperatura a una temperatura específica.

Como primera aproximación la dependencia de la resistencia eléctrica (RE) con respecto a la temperatura es

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T), \quad (1)$$

donde  $R_0$  es la RE en  $0^\circ\text{C}$  (o alguna temperatura de referencia).

#### 3.2. Los *RTD* basados en semiconductores

Los termistores son *RTD* basados en semiconductores (silicio), donde el coeficiente de temperatura de resistencia es negativo (*NTC*, *negative temperature coefficient*), o positivo (*PTC*, *positive temperature coefficient*). Además, tienen una curva característica lineal tensión-corriente cuando la temperatura es constante.

La dependencia de la resistencia eléctrica con respecto a la temperatura es

$$R(T) = R_0 \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2)$$

donde  $R_0$  es la resistencia a la temperatura  $T_0$  ( $25^\circ\text{C}$ ), y  $\beta$  es la temperatura característica del material.

## 4. Caracterización del termistor

Primero sería medir el coeficiente  $\beta$ . Tomando la resistencia a dos temperaturas, pero este método tiene asociada un incertidumbre grande. Algunos fabricantes recomiendan utilizar la ecuación empírica de Steinhart-Hart, la cual es[3]

$$R(T) = \exp \left[ A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3} \right], \quad (3)$$

donde los coeficientes  $A$ ,  $B$  y  $C$  deben ser determinados por lo menos con cuatro puntos. Para implementar esta caracterización se puede realizar el siguiente procedimiento

1. *Calentar* algún material (agua o metal) hasta cierta temperatura. A su vez, se deberá poner en contacto térmico un termistor y un termopar (conectado a un multímetro).
2. Dejar *enfriar* el material. Este seguirá la **Ley de Enfriamiento de Newton**, ver Apéndice A. Cuando este bajando la temperatura se deberá registrar la temperatura del termopar,  $T_i$ , y la resistencia eléctrica del termistor,  $R_i$ , donde  $i$  indica la medición realizada.
3. Al final tendremos una serie de datos de la forma  $(T_i, R_i)$ , con  $i = 1, \dots, N$  y donde  $N$  es el número de datos. Realizar una regresión a la Ecuación (3) u otra más conveniente. Esta regresión se consigue minimizando [1] la suma,  $S$ , dada por

$$S = \sum_{i=1}^N (R(T_i) - R_i)^2 \quad (4)$$

Otra caracterización es la relación entre el voltaje de los bordes del termistor ( $V_t$ ) y la corriente que pasa por él ( $i_t$ ), ver Figura 1. La temperatura la mantenemos constante. La relación sirve para analizar el calentamiento del termistor. La curva resultante le llamaremos *curva característica*.

La curva característica que se tiene, ver Figura 2 obtenida de [2], se divide en tres regiones: zona termométrica, zona de transición y zona de alta corriente. En la primera zona tenemos que el efecto de autocalentamiento no es apreciable y la resistencia es la correspondiente a la temperatura ambiente

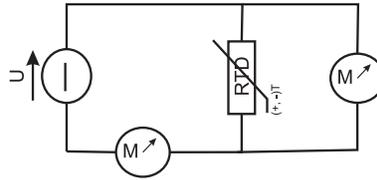


Figura 1: Circuito para obtener la relación entre corriente y voltaje

(corriente muy pequeña). La curva puede aproximarse a la expresión de una recta asintótica y puede utilizarse la Ecuación 2. La segunda zona, la curva característica presenta una ondulación y la resistencia dinámica es negativa, los circuitos para los cuales el termistor opera en esta zona son inestables y el autocalentamiento produce una realimentación térmica regenerativa. Esta zona es usada por los ingenieros como detectores de umbral. (arranque de motores, sistemas de control, encendido de lámparas). La última zona, el efecto dominante es el autocalentamiento.

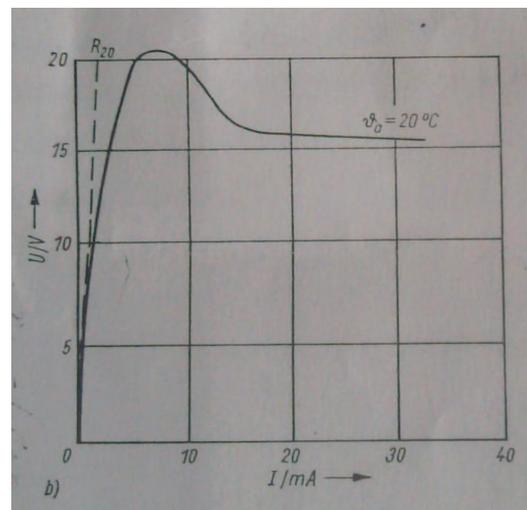


Figura 2: Curva característica de un termistor

## 5. Métodos de medición

El método para medir la temperatura con un *RTD* puede ser con los circuitos electrónicos: un potenciómetro, o por deflexión simple, o por un

punteo de Wheastone. En este trabajo utilizaremos el método por deflexión simple.

### 5.1. Método por deflexión simple

La implementación del método por deflexión simple es mediante el circuito mostrado en la Figura 3, donde  $R_1$  es una resistencia auxiliar, RTD es el termistor y  $U$  la fuente de voltaje constante.

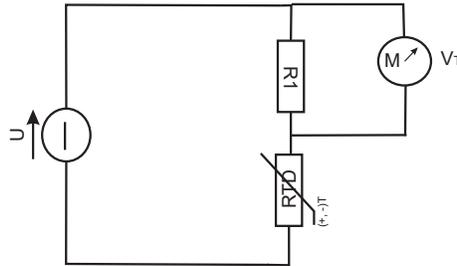


Figura 3: Circuito para implementar un sensor de temperatura con un termistor.

Del circuito de la Figura (5) se sigue la siguiente ecuación

$$\begin{aligned}
 V_T &= U - R_1 I \\
 &= \left( \exp \left[ A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3} \right] \right) \cdot I,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

donde  $I$  es la corriente que pasa por el circuito. Con la información anterior se debe elegir el punto de implementación del termómetro, el cual, debe cumplir dos cosas: 1. se debe trabajar en la zona termométrica, y 2. el voltaje  $V_T$  no debe pasar de  $|\pm 2,5V|$ .

### 5.2. Método por un puente de Wheastone

Utilizaremos un termistor conectado con la configuración de dos hilos o tres hilos. El circuito de dos hilos se muestra en la Figura 4 donde el termistor se conecta al puente de Wheastone mediante dos cables (A y B), que llamaremos brazos. Existen dos problemas: los cables A y B al elevarse su

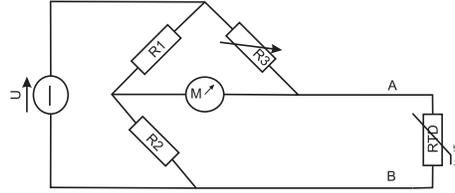


Figura 4: Arreglo de dos hilos

temperatura cambian también su resistencia, y si son muy largos aumentan la resistencia eléctrica del circuito.

En este caso tenemos (sin considerar los brazos A y B)

$$V_T = \frac{U R_3}{R_3 + R_T} - \frac{U R_1}{R_1 + R_2}. \quad (6)$$

En condición de equilibrio

$$\frac{R_3}{R_3 + R_T} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (7)$$

de donde

$$R_3 R_2 = R_1 R_T. \quad (8)$$

Finalmente

$$R_T = \frac{R_3 R_2}{R_1} \quad (9)$$

## 6. Experimento

El primer paso es instalar el *software* necesario para controlar el *AR-DUINO* con *LabVIEW* o la tarjeta de adquisición de datos. El segundo paso es obtener el comportamiento de la resistencia eléctrica con la temperatura. El alumno puede utilizar un medio en el que pueda cambiar la temperatura lentamente y con ayuda de un segundo termómetro registrar la temperatura de este, por ejemplo un termopar conectado a un multímetro. Ver Figura (5). Poner en contacto térmico el termistor y el medio. Ajustar los datos experimentales a la Ecuación (2) o la Ecuación (3). El tercer paso es la implementación usando el circuito eléctrico de la Figura (3). En el circuito se

observan dos elementos importantes: la fuente de voltaje constante y medir la caída de potencial de la resistencia auxiliar. Si se utiliza el *ARDUINO*, este suministra ambos. Si se utiliza la tarjeta de adquisición se datos se debe utilizar una fuente de voltaje constante independiente y la misma tarjeta mide la caída de potencial de la resistencia auxiliar. El cuarto paso es comprobar es sensor mediante la comprobación de la Ley de Enfriamiento de Newton, ver Apéndice A.



Figura 5: Fotografía donde se muestra un termómetro de mercurio y un termopar conectado con un multímetro.

### 6.1. Implementación de un termómetro con un *ARDUINO*

La implementación del sensor de temperatura es la misma que se encuentra en las notas: Labview II: *ARDUINOS* con *LabVIEW* (Sensores)

## 7. Pormenores de la práctica

Cantidad de sesiones en el laboratorio: 3 sesiones.

## 8. Agradecimientos

Estas notas fueron realizadas con el apoyo de los proyectos PAPIME PE106415 (version 1) y PAPIME PE105917 (version 2). También, agradecemos a los estudiantes Jorge Arturo Monroy Ruz y Francisco Javier Morelos Medina por su contribución a la preparación de estas notas.

### A. Ley de enfriamiento de Newton

La ley de *enfriamiento de Newton* determina el cambio de la temperatura con respecto al tiempo de un sistema en estudio, y que es directamente proporcional a la diferencia de temperatura del sistema menos la temperatura de sus alrededores, esto es[4]

$$\frac{dT}{dt} = k(T_A - T), \quad (10)$$

donde  $T_A$  es la temperatura de los alrededores y  $k$  es factor de proporcionalidad. Por termodinámica clásica sabemos que entre el sistema de estudio y sus alrededores hay una transferencia de calor (caracterizado por un coeficiente  $h$ ) a través de la *pared diatérmica* que los separa[5]; y sea  $A$  es el area efectiva de contacto entre el sistema y sus alrededores. Si el sistema tiene una masa  $m$  y un calor específico  $c_p$ , entonces, en un intervalo de tiempo  $dt$  el cambio de temperatura  $dT$  esta dado por (pag. 68 de [5])

$$hA(T_A - T)dt = c_p m dT. \quad (11)$$

Si definimos

$$\tau = \frac{c_p m}{hA}, \quad (12)$$

como el tiempo de respuesta característico del sistema. Por lo cual,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau}(T_A - T). \quad (13)$$

Si consideramos  $c_p$  constante, entonces

$$T(t) = T_A - (T_A - T_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (14)$$



## Referencias

- [1] W. R. Leo, "Techniques for nuclear and particle physics experiments," Springer-Verlag, 1994.
- [2] H. Pfeifer, "Prácticas avanzadas de electrónica," Ed. Alfaomega y Ed. Prial, 1988.
- [3] Ver por ejemplo la pagina <http://www.thermistor.com/> de Quality Thermistor, inc (Qti).
- [4] J. H. Lienhard IV y J. H. Lienhard V, "A heat transfer textbook," Phlogiston press, 2008.
- [5] L. García-Colín, "Introducción a la termodinámica clásica," Trillas, 1995.