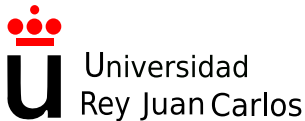


## 6. Sensores de temperatura y humedad

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores

23 de noviembre de 2021



(CC) Julio Vega

*Este trabajo se entrega bajo licencia **CC BY-NC-SA**.  
Usted es libre de (a) compartir: copiar y redistribuir el material en  
cualquier medio o formato; y (b) adaptar: remezclar, transformar  
y crear a partir del material. El licenciador no puede revocar estas  
libertades mientras cumpla con los términos de la licencia.*

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Termistor
- 3 Termopar o termocupla
- 4 Sensor de temperatura resistivo (RTD)
- 5 Sensor de temperatura basado en diodos semiconductores
- 6 Pirómetro: medidor de temperatura a distancia
- 7 Sensor de humedad

- Definiciones de temperatura:
  - Energía calorífica que indica la intensidad de calor de un objeto.
  - Medida promedio de la energía cinética de las partículas de la materia.
  - Energía asociada a los movimientos de las moléculas del sistema.
- Escala de  $T.^a$ : relación continua entre la propiedad termométrica...
  - ...de una sustancia específica y la temperatura.
    - E.g.: agua contenida en tubo  $\rightarrow$  prop. term. = presión del vapor.
  - Estándares: Fahrenheit, Celsius, Kelvin, Rankine.
- Las propiedades físicas de los cuerpos suelen variar con temperatura.
  - E.g.: densidad, solubilidad, dureza, elasticidad, área, volumen.
  - Dispositivos que sensan  $T.^a$  aprovechan material del que están hecho.
    - E.g.: radiación emitida, cambio resistividad o volumen del material.
- Categorías de transductores que convierten  $E.^a$  térmica en otro tipo:
  - Termómetros: de líquido (alcohol y mercurio) en vidrio y bimetalico.
  - Sistemas termales: líquidos orgánicos, vapor orgánico, gas y mercurio.
  - Termoeléctr.: termistor, termopar, bulbo de resist. eléct. y pirómetro.
    - Relacionan variación de  $E.^a$  térmica con variación  $\propto$  señal eléctrica.
    - Basados en propiedades eléctricas de conductores y semiconductores.

- NTC vs. PTC: Coeficiente de Temperatura Negativo vs. Positivo.
- Resistencia hecha con semiconductor sensitivo a variaciones de  $T.^a$ .
- Varía su valor resistivo según los cambios de la energía térmica.
- Semiconductor NTC, si  $\uparrow T.^a \implies \downarrow Res_{electr.}$  (inversa metal puro).
  - Los de coeficiente de  $T.^a$  positivo (PTC) actúan = metales.

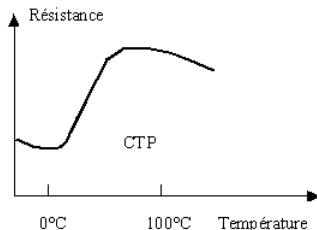
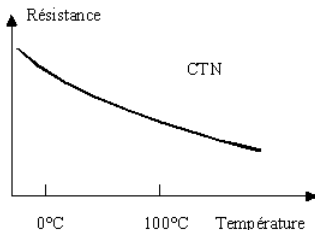


Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- La función que relaciona la  $R$  con la  $T$  en los NTC es exponencial:

$$R_{NTC} = R_0 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

donde:

$R_{NTC}$  : resistencia del termistor NTC a  $T = T$  en Kelvin [ $\Omega$ ]

$T_0$  : temperatura de referencia [ $K$ ], normal/ 298K(25°C)

$R_0$  : resistencia de referencia;  $R_{NTC}$  a  $T = T_0$  [ $\Omega$ ]

$\beta$  : constante de la NTC, según composición y fabricación [ $\Omega$ ]

$T$  : temperatura que se está intentando medir [ $K$ ]

- Debido a que la circulación de corriente calienta el dispositivo.
  - Esto conlleva un error de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  en rango  $[0 - 50]^{\circ}\text{C}$ .
  - A partir de A, los efectos del autocalentamiento son más evidentes.
  - Con  $I \downarrow \downarrow$  (antes de A)  $\approx$  Ley de Ohm:  $R$  no varía;  $V \propto I$ .

$$P_{NTC} = \delta_d (T - T_{amb}) \quad (2)$$

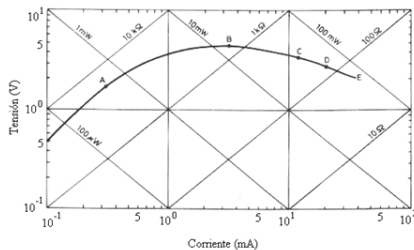
donde:

$P_{NTC}$  : potencia consumida por termistor NTC [W]

$T$  : temperatura de trabajo [K]

$T_{amb}$  : temperatura ambiente [K]

$\delta_d$  : cte. disipación de calor  $\left[\frac{\text{W}}{\text{K}}\right]$  dada por fabricante (para el aire).



- Configuraciones comunes en circuitos electrónicos:
  - Medidor de corriente.
  - Regulador de tensión.
  - Control de temperatura.
- Ventajas:
  - Rápido.
  - Alta sensibilidad.
  - Implementación fácil.
  - Bajo coste.
- Desventajas:
  - No lineal.
  - Rango de temperaturas limitado.
  - Requiere fuente de corriente.
  - Autocalentamiento.



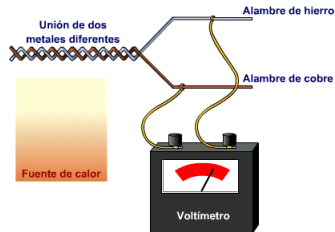
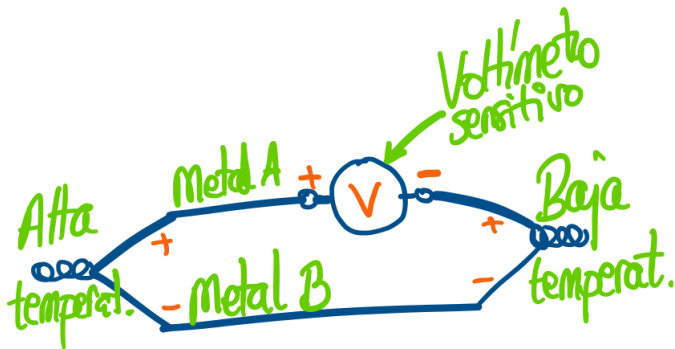


Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- Es uno de los dispositivos más usados en la industria para medir  $T.^a$ .
- Está formado por dos conductores; uno hace de  $+$  y otro de  $-$ .
- Fenómeno Thomas Seebeck. Con estas condiciones se genera  $I$ :
  - Dos conductores metálicos con propiedades  $\neq$ , enrollados en bucles.
  - Bajo una fuente de calor, las  $T.^a$ s de estos bucles serán  $\neq$ .
- Fenómeno Seebeck se basa en otros dos fenómenos de la física:
  - Peltier: se absorbe/libera calor al circular  $I$  por la unión de dos...
    - ...metales distintos, pues  $\exists$  desbalance de energía de los  $e^-$  libres.
  - Thomson: se absorbe/libera calor al circular  $I$  por metal homogéneo...
    - ...sometido a gradiente de  $T.^a$ .



- Si se abre circuito  $\Rightarrow \exists$  fuerza termoelectromotriz:  $e_{AB} = \alpha T$ .
  - Esta fuerza depende del tipo de conductores y de  $\Delta T (A - B)$ .
  - $\alpha$  = coef. Seebeck =  $\Delta V$  producido por  $\Delta T_{AB}$  ( $\Rightarrow$  F.E.M. [V/mV]).
- En cada bucle,  $\Delta T$  genera dos  $V$  ( $V_A$ ,  $V_B$ ) con polaridades opuestas.
  - Así,  $V_{Bucle}$  necesaria para conducir corriente es:  $V_{Bucle} = |V_A - V_B|$ .

- Ley de circuito homogéneo (LCH):
  - En circuito con un conductor metálico homogéneo no se puede...
    - ...percibir una corriente eléctrica por el efecto único de la  $T$ .<sup>a</sup>.
- Ley de los metales intermedios:
  - Si en circuito formado por varios conductores  $T = cte.$   $\implies \sum_e = 0$ .
- Ley de las temperaturas sucesivas:
  - En circuito con tres conductores  $(A, B, C)$ :  $e_{AC} = e_{AB} + e_{BC}$ .

- Para leer correcta/  $V_{Seebeck}$  no se hace directa/ sobre termopar.
  - Al conectar voltímetro, cables crean una nueva unión termoeléctrica.
    - E.g.: termopar cobre-constantán y cables voltímetro también de cobre:
    - a) Se tendrá una unión cobre-cobre  $\Rightarrow \nexists e$  (según LCH).
    - b) Otra unión cobre-constantán con  $V$  no deseado  $\Rightarrow$  error lectura.
  - Solución: saber  $V$  generado por unión de termopar a  $T.^a$  conocida.
    - E.g.: a  $0^{\circ}\text{C}$  (inmerso en agua con hielo), esta será unión de referencia.
- Según el uso,  $\exists$  diversas combinaciones o tipos de calibraciones:
  - T: cobre (+) y constantán (aleación 60 % cobre + 40 % níquel) (-).
    - Rango de operación:  $0^{\circ} - 350^{\circ}\text{C}$  ( $> 350^{\circ}\text{C}$  Cu oxida). Cu y Ni baratos.
  - J: Fe (+) y constantán (-). Rango  $< 700^{\circ}\text{C}$  ( $> 700^{\circ}\text{C}$  Fe oxida). Barato.
  - K: 90 % Ni + 10 % Cr (+) y 94 % Ni + 2 % Al + 3 % Mn + 1 % Si (-).
    - Rango  $< 1200^{\circ}\text{C}$ . Muy usado en industria de fundición. Coste elevado.
  - R: aleación 87 % platino + 13 % sodio (+) y alambre de platino (-).
    - Rango  $< 1500^{\circ}\text{C}$ . Muy usado en la industria. El + caro, por platino.

- Ventajas:
  - Implementación simple y fácil.
  - Bajo coste.
  - Amplio rango de temperaturas.
- Desventajas:
  - No lineal.
  - Bajo voltaje.
  - Requiere referencia.
  - Baja estabilidad.
  - Baja sensibilidad.

- Opera = termistor coeficiente  $T.^a$  positivo = metales:  $\uparrow T \implies \uparrow R$ .
- Función que relación la resistencia del RTD y la  $T.^a$ :

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (3)$$

donde:

$R_0$  : resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$  [ $\Omega$ ]

$\Delta T$  : desviación de temperatura respecto a  $T_0$  ( $\Delta T = T - T_0$ ) [ $\Omega$ ]

$\alpha$  : coeficiente de temperatura del conductor a  $0^\circ C$

- Tipos de fabricación: de bobina o alambre y de película delgada.
- Materiales: platino (Pt), níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno.
  - El + usado: Pt, por su estabilidad, exactitud y amplio rango de  $T$ .<sup>a</sup>.
    - E.g.: sensor Pt100 o Pt1000 presentan  $R = 100\Omega$  o  $R = 1000\Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ .
  - Dvtja.: Pt tiene  $\downarrow$  resistividad  $\Rightarrow$  necesaria bobina-Pt para  $\uparrow R$ .
    - Hace que su precio, volumen y masa sea  $>$  termopar y termistor.

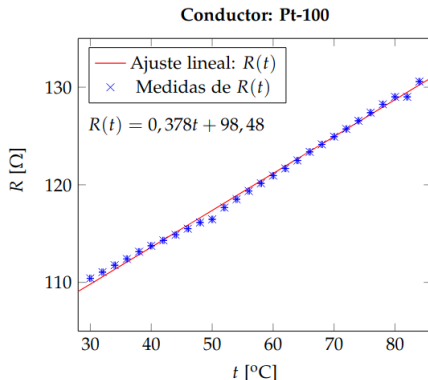


Figura: Imagen extraída del artículo *Variación de la resistencia de un conductor y un semiconductor con la temperatura*, J. Estévez

- Ventajas:
  - Alta estabilidad.
  - Alta precisión.
- Desventajas:
  - Coste elevado.
  - Lento.
  - Requiere fuente de corriente.
  - Poco cambio en la resistencia.
  - Medida con puente (4 conductores).

[Ej.: Configuración del sensor RTD como circuito puente Wheatstone]



- Es aplicación más simple de las uniones semiconductoras en sensores.
  - T.4: *fotodiodo<sub>directa</sub>* ( $P-V^+$  y  $N-V^-$ ) = diodo común (unión  $PN$ ).
  - Uso diodo: dejar fluir corriente en un solo sentido, cuya respuesta es:

$$I = I_S \left( e^{(V_D/nV_T)} - 1 \right) \quad (4)$$

donde:

- $I$  : intensidad de la corriente que atraviesa el diodo [ $A$ ]  
 $V_D$  : diferencia de tensión entre sus extremos [ $V$ ]  
 $I_S$  : corriente de saturación ( $\approx 10^{-12} A$ )  
 $n$  : coeficiente de emisión según fabricación (rango  $[1 - 2]$ )  
 $V_T$  : voltaje térmico ( $\approx 25,85 mV$  a  $T.^a$  ambiente ( $20^\circ C$ ))  
 $V_T = \frac{kT}{q}$  :  $k$  = cte. Boltzmann;  $T = T.^a$  unión  $PN$ ;  $q$  = carga de  $e^-$ .

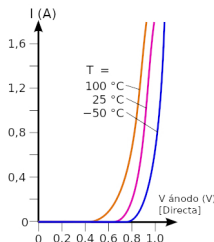


Figura: Imagen modificada de original extraída de Wikipedia

- Diodo presenta gran variación de curva  $V - I$  por gradiente de  $T$ .<sup>a</sup>
  - Por tanto, sirve para medir  $T$ .<sup>a</sup>. Necesario hacer buena calibración.
- En directa tiene un coef.  $T$ .<sup>a</sup>  $\approx 2,3mV/^{\circ}C$ , y variación  $\simeq$  lineal.
  - Por tanto, se debe mantener corriente básica de excitación estable.
    - Para ello, usar *fuentes*<sub>I</sub> cte. o  $R$  conectada a *fuentes*<sub>V</sub> estable.
- Corolario: al usar un diodo, podemos tomar en consideración que...
  - ...los cambios de  $T$ .<sup>a</sup> pueden representarse como variaciones de  $V$ .

- LM35 de Texas Instruments.

- Precisión =  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  en rango =  $[-55, +150]^{\circ}\text{C}$ .
- Salida lineal  $\approx 10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .
- Opera con rango entre 4 – 30V de alimentación.
- Bajo autocalentamiento.

- TMP36 de Analog Devices.

- Precisión =  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  en rango  $[-40, +125]^{\circ}\text{C}$ .
  - Alta precisión: la precisión indicada es ¡sin ser calibrado!
- Salida lineal similar al anterior.
- Bajo voltaje: opera con rango entre 2,7 – 5,5V de alimentación.

- Usa visión para detectar variaciones del ancho banda de radiación...
  - ...emitida por algún objeto sólido bajo la acción de la temperatura.
- Cada color incandescente tiene asociado una temperatura.
  - Rango de temperatura de objeto detectable =  $[700, 1300]^{\circ}\text{C}$ .
- Compara radiación filamento ( $f$ , lámpara) de referencia vs. obj. ( $o$ ).
  - Fig.:  $T_f < T_o \parallel T_f = T_o \parallel T_f > T_o$ .



Figura: Imagen extraída de Wikimedia Commons

- Tiene lente de fluoruro de calcio que concentra radiación de objeto.
- Se envía radiación a *termopila* (cjto. termopares en serie).
- Su funcionamiento se basa en la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (5)$$

donde:

$E$  : energía emitida por la superficie de un cuerpo negro [ $W/m^2$ ]

$T_e$  : temperatura efectiva o temperatura absoluta de la superficie [ $K$ ]

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ )

- La humedad =  $n.^{\circ}$  moléculas de agua [ $H_2O$ ] presentes en sustancia.
  - Su magnitud es  $\propto n.^{\circ}$  [ $H_2O$ ] absorbidas en tal sustancia.
  - E.g. en atmósfera, se refiere a  $n.^{\circ}$  [ $H_2O$ ] (vapor) en aire.
- Este sensor se basa en capacidad absorción de algunos materiales...
  - ...y que altera sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- H. absoluta  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ : relación entre  $n.^{\circ}$  [ $H_2O$ ] en sustancia y volumen.
  - Cambios  $T.^a \rightarrow$  cambios densidad sustancia  $\rightarrow$  cambios humedad.
    - E.g. aire:  $\downarrow T.^a \Rightarrow$  condensación vapor  $\Rightarrow \uparrow$  h. abs.
- H. relativa (%): relación entre  $n.^{\circ}[H_2O]$  en gas y  $n.^{\circ}[H_2O]$  que este...
  - ...contendría en estado de saturación sin producirse condensación.
    - Por tanto, cuando humedad real = máx. posible  $\Rightarrow$  h. rel. = 100 %.
- H. específica: relación entre masa de agua y masa de sustancia seca.
  - E.g. para el aire = masa vapor de agua (kg.) / masa aire seco (kg.).



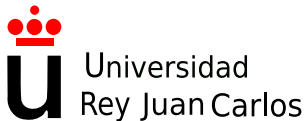
Figura: Imagen extraída de Mouser

- Formado por dos electrodos que determinan la humedad en sustancia.
- Al inicio el circuito está abierto, los electrodos no están conectados.
- Al insertarlos en sustancia, esta hace de  $R$  que los une eléctrica/.
- Corriente que pasa por electrodos depende de humedad de sustancia.
  - $\uparrow$  humedad  $\implies \uparrow$  conductividad  $\implies \uparrow$  flujo de corriente.
- Puede incluir potenciómetro para calibrar humedad de referencia.
  - El estado digital de su salida es bajo si  $h.$  detectada =  $h.$  referencia.

## 6. Sensores de temperatura y humedad

Julio Vega

[julio.vega@urjc.es](mailto:julio.vega@urjc.es)



Sensores y actuadores

23 de noviembre de 2021